



HAL
open science

Étude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone

Antoine Poutord

► **To cite this version:**

Antoine Poutord. Étude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2014. Français. NNT : 2014ENAM0149 . tel-01148708

HAL Id: tel-01148708

<https://pastel.hal.science/tel-01148708>

Submitted on 5 May 2015

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.

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie mécanique – Procédés de fabrication "

présentée et soutenue publiquement par

Antoine POUTORD

le 15 décembre 2014

ETUDE DU PERÇAGE A SEC DE L'EMPILAGE

Ti6Al4V/COMPOSITE FIBRE DE CARBONE

Directeur de thèse : **Gérard POULACHON**
Co-encadrement de la thèse : **Frédéric ROSSI**

Jury

M. Joël RECH, Professeur, LTDS, ENISE
M. Benoit FURET, Professeur, IRCCyN, Université de Nantes
M. Redouane ZITOUNE, Maître de Conférences HDR, IUT GMP, Université Paul Sabatier, Toulouse
M. Guillaume ABRIVARD, Docteur, Airbus Group Innovations
M. Gérard POULACHON, Professeur, LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech Cluny
M. Frédéric ROSSI, Maître de Conférences, LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech Cluny
M. Rachid M'SAOUBI, Docteur, SECO Tools Suède

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité

T
H
È
S
E

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce à une collaboration entre le Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés (LaBoMaP) et les entreprises SECO Tools et EADS. La région Bourgogne et l'association Institut Carnot ont également été sollicités dans le cadre de cette étude.

Je tiens à remercier en premier lieu Mr Joël RECH, Professeur au LTDS de L'ENISE (Saint Etienne), pour avoir présidé le jury de thèse. Je tiens ensuite à exprimer ma profonde gratitude à Mr Benoît FURET, Professeur à L'IRCCyN (Nantes), et Mr Redouane ZITOUNE, Maître de Conférences à l'Université Paul Sabatier (Toulouse) pour avoir accepté d'être mes rapporteurs de thèse et avoir lu méticuleusement ce mémoire.

Je souhaite ensuite remercier mes encadrants, Mr Gérard POULACHON et Mr Frédéric ROSSI pour leur suivi tout le long de cette thèse.

Mes remerciements vont également à mes contacts industriels dans le cadre de cette étude, Mr Didier DAGUET et Mr Rachid M'SAOUBI de SECO Tools qui ont pu apporter à la fois leur soutien, leur savoir faire et leur expertise dans le domaine de l'usinage des matériaux aéronautiques, mais également à Mr Guillaume ABRIVARD de EADS qui a pu fournir la matière première nécessaire à l'étude ainsi que les directions d'études souhaitées.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de l'équipe Usinage des Arts et Métiers de Cluny, ainsi que de l'association ARTS de Cluny :

Rémi PORCHERAY, pour l'ensemble des informations et conseils pour le perçage d'empilages qui m'auront été d'une très grande aide.

Romain BLENDEN, Gilles DETROYAT, Gilles DELHOMME, Eric POLSINELLI, les techniciens de l'équipe Usinage, pour leur très bonne connaissance des machines, de l'usinage, et leur envie de partager toutes leurs connaissances, mais également le partage du café lors des pauses.

Mr Guillaume FROMENTIN, pour l'aide apportée sur machine, notamment pour comprendre le code contenu dans AMC3 et me permettre d'apporter les modifications nécessaires à l'étude

Mr Laurent LABOUREAU, Mr Jean-Philippe COSTES, Mr José OUTEIRO, enseignants et enseignants – chercheurs de l'équipe usinage.

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel de Arts pour leur soutien et leur sympathie.

Je tiens également à remercier les élèves que j'ai pu encadrer dans le cadre de projets de fin d'étude et qui auront contribué aux recherches présentées dans ce mémoire, il s'agit de Mr Benjamin ROUX et Mr Christophe RAMIREZ. Je tiens également à remercier Mr Thomas BAIZEAU que je n'ai pas encadré, mais dont les recherches connexes ont permis des échanges riches.

Je tiens à remercier l'ensemble des doctorants que j'ai pu croiser lors de cette étude, ils auront chacun à leur manière contribué à l'avancée de ces recherches. Je pense tout particulièrement à Mickaël RANCIC avec qui il aura été possible d'échanger sur nos sujets respectifs – a des heures plus ou moins tardives du jour et de la nuit – et de faire avancer un bon nombre de problèmes auquel nous étions confrontés. Je pense également à Sébastien CAMPOCASSO, Simon HANNOUZ, Dimitri GERMAIN, Jaouher SELMI, Théo DORLIN, Thomas BAIZEAU, Christophe RAMIREZ, Lamice DENGIR.

Je tiens enfin à remercier l'ensemble des personnes avec qui j'aurai pu échanger et qui auront pu me soutenir, chacun à leur manière durant cette thèse, qu'ils soient de la famille ou des amis.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 13 |
| 1 - Contexte et objectifs de l'étude | 13 |
| 2 - Démarche de l'étude | 15 |
| Partie 1 - Bibliographie | 17 |
| Chapitre 1 - Usinage du Ti6Al4V | 19 |
| 1 - Matériau | 19 |
| 2 - Usinage du titane Ti6Al4V | 27 |
| Chapitre 2 - Usinage du composite à fibres de carbone (CFRP)..... | 47 |
| 1 - Matériau | 47 |
| 2 - Perçage des matériaux composites..... | 51 |
| Chapitre 3 - Perçage d'empilages | 65 |
| 1 - Introduction..... | 65 |
| 2 - Problématiques liées au perçage des empilages..... | 66 |

| | |
|---|-----|
| Partie 2 - Protocoles expérimentaux..... | 73 |
| Chapitre 4 - Méthodologie des essais..... | 75 |
| 1 - Introduction..... | 75 |
| 2 - Matières premières et outils | 75 |
| 3 - Machines-outils..... | 76 |
| 4 - Moyens de mesure | 77 |
| 5 - Traitement des données..... | 80 |
| Chapitre 5 - Essais préliminaires..... | 83 |
| 1 - Qualification des outils | 83 |
| 2 - Evolutions de la réponse du capteur rotatif en fonction du temps et des vitesses de rotation et de translation..... | 90 |
| 3 - Couple Outil Matière (COM) en continu..... | 93 |
| Chapitre 6 - Mesures des températures en perçage | 105 |
| 1 - Introduction..... | 105 |
| 2 - Problématique | 108 |
| 3 - Mesure des températures en perçage sur tour | 110 |
| 4 - Développement d'un dispositif de mesure des températures pour outil tournant | 112 |
| 5 - Mesure des températures lors de la coupe de fils thermocouples | 130 |
| 6 - Conclusions..... | 135 |
| Chapitre 7 - Décomposition d'arête (méthodologie et validation)..... | 137 |
| 1 - Introduction..... | 137 |
| 2 - Méthodologies de décomposition d'arête | 139 |
| 3 - Comparaison des diverses méthodologies | 154 |
| 4 - Programme interfacé et options | 156 |

| | |
|---|-----|
| Partie 3 - Perçage du Ti6Al4V et du CFRP | 161 |
| Chapitre 8 - Etude du perçage du Ti6Al4V | 163 |
| 1 - Répartition des efforts le long de l'arête en fonction des conditions de coupe..... | 163 |
| 2 - Evolutions liées à l'usure lors du perçage de Ti6Al4V | 169 |
| 3 - Etude de la température du foret dans le Ti6Al4V | 172 |
| Chapitre 9 - Etude du perçage du CFRP | 175 |
| 1 - Répartition des efforts le long de l'arête en fonction des conditions de coupe..... | 175 |
| 2 - Evolution l'usure..... | 181 |
| 3 - Etude de la température de l'outil dans le CFRP | 188 |
| 4 - Conclusion | 192 |
| Partie 4 - Empilage..... | 195 |
| Chapitre 10 - Etude du perçage de l'alternance des matériaux | 197 |
| 1 - Définition des essais | 197 |
| 2 - Evolution des efforts avec l'usure | 198 |
| 3 - Etude de l'usure de l'outil..... | 200 |
| 4 - Etude de la qualité des trous | 204 |
| 5 - Conclusions..... | 207 |
| Chapitre 11 - Etude du perçage de l'empilage Ti6Al4V/CFRP | 209 |
| 1 - Définition des essais | 209 |
| 2 - Etude des efforts lors du perçage de l'empilage | 212 |
| 3 - Etude de l'usure de l'outil..... | 216 |
| 4 - Etude de la qualité des trous | 220 |
| 5 - Conclusion | 222 |

| | |
|--|-----|
| Chapitre 12 - Etude du perçage de l'empilage CFRP/Ti6Al4V | 225 |
| 1 - Définition des essais | 225 |
| 2 - Etude du perçage dans les conditions de l'empilage..... | 228 |
| 3 - Etude de la température dans l'outil | 232 |
| 4 - Etude de l'usure de l'outil..... | 235 |
| 5 - Etude de la qualité des trous | 238 |
| 6 - Conclusions..... | 239 |
| Partie 5 - Conclusions générales et perspectives..... | 241 |
| Partie 6 - Références bibliographiques..... | 245 |
| Partie 7 – Annexes..... | 255 |
| Annexe 1 Méthodologie de calibration de la platine Kistler 9121 de tournage pour la mesure des couples..... | 256 |
| Annexe 2 Tableau des essais pour le COM dans le Ti6Al4V..... | 259 |
| Annexe 3 Tableau des essais pour le COM dans le CFRP | 260 |
| Annexe 4 Essais de validation du COM dans le Ti6Al4V..... | 261 |
| Annexe 5 Calculs de l'effet Doppler | 262 |
| Annexe 6 Méthode de mesure à l'aide de coupe de fils thermocouples Confidentiel (dépôt de brevet en cours) | 264 |
| Annexe 7 Décomposition de la pointe sur tour, essais à l'aide de forets monodent..... | 266 |
| Annexe 8 Essais réalisés dans le Ti6Al4V pour le CAM | 267 |
| Annexe 9 Analyse EDX du foret après avoir usiné de l'IMA M21E | 268 |
| Annexe 10 Essais de perçages à l'aide d'outils en PCD monoblocs | 269 |
| 1 - Foret avant usinage | 269 |
| 2 - Perçage du CFRP | 269 |
| 3 - Perçage du Ti6Al4V | 270 |
| 4 - Conclusion | 271 |

| | | |
|--|--|-----|
| Annexe 11 | Essais de perçages à l'aide d'outils en PCD monoblocs modifiés (V2)..... | 272 |
| 1 - Foret avant usinage | | 272 |
| 2 - Perçage du CFRP | | 273 |
| 3 - Perçage du Ti6Al4V | | 273 |
| 4 - Conclusion | | 274 |
| Annexe 12 | Essais de tribologie | 275 |
| 1 - Contexte..... | | 275 |
| 2 - Etude du perçage à l'aide d'outils carbures dans le Ti6Al4V..... | | 275 |
| 3 - Etude en tournage à l'aide d'outils carbure et PCD..... | | 277 |
| 4 - Déroulement des essais de tribologie..... | | 277 |
| 5 - Plan des essais de tribologie | | 280 |
| 6 - Résultats..... | | 281 |
| Annexe 13 | Résultats de tomographie | 282 |
| Annexe 14 | Présentation de thèse du 15/12/2014..... | 283 |

INTRODUCTION GENERALE

1 - CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les secteurs aéronautique et aérospatial sont toujours à la recherche de matériaux plus performants afin d'alléger les structures ; c'est pourquoi les composites et les alliages de titane prennent une part de plus en plus importante dans les avions. Ces matériaux étant utilisés pour des pièces de structure, leur maintien est assuré par un rivetage ou un boulonnage. Ces systèmes de maintien en position nécessitent la réalisation d'un très grand nombre de trous, de l'ordre de 750 000 à 1 500 000 perçages par avion. La complexité du perçage d'empilage conduit parfois à devoir le décomposer en plusieurs opérations. Ce séquençage augmente le coût global, que ce soit de par la multiplicité des perçages, par la précision accrue du positionnement des trous sur les divers éléments ou par les temps de manipulation des pièces. Dans le cas où les perçages s'effectuent sous lubrifiant, il faut en outre laver les pièces indépendamment les unes des autres.

Pour faire face à ces problématiques, il serait souhaitable de pouvoir réaliser les perçages d'empilages en une unique opération, si possible à sec pour éviter de devoir dissocier les éléments percés afin de retirer le lubrifiant qui a pu s'insérer entre les plaques.

Des verrous technologiques et scientifiques rendent cette opération complexe, que cette thèse propose d'étudier.

Dans la présente étude, il sera choisi de ne travailler que sur machine-outil (fraiseuse ou tour à commande numérique). Si ce moyen de production ne correspond pas réellement à ceux employés dans la majorité des perçages réalisés dans l'industrie aéronautique, il permet néanmoins de s'affranchir d'un certain nombre de variables liées à l'emploi d'UPA pneumatiques (manque de rigidité, imprécision des paramètres de coupe, lien entre la vitesse de coupe et d'avance liée...). Par ailleurs, sur proposition du partenaire industriel EADS, cette étude ne concernera que des perçages « one shot » — c'est-à-dire réalisés en une seule opération — sans forets étagés, sans oscillations ou débouffages et sans lubrifiants (ni air pulsé). Les matériaux, fournis par le partenaire industriel, seront issus d'un unique lot de Ti6Al4V pour l'alliage de titane et d'IMA M21E pour le composite à fibres de carbone.

Deux partenaires industriels auront contribué à cette thèse : EADS et SECO Tools. Le financement de l'étude aura été assuré, pour la partie salaire, par un appel à projet Carnot ainsi qu'un apport de SECO Tools. La partie fonctionnement du financement aura pour sa part été assurée par le montage d'un contrat d'étude entre EADS et la Région Bourgogne.

2 - DEMARCHE DE L'ETUDE

Les travaux de thèse sont présentés suivant deux axes distincts : le premier correspond aux développements mis en place au cours de cette recherche ; le second met en avant les essais et les analyses réalisés dans les diverses configurations envisagées.

La **première partie** de ce mémoire exposera un état de l'art des différentes thématiques nécessaires à la compréhension des phénomènes survenant durant l'opération de perçage multi-matériaux. Tout d'abord, le chapitre 1 présentera les phénomènes survenant lors de l'usinage des alliages de titane, et plus précisément de Ti6Al4V. Le chapitre 2 reprend les mêmes thématiques en se focalisant sur l'usinage de matériaux composites, principalement à fibres de carbone. Le chapitre 3 s'intéressera quant à lui aux phénomènes relevés durant le perçage d'empilages de matériaux métalliques (alliages d'aluminium et/ou de titane) avec des matériaux composites.

La **seconde partie** traitera des protocoles expérimentaux mis en œuvre dans le cadre des travaux de thèse, ainsi que de leurs spécificités. Le chapitre 4 exposera les moyens matériels employés durant la thèse, alors que le chapitre 5 présentera les études préliminaires, notamment les essais de qualification d'outils ou la détermination des conditions opératoires. Le chapitre 6 sera consacré aux moyens de mesure de température in-situ développés et employés au cours de la thèse, alors que le chapitre 7 analysera les dispositifs développés pour décomposer les efforts le long de l'arête du foret.

La **troisième partie** sera consacrée au perçage des matériaux pris indépendamment, avec le même outil bien entendu, le chapitre 8 se focalisant sur le perçage du Ti6Al4V et le chapitre 9 sur le composite à fibre de carbone IMA M21E.

Enfin la **quatrième partie** sera consacrée aux perçages d'empilages. Le chapitre 10 constituera une approche de l'empilage en considérant le perçage de l'alternance des matériaux. Le chapitre 11 se focalisera sur les travaux réalisés dans le cadre du perçage de l'empilage Ti6Al4V/IMA M21E alors que le chapitre 12 sera consacré à l'empilage dans le sens inverse.

Partie 1 - BIBLIOGRAPHIE

Dans cette première partie est exposé l'état de l'art du perçage du Ti6Al4V (Chapitre 1), puis celui des composites à fibres de carbone (Chapitre 2). On s'intéressera ensuite aux spécificités propres au perçage des empilages (Chapitre 3)

Chapitre 1 - USINAGE DU Ti6Al4V

1 - MATERIAU

L'élément titane est le dixième élément le plus abondant de la croûte terrestre (après l'azote, l'oxygène, le silicium, l'aluminium, le fer, le magnésium, le calcium, le sodium et le potassium). Cependant il n'a été découvert qu'en 1791 par le prêtre britannique William Gregor, puis en 1925 que Van Arkel et De Boer réussissent à produire du titane d'excellente pureté (>99.95 %). La métallurgie extractive de ce métal étant complexe, ce n'est que vers 1940 que W. Kroll a proposé des solutions exploitables industriellement. La généralisation de ce procédé au niveau industriel a permis le démarrage de l'industrie du titane vers 1950.

1 - 1 - COMPOSITION DU Ti6Al4V

Parmi les alliages de titane, le Ti6Al4V est parmi les plus employés. La composition de cet alliage est reportée dans le Tableau 1. Les éléments d'addition principaux sont l'aluminium et le vanadium, leur proportion modifie de manière importante la proportion des phases dans l'alliage. Les autres éléments, présents en moindre quantité modifient de manière importante les propriétés physiques de l'alliage.

| | Al | V | Fe | O | C | H | N | Y | Ti |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|--------|---------|
| Min | 5.50 | 3.50 | 0.30 | 0.14 | 0.08 | 0.01 | 0.03 | 50 ppm | Balance |
| Max | 6.75 | 4.50 | | 0.23 | | | | | |

Tableau 1 : Composition de l'alliage de titane Ti6Al4V en % massique [Ezugwu_2005b]

1 - 2 - MICROSTRUCTURE DU TITANE

Le titane existe sous deux formes cristallographiques, comme cela est visible sur la Figure 1. A température ambiante, le titane (non allié) se présente sous une structure hexagonale compacte nommée phase α . A une température de 883°C, le titane subit une transformation allotropique et forme la phase β ayant une structure cubique centrée [Destefani_2000] Cette température est nommée température de transus β .

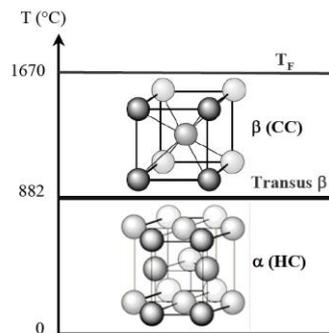


Figure 1 : Structures cristallographiques du titane

La température de transformation $\alpha \rightarrow \beta$ est fortement dépendante des éléments d'alliage (de substitution ou d'insertion) comme cela est indiqué dans le Tableau 2. Ainsi les éléments favorisant la présence de la phase α sont dit alphagènes. Tandis que ceux qui favorisent la phase β (en abaissant la température de transus β) sont classés comme des éléments bêtagènes, une dernière catégorie est dite neutre car elle n'influe que très peu sur la température de transus β .

| Éléments d'alliage | Diagramme d'équilibre | Solution solide d'insertion | Solution solide de substitution |
|--------------------|---|--|---|
| Alphagènes | <p>Diagramme d'équilibre pour les éléments alphagènes. L'axe vertical est la température et l'axe horizontal est la composition X (% masse). On observe des courbes de solubilité linéaires. Les zones de coexistence sont étiquetées alpha+beta et alpha+beta+gamma. La température 882°C est indiquée sur l'axe vertical.</p> | O ₂ , N ₂ , B, C | Al |
| isomorphes | <p>Diagramme d'équilibre pour les éléments isomorphes. L'axe vertical est la température et l'axe horizontal est la composition X (% masse). On observe des courbes de solubilité courbes. Les zones de coexistence sont étiquetées alpha+beta et alpha+beta+gamma. La température 882°C est indiquée sur l'axe vertical.</p> | | Mo, V, Nb, Ta |
| Bêtagènes | <p>Diagramme d'équilibre pour les éléments bêtagènes. L'axe vertical est la température et l'axe horizontal est la composition X (% masse). On observe des courbes de solubilité en V. Les zones de coexistence sont étiquetées alpha+beta, alpha+TLX et beta+TLX. La température 882°C est indiquée sur l'axe vertical.</p> | H ₂ | Mn, Fe, Cr, Co, W, Ni, Cu, Au, Ag, Si |
| Neutres | <p>Diagramme d'équilibre pour les éléments neutres. L'axe vertical est la température et l'axe horizontal est la composition X (% masse). On observe des courbes de solubilité courbes. Les zones de coexistence sont étiquetées alpha+beta et alpha+beta+gamma. La température 882°C est indiquée sur l'axe vertical.</p> | | Sn, Zr |

Tableau 2 : Classification des éléments d'alliage du titane [Gélas_1976]

La Figure 2 présente de manière plus précise les diagrammes de phase du titane pour les deux éléments les plus présents dans le Ti6Al4V.

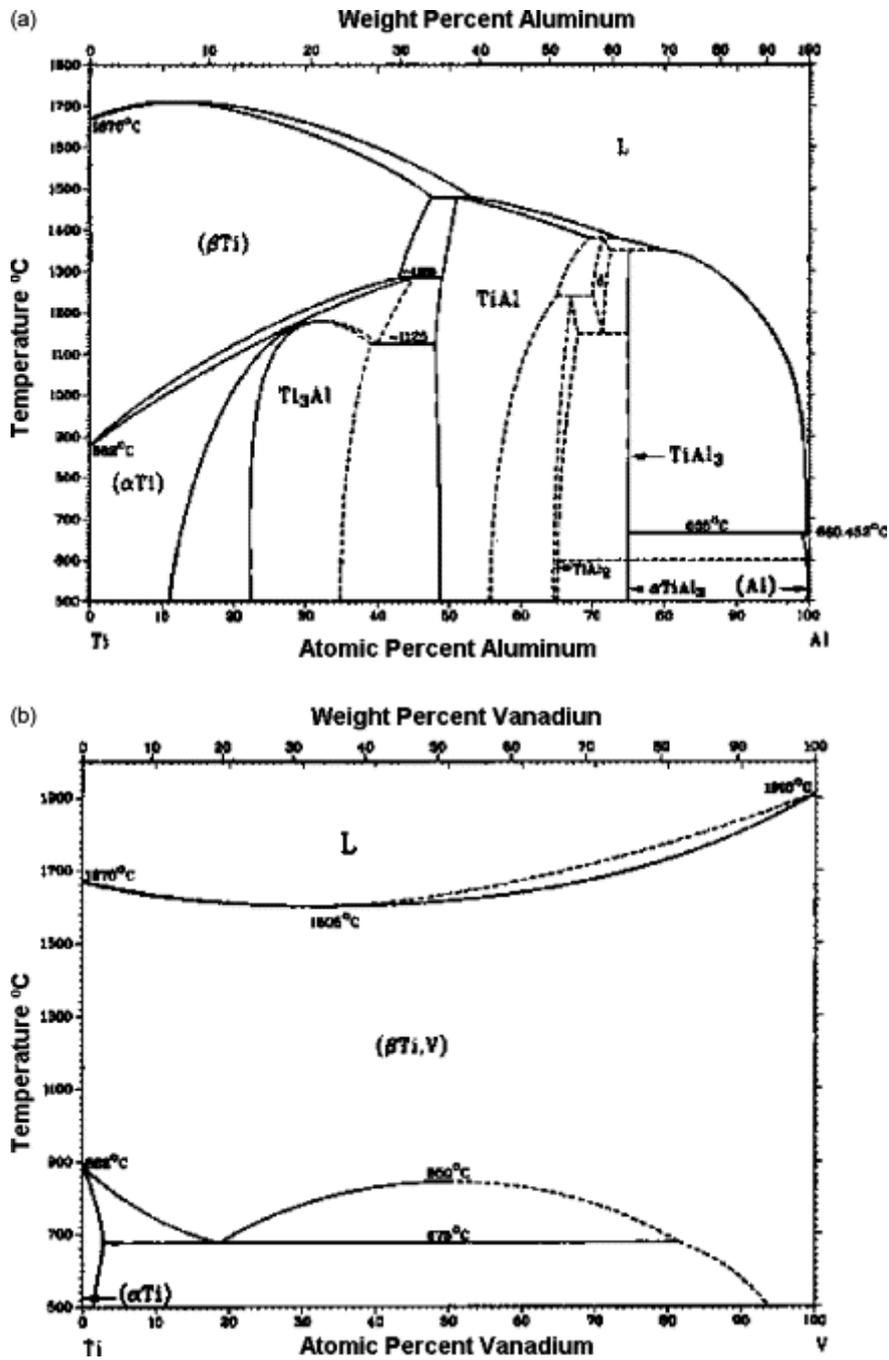


Figure 2 : Diagrammes de phase pour le couple Ti/Al et Ti/V [Ribeiro_2003]

Ainsi les alliages de titane se classent dans trois grandes familles en fonction de la plus ou moins grande quantité à température ambiante de chacune des deux phases : [Ezugwu_2003]

- Les alliages α , constitués de 100 % de la phase α ;
- Les alliages β , constitués de 100 % de la phase β à température ambiante ;
- Les alliages $\alpha+\beta$ constitués des deux phases à la fois à température ambiante, cette catégorie, très vaste, est subdivisée en trois parties :
 - les quasi α (très peu de phase β à température ambiante, proche des alliages α)
 - les $\alpha+\beta$
 - les quasi β , ou β métastables (contenant très peu de phase α à température ambiante, proche des alliages β).

La morphologie d'un alliage de type α ou $\alpha+\beta$ est en partie fonction de la vitesse de refroidissement, ainsi, une chute rapide de la température dans le matériau conduit à la formation d'une structure aiguillée fine, et lorsque cette vitesse de refroidissement augmente, des aiguilles de plus en plus grosses se forment, puis des lamelles. Si un traitement thermomécanique est réalisé, il est possible de briser ces lamelles pour obtenir une structure équiaxe. [Combres_1999]

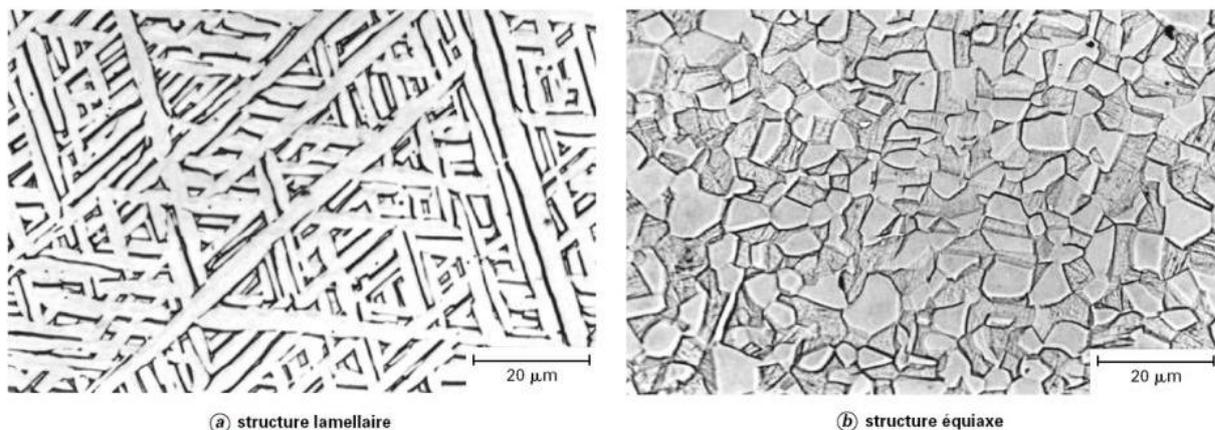


Figure 3 : Morphologies du titane Ti6Al4V [Combres_1999]

Le titane employé dans le cadre de cette étude est un titane $\alpha+\beta$ avec une microstructure en forme d'aiguilles, dite Ti6Al4V β .

1 - 3 - PROPRIETES

Le Tableau 3 résume les principales caractéristiques physiques de l'alliage de titane Ti6Al4V sous la forme α - β recuit à 700-785°C.

| Propriétés | Symbole | Valeur | Unité |
|---|---------------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Masse volumique | ρ | 4 430 | Kg.m ⁻³ |
| Module d'Young | E | 113.8 | GPa |
| Coefficient de Poisson | ν | 0.342 | |
| Limite élastique à 0.2 % | $\sigma_{e 0.2 \%}$ | 880 | MPa |
| Résistance à la rupture | σ_m | 950 | MPa |
| Allongement | A % | 14 % | |
| Conductivité thermique | λ | 6.7 | W.m ⁻¹ .°C ⁻¹ |
| Capacité thermique massique | φ | 526.3 | J.Kg ⁻¹ .°C ⁻¹ |
| Coefficient de dilatation linéique à 20/250/500°C | λ | 8.6 / 9.2 / 9.7 | $\mu\text{m.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ |
| Ténacité | | 75 | MPa.m ^{0.5} |
| Température de fusion | T | 1660 | °C |
| Température de transus beta | T _{β} | 980 | °C |

Tableau 3 : Propriétés physiques de l'alliage de Ti6Al4V α - β recuit à 700-785°C [Lampman_1990]

Avec une masse volumique d'environ 40 % plus faible que l'acier et une limite élastique à 880 MPa qui est très proche de sa résistance à la rupture, son rapport résistance mécanique/densité est très intéressant. Ses caractéristiques mécaniques restent élevées jusqu'à environ 600°C comme le montre la Figure 4.

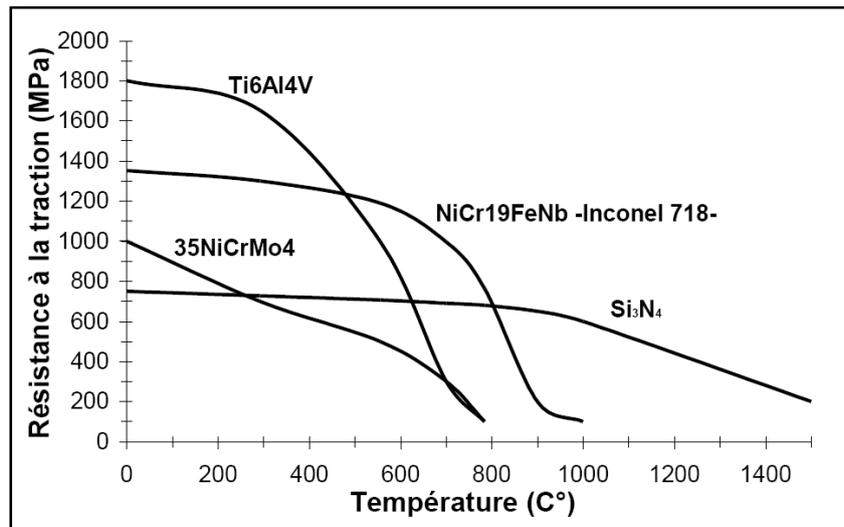


Figure 4 : Evolution de la résistance mécanique en fonction de la température [Malot_2001]

La valeur modérée du module d'Young par rapport aux aciers permet d'associer le titane à d'autres éléments non métalliques tels que les os ou les composites. Ainsi le titane est très employé dans le domaine médical pour sa biocompatibilité.

Les alliages de titane sont de plus très résistants à la corrosion, il se forme à sa surface une très mince couche d'oxyde de titane (TiO₂) imperméable qui protège la pièce de l'oxydation.

Sa ténacité (résistance à la propagation de fissures) est intéressante pour des applications sensibles.

1 - 4 - DOMAINES D'EMPLOI

Un domaine employant de plus en plus le titane est le secteur aéronautique et aérospatial. Dans ces applications, le rapport résistance/poids est un facteur primordial, qu'il convient de maximiser. Les alliages de titane offrent d'excellentes performances pour cela, et même à des températures moyennes. Ainsi dans la fabrication des avions, les alliages de titane se retrouvent dans les parties froides des réacteurs et dans les éléments de structure. Dans les parties structurales, des empilages sont communément employés [Ezugwu_2003, 1997 ; Zhang_2008].

L'industrie chimique est un secteur d'activité où le titane est employé, il est notamment employé dans des tubes et réservoirs où la résistance à la corrosion et à l'abrasion sont des éléments clefs pour garantir une durée de vie des installations.

L'industrie militaire emploie elle aussi les alliages de titane pour de nombreuses applications, principalement pour le blindage (il est plus léger que l'acier, et a une résistance à la corrosion et au feu le rendant sans équivalent en termes de performances). Il est également employé pour ses caractéristiques amagnétiques pour les coques de sous-marins, permettant de les rendre indétectables à certains types de capteurs.

De parts ces propriétés, le titane fait partie des huit matières premières indispensables tant en temps de paix qu'en temps de guerre.

2 - USINAGE DU TITANE TI6AL4V

Parmi les alliages de titane, le Ti6Al4V est de loin le plus répandu, son usinage est par conséquent une opération qui est étudiée depuis les années 1980. Néanmoins cette opération reste complexe et n'est pas toujours totalement contrôlée. Lorsque l'optimisation de l'usinage de cet alliage est réalisée en perçage, les phénomènes sont plus complexes à qualifier et quantifier de par l'aspect clos de l'opération qui rends difficile toute observation (et qui complexifie l'usinage, notamment en concentrant la chaleur, les contraintes et en rendant l'évacuation de copeaux plus complexes). A cela s'ajoute le fait que l'âme ne coupe pas réellement la matière ($V_c \approx 0$).

2 - 1 - OUTILS DE COUPE

La définition de l'outil de coupe passe par le paramétrage géométrique du foret, un choix de cette géométrie et la sélection du matériau usinant.

2 - 1 - 1 - PARAMETRAGE DU FORET

Un foret est un outil ayant une géométrie particulièrement complexe. Un paramétrage est défini dans la norme NF E 66-502 présentées sur les Figure 5 et 6.

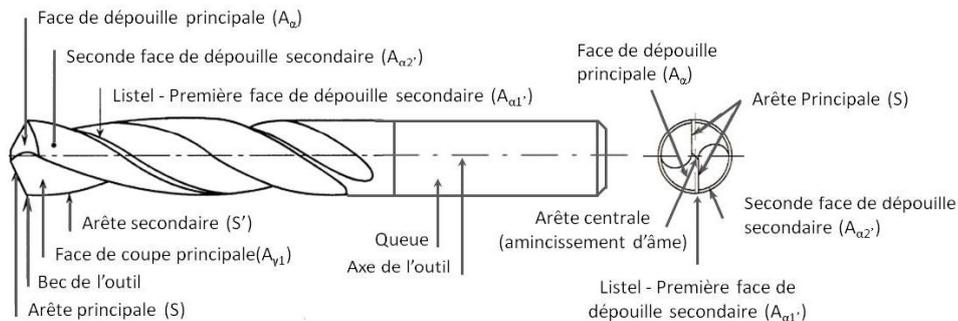


Figure 5 : Géométrie globale d'un foret selon la norme NF E 66-502

La Figure 6 permet de définir les plans et les angles dans le cas des forets standards. Néanmoins la norme n'indique pas précisément comment définir des géométries spéciales telles que des forets ayant des arêtes curvilignes, ou un amincissement d'âme comme nous pouvons le voir sur la Figure 7.

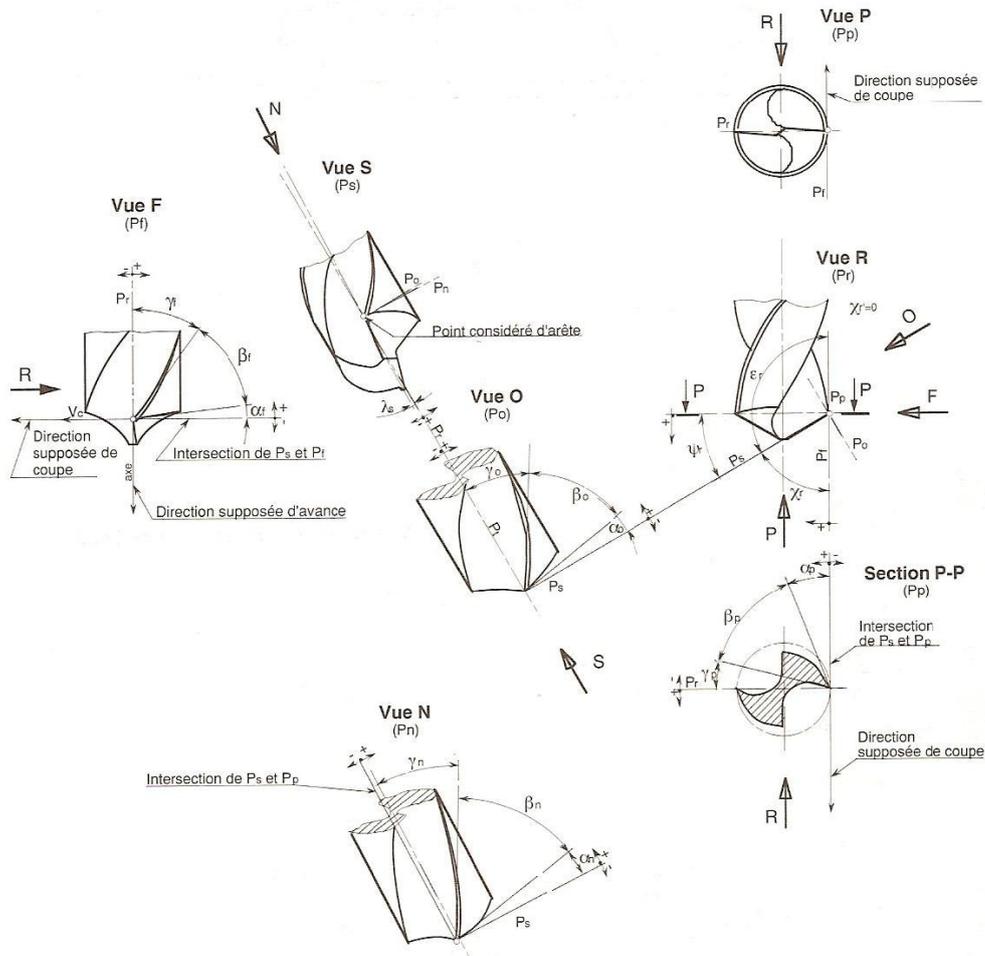


Figure 6 : Paramétrage de la géométrie du foret selon la norme NF E 66-502

2 - 1 - 2 - PRECONISATIONS SUR LA GEOMETRIE DU FORET

Les fabricants d'outils et la littérature fournissent de nombreuses recommandations concernant la géométrie de forets dédiés au perçage de titane [Zhang_2008].

Ainsi une bonne acuité d'arête permet la réduction du phénomène d'arête rapportée et améliore la qualité de la surface usinée. Pour réduire l'usure en dépouille, un angle de dépouille (α_r) de 10° est proposé, permettant également de limiter l'échauffement du au frottement. Un angle de coupe positif est souvent préférable afin de faciliter l'écoulement du copeau (surtout dans le cas de perçage où l'on est dans un milieu confiné) et permet de former une couche d'adhésion de la matière sur la face de coupe [Calamaz_2008b]. Dans le cas d'un angle de coupe nul ou négatif, cette couche ne peut pas se former. Dans le cas d'un angle de coupe trop important (supérieur à 30°), les risques de rupture d'arête sont augmentés dangereusement.

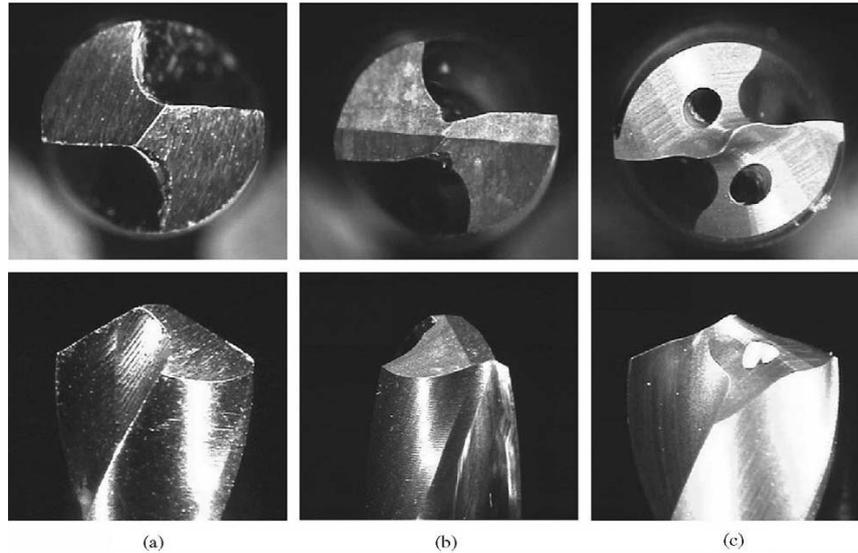


Figure 7 : Amincissements d'âme du foret (a) sans amincissement (b) affûtage 2 pentes (c) affûtage profil en « s » [Li_2007a]

Dans le cas spécifique des forets, l'angle de coupe plus faible au niveau de l'âme est compensé par un amincissement, réduisant l'effort de pénétration. Sur la Figure 7, Li [Li_2007a] a mis en évidence que le foret avec un amincissement multi-pente(c), ou profil en « s », est préférable. La durée de vie des forets avec de telles géométries est plus importante que pour des forets similaires ne présentant pas cet affûtage spécial. Un angle de pointe de 130-135° et une conicité arrière de 0.24 % (au lieu de 118° d'angle de pointe pour les forets classiques et une conicité arrière de 0.12 % préconisée pour les aciers) sont préférés pour le perçage des alliages de titane. Les listels sont plus fins sur ces outils, ce qui permet de limiter le frottement de cette partie du foret sur les parois du trou [Cantero_2005].

2 - 1 - 3 - PRECONISATION SUR LE MATERIAU USINANT

L'outil devant usiner le Ti6Al4V doit avoir certaines propriétés mécaniques et chimiques pour permettre de travailler ce matériau aux propriétés élevées.

Le substrat du foret devra avoir une bonne tenue mécanique car les sollicitations sont importantes lors de la formation du copeau. Il conviendra de choisir un matériau qui soit à la fois tenace, rigide, dur, résistant à l'usure et à la fatigue. De plus une bonne conductivité thermique permettra de minimiser les gradients de température dans l'outil [Ezugwu_1997 ; Yang_1999].

La Figure 8 montre les duretés à chaud des différents substrats servant habituellement en usinage ; sachant que la température d'outil en usinage est supérieure à 500°C.

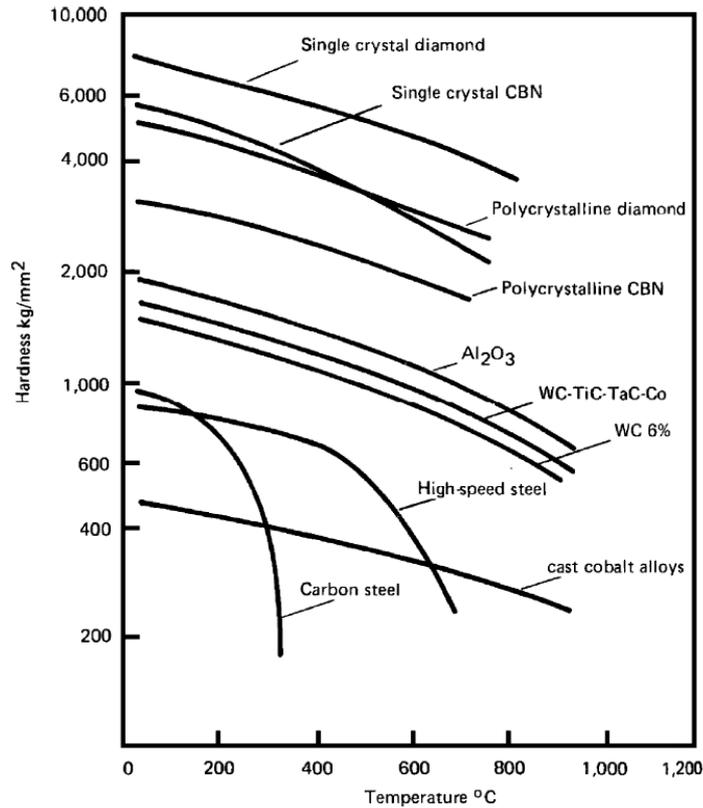


Figure 8 : Micro-dureté Knoop à chaud de divers substrats [Almond_1981 ; Ezugwu_2003]

2 - 1 - 3 - 1 - Aciers rapides

La Figure 8 montre que les aciers rapides ont des propriétés mécaniques qui chutent dès 600°C, ils sont souvent considérés comme non recommandés pour l'usinage des alliages de titane [Ezugwu_2003, 1997].

2 - 1 - 3 - 2 - Carbures

Les substrats en carbure de tungstène avec liant cobalt (WC/Co) ont remplacé les aciers rapides car leurs performances sont très supérieures. Les nuances de carbure les plus aptes à usiner du titane sont de type K avec 6 à 10 % de Cobalt (6 % dans le cas de revêtements ou pour la finition et 10 % dans les autres cas). Dans certains cas, les outils carbure ont tendance à favoriser la formation d'une couche de TiC en réagissant avec le titane, ce qui dégrade progressivement les propriétés de l'outil en l'appauvrissant en carbone.

Les outils carbure font donc partie des outils très fortement recommandés pour usiner les alliages de titane [Armendia_2010 ; Arrazola_2009 ; Cantero_2005 ; Ezugwu_1997, 2005a, 2005b ; Rahim_2008].

2 - 1 - 3 - 3 - Céramiques

Les matériaux céramiques sont particulièrement durs et conservent leurs propriétés, même à haute température (Figure 8). Deux types de céramiques sont principalement présents sur le marché pour les outils : à base d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) ou à base de nitrure de silicium (Si_3N_4) [Ezugwu_2003].

Les céramiques ont apporté une amélioration importante pour l'usinage de la plupart des alliages aéronautiques difficiles à usiner, notamment les alliages base nickel. Ce type de substrat n'a pas remplacé pour autant les autres matériaux d'outil. En effet ces types d'outils ont de faibles conductivité thermique (augmentant la température en pointe d'outil) ainsi qu'une forte réactivité chimique avec le titane et une fragilité élevée [Ezugwu_1997]. Les céramiques ne sont donc pas recommandées pour l'usinage des alliages de titane.

2 - 1 - 3 - 4 - Diamant

Le diamant monocristallin est employé en usinage pour ses caractéristiques de dureté très élevées. Pour des raisons de coûts, de ténacité et de difficulté de mise en forme, celui-ci est de synthèse dans la majorité des cas. Les outils diamant se divisent donc en deux catégories, les MCD sont les diamants monocristallins alors que les PCD sont des diamants poly-cristallins, ils sont obtenus à partir de cristaux de diamants très fins qui sont agglomérés par frittage sous des pressions et températures élevées. Ils se présentent sous forme de plaquettes à braser ou directement sous la forme d'outils. Les outils PCD ont une dureté moins élevée, mais qui reste tout de même importante au vu des autres matériaux usinant (7500 HK, dureté Knoop, pour le MCD et 5000 HK pour le PCD). La conductivité thermique est excellente $560 W.m^{-1}.K^{-1}$. Ces outils ne sont néanmoins pas adaptés pour l'usinage à grande vitesse car les températures élevées générées par les opérations dégradent le diamant. La plupart des études porte sur les outils PCD, en effet, ils sont plus simples à mettre en œuvre et moins coûteux que les outils MCD, ce qui peut les rendre plus rentables d'un point de vue industriel. Les outils PCD ont pour avantage d'avoir des durées de vie bien plus élevées que les outils carbure dans le titane, néanmoins leur cout (environ sept fois plus élevé que celui d'outils carbure) ne les rendent pas toujours économiquement viables.

Les outils diamants PCD font donc partie des types d'outils qui peuvent se révéler très intéressant pour l'usinage du titane [Ezugwu_1997, 2003, 2005a].

2 - 1 - 3 - 5 - Nitrure de bore cubique (C-BN)

Ces matériaux de très grande dureté se présentent sous la forme d'inserts à braser. Les performances de ces outils dans le titane sont discutées, d'après Ezugwu [Ezugwu_1997, 2005a]. La durée de vie de ces outils est inférieure à celle des outils carbure (sous lubrification conventionnelle et sous lubrification haute pression). Ce point a été confirmé quelques années plus tard lors d'opérations de tournage [Ezugwu_2005b]. Ce matériau, si il permet d'usiner les alliages de titane, ne semble pas le plus adapté pour l'opération de perçage.

2 - 1 - 3 - 6 - Revêtements

L'emploi de revêtement sur les outils de coupe est intéressante car ils permettent de limiter l'adhésion du copeau et facilite donc son écoulement. Les revêtements sont généralement durs et servent également à assurer une protection contre l'usure, qu'elle soit par abrasion ou par diffusion.

Ezugwu et al. [Ezugwu_1997] ont noté que parmi les revêtements testés (TiC, TiCN, TiN-TiC, Al₂O₃-TiC, TiN-Ti(C,N)-TiC, Al₂O₃, TiB₂), tous s'arrachent rapidement sous les contraintes de coupe des alliages de titane. Diverses autres études montrent qu'il est souvent préférable d'employer des outils carbure non revêtus aux outils revêtus [Ezugwu_2005a].

2 - 2 - MECANISMES DE COUPE DANS LE TITANE

Lors de l'usinage, le contact entre la partie active de l'outil et la matière usinée génère des phénomènes mécaniques et thermiques nombreux et très extrêmes. Cette zone est le lieu de déformations plastiques importantes et de frottements intenses aux zones de contact outil-matière. Si ces zones de transformations intenses et rapides de la matière ont été étudiées, il reste de nombreuses zones d'ombre dans la compréhension de ces phénomènes.

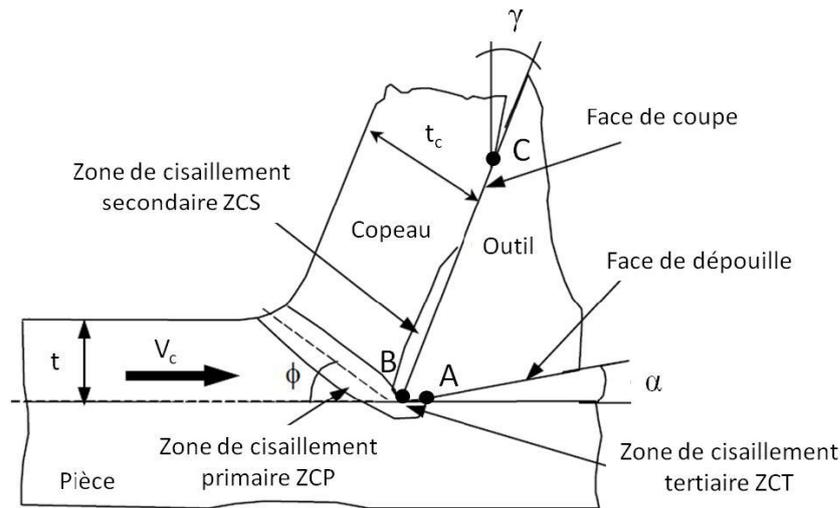


Figure 9 : Mécanismes de formation du copeau

Nous pouvons remarquer la présence de trois zones de cisaillement sur la Figure 9.

La zone de cisaillement primaire est le siège de grandes déformations (rapport supérieur à 1) à très grande vitesse (environ 10^{-5} s). La vitesse de ce phénomène empêche tout échange thermique avec le milieu extérieur, cette zone subit donc un échauffement important qu'il est difficile à estimer. Certaines simulations numériques tentent de calculer cette température dans le copeau, les distributions de températures seraient de l'ordre de 500-600°C d'après Calamaz [Calamaz_2008a].

La zone de cisaillement secondaire est à l'interface copeau/face de coupe, les pressions de contact et les phénomènes d'adhésion du copeau entraînent une déformation plastique importante dans une fine épaisseur, provoquant un échauffement de l'outil sur sa face de coupe. La très faible longueur de contact outil/copeau dans le cas du titane (environ 1/3 plus faible que dans les aciers [Che-Haron_2001]) génère des gradients de température très importants dans l'outil. D'après Ezugwu et al. [Ezugwu_1997] une grande proportion des calories générées lors de l'usinage sont évacuées par l'outil. Ces données ont été confirmées dans la thèse de Bonnet [Bonnet_2010].

La zone de cisaillement tertiaire se situe au niveau du contact entre la surface de la pièce restante après usinage et la face de dépouille de l'outil. Malgré la présence d'un angle de dépouille α , la matière fortement comprimée lors de la coupe se détend (retour élastique) et frotte contre la face de dépouille.

Ces trois zones sont donc les parties où le matériau se déforme. L'usure de l'outil et la production de chaleur se concentre donc dans ces parties.

2 - 3 - USURE DES OUTILS

Comme indiqué dans la partie précédente, de fortes contraintes tant thermiques que mécaniques interviennent pendant la coupe. Ces sollicitations sévères lors de l'usinage du titane conduisent à un endommagement des outils. Cette dégradation peut prendre différentes formes qui ont pour origine des phénomènes physico-chimiques et qui se traduisent par diverses formes d'usures. Il convient de différencier les phénomènes générant l'usure et les types d'usures qui sont rencontrés lors de l'usinage, même si ces deux points sont intimement liés.

L'usure peut ainsi provenir de différents phénomènes tels que l'adhésion (Figure 12), l'abrasion (Figure 13) ou encore la diffusion d'éléments chimiques. La Figure 10 indique l'importance de ces phénomènes en fonction de la vitesse de coupe pour l'usinage du titane.

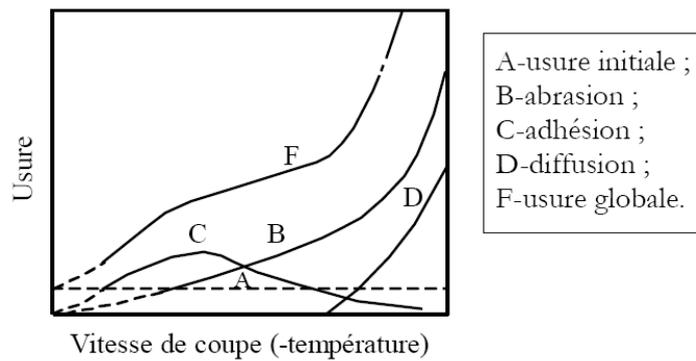


Figure 10 : Types d'usures en fonction de la vitesse de coupe [Bhaumik_1995]

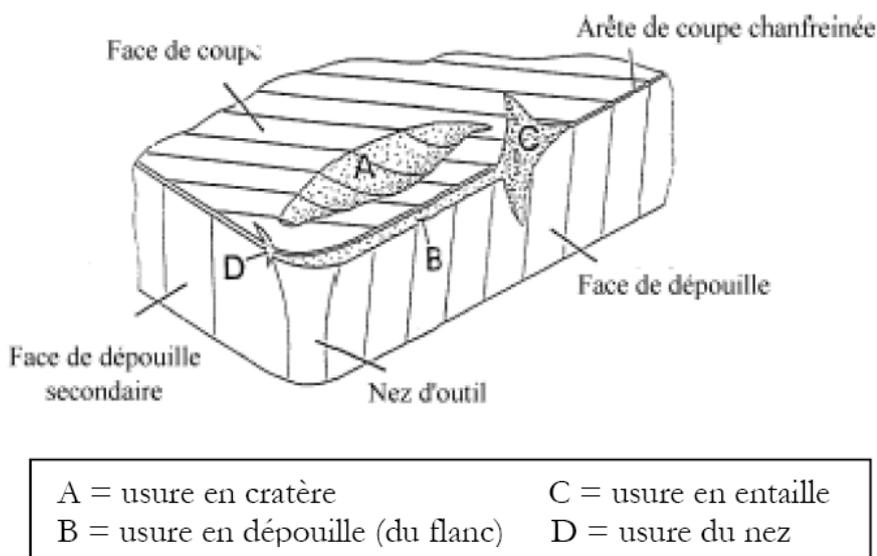


Figure 11 : Formes d'usure classique d'une plaquette d'usinage [Calamaz_2008a]

Ces phénomènes génèrent des profils d'usure caractéristiques, qui sont à la fois liés au type d'usure rencontré, mais également impactés par les conditions de coupe, le matériau de l'outil, sa géométrie ou encore le matériau usiné. Les principaux modes d'usure sont représentés sur la Figure 11.

Le phénomène d'adhésion (Figure 12) est très présent lors de l'usinage du titane (surtout à sec). Une mince couche de titane vient se déposer sur la face de coupe de l'outil. Ce dépôt, tant qu'il reste mince, fait office de protection pour l'outil et limite la diffusion, cependant, lorsque la vitesse ou le temps d'usinage augmente, cette couche devient plus épaisse et s'arrache plus facilement, perdant son rôle protecteur. L'adhésion est présente sur l'ensemble des types d'outils lors de l'usinage des alliages de titane [Bhaumik_1995].

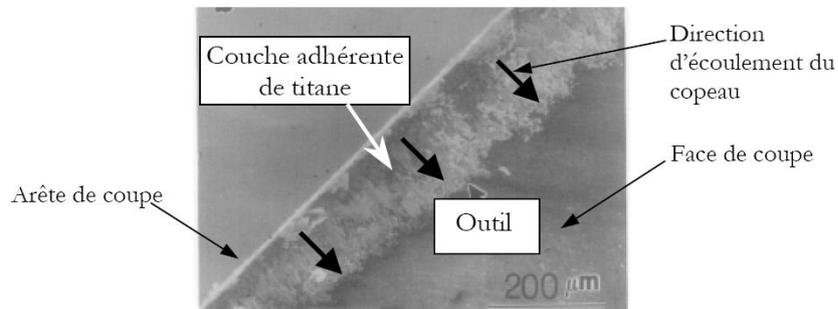


Figure 12 : Couche de titane collée sur l'arête de coupe [Bhaumik_1995]

L'usure par abrasion est généralement le principal phénomène qui est combattu. Ce phénomène est dû à la présence de particules dures (et souvent anguleuses) dans le matériau usiné qui viennent arracher de la matière sur la surface de l'outil. L'abrasion augmente avec la quantité de particules venant au contact de l'outil par unité de temps. Ce type d'usure dépend donc de la matière usinée (composition chimique et procédé d'obtention du brut), mais également de la vitesse de coupe [Salguero Gomez_2011].

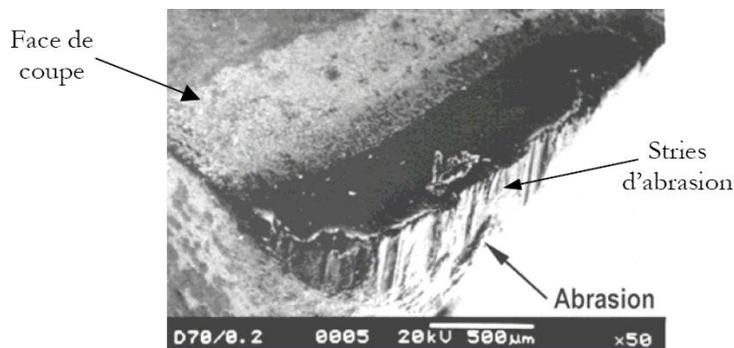


Figure 13 : Usure par abrasion d'un outil carbure ayant usiné du titane à sec [Venugopal_2007]

L'usure par abrasion (souvent aidé par la diffusion chimique) génère, sur la face de coupe, un cratère, qui est représentée par la zone A sur la Figure 11. Ce cratère est creusé par le frottement du copeau sur la face de coupe. La Figure 14 représente les caractéristiques associées à l'usure en cratère, il est en effet possible de mesurer la profondeur maximale du cratère (K_T), la distance du centre du cratère à l'arête (K_M) ou l'angle γ_c . Che-Haron [Che-Haron_2001] recommande de remplacer l'outil lorsque K_T atteint 0.14 mm.

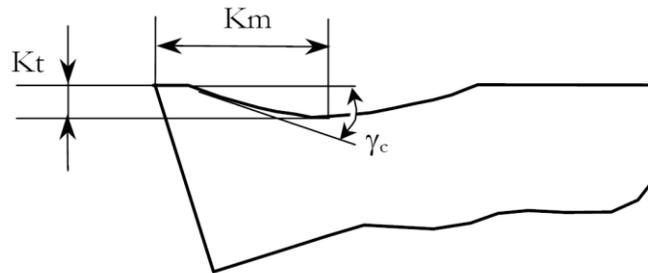


Figure 14 : Caractérisation de l'usure en cratère

Sur la face de dépouille, l'usure par abrasion génère des stries résultant du frottement de l'outil sur la surface usinée (zone B de la Figure 11). Comme indiqué précédemment avec le phénomène d'abrasion, ce type d'usure se caractérise par des stries parallèles à la direction de coupe (Figure 13). Les causes de ce type d'usure sont d'ailleurs l'abrasion combinée à de la diffusion [Ezugwu_2003]. Le moyen le plus répandu pour évaluer cette usure est de mesurer la taille de la zone striée ; la valeur retenue sera soit la largeur maximale (V_{Bmax}), soit la largeur moyenne (V_B) comme indiqué sur la Figure 15. Pour les alliages de titane, les valeurs limites pour V_B et V_{Bmoy} sont respectivement 0.4 mm et 0.7 mm. Lorsque l'usure en dépouille devient trop importante, l'état de surface se dégrade et les tolérances géométriques peuvent ne plus être respectées.

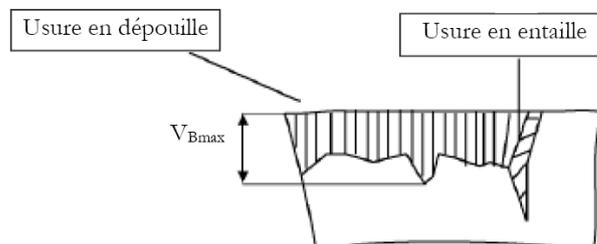


Figure 15 : Usure en dépouille et en entaille

L'usure par diffusion en usinage est marquée par la migration d'atomes de l'outil vers le copeau en mouvement (ou l'inverse). Ce type d'usure a tendance à former un cratère sur la face de coupe juste au-dessus de l'arête. Ce défaut, en creusant la face de coupe augmente

l'angle de coupe et rend l'arête plus fragile, entraînant une rupture de cette dernière lorsqu'elle n'est plus assez résistante.

Sur les outils en carbure de tungstène usinant du titane, la diffusion a pour effet de fragiliser l'outil. Le liant (cobalt) diffuse dans le copeau à cause de sa forte réactivité avec le titane et des hautes températures à l'interface copeau-outil. Ce phénomène engendre un déchaussement des grains de tungstène sous l'effet de l'écoulement du copeau.

Lors de l'usinage du Ti6Al4V par des outils en diamant, le carbone de l'outil réagit avec le titane pour former une couche de TiC sur l'outil. Cet intermétallique qui agit comme une barrière plus ou moins efficace qui ralentit la vitesse de diffusion.

La diffusion étant un phénomène physico-chimique, la température est un activateur de cette réaction. [Hartung_1982]

La diffusion peut tendre à rendre la face de l'outil plus cassante en appauvrissant le carbure de tungstène de son liant, ce qui peut également entraîner des déchaussements de grains, amplifiant l'usure par abrasion, mais ces phénomènes peuvent également conduire à des écaillages ou des fissurations de l'arête.

Ces phénomènes surviennent également dans le cas de coupe discontinue, l'outil subissant un cyclage thermomécanique important, il travaille en fatigue. En fonction du refroidissement, il se peut que des contraintes entre la surface rapidement refroidie et le cœur de l'outil encore chaud génèrent des fissures dans l'outil qui peuvent mener à l'écaillage.

L'usure en entaille (zone C de la Figure 11) se présente sous la forme d'une entaille sur l'arête de coupe. Localement les conditions de coupe sont donc défavorables à cause de cette géométrie, ce qui a tendance à amplifier ce phénomène. Ce défaut est mesuré sur la face de dépouille et est généralement noté V_{BN} , la taille critique pour les alliages de titane est de l'ordre du millimètre.

Le bec de l'outil, sous l'action des pressions de coupe et des températures élevées lors de l'usinage peut subir une déformation plastique, ce qui se traduit par un affaissement de l'arête.

Lorsque les contraintes sur l'outil deviennent encore supérieures, il arrive qu'une rupture fragile de l'outil survienne.

Pour l'ensemble de ces mécanismes d'usure, les grandeurs thermomécaniques jouent un rôle dans les alliages de titane, les formes d'usures principalement rencontrées sont les usures en cratère et en dépouille. Ces deux types d'usure cohabitent dans la plupart des cas.

2 - 4 - CARACTERISTIQUES DU TROU DANS LE Ti6Al4V

2 - 4 - 1 - BAVURE

La plupart des opérations de perçage dans des matériaux métalliques génèrent des bavures en entrée et surtout en sortie de matériau. Néanmoins dans le secteur aéronautique, les bavures ne sont pas permises, par conséquent les trous sont régulièrement suivis d'opérations d'ébavurage. Cette opération, ainsi que le nettoyage ont des coûts non négligeables sur la pièce. Dornfeld [Dornfeld_1999] a estimé à 30 % le surcoût de telles opérations.

L'étude de la formation des bavures a conduit à la conclusion qu'elles sont le fruit d'une accumulation de chaleur sous la pointe du foret qui accentue la déformation plastique de la matière en fin de perçage, cette matière se rompt alors, et le point où la rupture se forme donne la morphologie de la bavure. La Figure 16 identifie trois types de bavures.

Les bavures de type A sont sans capsule, la rupture est de type fragile.

Les bavures de type B sont avec capsule, la bavure est uniforme, la rupture a eu lieu aux extrémités.

Les bavures de type C sont avec capsules, la bavure est longue et non uniforme, la rupture a eu lieu au centre.

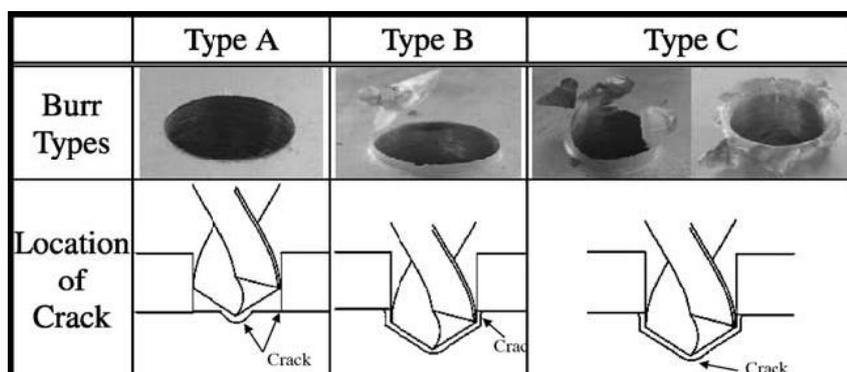


Figure 16 : Types de bavures lors du perçage de matériaux métalliques [Ko_2003]

La taille des bavures est directement liée à la production de chaleur dans la zone de coupe au moment de la sortie de l'outil [Dornfeld_1999]. Ko [Ko_2003] a également mis en évidence

que la géométrie du foret et les paramètres de coupe influent de manière importante sur la taille de la bavure.

2 - 4 - 2 - DIMENSION DU TROU

Lors du perçage du Ti6Al4V, le suivi du diamètre du trou en fonction de la profondeur est un élément à vérifier car les composantes thermiques durant l'opération peuvent générer une dérive du procédé au cours du perçage. La Figure 17 nous montre ainsi que le diamètre du trou évolue dans la partie titane alors que les paramètres de coupe et le matériau sont inchangés. Certaines études ont mis en évidence qu'un même foret peut réaliser divers diamètres de trous en fonction des paramètres de coupe (la variation de diamètre est très faible). De même deux géométries d'outils différentes mais de même diamètre ne donneront pas toujours un diamètre de trou identique à paramètres de coupe identiques comme cela est visible sur la Figure 18 [Brinksmeier_2002].

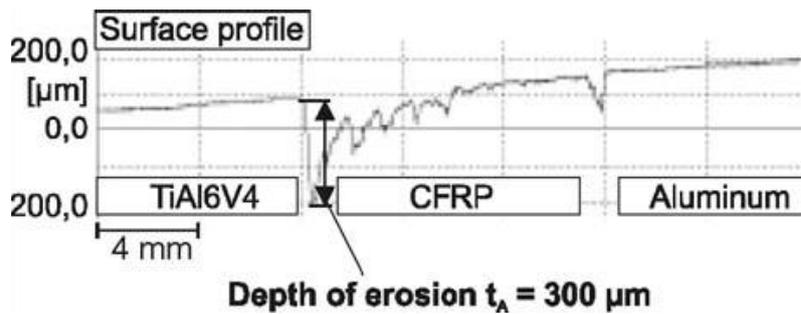


Figure 17 : Evolution du profil de la surface du trou suite à un perçage d'empilage [Brinksmeier_2002]

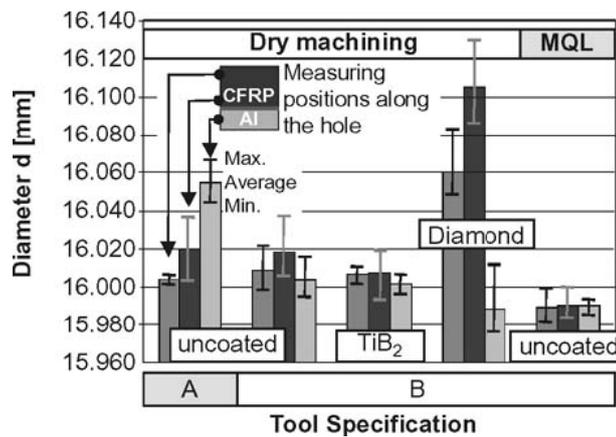


Figure 18 : Diamètres obtenus lors de perçage à l'aide d'outils WC-Co ayant divers revêtements lors de perçage d'empilage [Brinksmeier_2002]

2 - 4 - 3 - RUGOSITE

La rugosité dans le trou est fonction des paramètres machine et de l'usure de l'outil [Cantero_2005]. Certaines études corrélient également la rugosité à la température lors de l'usinage. Les travaux de Li [Li_2007a] mettent en évidence que lorsque la résistance à l'évacuation du copeau atteint un seuil, ce dernier se replie sur lui-même et vient rayer la surface du trou, dégradant ainsi son état de surface.

2 - 4 - 4 - MICROSTRUCTURE

Lors du perçage du Ti6Al4V, les contraintes et les températures sur les parois du trou sont à même de modifier les propriétés de l'alliage.

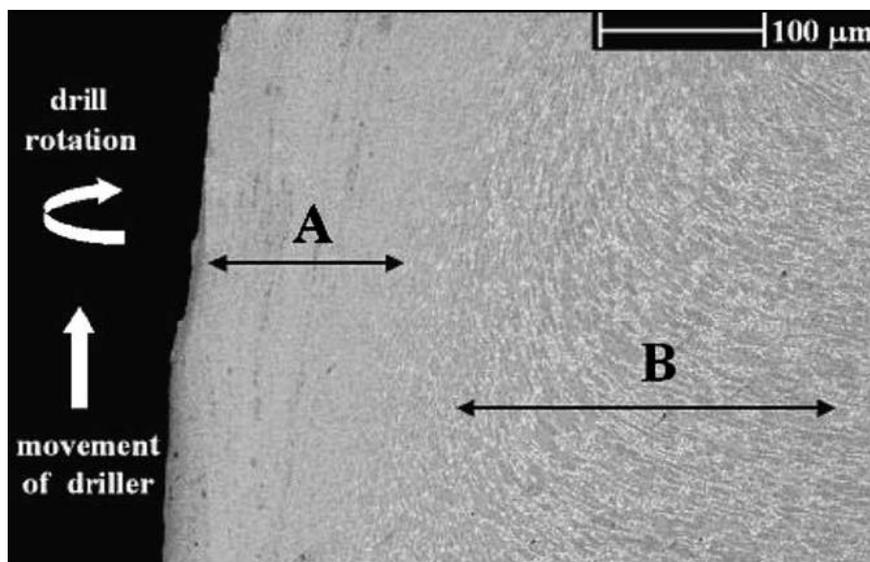


Figure 19 : Microstructure d'un alliage de Ti6Al4V à proximité d'un trou [Cantero_2005]

La Figure 19 présente une micrographie d'un trou. Deux zones distinctes sont visibles, la zone A qui ne contient plus de phase β , le titane ayant réagi avec l'oxygène et l'azote de l'air ont stabilisé la phase α , ce qui a augmenté la dureté. La seconde zone est indiquée B, les deux phases (α et β), sont présentes mais il y a eu une déformation plastique de la paroi [Cantero_2005].

Ces modifications de la microstructure sont à surveiller lors de l'étude du perçage d'alliages de titane car ces éléments peuvent constituer des causes de défaillance en fatigue du matériau.

2 - 5 - THERMIQUE LORS DE L'USINAGE DE Ti6Al4V

Certains défauts dans les trous en alliage de titane sont fonction de la température lors de la coupe. De plus l'usure de l'outil est également fonction de la température. Il est donc important de contrôler ce facteur lors de l'opération de perçage. Afin de contrôler cette grandeur, il faut dans un premier temps comprendre comment est généré l'échauffement, puis comment il est mesurable.

2 - 5 - 1 - ZONES D'ECHAUFFEMENT THERMIQUE

Lors de l'usinage des métaux, les trois zones de cisaillement génèrent un dégagement thermique. Néanmoins ce phénomène est très rapide et le titane est mauvais conducteur de la chaleur. Par conséquent l'échauffement généré dans la zone de cisaillement primaire, qui représente la zone générant le plus de calories lors de la coupe, va s'évacuer dans le copeau et dans l'outil de part la proximité de celui-ci avec les bords de cette zone. La zone de cisaillement secondaire va générer un flux thermique entre l'outil et la surface en contact avec le copeau, mais de part la faible effusivité du titane, l'outil absorbera une grande quantité de l'énergie générée dans cette zone. L'échauffement dans la zone de cisaillement tertiaire est souvent considérée comme faible face aux deux autres zones, l'énergie thermique se dissipe entre la pièce et l'outil.

Diverses études ont été menées sur la répartition du flux thermique lors de l'usinage de titane, mais des divergences sur les rapports de puissance générées dans la zone de cisaillement primaire et secondaire semblent subsister.

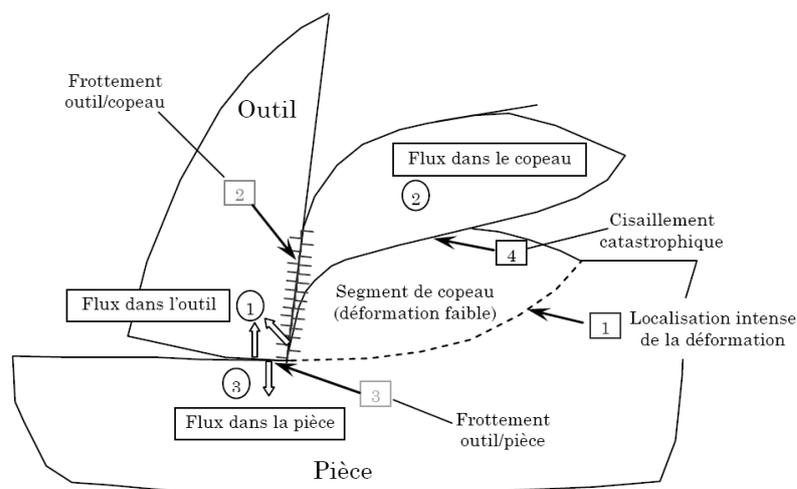


Figure 20 : Distribution des flux thermiques lors de l'usinage des alliages de titane [Komanduri_1982]

2 - 5 - 2 - MOYEN DE MESURE DE LA TEMPERATURE EN USINAGE

Il existe de nombreux moyens de mesurer la température ou la variation de la température au cours de l'usinage. Les thermocouples, les thermistances et la thermographie infrarouge figurent parmi les techniques les plus courantes.

Les systèmes employant les thermocouples sont les plus fréquents. Trois types de montages utilisent ce phénomène. Le premier utilise le thermocouple naturel formé par l'outil et la pièce. Ce système a pour inconvénient d'être imprécis, la localisation précise où la mesure la température s'effectue est inconnue. Ces systèmes sont maintenant assez peu employés.

Le second système emploie des thermocouples placés dans la pièce, la température mesurée est donc celle du matériau entourant le trou. Ce type d'instrumentation permet de comparer différents types de forets ou paramètres de coupe sans difficulté. La Figure 21 présente une pièce équipée de trois thermocouples pour mesurer l'évolution de sa température en fonction de la descente du foret. Il convient néanmoins de placer les thermocouples de manière précise afin de pouvoir corréler les divers éléments

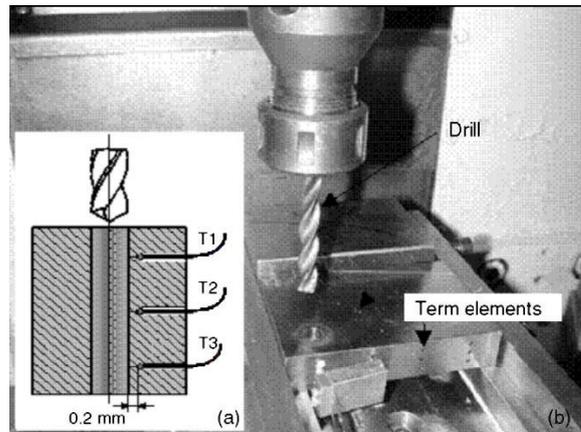


Figure 21 : Technique pour comparer divers outils ou paramètres d'un point de vue thermique [Zeilmann_2006]

La troisième technique est d'implanter directement les thermocouples sur la face de dépouille ou directement dans l'outil, au plus près de l'arête. La Figure 22 présente un foret équipé de deux thermocouples disposés sous la face de dépouille primaire.

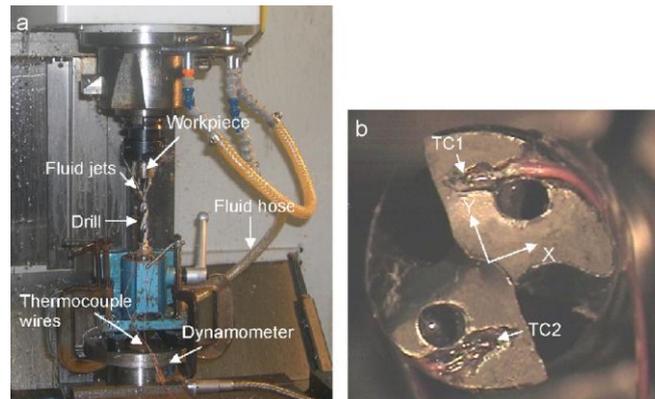


Figure 22 : Moyen de mesure de la température du foret au cours de l'usinage [Li_2007b]

L'inconvénient de ces systèmes avec des thermocouples est qu'ils sont uniquement capables de donner la température dans une zone approximative. Ce procédé est donc très employé pour effectuer des mesures comparatives.

Une technologie qui peut s'apparenter à celle des thermocouples dans l'outil est l'emploi de thermistance directement dans l'outil. Cette technique est principalement employée en tournage. La Figure 23 présente une plaquette de tournage instrumentée.

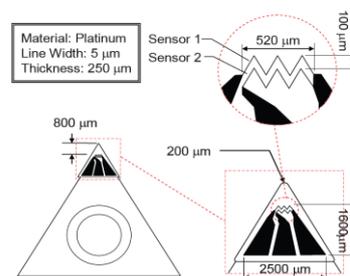


Figure 23 : Plaquette de tournage équipée de thermistance [Davies_2007]

Les autres techniques répandues pour mesurer la température lors de l'usinage sont sans contact, il s'agit de la thermographie infrarouge. Ce moyen, habituellement utile pour des opérations de tournage ne sera pas le plus employé en perçage (l'opération de perçage est une opération dans un milieu confiné et se prête donc peu aux techniques employant des caméras ou des pyromètres).

Toutes ces mesures de températures ont pour objectif de limiter l'échauffement de l'outil dans le but de limiter l'impact de l'opération de perçage sur la qualité de la pièce, mais également pour lutter contre l'usure des outils (la température est un « catalyseur » au niveau des réactions d'usure). Ces mesures servent donc de base pour des modèles thermiques et thermomécaniques.

En conclusion, le perçage des alliages titane est une opération complexe ; les verrous identifiés de cette opération confinée sont dans le contrôle de l'usure, le suivi des efforts et la maîtrise des aspects thermique, sans oublier la bavure en sortie qu'il faut s'efforcer de minimiser.

Chapitre 2 - USINAGE DU COMPOSITE A FIBRES DE CARBONE (CFRP)

1 - MATERIAU

Un matériau composite est défini comme un assemblage macroscopique d'au moins deux éléments non miscibles. Le matériau ainsi obtenu possède des propriétés, souvent mécaniques, que les autres matériaux n'ont pas individuellement. Principalement employé pour ses propriétés structurales, le matériau composite est généralement composé de deux éléments : les renforts (fibres ou particules) liés par une matrice (résine). Les composites à matrice métalliques notamment ne seront donc pas traités ici.

1 - 1 - CONSTITUANTS DES COMPOSITES

Les caractéristiques du composite dépendent de trois éléments : les renforts, la matrice ainsi que l'interface matrice-renfort.

1 - 1 - 1 - LES RENFORTS

Les renforts, ici sous forme de fibres, assurent la bonne tenue des matériaux composites en transmettant des actions mécaniques. Le matériau obtenu n'étant pas isotrope, le choix de l'orientation et l'agencement de ces fibres joue un rôle prépondérant dans les propriétés finales du matériau.

Il existe un nombre important de types de fibres sur le marché telles que les fibres de verre, d'aramide, de carbone ... Le secteur aérospace emploie majoritairement les fibres de carbone pour leur très hautes performances mécaniques.

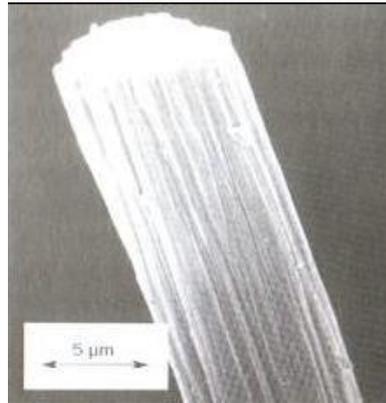


Figure 24 : Fibre de carbone

Le process de fabrication des fibres de carbone est relativement complexe, et donc cher à mettre en place. Ce coût élevé implique que les pièces réalisées dans ce matériau doivent avoir pour critère principal le rapport caractéristiques/poids élevé et être fortement sollicitées mécaniquement.

Quatre étapes sont nécessaires à la production de fibres de carbone. La première est une oxydation à l'air à une température de 200-300°C de fibres Polyacrylonitrile (PAN) suivi d'une carbonisation sous gaz inerte (700-1500°C). Suite à ces deux étapes, une structure hexagonale des atomes de carbone est obtenue. Pour augmenter la rigidité, un traitement de graphitisation sous gaz inerte (2000-3000°C) est effectué, qui a pour effet de réorganiser les réseaux hexagonaux suivant l'axe de la fibre. La dernière étape est un traitement de surface ayant pour but d'améliorer la liaison entre la fibre et la matrice (qui est une résine dans la majorité des composites à fibre de carbone)

| Densité (g.cm ⁻³) | Résistance à la rupture en traction (GPa) | Déformation à la rupture en traction (%) | Module de Young (GPa) |
|----------------------------------|---|--|--------------------------|
| 1.82 | 5.49 | 1.9 | 294 |

Tableau 4 : Propriétés mécaniques types des fibres à haute résistance [Dupupet_2008]

1 - 1 - 2 - LA MATRICE

La matrice a pour but de maintenir les renforts en place et d'assurer la distribution des efforts entre les fibres. Cet élément fournit la résistance à la propagation des fissures dans le matériau et définit donc les propriétés en cisaillement du matériau.

La matrice assure également la protection chimique des fibres. Elle limite en général la température d'emploi des composites car ce sont souvent des résines thermodurcissables ou thermoplastiques. Les résines thermodurcissables ont la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. En effet, ces résines sont infusibles et insolubles dès lors qu'il y a réticulation. Cette réaction pouvant intervenir suite à l'ajout d'un catalyseur ou durcisseur. Les résines thermoplastiques, quand à elles, peuvent être remises en forme en les ramollissant sous l'action de la chaleur. L'un des avantages de ces résines (thermoplastiques et thermodurcissables) réside dans leur forte aptitude à se mouler lorsqu'elles sont à l'état liquide.

La résine correspondant à l'étude est une résine époxyde M21E, de type thermodurcissable, se dégradant de manière irréversible si elle est trop chauffée. Ce type de résine à la particularité d'avoir une bonne tenue en fatigue, une bonne adhésion avec les fibres, de plus, leur facilité de traitement et de mise en œuvre permet d'obtenir des coûts de fabrication raisonnables.

1 - 1 - 3 - L'INTERFACE RENFORTS/MATRICE

L'interface entre les renforts et la matrice peut être considérée comme un constituant à part du composite, en effet, ses propriétés mécaniques et chimiques sont particulières. De plus cette interface joue un rôle primordial dans la qualité du composite car c'est cette zone qui est en charge de transmettre les efforts aux fibres.

1 - 2 - PROPRIETES DES MATERIAUX COMPOSITES

Les propriétés mécaniques d'un composite unidirectionnel sollicité suivant la direction des fibres et perpendiculairement à celles-ci sont présentées dans le Tableau 5. Les propriétés de l'assemblage sont en deçà de celles correspondant aux fibres seules (Tableau 4), néanmoins elles restent très élevées comparées à la densité de ce matériau.

| Propriétés | Valeur | Unité |
|-------------------------------------|--------|--------------------|
| Teneur volumique en fibre | 60 % | |
| Masse volumique (ρ) | 1 550 | Kg.m ⁻³ |
| Sens longitudinal | | |
| Résistance à la traction | 2840 | MPa |
| Module de traction (module d'Young) | 160 | GPa |
| Allongement à la rupture | 1.6 % | |
| Résistance en compression | 1570 | MPa |
| Module de compression | 145 | GPa |
| Cisaillement interlaminaire | 100 | MPa |
| Sens transversal | | |
| Résistance à la traction | 80 | MPa |
| Module de traction | 7.8 | GPa |
| Allongement à la rupture | 1.0 % | |
| Coefficient de Poisson | 0.34 | - |

Tableau 5 : Propriétés mécaniques d'un composite unidirectionnel fibre T800/résine époxyde à 20°C [Dupupet_2008]

1 - 3 - UTILISATIONS DES MATERIAUX COMPOSITES

Les matériaux composites à fibre de carbone sont employés en aérospatiale [Liu_2012] où le rapport résistance mécanique/poids est important. De même, ces matériaux se retrouvent dans la fabrication automobile pour la haute compétition, que ce soit pour des éléments de carrosserie ou d'autres composants. Des équipements sportifs haut de gamme (arcs, vélos ou bateaux par exemple) sont composés pour tout ou partie de composites. Certains instruments de musique contiennent eux aussi des fibres de carbone (archets de violons notamment).

L'ensemble de ces applications exigent une grande résistance mécanique ou une grande rigidité tout en ayant un poids réduit.

L'assemblage des pièces composites peut être réalisé grâce à de nombreux procédés, incluant le collage, l'assemblage boulonné ou riveté, ou encore des systèmes de coutures. L'étude qui suivra se focalisera sur les procédés nécessitant un perçage préalable des structures (boulonnage ou rivetage).

2 - PERÇAGE DES MATERIAUX COMPOSITES

L'utilisation de matériaux composites à renforts fibreux a considérablement augmenté ces dernières années, notamment dans les secteurs aéronautiques et spatiaux pour leurs propriétés mécaniques élevées. L'usinage de ces matériaux dans l'industrie aérospatiale se limite majoritairement au perçage et au détournage (ou fraisage). L'opération de perçage est critique et requiert une attention particulière sur l'ensemble des éléments servant à réaliser le trou. Ainsi les forets et les paramètres de coupe sont particulièrement importants [Abrão_2007]. La compréhension des mécanismes d'usure des outils et les mécanismes de coupe permettent de mieux définir les types d'outils à employer. Il convient ensuite de caractériser un trou et de déterminer les principaux défauts pouvant survenir lors du perçage de matériaux composites à fibre de carbone. Ce qui conduit à des études thermiques et à des simulations de perçage des composites.

2 - 1 - OUTILS DE COUPE

La géométrie des forets et leur substrat ont un impact fort sur la qualité du trou.

Des géométries sont optimisées pour percer des composites seuls, celles-ci ne permettant pas de percer des alliages de titane. L'objectif étant le perçage d'empilages, ces éléments ne seront pas approfondis. Néanmoins les matériaux des outils sont un point clef permettant d'améliorer la coupe. Les caractéristiques souhaitées sont donc présentées ci-dessous.

Les matériaux des forets pour les composites à fibre de carbone doivent avoir des caractéristiques mécaniques spécifiques, parmi lesquelles :

- une bonne résistance à l'abrasion et au frottement,
- une dureté élevée (notamment à chaud),
- la capacité à évacuer les calories (bonne conductivité thermique).

Ces spécificités doivent permettre de conserver une bonne acuité d'arête. Toute dégradation de l'arête de coupe peut entraîner des endommagements importants dans la pièce (délaminage, arrachement, échauffement, etc.). La capacité à évacuer les calories permet de limiter l'échauffement de la matrice, qui pourrait entraîner sa dégradation.

Les matériaux d'outils existant industriellement pour le perçage de composites sont décrits ci-dessous par ordre croissant de dureté :

- Les aciers rapides

Ce sont des aciers fortement alliés qui peuvent être revêtus par un dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Deposition, PVD) d'un matériau dur sur une faible épaisseur (1 à 5 μm). Ils sont employés de manière occasionnelle, principalement pour de très petites séries sans qualité requise.

Ces outils ont été rejetés lors de nombreuses études pour des applications industrielles principalement à cause de leur très grande usure et de la faible acuité d'arête en cas de revêtement [Iliescu_2008 ; Kim_2004 ; Krishnamurthy_1992 ; Piquet_1999].

- Les carbures de tungstène (WC)

Ces matériaux sont issus des technologies des poudres avec un liant métallique. La dureté à chaud et la résistance à l'abrasion sont très supérieures aux valeurs des aciers rapides [Iliescu_2008]. Il est également possible d'effectuer un dépôt sur ces matériaux, que ce soit en PVD ou en CVD (Chemical Vapor Deposition, dépôt chimique en phase gazeuse, qui permet une grande diversité de dépôts et une bonne accroche sur le substrat). Krishnamurthy et al. [Krishnamurthy_1992] relève que les revêtements peuvent se déformer ou s'écailler, engendrant des modifications importantes de la géométrie de l'arête, ce qui peut être préjudiciable lors de la coupe.

- Le diamant

C'est le plus dur des matériaux. Il se présente sous diverses formes, que ce soit en dépôt de cristaux sur un support métallique ou carbure, ou par frittage de grains de diamant eux-mêmes frités sur un support en carbure de tungstène, ou encore par frittage de diamant monocristallin, taillé et fritté sur un support en carbure de tungstène puis affuté.

Ce type d'outil est recommandé dans de nombreux cas pour l'usinage de composites à fibres de carbone [Guegan_1994]. En effet l'usure dans le composite d'outils diamants PCD est bien plus faible que pour les outils en WC, le rapport est de l'ordre de 120 dans l'étude de Ramulu [Ramulu_1999] en tournage. La tendance est confirmée lors de plusieurs campagnes d'essais [Chambers_1995 ; Hickey_1987]. L'emploi de tels outils est freiné par leurs coûts et leur faible ténacité ainsi que la difficulté pour obtenir des géométries d'arêtes complexes.

En conclusion, pour l'usinage de matériaux composites à fibres de carbone, il est fortement recommandé, d'après les diverses études, d'employer des outils en WC ou en PCD [Abrate_1992 ; Iliescu_2010 ; Piquet_1999].

2 - 2 - MECANISMES DE COUPE DES COMPOSITES

La Figure 26 représente les mécanismes de coupe d'un composite à renforts fibreux, il est le fruit de l'étude de D. H. Wang sur la coupe des composites [Wang_1995]. Les cas étudiés sont identifiés par l'orientation des fibres par rapport à la direction de coupe. Les phénomènes de formation de copeaux dans le composite sont régis par les modes de propagations des fissures, rappelés sur la Figure 25. Ces travaux ont été confirmés par ceux de Zitoune [Zitoune_2005].

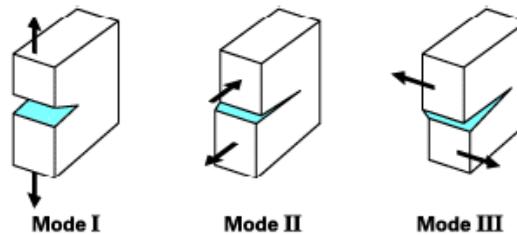


Figure 25 : Modes de propagation de fissures dans un matériau

Pour une orientation des fibres à 0° , la formation du copeau s'effectue par un chargement en mode I (ouverture de fissure) avec une rupture à l'interface fibre-matrice, combiné à un chargement en mode II (glissement droit) dans la direction d'avance de l'outil. La séparation du copeau est réalisée par la rupture des fibres dans une direction perpendiculaire à leur axe. Dans ce cas, les copeaux auront tendance à être long car l'outil décolle les fibres et les arrache comme un copeau de bois. Si la pointe de l'outil arrive entre deux couches (que ce soit à cause de l'usure ou d'un réglage), l'état de surface sera moins bon.

Pour une orientation des fibres positives jusqu'à $+75^\circ$, l'arête de coupe cisaille les fibres (mode II), puis il y a cisaillement à l'interface fibre-matrice (toujours en mode II) jusqu'à la surface libre. Ce type de coupe produit donc de petits débris (notamment pour une inclinaison de 45°). La surface n'est pas toujours régulière car l'outil ne coupe pas le matériau, mais casse les renforts fibreux, et ce, pas toujours de façon très nette.

Pour une orientation des fibres à 90° ainsi que les orientations négatives, la formation du copeau est initiée par une ouverture en mode I de la matière sous l'arête de coupe en suivant l'interface matrice-fibre, puis une rupture en mode II qui remonte jusqu'à la face libre en cisillant les fibres. Lorsque les fibres sont orientées à 90° , la surface présente un décollement des fibres, elles sont penchées en avant par paquet comme cela est visible sur la Figure 27. Les fibres fléchissent le plus lorsque les fibres sont à -45° , l'arrachement est alors le mode de

rupture de ces fibres, engendrant un décollement des fibres avec la matrice et il est possible de remarquer des défauts importants se propageant vers l'intérieur de la matière.

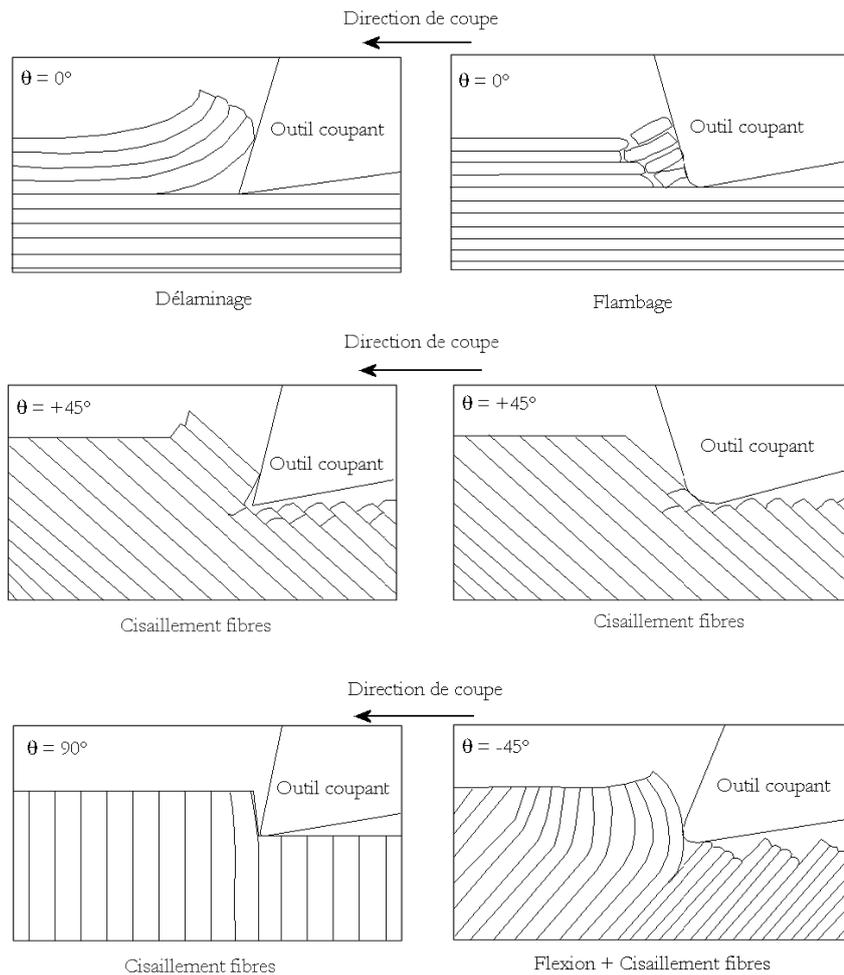


Figure 26 : Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du composite carbone/époxy unidirectionnel, d'après Wang et al. [Wang_1995]

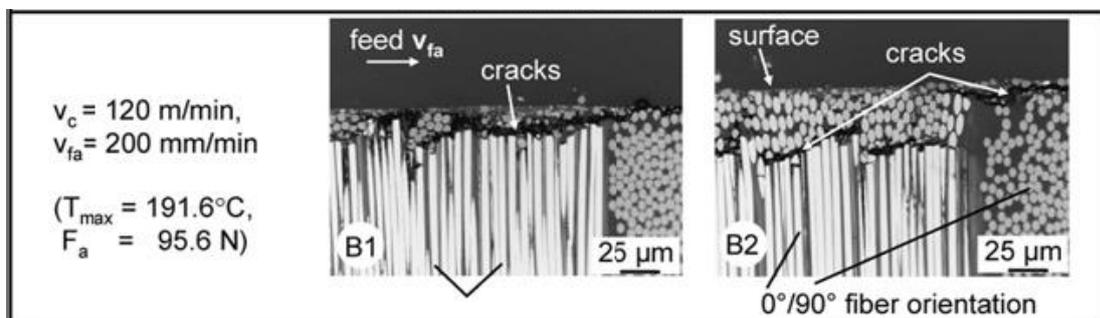


Figure 27 : Micrographies de composite suite à un perçage conventionnel (bord du trou) [Brinksmeier_2011]

2 - 3 - MECANISMES D'USURE DES OUTILS

Les études d'usure des outils dans les matériaux composites ont majoritairement été menées pour des opérations de perçage. Néanmoins à cause de la diversité et la complexité des géométries employées, les critères de quantification usuels de l'usure (usure en dépouille V_B , usure en cratère K_T) ne sont pas toujours représentatifs de l'usure réelle de l'outil. Le critère d'usure a notamment été complété par un critère de rayon de bec de l'outil usé (R_{eu}) dans les travaux de thèse de D. Iliescu [Iliescu_2008].

Plusieurs facteurs ont été relevés comme influant fortement sur l'usure de l'outil, le premier est la vitesse de coupe (plus celle-ci est élevée, plus l'usure est rapide). De plus Kim et al. [Kim_1992] ont mis en évidence en tournage l'influence de l'orientation des fibres sur l'usure. Ainsi lorsque le composite passe d'un agencement monodirectionnel à 0° à un stratifié à $\pm 45^\circ$, la durée de vie de l'outil carbure (K10) chute de 70 % (pour une vitesse de coupe de 50 m/min).

Le phénomène qui est le principal responsable de l'usure des outils dans le composite est l'abrasion. Les arêtes sont érodées au contact des fibres [Abrão_2008 ; Bonnet_2010 ; Iliescu_2008]. Ce type d'usure étant proportionnelle à la longueur usinée, une usure triangulaire est observée sur les forets (l'arête proche du centre est moins usée que celle sur l'extérieur) [Iliescu_2008].

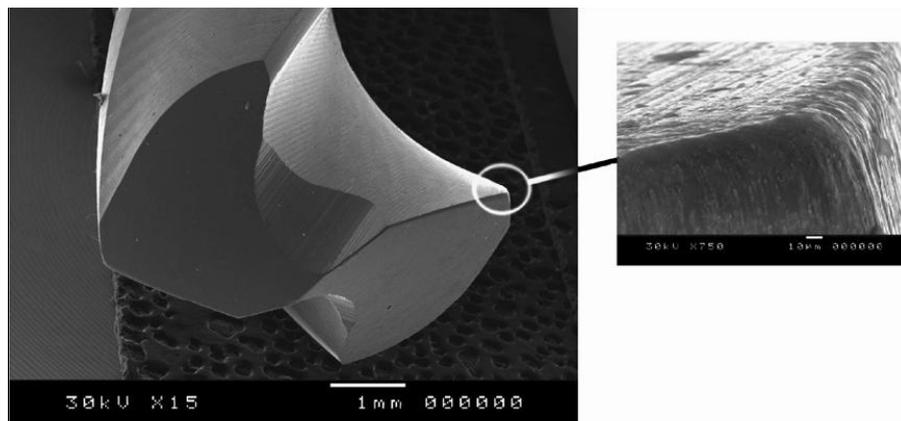


Figure 28 : Usure de l'arête d'un foret après avoir usiné 180 trous dans un composite à fibre de verre [Abrão_2008]

L'usure par abrasion est caractérisée par un rayonnage de l'arête de coupe et surtout par la présence de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou la direction d'écoulement du copeau. Ces marques sont donc visibles à la fois sur la face de coupe (mais sur une très courte distance à cause de la taille des copeaux) et sur la face de

dépouille. Les stries sont causées par les particules dures du matériau, dans le cas d'un composite à fibres de carbone, ces particules sont les fibres [Iliescu_2008].

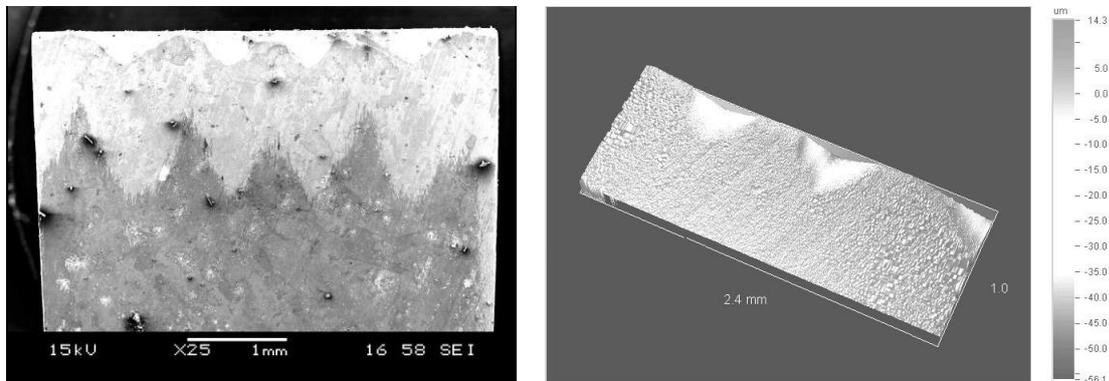


Figure 29 : Image MEB de la face de dépouille et profil 3D d'un outil utilisé par abrasion lors d'usinage de composite à fibre de carbone [Iliescu_2008]

Des phénomènes d'adhérence sur la face de coupe sont parfois relevés, notamment sur des essais de rabotage, dans les zones entre les plis.

2 - 4 - CARACTERISATION DU TROU REALISE

L'emploi de forets hélicoïdaux pour percer des matériaux composites génère des dommages spécifiques. Les dommages s'appliquent dans les trois zones que sont l'entrée du trou, la paroi du trou et la sortie du trou.

2 - 4 - 1 - DEF AUT EN ENTREE DE TROU

A l'entrée du foret dans la matière, l'angle d'hélice du foret et l'angle de coupe tendent à arracher le premier pli, pouvant occasionner un délaminage en entrée du trou. Ce défaut est considéré comme l'un des quatre défauts majeurs en perçage selon A.M. Abrão et al. [Abrão_2007].

Les méthodes employées pour détecter ce type de défaut peuvent être visuelles (inspection à l'œil ou avec une caméra), mais ce procédé est uniquement fiable pour détecter les délaminages importants et ne permet pas de quantification précise du défaut. Une autre technique permettant de mesurer ce défaut est le scan à l'aide d'ultrasons, comme cela est visible sur la Figure 30. L'une des valeurs retenues pour mesurer la taille du défaut est la mesure du diamètre maximal délaminé, comme le montre la Figure 31 [Tsao_2004].

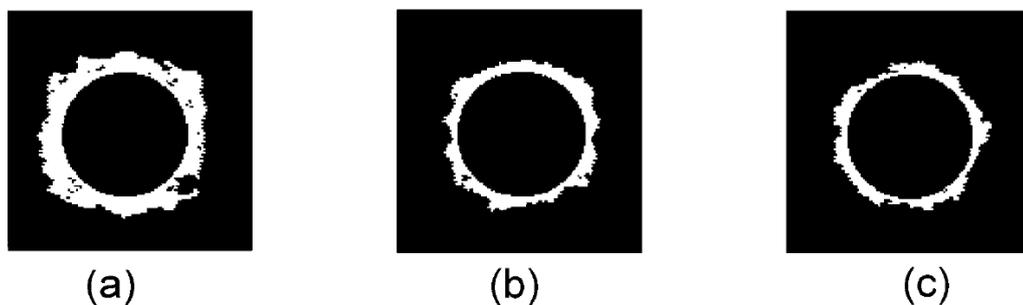


Figure 30 : Vues à l'ultrason de trous mettant en évidence le délaminage (trous réalisés avec trois types de forets distincts [Tsao_2004])

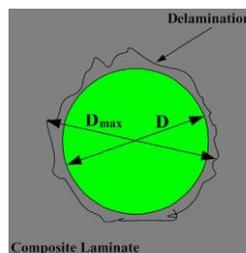


Figure 31 : Définition du diamètre de délaminage [Tsao_2004]

2 - 4 - 2 - DEF AUT SUR LA PAROI DU TROU

L'arrachement des fibres et la dégradation de la matrice engendrent divers défauts sur la paroi du trou. Le premier est un défaut géométrique de circularité au niveau de chaque pli comme cela est visible sur la Figure 32.

Guegan [Guegan_1994] affirme que les fibres, avant leur rupture fragile par cisaillement, ont une déformation élastique due à de la flexion. Un défaut de circularité global au niveau de chaque pli est donc réalisé, la forme du trou dans le pli est alors elliptique. Si le composite est composé de plis orientés différemment, les ellipses sont alors orientées suivant ces plis, générant un trou de diamètre le petit axe de l'ellipse. Dans ce cas, sur la Figure 32, D_{th} correspond au contour circulaire théorique du trou (correspondant au diamètre du foret), D_r correspond au profil percé dans un pli et D au contour du trou dans la matière en tenant compte des divers empilages. Nous avons alors $D < D_{th}$. Ce rétrécissement du trou engendre un resserrement du composite sur le foret, entraînant : un frottement des fibres sur les listels qui produisent une usure du foret, un échauffement de la paroi du trou et de l'outil pouvant générer une dégradation de la matrice. La matrice risque d'être carbonisée par cette élévation de température. La présence ou non de brûlure de la matrice est binaire : elle est présente ou non [Iliescu_2008]. Ces deux défauts (géométrique et brûlure de la matrice) constituent deux des quatre défauts majeurs en perçage de composites à renforts fibreux selon A.M. Abrão et al [Abrão_2007].

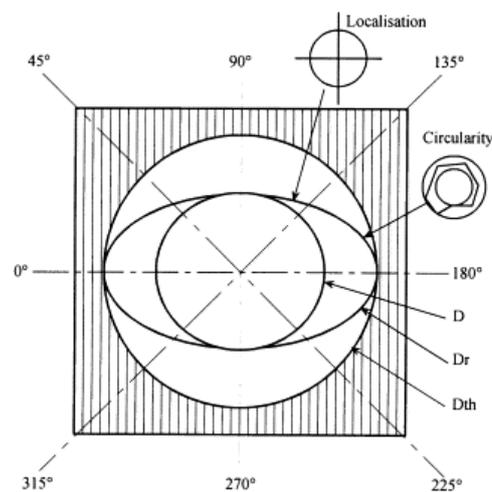


Figure 32 : Défaut de circularité en perçage d'un matériau composite unidirectionnel [Piquet_2000]

Le fait que le composite soit composé de couches successives, induit également des défauts de rugosité car les phénomènes de coupe ne sont pas les mêmes en fonction de l'orientation des fibres par rapport à la direction de la vitesse de coupe de l'outil. La mesure de la rugosité est

également complexe car dans le cas de palpeur physique, la pointe diamant ou carbure vient prendre la mesure sur des fibres dépassant de la matrice, les faisant fléchir et donc faussant la mesure. La mesure de la rugosité dans un composite à l'aide de palpeurs mécaniques peut par conséquent minimiser la valeur de la rugosité [Guegan_1994 ; Iliescu_2008]. Si le critère de rugosité Ra est discriminant, il est néanmoins très discutable d'un point de vue scientifique.

En plus de la forme ovale des trous dans une couche, il arrive qu'il y ait des phénomènes d'arrachage, lorsque les fibres ont une orientation négative par rapport à l'arête de coupe (Figure 26). Les fibres, qui sont soumises à de fortes sollicitations, peuvent entraîner un arrachement de morceaux de fibres et de matrice. Ce type de phénomène intervient principalement lorsque les stratifiés sont fortement orientés [Iliescu_2008].

Les matrices therm durcissables ayant généralement des propriétés fragiles, il arrive que sur les arêtes vives, il y ait des cassures, souvent notées écaillage. Ce phénomène est néanmoins peu courant en perçage [Guegan_1994].

La Figure 33 montre un décollage entre deux plis dans la matière. Ce phénomène, difficilement mesurable peut nuire à la durée de vie de l'assemblage en produisant des fissures interlamellaires qui fragilisent le matériau [Gouleau_2007].

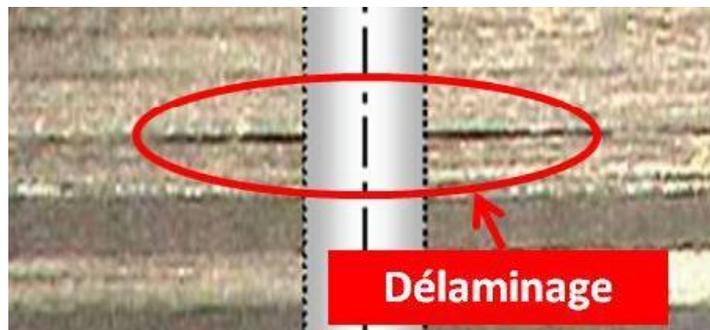


Figure 33 : Délaminage dans le composite [Gouleau_2007]

2 - 4 - 3 - DEF AUT EN SORTIE DU TROU

Le délaminage en sortie de trou est le défaut généralement considéré comme le plus important lors du perçage de composites [Abrão_2007 ; Iliescu_2008 ; Rahme_2008 ; Zitoune_2007]. Ce phénomène résulte du fait que les derniers plis ne sont plus capables de résister à l'effort de poussée du foret. Lorsque cet effort de pénétration (F_z) devient supérieur à la charge de décollement interlaminaire, le délaminage apparaît comme cela est visible sur la Figure 34 et 35. Le délaminage en sortie du trou est donc directement influencé par l'effort de poussée. Par

conséquent tout paramètre influençant cet effort impactera le délaminage en sortie [Langella_2005 ; Tsao_2003].

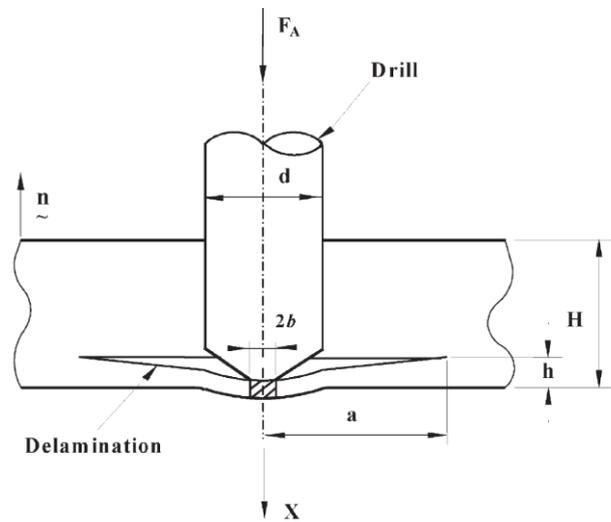


Figure 34 : Modèle employé pour étudier le délaminage (dans le cas présent avec un pré-trou) [Tsao_2003]

La Figure 35 présente une photographie d'une sortie de trou où il est possible de visualiser le phénomène de délaminage. Des fibres mal coupées sont également visibles.

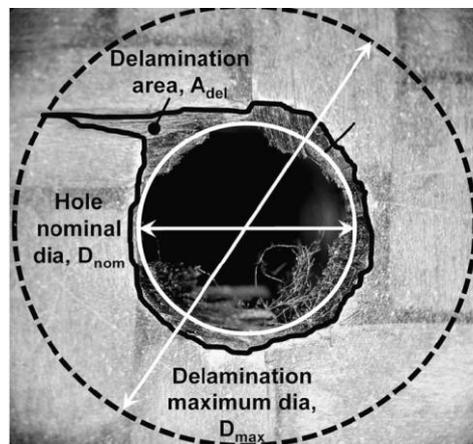


Figure 35 : Défaut de délaminage en sortie de trou dans un composite GFRP [Faraz_2009]

2 - 4 - 4 - CONCLUSION SUR LES PRINCIPAUX DEFAUTS LORS DU PERÇAGE DE COMPOSITES

La Figure 36 reprend les principaux défauts que l'on peut rencontrer lors du perçage de composites : un défaut de délaminage en entrée du trou, un défaut de délaminage en sortie du trou, et un défaut de circularité combiné à un rétrécissement du trou. A ces défauts, il faut ajouter la brulure de la matrice.

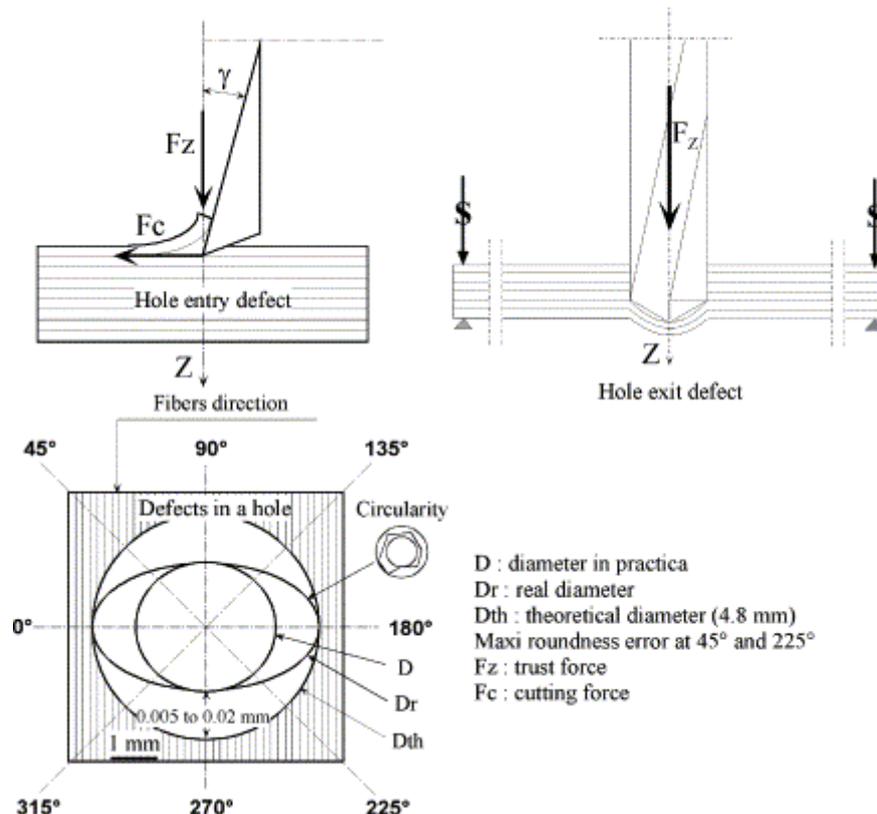


Figure 36 : Principaux defaults lors du perçage de composites à renforts fibreux [Lachaud_2001]

2 - 5 - MODELISATION DU PERÇAGE DES MATERIAUX COMPOSITES

Lors du perçage des composites, le défaut majeur est le délaminage en sortie, ainsi, la majeure partie des simulations sur les composites porte sur ce point. Si ce phénomène est compris globalement, la simulation pour l'ensemble des géométries de forets, paramètres machines et propriétés du composite reste encore très complexe à réaliser. Un certain nombre de simulations se basent sur des essais de poinçonnage, cherchant à déterminer l'effort nécessaire au délaminage en sortie [Bonnet_2011 ; Hocheng_2005 ; Tsao_1997 ; Zitoune_2007]. D'autres études se font expérimentalement en testant des paramètres avec divers outils afin de déterminer ce qui limite au mieux le délaminage tout en garantissant une qualité de trous suffisante et une usure d'outils correcte [Abrão_2008 ; Khashaba_2004].

Une petite partie des autres modélisations porte sur la modélisation des efforts mécaniques lors du perçage de composites à fibres [Fernandes_2005].

En conclusion, le perçage des composites est une opération complexe engendrant de nombreux rebuts, il convient d'y prêter particulièrement attention. Les verrous concernant cette opération sont le contrôle du délaminage en sortie, la qualité de la surface du trou ainsi que le contrôle de l'usure des outils qui peut rapidement devenir catastrophique.

Chapitre 3 - PERÇAGE D'EMPILAGES

1 - INTRODUCTION

Les composites sont de plus en plus employés pour des pièces de structures dans le secteur aéronautique. Leur utilisation se fait en partie en empilage. Dans ce cadre, le perçage d'empilages permet d'assurer une parfaite position des trous les uns par rapport aux autres et peut représenter un gain au niveau du temps d'usinage et d'assemblage. La Figure 37 présente la part de composites employés en empilages dans les avions chez Airbus. Il convient de noter que 50 % du composite est employé en empilage avec un métal. Cette utilisation importante justifie la recherche et l'optimisation d'outils et de méthodes adaptées au perçage d'empilages.

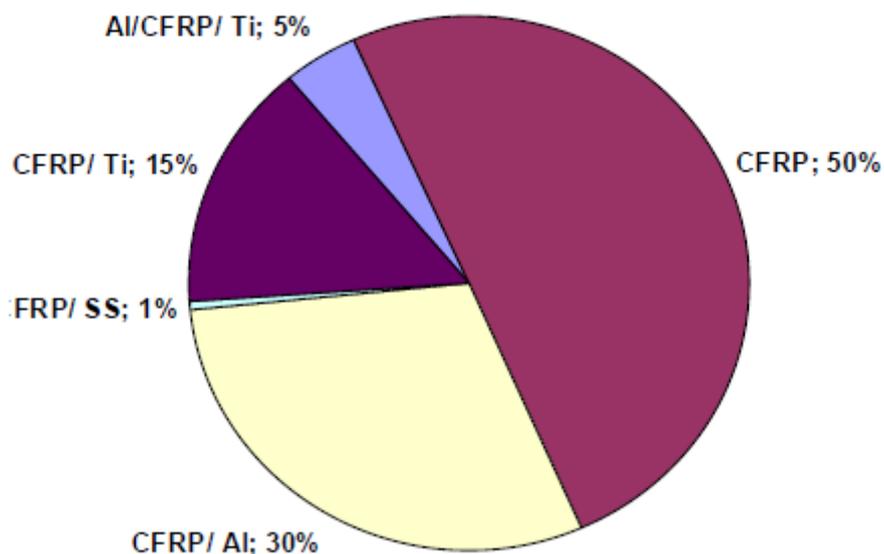


Figure 37 : Part de l'utilisation des composites dans les avions de la gamme Airbus (A380, A400M et A350-900 XWB) [Hammadi_2010]

Une première étude sur le perçage d'empilages a fait l'objet d'une thèse en 1978 [Rujikietgumjorn_1978] puis plus aucun travaux sur ce type d'investigation n'ont été relevés

avant les années 2000. Nous remarquons de plus qu'il y a une très forte accélération des publications internationales depuis ces trois dernières années sur le sujet, preuve que ce sujet est d'actualité et correspond à une problématique industrielle forte.

2 - PROBLEMATIQUES LIEES AU PERÇAGE DES EMPILAGES

Les empilages de matériaux métalliques et composites à renforts fibreux et matrice plastique soulèvent plusieurs problématiques. La première est l'usinabilité d'un tel assemblage, avec le choix de paramètres machines et la géométrie de l'outil. Cela peut également donner lieu à des techniques spéciales pour le perçage d'empilage, des pistes étudiées seront présentées succinctement (utilisation de trépan, perçage orbital, vibratoire ...). Une fois ce premier point résolu, il convient de relever les interactions entre les deux composants, comme par exemple l'impact du perçage du titane avant celui du composite. Pour finir, il convient de caractériser la qualité d'un trou dans un empilage de manière fine. Les propriétés des matériaux étant différentes, la qualité du trou dans chacun de ces matériaux diffère, cette partie est encore très peu abordée dans la bibliographie.

2 - 1 - USINABILITE D'UN EMPILAGE

Le perçage d'empilages composite-métal est un défi important car comme il a pu être noté dans les parties précédentes, les propriétés mécaniques de ces deux matériaux sont très éloignées, les géométries préconisées d'outils diffèrent fortement et surtout les conditions d'usinage sont disjointes comme cela est visible sur la Figure 38.

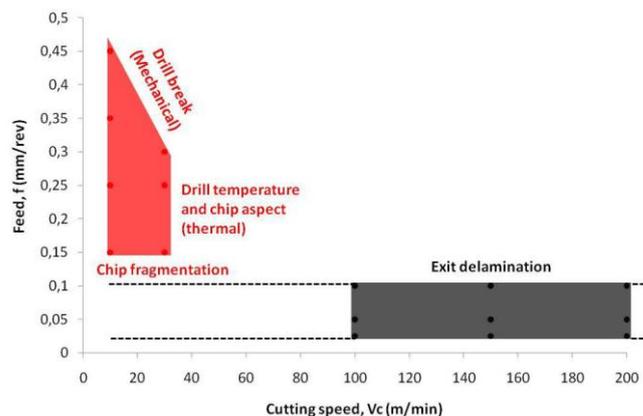


Figure 38 : Comparaison des conditions de coupe pour le titane (rouge) et le CFRP (gris) en perçage à sec [Bonnet_2010]

Ces considérations techniques entraînent une certaine complexité du choix des paramètres d'outils et de coupe. Dans ce cadre, une première approche est de garder les paramètres de coupe constants, tandis que la seconde est de faire varier les paramètres de coupe pour les adapter au mieux au matériau usiné.

Le cas de paramètres constants lors du perçage est le plus étudié pour le moment [Kuo_2014]. Il a pour avantage de ne chercher à optimiser qu'un ensemble de paramètres de coupe. Cela peut également permettre de réaliser une première modélisation des phénomènes qui peuvent survenir en cas d'utilisation d'Unité de Perçage Automatique (UPA) pneumatiques ou électriques. L'inconvénient est que les résultats obtenus en termes de qualité de trous et de durée de vie des outils sont bien souvent assez médiocres.

Dans le cas où le choix est d'adapter les paramètres machine au matériau usiné, de très nombreux paramètres supplémentaires surviennent. Cela implique de poser des hypothèses ou de choisir de ne pas optimiser l'ensemble des éléments simultanément. Il semble que les quelques études ayant fait ce choix technique aient des résultats supérieurs en terme de qualité de trous et surtout en terme de durée de vie des outils. Le fait d'avoir des paramètres qui évoluent au cours de l'usinage semble donc le choix le plus prometteur pour la suite des études [Gouleau_2007 ; Benezech_2011].

Ensuite pour étudier l'usinabilité, la majorité des études introduisent l'usure des outils [Park_2011]. En effet, des outils ne réussissent à faire que quelques trous, notamment lors des études de M. Ramulu et D. Kim [Kim_2004 ; Ramulu_2001]. L'usure des outils et la dérive des propriétés du trou constituent des points importants [Kim_2008].

Afin de poursuivre sur l'usinabilité, des mesures des efforts de coupe au cours du perçage sont effectuées dans la quasi-totalité des études sur le perçage d'empilages [Shyha_2011 ; Zitoune_2011, 2010]. La Figure 39 présente un profil classique d'évolution des efforts de coupe dans le cas d'empilages composite-titane. Il est ainsi possible de visualiser dans un premier temps l'effort de pénétration de la pointe du foret (Région 1), puis la pénétration du foret avec la part des listels en contact avec le composite qui augmente (région 2), ensuite une zone constante : la longueur de listels en contact avec le composite n'augmente plus, c'est la région 3. La région 4 est l'entrée du foret dans le titane (entrée de la pointe), suivi d'une zone où ce sont les listels qui rentrent en contact avec le titane. La région 6 est une zone normalement constante où la longueur des listels en contact avec le titane est constante. La région 7 est la sortie de la matière, en fonction du type de bavure, il est alors possible de décomposer cette zone en deux parties distinctes, la sortie de la pointe et la sortie des listels.

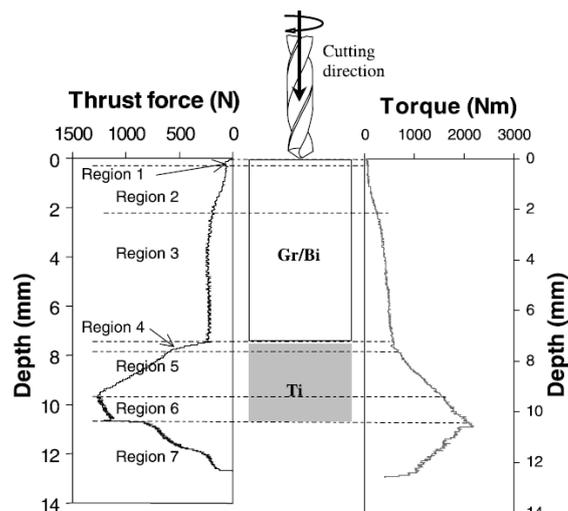


Figure 39 : Evolution des efforts de coupe lors du perçage d'un empilage composite (Graphite/Bismaleimide) Titane [Ramulu_2001]

2 - 2 - TECHNIQUES SPECIALES

Afin de pouvoir percer ces empilages, diverses techniques autres que le perçage conventionnel ont été abordées dans la bibliographie. Ces voies pourraient être abordées car cette opération a une forte valeur ajoutée, par conséquent une opération sensiblement plus lente ou onéreuse peut parfois être envisagée face au perçage conventionnel.

L'emploi de trépan est envisagé dans plusieurs études dans le cadre du perçage de trous de diamètres relativement important (environ une dizaine de millimètres de diamètre) [Cong_2014, 2013].

Denkena [Denkena_2008] a pour sa part étudié l'influence du perçage orbital lors du perçage d'empilages composite CFRP/titane (Ti6Al4V). D'après cette première étude, cette technologie peut être une réponse aux problématiques de perçage des empilages, ces résultats doivent être approfondis pour pouvoir être validés. Néanmoins, de part la trajectoire de l'outil, le débit copeau est plus faible, rendant l'opération assez coûteuse.

Afin d'avoir un débit copeau suffisant, un perçage avec des cycles de déburrage est étudié par Brinksmeier [Brinksmeier_2002], ces cycles permettant d'éliminer les copeaux pour limiter le frottement contre la paroi de composite et refroidir la pièce et l'outil.

Toujours dans le but de fractionner les copeaux et afin d'améliorer l'opération [Ladonne_2013], l'étude du perçage vibratoire a permis de mettre en évidence les possibilités

offertes par ce procédé. Pecat [Pecat_2014a, 2014b] a ainsi démontré que l'assistance vibratoire est un réel plus pour diminuer la température de l'outil et de la pièce.

Brinksmeier [Brinksmeier_2002], a étudié l'impact d'un foret étagé, les résultats, comparés aux autres forets en sa possession semblent prometteur, ce type de géométrie peut permettre des avancées, néanmoins l'optimisation de tels outils nécessite un très grand nombre d'expériences car les paramètres sont nombreux.

Le perçage d'empilages étant à ses débuts, il semble normal que de telles études voient le jour, il est en effet intéressant d'étudier les diverses méthodes et techniques afin de déterminer celles qui permettront de réaliser au mieux des trous répondant au cahier des charges.

2 - 3 - INTERACTIONS ENTRE LES COMPOSANTS DE L'EMPILAGE

2 - 3 - 1 - INTERACTIONS PROPRES A UN EMPILAGE DE DEUX MATERIAUX SIMILAIRES

Lors du perçage d'un empilage de deux plaques, divers phénomènes peuvent se révéler problématiques, et ce, quels que soient les matériaux usinés. L'un des défauts les plus récurrents est l'apparition de copeaux entre les plaques [Melkote_2010]. La présence de corps entre deux plaques nécessite le démontage et le nettoyage de l'assemblage, ces opérations sont longues et coûteuses, leur minimisation est donc un travail important.

Dans le cas de plaques minces, les phénomènes de décollement à l'interface sont également sources de défauts dans le trou et d'instabilité de la coupe.

2 - 3 - 2 - INTERACTIONS PROPRES A UN EMPILAGE BI-MATERIAUX

Lors du perçage d'un empilage de deux matériaux tels que le titane et les composites à fibres de carbone et matrice époxyde, l'agencement des matériaux de l'empilage a une importance particulière. Le choix de ce sens modifie de manière importante les verrous techniques liés au bon déroulement du perçage. La majeure partie des études évite le problème en n'explicitant pas le choix du sens ou en indiquant simplement que ce choix est le fruit d'études préliminaires sans expliciter les paramètres de cette étude.

La Figure 40 présente ainsi les difficultés lors du perçage du titane vers le composite. Dans le titane, le foret chauffera et s'usera et lorsque le foret entrera dans le composite, il risque de brûler la matrice, impactant par conséquent la qualité du trou en dégradant le bord de celui-ci. Un autre risque est qu'il se forme une bavure en sortie du titane qui pénètre le composite en

brûlant la matrice de ce dernier. De plus si le foret est revêtu, il est possible que ce dépôt ne tienne pas dans le titane. Par conséquent il ne peut plus servir de manière optimale dans le composite.

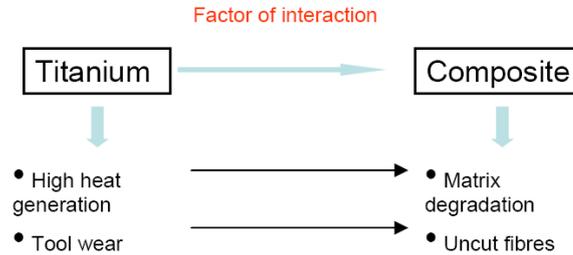


Figure 40 : Interactions dans le cas d'un perçage d'empilage titane vers composite [Roudgé_2008]

Dans le cas d'un perçage composite vers titane, le foret s'use dans le composite et sera par conséquent moins bon dans le titane, générant un échauffement de celui-ci qui peut dégrader la matrice au contact de la plaque. De plus la remontée des copeaux de titane chauds et coupants viendra rayer la paroi du trou en composite (Figure 41), ce qui dégradera de manière importante la qualité du trou. Néanmoins, dans cette configuration, lors du perçage, la plaque de titane assurera un support aux derniers plis du composite, réduisant leur flexion et par conséquent limitant de manière importante le risque de délaminage en sortie du trou [Qi_2014]. Montoya [Montoya_2013] a d'ailleurs simulé la température de la matière lors du perçage de l'empilage.

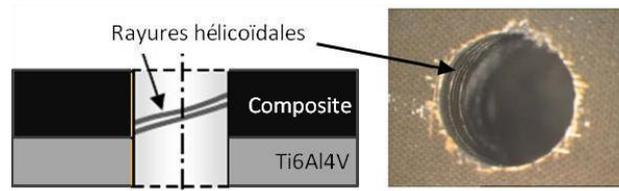


Figure 41 : Rayure dans la paroi du composite [Bonnet_2010]

Chacun des sens présente une problématique différente, la connaissance dans le perçage d'empilage n'est pas encore suffisante pour déterminer si l'un des deux sens est réellement plus simple que l'autre mais il convient d'étudier les deux directions pour avoir une vision d'ensemble du problème.

2 - 4 - QUALITE DU TROU

Afin de qualifier le trou réalisé, les critères sont sensiblement les mêmes que pour chacun des éléments séparés. Ainsi, la partie dans le composite ne doit pas comporter de délaminage ou

de matrice brûlée, la cote et la rugosité doit être respectée, il en est de même pour ces deux derniers points dans le titane, de plus il ne doit pas comporter de bavure.

Il est ainsi relevé que les dimensions varient différemment dans les matériaux en fonction des paramètres machine et des types d'outils. Il conviendra de prêter une attention particulière à ce point [Brinksmeier_2002 ; Shyha_2011]. La Figure 42 met en évidence le fait que des outils de mêmes diamètres produisent des trous de dimensions différentes en fonction de leurs aptitudes à couper les composites.

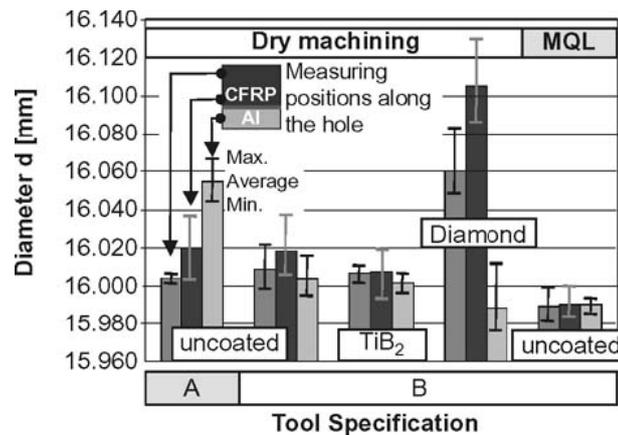


Figure 42 : Diamètres obtenus lors de perçage à l'aide d'outils WC-Co ayant divers revêtements lors de perçage d'empilage [Brinksmeier_2002]

La Figure 17 (p. 35) représente un profil dans le cas d'un perçage de Ti6Al4V/CFRP/Aluminium, nous pouvons remarquer que le diamètre évolue en fonction du matériau usiné, de plus nous pouvons visualiser des marques aux interfaces. Il conviendra de s'assurer du type de défaut présent aux interfaces car cela constitue un problème supplémentaire pour le perçage d'empilages.

2 - 5 - CONCLUSIONS

Le perçage d'empilage de composite à fibres de carbone et résine époxyde (CFRP) avec un métal est une problématique actuelle impulsée par le secteur aéronautique. Cela pose de nombreuses complications car le phénomène est encore peu contrôlé et analysé. Les prochaines années vont marquer une évolution certaine dans ce domaine au vu des progrès nécessaires pour maîtriser suffisamment le process.

Partie 2 - PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

Dans cette partie les protocoles expérimentaux développés au cours de la thèse sont présentés, ainsi que les essais préliminaires.

Chapitre 4 - METHODOLOGIE DES ESSAIS

1 - INTRODUCTION

Ce chapitre présentera les différents moyens matériels employés au cours de cette thèse, que ce soit la matière première, les outils, les machines-outils, les moyens de mesure, le traitement des données ou encore les moyens de contrôle des forets ou des trous.

2 - MATIERES PREMIERES ET OUTILS

Dans le cadre de cette étude, deux matériaux sont étudiés pour usiner un empilage : l'alliage de titane Ti6Al4V qui a subi un traitement dit β , et un composite à fibres de carbone lié par une résine époxyde, l'IMA M21E (qui sera nommé par la suite de manière indifférente CFRP, pour Carbon Fiber Reinforced Plastic, ou IMA M21E). Un lot de composite à fibres de carbone unidirectionnelles T800 M21 a également été employé dans le chapitre traitant du perçage du composite (Chapitre 9).

Les outils employés seront tous issus de trois lots, possédant tous la même géométrie définie dans le Tableau 6, correspondant à la référence SECO Tools de diamètre 12 mm pour le perçage des alliages de titane SD205A-12.0-56-12R1-T. Cette géométrie est issue de l'optimisation réalisée par Bonnet [Bonnet_2006] et correspond à la géométrie actuelle des forets SECO Tools pour percer les alliages de titane. Le lot d'outil employé par défaut est constitué de forets en carbure non revêtus (grade K20) et présentant une rainure derrière les listels permettant le passage de sondes thermocouples. Suit deux autres lots, un premier ayant la même géométrie (avec les rainures) et revêtu de diamant poly cristallin diamant (PCD), et le second, non revêtu, et sans les rainures derrière les listels.

| | |
|-------------------|----------------------------------|
| Référence | SD205A-12.0-56-12R1-T |
| Nature du carbure | Carbure de tungstène (grade K20) |
| Diamètre | 12 mm |
| Angle de pointe | 140° |
| Conicité arrière | 0.5 % |

Tableau 6 : Géométrie des forets employés dans l'étude

3 - MACHINES-OUTILS

Lors de cette étude, deux machines CN ont été mises en œuvre ; une fraiseuse 3 axes CN DMG 65 et un tour 2 axes CN Somab présentés sur la Figure 43.

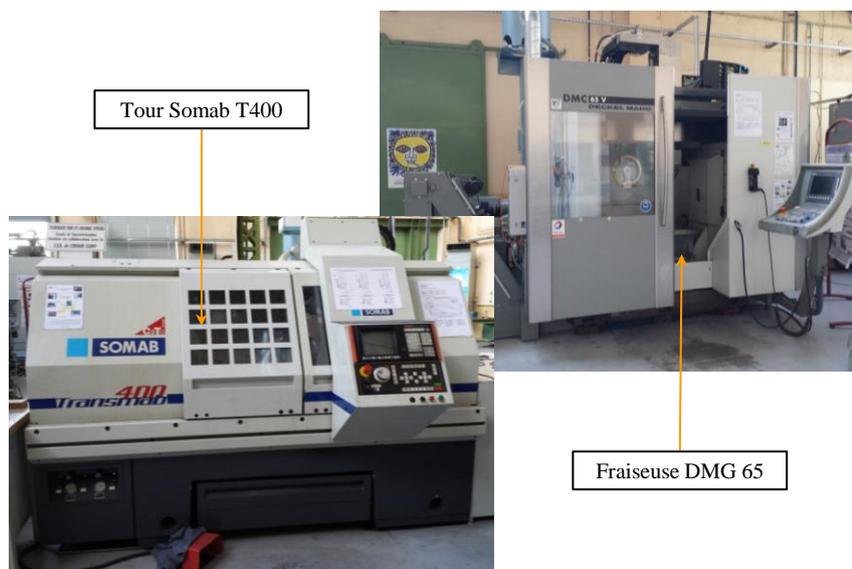


Figure 43 : Fraîseuse DMG65 et tour SOMAB T400 du LaBoMaP

La fraiseuse CN utilisé est une DMG 65 équipée d'une broche de 25 kW tournant à 18 000 tr/min et d'une commande numérique Siemens. Des sorties analogiques permettent à la CN d'envoyer ou de lire des informations de positions ou de vitesses. Ces sorties sont utilisées pour renvoyer les informations sur les conditions de coupe et la position de l'outil.

Le tour T400 de chez Somab est pour sa part équipé d'une broche montant à 8 000 tr/min et d'une commande numérique NUM. Les sorties analogiques présentes sont pré-câblées et renvoient des informations concernant la vitesse de broche et le courant du moteur de broche.

4 - MOYENS DE MESURE

L'ensemble des essais sont conduits avec des moyens de mesure mis en place lors de l'usinage, mais également des moyens de caractérisation des forets et des trous réalisés obtenus.

4 - 1 - MOYENS DE MESURE EN USINAGE

Les moyens de mesure en usinage passent par la mesure de signaux. Pour ce faire, un système d'acquisition a été acheté dans le cadre de cette thèse : le Châssis CompacDAQ NI 9188, permettant d'insérer jusqu'à huit cartes d'acquisition qui mesurent des signaux de manière synchrone jusqu'à 80 Mhz et les transfèrent à l'ordinateur via une connexion Ethernet. L'achat de cartes permettant d'effectuer des acquisitions de signaux analogiques de divers types à de hautes fréquences s'est fait en même temps que celui du Châssis CompacDAQ NI 9188. Ainsi trois cartes NI 9215 ont été achetées pour la mesure de signaux analogiques ($\pm 10V$) pour des fréquences allant jusqu'à 100 kHz. Une carte NI 9219, intégrant une compensation de soudure froide, a été acquise pour les relevés de températures à l'aide de thermocouples, pour des fréquences allant jusqu'à 100 Hz par voie. Une carte NI 9205 a été acquise pour la mesure de signaux analogiques ou la mesure de température pour des fréquences pouvant monter jusqu'à 250 kech/s (donc à diviser par le nombre de voies pour obtenir la fréquence maximale pour la carte) pour les deux natures de signaux (mais une résolution de 16 bits, ce qui donne environ $0.1^{\circ}C$ de résolution pour la température, et une absence de compensation de soudure froide).

L'ensemble de ces cartes de mesure permettent l'emploi de moyens de mesure d'efforts en usinage.

En tournage, une platine de mesure piézoélectrique Kistler 9121 couplée à un amplificateur de charge Kistler 5019 renvoie des informations sur les efforts d'usinage dans les trois directions de l'espace. L'Annexe 1 présente une procédure développée au cours de la thèse permettant la mesure des couples à l'aide de cette platine alors que ce mode de mesure n'est pas initialement prévu par le fabricant.

En Fraisage, le capteur rotatif Kistler 9123C est installé pour relever les efforts et le couple de coupe exercés sur l'outil en cours d'usinage.

La mesure des efforts en usinage s'effectue en parallèle de la mesure de position de l'outil dans l'espace machine.

Si sur la fraiseuse, la CN peut envoyer des informations de position de l'outil par rapport à la pièce, ces informations sont liées à la jauge outil et aux origines du programme. Or de petites erreurs de position peuvent exister, faussant les mesures ou les analyses. Dans la majeure partie des études effectuées en usinage, la détection du contact entre l'outil et la pièce s'effectue de manière approximative, en identifiant l'augmentation de la valeur du signal associé à l'effort de poussée (identification effectuée post-usinage).

Pour cette étude, un dispositif électrique de détection de contact entre l'outil et la pièce a été développé. Les deux principales contraintes de ce moyen sont l'isolation électrique de la pièce usinée par rapport à la machine ainsi que la vérification de la bonne conductivité électrique des roulements de broche.

Le tour utilisé pour l'étude ne permet pas le renvoi d'informations de position, il a donc été choisi de mettre en oeuvre un boîtier de dérivation des signaux issu des interpolateurs des règles optiques, permettant l'envoi des informations A, B, \bar{A} et \bar{B} sur une carte analogique. Le traitement de ces signaux après usinage a permis de déterminer la position de l'outil avec une résolution de 0.25 μm . La très grande résolution des règles après interpolation nécessite néanmoins d'acquérir les signaux à des fréquences très élevées, entre 20 kHz et plus de 50 kHz, en fonction des vitesses de déplacement souhaitées. Le temps de calcul nécessaire à l'obtention de la position est donc conséquent et ne peut être effectué en temps réel, au cours de l'usinage. Le même principe est utilisé pour déterminer la position angulaire de la broche.

Les conditions de coupe, les positions de l'outil par rapport à la pièce à usiner ainsi que les efforts de coupe sur le foret sont les principales informations relevées au cours des opérations de perçage.

4 - 2 - MOYENS DE MESURE ET DE CONTROLE DES OUTILS

Certaines mesures ou observations ne peuvent être effectuées en cours d'usinage, un certain nombre de moyens de contrôle ont été utilisés afin de suivre l'engagement du foret au cours des opérations de perçage. Ainsi un microscope Keyence VHX-600 Génération II, permet d'assurer un suivi des divers motifs d'usure, du collage ou de l'ébréchage des arêtes au cours des essais. L'outil est donc régulièrement sorti de la machine afin d'effectuer des observations sous plusieurs angles.

Le second moyen employé afin de suivre l'usure des arêtes est un dispositif de mesure de profils : le Surfascan de marque SOMITRONIC. La Figure 44 présente le montage spécifique développé dans le cadre de cette étude, qui permet le montage du foret ainsi que du capteur d'effort rotatif Kistler 9123C dans une position réglable et répétable. Différents profils le long de l'arête ont alors pu être relevés en fonction du nombre de trous effectués.

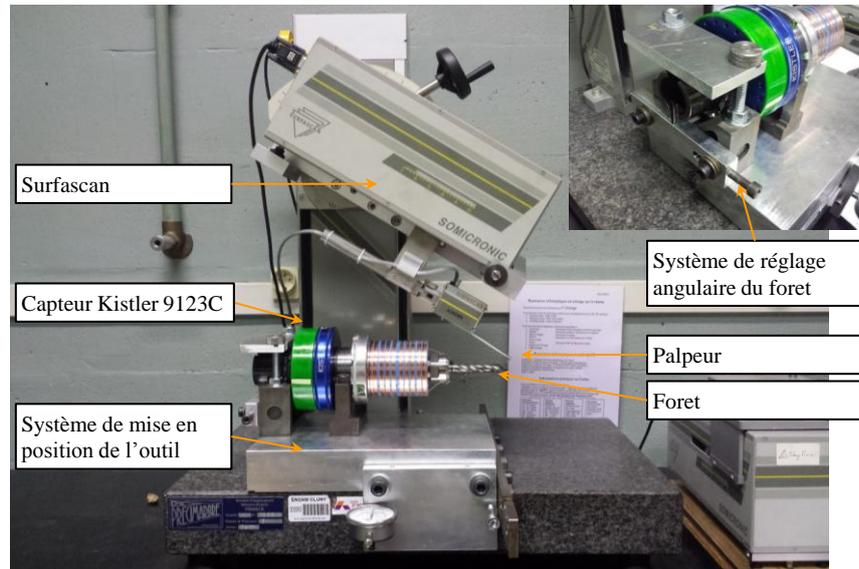


Figure 44 : Keyence avec montage spécifique

4 - 3 - MOYENS DE MESURE DES TROUS

Suite à la mesure en usinage et la mesure des outils, les caractéristiques des trous sont également mesurés.

Les moyens précédemment présentés (Keyence et Surfascan) sont également mis en œuvre afin d'effectuer des contrôles des trous.

Un mesureur de circularité Talyrond TR585 a également été acquis pendant l'étude, permettant une mesure de la cylindricité, ou encore de la rugosité circonférentielle.



Figure 45 : Talyrond TR585

5 - TRAITEMENT DES DONNEES

L'acquisition des données et le paramétrage des cartes d'acquisition ont été réalisés à l'aide des logiciels MAX et DasyLab.

L'ensemble des données collectées lors des essais sont ensuite traitées à l'aide de programmes Matlab développés dans le cadre de cette étude afin de répondre au mieux aux contraintes propres à chaque essais, telle que la dérive des capteurs piézoélectriques.

Chapitre 5 - ESSAIS PRELIMINAIRES

1 - QUALIFICATION DES OUTILS

Les trois types de foret retenus sont tous issus de trois lots de fabrication différents et ont été numérotés à leur réception afin de pouvoir assurer leur traçabilité. Afin de vérifier que les outils sont similaires dans un même lot, et ainsi assurer la pertinence des comparaisons entre les résultats issus des divers essais, des essais de qualification des outils sont menés.

Le choix du matériau à usiner s'est porté sur l'AU4G car les géométries des forets pour les alliages de Titane, notamment le Ti6Al4V, sont bien adaptées à la coupe des alliages d'aluminium. Pour ce faire, l'ensemble des outils a été qualifié lors du perçage d'un trou dans un alliage d'aluminium AU4G. Ces essais sont réalisés sur un tour CN Somab T400 et les outils sont instrumentés en effort à l'aide de la platine Kistler 9121 comme cela est visible sur la figure ci-dessous.

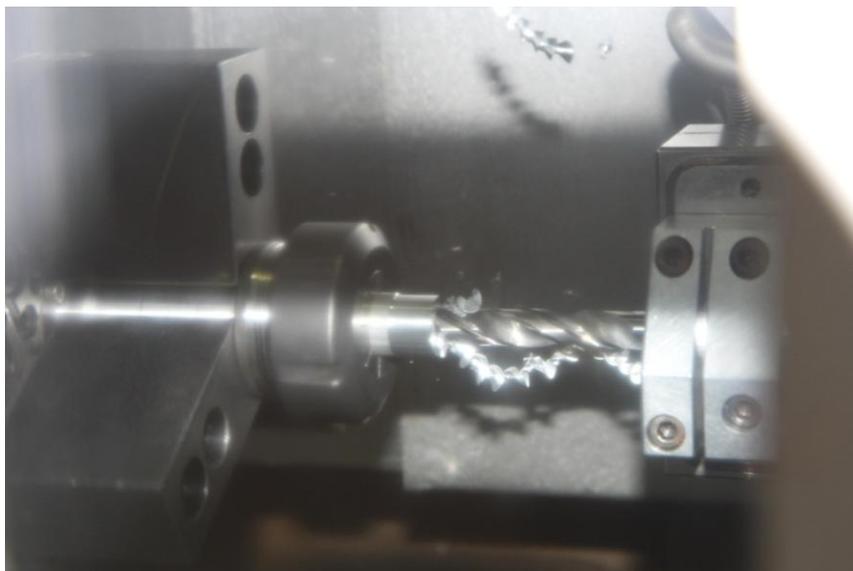


Figure 46 : Photographie en cours d'usinage de qualification des outils

1 - 1 - PRESENTATION DE L'EXPERIENCE

Le matériau usiné est en barre de diamètre 20 mm, tenu en pince, comme le montre la Figure 47. De plus, la bonne usinabilité de ce matériau devrait ne pas trop endommager notre outil.

Les conditions d'usinage retenues pour ces essais sont une vitesse de coupe de 200 m/min et une avance de 0.3 mm/tr pour une profondeur de perçage de 14 mm.

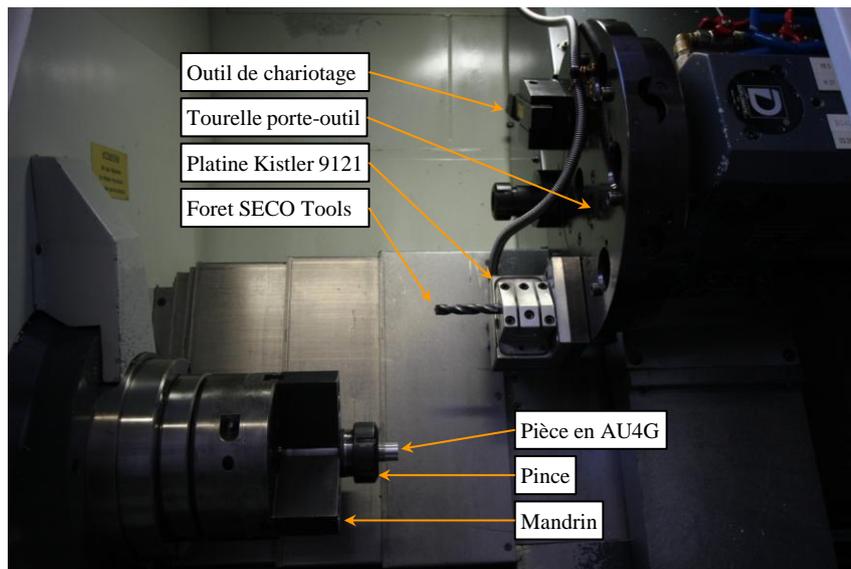


Figure 47 : Configuration de l'essai de qualification

La platine Kistler 9121 ne permettant d'obtenir que les signaux d'efforts, le couple fut relevé en mesurant une des sorties analogiques de la machine correspondant au courant de broche. A la mesure du courant en charge fut retranché la valeur du courant mesuré lors de la même opération à vide (mandrin tournant), afin de ne considérer que le couple induit par la coupe pure.

Afin de vérifier la validité des résultats obtenus, une campagne de répétabilité des essais a été conduite. Le foret en carbure non revêtu N°2 a été employé pour effectuer une série de 30 essais. Dans un premier temps, 15 trous ont été percés sans démonter l'outil ; puis les 15 trous suivants ont été percés en démontant le foret entre chaque perçage. Cela afin de simuler au mieux les changements d'outils menés lors de la qualification des outils.

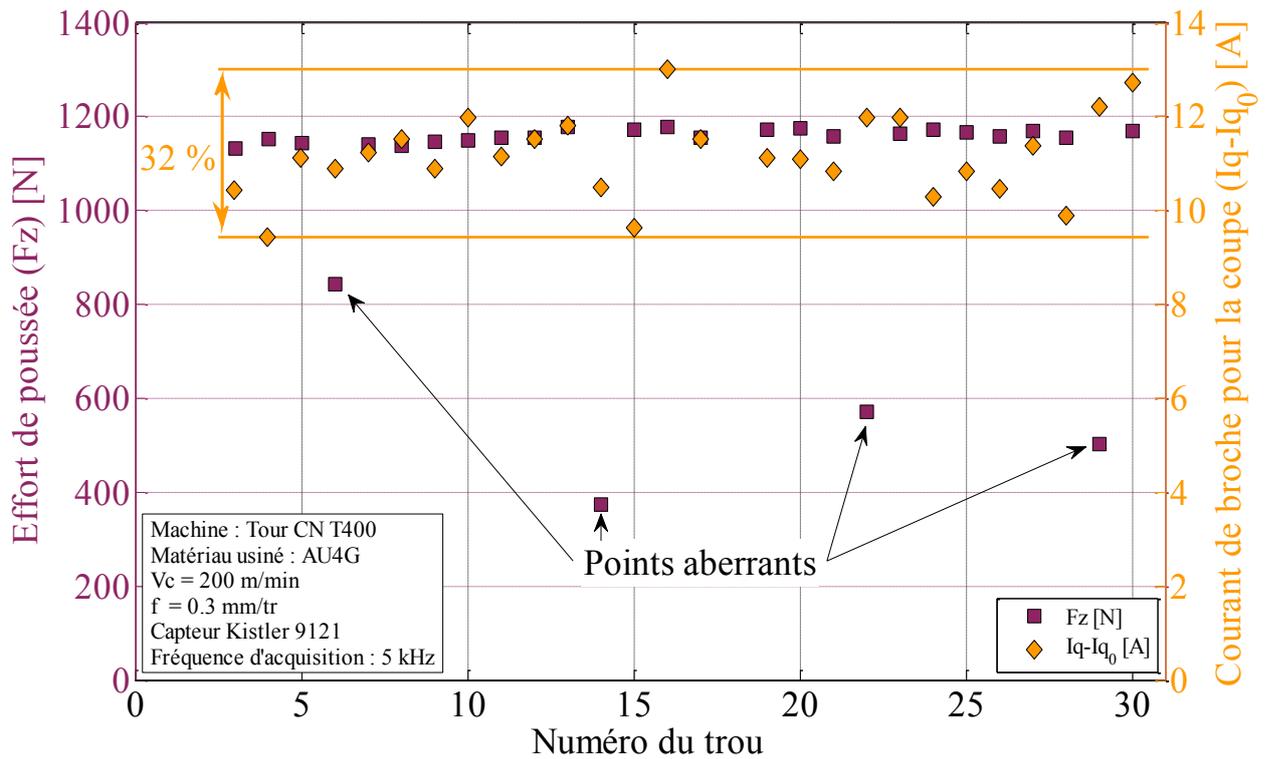


Figure 48 : Efforts de poussée sur le foret et courant de broche en fonction du nombre de trous percés

La Figure 48 indique que les valeurs des efforts de poussée semblent stables, exceptions faites des quatre points aberrants. Après un certain nombre de recherche, l'explication concernant l'apparition de valeurs aussi basses est liée à un problème de transmission du gain de l'amplificateur de charge Kistler 5019. Ce défaut ne fut plus relevé suite à l'envoi de la platine et de l'amplificateur associés en révision. Les valeurs liées au courant de broche ($I_q - I_{q_0}$) semblent pour leur part bien moins régulières, avec des variations de l'ordre de 30 % des valeurs relevées.

Ces irrégularités dans la mesure du courant de broche proviennent de deux facteurs, le temps de perçage qui est de 0.5 seconde environ (pour 14 mm de profondeur de perçage), ce qui est très court, ainsi que du temps de stabilisation du courant de broche qui est relativement important (environ 1 seconde). Le second point est que l'opération débute alors que la vitesse de rotation de la broche est stabilisée, néanmoins il manque quelques dixièmes de seconde pour que le courant de broche finisse de se stabiliser.

Les trente essais de répétabilité ont permis, en retirant les quatre valeurs aberrantes, de ressortir des valeurs associées à la répétabilité de cette mesure :

| | Effort de poussée (Fz) | Courant de broche (Iq-Iq ₀) |
|-----------------------------|------------------------|---|
| Valeur moyenne | 1159 N | 11.13 A |
| Valeur minimale | 1133 N | 9.44 A |
| Valeur maximale | 1178 N | 13.00 A |
| Ecart type | 13 N | 0.8786 A |
| 5×Ecart type/Valeur moyenne | 5.75 % | 39.48 % |

Tableau 7 : Statistiques associées aux efforts lors des essais caractérisant la répétabilité

La valeur $5 \times \text{Ecart type/Valeur moyenne}$ correspond à la demi disparité des mesures liées à l'ensemble de l'acquisition.

Par conséquent, lors des essais de qualification, les outils dont les efforts de poussée présenteront un écart inférieur à 5.75 % à la moyenne des efforts de l'ensemble des outils seront retenus. Le courant de broche est jugé non déterminant dans la qualification des outils, même si ce dernier est mesuré et présenté. Dans le cas où une mesure de l'effort de poussée est trop éloignée des valeurs moyennes, l'essai sera renouvelé afin de ne pas rejeter un outil à cause d'une mesure aberrante.

1 - 2 - RESULTATS DE LA QUALIFICATION DES FORETS

La Figure 49 présente les valeurs relevées pour les efforts et les courants de broche pour la coupe. Il est possible de noter que certains outils semblent s'éloigner des valeurs seuils définies précédemment. Le Tableau 8 présente les statistiques associées à ces essais (points aberrants exclus), et permet de définir les seuils d'acceptation des outils.

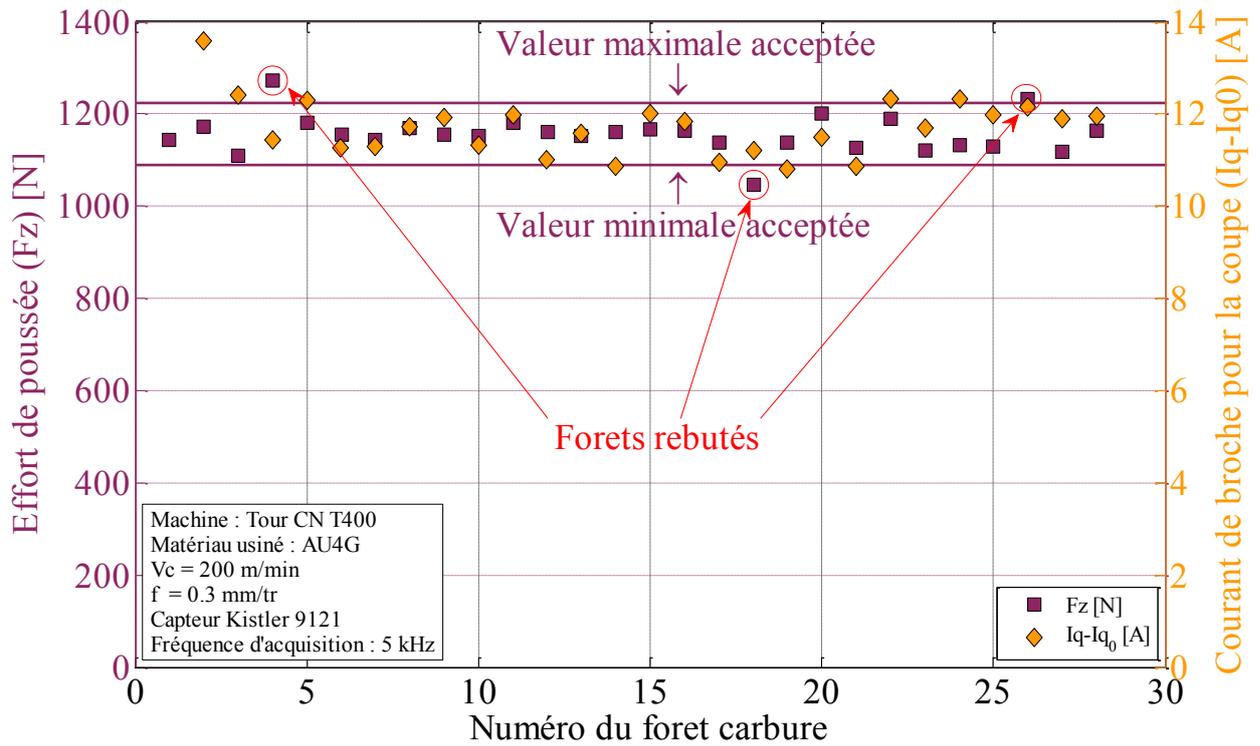


Figure 49 : Essais de qualification pour les outils WC-Co

| | Effort de poussée (Fz) | Courant de broche (Iq-Iq0) |
|-----------------------------|------------------------|----------------------------|
| Valeur moyenne | 1156 N | 11.82 A |
| Valeur minimale | 1045 N | 10.80 A |
| Valeur maximale | 1273 N | 14.56 A |
| Ecart type | 40.8 N | 0.922 A |
| 5×Ecart type/Valeur moyenne | 17.7 % | 39.00 % |
| Valeur minimale acceptée* | 1223 N | 16.50 A |
| Valeur maximale acceptée* | 1090 N | 7.16 A |

* Les valeurs minimales et maximales acceptées correspondent à la moyenne de l'essai, auquel est ajouté ou retranché l'écart maximal admissible défini dans la section 1 - 1 - Présentation de l'expérience, soit 5.75 %.

Tableau 8 : Statistiques associées aux efforts lors des essais caractérisant la répétabilité

Les outils qui sont considérés comme étant hors catégorie sont donc les outils suivants : N°4, 18 et 26. Cet écart dans les réponses en effort provient très probablement de légères différences d'affûtage.

La même démarche a été effectuée pour les outils revêtus de diamant. Les résultats sont présentés sur la Figure 50 et le Tableau 9.

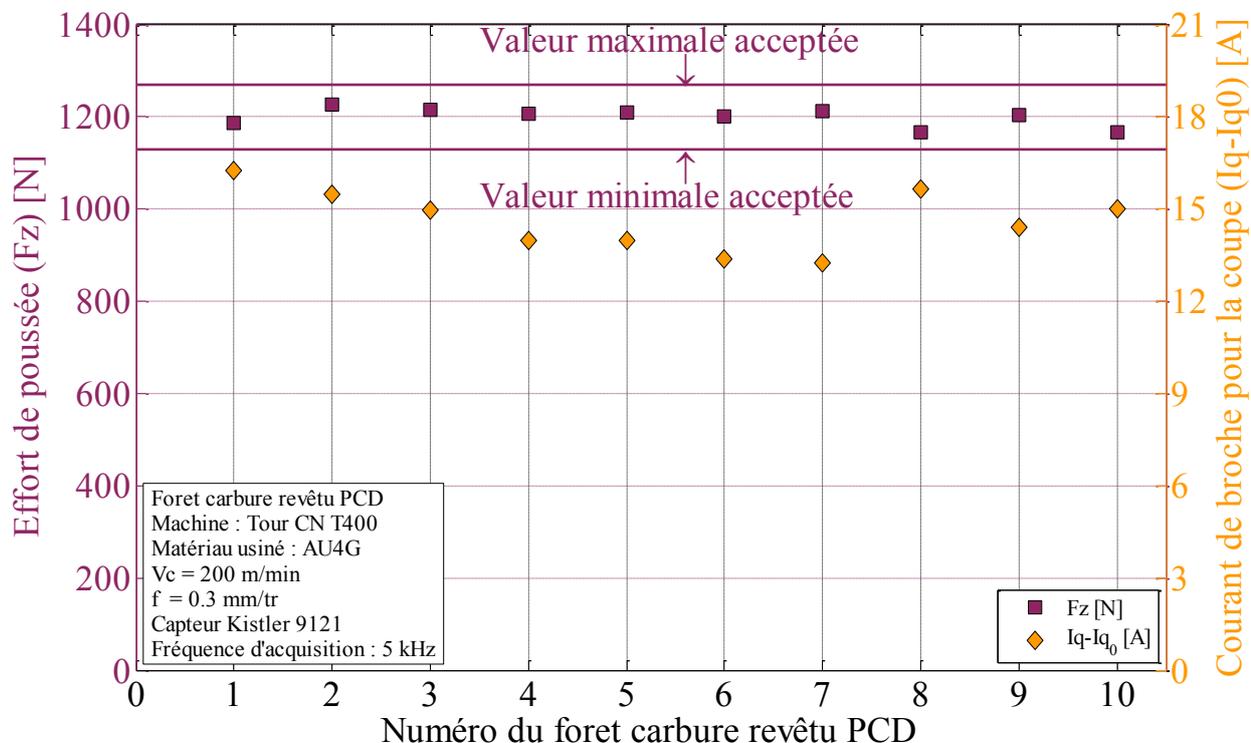


Figure 50 : Essais de qualification pour les outils revêtus PCD

| | Effort de poussée (Fz) | Courant de broche (Iq-Iq0) |
|-----------------------------|------------------------|----------------------------|
| Valeur moyenne | 1200 N | 14.64 A |
| Valeur minimale | 1168 N | 13.27 A |
| Valeur maximale | 1227 N | 16.25 A |
| Ecart type | 19.8 N | 1.00 A |
| 5×Ecart type/Valeur moyenne | 8.25 % | 34.20 % |
| Valeur minimale acceptée * | 1131 N | 8.86 A |
| Valeur maximale acceptée * | 1269 N | 20.42 A |

*Les valeurs minimales et maximales acceptées correspondent à la moyenne de l'essai, auquel est ajouté ou retranché l'écart maximal admissible défini dans la section 1 - 1 - Présentation de l'expérience, soit 5.75 %.

Tableau 9 : Statistiques associées aux efforts lors des essais caractérisant la répétabilité pour un outil revêtu PCD

Les valeurs étant beaucoup plus proches de la moyenne, aucun outil ne sera rebuté dans ce lot.

1 - 3 - CONCLUSION

Même si les deux lots sont assez homogènes, un total de trois forets fut rebuté sur le premier lot (forets carbures non revêtus).

Ces essais ont également permis de mettre en évidence que la mesure du couple par le relevé du courant du moteur de broche est une méthode expérimentale peu précise. Un autre moyen sera développé par la suite pour relever ces valeurs sur le tour CN et est présenté dans l'Annexe 1.

2 - EVOLUTIONS DE LA REPONSE DU CAPTEUR ROTATIF EN FONCTION DU TEMPS ET DES VITESSES DE ROTATION ET DE TRANSLATION

Lors des essais sur fraiseuse, la mesure des efforts se fera à l'aide d'un capteur rotatif Kistler 9123C. Ce dispositif de mesure, visible sur la Figure 51 permet d'acquérir les valeurs d'efforts dans les trois directions ainsi que la valeur de couple de manière plus simple qu'avec une platine (et ce, dans le repère outil).

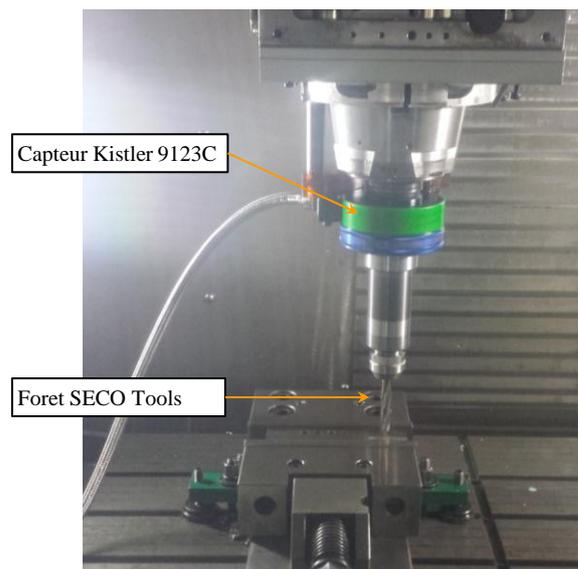


Figure 51 : Capteur rotatif Kistler 9123C

Diverses vitesses de rotation de la broche et d'avance seront testées au cours de cette étude, par conséquent, une étude préliminaire est réalisée, visant à déterminer l'impact des variations des conditions de coupe sur les valeurs de sortie du signal du capteur d'effort rotatif.

2 - 1 - EVOLUTION DU SIGNAL D'EFFORT AVEC LE TEMPS

Dans un premier temps, l'étude a porté sur la dérive du capteur lorsque la broche tourne et qu'aucun autre déplacement n'est effectué.

Les causes des variations du signal issu d'un capteur piézoélectrique peuvent provenir d'une dérive liée à l'amplificateur de charge (dérive électronique dont la pente maximale est garantie par le fournisseur, dans le cas du capteur rotatif, elle est de 1 à 2 N/s). Une seconde cause peut être liée à une élévation de la température du système qui, en se dilatant, va augmenter ou diminuer la précontrainte des capteurs piézoélectriques.

Les signaux liés à l'effort et au couple dérivent de manière quasi linéaire. Une répétition de ces essais a montré que les variations ne s'effectuent pas toujours dans le même sens (croissant ou décroissant), mais que cela suit toujours une loi affine (déviations constantes avec le temps). Ces essais ont également été menés sur les autres platines exploitées dans le cadre de cette étude et des résultats similaires ont été relevés.

Pour cette raison, dans la suite des essais, les données seront traitées à l'aide d'un programme Matlab, développé dans le cadre de cette étude, qui se chargera de compenser cette dérive de manière affine. Cette compensation se fera en considérant que l'outil hors matière ne subit pas d'effort (avant et après l'usinage). La dérive due à l'amplificateur de charge est donc aisément compensable si la dérive liée à une chauffe du système rotatif est négligeable (car cette dernière cause ne génère pas de dérive constante avec le temps). Ce traitement des données permet un gain dans la fiabilité des valeurs relevées car lors d'un essai de perçage, la déviation du signal peut atteindre 75 à 100 N en une minute.

2 - 2 - EVOLUTION DU SIGNAL DU CAPTEUR ROTATIF EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE

Comme le signal issu d'un capteur piézoélectrique peut varier avec le temps, il est envisagé qu'il puisse varier lorsque les conditions de coupe varient. Il a donc été choisi d'effectuer des essais de mesure d'efforts lorsque l'outil est hors matière et que les conditions d'avance et de vitesse de rotation de broche évoluent.

L'étude a porté dans un premier temps, sur la variation de la vitesse de rotation de la broche. Afin d'avoir une valeur nulle lorsque la broche est à l'arrêt, une remise à zéro liée à l'amplificateur de charge (« Operate ») est faite lorsque la broche ne tourne pas. La Figure 52 permet de visualiser les variations des efforts en fonction de la vitesse de coupe (la vitesse de coupe est calculée pour un outil de diamètre 12 mm).

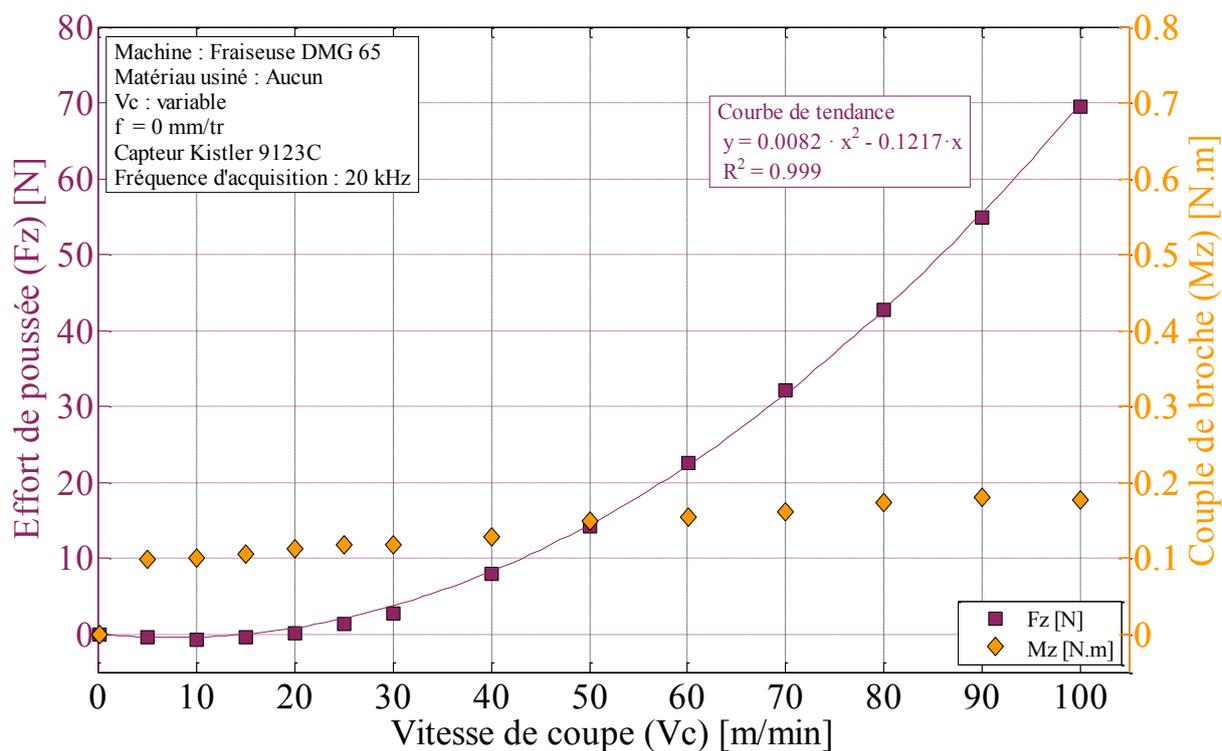


Figure 52 : Evolution des offsets de l'effort de poussée et du couple en fonction de Vc

La Figure 52 semble indiquer que l'offset de l'effort de poussée est nul ou négligeable pour une vitesse de coupe inférieure à 20 m/min, puis la variation de l'offset est plus importante et ne pourra plus être négligée lors d'un essai de perçage. Une loi polynomiale du second degré permet d'obtenir un coefficient de corrélation très proche de 1.

La même étude a été effectuée en faisant varier les vitesses d'avance, et aucun impact n'a été identifié sur les efforts ou le couple. Aucune compensation ne sera donc nécessaire si seule l'avance évolue. Ces vérifications préliminaires ont pour but de s'assurer de la validité des résultats recueillis et de permettre d'effectuer les corrections nécessaires. Dans le cas où l'un des paramètres devra varier, il sera plus aisé de faire varier uniquement l'avance par tour car il n'y aura pas de compensation à effectuer.

3 - COUPLE OUTIL MATIERE (COM) EN CONTINU

Afin de définir les conditions de coupe de l'opération de perçage pour la suite de l'étude, il convient d'effectuer un Couple Outil Matière (COM) [Norme NF E66-520_1997]. Le choix s'est porté sur la réalisation d'un COM en faisant varier les paramètres de manière continue. L'avantage de cette méthode est la diminution du nombre d'essais et donc de la consommation de matière et d'outils ainsi que l'obtention d'une courbe « continue » (à la fréquence d'échantillonnage de notre système) lors des variations d'un paramètre. La réduction du nombre d'essais pour cette étude préliminaire, mais néanmoins incontournable pour la suite de l'étude, est souvent un point important dans la plupart des études en usinage. Voilà pourquoi cette démarche spécifique a été utilisée dans cette partie.

3 - 1 - INTRODUCTION

Comme indiqué précédemment, afin de réduire le nombre d'essais, et donc la matière et les outils choisis pour cette étude, une variation des paramètres de coupe en cours d'usinage a été effectuée. Afin d'avoir un maximum de points et d'assurer un minimum de chocs pour l'outil, cette variation s'est effectuée en continu. Pour cela, le programme CN développé dans le logiciel AMC3 [AMC3_2009] breveté par le LaBoMaP [“Procédé pour optimiser les conditions de travail d'un outil coupant”_2009] a été mis en application. Le traitement des données, initialement effectué dans la CN par le programme protégé, a quant à lui été effectué à l'aide d'un programme Matlab spécifiquement développé au cours de cette thèse afin de pouvoir traiter les données issues notamment du capteur rotatif et ne pas se limiter aux courants des moteurs d'axes et de broches.

3 - 2 - PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Ces essais de perçage ont été effectués sur une fraiseuse DMG 85VL équipée d'une CN Siemens 840D, ce qui a permis l'usage du programme CN AMC3 [AMC3_2009] ainsi que le renvoi d'informations incluses ou calculées par la CN sur des sorties analogiques. Les informations de la position, mais surtout les conditions de coupe (V_c et f) ont ainsi pu être transmises à une fréquence de 333 Hz (ce qui correspond à la fréquence de l'interpolateur de la CN). Les efforts ont été mesurés à l'aide du capteur rotatif Kistler 9123C. L'ensemble de ces signaux sont renvoyés sur des cartes d'acquisition NI 9215 insérées dans un Châssis CompacDAQ NI 9188.

Les grandeurs enregistrées de manière synchrone sont les suivantes : le temps (s), les efforts (F_x (N), F_y (N), F_z (N), M_z (N.m)), les conditions de coupe (V_c (m/min), f (mm/tr)) et la position suivant l'axe Z (mm).

Les matériaux usinés pour le COM sont l'alliage de titane Ti6Al4V et le composite à fibre de carbone IMA M21E. Les plages de conditions de coupe sont décrites dans le tableau suivant :

| Matériau usiné | Ti6Al4V | IMA M21E |
|---|-------------------------------------|---------------------------------------|
| V_c (m/min) | 10 – 20 – 30 | 25 – 50 – 100 – 150 – 200 – 250 |
| f (mm/tr) | 0.1 à 0.3 | 0.01 à 0.2 |
| Lubrification | Usinage à sec | Usinage à sec |
| Conditions de coupe lors de la caractérisation de l'usure | $V_c = 10$ m/min $f = 0.2$ mm/tr | $V_c = 100$ m/min $f = 0.05$ mm/tr |

Tableau 10 : Conditions de coupe pour le COM

Le choix du paramètre évoluant de manière graduelle s'est porté sur l'avance par tour car des perturbations du capteur ont été remarquées lors de changements de vitesses de rotation de broche (Figure 52). Aucune compensation d'efforts liée à l'évolution des paramètres de coupe n'est nécessaire dans ce cas de figure (un essai à vide est effectué pour vérifier ce point).

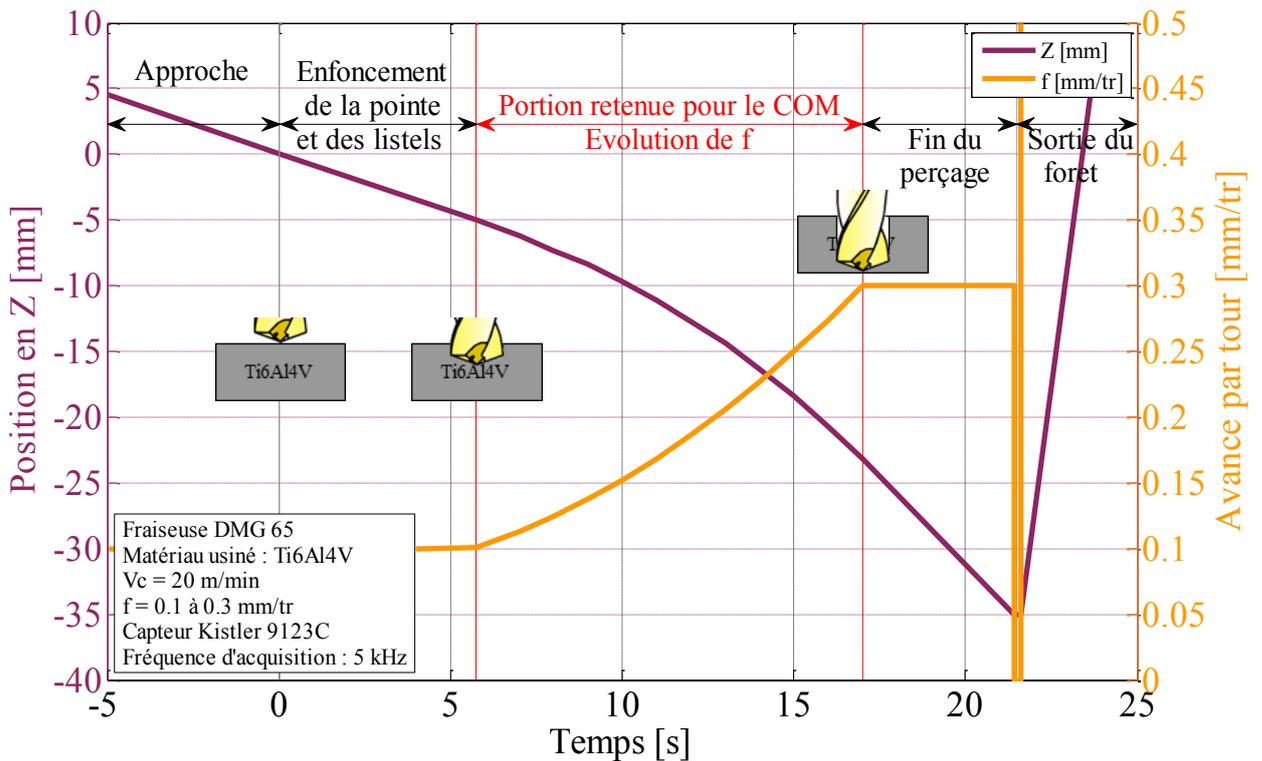


Figure 53 : Evolution des paramètres de coupe lors du COM, cas de f croissant dans le Ti6Al4V

Afin de limiter l'impact de l'usure du foret sur les valeurs d'efforts dans le COM, des essais de caractérisation ont été menés tous les deux trous dans le composite, ainsi qu'au début et à la fin des essais dans l'alliage de titane. L'ensemble des conditions de coupe retenues pour ces usinages sont présentées dans l'Annexe 2 pour le Ti6Al4V et l'Annexe 3 pour l'IMA M21E. Ces essais correspondent au perçage d'un trou à l'aide des conditions décrites dans le Tableau 10.

Dans le Ti6Al4V, les valeurs d'efforts de poussée et de couple de broche n'ont pas variés de manière significative entre l'essai n°1 et n°6. Aucune correction des valeurs relevées n'est donc effectuée.

Lors des essais de caractérisation dans le composite, les efforts sur l'outil présentent une évolution qui ne doit pas être négligée, comme cela est présenté dans la Figure 54. Par conséquent, un coefficient de correction de l'usure sera employé lors du dépouillement des essais de COM dans le CFRP.

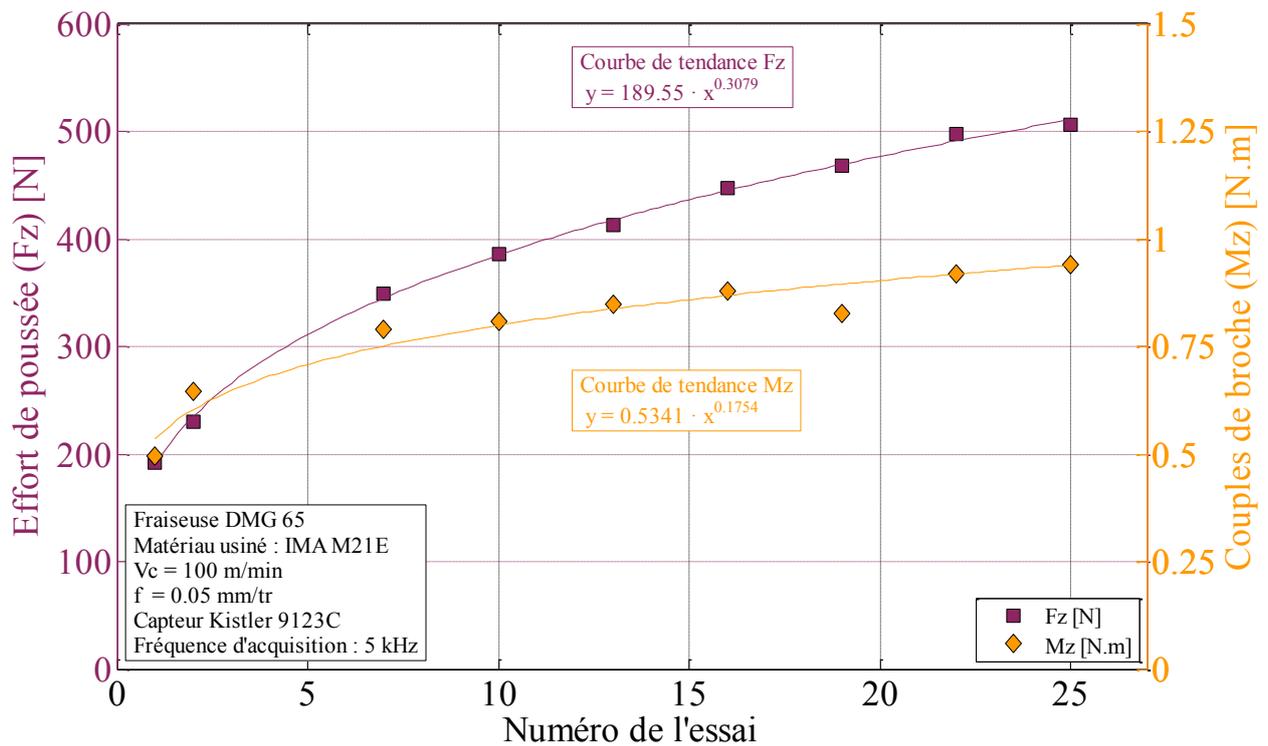


Figure 54 : Evolution des efforts dans les essais de caractérisation dans le CFRP

Une autre source d'erreur dans les résultats pourrait être un comportement du foret influencé par les constantes de temps thermiques et mécaniques. De plus, suivant le sens de l'évolution du paramètre, les résultats pourraient également varier à cause des inerties. Afin de limiter les risques liés à l'utilisation d'une évolution des paramètres, il a été choisi de les faire évoluer graduellement de manière croissante lors d'un perçage puis de manière décroissante lors du suivant afin de pouvoir comparer les résultats obtenus dans chacun des deux cas de figure.

Afin de pouvoir comparer les valeurs obtenues, les efforts et le couple sont convertis en efforts spécifiques de coupe. Les formules définies dans la norme sont les suivantes : [SANDVIK-COROMANT_2001]

$$K_{cp} = \frac{F_z}{0.5 \cdot D/2 \cdot f \cdot \sin k_r} \quad \text{avec } K_c \text{ en } N/mm^2 \text{ et le reste en unité usuelles}$$

$$K_{cc} = \frac{8 \cdot 1000 \cdot M_z}{f \cdot D}$$

K_{cp} (N/mm^2) correspondant à la pression de coupe calculée à l'aide de l'effort de poussée, et K_{cc} (N/mm^2) correspondant à la pression de coupe issue du couple de broche.

3 - 3 - PRESENTATION DES RESULTATS ET CONCLUSION

3 - 3 - 1 - RESULTATS POUR LE Ti6Al4V ET VALIDATION DE LA METHODE

Avant de considérer les résultats obtenus lors des essais réalisés avec des conditions de coupe variables, il est souhaitable de s'assurer que ces valeurs sont similaires à celles obtenues lors d'essais à paramètres constants afin de valider la méthode. En effet, un certain nombre d'éléments, tels que l'inertie mécanique ou thermique, pourraient impacter la validité de ces données.

Afin de permettre cette confirmation, un second foret est employé pour conduire une série de trous avec les conditions de coupe décrites dans l'Annexe 4.

Les essais de caractérisation permettent de s'assurer du niveau d'usure, et de le compenser si cela avait été nécessaire. La variation des niveaux d'efforts étant inférieure à 10 %, il a été choisi de ne pas compenser les valeurs relevées.

Afin d'effectuer la validation de la méthode de variation continue de paramètres, les valeurs des essais réalisés avec des conditions de coupe constantes et évoluant au cours du temps sont comparées sur la Figure 55. L'essai à f décroissant pour un V_c de 30 m/min n'est pas représenté car l'outil s'est cassé en cours de perçage et les valeurs d'efforts relevés ne sont donc pas représentatives.

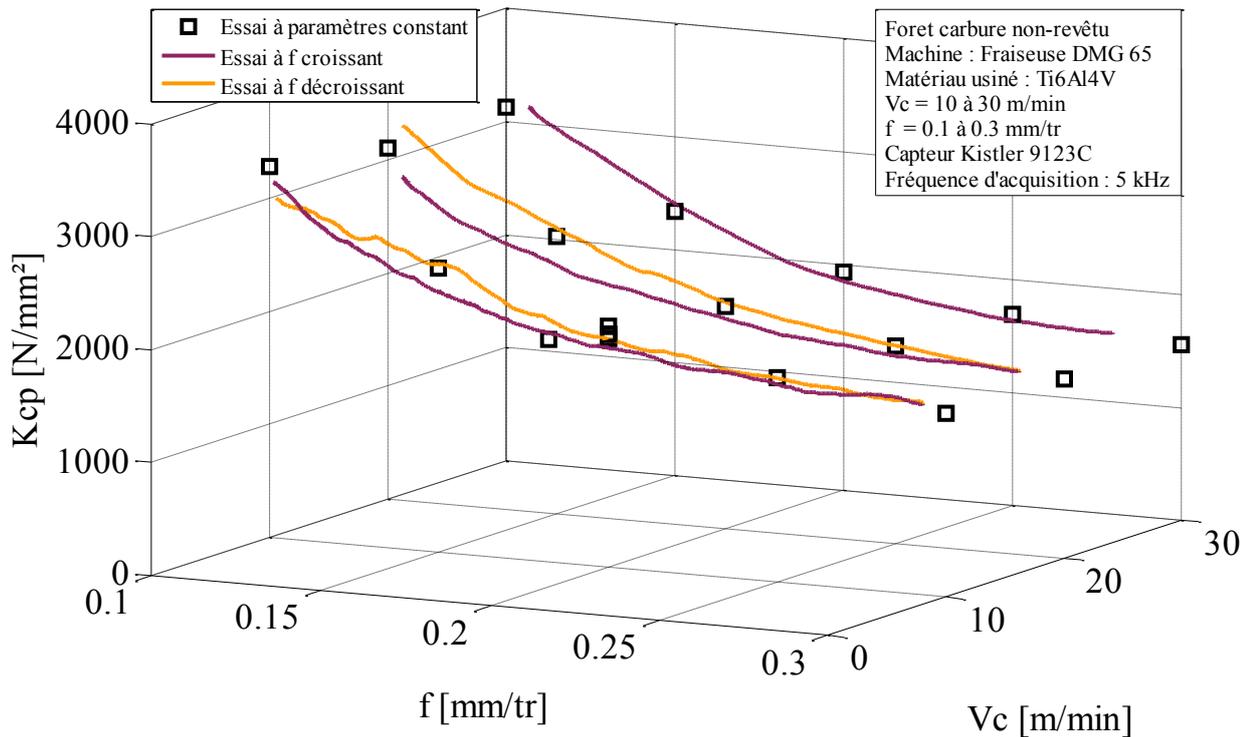


Figure 55 : Comparaison des valeurs de K_{cp} lors d'essais réalisés à l'aide de conditions de coupe fixes et variables

L'écart entre les valeurs relevées lors des deux campagnes d'essais est inférieur à 10 %, de plus l'ensemble des tendances sont conservées, ce qui permet de valider la méthode, des résultats similaires ont été relevés sur le K_{cc} .

L'ensemble de ces données permettent également de sélectionner les conditions de coupe qui seront retenues pour la suite de l'étude :

$$\begin{aligned} V_c &= 10 \text{ m/min} \\ f &= 0.2 \text{ mm/tr} \end{aligned}$$

Donc ces deux séries d'essais ont permis de déterminer les conditions de coupe à employer pour la suite de l'étude, ainsi que de confirmer la validité des résultats obtenus lors de mesures effectuées à l'aide de conditions de coupe évoluant au cours du perçage.

3 - 3 - 2 - RESULTATS POUR LE CFRP

Les essais précédemment présentés dans le composite permettent de définir une première plage de conditions de coupe. La Figure 56 et 57 permettent de visualiser en trois dimensions les pressions spécifiques K_{cp} et K_{cc} calculées à l'aide des efforts.

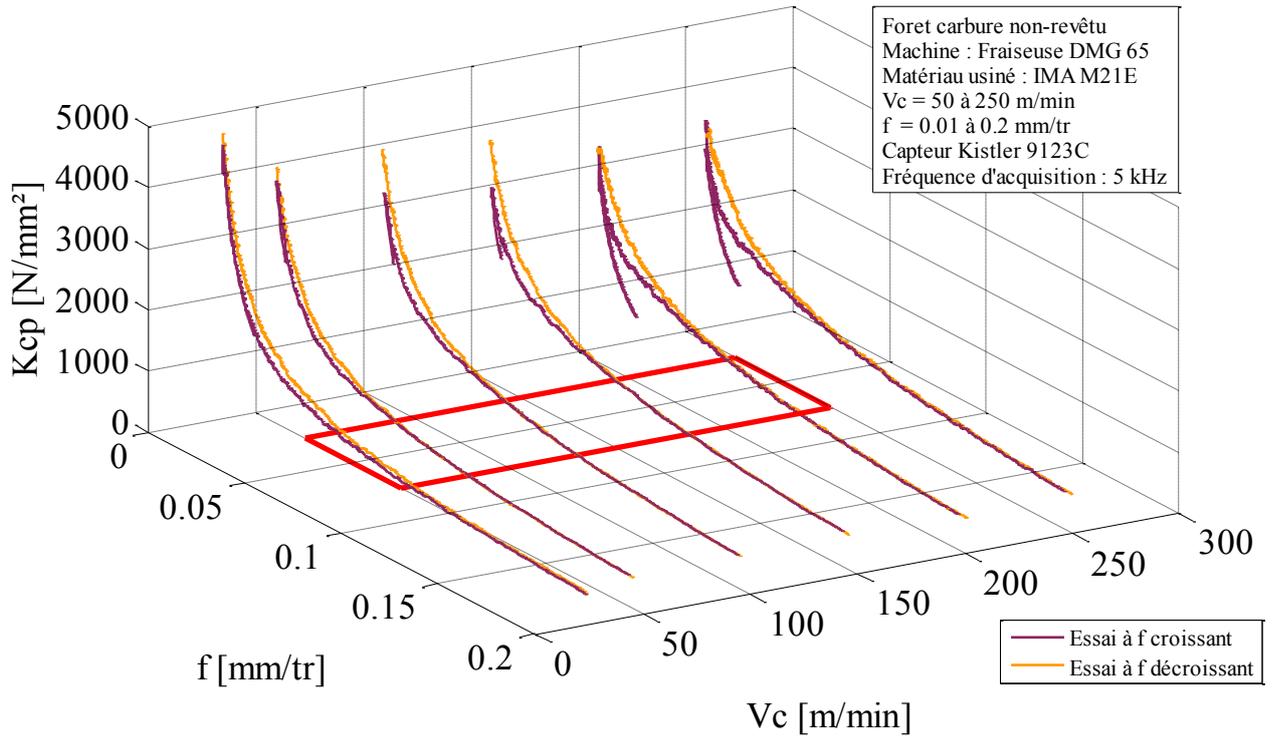


Figure 56 : Evolution de K_{cp} en fonction de l'avance et de la vitesse de coupe dans le CFRP

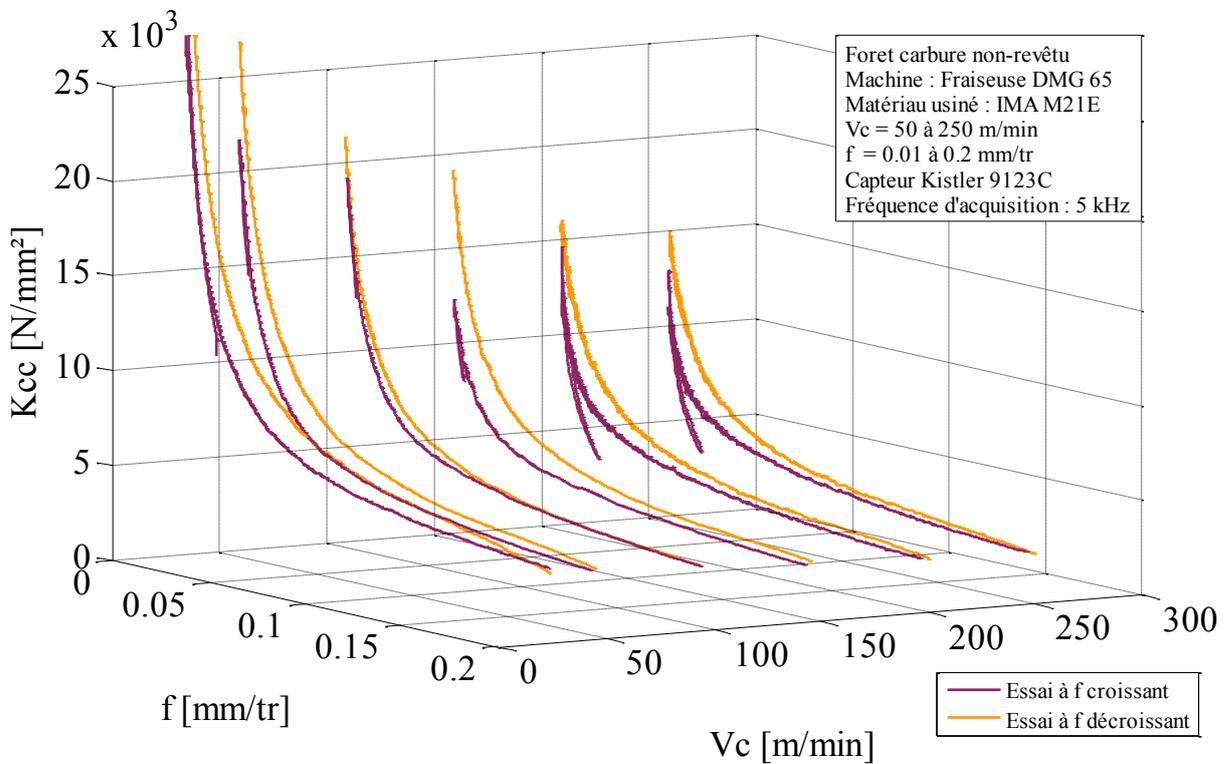


Figure 57 : Evolution de K_{cc} en fonction de l'avance et de la vitesse de coupe dans le CFRP

Il est intéressant de noter que les pressions de coupe sont toujours plus élevées lorsque l'évolution de f est décroissante. Une première approche pourrait conclure à un retard du signal des efforts, néanmoins il a été vérifié qu'un simple déphasage ne permettrait pas de recalcr les deux courbes.

Les pressions de coupe évoluent de manière plus importante avec l'avance plutôt que la vitesse de coupe. En traçant les K_{cp} et K_{cc} en fonction de f pour l'ensemble des essais effectués, la valeur du f_{min} se situe approximativement à 0.05 mm/tr (rectangle sur la Figure 56). Cette valeur d'avance est donc retenue dans un premier temps afin de relever le $V_{c_{min}}$, permettant de fixer ensuite de manière précise la valeur de l'avance pour la suite de l'étude.

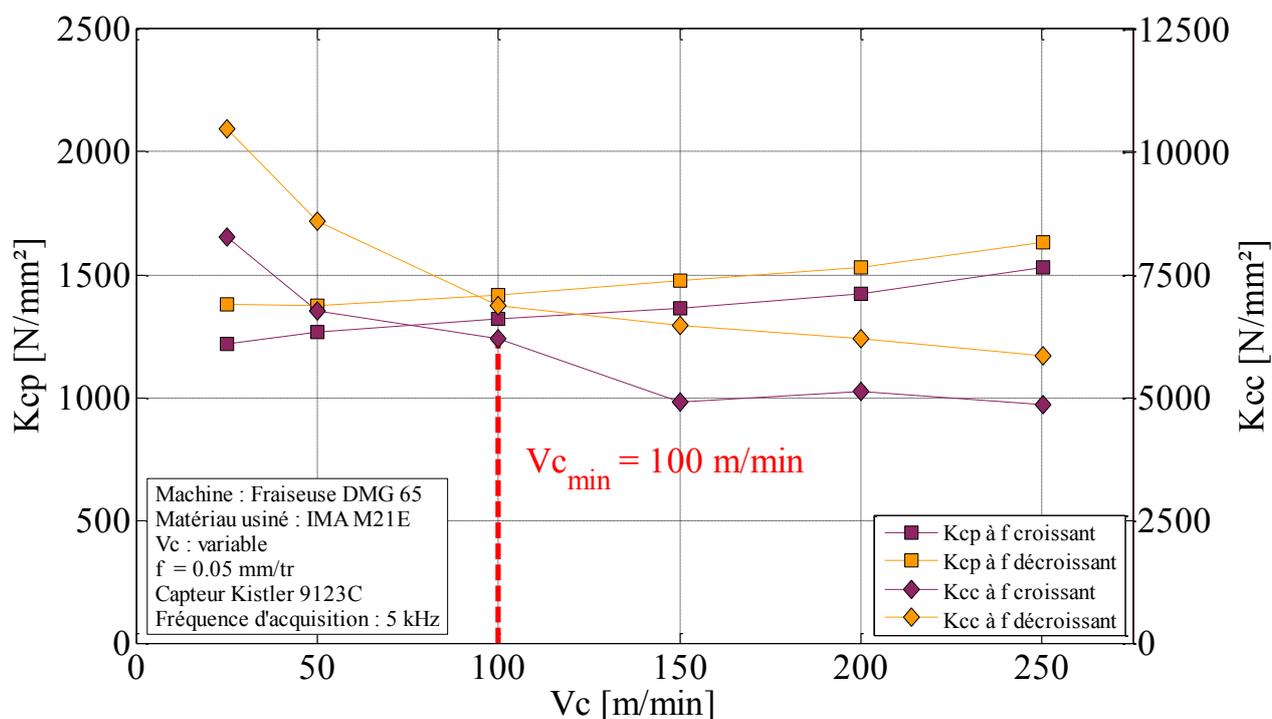


Figure 58 : Evolution de K_{cp} et K_{cc} en fonction de V_c pour une avance fixée à 0.05 mm/tr

Les données ont ensuite été traitées afin de tracer les points correspondant aux efforts spécifiques de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour une vitesse d'avance proche de 0.05 mm/tr, comme cela est présenté sur la Figure 58. Pour obtenir ces valeurs, une moyenne est effectuée sur les efforts mesurés pour une avance comprise entre 0.045 mm/tr et 0.055 mm/tr lors des essais à f variable, puis les efforts spécifiques de coupes sont calculés.

Si les efforts spécifiques de coupe obtenus à l'aide des efforts de poussée (K_{cp}) ne semblent pas présenter d'intérêt pour le choix de la vitesse de coupe. Le K_{cc} semble décroître en dessous de 100 m/min puis se stabiliser au-delà.

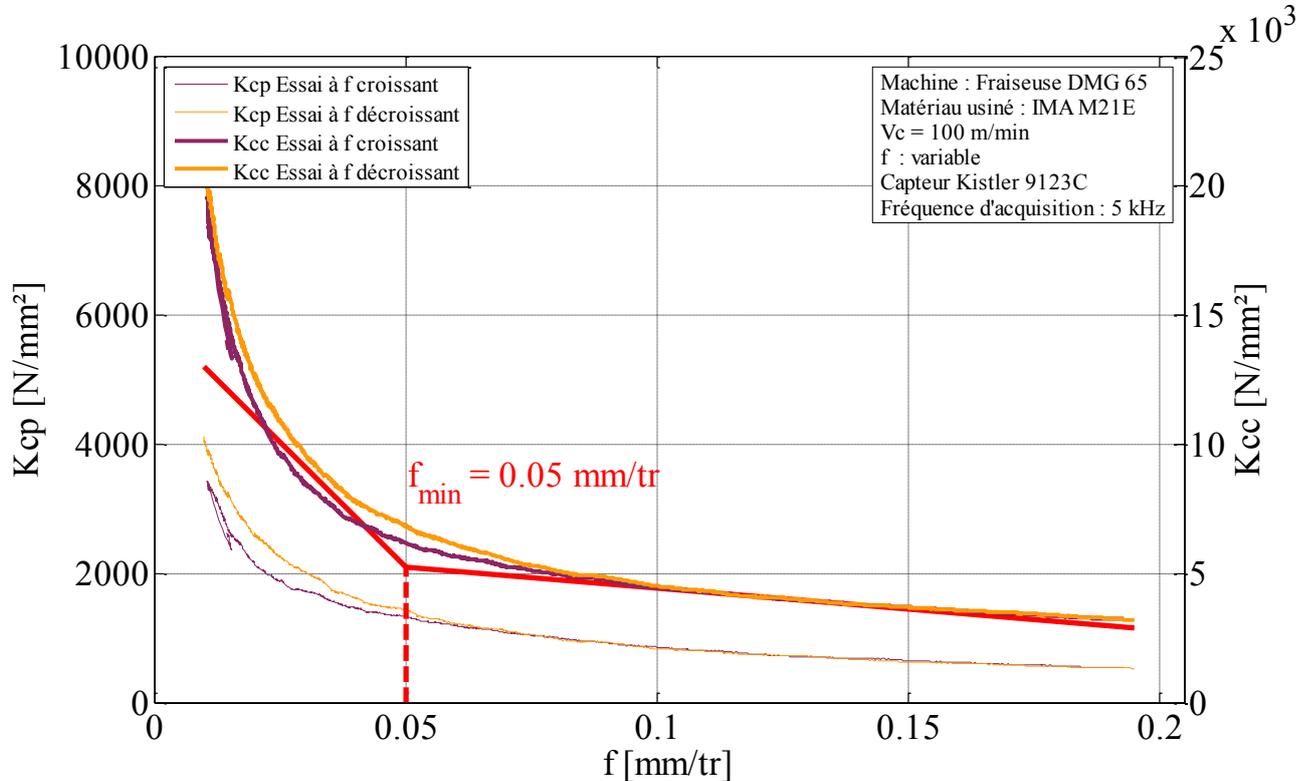


Figure 59 : Evolution de K_{cp} et K_{cc} en fonction de l'avance dans le CFRP

La vitesse de coupe retenue à 100 m/min, il convient d'observer de manière plus fine les courbes obtenues pour ces conditions opératoires. La Figure 59 reprend les données de K_{cp} et K_{cc} présentées dans la Figure 56 et 57 afin de pouvoir au mieux sélectionner la vitesse d'avance propice à la coupe du composite. L'avance minimale (f_{min}) se situe entre 0.04 et 0.05 mm/tr. Le choix s'est donc porté sur une avance de 0.05 mm/tr pour la suite de l'étude.

Ce choix d'une vitesse d'avance relativement faible permet également de limiter les risques de délaminage en sortie du composite.

3 - 4 - CONCLUSION

L'ensemble des essais et le traitement des données associées ont permis la validation de la méthodologie du COM en faisant varier les paramètres. De plus les conditions de coupe suivantes ont été retenues pour la suite de l'étude :

| | |
|-----------|---------------------------|
| Ti6Al4V : | $V_c = 10 \text{ m/min}$ |
| | $f = 0.2 \text{ mm/tr}$ |
| CFRP : | $V_c = 100 \text{ m/min}$ |
| | $f = 0.05 \text{ mm/tr}$ |

Les courbes des pressions de coupe ont également pu mettre en évidence que les domaines de validité des conditions de coupe des deux matériaux sont disjoints. Il ne sera donc pas envisagé par la suite d'effectuer des perçages d'empilage à des conditions de coupe constantes.

Chapitre 6 - MESURES DES TEMPERATURES EN PERÇAGE

1 - INTRODUCTION

L'une des clefs pour comprendre les performances de la coupe réside dans la mesure de la température [Davies_2007]. Ces mesures peuvent permettre de déterminer à la fois les propriétés de la pièce et de l'outil comme l'a indiqué Taylor [Taylor_1906] et Barrow [Barrow_1973]. Si la plupart des études sur la température ont pour but une amélioration de la qualité de la surface finie, notamment en maîtrisant la dureté de l'outil et du matériau usiné comme l'a montré Brinksmeier [Brinksmeier_1996], la température sur l'outil permet de mieux comprendre les phénomènes d'usure. Les réactions chimiques et l'adoucissement dépendent grandement de la température au niveau de l'arête et de la zone de cisaillement primaire.

L'origine de l'étude de la température lors d'un procédé d'usinage remonte à 1798 avec les travaux de Rumford [Rumford_1798] présentant des expériences réalisées à l'aide de calorimètres. Ces travaux étaient précurseurs car il faudra attendre 1906 pour que l'étude de la température soit à nouveau étudiée par Taylor [Taylor_1906]. Les études dans le domaine restent relativement rares, celles-ci ne s'accéléreront que dans les cinquantes dernières années. Quinn [Quinn_1983], Childs [Childs_2001] et Nicholas et White [Nicholas_2001] ont défini un ensemble de facteurs à considérer pour définir les dispositifs de mesures de température les plus adaptés en fonction des configurations.

1 - 1 - MOYENS DE MESURE DE TEMPERATURE EN USINAGE

Des dispositifs employant des phénomènes thermo-physiques ou thermochimiques constituent les procédés qui peuvent être les plus simples à mettre en œuvre avec l'emploi de peintures thermosensibles qui changent de teinte avec la température. D'autres procédés thermo-physiques bien plus complexes sont également employés, notamment par Trent [Trent_1988, 2000], qui a étudié la dureté du matériau usiné ainsi que de l'outil, les transformations de

phases de la pièce et du copeau ainsi que la couleur de ce dernier afin de remonter au profil thermique de l'outil, du copeau et de la pièce. Ces dispositifs sont généralement considérés comme semi-invasifs.

Deux méthodes invasives sont relevées, la première est l'emploi de thermistances, principalement en platine. Yoshika [Yoshioka_2004] a utilisé de tels dispositifs pour la mesure de température en usinage, les principaux avantages résident dans le fait que cette méthode est peu coûteuse, précise et relativement simple à employer, néanmoins les sondes ont une taille importante et donc une constante de temps importante (de 2 à 20 secondes), de plus les plages de températures sont relativement limitées.

La seconde grande famille de sondes employées afin de mesurer la température est constituée par les thermocouples. Ces capteurs se caractérisent par l'exploitation de l'effet Seebeck, découvert en 1821 par Thomas Johann Seebeck, qui se traduit par l'apparition d'un potentiel à la jonction de deux matériaux lorsque ceux-ci sont soumis à un gradient de température. Les principaux avantages de ces sondes résident dans la facilité de mise en œuvre et le coût réduit. Les constantes de temps sont bien inférieures à celles relevées par les résistances (inférieures à la seconde), mais la dimension reste importante face aux systèmes non intrusifs.

Si les thermocouples sont souvent utilisés comme des sondes de température, le thermocouple naturel formé par l'outil et la pièce au niveau de la zone de coupe peut également être employé [Barrow_1973].

La dernière grande famille de techniques expérimentées pour la mesure est la thermométrie par rayonnement spectral. Cette méthode non invasive, détermine la température d'un corps en fonction de son émission. La longueur d'onde et l'émissivité permettent de déterminer la température du corps visé par le capteur, néanmoins ces valeurs fluctuent de manière importante en fonction du matériau considéré comme l'a montré Childs [Childs_2001], Nicholas et White [Nicholas_2001].

1 - 2 - DISPOSITIFS DEVELOPPES POUR LE PERÇAGE

Le développement de dispositifs de mesure de température en perçage est un challenge technologique. Le premier dispositif décrit dans la littérature date des années 1950 par Schmidt [Schmidt_1949], qui a développé un dispositif à calorimètre.

L'analyse de la microstructure des outils et des pièces usinées ont également permis de déterminer des températures, ainsi Mills [Mills_1981] et Thangaraj [Thangaraj_1984] ont pu

déduire des températures allant de 600 à 900°C pour des outils en ARS. Plus récemment, Reissing [Reissig_2004] a analysé à l'aide d'un MET la surface usinée en Ti6Al4V afin de déterminer la concentration en vanadium de la phase β .

L'emploi de la thermométrie infrarouge peut être implémentée directement lors de l'usinage traditionnel, car les outils et les surfaces usinées sont directement accessibles, ce qui n'est pas le cas en perçage qui est une opération fermée. Pour cela, la mesure a pu être effectuée au niveau du bord de la pièce, notamment par Dörr [Dörr_2003], puis des fibres optiques infrarouges ont été développées, ce qui a permis de mesurer la température en usinage à des distances de l'ordre du millimètre de la surface usinée [Belotserkovsky_1994].

Les mesures de pièces usinées ont également pu être menées à l'aide de thermocouples, notamment de type K, ainsi Zeilmann [Zeilmann_2006] les a placés à 0.2 mm de la paroi du trou à plusieurs profondeurs, permettant ainsi de déterminer le gradient de température dans la pièce.

Les thermocouples ont également été mis en œuvre dans des études portant sur la température de l'outil, ainsi, De Vries [DeVries_1967, 1970] a pu mesurer la température de la face de dépouille du foret à l'aide de thermocouple fer-constantan. Ce type d'étude se poursuit encore aujourd'hui [Risse_2005]. Une approche particulière de l'emploi des thermocouples a également pu être menée par Bono [Bono_2002] qui a percé une pièce dans laquelle une feuille métallique était introduite, créant un thermocouple dynamique entre l'outil et la feuille percée. Cette approche a permis de remonter aux températures en fonction du rayon, la zone de contact entre l'outil et la feuille du thermocouple parcourant l'ensemble de l'arête.

Pour finir, la méthode inverse est également employée, notamment par Bataglia et Kusiak [Battaglia_2005 ; Kalidas_2002], qui ont pu estimer les flux de température interne durant le perçage et ainsi prédire l'usure de l'outil.

2 - PROBLEMATIQUE

Un des points importants à maîtriser lors de l'usinage, quel que soit le matériau usiné et usinant, est les températures de coupe car les phénomènes mécaniques, mais surtout métallurgiques et chimiques en dépendent fortement. Trois aspects thermiques peuvent être étudiés, le premier concerne la pièce et son élévation de température au cours de l'usinage. La surface usinée étant ce qui est vendu, il convient de respecter un certain nombre de contraintes géométriques (dimensions, état de surface ...), mais également d'un point de vue microstructure de la matière, or cette dernière est fortement impactée par les élévations de températures ainsi que les contraintes subies. La seconde étude de température correspond à celle du copeau formé, il a en effet été possible, à l'aide de l'étude des phases contenues dans les copeaux de remonter aux températures atteintes. Si la connaissance de ces températures ne permet pas de remonter directement à la pièce, cela permet néanmoins de comparer des usinages ou de remonter aux températures dans l'outil et la pièce usinée à l'aide de simulations ou de méthodes inverses. Le dernier point qui peut être étudié est la température au sein de l'outil. L'élévation de la température de l'outil impacte sa durée de vie, car les affinités chimiques et les propriétés mécaniques sont conditionnés par la thermique.

Le choix s'est porté sur le développement de moyens de mesure de température dans le foret.

Afin de déterminer des flux ou des cartographies de température dans l'outil, il convient dans la plupart des cas d'instrumenter des forets à l'aide de sondes de température. Le choix s'est porté sur des thermocouples gainés de type K ayant un diamètre de 0.5 mm. Afin de pouvoir définir au mieux ces flux de températures, il a été choisi de placer six thermocouples dans chacun des forets instrumentés.

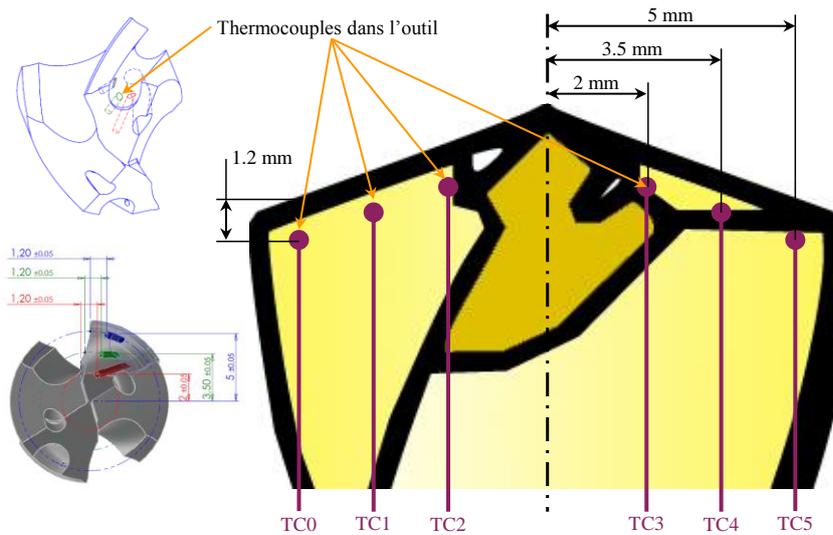


Figure 60 : Position des trous pour l'implantation des thermocouples dans le foret

La Figure 60 présente l'emplacement de trois orifices ayant servi à loger les thermocouples, les trois autres sont disposés de manière symétrique sur l'autre arête du foret. Il est également possible de visualiser une partie des deux rainures hélicoïdales usinées derrière les listels afin de permettre le positionnement des fils thermocouples sur l'outil sans que cela ne perturbe l'usinage. Le fait de placer plusieurs thermocouples sur le rayon de l'outil permet d'évaluer l'écart de température le long de l'arête en usinage et de s'assurer qu'il n'y a pas d'évolution importante, ce qui générerait des contraintes supplémentaires dans l'outil. Un thermocouple est placé à proximité de l'âme afin de mesurer la température dans cette zone où le foret ne coupe pas ou peu et poinçonne principalement la matière. Le thermocouple à proximité des becs permet de mesurer la température générée par la coupe à ce niveau, mais également par le frottement des listels le long de la paroi du trou. Le fait de placer des thermocouples de manière symétrique permet à la fois de vérifier que les valeurs lues ne sont pas aberrantes, mais également de s'assurer, en lien avec les efforts dans les directions x et y, que l'outil est bien équilibré au niveau de l'affûtage. Un déséquilibre se traduirait par des efforts perpendiculaires à l'axe du foret et à des températures plus élevées sur une arête.

Trois configurations de mesures ont été employées au cours de cette thèse. La première est l'emploi d'un foret fixe et d'une pièce tournante, sur un tour. La seconde est le développement de trois systèmes de mesure de température avec un outil tournant. Le dernier moyen mis en œuvre est la coupe de fils thermocouples implantés dans la pièce, associé à une acquisition haute fréquence.

3 - MESURE DES TEMPERATURES EN PERÇAGE SUR TOUR

La première méthode pour mesurer la température dans l'outil consiste à utiliser un outil fixe et faire tourner la pièce. Ce type de dispositif est le plus simple pour mesurer les températures dans l'outil. La Figure 61 présente le dispositif mis en place lors des essais. Contrairement à Babur [Ozcelik_2006], le montage a été réalisé sur tour.

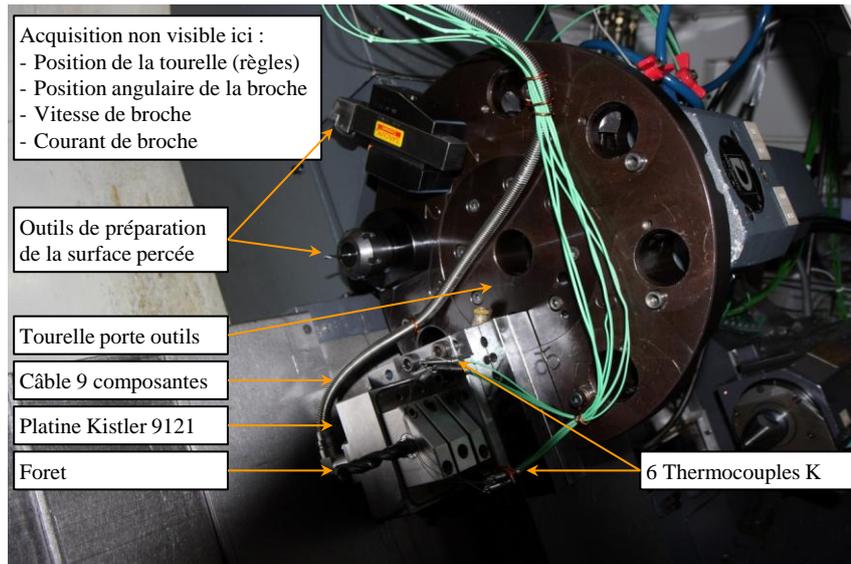


Figure 61 : Essai de perçage instrumenté en température sur tour

3 - 1 - PRESENTATION DU SYSTEME

Les essais réalisés ont permis de mener des essais de perçage du Ti6Al4V avec un relevé de la position de l'outil par rapport à la pièce, l'acquisition des efforts exercés sur l'outil (trois efforts et le couple suivant l'axe de broche), ainsi que la température en six points de l'outil. La fréquence d'acquisition de la température est de 100 Hz, ce qui permet de bien identifier les phases transitoires. La Figure 62 présente le relevé de température lors à une vitesse de coupe de 10 m/min et une avance de 0.2 mm/tr. Les courbes représentent les températures relevées par les thermocouples au niveau du bec, au milieu de l'arête et de l'âme.

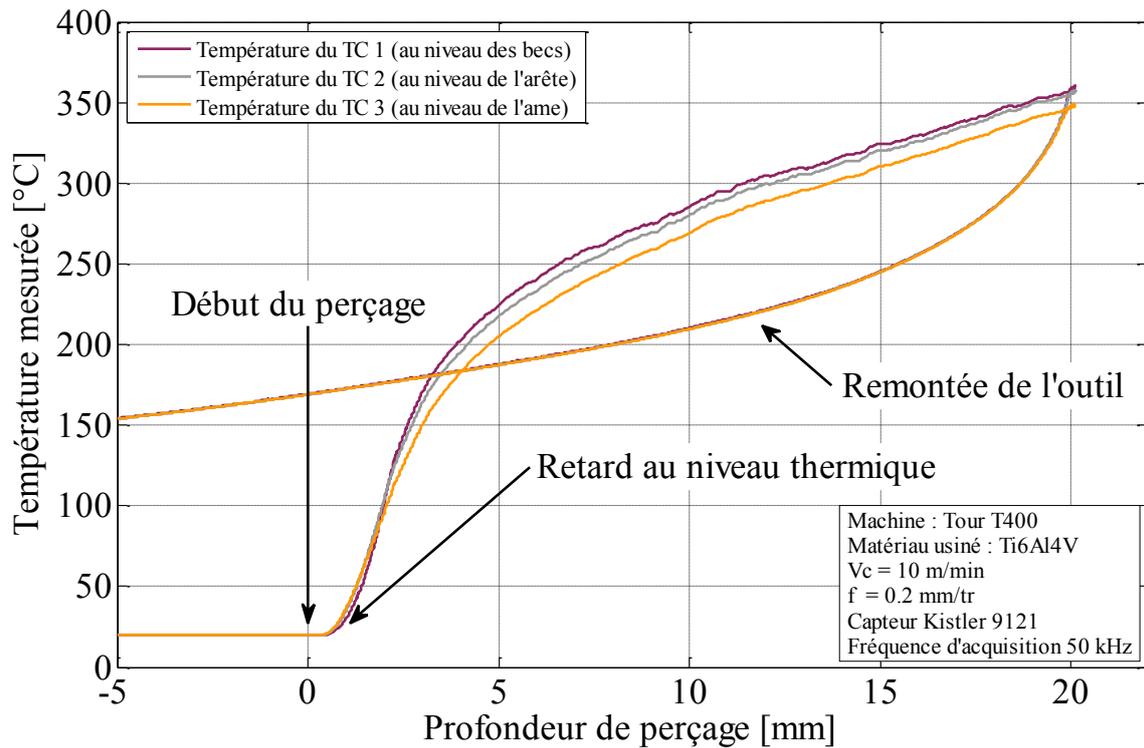


Figure 62 : Relevé de température lors du perçage de Ti6Al4V sur tour en trois points de l'arête

3 - 2 - PROBLEMES RENCONTRES ET SOLUTIONS APORTEES

Les problèmes techniques liés à la mise en place des essais sont détaillés dans le Chapitre 7 (page 139). Il est de plus, relativement compliqué d'effectuer un grand nombre d'essais avec une telle instrumentation, car l'outil n'est pas aisément démontable.

En conséquence, il serait plus aisé de pouvoir instrumenter directement un outil tournant. Le développement de systèmes permettant une telle instrumentation est présenté dans les paragraphes suivants.

4 - DEVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF DE MESURE DES TEMPERATURES POUR OUTIL TOURNANT

L'instrumentation en température sur tour limite la possibilité d'effectuer un nombre d'essais important ainsi que les possibilités de percer du composite (lié à la configuration du tour employé). De plus, les perçages de pièces aéronautiques se font à l'aide de dispositif ayant un outil tournant (fraiseuses ou UPA). Le choix de développer un dispositif de mesure de température pour un outil tournant s'est donc imposé. Deux systèmes ont été développés et un troisième est en cours de réalisation.

4 - 1 - RESULTATS SOUHAITES (CONTRAINTES/CAHIER DES CHARGES)

La première des tâches a été la définition des besoins et donc du cahier des charges.

Le choix s'est porté sur le fait d'instrumenter les outils à l'aide de six thermocouples, il conviendra donc de transmettre six valeurs. Le Tableau 11 indique les principales caractéristiques souhaitées initialement pour le système de transmission des valeurs de température.

| Caractéristiques | Valeur |
|---|----------------------------|
| Nombre de thermocouples et type | 6 thermocouples de type K |
| Résolution des valeurs | 1°C de résolution minimale |
| Fréquence de transmission des données (Bluetooth) | 1000 Hz |
| Vitesse de rotation du système | 0 à 3000 tr/min |
| Temps de retard du système | < 0.1 s |

Tableau 11 : Caractéristiques souhaitées pour le système de transmission des données de température

De plus, comme la mesure des efforts est un paramètre important dans les études en perçage, le système devra pouvoir s'adapter sur le capteur rotatif d'effort Kistler 9123C.

4 - 2 - PREMIER PROTOTYPE DEVELOPPE (BLUETOOTH)

4 - 2 - 1 - PRESENTATION DU SYSTEME

Le premier système développé a été conçu avec un étudiant de troisième année à l'Ecole des Arts et Métiers de Cluny, Benjamin ROUX, dans le cadre d'une partie de son projet de fin d'études en 2012 [Roux_2012]. Son travail a porté sur le système de transmission de données pour outil tournant, en se focalisant sur la conception mécanique et la programmation de la partie électronique. La réalisation des pièces mécaniques fût effectuée par les techniciens du LaBoMaP. L'ajustement et la recherche de solutions aux multiples problèmes rencontrés une fois le système monté furent réalisés ensuite.

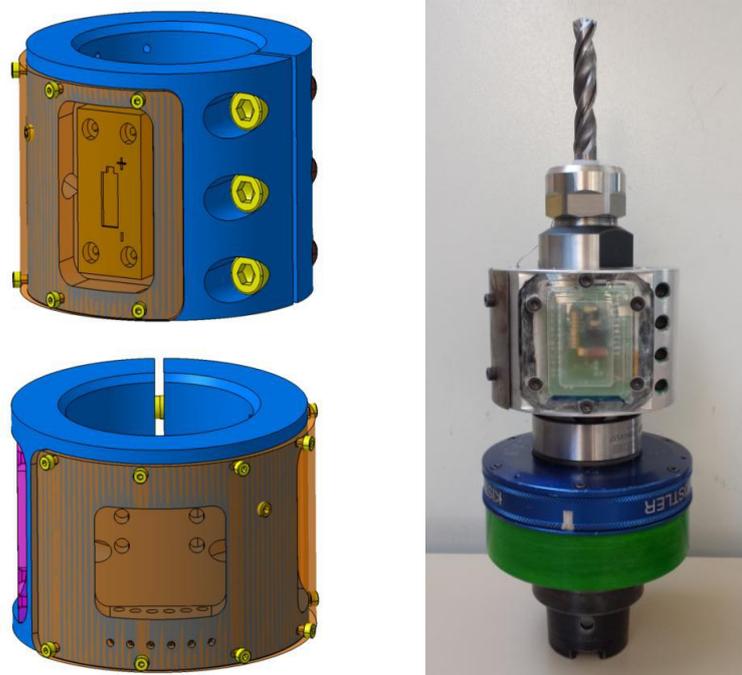


Figure 63 : CAO du système de télétransmission pour les thermocouples [Roux_2012] et montage réalisé, monté sur le capteur Kistler 9123C

La Figure 64 présente le fonctionnement du système, scindé en deux parties. La première est embarquée sur l'outil et se charge d'acquérir les informations issues des thermocouples, en millivolts, pour les convertir puis de les transmettre via une connexion sans fil, dans notre cas en employant un protocole Bluetooth. Il est choisi de concevoir la partie embarquée afin qu'elle puisse se positionner sur le capteur rotatif d'effort Kistler 9123C muni d'un porte outil spécialement développé pour le système et équipé d'une pince D29. La seconde partie est un module récepteur qui se charge de récupérer les signaux Bluetooth et de les convertir en

signaux analogiques afin de pouvoir collecter ces valeurs de manière synchronisée avec les autres signaux.

La fréquence de transmission des températures a dû être limitée à 5 Hz à cause du temps de traitement du composant compensant la soudure froide et linéarisant le signal. La liaison Bluetooth limitant pour sa part la fréquence des transmissions à 800 Hz.

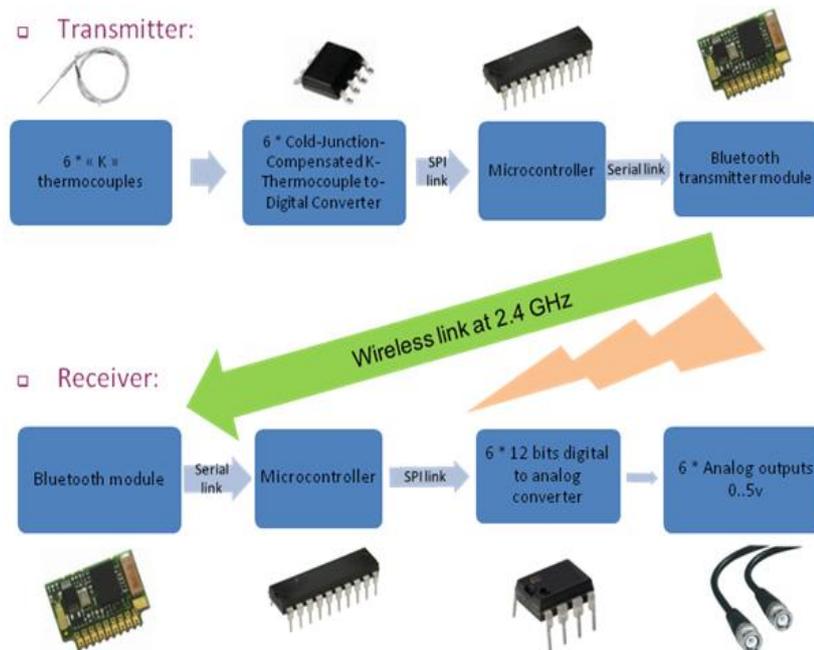


Figure 64 : Schéma de fonctionnement des modules du système de télétransmission [Roux_2012]

4 - 2 - 2 - PRECAUTIONS PARTICULIERES

Comme pour les autres systèmes de mesure de température, un certain nombre de précautions ont été nécessaires à la fois lors de la conception, puis lors de la réalisation et lors de la mise en route du système afin de s'assurer du bon fonctionnement.

La partie émetteur du système comporte trois poches. La première contient la partie alimentation du système, la seconde rassemble la connectique avec les thermocouples et la dernière contient l'électronique embarquée permettant le traitement des signaux et l'émission du signal radio.

L'alimentation du système s'est faite à l'aide d'une pile 9 V. Des essais sur un tour ont permis de valider la capacité de la pile à délivrer une tension et un courant à ces fréquences de rotation. Dans les premiers essais, une déformation importante de la pile, entraînant sa destruction a été relevée, une modification du logement de la pile a permis de résoudre ce

souci. Lors des essais suivants, une très faible autonomie sera remarquée, de l'ordre d'une dizaine de minutes. Des essais à l'aide de piles rechargeables ont été menés, mais, malgré les diverses références testées, l'autonomie est encore réduite et la capacité à recharger les batteries est grandement altérée.

Le cache de la partie électronique est réalisé en polycarbonate afin de permettre la transmission des ondes pour la communication. Un indicateur de mise sous tension (DEL) placé initialement sur la carte électronique a dû être retiré car il causait une élévation de la température de certains composants, faussant les valeurs de températures lues.

Afin de ne pas fausser les efforts suivant les axes X et Y, le système fût équilibré en deux temps : lors de la conception, puis une fois le système totalement monté, sur un banc d'équilibrage.

4 - 2 - 3 - ESSAIS REALISES

Avant de considérer les températures en perçage, une étude des valeurs de sortie du système est dans un premier temps effectuée afin de pouvoir convertir la tension analogique de sortie du module récepteur en température.

4 - 2 - 3 - 1 - Analyse du signal en sortie du système

La Figure 65 présente la forme du signal de sortie du récepteur lorsque la valeur de température envoyée par le système Bluetooth ne varie pas. Dans le cas présenté, la température imposée est d'environ 35°C. La fréquence du signal est de 50 Hz, ce qui correspond à la fréquence de la communication entre le microcontrôleur de la carte réception et les convertisseurs numériques-analogiques de cette même carte. La remise à zéro précoce des valeurs est due à une réinitialisation de ces convertisseurs. De même les points aberrants indiqués sur la Figure 65 sont le résultat de parasites impactant ces composants. Les valeurs nulles et le bruit sur les plateaux sont donc à retirer, ce qui est réalisé par un algorithme spécifique développé sous Matlab. La courbe de température ainsi obtenue est la courbe orange indiquée sur la Figure 65.

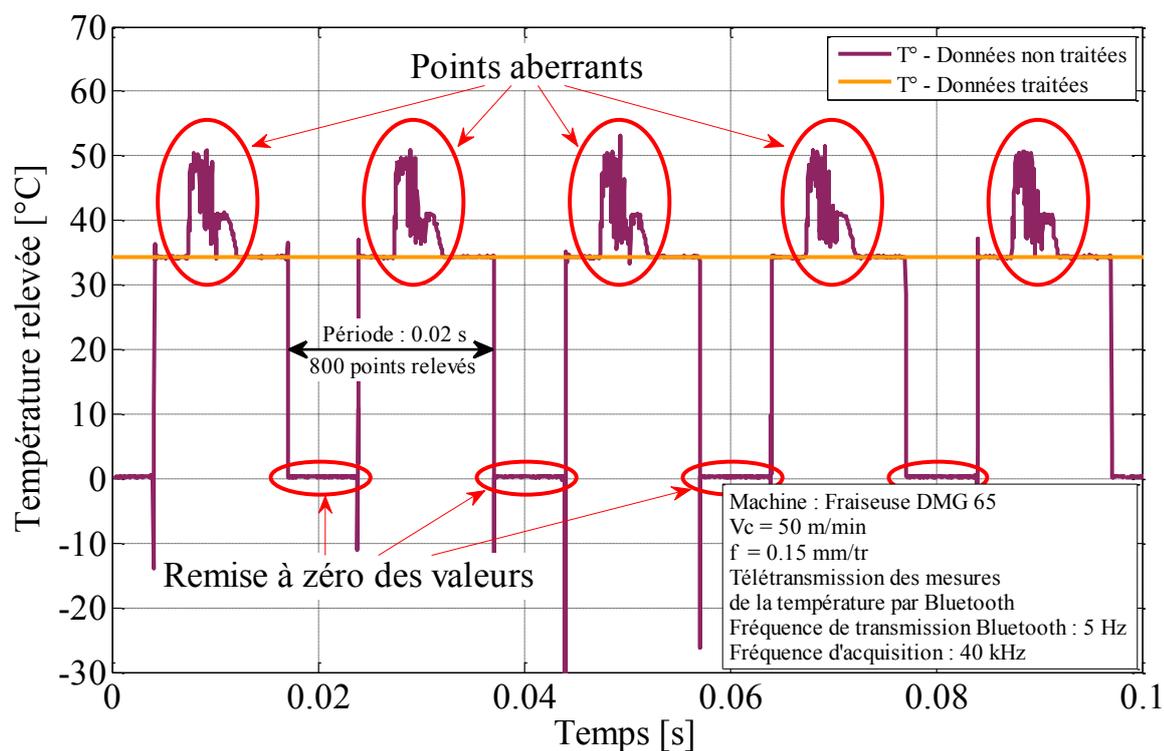


Figure 65 : Valeur du signal de température avant et après traitement numérique

4 - 2 - 3 - 2 - Perte du signal

Des essais en dynamique du capteur a permis de déterminer la fréquence de rotation maximale du système, d'environ 4000 tr/min. Plusieurs raisons peuvent expliquer la rupture de la communication, la première est la centrifugation des électrolytes de la pile et la seconde peut être liée à l'effet Doppler.

Les calculs liés à cette seconde hypothèse impactant la variation de la fréquence de la porteuse sont présentés en Annexe 5.

La théorie la plus probable concernant la perte du signal vers 4000 tr/min est la centrifugation des électrolytes de la pile. Notre système devant tourner à moins de 3000 tr/min, ce problème n'est pas primordial.

4 - 2 - 3 - 3 - Essai dans l'alliage d'aluminium AU4G

Suite à ces études préliminaires sur le signal et la capacité à transmettre une information alors que le système est en rotation, une campagne de perçage dans l'alliage d'aluminium AU4G fut réalisée. La Figure 66 représente l'évolution de la température mesurée dans le foret à l'aide du système développé. Les créneaux de température de 0.2 s de durée correspondent à la limitation de 5 Hz due aux composants se chargeant de linéariser le signal issu des thermocouples (MAX) situé dans la partie tournante du système.

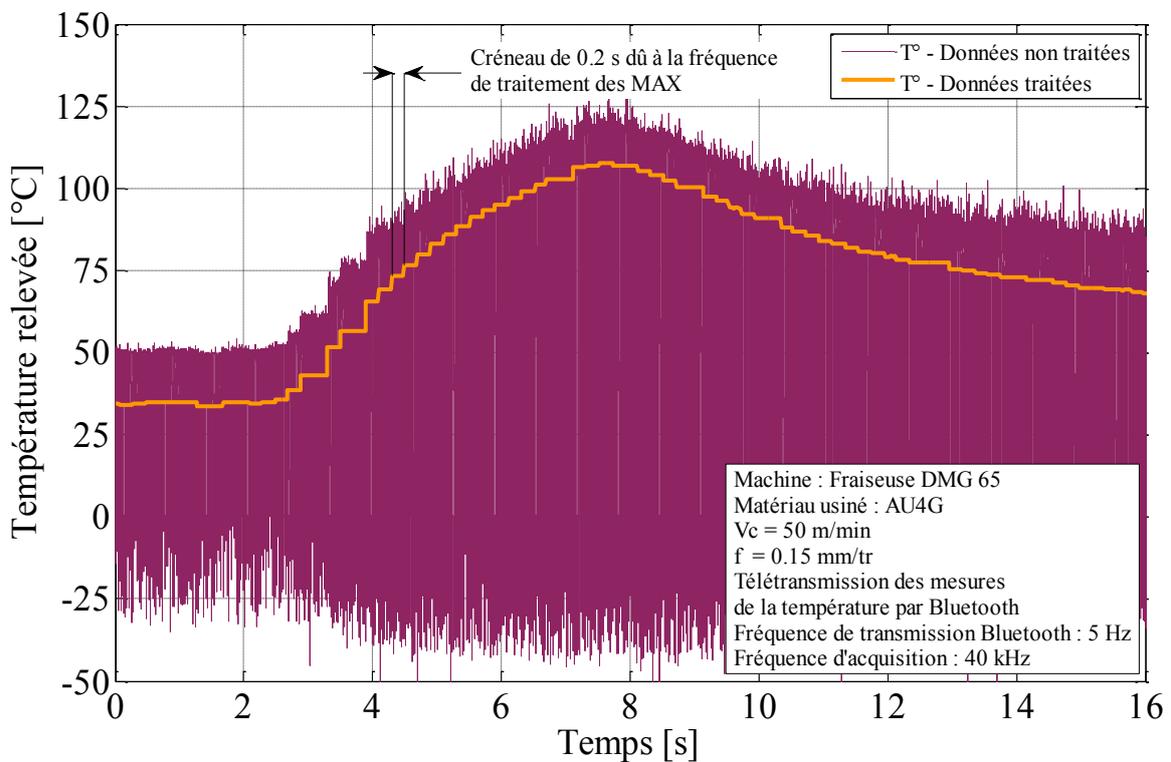


Figure 66 : Evolution de la température dans le foret lors du perçage de l'AU4G

4 - 2 - 4 - CONCLUSION

Ce système développé en interne a permis de démontrer la possibilité de réaliser un système de mesure in-situ de température sur outil rotatif.

Si la défaillance du système n'a pas pu permettre de l'exploiter pleinement, un certain nombre d'enseignements et le relevé d'un certain nombre de verrous technologiques ont pu être mis en évidence.

L'alimentation du système en électricité fut un écueil, en conséquence, l'emploi d'une pile 9 V devra être évité autant que possible. La première solution technique à même de remplacer cette source d'énergie serait l'utilisation de batteries rechargeables au lithium. Il conviendra de s'assurer de la tenue de l'accumulateur dans les conditions dans lesquelles il sera utilisé par la suite, car la résistance n'est pas la même dans toutes les directions de l'espace. La seconde possibilité est l'emploi d'un système de transmission de puissance par induction. Il conviendra néanmoins de veiller à ce que l'induction ne vienne perturber ni le capteur Kistler (la transmission des valeurs d'efforts et de l'énergie pour le système rotatif se fait via un inducteur), ni la communication des données de température. La dernière solution technologique envisagée pour l'alimentation de la partie tournante est plus basique et consiste en l'ajout de balais ou de charbons venant frotter sur des pistes, permettant ainsi l'apport de la tension nécessaire au bon fonctionnement du système.

Le second verrou technologique relevé concerne la transmission des données. Le protocole de la liaison Bluetooth limite à 800 Hz la fréquence de transmission pour 6 informations codées sur 10 bits, ce qui peut être considéré comme relativement peu à la fois en fréquence et en résolution de température. Afin d'améliorer le temps de cycle, il est possible de ne plus employer un protocole propriétaire, mais d'en développer un relativement simple pour cette application. Une seconde possibilité peut être de transmettre un top départ et de stocker les données dans une mémoire embarquée dans le système.

Le dernier verrou relevé est la tenue des composants électroniques à la force centrifuge. Afin de miniaturiser au maximum le système, de la microélectronique a été employée. Les composants ont été placés de telle sorte que la force centrifuge plaque les composants sur le circuit imprimé. Néanmoins, cette disposition n'a pu être respectée pour la partie émettant le Bluetooth et au moins un des composants du système fut dégradé. Il convient donc de trouver un moyen pour que les éléments électroniques ne subissent pas de dommage. Une possibilité est de les noyer dans une résine qui maintiendra l'ensemble des composants en place tout en laissant passer les ondes. Une seconde est de disposer la partie électronique directement dans la partie reliée au capteur Kistler, sans employer de manchon, et donc au plus près de l'axe de rotation pour limiter les effets de la force centrifuge.

Ce système, malgré ses défauts a permis de mettre en évidence les principaux points clés à surmonter pour réaliser un système fiable et efficace de transmission des températures.

4 - 3 - SECOND SYSTEME DEVELOPPE (COLLECTEUR A BALAIS)

4 - 3 - 1 - PRESENTATION DU SYSTEME

Suite à la défaillance du premier dispositif, un second moyen de transmission des informations issues des thermocouples fut réalisé. Cette instrumentation fut inspirée des travaux de Thomas BAIZEAU lors de son stage de master recherche [Baizeau_2013].

Ce second système, développé dans le cadre de la thèse est présenté sur les figures ci-dessous. Il ne comporte pas d'électronique, et se compose d'une bague venant se placer sur le support de pince D29 spécialement conçu pour le capteur rotatif Kistler 9123C, et permettant ainsi d'effectuer le contact entre les fils du thermocouple et des pistes faisant le tour de cette bague. Des balais frottant sur les pistes permettent d'assurer le contact électrique, et ainsi la mesure des millivolts sur une carte d'acquisition NI 9205 qui seront ensuite transformés en température.

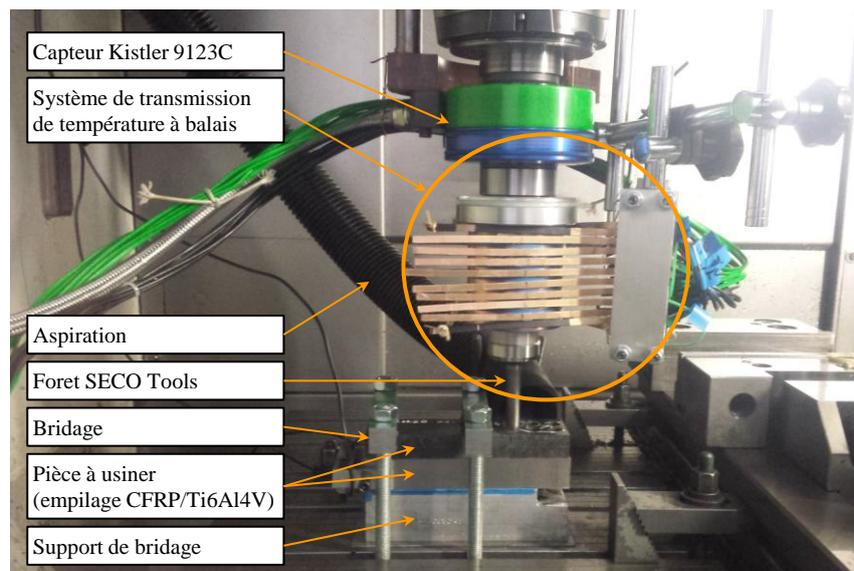


Figure 67 : Dispositif de transmission du signal des thermocouples à l'aide de balais

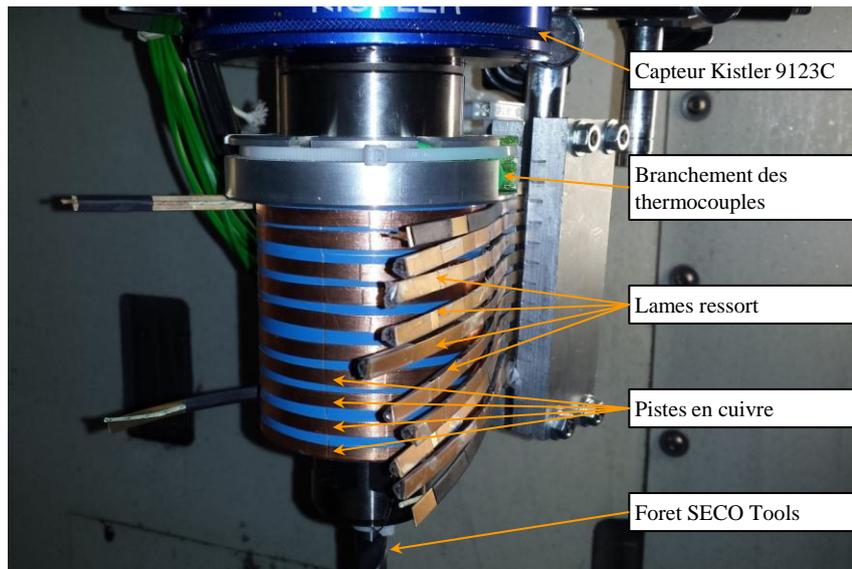


Figure 68 : Détail des pistes et des balais du système de transmission des températures

4 - 3 - 2 - PRECAUTIONS PARTICULIERES

4 - 3 - 2 - 1 - Chaîne électrique de la mesure

Comme cela a été indiqué précédemment, le système comporte des balais et des pistes. Ces deux éléments ne sont pas dans les matériaux K^+ et K^- , ce qui implique que d'autres potentiels thermocouples sont générés dans le système, ce qui est présenté sur la Figure 69. Afin de limiter au maximum les potentiels thermocouples parasites qui sont générés, le matériau du fil qui est soudé aux pistes est le matériau du thermocouple (soit K^+ , soit K^-). Les pistes sont réalisées à l'aide de rubans adhésifs en cuivre et des fils électriques en cuivre de 1.5 mm² de section sont mis en œuvre comme balais. Ainsi deux matériaux de nature similaire sont en frottement, en ne produisant pas d'effet thermocouple. De plus, les contacts électriques entre les balais et les pistes sont contrôlés régulièrement.

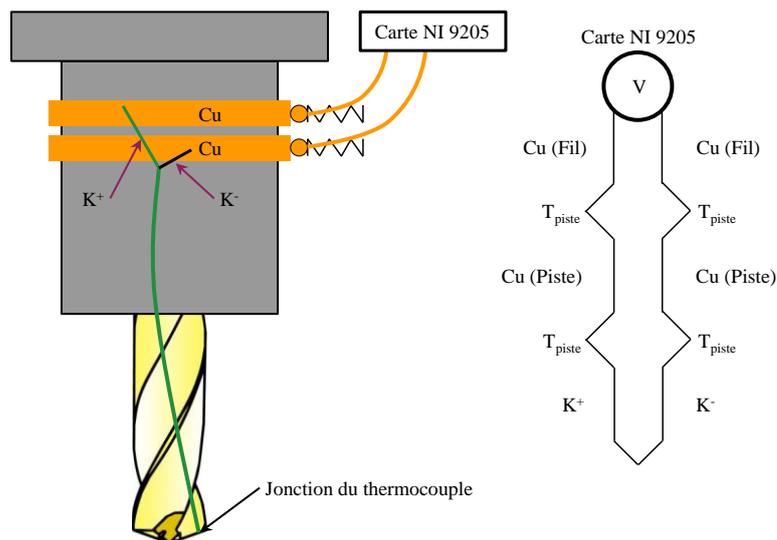


Figure 69 : Principe du montage pour la mesure de température à l'aide de balais

Etant donné que les pistes et les fils sont dans un matériau très proche, l'effet thermocouple entre la piste et le balai peut être négligé. De plus, si les températures des deux pistes sont proches, il est possible de considérer que la température de la piste correspond à la température de la soudure froide. Il conviendra alors d'ajouter cette température de soudure froide à celle mesurée lors de l'essai (issue de la valeur de la tension mesurée sur la carte NI 9205) afin de pouvoir déterminer la température dans l'outil.

Ces mesures permettent donc de remonter à des valeurs de température de manière relativement fiable, et ce, sans contraintes de fréquence de transmission.

4 - 3 - 2 - 2 - Mesure de la température de soudure froide (ou température des pistes du manchon)

Il convient donc de mesurer la température des pistes, ou celle du manchon afin de pouvoir remonter aux températures dans l'outil.

La méthode retenue est présentée sur la Figure 70. Le principe est de faire frotter, sur une piste isolée électriquement du système, un fil K^+ d'un côté et un fil K^- de l'autre, l'équivalence d'un point de vue des potentiels thermocouples générés est indiqué sur cette même figure.

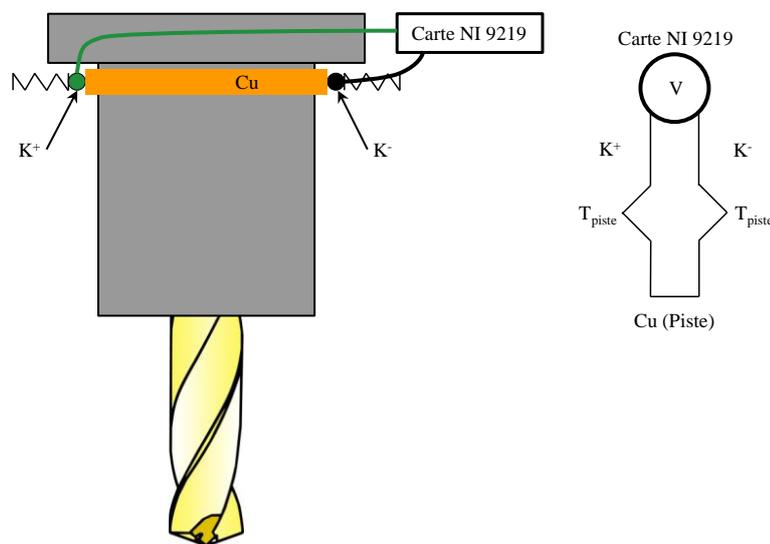


Figure 70 : Principe du fonctionnement de la mesure de température de soudure froide

En considérant que la température de la piste est uniforme, ce schéma revient à la mesure de la température à l'aide d'un thermocouple de type K. Ce système relativement simple sera placé en haut et en bas du manchon. Afin d'assurer un relevé fiable, ces mesures seront envoyées sur une carte dédiée aux mesures thermocouples. Cette carte NI 9219 permet une mesure à 100 Hz de la température sur chacune des voies.

Des essais de mesure de la température du manchon sont réalisés à l'aide de ce moyen de mesure. La température relevée augmentant de manière importante avec la vitesse de rotation du système, la mesure effectuée ne correspond pas à la température du manchon, mais à celle du point de frottement fil thermocouple-piste.

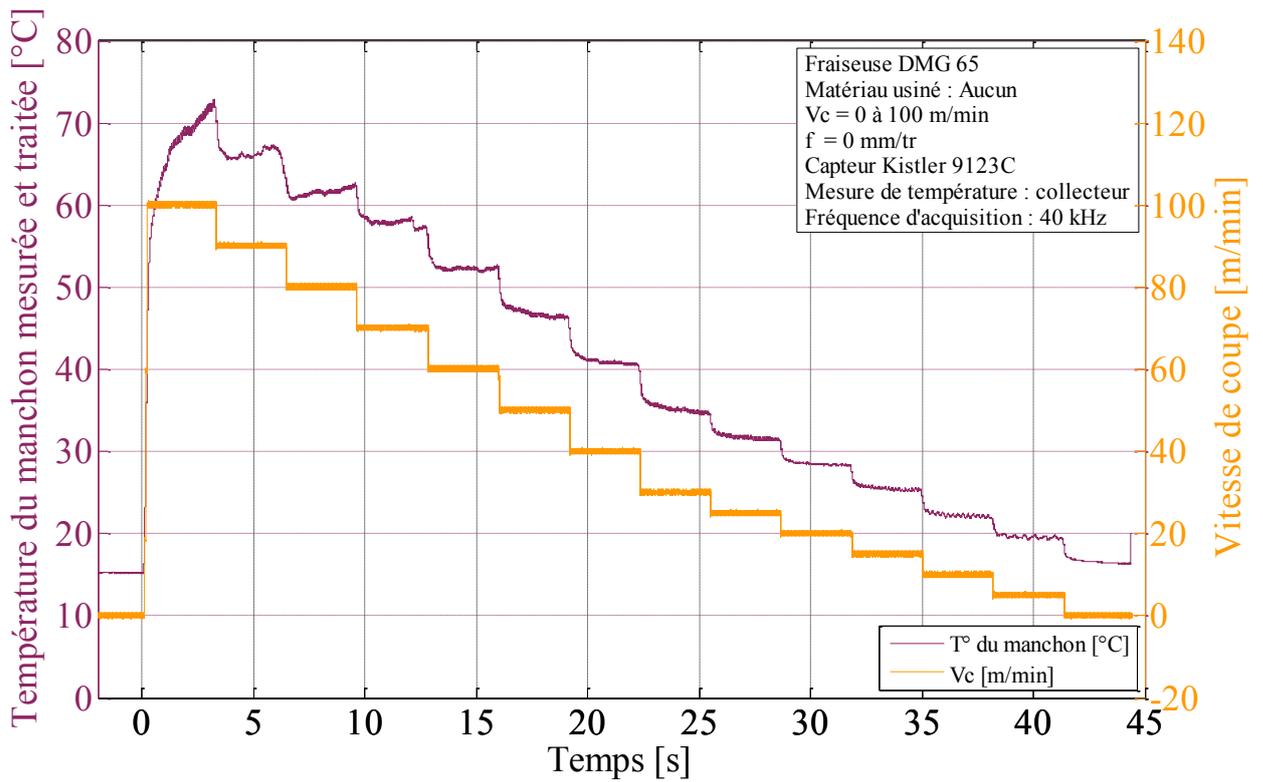


Figure 71 : Evolution du relevé de la température du manchon en fonction de la vitesse de rotation de la broche

Le moyen retenu pour remonter à la température de la soudure froide en usinage sera d'effectuer la mesure de la température du manchon, la broche à l'arrêt avant l'usinage, puis à la fin de l'usinage, une fois la broche arrêtée. Ce moyen ne permettant pas de connaître la température du manchon à tout instant, la source de chaleur étant néanmoins loin de la zone dans laquelle la mesure est effectuée, il est possible d'approximer les variations de température par une droite passant par les points mesurés avant et en fin d'usinage.

4 - 3 - 2 - 3 - Mesure de la température de l'outil en fonction de la vitesse de rotation

Tout comme pour le système Bluetooth, il convient de s'assurer que la transmission des données s'effectue lorsque la broche tourne. Il est choisi d'effectuer des paliers de vitesse de rotation, comme cela est présenté sur la Figure 72. Les vitesses s'échelonnent de 0 à 100 m/min pour un outil de 12 mm de diamètre. Lorsque la vitesse de rotation est supérieure ou égale à 40 m/min, des points aberrants à des températures de l'ordre de 5 500°C sont relevés et correspondent à la saturation de la carte.

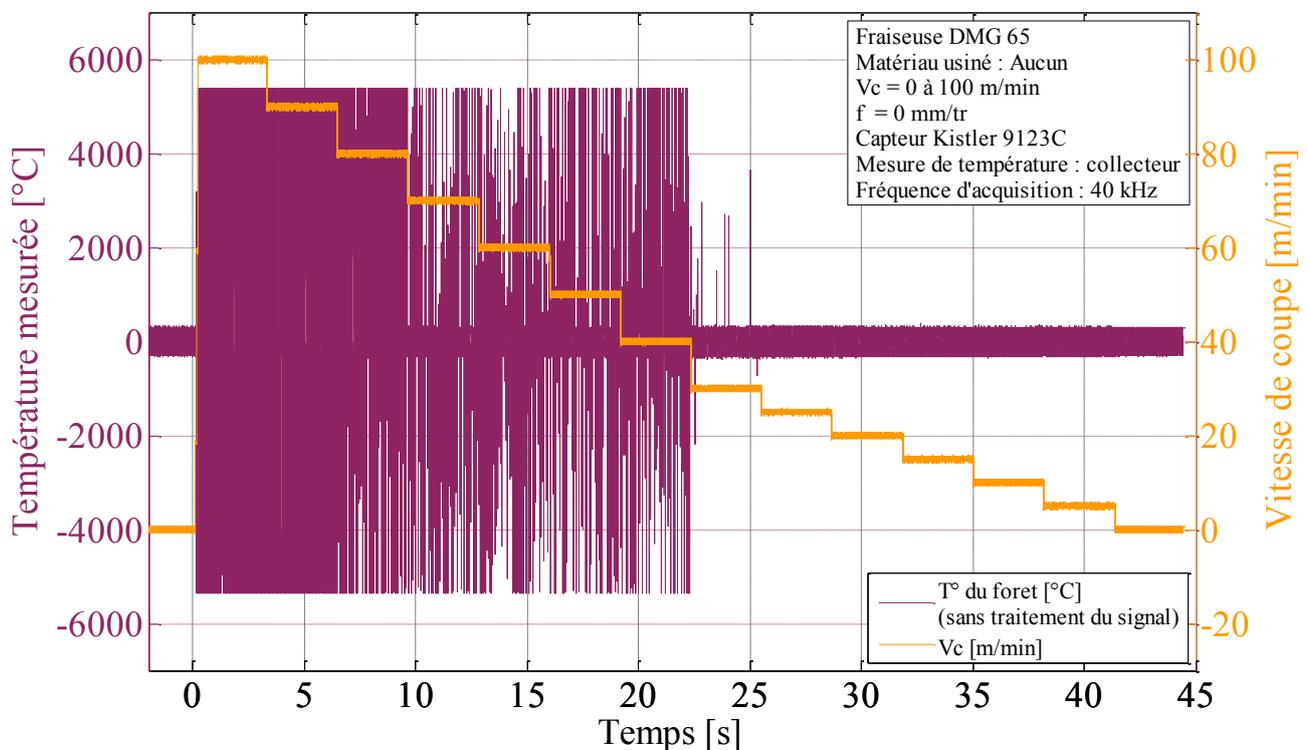


Figure 72 : Evolution du niveau de bruit en fonction de la vitesse de coupe

Une étude des fréquences du signal est alors opérée afin de filtrer au mieux les valeurs. Un bruit blanc est mis en évidence, auquel s'ajoute une fréquence de 8 151 Hz présente pour l'ensemble des vitesses testées. L'amplitude de ce signal est d'environ 200°C, ce qui est bien supérieur à l'ensemble des autres fréquences. Des essais menés avec le capteur Kistler éteint ont montré que cette composante disparaît et que le signal de température est beaucoup moins bruité.

Le capteur rotatif est donc la source d'une part non négligeable du bruit, probablement à cause du système d'induction permettant l'envoi de la puissance et le transfert d'informations au système tournant. Afin de limiter les effets, il conviendrait d'isoler davantage les fils venant frotter sur les pistes du système de mesure de température. Cette mesure ne sera pas prise pour les essais développés dans le cadre de cette thèse pour des raisons pratiques.

4 - 3 - 2 - 4 - Mesure de la température de l'outil en usinage

L'ensemble de ces éléments ont permis de traiter les signaux afin de pouvoir retracer la température dans l'outil en cours d'usinage.

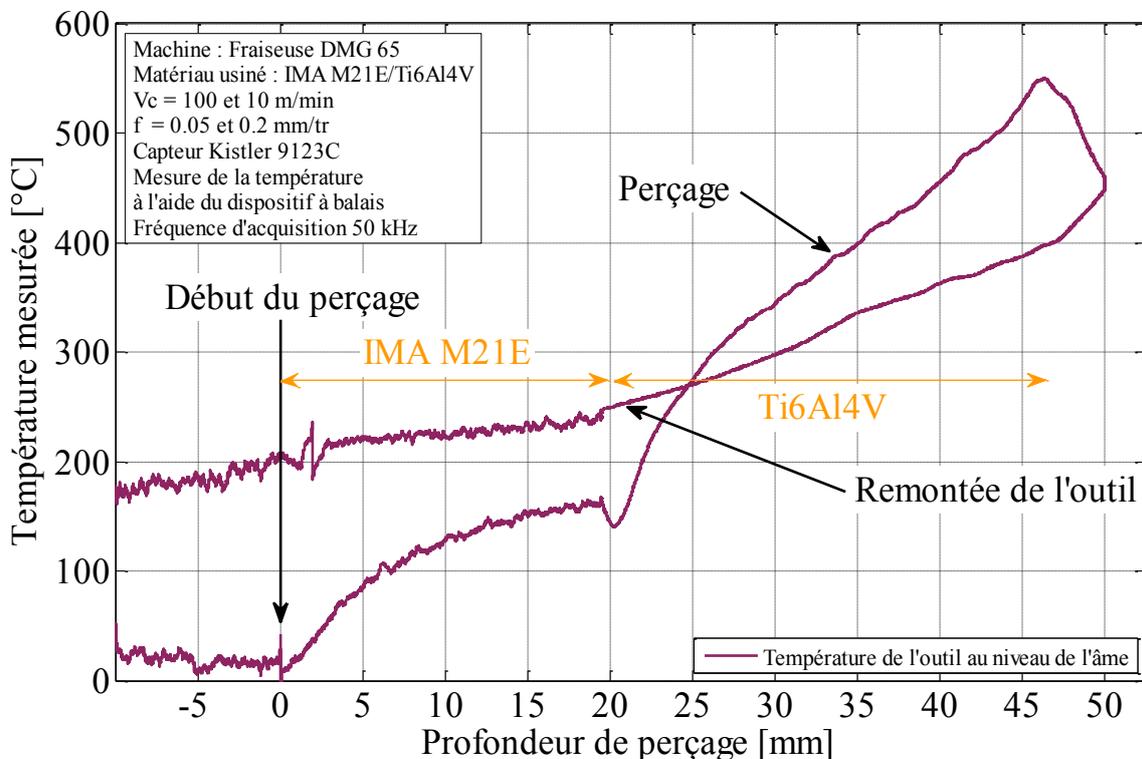


Figure 73 : Relevé de température lors du perçage de l'empilage IMA M21E/Ti6Al4V, outil neuf

Comme le présente la Figure 73, un lissage optimal du signal permet d'obtenir des courbes de température relativement propres, sans pour autant dénaturer le signal, ce qui les rend exploitables.

4 - 3 - 3 - CONCLUSION

Ce second système de mesure de température pour un outil tournant a donc montré qu'il permet de relever des températures. Si l'emploi du capteur rotatif Kistler perturbe les relevés, il est possible de filtrer le bruit généré pour revenir à des valeurs cohérentes (sous réserve que la fréquence d'échantillonnage du système le permette, comme indiqué à la page 124).

Les principaux inconvénients de ce système ont été relevés lors des essais, une usure importante des pistes contraint à un renouvellement régulier des pistes en scotch cuivre ainsi qu'à une vérification entre chaque essai de l'état de ces dernières. Toutes les 10 minutes en rotation environ, les pistes doivent être changées. La sortie de l'outil de la machine est une opération complexe à cause du nombre important de balais. Le remontage de l'outil en broche est lui aussi long, car il convient de s'assurer que l'ensemble des contacts est bien en place. Ces opérations pour des mesures d'outils sont donc à limiter pour ces raisons pratiques.

Le principal avantage de ce système réside dans la fréquence de transmission des valeurs. Elle n'est limitée que par le lissage imposé par le bruit causé par le capteur rotatif, contrairement au système Bluetooth qui était limité à 0.5 Hz.

Au regard du système précédent, les défauts résident principalement dans la complexité à mettre en œuvre la mesure sur la machine ainsi qu'aux multiples vérifications à faire entre les essais.

4 - 4 - TROISIEME DISPOSITIF EN COURS DE DEVELOPPEMENT

Au vue des problèmes de casses non réparables du système de transmission de température via Bluetooth, il a été choisi de lancer la conception d'une autre version sans fil, tout en intégrant un certain nombre d'améliorations afin de résoudre les problèmes répertoriés lors des essais à l'aide des deux systèmes précédemment utilisés.

Ce système n'est pas encore réalisé, néanmoins, un certain nombre de caractéristiques techniques ont dès à présent été fixées, et des essais de qualification ont été lancés pour déterminer les meilleurs choix technologiques.

Tout comme le premier système, il a été choisi d'effectuer un montage intégrant de l'électronique car cela permet de linéariser au mieux les signaux des thermocouples. Il convient donc de définir comment alimenter électriquement de ce dernier.

Le choix d'une pile a déjà été décidé dans la version précédente et le résultat ne s'est pas révélé très concluant, trois autres possibilités se présentent.

La solution idéale serait de pouvoir récupérer une partie de l'alimentation transmise par le système Kistler via l'inducteur du capteur rotatif 9123C. L'inconvénient est que le système serait alors obligatoirement employé avec ce capteur Kistler, sauf si un inducteur est développé pour l'alimentation. La seconde solution, toujours pratique, serait de trouver un accumulateur rechargeable supportant ces vitesses de rotation. La dernière solution, qui présente l'intérêt d'être simple à mettre en œuvre est l'emploi d'un système de balais permettant l'envoi d'un courant, l'électronique embarquée se chargeant de lisser la tension ainsi récupérée.

Des essais sont actuellement menés sur les deux premières méthodes, la dernière sera employée si jamais les essais ne sont pas concluants pour les autres méthodes. Dans tous les cas, il a été identifié que la partie traitement du signal issu des thermocouples devrait se situer sur une autre carte que la partie gérant l'alimentation et une éventuelle transmission afin que les élévations de température dues à l'électronique environnante ne perturbe pas ce traitement. Il a également été indiqué que la présence d'un témoin lumineux de l'alimentation (DEL par exemple) serait un plus lors des essais.

Après la gestion de l'alimentation, la question du transfert des données se pose. Si le système Bluetooth permet l'envoi de 6 données de 10 bit à des fréquences allant jusqu'à 800 Hz, les problèmes de communication par ce biais sont nombreux. Il est donc possible de choisir un

autre protocole de transmission de données (propriétaire ou non), ou de stocker les données de température dans une mémoire intégrée au système. Cette seconde solution a été retenue. La mémoire flash étant disponible à des coûts relativement faibles, avec des encombrements réduits, rien ne semble contre-indiquer son utilisation. Cet emploi du stockage des données soulève néanmoins un problème : la synchronisation des données avec le reste de l'instrumentation.

Cette synchronisation des données comporte deux parties. La première est la gestion de la base de temps de la mesure. Il convient en effet de s'assurer que les efforts mesurés d'un côté (ou toute autre grandeur mesurée), ne dérive pas dans le temps par rapport aux relevés de température. Cette gestion du temps sera confiée à un processeur, couplé à un quartz, qui sera programmé en assembleur car c'est le seul langage à même de contrôler précisément le temps d'exécution d'un programme, et ce, de manière déterministe. L'intérêt de ce langage de programmation est qu'il est possible de contrôler de manière précise le nombre de cycles d'horloges nécessaires à la réalisation d'une tâche, et donc d'imposer très exactement la fréquence d'acquisition des données. Néanmoins le risque est que la fréquence d'acquisition soit figée une fois le système développé. C'est ce type de programmation qui a été développé dans le premier système employant le Bluetooth afin de garantir la fréquence des mesures.

Une fois la base de temps définie pour les deux systèmes de mesure, il convient d'assurer la synchronisation du départ de la mesure, qui constitue la seconde partie dans la synchronisation des données. Pour cela, la partie tournante doit communiquer avec le reste de l'acquisition qui est fixe. Deux solutions technologiques sont retenues ; la première consiste à disposer une couronne de récepteurs infrarouges autour de notre système (le nombre reste à définir en fonction de l'angle couvert par les récepteurs en question), et une DEL infrarouge fixe, contrôlée par l'acquisition ou par un boîtier trigger. La réception du signal émis par la DEL déclenchera l'acquisition, qui s'arrêtera après un certain temps défini ou la réception d'un second signal infrarouge. Dans le cas d'une alimentation à l'aide de balais, il est envisagé de placer une troisième piste actionnant et arrêtant l'acquisition.

Les essais préliminaires et les directions à suivre pour le bon développement de ce système ont été transmis afin que ce moyen de mesure puisse aboutir. Il est actuellement en cours de développement interne au LaBoMaP pour des applications dédiées à une autre thèse en cours.

4 - 5 - CONCLUSIONS

Le développement d'un système de mesure pour outil tournant présente une certaine complexité. Si le premier système n'a pas permis une utilisation prolongée, il a ouvert la voie à d'autres développements permettant une mesure de la température de l'outil en perçage, qui pourront être également exploités en fraisage.

5 - MESURE DES TEMPERATURES LORS DE LA COUPE DE FILS THERMOCOUPLES

Les deux précédentes parties ont traité des moyens matériels mis en place afin de mesurer la température de l'outil en plaçant des thermocouples dans le foret. Une seconde approche consiste à venir mesurer la température de l'arête en appliquant le thermocouple contre celle-ci alors qu'elle est en cours d'usinage. Cette méthode, inspirée de celle développée par Thomas Baizeau [Baizeau_2013], est détaillée dans un premier temps, puis les précautions nécessaires pour ces essais seront précisées pour enfin présenter les résultats des essais réalisés avec l'aide d'un étudiant de master recherche, Christophe Ramirez, lors de perçage de composite unidirectionnel à fibre de carbone T800 M21.

5 - 1 - METHODE EMPLOYEE

Un brevet étant en cours de dépôt concernant le dispositif employé, celui-ci est présenté dans l'Annexe 6.

5 - 2 - PRECAUTIONS PARTICULIERES

La mesure s'effectuant lorsque l'arête est au niveau des fils thermocouples, cela ne survient que pendant un laps de temps très court (moins d'une milliseconde). L'acquisition doit donc se faire à des fréquences très élevées afin de relever les points de contact entre l'outil et les fils thermocouples, la fréquence retenue est de 40 kHz. De plus, une résistance de pull up est utilisée afin de limiter les problèmes de mesures lorsque la sonde n'est pas en contact avec le foret (les fils sont normalement en l'air, les mesures seraient donc aberrantes). Ces points seront retirés lors du traitement des données.

Afin de limiter les perturbations électriques et électromagnétiques, la pièce à usiner ainsi que le foret doivent être isolés électriquement de la machine. Pour ce faire, une pièce en nylon est réalisée et placée entre le foret et la pince du capteur rotatif. La pièce usinée est maintenue en étau avec un film plastique recouvrant les surfaces d'appui. Afin de limiter au maximum les faux contacts, les fils thermocouples des sondes sont isolés à l'aide de cyanoacrylate puis noyés dans une résine afin de former une sonde de 1 mm de diamètre.

5 - 3 - ESSAIS REALISES ET RESULTATS

Si des essais préliminaires ont été menés avec divers matériaux par Thomas Baizeau [Baizeau_2013], ceux présentés ci-dessous se sont déroulés dans une plaque de composite à fibre de carbone unidirectionnel de type T800 M21, de 30 mm d'épaisseur, avec une vitesse de coupe de 100 m/min et une avance de 0.05 mm/tr (les fibres étant orientées perpendiculairement à la direction de perçage).

La Figure 74 représente la mesure en Volts de la température issue du thermocouple placé verticalement. Les points situés à plus ou moins 0.21 V correspondent à une saturation de la carte, de même les points à 0.15 V correspondent aux points lorsque le thermocouple est ouvert, indiquant que l'outil n'est pas en contact avec les fils thermocouples. Les points proches de 0 V correspondent aux valeurs mesurées lorsque l'arête l'outil est en contact avec les deux fils, et que la mesure est effectuée.

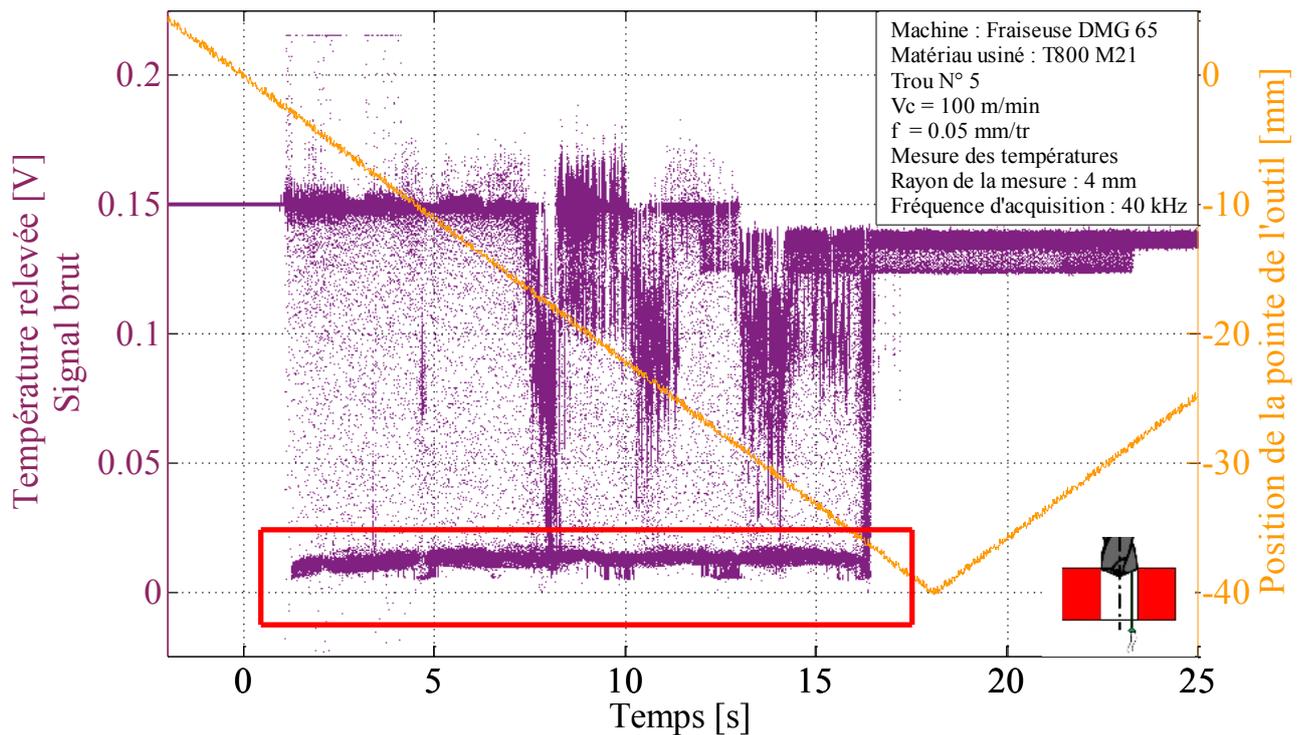


Figure 74 : Evolution du signal de température en cours de perçage

La Figure 75 présente un détail sur 0.1 seconde du signal de la Figure 74, afin de mieux visualiser ce qui se passe lors de l'acquisition. Il est possible de remarquer que le signal présente un plateau à 0.15 V. Dans les conditions de coupe testées, le temps de contact est d'environ 0.325 ms, ce qui correspond à 13 ou 14 points pour la fréquence d'échantillonnage sélectionnée. Sachant que les mesures de températures sont effectuées toutes les 11.3 ms, la proportion des points correspondant aux mesures de température de l'outil sur l'ensemble des points est d'environ 3 %.

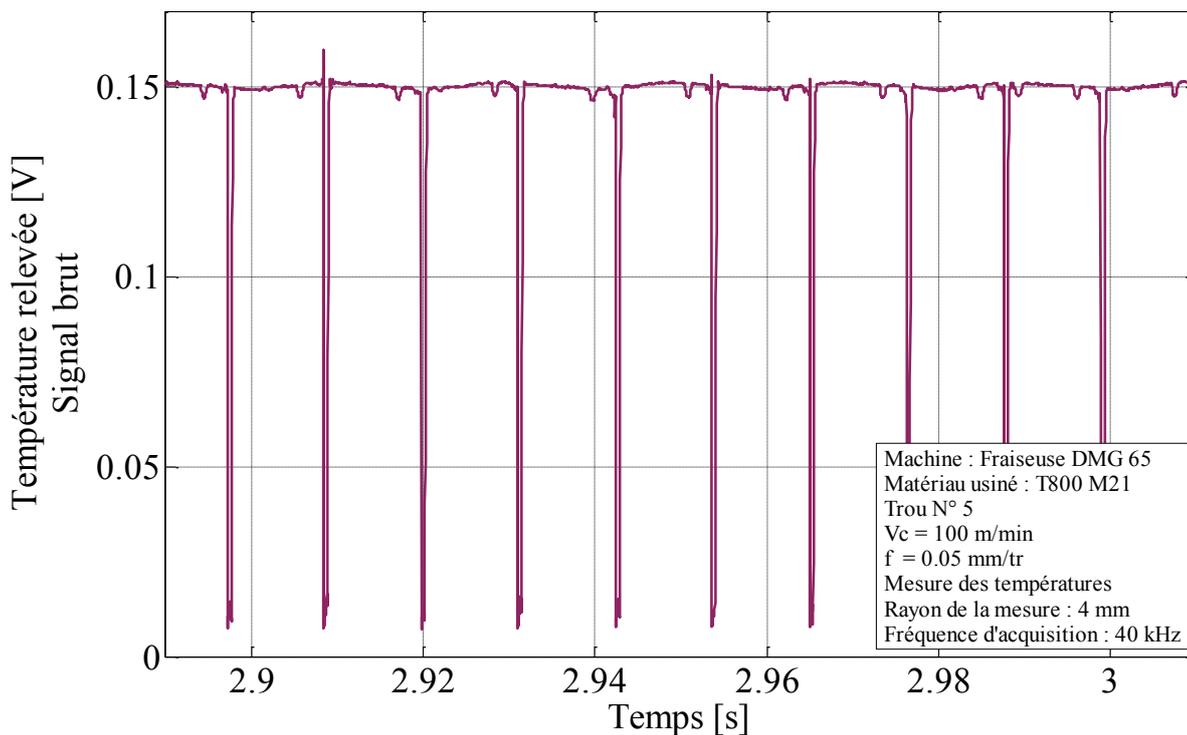


Figure 75 : Détail du signal de la mesure des températures

Malgré l'ensemble de ces contraintes, il est possible de sortir des tendances concernant la température de l'arête de l'outil.

5 - 4 - CONCLUSIONS (RESULTATS ET AMELIORATIONS)

La Figure 76 présente le même signal que précédemment, mais converti en température. Il est possible de visualiser des tendances. Ainsi, la température de l'arête du foret augmente lors des 12 premiers millimètres pour se stabiliser aux environs de 375°C à un rayon d'outil de 4 mm.

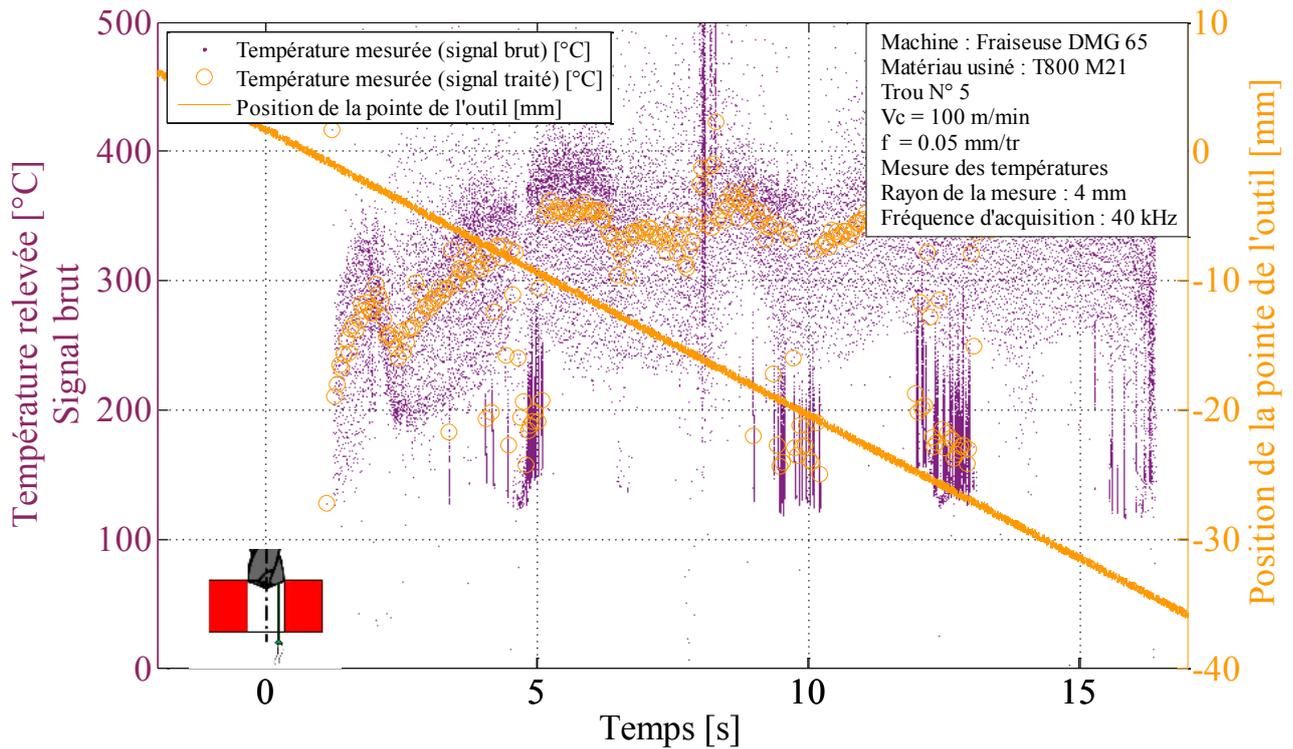


Figure 76 : Evolution de la température en fonction du temps

De la même manière, les valeurs des thermocouples placés perpendiculairement à l'axe du foret sont analysées, comme le présente la Figure 77. Il est ainsi possible de visualiser la température le long du rayon du foret à une profondeur de perçage donnée (ici 5 mm). La pointe du foret perce le thermocouple à $t=3$ s et l'ensemble de l'arête viens couper le thermocouple en 1 s, la température de l'arête augmente avec le rayon de l'outil pour atteindre environ 450°C au niveau des becs. Puis lorsque les listels viennent couper ou frotter la sonde, la température baisse rapidement à des valeurs situées entre 150°C et 300°C. Ensuite, à partir de 6.2 s, le contact n'est plus franc avec les fils thermocouples et la mesure ne s'effectue donc plus régulièrement, la conicité arrière de l'outil fait que celui-ci n'est plus en contact avec la matière. Cette longueur de contact est estimée entre 6 et 7 mm à partir de la pointe, soit 4 à 5 mm environ à partir des becs.

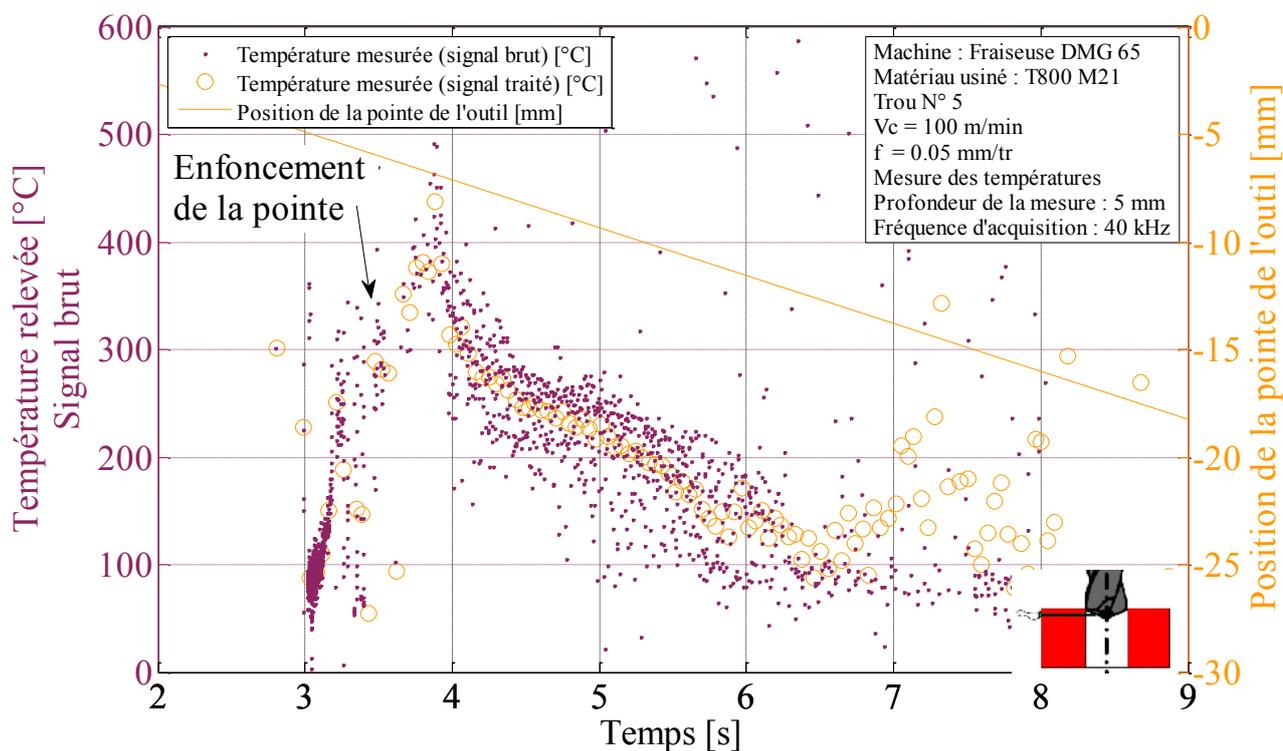


Figure 77 : Mesure de la température lors du perçage par un capteur placé perpendiculairement à l'axe de l'outil

Les mesures effectuées présentent un niveau de bruit important qui ne peut pas être totalement lissé sans dénaturer le signal. Le traitement proposé permet d'obtenir un certain nombre de points (un point pour deux passages d'arête) tout en ayant un niveau de bruit contenu. Néanmoins le procédé de par sa conception ne permet pas d'assurer des mesures moins bruitées. Le matériau usiné étant un conducteur électrique (du moins pour les fibres de carbone), des perturbations sont générées de manière intrinsèque.

En conclusion, cette technique permet de mesurer des températures d'arête d'outil (forets ou fraises), sans avoir recours à une méthode inverse ou une simulation, ce qui permet de s'affranchir des nombreuses hypothèses. Néanmoins, la précision de la lecture de la valeur est relativement faible, de l'ordre de la dizaine de degrés, limitant l'utilisation de cette méthode. La seconde limitation concerne le matériau usiné, dans le cas où celui-ci est conducteur. Le fait de placer plusieurs thermocouples perturbe la mesure (possibilité d'effectuer des courts-circuits entre les thermocouples). Ce dispositif n'a donc pas pu être évalué pour la mesure de la température dans le Ti6Al4V.

6 - CONCLUSIONS

Un certain nombre de méthodologies et de systèmes ont été développées dans le cadre de cette étude afin de mesurer la température de l'outil en perçage.

Le principal avantage du système sur tour réside dans la facilité d'obtention des données, et il est de plus possible d'employer un grand nombre de conditions de coupe. Les deux principaux désavantages de cette technique résident dans la complexité des réglages machine et les limitations des pièces usinés à cause de la prise en mandrin.

Le système de relevé de la température des arêtes du foret par la coupe de thermocouple nécessite des moyens de mise en œuvre relativement complexes. Néanmoins il est possible de réaliser un nombre d'essais important par ce type de mesure.

La dernière grande famille de méthodologies concerne les systèmes embarqués sur l'outil ou la broche. Cette dernière approche semble le meilleur compromis afin de mesurer la température d'un foret, un certain nombre de contraintes sont liées à l'emploi du capteur Kistler 9123C, mais il est possible de les surmonter.

Il convient néanmoins de relever que l'instrumentation des outils en thermocouples fragilise grandement les outils, il est donc parfois impossible techniquement de mesurer la température dans l'outil sans risquer de le détruire lors de l'usinage. La casse des outils instrumentés en thermocouples a en effet été observée lors des opérations de perçage de l'empilage Ti6Al4V/CFRP.

Chapitre 7 - DECOMPOSITION D'ARETE (METHODOLOGIE ET VALIDATION)

1 - INTRODUCTION

Le perçage est, par définition, une opération fermée. Il est par conséquent compliqué de déterminer finement ce qui se passe au niveau des arêtes. Les diverses modélisations à l'aide de la coupe orthogonale ou oblique ne permettant pas, pour le moment, de faire de transposition directe au perçage. Il est surprenant que peu d'études visent à reconstituer les efforts le long de l'arête d'un foret. Seulement deux méthodologies ont été relevées dans la bibliographie.

Le premier principe relevé consiste à décomposer physiquement l'arête en usinant des pions de diamètres inférieurs au diamètre de l'outil ou en usinant des plaques percées d'avant-trous de diamètres connus. Le nombre de segments d'arêtes identifié est directement lié au nombre d'essais réalisés, la décomposition peut être qualifiée de discrète.

Le second principe, moins courant, consiste à décomposer les efforts lors de la pénétration de la pointe de l'outil afin de revenir à une cartographie des efforts le long de l'arête. Il est par conséquent possible de remonter à un nombre important de segments le long de l'arête, et donc de qualifier cette décomposition de continue.

Afin d'effectuer la validation des méthodologies, une comparaison des résultats issus des deux principes a été menée. [Poutord_2013a]

Il convient de noter que pour l'ensemble de ces méthodologies, l'arête est « découpée » en segments le long du rayon. Afin de pouvoir décomposer les efforts une hypothèse est réalisée, celle de l'indépendance des segments. Elle implique que les diverses portions d'arêtes coupent la matière de manière indépendante de leurs voisines. Cette hypothèse ne peut être vérifiée autrement qu'à l'aide de « split tool » [Barrow_1982 ; Kato_1972], dont une partie de l'arête est instrumentée en effort. Ce moyen, déjà complexe à mettre en place en tournage sur des

outils de géométrie simple, ne pourra pas être développé pour cette étude pour des raisons techniques évidentes. Le fait de découper les diverses parties de l'arête afin d'analyser les efforts locaux permet de s'assurer que l'ensemble de l'outil fonctionne dans sa plage de fonctionnement optimale, ou qu'aucune zone de l'outil n'est confrontée à des contraintes qui risquent de l'endommager précocement.

Afin de comparer les résultats obtenus, il est choisi d'effectuer les essais dans un alliage de titane, le Ti6Al4V. Le choix s'est porté sur cet alliage car il permet de mettre en place l'ensemble des méthodologies envisagées, contrairement à l'IMA M21E qui ne pourrait pas être usiné aisément en tournage.

La détermination des efforts le long de l'arête peut également servir à recalibrer des simulations qui décomposent l'arête en divers segments [Matsumura_2013], permettant ainsi de déterminer les évolutions des efforts lors du passage de l'interface lors du perçage d'empilage multi-matériaux.

2 - METHODOLOGIES DE DECOMPOSITION D'ARETE

2 - 1 - METHODOLOGIE DE LA DECOMPOSITION PHYSIQUE DE L'OUTIL PAR PERÇAGE DE PIONS

La décomposition physique de l'action individuelle de chaque portion de l'outil peut s'effectuer de diverses manières, lorsque le choix se porte sur l'usinage de cylindres de diamètres inférieurs, égaux et supérieurs au diamètre de l'outil (méthode 1). Le plus simple est d'effectuer ces essais sur un tour. La Figure 78 présente les conditions dans lesquelles ont été effectués les essais. Un foret de diamètre 3 mm et un outil de chariotage sont installés sur la tourelle en plus du foret à tester. Les divers engagements d'arête de l'outil au cours des essais permettront de revenir à des efforts locaux sur l'arête.

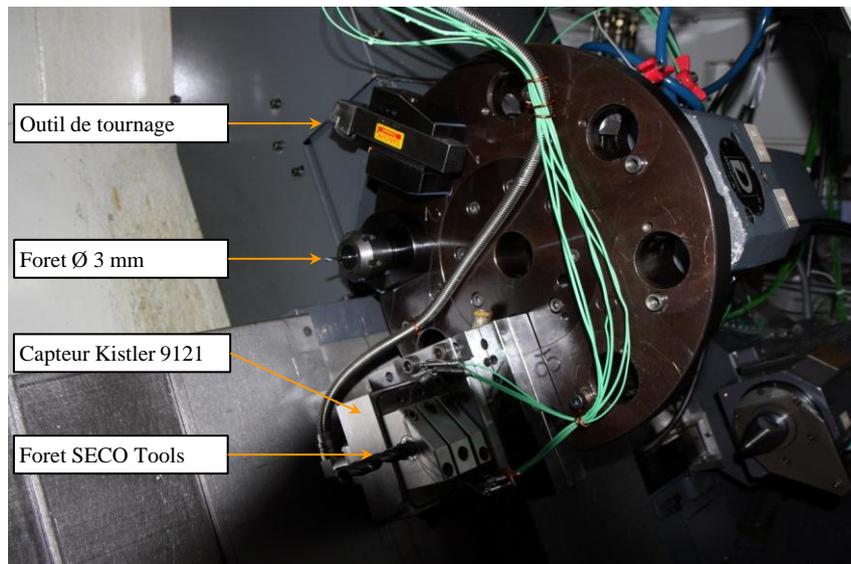


Figure 78 : Dispositif mis en place sur la tourelle du tour pour assurer la décomposition d'arête

2 - 1 - 1 - PARAMETRES DE COUPE ET ACQUISITION

Une partie de la plaque de Ti6Al4V a été tournée afin d'en faire des barres de 20 mm de diamètre. Les conditions de coupe retenues sont celles issues du couple outil-matière (page 93), à savoir une vitesse de coupe de 10 m/min et une avance de 0.2 mm/tour, le tout sans lubrification.

Lors d'essais précédents similaires (Chapitre 5), il a été relevé que la mesure du couple à l'aide du courant de broche du tour n'apporte pas une précision et une réactivité suffisante pour ce type d'expérience. Par conséquent, il a fallu développer un système particulier afin de

pouvoir mesurer les couples de perçage sur un tour. C'est pour cela que la platine d'effort Kistler 9121 a été spécialement étalonnée par nos soins afin de mesurer les efforts dans les trois directions ainsi que le couple de coupe (cette platine, associée aux amplificateurs de charges trois voies recommandés ne permettant pas de mesurer cette dernière information, un montage spécifique détaillé dans l'Annexe 1 a permis cette mesure).

Afin de remonter aux efforts le long de l'arête, un certain nombre de données sont acquises de manière synchrone à l'aide d'un châssis d'acquisition CompacDAQ NI 9188 :

- Une base de temps (40 kHz),
- Les efforts et couple de coupe (M_z , F_z , F_x , F_y),
- Les températures en 6 points de l'outil (fréquence limitée à 100 Hz par la carte NI 9219 et 4 Hz pour la carte 9211),
- La position de l'outil à l'aide des règles optiques de la machine (résolution 0.1 μm),
- La position angulaire de l'échantillon (codeur de broche de 4096 points, assurant une résolution de 0.09°).

2 - 1 - 2 - EXPERIENCES REALISEES

Plusieurs précautions précisées dans la suite sont prises avant de débiter les essais.

2 - 1 - 2 - 1 - Expériences préliminaires/vérifications

Avant même d'effectuer ces essais il a fallu s'assurer que le foret employé ne s'userait pas de manière significative au cours de nos essais. Des essais d'usure ont donc été menés à l'aide d'un outil afin de s'assurer que les valeurs en effort ne varient pas de manière significative lors du perçage d'une vingtaine de trous. Ceux-ci ont été conduits sur une fraiseuse et l'instrumentation en effort a été réalisée à l'aide d'un capteur rotatif de mesure d'effort (Kistler 9123C).

La seconde vérification fut l'étalonnage de la platine Kistler 9121 associé à l'amplificateur de charge quatre voies 5019 afin d'acquérir des informations au niveau des trois efforts, ainsi que du couple dans l'axe de la broche. Cet étalonnage est présenté dans l'Annexe 1.

Avant de commencer les essais, le troisième point consiste à régler la coaxialité entre l'outil et la broche. Un axe Y réglable manuellement dû être monté sur la tourelle afin de garantir un bon positionnement de l'outil par rapport à la broche. L'ensemble des axes X, Y et Z, ainsi que la mise en position de la bride sur la platine Kistler 9121 (rotation autour de l'axe Y) ont dû être réglés.

La vérification des dimensions réelles des pions usinés (à 0.2 μm de résolution), a permis de valider la portion de l'arête en prise du foret lors des essais.

Lors de ces mesures, une inspection de l'outil à l'aide d'une loupe permet de s'assurer l'absence d'endommagement important de l'arête.

Afin de pouvoir remonter à l'ensemble des efforts sur l'outil, il a été envisagé d'effectuer des essais à l'aide de foret monodent. Les essais réalisés à l'aide de cet outil sont présentés en Annexe 7, les résultats ne seront pas conservés à cause d'une forte flexion de l'outil en usinage, faussant les résultats.

Une fois ces essais et vérifications effectués, il est possible de commencer les essais pour la décomposition discrète d'arête à proprement parler.

2 - 1 - 2 - 2 - Expériences pour décomposition d'arête

Le Tableau 12 résume les dimensions des pièces usinées pour cet essai, le détail des essais réalisés est présenté dans l'Annexe 8.

| Paramètre | Valeur |
|--------------------|--------------------------------------|
| Foret | Foret Seco Tools \varnothing 12 mm |
| Vc | 10 m/min |
| f | 0.2 mm/tr |
| Diamètre intérieur | 0 ou 3 mm |
| Diamètre extérieur | 5 – 7 – 9 – 11 – 11.9 – 20 mm |
| Lubrification | Usinage à sec |

Tableau 12 : Paramètres des essais réalisés pour le Couple Arête Matière (CAM) dans le Ti6Al4V

Afin d'améliorer la précision des valeurs retenues, la dérive de l'ensemble platine et amplificateur de charge a été compensée comme cela a été présenté au Chapitre 5.

2 - 1 - 3 - RESULTATS ET EXPLOITATIONS

Les essais réalisés, au nombre d'une vingtaine, permettent de déterminer les efforts sur 7 zones du foret. Etant donné que le nombre d'essais est supérieur au nombre de zones définies sur le foret, chaque valeur d'effort sur une zone est le résultat de plusieurs essais.

Ainsi, la valeur retenue pour les efforts sur la partie la plus centrale est la moyenne de ces 6 valeurs :

$$F_{Calc_0}^3 = \frac{1}{6} \cdot \sum_{k=[5 \ 7 \ 9 \ 11 \ 11.9 \ 20]} (F_{Mes_0}^k - F_{Mes_3}^k)$$

Avec :

$F_{Calc_i}^j$ L'effort calculé pour un engagement d'arête du rayon i au rayon j en mm
 $F_{Mes_i}^j$ L'effort mesuré lors d'un perçage avec un engagement d'arête du rayon i au rayon j en mm

Lors des calculs pour les autres segments d'arêtes, les valeurs précédemment calculées sont réemployées. La formule suivante représente la formule pour le segment d'arête de 3 à 5 mm :

$$F_{Calc_3}^5 = \frac{1}{2} \cdot ((F_{Mes_0}^5 - F_{Mes_0}^3) + F_{Mes_3}^5)$$

Et pour les segments suivants entre un diamètre i et k, la formule employée est la suivante :

$$F_{Calc_i}^k = \frac{1}{4} \cdot ((F_{Mes_0}^k - F_{Mes_0}^i) + (F_{Mes_3}^k - F_{Mes_3}^i) + (F_{Mes_0}^k - F_{Calc_0}^i) + (F_{Mes_3}^k - F_{Calc_3}^i))$$

Les résultats de ces calculs permettent de déterminer la portion de l'effort de poussée ou du couple associé à ces segments d'arête. Le couple (C_z) est alors converti en effort de coupe (F_c) en effectuant l'hypothèse que sur cet élément d'arête, F_c est constant. La formule suivante est alors employée :

$$F_c = C_z \cdot \frac{3 \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2)}{2 \cdot (R_{ext}^3 - R_{int}^3)}$$

Les efforts sur chaque zone sont divisés par la longueur d'arête en contact. La valeur obtenue est alors en N/mm, ce qui correspond à la charge linéique le long de l'arête. Cette opération a pour intérêt de permettre des comparaisons même si les portions d'arête ne sont pas de longueurs identiques. Les efforts sur les listels sont maintenus en Newtons et sont divisés par

le nombre de dents (2) afin de remonter à l'effort sur une arête. Ces calculs permettent d'obtenir la répartition des efforts le long de l'arête.

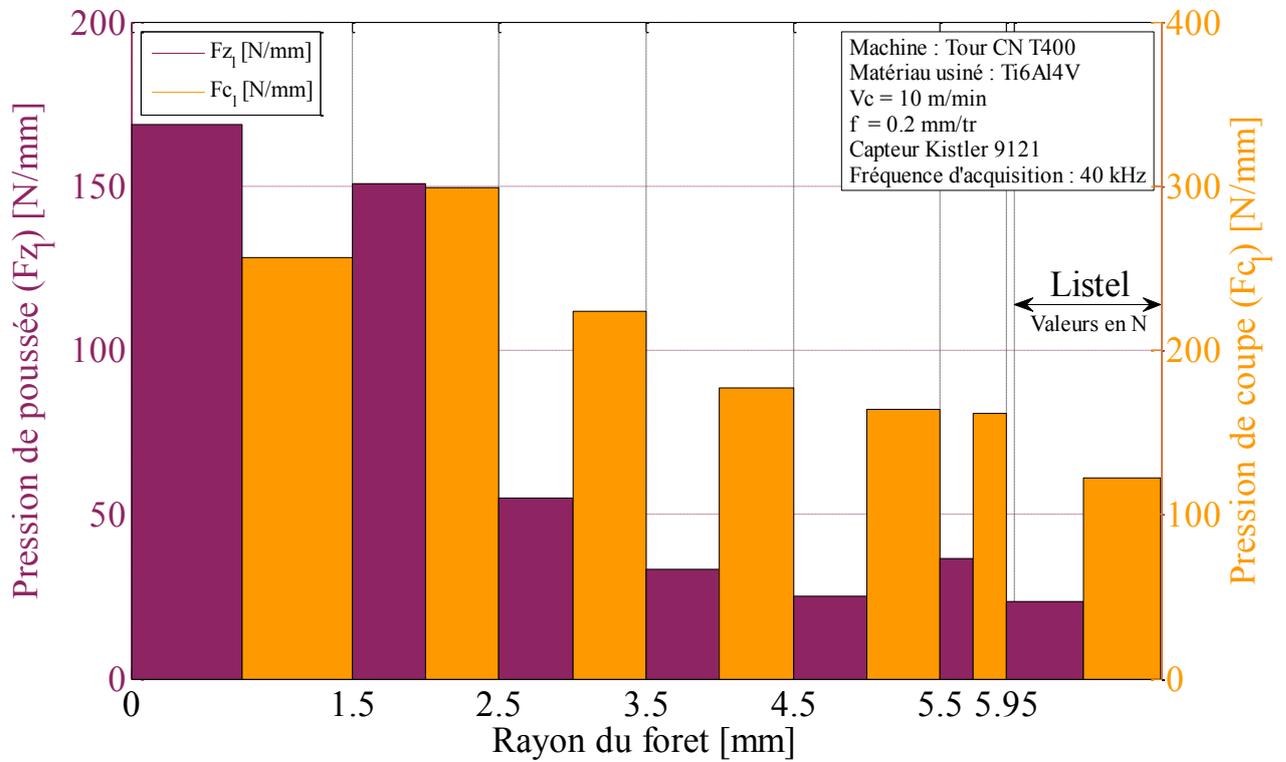


Figure 79 : Répartition des pressions de coupe le long de l'arête du foret à l'aide des essais sur tour

2 - 2 - METHODOLOGIE DE LA DECOMPOSITION PHYSIQUE DE L'OUTIL A L'AIDE D'AVANT-TROUS

La précédente méthodologie, correspondant à l'usinage de pions, permet une décomposition discrète des efforts le long de l'arête en ayant un engagement progressif de l'âme vers les becs : la matière à percer est retirée du côté des becs (en perçant des pions de divers diamètres extérieurs). Les essais présentés dans cette partie permettent également une décomposition discrète, mais la matière à percer est retirée du côté de l'âme grâce à des avant-trous de divers diamètres.

Pour des raisons pratiques, ces essais se sont déroulés sur une fraiseuse trois axes, la DMC 65.

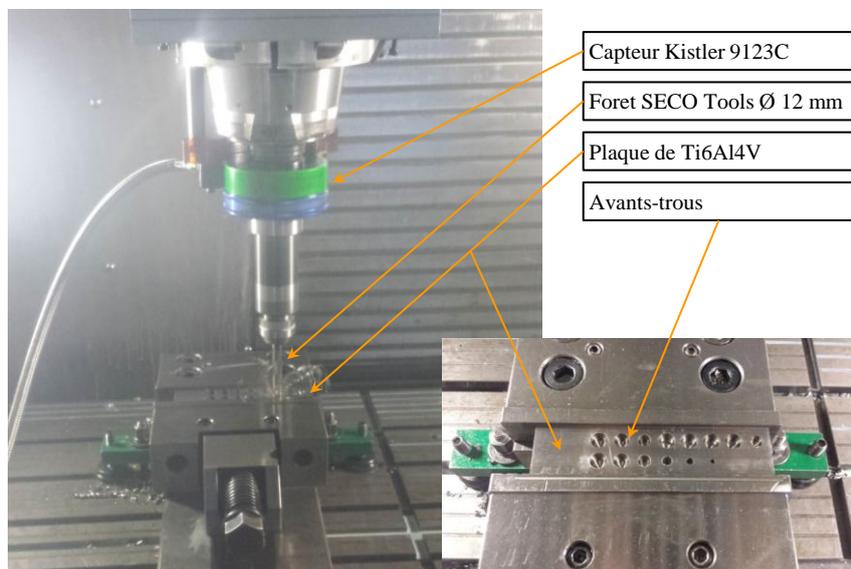


Figure 80 : Déroulement de l'essai de décomposition de pointe sur fraiseuse

2 - 2 - 1 - PARAMETRES DE COUPE ET ACQUISITION

Pour comparer les résultats de cette méthodologie aux précédents, le matériau usiné est issu de la même plaque de Ti6Al4V que pour les essais précédents. Les conditions de coupe retenues sont identiques à celles employées lors de la décomposition d'arête à l'aide de pions.

Un capteur d'effort rotatif Kistler 9123C a été employé afin de mesurer les efforts suivant les trois directions ainsi que le couple de broche.

Les éléments suivants sont mesurés de manière synchrone, encore une fois grâce à l'emploi du châssis Compac DAQ NI 9188 :

- Une base de temps
- Les efforts et couple de coupe
- La position de l'outil à l'aide des sorties analogiques de la machine (sur 8 bits)
- Les conditions de coupe à l'aide des sorties analogiques de la machine (sur 8 bits)

Des essais ont été menés à l'aide d'outils instrumentés de sondes thermocouples, comme pour la méthodologie sur tour. Néanmoins le passage des thermocouples fragilise l'outil (création de trous et de rainures derrière les listels pour passer les sondes). Cette fragilité accrue a engendré une rupture des becs lors du perçage avec un avant-trou de 7 mm de diamètre. Les avant-trous génèrent des contraintes supplémentaires au niveau de l'arête pouvant entraîner une rupture. Les essais sont donc menés à l'aide d'outils n'ayant pas de rainure derrière les listels. Cette géométrie, plus robuste, n'impacte pas le profil de l'arête, et donc les efforts le long de celle-ci.

2 - 2 - 2 - EXPERIENCES REALISEES

Avant de pouvoir effectuer les perçages, il a fallu vérifier un certain nombre de points similaire à ceux identifiés lors des essais d'usinages de pions de divers diamètres.

Les dimensions des avant trous ont été choisies afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux issus de la décomposition précédente :

| Paramètre | Valeur |
|--------------------|----------------------------------|
| Foret | Foret Seco Tools Ø 12 mm (T01) |
| Vc | 10 m/min |
| f | 0.2 mm/tr |
| Diamètre intérieur | 0 – 3 – 5 – 7 – 9 – 11 – 11.8 mm |
| Lubrification | Usinage à sec |

Tableau 13 : Paramètres des essais réalisés pour le CAM dans le Ti6Al4V sur fraiseuse

Présenté au Chapitre 5, la dérive du signal des efforts est compensée, ce qui permet d'améliorer de manière significative la précision des valeurs. De plus, chacune des conditions d'engagement d'arête est effectuée trois fois.

2 - 2 - 3 - RESULTATS ET EXPLOITATION

Les essais réalisés, au nombre de 22, dans 7 configurations décrites dans le Tableau 13, permettent de déterminer les efforts sur 7 zones du foret, comme dans la méthodologie précédente. Cependant, pour cette expérience, le nombre d'essais est directement lié au nombre de segments retenus sur l'arête.

Ainsi, la valeur retenue pour les efforts sur la partie la plus centrale (âme) est obtenue par le biais de cette formule :

$$F_{Calc_0}^3 = F_{Mes_0}^{12} - F_{Mes_3}^{12}$$

De même pour les segments suivants, entre diamètre i et k , la formule suivante est employée :

$$F_{Calc_i}^k = F_{Mes_i}^{12} - F_{Mes_k}^{12}$$

La méthode précédemment employée (section 2 - 1 - Méthodologie de la décomposition physique de l'outil par perçage de pions) pour le calcul des efforts de coupe local (F_{c_i}) ainsi que l'effort de poussée local (F_{z_i}) en N/mm permet de calculer les efforts le long de l'arête.

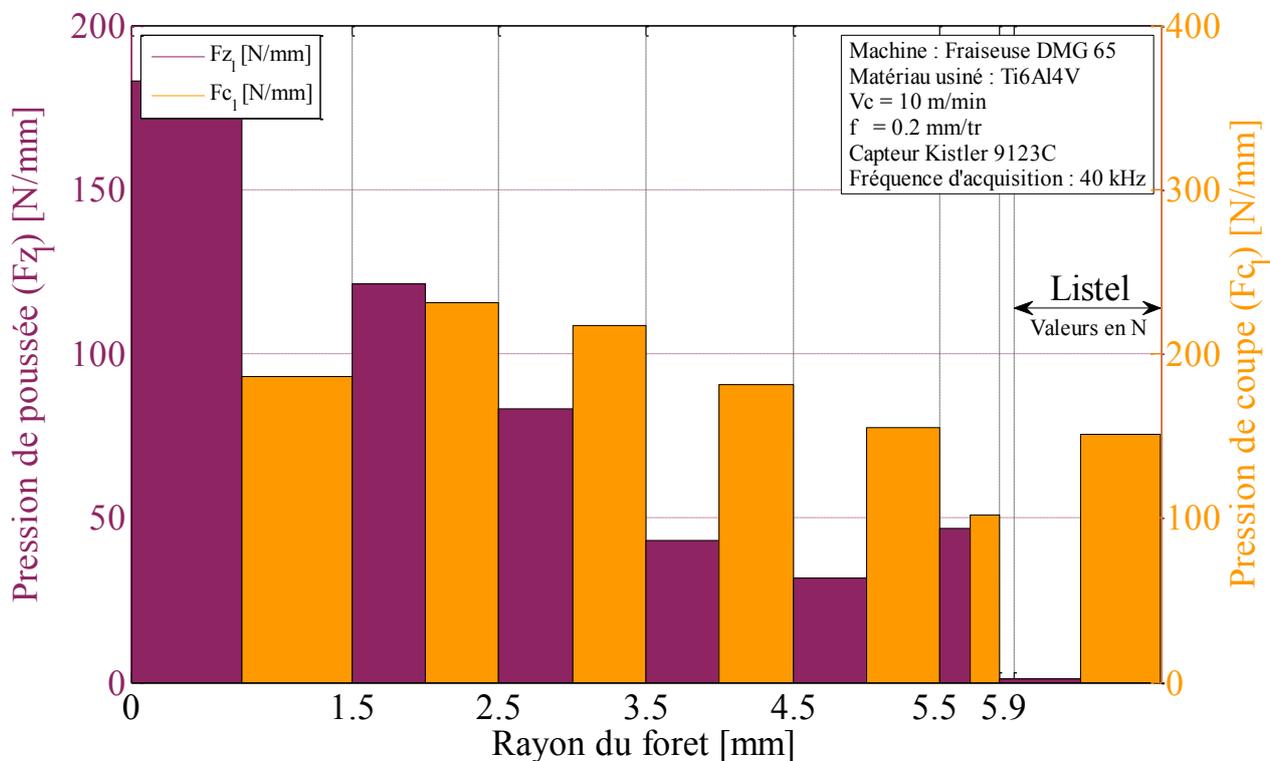


Figure 81 : Répartition des pressions le long de l'arête du foret à l'aide des essais sur fraiseuse

2 - 3 - METHODOLOGIE DE LA DECOMPOSITION DE LA POINTE DE L'OUTIL

Si les moyens exposés ont nécessité le recours à de multiples essais, cette dernière méthode présente l'avantage de permettre une reconstitution à l'aide d'un usinage unique.

Cette technique repose sur le fait que les outils ont un angle de pointe connu, ce qui permet à l'outil de s'enfoncer progressivement dans la matière. En décomposant cet enfoncement, il est possible de revenir à des efforts le long de l'arête.

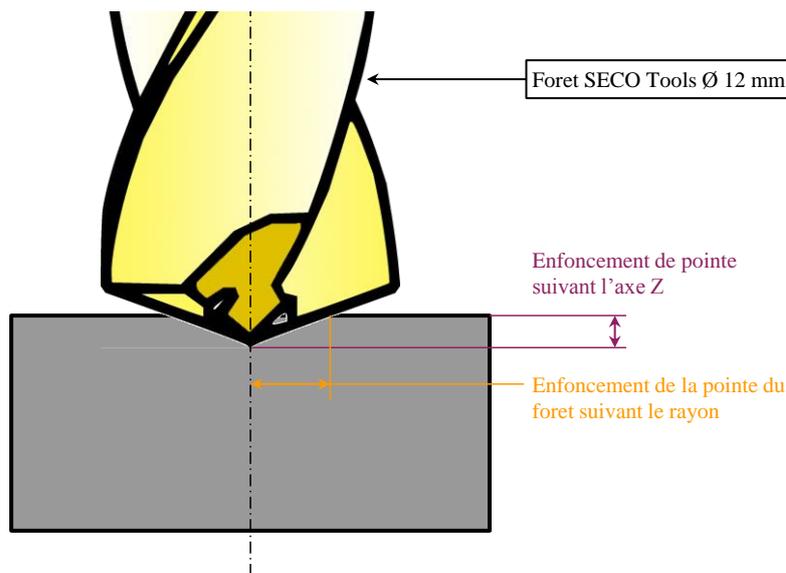


Figure 82 : Lien entre l'enfoncement du foret suivant l'axe Z et l'engagement d'arête

2 - 3 - 1 - PARAMETRES DE COUPE, ACQUISITION ET TRAITEMENT DU SIGNAL

Etant donné qu'un unique perçage est nécessaire, les mesures d'efforts réalisées en perçage plein pour les essais des deux précédentes expériences sont reprises. Par conséquent, les paramètres de coupe et d'acquisition sont identiques.

Le traitement des données est effectué à l'aide d'un programme Matlab développé au cours de cette thèse. La Figure 83 résume le fonctionnement global de ce programme, qui sera davantage détaillé dans la section 4 de ce chapitre (page 156).

Au Chapitre 5, la dérive du capteur est compensée par une droite affine en considérant que les efforts et le couple suivant l'axe Z doivent être nuls avant d'entrer dans la matière et lorsque l'outil est ressorti de la matière.

Il convient de lisser le signal des efforts et du couple pour ne plus être dépendant du bruit de mesure. Le signal correspondant à la position étant légèrement bruité, il est également lissé.

La position est ensuite convertie en longueur d'engagement d'arête du foret. Les efforts à divers engagements d'arêtes sont relevés et par soustraction, les efforts sur les segments d'arête sont définis. Les efforts de poussée et de coupe sur les segments sont déterminés et exprimés en N/mm.

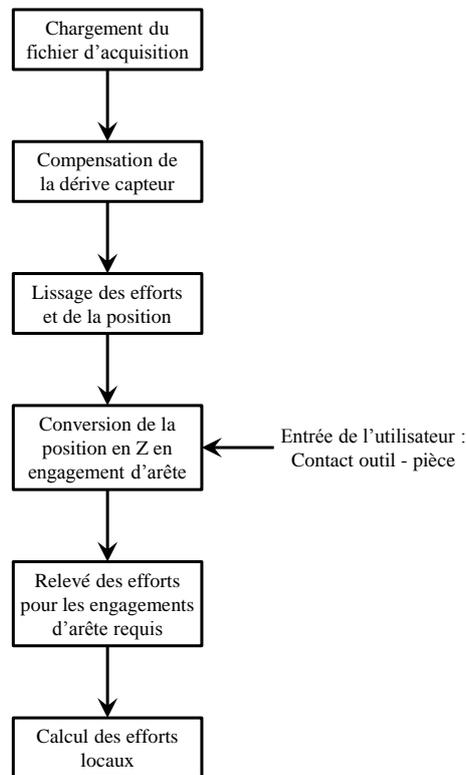


Figure 83 : Fonctionnement du programme de décomposition d'arête du foret lors de l'enfoncement de la pointe

2 - 3 - 2 - EXPERIENCES PRELIMINAIRES/VERIFICATIONS

2 - 3 - 2 - 1 - Mesure de l'angle de pointe

Afin de convertir les données issues de l'axe Z de la machine en longueur d'arête engagée, il faut connaître avec précision la géométrie de l'outil, et plus particulièrement l'angle de pointe.

Pour effectuer cette mesure, l'outil a été placé sur un projecteur de profil et a été positionné de telle sorte que ses deux becs soient dans le même plan. Suite à quoi, l'emplacement des deux becs et de la pointe a été relevé, permettant de déduire l'angle de pointe réel de l'outil.

La connaissance précise de l'angle de l'outil est nécessaire pour obtenir une décomposition correcte des efforts le long de l'arête. En effet, les forets employés ayant un angle de pointe d'environ 140°. La Figure 84 présente la variation de la longueur d'enfoncement de la pointe en fonction de l'angle de pointe. Une faible erreur de cet angle, de quelques degrés seulement, génère des erreurs de calcul de la distance de l'ordre de 15 à 20 % à parcourir en Z pour enfoncer la pointe, ce qui pourrait générer des variations sur les répartitions des efforts le long de l'arête.

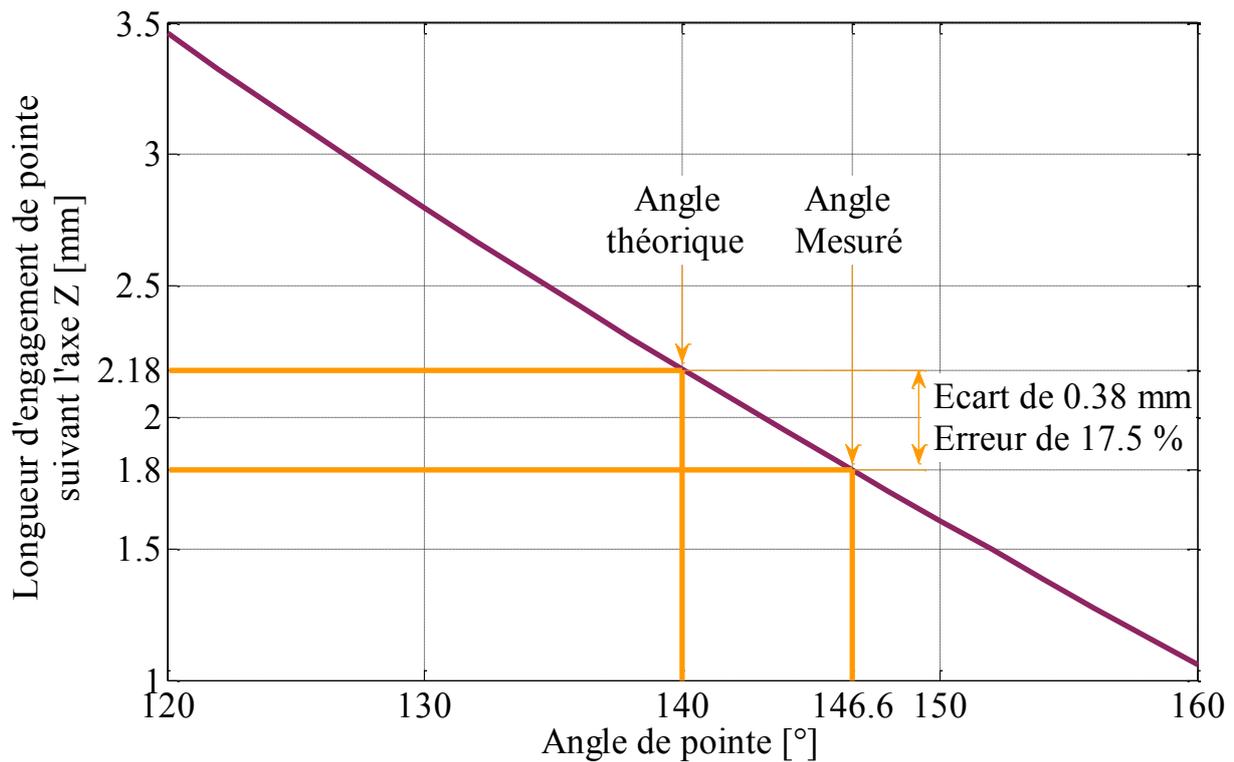


Figure 84 : Impact de l'angle de pointe sur la longueur d'engagement de pointe suivant l'axe de broche

La Figure 85 présente les résultats des décompositions des efforts le long de l'arête à l'aide d'un essai dont le foret a un angle de pointe de 146.6°. Le signal a été traité comme si le foret avait un angle de pointe de 146.6° et 140°. Cette comparaison permet de mettre en évidence l'importance d'une bonne connaissance de l'angle de pointe.

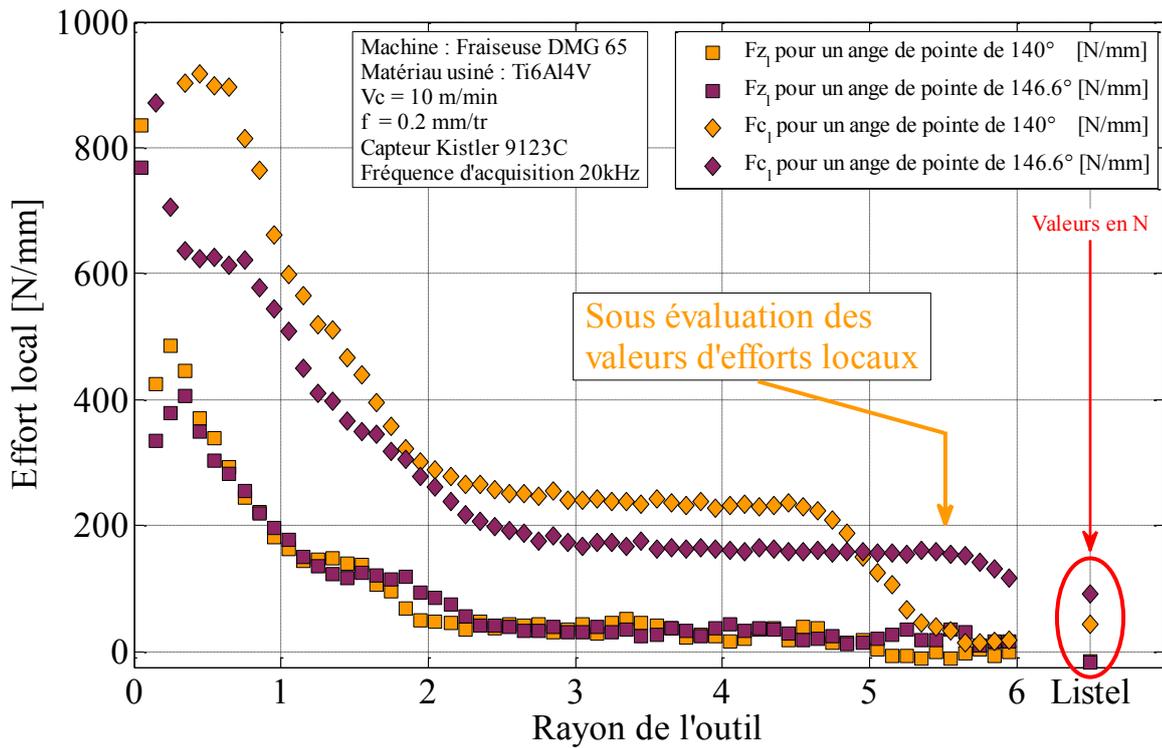


Figure 85 : Evaluation des efforts locaux en fonction de la variation de l'angle de pointe

La définition de l'angle de pointe est importante car c'est ce paramètre qui permet de recalibrer les efforts avec les segments d'arête. La Figure 77 met en évidence le fait qu'un angle de pointe sous-évalué aura tendance à réduire les valeurs au niveau des becs et à décaler la courbe d'efforts vers la gauche (ce qui revient à concentrer davantage les efforts au niveau de l'âme).

2 - 3 - 2 - 2 - Détection du contact outil-pièce

La Figure 84 met en évidence que la distance en Z pour engager pleinement l'arête est relativement courte pour les forets de 12 mm de diamètre et d'angle de pointe proche des 140°. Par conséquent, il convient de connaître avec précision le point de contact entre l'outil et la pièce.

Un système électrique a été développé, permettant de détecter le contact outil-pièce en cours d'usinage. Ce développement permet de s'assurer, que le point sélectionné comme étant le point de contact de l'outil avec la pièce, correspondait bien à celui identifié à l'aide de l'évolution des efforts de poussée. Le système a également permis une plus grande précision dans la détermination de ce point, ainsi que la suppression du « facteur humain » (l'identification du point de contact au regard des efforts peut varier d'une personne à l'autre).

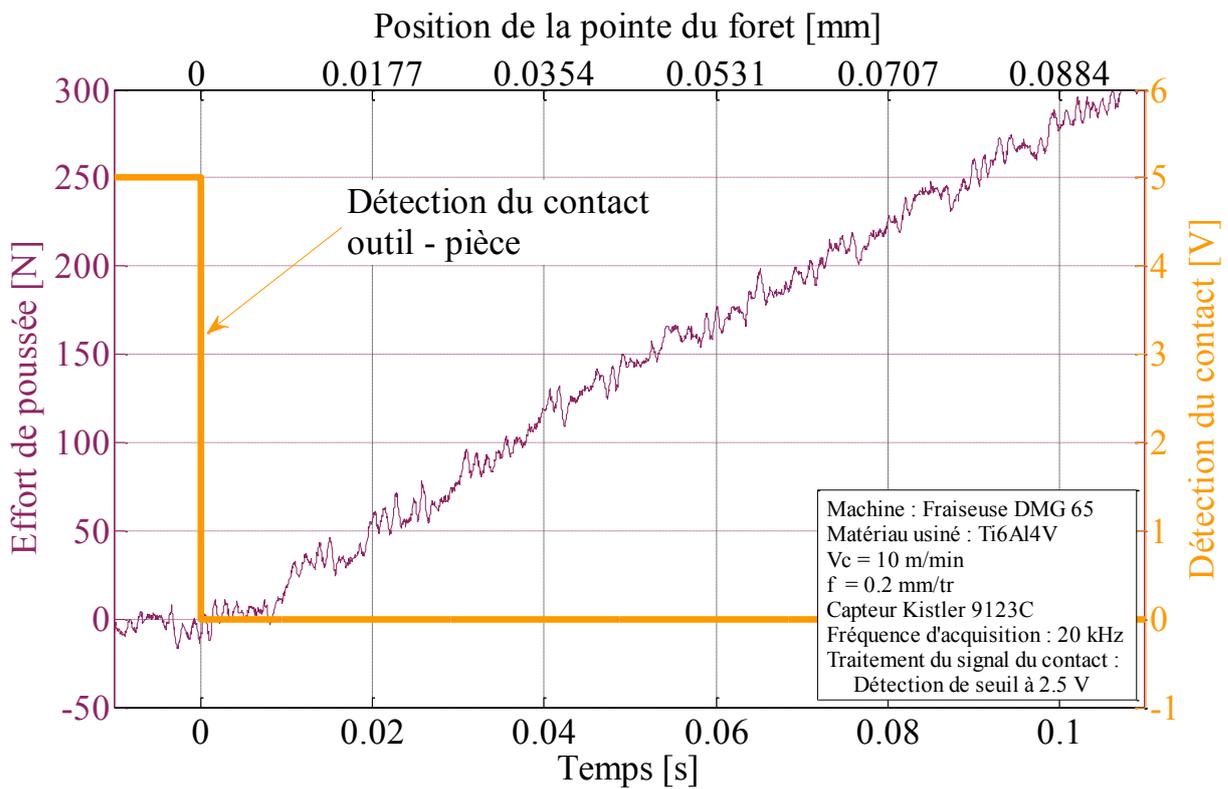


Figure 86 : Détection du contact outil-pièce à l'aide d'un dispositif électrique

La Figure 86 présente la détection du contact outil-pièce par fermeture d'un circuit électrique. Le signal obtenu pour la identifier le contact est passé par une détection de seuil sous Matlab afin d'avoir un signal plus lisible (la résistance entre la matière et l'outil lors de l'usinage variant, le signal est légèrement bruité lors de l'usinage). Le signal des efforts est brut et est obtenu lors d'un perçage de Ti6Al4V, avec les conditions de coupes définies préalablement.

Le point de contact entre l'outil et la pièce peut ainsi être détecté à la fréquence d'échantillonnage de la mesure. De plus, il est intéressant de remarquer que le fait de ne relever que les efforts génère une imprécision de l'ordre de 0.01 s dans la détermination du point de contact dans le Ti6Al4V, mais de 0.1 s dans le CFRP. Avec les conditions de coupe définies précédemment, l'outil avance à une vitesse de 0.88 mm/s, ce qui implique que l'imprécision dans la position du point initial est de 0.088 mm, ce qui n'est pas négligeable au vu de la courte distance nécessaire à l'enfoncement de la pointe (environ 5 %).

Cette vérification de la détection du contact est un point nécessaire à la validité scientifique de ces mesures. Afin de le compléter, il conviendrait de mesurer le retard généré par la chaîne de mesure des efforts (à la fois la platine et l'amplificateur de charge). Kistler indique néanmoins que ces retards sont inférieurs à 10 ms, et que ce dernier ne peut venir que de l'amplificateur de charge, les retards provoqués par les quartzs et le câble n'étant pas mesurables par les moyens employés au cours de ces essais.

2 - 3 - 2 - 3 - Choix du type de lissage des valeurs et taille de la fenêtre

Les signaux issus du capteur rotatif étant trop bruités pour remonter directement aux efforts le long de l'arête, il a fallu effectuer un lissage de ce signal. La principale technique employée est de placer un filtre passe bas, soit électroniquement sur le câble de sortie de l'amplificateur de charge, soit numériquement.

La fréquence de coupure est alors choisie relativement basse pour permettre de bien lisser le signal, mais suffisamment haute pour garder les variations de celui-ci. Une fréquence proche de 10 à 20 Hz est généralement adoptée. Les deux principaux inconvénients de cette méthode sont la génération d'un retard et une altération des variations du signal. Ces deux défauts peuvent donc fausser la reconstitution des efforts.

Une autre technique originale de lissage est d'effectuer une moyenne glissante. Ce type de traitement présente l'intérêt de pouvoir éliminer totalement une fréquence ainsi que toutes ses harmoniques. De plus, le déphasage entre les signaux est maîtrisé. Cette dernière particularité est des plus importantes pour la méthodologie de décomposition de l'enfoncement de pointe. Le choix de la longueur de moyennage sera pris avec soin afin de réduire au maximum les perturbations tout en gardant le plus possible des variations rapides. Les deux principales fréquences relevées lors du perçage (à la fois dans le Ti6Al4V et dans les matériaux fibreux comme l'IMA M21E) sont la fréquence de rotation de l'outil ainsi que le double de celle-ci (fréquence de passage des arêtes). Ces deux fréquences sont représentatives des défauts

géométriques de l'outil (affûtage déséquilibré, écaillage d'une arête ...), mais également de la broche ou du porte outil (faux rond). Ces fréquences proviennent également de l'aspect non isotrope de certains matériaux. Ainsi, la longueur de moyennage retenue correspondra à la fréquence la plus basse de celle à retirer, à savoir la fréquence de rotation de la broche.

2 - 3 - 2 - 4 - Répétabilité

La campagne d'essai de validation des outils (Chapitre 5) a été employée pour contrôler la répétabilité de la méthode. La faible fréquence d'acquisition (5 kHz) et l'absence de la position et couple lors de cet essai préliminaire, ont réduit la précision des calculs. D'autres essais non présentés ici ont donc également été sélectionnés pour valider les résultats.

2 - 3 - 3 - RESULTATS ET EXPLOITATION

Les résultats présentés sur la Figure 87 correspondent aux extractions des données issues des essais réalisés en tournage lors de la précédente décomposition d'arêtes lorsque le foret perceait en pleine matière. L'avantage de cette méthodologie est de pouvoir affiner de manière bien plus importante les segments traités.

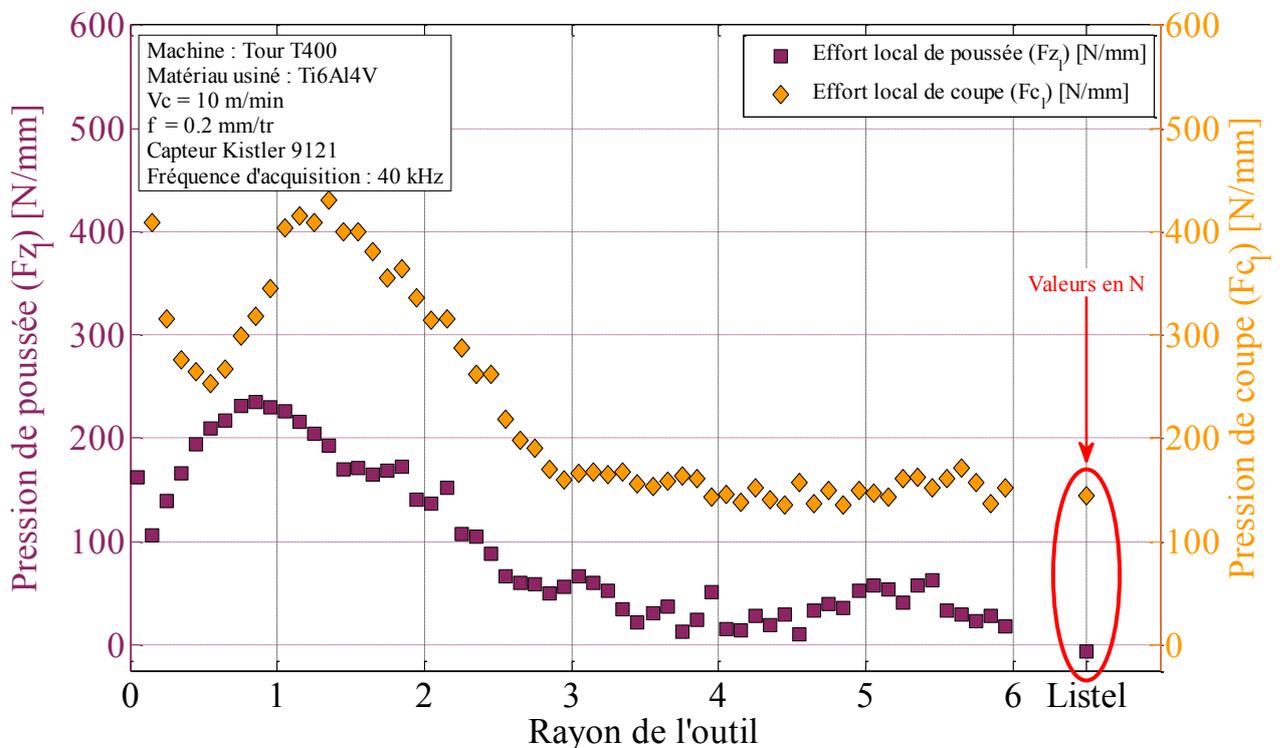


Figure 87 : Répartition des efforts, calcul effectué grâce à l'enfoncement de pointe

3 - COMPARAISON DES DIVERSES METHODOLOGIES

Les trois méthodologies de décomposition de l'arête ayant été présentées et développées, il convient maintenant de confronter les résultats obtenus ainsi que de comparer leurs avantages et inconvénients.

3 - 1 - COMPARAISON DES RESULTATS

La Figure 88 représente les répartitions des efforts le long de l'arête. Les trois méthodes développées sont comparées. Les segments d'arêtes sont légèrement différents au niveau des becs, le rayon de 5.9 mm est employé pour les décompositions d'arêtes à l'aide de pré-trous et d'enfoncement de pointe alors que pour les essais sur tour, le segment d'arête se poursuit jusqu'à 5.95 mm de rayon.

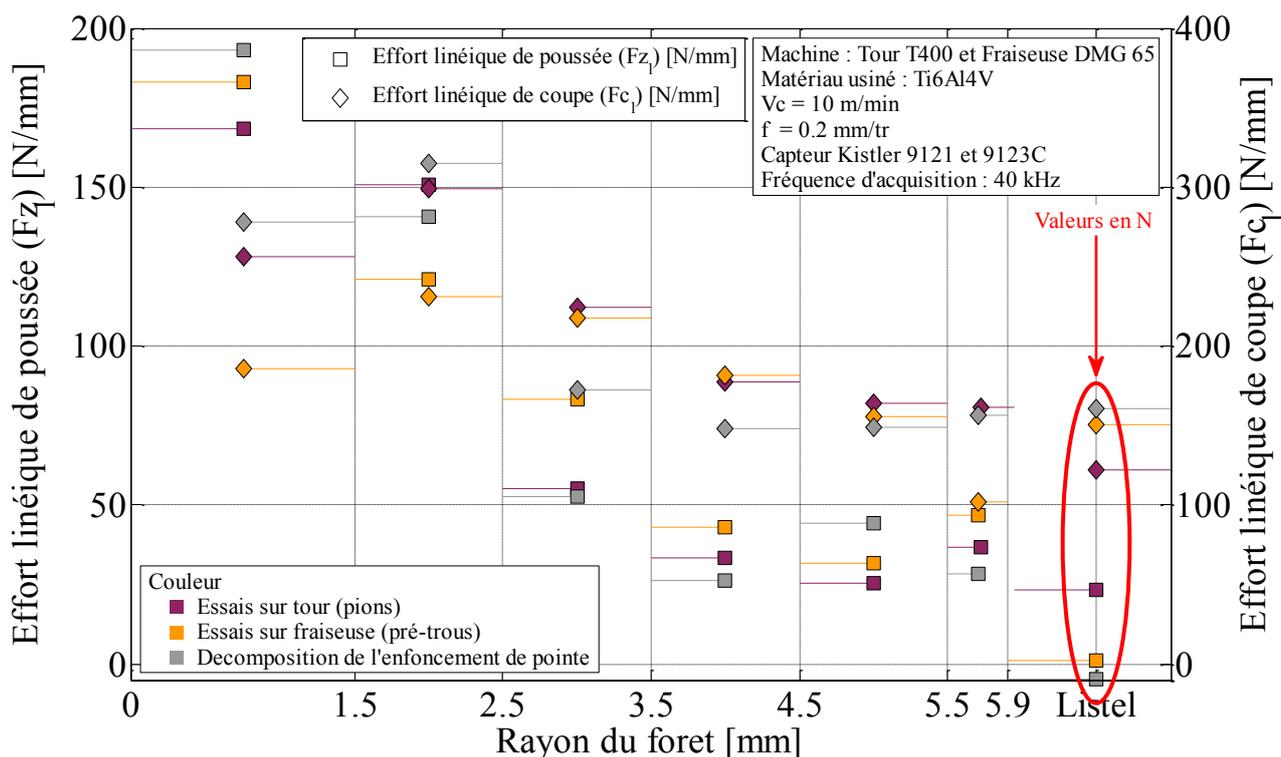


Figure 88 : Comparaison des efforts le long de l'arête calculés à l'aide des trois méthodologies

L'ensemble des trois méthodologies ont permis de retracer les efforts locaux pour chacun des segments. Si quelques écarts peuvent être relevés au niveau des mesures, ces variations restent contenues et le profil de l'évolution des efforts le long de l'arête reste similaire. Ces essais

permettent de confirmer que ces trois méthodes permettent de remonter aux efforts le long de l'arête pour un foret.

3 - 2 - COMPARAISON DES AVANTAGES/INCONVENIENTS DES DIVERSES METHODOLOGIES

Le Tableau 14 résume les avantages et inconvénients de chacune des trois méthodes développées pour recomposer les efforts le long de l'arête.

| Décomposition physique Usinage de pions | Décomposition physique Usinage avec avant-trous | Décomposition de l'enfoncement de la pointe |
|--|--|--|
| Décomposition discrète en quelques segments | | Méthode « continue » |
| Sensible aux diamètres usinés | | Sensible à l'angle de pointe |
| Nombreux essais à réaliser pour remonter à une répartition => Nécessité d'étudier l'impact de l'usure | | Un unique perçage pour obtenir une répartition => Effet de peau du matériau (Variation des propriétés mécaniques avec la profondeur) |
| Expérimentation complexe | Expérimentation simple (mais l'outil doit tenir les contraintes plus importantes) | Expérimentation simple |
| Données simples à traiter | | Données complexes à extraire correctement |

Les trois méthodes permettent de déterminer la tendance des efforts locaux le long de l'arête, que ce soit pour l'effort de coupe ou l'effort de poussée.

Tableau 14 : Comparaison des méthodologies

L'ensemble des qualités de la méthode d'enfoncement de pointe ont conduit à la réalisation d'un programme interfacé permettant ces calculs dans la majorité des cas qui peuvent être rencontrés en perçage. Ce programme est présenté dans la section suivante.

4 - PROGRAMME INTERFACE ET OPTIONS

La méthodologie par enfoncement de pointe ayant permis de remonter aux efforts locaux, il a été choisi de développer un programme permettant de traiter automatiquement les données issues des essais.

Ce programme a pour but de pouvoir être utilisé pour les prochaines études en perçage au sein du laboratoire, ou pour les industriels associés au projet. Il a donc fallu créer un code qui soit à la fois adaptable à un maximum de situation, et qui soit interfacé.

L'objectif étant de traiter des tableaux de données, il a été choisi de réaliser ce programme sous Matlab. Un soin particulier a été apporté au gain de temps dans l'exécution de ce programme. En effet, les fichiers sources sont souvent volumineux (dépassant souvent les 300 Mo), ce qui correspond à plusieurs millions de lignes de valeurs (10^9 lignes). Le gain de temps de calcul a donc été une nécessité, le temps a pu être divisé par environ dix entre les premières versions du code interfacé et la dernière version, permettant le traitement de fichiers de plus de 200 Mo en quelques minutes à quelques dizaines de secondes.

L'interface et les options retenues sont présentées dans la suite. Le code a été prévu pour pouvoir y inclure un certain nombre d'options supplémentaires qui n'ont pu être implantées faute de temps et qui seront présentées dans les perspectives d'évolutions du programme.

4 - 1 - PRESENTATION ET OPTIONS DU PROGRAMME

Le cahier des charges associé au programme regroupe l'ensemble des points suivants :

- Traiter les données directement issues de l'acquisition
- Effectuer une compensation de la dérive du capteur
- Permettre l'affichage des données de l'acquisition
- Afficher les résultats du calcul et les enregistrer dans un fichier
- Retourner la valeur des efforts moyens lors du perçage
- Permettre un certain nombre d'options concernant les propriétés de l'outil (Diamètre, angle de pointe, nombre de dents ...)
- Permettre un certain nombre d'option concernant l'essai (Profondeur de perçage, Présence ou non de l'axe Z dans les données ...)

Afin de répondre au mieux à l'ensemble de ces besoins, une interface a été générée. La Figure 89 présente la disposition retenue pour l'ensemble des éléments.

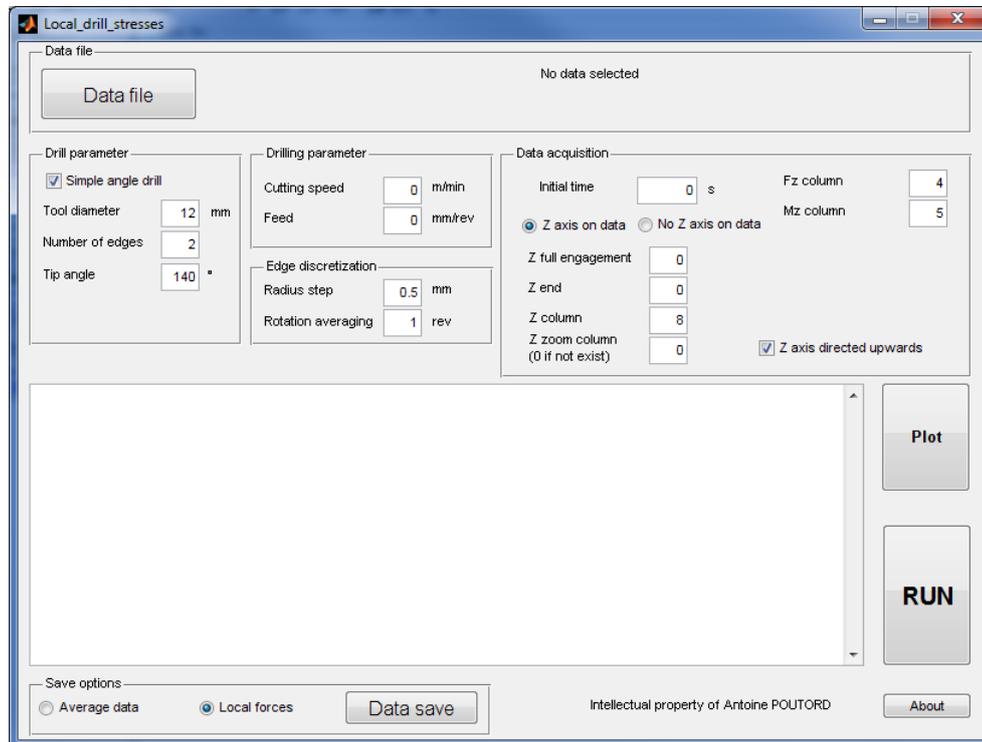


Figure 89 : Interface développée pour le programme de décomposition des efforts le long de l'arête

Il est ainsi possible de sélectionner le fichier à traiter depuis l'interface, puis y associer l'ensemble des paramètres de l'outil. Il est ensuite demandé de donner des indications sur les paramètres de coupe, ce point permet d'optimiser le lissage des valeurs pour assurer un niveau de bruit minimal.

La longueur des segments est également demandée, permettant de définir le nombre de segments que composera l'arête. Un paramètre assurant le lissage y est associé, il est en effet possible de sélectionner la longueur de moyennage souhaitée, l'optimum étant de garder la valeur de un tour. Cette longueur impactera les valeurs d'efforts locaux au niveau de l'âme si les segments d'arête sont trop petits.

En prenant l'exemple de notre outil avec un angle de 146.6° , la pointe s'enfonce sur 1.8 mm suivant Z. En considérant que l'avance durant l'essai est de 0.2 mm/tr (valeur retenue dans la majorité des essais) et que le moyennage s'opère sur un tour, les valeurs d'efforts sur les premiers 0.1 mm de perçage suivant l'axe Z seront sous évalués. En effet, la fenêtre de moyennage inclura des valeurs avant le début du perçage, faussant les valeurs considérées,

pendant les premiers 0.33 mm au rayon de l'outil (0.33 mm au rayon correspond à une valeur d'enfoncement de 0.1 mm suivant Z).

Dans le cas où la longueur de discrétisation de l'arête est trop fine au vu des paramètres, un message d'avertissement est affiché, mais les calculs sont effectués car seule l'âme du foret est affectée.

Les derniers points demandés à l'utilisateur du programme concernent les données lors de l'essai, il faut ainsi indiquer la valeur du temps lors du contact outil pièce (pour cela, le bouton « Plot » permet de tracer l'effort de poussée en fonction du temps, permettant de définir de manière fine le point de contact). Les informations concernant les colonnes où figurent les diverses informations dans le fichier, ainsi que des valeurs de profondeur de perçage (lorsque le listel est pleinement engagé, la profondeur à laquelle l'outil sort du trou.

Il est également demandé d'indiquer si l'axe Z est inclus dans le fichier ou si cet axe doit être recalculé en fonction des paramètres de coupe.

Les résultats des calculs sont affichés dans la fenêtre principale, permettant une lecture immédiate des valeurs. Ces dernières peuvent également être enregistrées dans un fichier texte, reprenant l'ensemble des valeurs.

4 - 2 - PERSPECTIVES D'EVOLUTIONS

Il est envisagé d'ajouter un module à ce programme afin qu'il puisse traiter des formes d'outils complexes, en effet, pour le moment seuls les forets à simple angle de pointe sont considérés. Cette possibilité a été incluse dès la conception de la fenêtre principale du programme et n'a pas été implémentée faute de temps.

4 - 3 - CONCLUSION

L'ensemble des données d'efforts le long de l'arête présentés dans la suite ont été mesurés à l'aide de ce programme, de même les calculs d'efforts et de couples moyens lors du perçage sont issues de ce programme, la dérive du capteur étant compensée, les données sont plus précises.

Cette partie de l'étude a regroupé la présentation des moyens préexistants pour réaliser ainsi que ceux acquis ou développés spécialement pour l'étude du perçage d'empilages de Ti6Al4V/IMA M21E.

Les principales précautions prises lors des essais ont été présentées dans le Chapitre 5. Les dispositifs de mesures d'outils présents au LaBoMaP ne permettant pas de déterminer les variations dans les géométries outils tels que les forets, une comparaison des valeurs d'efforts mesurées en usinage a été mise en place. Une autre particularité de l'étude a consisté en l'identification et la compensation de la dérive des capteurs piezzoélectriques pendant chaque usinage. Cette compensation a permis la mise en place d'une démarche de Couple Outil-Matière avec des perçages à paramètres de coupe variable. Les paramètres retenus sont les suivants :

| | |
|-----------|---|
| Ti6Al4V : | $V_c = 10 \text{ m/min}$ $f = 0.2 \text{ mm/tr}$ |
| CFRP : | $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0.05 \text{ mm/tr}$ |

Une démarche expérimentale de mesure thermique a ensuite été menée (Chapitre 6), un ensemble de quatre dispositifs ont été mis en place pour la mesure de température in-situ. Le premier sur outil fixe, les deux seconds ont été développés pour mesurer la température dans l'outil alors que ce dernier est en rotation (dans la broche). Le dernier dispositif permet la mesure de la température de l'arête de l'outil. L'ensemble de ces dispositifs sera employé par la suite pour permettre de mieux comprendre les phénomènes en jeux lors du perçage. Ils sont dès à présent employés au sein du LaBoMaP pour d'autres études.

Le Chapitre 7 présente le développement et la validation de dispositifs de mesure des efforts le long de l'arête de l'outil. Ces expérimentations ont menés à la réalisation d'un programme interfacé permettant la reconstruction du profil d'effort le long de l'arête d'un foret à l'aide d'un unique perçage.

Ces développements réalisés, l'étude du perçage dans les matériaux de l'étude va maintenant être possible.

Partie 3 - PERÇAGE DU Ti6Al4V ET DU CFRP

Dans cette partie, l'étude porte sur l'usinage des matériaux Ti6Al4V et IMA M21E, en vue de découpler au mieux les phénomènes survenant lors du perçage des empilages.

Chapitre 8 - ETUDE DU PERÇAGE DU Ti6Al4V

L'étude du perçage du Ti6Al4V porte sur l'évolution de la répartition des efforts le long de l'arête, que ce soit en fonction des conditions de coupe ou de l'usure. Un second point portant sur les résultats des mesures de température de l'outil en usinage sera également présenté.

1 - REPARTITION DES EFFORTS LE LONG DE L'ARETE EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE

Dans le Chapitre 5, le Couple Outil Matière a permis de déterminer les conditions de coupe retenues pour l'outil et le matériau sélectionné. Un programme de décomposition des efforts le long de l'arête a été développé afin de remonter aux contraintes locales le long de l'arête à partir d'un simple perçage (Chapitre 7).

Lors de l'étude du Couple Outil Matière, il a été montré que la vitesse de coupe impacte peu les efforts relevés dans le perçage de l'alliage de Ti6Al4V. Par conséquent, seuls les effets liés à l'avance seront analysés dans cette section.

Lors du traitement des efforts sur le foret, il a été choisi de décomposer l'arête en segments de 0.1 mm de long au rayon. Par conséquent, les segments sont représentés par des points et non des histogrammes comme précédemment (Chapitre 7). Les valeurs retenues sont l'effort de poussée local (F_{z1}) et l'effort de coupe local (F_{c1}), mais également la puissance locale exercée par l'outil lors de la coupe au niveau de la portion d'arête.

1 - 1 - REPARTITION DES EFFORTS LE LONG DE L'ARETE POUR LES CONDITIONS DE COUPE STANDARD

Les données présentées dans cette section sont la moyenne des valeurs obtenues pour un ensemble de cinq perçages aux conditions de coupe retenues dans le Chapitre 5, à savoir :

$$V_c = 10 \text{ m/min}$$
$$f = 0.2 \text{ mm/tr}$$

La Figure 90 représente les efforts linéaires locaux le long de l'arête. Pour ces deux efforts (F_{z1} et F_{c1}), la partie centrale de l'outil (de 0 à 2.5 mm de rayon) concentre la part la plus importante des contraintes, avec plus de 85 % de l'effort de poussée et plus de 70 % de l'effort de coupe. Les fortes sollicitations de l'âme du foret s'expliquent par des angles d'affutages négatifs.

Entre 2.5 et 5.5 mm au rayon, les efforts sur l'arête sont constants. Or la géométrie de l'arête de coupe évolue peu dans cette zone du foret. Seule la vitesse de coupe augmente avec le rayon, passant de 4 m/min à 8 m/min entre 2.5 et 5 mm au rayon. Cette décomposition met en évidence le fait que les efforts locaux n'évoluent pratiquement pas avec la vitesse de coupe, comme l'a déjà montré les essais de COM.

Entre 5.5 et 6 mm au rayon, l'effort F_{c1} décroît de manière importante. De plus, sur certains essais (non présentés ici), l'effort de poussée devient négatif, ce qui implique que le bec peut travailler en traction. Cet effort de poussée négatif est toujours relevé au niveau des listels, dans les conditions présentées, l'effort sur chaque listel est d'environ 20 N. Ce changement de direction des efforts peut expliquer en partie l'ébrêchage de l'arête dans cette zone du foret lors de perçages visant à étudier la durée de vie de l'outil. En effet, le carbure de tungstène a une résistance moindre en sollicitation de traction. Un second point pouvant expliquer ces dégradations d'arêtes est la grande variation de l'effort linéique de coupe, provoquant des variations de contraintes locales, qui favorisent le cisaillement de l'outil et donc potentiellement l'écaillage.

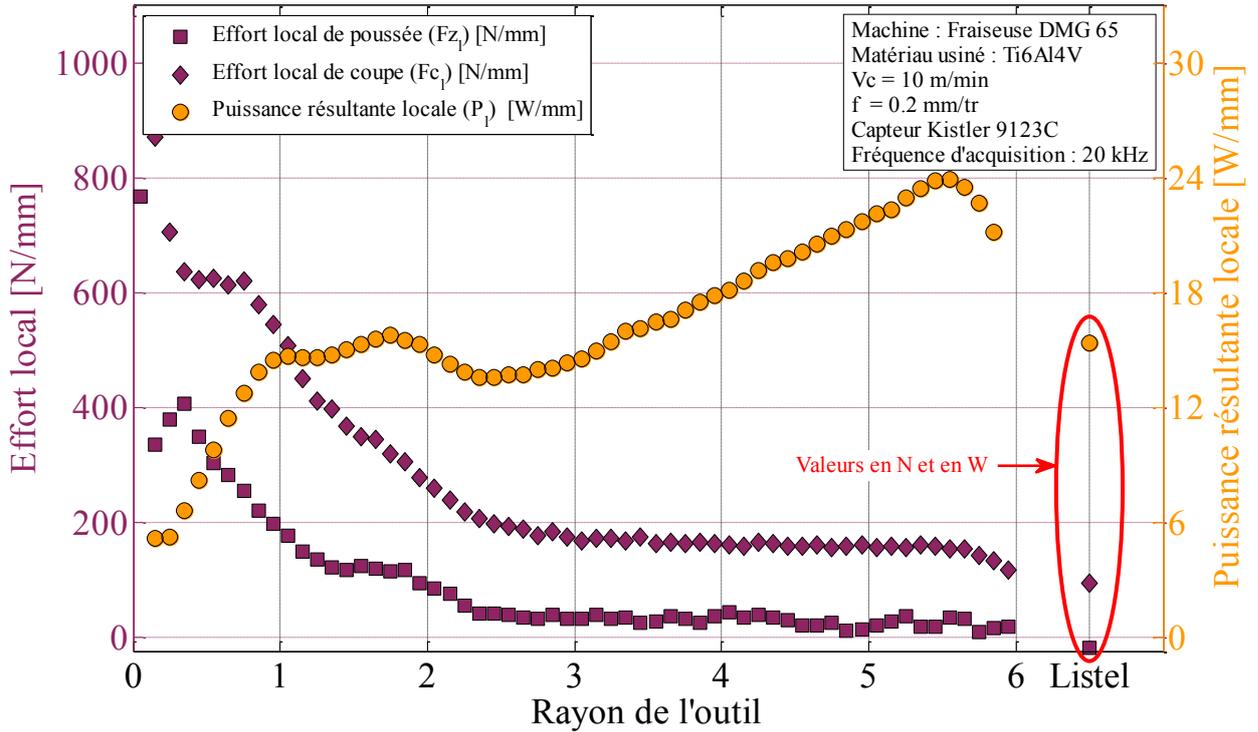


Figure 90 : Evolution des efforts locaux et de la puissance locale totale sur chaque portion d'arête en fonction du rayon

Grace aux deux efforts le long du rayon, il est possible de calculer la puissance consommée par chaque portion de l'arête. Le calcul de la puissance mécanique consommée par la coupe s'effectue grâce à la formule :

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

Or ici, le vecteur \vec{v} n'est dirigé que suivant 2 axes : Z (pour Vf) et X ou Y (pour Vc).

$$P_{Zl} = F_{Zl} \cdot V_f \text{ (en W/mm)}$$

$$P_{Cl} = F_{Cl} \cdot V_c \text{ (en W/mm)}$$

Ce qui donne pour la puissance totale sur le segment d'arête :

$$P_l = P_{Zl} + P_{Cl} \text{ (en W/mm)}$$

La puissance totale est indiquée sur la Figure 90.

Cette étude de la puissance confirme que la majeure partie de la puissance consommée lors du perçage s'effectue suivant la direction de coupe. La puissance consommée dans la direction

d'avance représente une part négligeable de la puissance totale consommée lors de l'opération, de l'ordre de 0.54 % en moyenne sur l'arête, avec un maximum à 8 % au niveau de l'âme.

Cette étude permet également de visualiser la répartition de la puissance consommée par la coupe, celle-ci se répartie de manière relativement homogène le long de l'arête, limitant par conséquent les concentrations de contraintes dans l'outil. La diminution de la puissance consommée au niveau des becs permet de contrebalancer le fait que l'outil présente une fragilité, inhérente aux forets, due à un angle de taillant plus réduit.

1 - 2 - EVOLUTION DES REPARTITIONS DES EFFORTS LOCAUX EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE

Lors de l'étude du COM dans le Ti6Al4V, il a été montré que les efforts globaux n'évoluaient pas de manière significative avec la vitesse de coupe entre 10 m/min et 30 m/min. Le même constat est observé en employant une démarche similaire à celle développée dans la section précédente, pour des conditions de coupes décrites dans le Tableau 15. Par conséquent, la puissance nécessaire à la coupe est proportionnelle à la vitesse de coupe dans le domaine défini.

| Paramètre | Valeur |
|---------------|--|
| Foret | Foret Seco Tools Ø 12 mm (T02) |
| Vc | 5 – 10 – 20 – 30 m/min |
| f | 0.10 – 0.15 – 0.20 – 0.25 – 0.30 mm/tr |
| Lubrification | Usinage à sec |

Tableau 15 : Paramètres des essais retenus pour le CAM dans le Ti6Al4V sur fraiseuse

Les caractéristiques d'évolution des efforts locaux en fonction des conditions de coupe ont été relevées pour l'ensemble des vitesses de coupes présentées dans le Tableau 15, mais seuls les résultats pour une vitesse de coupe de 10 m/min sont présentés dans cette partie. Car la vitesse de coupe n'influe que très peu sur les répartitions des efforts le long de l'arête.

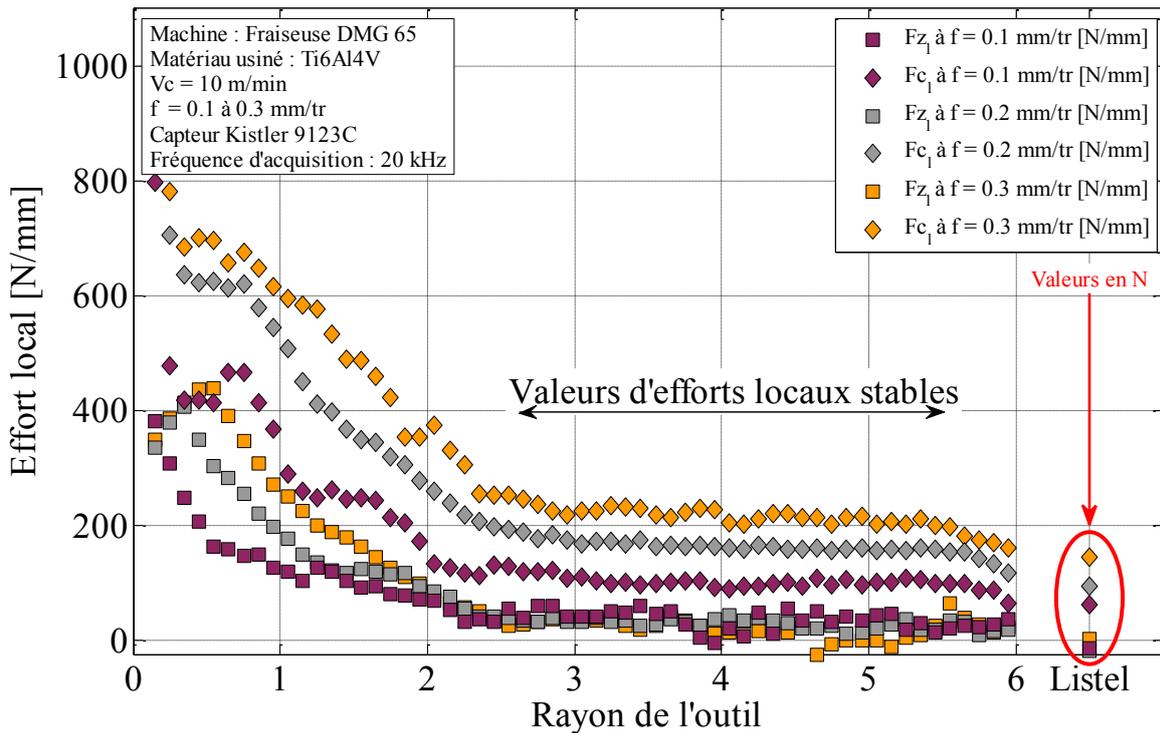


Figure 91 : Evolutions des efforts locaux F_{z1} et F_{c1} en fonction du rayon et des paramètres de coupe

Contrairement à la vitesse de coupe, l'avance a un impact non négligeable sur la répartition des efforts de poussée et de coupe comme le présente la Figure 91.

L'augmentation de l'avance accroît généralement l'effort de poussée en perçage. La Figure 91 permet de visualiser que dans le cas de l'outil SECO dans le Ti6Al4V, seule la partie centrale du foret voit son effort local F_{z1} augmenter. A partir de 2 mm au rayon, les contraintes locales sont à des niveaux similaires, alors que l'âme voit ses contraintes doubler en passant l'avance par tour de 0.1 mm/tr à 0.3 mm/tr.

Le signal des efforts est lissé sur un tour afin de réduire le bruit à un niveau acceptable. Ce filtrage a pour inconvénient de modifier les valeurs lors de variations importantes, tel que le contact de l'outil avec la pièce. Par conséquent, les valeurs d'efforts locaux au niveau de la pointe de l'outil seront minimisées. La longueur affectée par ce lissage est directement liée à l'avance par tour et à l'angle de pointe, ainsi pour une avance de 0.1 mm/tr, seuls les premiers 0.16 mm au rayon seront affectés (car l'outil devra effectuer 18 tours pour engager l'ensemble de son arête primaire). Dans le cas d'une avance de 0.3 mm/tr, l'outil engage l'ensemble de son arête primaire en seulement 6 tours, par conséquent les premiers 0.5 mm au rayon sont affectés par le lissage. Ce traitement particulier des données explique le fait que les efforts F_{z1} semblent croître dans les premiers dixièmes de millimètres de l'arête.

L'étude du COM a également permis de relever que l'effort de coupe augmente avec l'élévation de la vitesse d'avance, ce qui peut s'expliquer par l'augmentation de la section coupée. La Figure 91 présente cette augmentation locale de l'effort de coupe. Cette élévation des contraintes semble constante, les efforts locaux étant augmentés en moyenne de 150 N/mm pour l'ensemble de l'arête (exclusion faite du premier mm de l'âme).

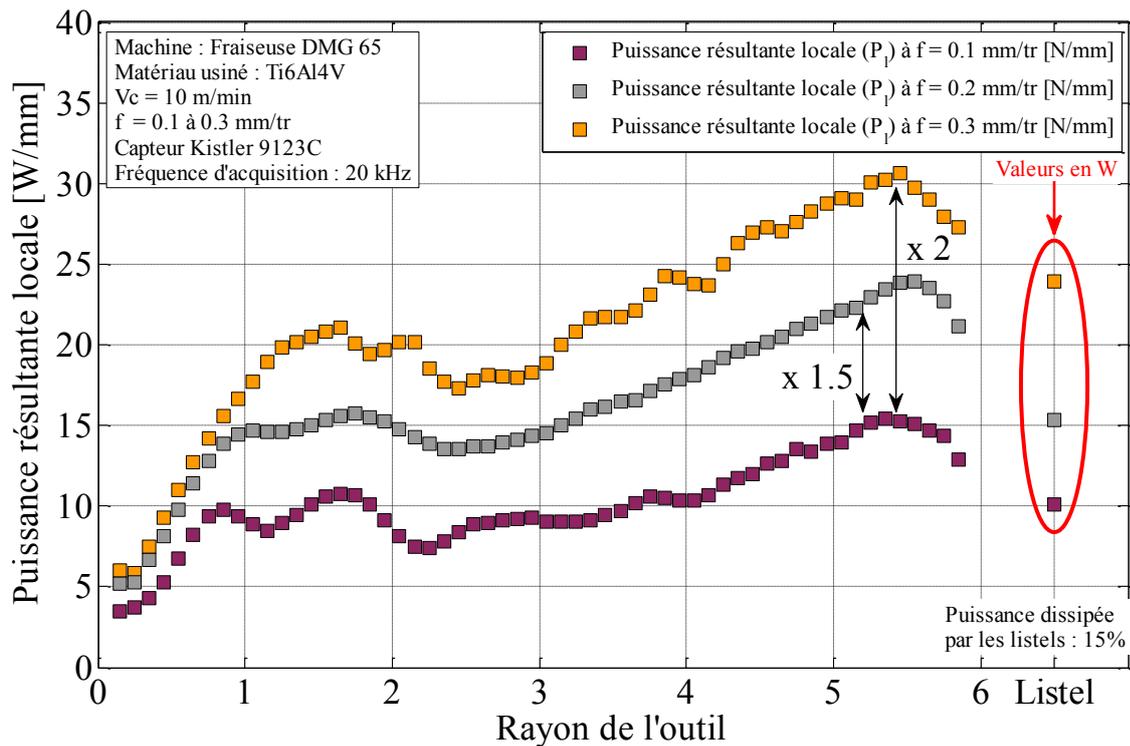


Figure 92 : Evolutions de la puissance résultante locale en fonction du rayon et des paramètres de coupe

La Figure 92 présente les rapports entre les puissances résultantes le long de l'arête pour les conditions précédemment décrites. La puissance consommée par la coupe est doublée sur l'ensemble du rayon du foret lorsque l'avance est triplée. De plus, les listels dissipent 15 % de la puissance totale résultante pour l'ensemble des avances étudiées.

La modification des paramètres de coupe ne modifie donc pas, ou peu, le profil des efforts et des puissances s'exerçant sur l'outil. Les zones les plus contraintes restent la partie centrale avec des efforts axiaux importants et la partie à 5 mm de rayon (proche des becs) avec une puissance dissipée importante. Les paramètres de coupes n'influencent pas la répartition des efforts, seuls les angles de coupe et l'écoulement du copeau semblent agir de manière importante sur les efforts et les puissances locales.

2 - EVOLUTIONS LIEES A L'USURE LORS DU PERÇAGE DE Ti6Al4V

Suite à l'étude des efforts locaux en fonction des conditions de coupe, il va être vérifié que ceux-ci n'évoluent pas ou peu en fonction de l'usure de l'outil. Pour cela une campagne d'essai de 18 perçages débouchants a été menée avec les conditions de coupe suivantes :

| Paramètre | Valeur |
|---------------------|--------------------------|
| Foret | Foret Seco Tools Ø 12 mm |
| Vc | 10 m/min |
| f | 0.20 mm/tr |
| Lubrification | Usinage à sec |
| Epaisseur de plaque | 25.5 mm |

Tableau 16 : Paramètres des essais réalisés pour l'étude de l'usure dans le Ti6Al4V sur fraiseuse

2 - 1 - EVOLUTION DES EFFORTS GLOBAUX

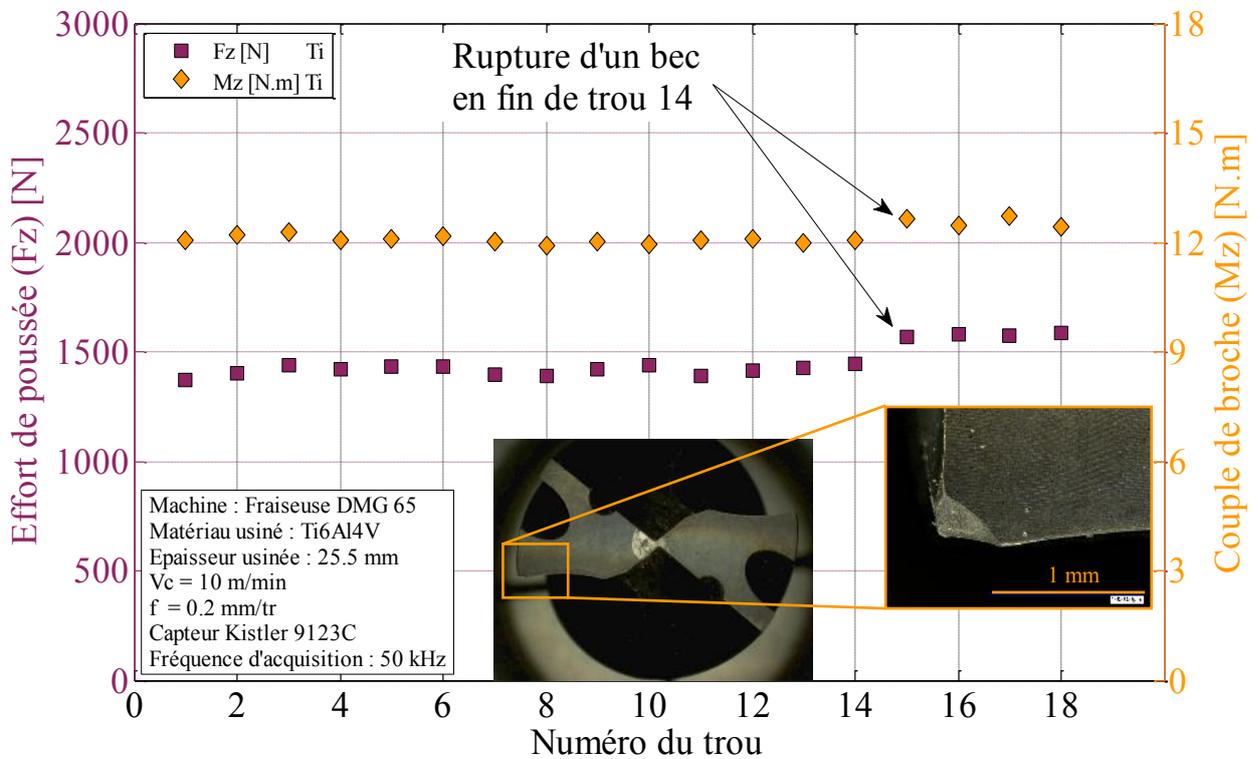


Figure 93 : Evolution des efforts en fonction du nombre de perçages

L'évolution des efforts globaux au cours du perçage sont dans un premier temps considérés afin de qualifier l'usure de l'outil. La Figure 93 montre que les efforts évoluent peu au cours des 18 premiers trous. Il n'y a que deux paliers où les efforts augmentent, d'environ 100 N pour l'effort de poussée et 0.6 N/m pour le couple de broche. Ces deux paliers correspondent à la rupture de becs en fin de perçage, une vue au microscope du bec brisé est présentée.

L'origine de la rupture des becs par écaillage peut provenir de deux sources. La première correspond à une contrainte mécanique ou thermique localisée trop importante, comme cela a pu être relevé sur la Figure 90. La seconde source est liée aux essais préliminaires de caractérisation des outils (Chapitre 5), des vibrations ont pu être relevées en fin de perçage, engendrant des éventuels endommagements au niveau des becs du foret.

En parallèle, d'autres essais ont été menés à l'aide d'outils ayant la même géométrie et venant du même fournisseur et ce phénomène ne s'est pas présenté, ou que de manière très exceptionnelle.

2 - 2 - EVOLUTION DES EFFORTS LOCAUX

Tout comme les efforts globaux qui évoluent peu, les efforts locaux présentent une évolution relativement faible le long de l'arête en fonction de l'usure.

Les valeurs sont similaires à celles relevées sur la Figure 90, néanmoins les efforts de poussée au niveau du listel sont négatifs (environ -10 N) pour les premiers perçages. Suite à la rupture du bec, les efforts au niveau des listels deviennent positif (environ 30 N). L'étude des efforts locaux a donc permis de déceler des ruptures de becs lors de l'usinage de Ti6Al4V.

2 - 3 - EVOLUTION DES PROFILS D'ARETES ET DE LA QUALITE DU TROU

L'arête du foret présentant peu d'usure, l'usure en dépouille V_B n'a pas pu être mesurée, même après les 18 trous à l'aide d'un microscope permettant un grossissement de 200×. Par conséquent, le profil d'arête n'a que très peu évolué. Il est néanmoins intéressant de noter qu'une couche de Ti6Al4V adhérente s'est formée sur l'arête au niveau de la face de coupe dès les premiers trous. Cette couche de métal adhérente visible sur la Figure 94, joue probablement un rôle protecteur au niveau de l'usinage.

La mesure de la qualité du trou est effectuée à l'aide du Talyrond TR585, un ensemble de 24 cercles est relevé. La qualité du trou évolue peu avec le nombre de trous réalisés. Le rayon des moindres carrés est stable autour de 6.02 mm, et une forme en trilobe est relevée sur chaque

section comme le présente la Figure 95. Ce trilobe forme de plus une hélice ayant un angle proche de celui de l'hélice du foret. Cette irrégularité du trou est causée par un manque de rigidité au niveau de l'outil ou de la broche, qui génère des vibrations dans le plan perpendiculaire à l'axe de perçage lors de l'usinage. Ces remarques sont vérifiées pour l'ensemble des trous réalisés dans le Ti6Al4V lors de cette campagne.

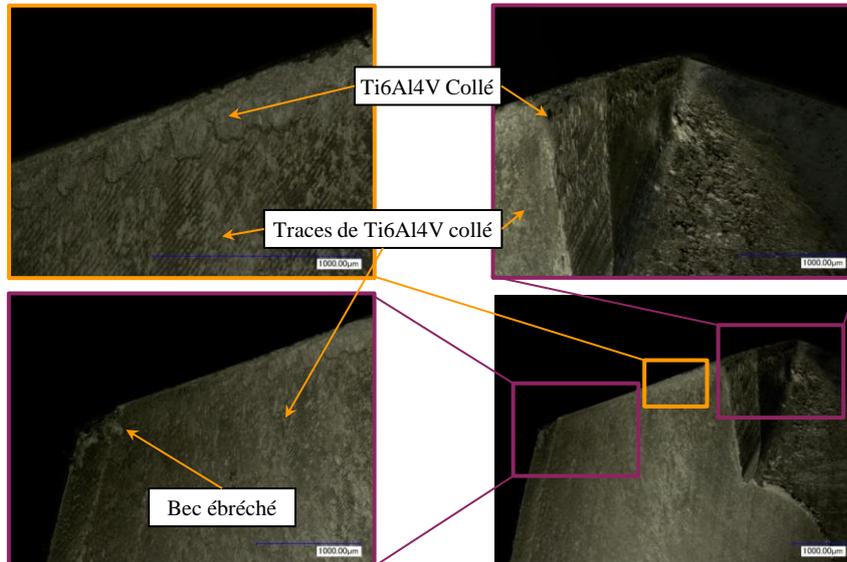


Figure 94 : Vues au microscope de la face de coupe et de la couche adhérente de Ti6Al4V après 18 perçages

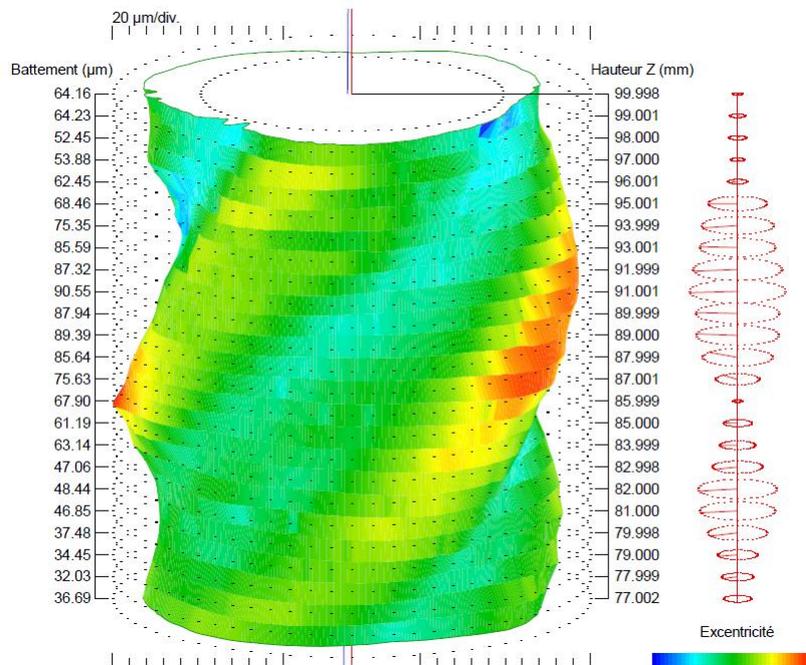


Figure 95 : Profil de la surface du trou dans le Ti6Al4V (Trou N°12)

3 - ETUDE DE LA TEMPERATURE DU FORET DANS LE Ti6Al4V

Etant donné que l'usure intervient tardivement lors de l'usinage du Ti6Al4V, l'étude ne porte pas sur l'impact de l'usure sur la thermique de l'outil. Le Chapitre 6 présente les essais réalisés pour étudier la température dans l'outil. Ces essais à divers engagements d'arêtes (en perçant des pièces de diamètres inférieurs au diamètre de l'outil) ont permis de relier la température en trois points de l'outil en fonction de la profondeur de perçage. La Figure 60 présente l'emplacement des sondes thermocouples, placées à 2 mm de l'arête de coupe.

Une démarche similaire à la décomposition de l'enfoncement de pointe (Chapitre 7) afin de recomposer les températures le long de l'arête n'est pas possible ici. Cette impossibilité est liée au fait que les régimes transitoires en thermique, à l'aide de cette instrumentation, sont de plusieurs secondes, ce qui correspond à un temps supérieur à celui que met la pointe de l'outil à s'enfoncer dans la matière.

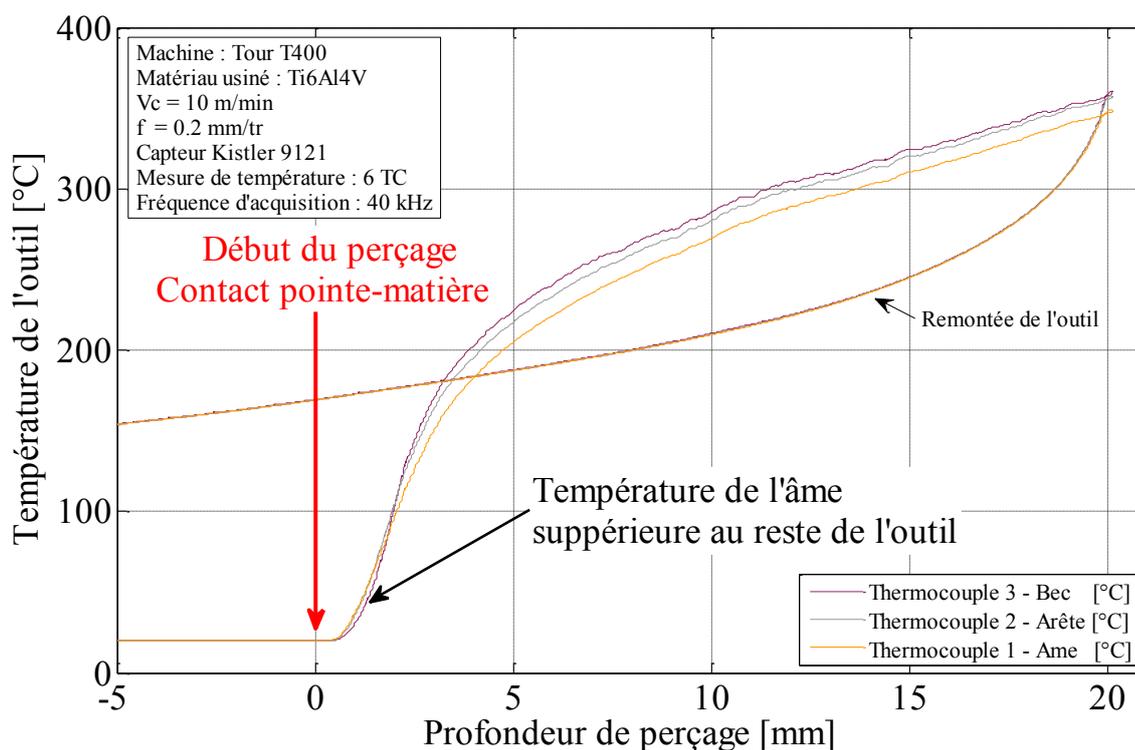


Figure 96 : Evolution de la température dans l'outil en fonction de la position

La Figure 90 représentant les puissances dissipées par la coupe en fonction du rayon indique qu'un maximum est atteint pour un rayon de 5.5 mm. Cette donnée peut permettre d'expliquer

que les becs, ayant plus d'énergie à dissiper que l'âme, sont soumis à une température plus importante, comme cela est visible sur la Figure 96.

L'évolution de la température indique que les variations sont importantes lors du perçage des cinq premiers millimètres, la stabilisation de l'évolution s'effectue à partir de 10 mm de profondeur, l'évolution des températures est alors relativement constante. Le choix a donc été fait de mesurer les températures pour une profondeur de perçage de 5 et de 15 mm dans les différentes configurations du perçage décrites dans l'Annexe 8. Ces mesures ont alors permis de déterminer l'impact des diverses portions d'arêtes sur l'élévation de température de l'outil.

Ainsi la présence de matière au niveau de l'âme (jusqu'au diamètre 3 mm) génère une augmentation importante de la température sur l'ensemble de l'arête, d'environ 40°C après 15 mm de perçage (plus de 25°C après 5 mm). Par conséquent, la coupe au niveau de l'âme est une source thermique supplémentaire qui se traduit par une élévation importante de température lors de l'usinage pleine matière.

L'effet du listel sur la hausse de température est quant à lui bien plus réduit. Cela s'observe lors des essais impliquant ou non le listel dans la coupe, les écarts de températures sont inférieurs à 10°C après 5 ou 15 mm de perçage. Le second point qui traduit ce faible échauffement au niveau des listels est le fait que la température dans l'outil diminue dès la fin du perçage. Cette diminution intervient car les frottements au niveau du listel sont trop faibles pour générer un échauffement permettant le maintien en température du thermocouple placé au niveau des becs du foret. Ce faible échauffement pendant la remontée de l'outil peut s'expliquer par le fait que la surface de contact du listel avec la paroi du trou est très réduite. Deux facteurs ont permis de réduire cette zone de frottement, d'un côté la largeur du listel est très faible (0.2 mm), et d'un second côté, l'angle de conicité arrière est important (0.5 %).

Par conséquent si lors des perçages d'empilages il convient de réduire la température de l'outil afin de limiter les risques de brûlures du composite, le fait de réaliser un avant trou dans la plaque de Ti6Al4V peut permettre une réduction suffisante (environ 15 % pour un avant trou de Ø 3 mm). Néanmoins cette opération apporte des contraintes supplémentaires sur l'outil. Lors des essais de couple arête-matière détaillé dans le Chapitre 7 (CAM sur fraiseuse), les outils ont présenté une fragilité supplémentaire pouvant engendrer une rupture pour un avant trou de diamètre 7 mm. Ces bris outils peuvent s'expliquer par une grande variation de contraintes mécaniques et thermiques le long de l'arête, produisant des fissurations et la rupture de l'outil au niveau du contact de l'arête sur le bord de l'alésage.

Chapitre 9 - ETUDE DU PERÇAGE DU CFRP

L'étude du perçage du CFRP se compose, comme pour le Ti6Al4V, d'une première étude portant sur la répartition des efforts le long de l'arête, puis d'une étude de l'usure dans un composite multidirectionnel et dans un second composite à fibres de carbone unidirectionnel.

1 - REPARTITION DES EFFORTS LE LONG DE L'ARETE EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE

La répartition des efforts de coupe le long de l'arête a été étudiée dans le Ti6Al4V dans le Chapitre 8. Une étude similaire a été menée dans le CFRP à l'aide de la méthodologie d'enfoncement de pointe, comme détaillé dans le Chapitre 7. Le caractère non homogène du composite générant beaucoup de bruit dans la mesure des efforts, l'arête a dû être découpée de manière moins fine que dans le Ti6Al4V. Des portions d'arêtes de 1 mm au rayon ont été retenues dans le traitement des données.

1 - 1 - REPARTITION DES EFFORTS LE LONG DE L'ARETE POUR LES CONDITIONS DE COUPE STANDARD

Les données présentées dans cette section sont la moyenne des valeurs obtenues pour un ensemble de 9 perçages aux conditions de coupe retenues dans le Chapitre 5, à savoir :

| Paramètre | Valeur |
|------------------------|--------------------------|
| Foret | Foret Seco Tools Ø 12 mm |
| Vc | 100 m/min |
| f | 0.05 mm/tr |
| Lubrification | Usinage à sec |
| Epaisseur de la plaque | 20 mm |

Tableau 17 : Paramètres des essais réalisés pour l'étude du perçage dans l'IMA M21E

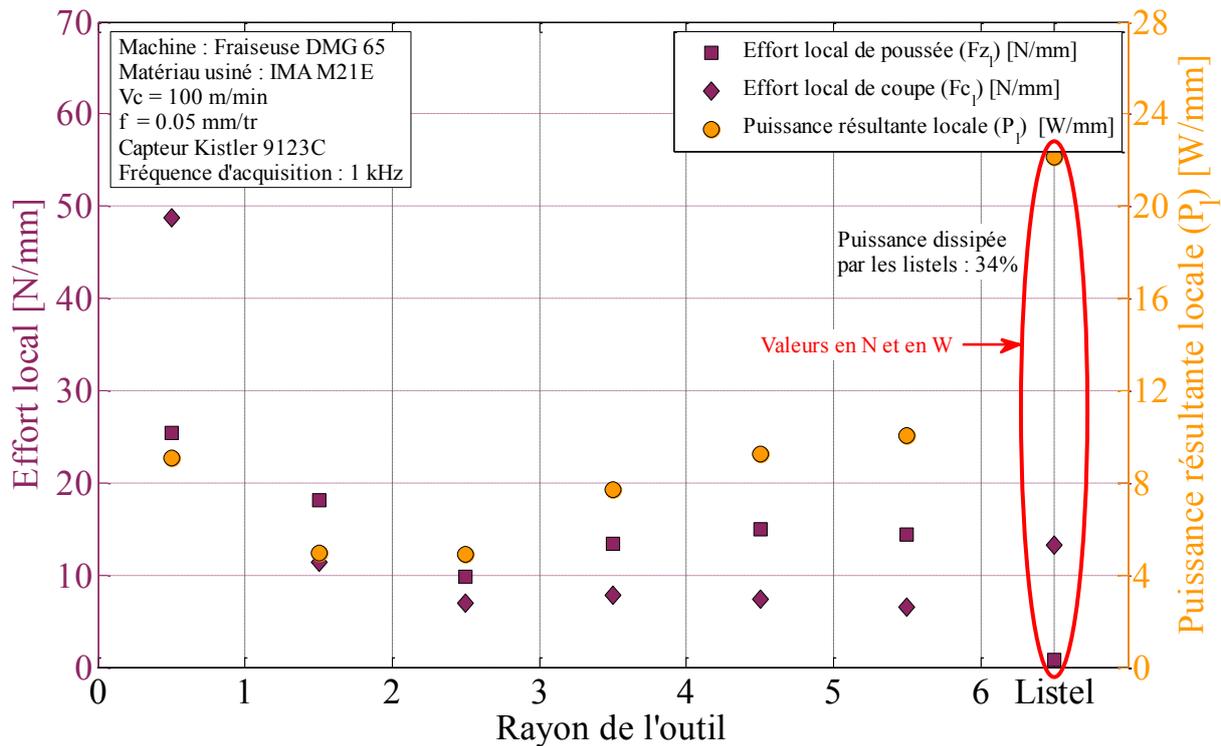


Figure 97 : Evolution des efforts locaux et de la puissance locale totale sur chaque arête en fonction du rayon

La Figure 97 présente la répartition des efforts le long de l'arête du foret lors du perçage du CFRP. Les efforts au centre du foret sont bien plus élevés qu'au niveau des becs car cette zone de l'outil présente une coupe négative ou nulle, qui est peu adaptée au composite pour lequel une coupe positive et une bonne acuité d'arête sont préférables. Vers 3 mm au rayon, l'angle de coupe passe de négatif ou nul à positif. Cette géométrie plus adaptée à la coupe du composite explique la cassure dans la courbe des efforts locaux ainsi que la stabilisation des efforts à partir de ce point. La faible augmentation de l'effort de poussée peut s'expliquer par le fait que l'effort de pénétration du foret augmente avec la vitesse (Figure 58). Les efforts sur le listel correspondent au frottement du foret sur les parois du trou, principalement à cause des fibres non coupées.

Les efforts globaux dans le composite sont bien plus faibles que dans le Ti6Al4V (Figure 90) lors du perçage, ce qui se reflète naturellement au niveau des efforts locaux. Ces derniers sont 10 à 20 fois plus faibles que les efforts locaux rencontrés dans l'alliage de titane. Cette grande variation des niveaux d'efforts ne se traduit pas par une telle variation au niveau des puissances. Les conditions de coupes ayant été modifiées, les puissances résultantes dissipées lors de l'usinage du composite n'est qu'environ deux fois plus faible que celle dissipée lors de

l'usinage du Ti6Al4V. La portion d'énergie dissipée dans les listels est plus importante dans le composite que dans le Ti6Al4V. Cette puissance dissipée dans les listels peut s'expliquer par le caractère non isotrope du matériaux et le fait que les fibres se coupent mal et se resserrent sur l'outil ([Rahme_2008]). La puissance résultante dissipée est, encore plus que dans le Ti6Al4V, très majoritairement issue de la coupe. La composante de la puissance correspondant à l'avance étant inférieure à 1 % sur chacun des segments étudiés.

1 - 2 - EVOLUTION DES REPARTITIONS DES EFFORTS LOCAUX EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE

Comme pour le perçage dans le Ti6Al4V, il convient d'étudier l'évolution des répartitions des efforts en fonction des conditions de coupe. Pour cela, un certain nombre d'essais sont réalisés, permettant de recomposer les efforts le long de l'arête pour les conditions de coupe décrites dans le Tableau 18.

| Paramètre | Valeur |
|------------------------|---------------------------------------|
| Foret | Foret Seco Tools Ø 12 mm (C10) |
| Vc | 25 – 50 – 100 – 150 – 200 – 250 m/min |
| f | 0.01 – 0.05 – 0.20 mm/tr |
| Lubrification | Usinage à sec |
| Epaisseur de la plaque | 20 mm |

Tableau 18 : Paramètres des essais réalisés pour le CAM dans le CFRP sur fraiseuse

1 - 2 - 1 - VARIATION DES REPARTITIONS DES EFFORTS LE LONG DE L'ARETE EN FONCTION DE LA VITESSE DE COUPE

Les évolutions de répartition des efforts sont étudiées dans un premier temps en fonction de la vitesse de coupe, puis dans une seconde section, en fonction de l'avance.

La Figure 98 représente l'impact de la vitesse de coupe sur les efforts locaux de poussée et de coupe.

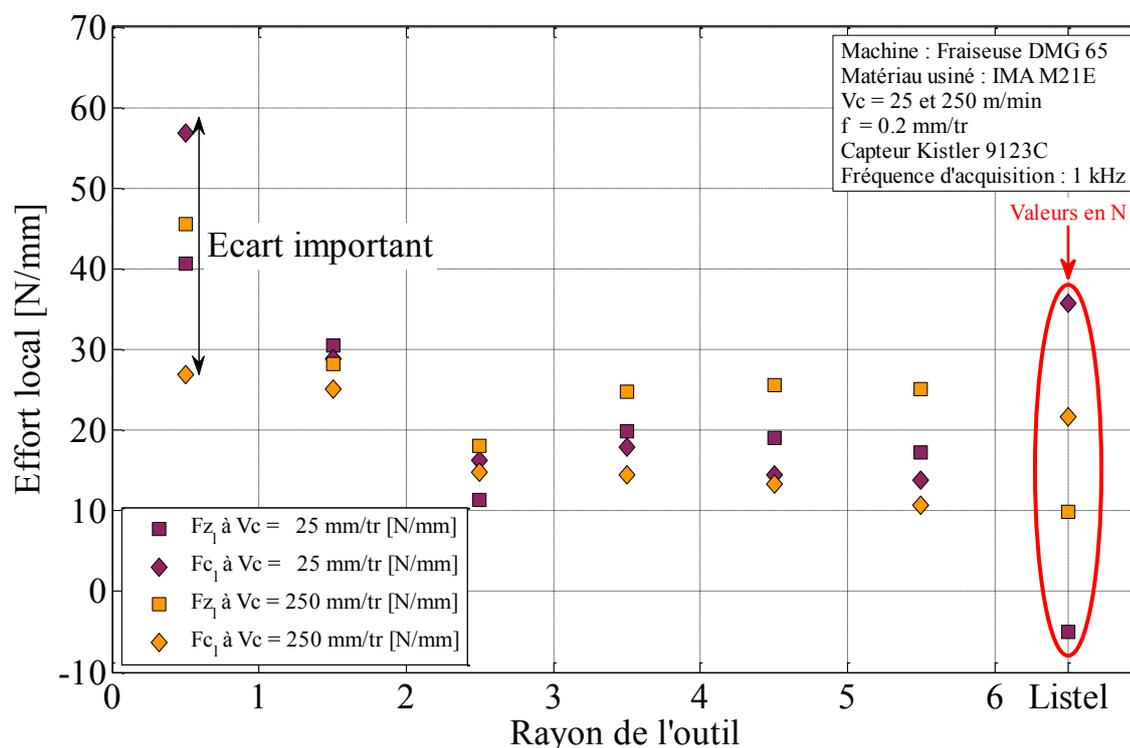


Figure 98 : Evolutions des efforts locaux F_{z1} et F_{c1} en fonction du rayon et des paramètres de coupe

Lors de l'étude du COM dans le CFRP, il a été remarqué que les efforts globaux évoluent peu avec la vitesse de coupe entre 25 m/min et 250 m/min alors que la vitesse de coupe est multipliée par dix. Le même constat est observé en analysant les efforts le long de l'arête. Il est néanmoins notable que l'effort de poussée est plus important dans la portion de l'arête qui se situe à partir de 3 mm au rayon. L'effort de coupe semble, pour sa part, diminuer très légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe sur toute l'arête, sauf au niveau de l'âme où la diminution de l'effort local est très marquée. Ces tendances sont relevées dans l'ensemble des configurations présentées dans le Tableau 18.

Les efforts locaux étant proches et la puissance étant majoritairement impactée par l'effort de coupe, les puissances locales nécessaires à la coupe sont donc majoritairement liées à la

vitesse de coupe. Un rapport dix existant au niveau des vitesses de coupe, ce même ratio lie les puissances consommées par chacun des tronçons d'arête de chacun des deux perçages. La chaleur dégagée lors de la coupe étant en grande partie liée à cette puissance, si la température de l'outil est jugée comme trop élevée lors de l'usinage du composite, l'abaissement de la vitesse de coupe peut permettre de réduire les risques de brûlure de la matrice organique du composite.

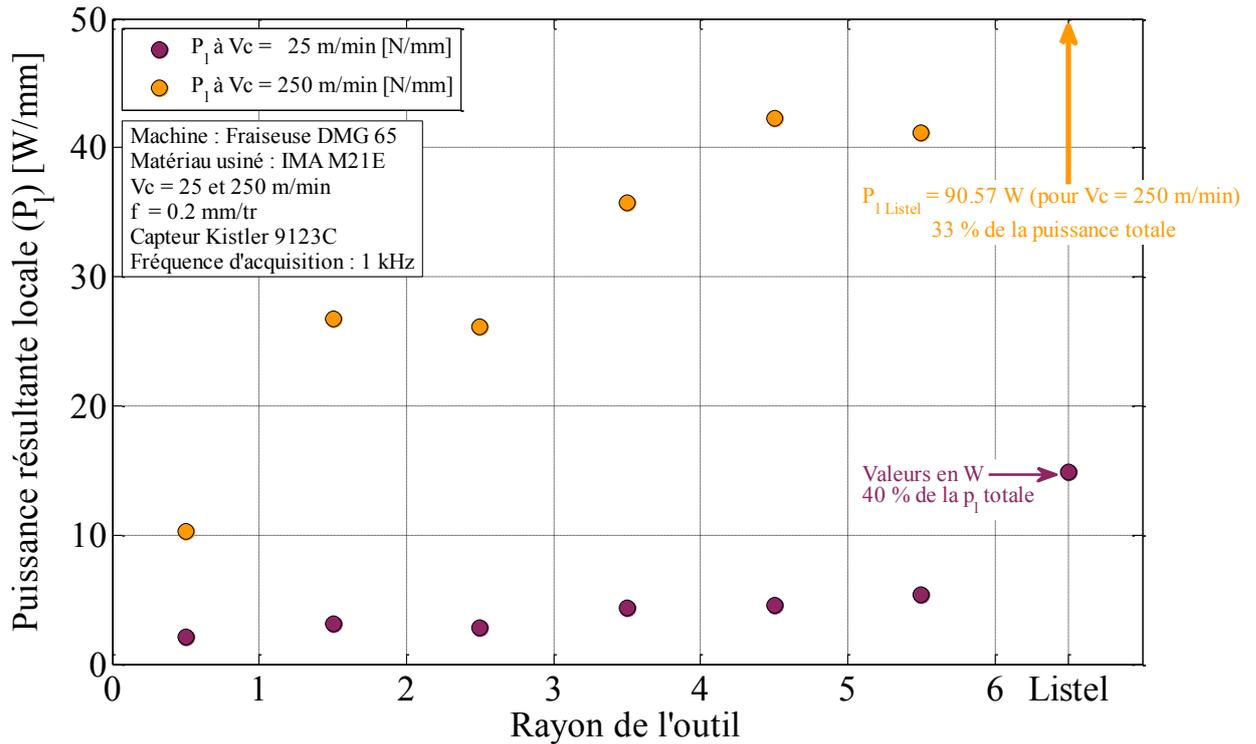


Figure 99 : Evolutions des puissances résultantes P_1 en fonction du rayon et des paramètres de coupe

1 - 2 - 2 - VARIATION DES REPARTITIONS DES EFFORTS LE LONG DE L'ARETE EN FONCTION DE L'AVANCE

Suite à la première étude portant sur l'impact de la vitesse de coupe sur la répartition des efforts le long de l'arête de l'outil, cette même répartition est étudiée en fonction de l'avance, comme cela est présenté sur la Figure 100.

Contrairement aux variations imposées par la variation de la vitesse, l'augmentation de l'avance par tour génère une augmentation de l'effort local suivant les deux directions, et ce, pour l'ensemble de l'arête du foret. L'augmentation de l'avance impacte donc l'ensemble de l'arête de manière importante.

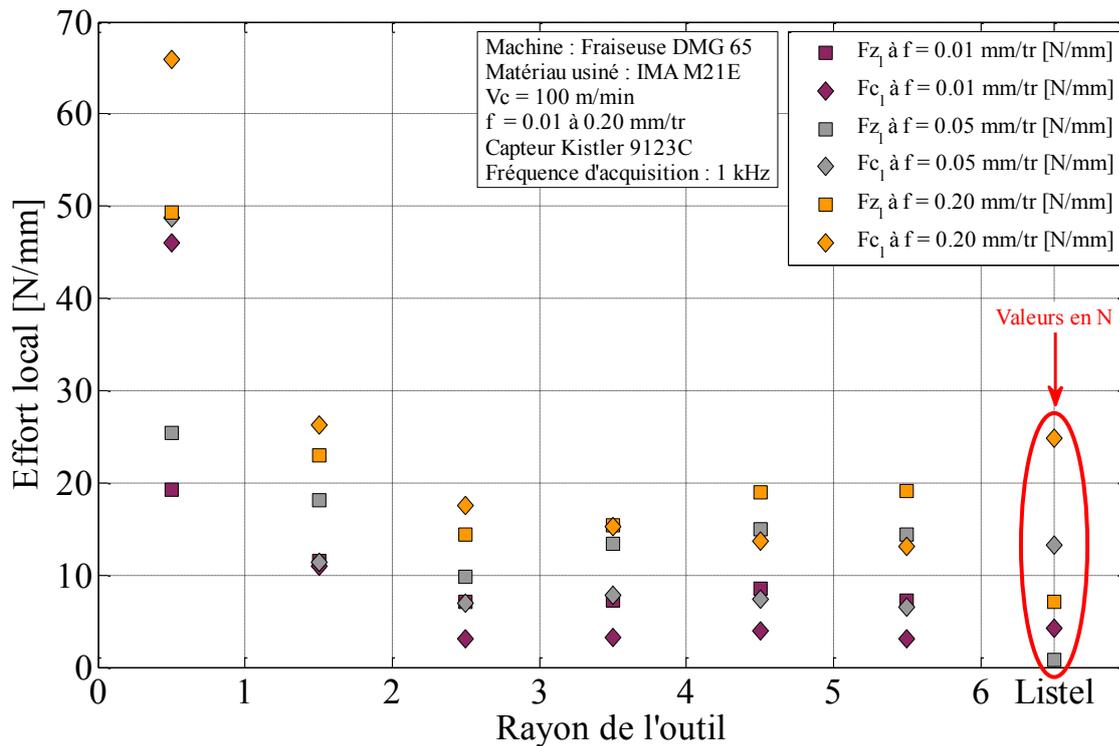


Figure 100 : Evolutions des efforts locaux F_{z1} et F_{c1} en fonction du rayon et des paramètres de coupe

L'usure dans le composite étant principalement liée à des phénomènes d'abrasion, il conviendra de limiter à la fois les efforts qui auront tendance à davantage éroder l'arête, mais il sera également préférable d'effectuer l'opération de perçage en limitant le contact de l'arête avec le matériau abrasif : le CFRP. Les deux phénomènes étant opposés, il serait nécessaire de réaliser une étude plus approfondie de l'impact de l'abrasion de l'arête en fonction des conditions de coupe et des pressions locales, le tout en fonction du rayon de l'outil.

1 - 3 - COMPARAISON DES REPARTITIONS DES EFFORTS LOCAUX LE LONG DE L'ARETE ENTRE LE Ti6Al4V ET LE CFRP

Les efforts locaux le long de l'arête présentent des profils typiques et très distinct dans le cas du Ti6Al4V et de l'IMA M21E. Ce type d'étude pourra donc être utilisé afin de concevoir des outils assurant une grande durée de vie. En effet, en limitant les efforts au niveau des becs dans le Ti6Al4V, les risques d'écaillage seront limités. De plus, en limitant ces mêmes efforts dans le CFRP, l'abrasion sera plus contenue, ce qui permettra de garantir une durée de vie importante de l'outil tout en garantissant une qualité de trou relativement constante.

2 - EVOLUTION L'USURE

Deux campagnes d'essais ont été menées afin d'étudier l'usure de l'outil dans le composite. La première a été effectuée suite aux essais de COM (Chapitre 5) dans le même composite IMA M21E aux conditions retenues. Une seconde campagne d'usure a été menée dans un composite unidirectionnel. Lors de la première campagne, seuls les efforts sont mesurés lors de l'usinage, la prise de vue au microscope du foret est effectuée régulièrement entre les perçages. La seconde campagne d'essais a permis une mesure de la température de l'arête de coupe à l'aide du dispositif décrit dans le Chapitre 6. Les mesures des rayons d'arête (3 sur chaque arête) et la prise de vues au microscope ont été effectuées tous les deux trous réalisés pour ces essais.

L'usure sera caractérisée par l'évolution globale des efforts sur l'outil dans un premier temps, puis l'évolution des efforts locaux (le long de l'arête) sera considérée, un lien avec le rayon d'arête et la qualité des trous sera présentée.

2 - 1 - EVOLUTION DES EFFORTS LORS DE L'USURE

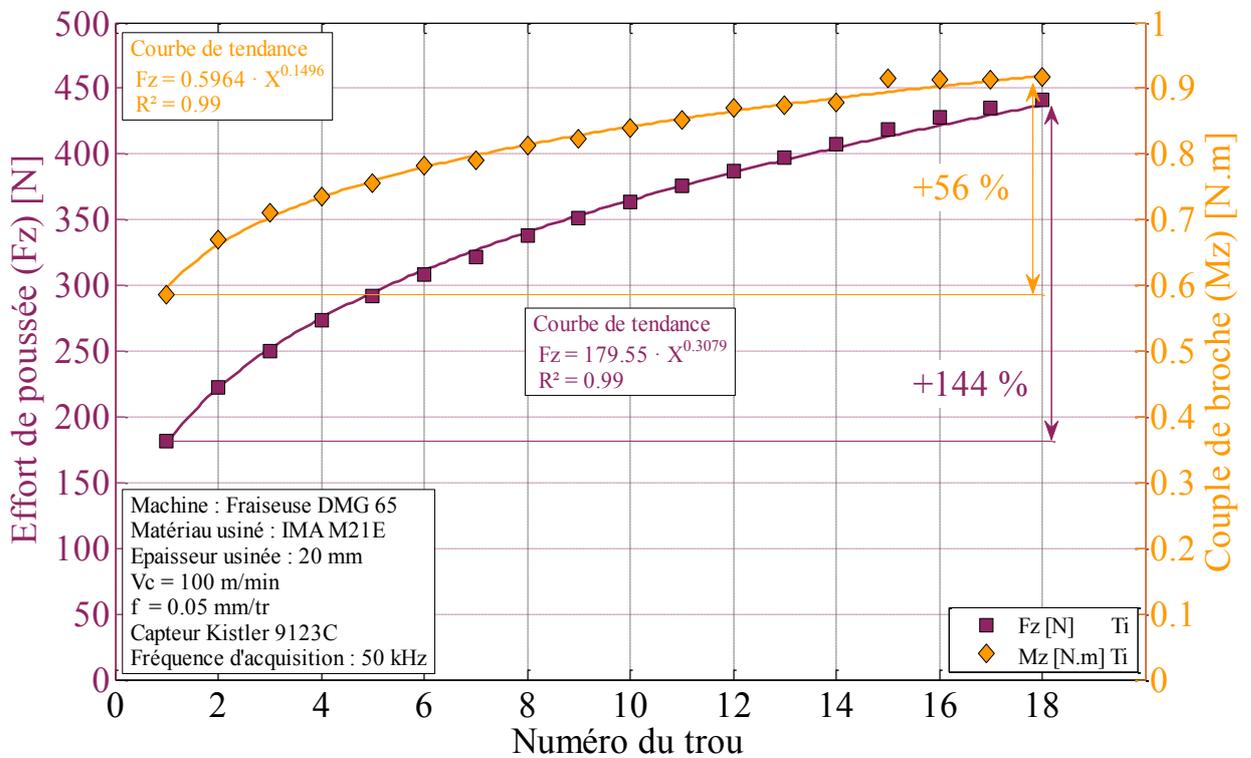


Figure 101 : Evolution des efforts sur l'outil lors de perçage d'IMA M21E

La Figure 101 représente les valeurs des efforts moyens au cours du perçage en pleine matière.

Lors des 18 perçages débouchant dans des plaques de 20 mm d'épais, soit 360 mm de percé au total, le couple a augmenté de plus de 50 %, mais surtout l'effort de poussée a été multiplié par 2.5. Or, lors de l'usinage de composites, il est reconnu ([Rahme_2008]) que l'effort de poussée est responsable du délaminage. De plus, cette augmentation des efforts indique une dégradation de la qualité de l'arête et donc de sa capacité à couper le matériau. Il convient donc de surveiller l'évolution des efforts afin de conserver une qualité de trou acceptable. Une étude des efforts locaux permettra de comprendre de manière plus fine les zones d'usure principales.

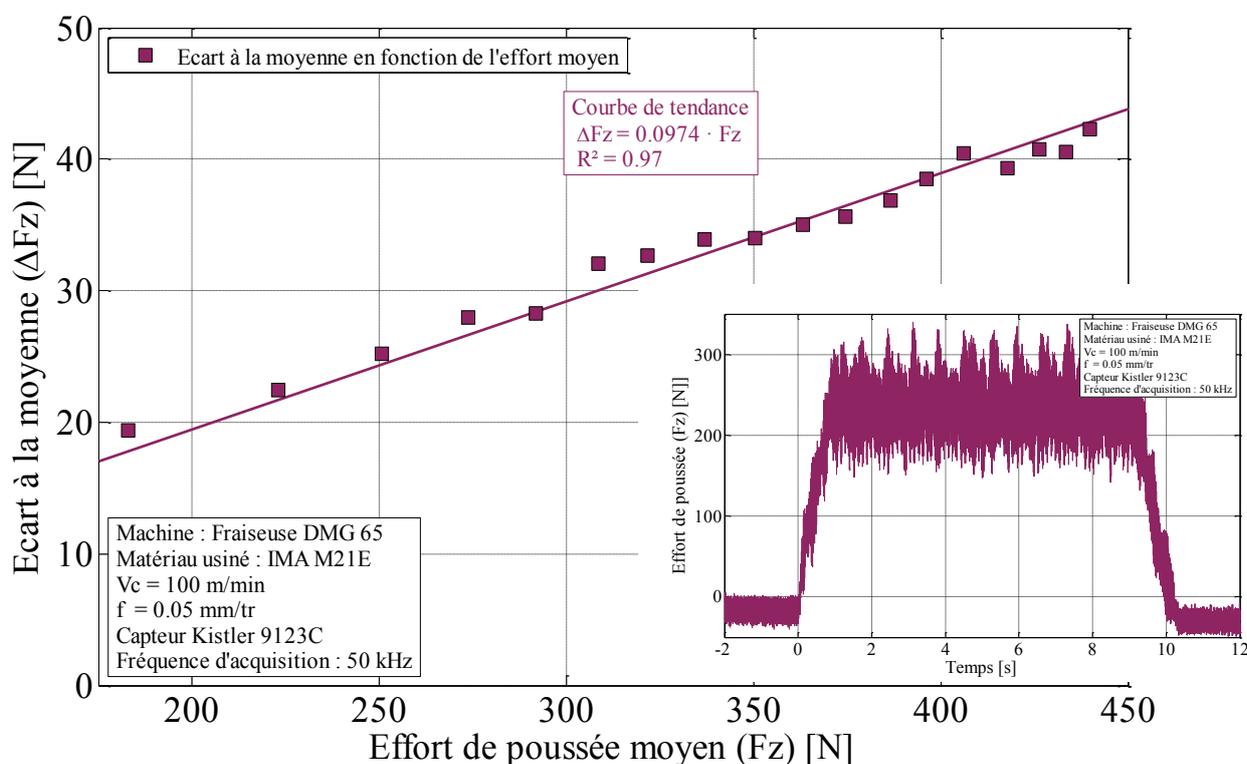


Figure 102 : Lien entre les oscillations de l'effort de poussée et l'effort de poussée moyen lors de l'usinage de l'IMA M21E

Les signaux d'efforts présentant des oscillations importantes, similaires à un bruit, une analyse de ce signal a été menée afin de le qualifier. Si le niveau des oscillations sur le couple est proche de celui mesuré à vide (indiquant que ces oscillations sont donc majoritairement du bruit de mesure), il n'en est pas de même pour l'effort de poussée. La qualification du bruit étant complexe, et ce dernier n'étant pas très régulier, un critère a été défini. Ce critère

correspond à la moyenne des écarts à la moyenne glissante, ce qui peut correspondre à la valeur d'un Ra si la courbe avait été un profil de surface (la moyenne glissante correspondant au profil d'ondulation). Il a ainsi été possible de lier ce critère à l'effort de poussée comme le présente la Figure 102, le niveau de bruit est directement proportionnel au niveau d'effort moyen.

L'oscillation de l'effort de poussée est liée au caractère « fibreux » du composite ainsi qu'à l'orientation des plis. Il a en effet été montré [Rahme_2008] que l'effort de pénétration de l'outil est lié à l'angle formé par l'arête avec les fibres. Lors de l'usinage de composite unidirectionnel, cette composante varie de manière cyclique, les efforts présentent alors une variation proche d'une sinusoïde. Lors de l'usinage de composite multidirectionnel, l'outil a plusieurs segments d'arêtes en contact avec plusieurs plis (qui ont des orientations différentes), la variation de l'effort de poussée est donc fortement dépendant de l'agencement des plis. Néanmoins la Figure 102 met en évidence que l'usure de l'outil impacte également directement ces variations, puisqu'elles représentent environ 10 % de la valeur de l'effort moyen de poussée mesuré lors du perçage.

2 - 2 - EVOLUTION DES EFFORTS LOCAUX LORS DE L'USURE

Les efforts augmentant de manière importante lors de l'usinage de CFRP, l'étude de l'usure locale à l'aide des évolutions des efforts locaux permet de montrer que l'ensemble de l'arête est impactée par le phénomène d'usure, comme le montre la Figure 103 présentant les efforts le long de l'arête pour le premier et le dernier perçage. L'analyse des autres perçages met en évidence le fait que les valeurs d'efforts locaux évoluent progressivement entre ces courbes.

La Figure 103 présente l'évolution de l'effort le long de l'arête avec l'usure. La composante correspondant à l'effort de poussée (F_z) le long de l'arête subit une hausse des contraintes relativement constante avec le rayon, d'environ 25 N/mm sur l'ensemble de l'arête. L'effort au niveau des becs diminue et devient négatif. Ce phénomène peut s'expliquer par l'abrasion des becs, ce qui augmente la longueur de contact du foret avec la surface du trou, l'entraînant dans la matière. En analysant les observations de l'arête de coupe au microscope, il est possible de remarquer une évolution de l'usure en dépouille sur tout le long de l'arête, mais avec une valeur du V_B croissante avec le rayon.

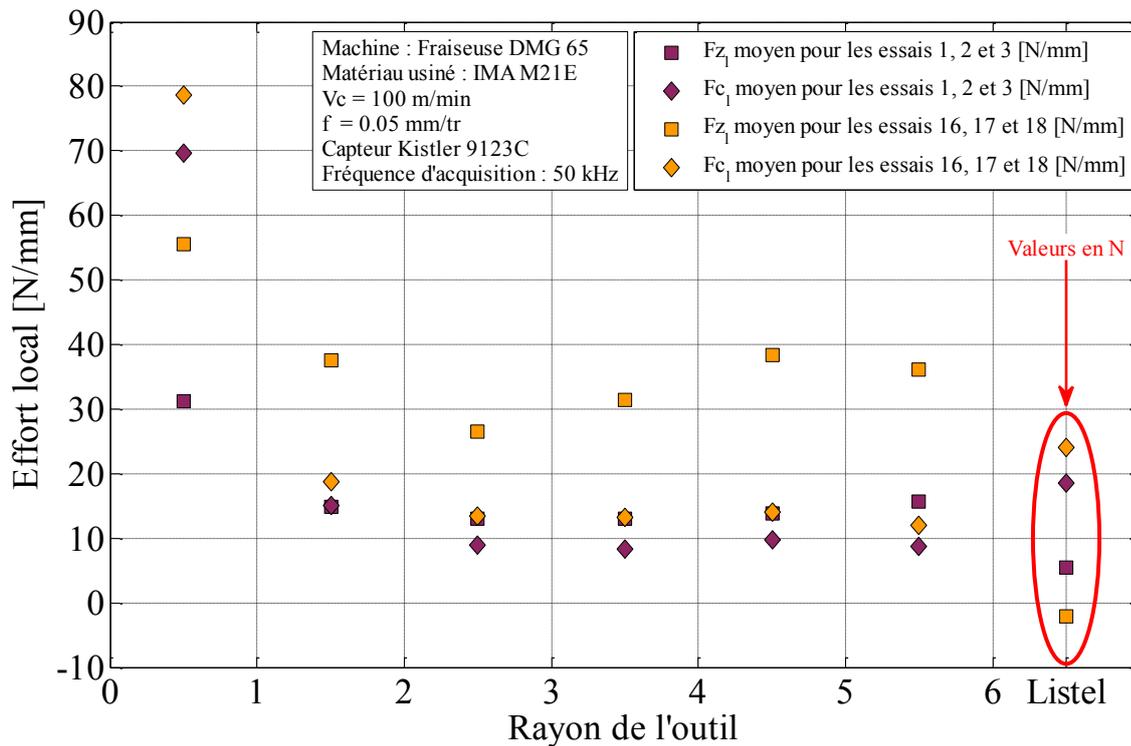


Figure 103 : Efforts le long de l'arête en fonction du nombre de trous réalisés

2 - 3 - USURE DE L'OUTIL

Les évolutions des efforts globaux le long de l'arête sont représentatifs de l'usure de l'outil. Une étude du rayon d'arête permet de déterminer les phénomènes mis en jeu lors de la dégradation de l'outil. La Figure 104 présente l'usure en dépouille de l'outil après 18 trous dans le composite.

La bibliographie et les vues au microscope permettent de déterminer que l'abrasion est le principal phénomène d'usure relevé lors de l'usinage de composites. Un relevé du profil de l'arête à l'aide du dispositif décrit dans le Chapitre 4 a donc été conduit afin de qualifier l'usure comme cela est présenté sur la Figure 105. Après 18 trous, un recul de l'arête d'environ 15 μm suivant l'axe Z est mesuré, le rayon d'arête est également augmenté. Ces modifications de l'arête sont la source de l'augmentation des efforts.

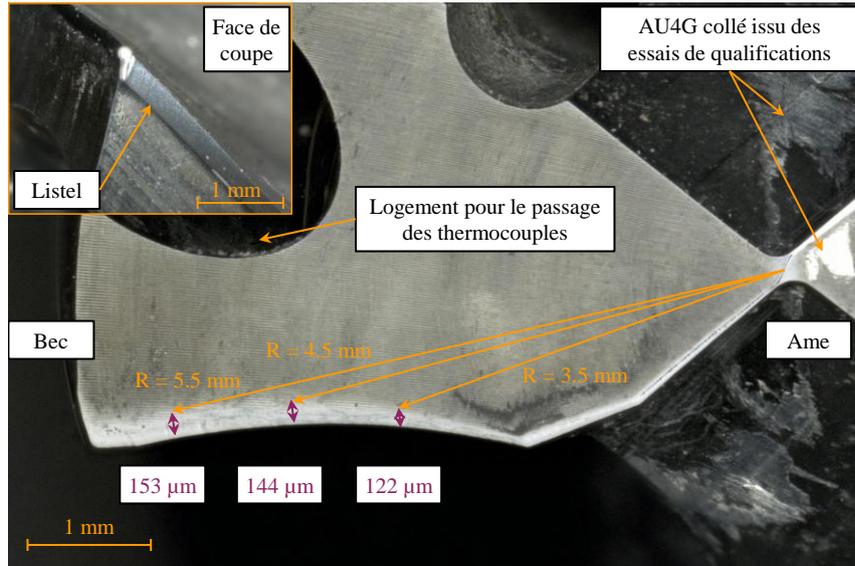


Figure 104 : Vue au microscope de la face de dépouille et des marques d'usure après 18 perçages dans l'IMA M21E

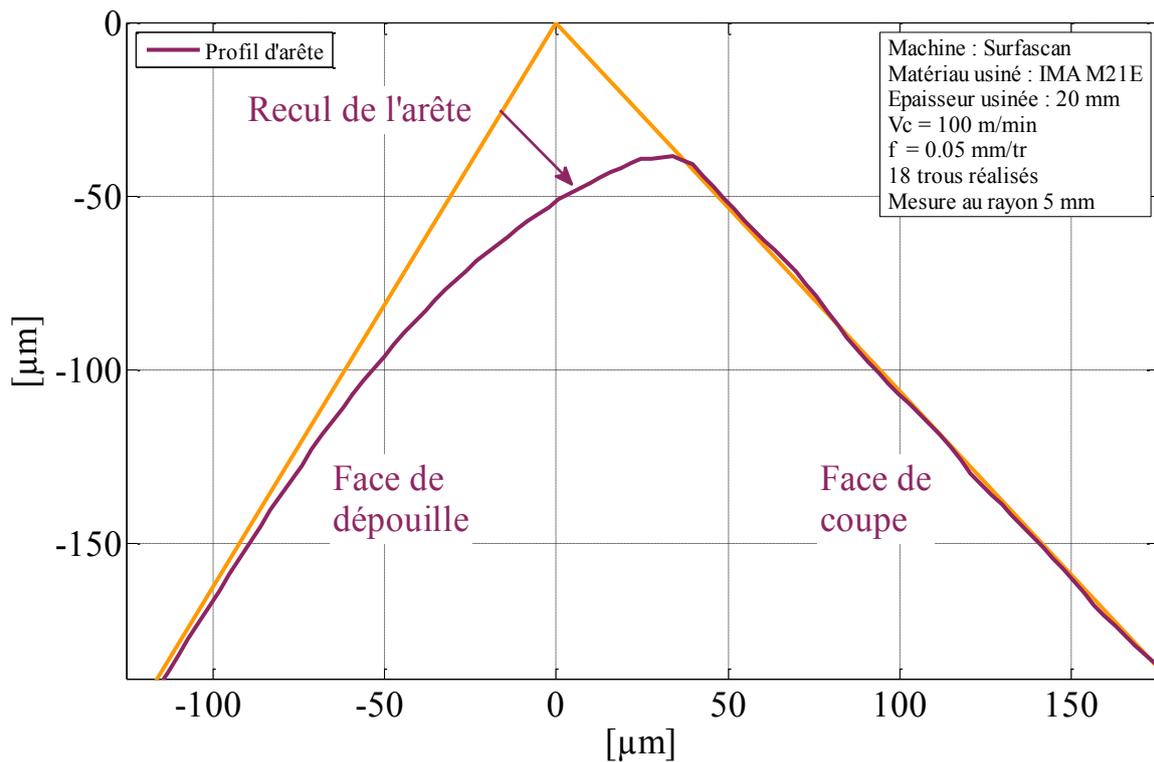


Figure 105 : Profil de l'arête après usinage d'IMA M21E

Une étude EDX (Annexe 9) a également montré qu'il y avait des dépôts de carbone sur les arêtes, au niveau de la face de coupe et de dépouille. Néanmoins ces dépôts ont une adhérence très faible et sont retirés dès que le foret usine un autre matériau.

2 - 4 - IMPACT DE L'USURE SUR LA QUALITE DU TROU

La dégradation de l'arête de coupe génère une évolution de la qualité du trou. Afin de pouvoir qualifier ces évolutions, une mesure de cylindricité (sur le Talyrond 840D) est menée sur l'ensemble de la surface.

Lors de la mesure à l'aide du Talyrond, un ensemble de 18 cercles sont mesurés sur toute la hauteur du trou afin de déterminer les caractéristiques de la surface générée. Le diamètre moyen est représenté sur la Figure 106. Au cours des 18 perçages, l'usure des listels a généré une réduction du diamètre du trou percé d'environ 30 μm , ce qui correspondrait à une qualité H8 à H9. Cette diminution du diamètre est causée par l'usure des listels qui génèrent une réduction du diamètre, comme le montre la Figure 104. Si le diamètre de l'outil diminue de la même manière que celui du trou, soit 30 μm , cela implique que la longueur de listel qui est en contact avec la paroi du trou est augmentée de 6 mm à cause de la conicité arrière (de 0.5 %). Cette augmentation de la longueur de contact explique les efforts de coupe plus importants dans cette zone ainsi que l'augmentation de l'effort tendant à attirer le foret vers le bas.

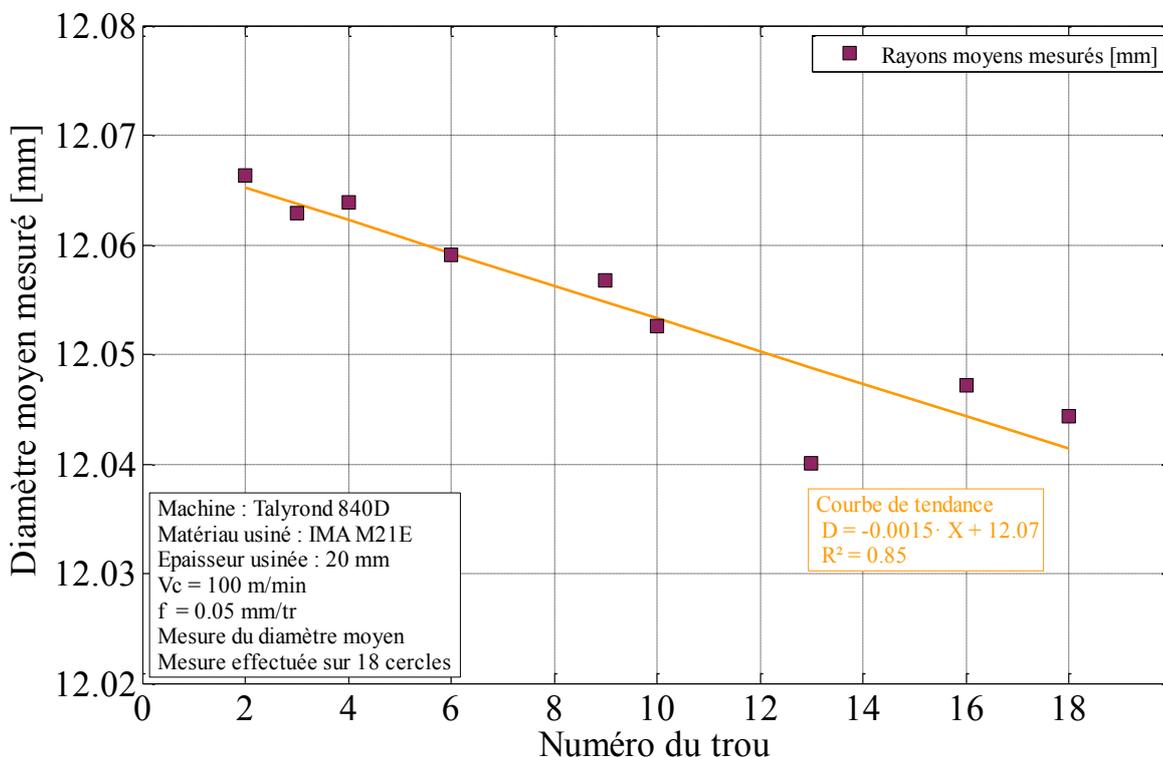


Figure 106 : Evolution des diamètres moyens des trous avec l'usure

Ces mesures ont permis d'identifier l'absence de trilobe ou de conicité de la surface lors de l'usinage du composite seul, comme l'atteste la Figure 107 présentant la surface du trou lors de l'analyse de la cylindricité. La valeur minimale du diamètre de 6.02 mm correspond au rayon moyen mesuré lors de l'usinage du Ti6Al4V dans le Chapitre 8. Par conséquent, le diamètre percé par l'outil dans le CFRP est légèrement supérieur. Cette remarque peut être expliquée par deux phénomènes, le premier provient de la particularité du matériau coupé, le CFRP est en effet composé de plusieurs plis d'un matériau non isotrope et donc les propriétés ne sont pas les mêmes en suivant l'angle de sollicitation. L'arrachage de fibres est donc un phénomène qui intervient de manière courante lors de la coupe. Le second phénomène qui peut expliquer cet écart de diamètre peut être lié au fait que lors du perçage du Ti6Al4V, il y a un fort rétreint, ce qui réduit le diamètre une fois l'opération terminée.

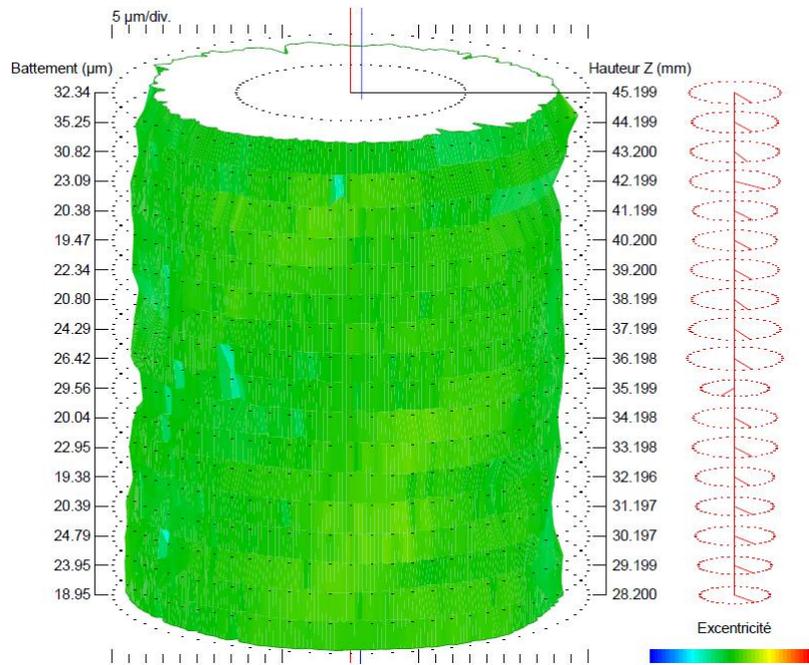


Figure 107 : Profil de la surface du trou dans le CFRP (Trou N°1)

3 - ETUDE DE LA TEMPERATURE DE L'OUTIL DANS LE CFRP

Une étude de la température a été menée dans un composite unidirectionnel, le T800 M21 dont le comportement est très proche du matériau de l'étude. Le matériau est équipé du système de mesure de température décrit dans le Chapitre 6 à l'aide de thermocouples implantés dans le matériau. La Figure 108 indique la disposition des thermocouples dans la pièce. Ceux qui sont disposés verticalement permettent de mesurer la température en un point de l'arête en fonction de la profondeur percée. Les sondes disposées horizontalement permettent pour leur part la mesure de la température de l'arête en une altitude donnée.

Entre chaque perçage, l'outil et le corps de l'outil sont refroidis par un jet d'air comprimé afin de ne pas fausser les mesures en perçant à l'aide d'un foret déjà chaud.

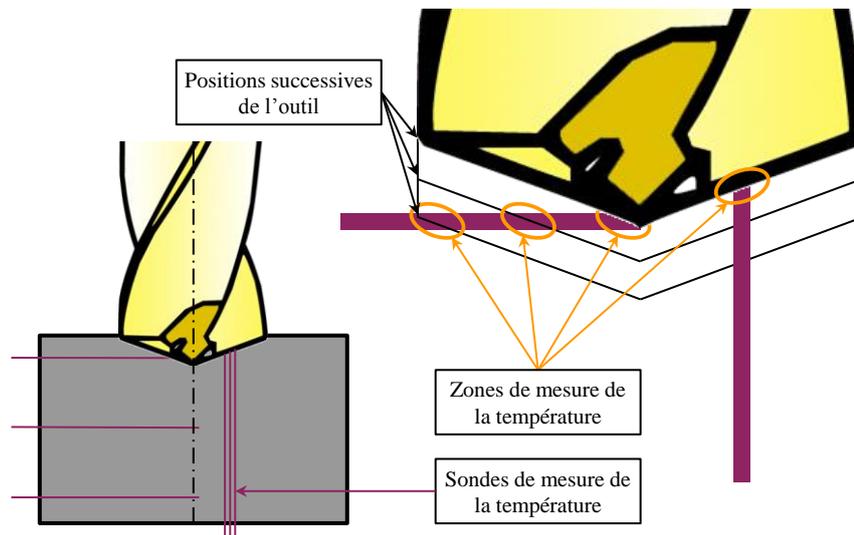


Figure 108 : Implantation des thermocouples dans le composite T800 M21

Si les courbes obtenues par ce procédé ne sont pas continues dans le temps, cela est dû au fait que la mesure n'est pas effectuée correctement un certain nombre de fois. Ces points aberrants sont donc retirés des graphiques car non significatifs. Les erreurs de mesures peuvent être causées par de multiples causes ; la première est que les fils du thermocouple sont écrasés l'un contre l'autre, faussant la mesure. La seconde cause soulevée est que les fils thermocouple sont trop éloignés, l'arête ne permet pas de fermer le circuit électrique, la mesure ne peut donc être effectuée correctement. La dernière cause de mauvaise mesure peut être liée aux interférences électromagnétiques qui sont présentes au sein de la machine-outil et qui perturbent les signaux.

3 - 1 - ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DANS LE TROU ET EN FONCTION DU NOMBRE DE TROUS REALISE

L'exploitation des informations issues des thermocouples placés verticalement a permis de considérer les températures obtenues en fonction de la profondeur percée lors d'un trou. Il a également été possible de considérer l'évolution de la température pour une altitude donnée en fonction du nombre de trous réalisés comme le présente la Figure 110.

L'étude de la température de la surface de la zone de coupe du foret au cours d'un perçage (Figure 109) permet de mettre en évidence une élévation significative (+100°C environ) au niveau de cette surface au cours du perçage. Cette remarque permet de confirmer les hypothèses lors de simulations d'usinage de flux imposé sur les surfaces du foret en contact avec la matière usinée et non de température.

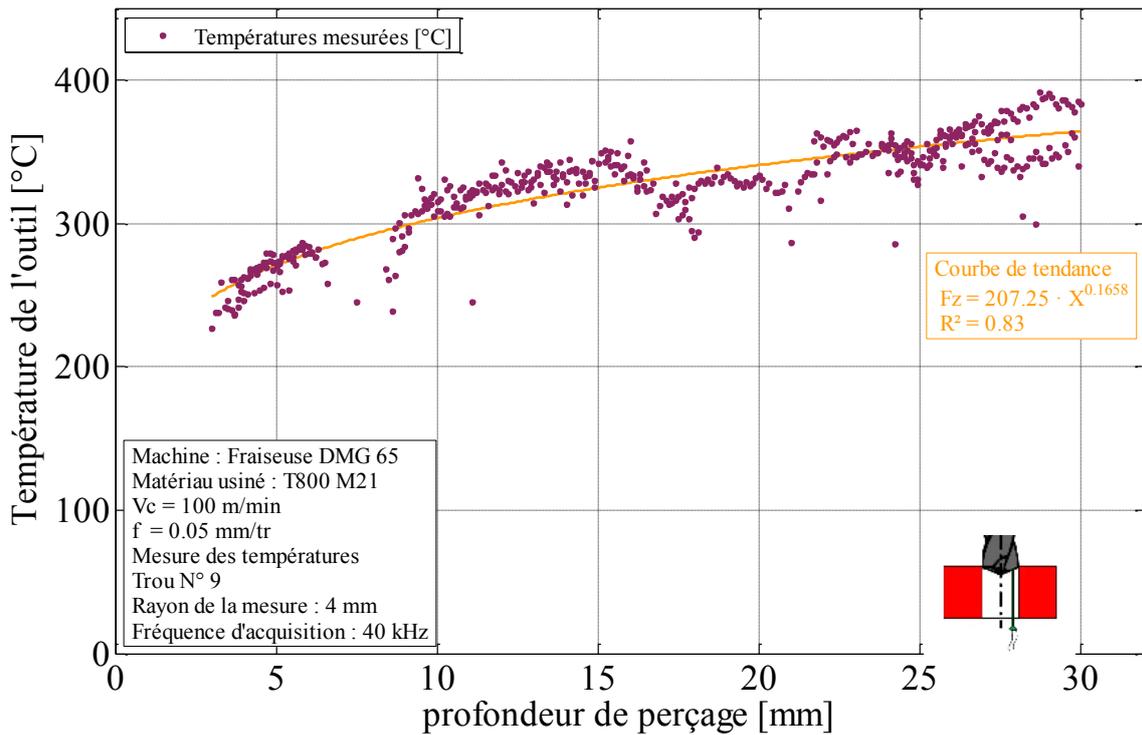


Figure 109 : Evolution de la température de l'arête en fonction de la profondeur du trou

La Figure 110 représente la température relevée de l'outil à un rayon de 4 mm pour une profondeur de perçage de 10 mm et 15 mm. L'arête s'arrondissant avec l'usure, la coupe est moins aisée et demande plus d'énergie, ce qui a été montré par l'évolution des efforts avec l'usure. Cette augmentation de la consommation de l'énergie pour la coupe impacte la

thermique, la température de l'arête de coupe augmente donc de manière non négligeable avec l'usure du foret (environ 2°C tous les 30 mm percés).

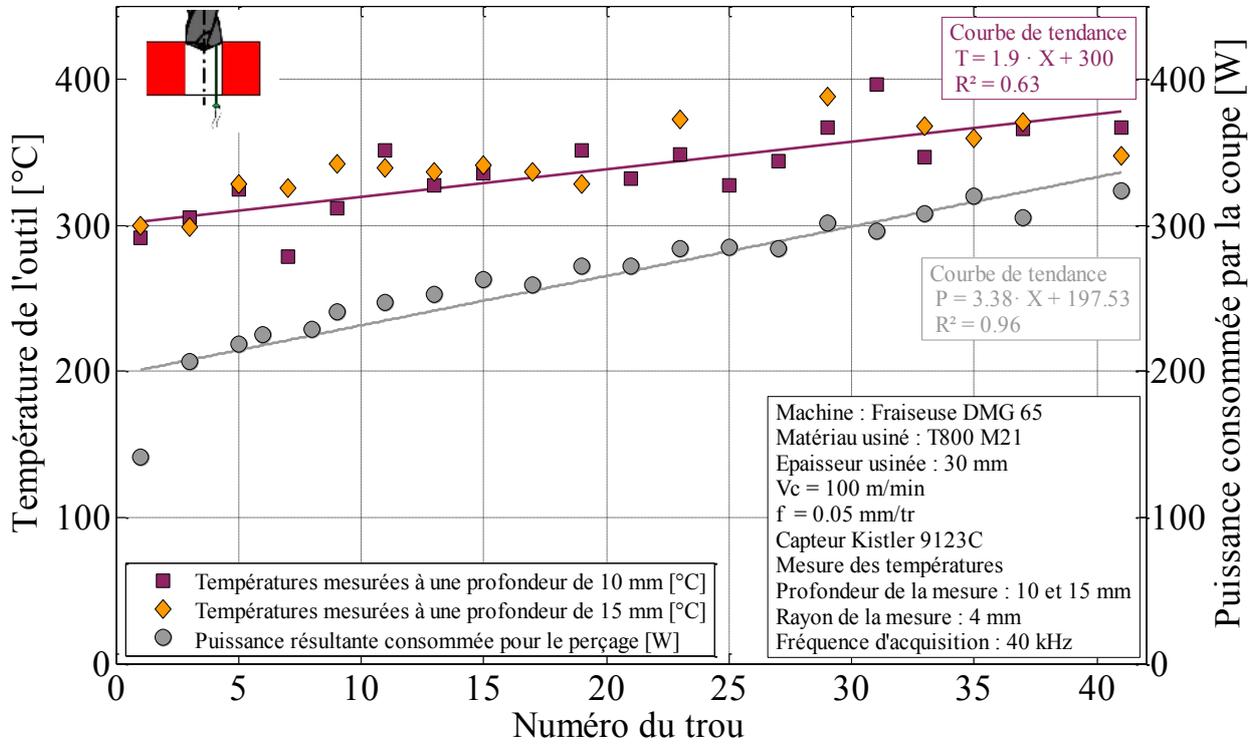


Figure 110 : Evolution de la température de l'arête en fonction de l'usure de l'outil

3 - 2 - ETUDE DE LA TEMPERATURE LE LONG DE L'ARETE

Ce type d'instrumentation et d'exploitation, inspiré par Bono [Bono_2002], a permis d'évaluer la température des arêtes en fonction du rayon lors de l'usinage du CFRP. Un thermocouple est placé horizontalement, et lorsque l'outil avance en usinant, il vient scanner l'ensemble de l'arête, ce qui permet de reconstituer la température le long du rayon. La Figure 111 représente l'un des résultats ainsi obtenus pour cette décomposition au cours d'un perçage.

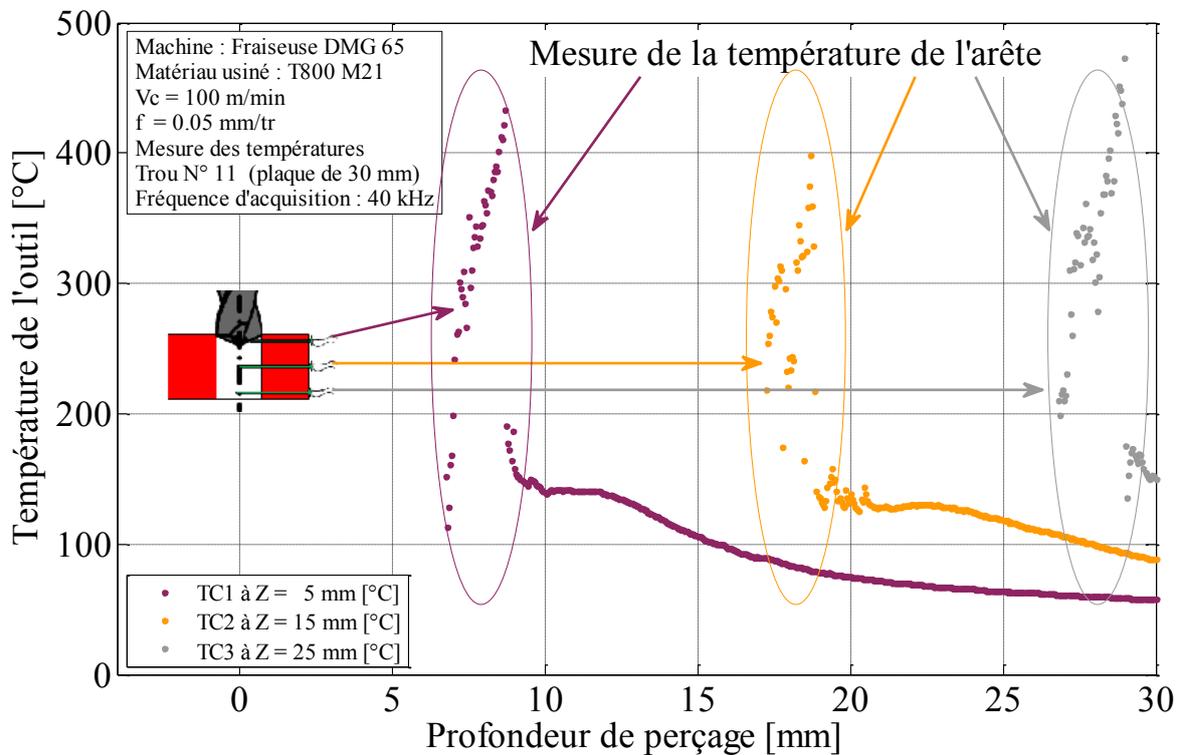


Figure 111 : Evolution des signaux des thermocouples horizontaux lors du perçage

L'un des inconvénients de ce traitement est que le signal étant fréquemment très bruité pour les raisons explicitées précédemment, il est souvent impossible de remonter à un tel tracé. L'avance étant de 0.025 mm/dent durant ces essais et la longueur de la pointe suivant Z étant de 1.8 mm pour l'outil retenu, le nombre de points de mesure le long de l'arête est limité à environ 72. Le traitement ramène ce nombre à 36 afin de limiter le bruit de mesure et assurer un lissage minimal. Ce très faible nombre de points pour l'ensemble de l'arête permet néanmoins de recomposer la température comme le présente la Figure 112.

Malgré ces difficultés, la recombinaison des températures permet de mettre en valeur le fait que les gradients de température sont importants au niveau de la zone de coupe le long de l'arête et dans l'outil. Entre l'âme et les becs, la température passe de moins de 150°C à plus de 400°C en seulement 6 mm.

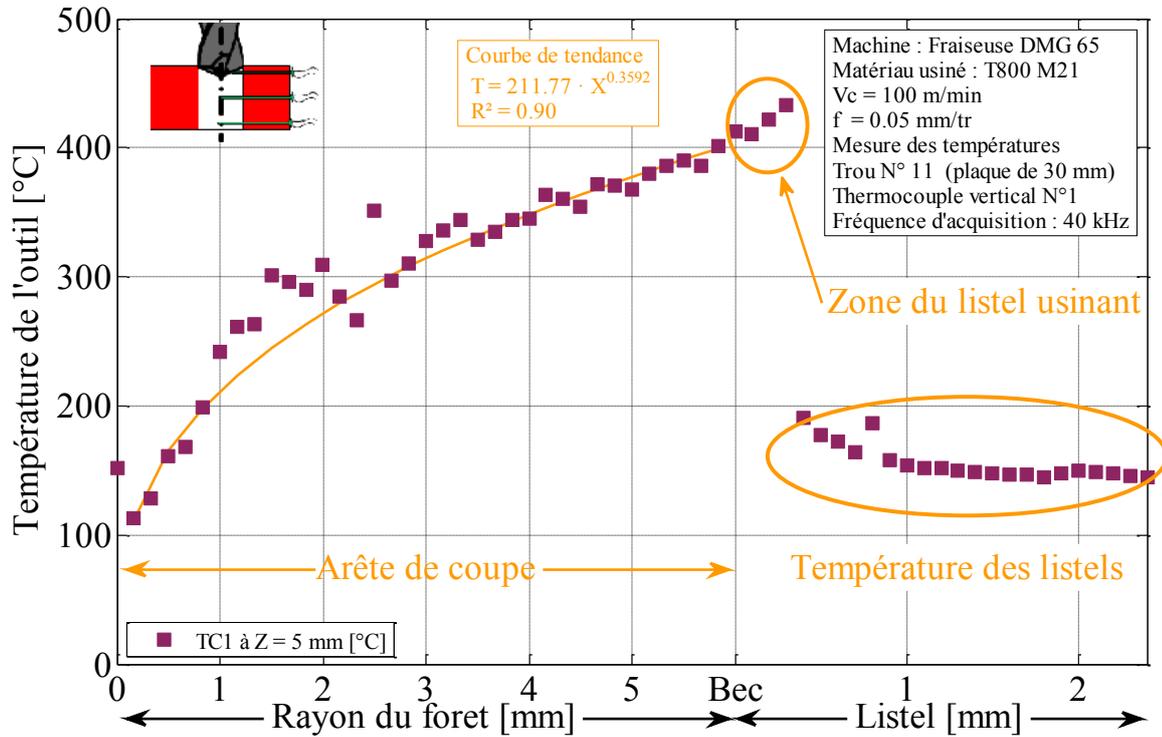


Figure 112 : Evolution de la température le long de l'arête de l'outil à 5 mm de profondeur

4 - CONCLUSION

Les études sur les matériaux percés séparément ont permis d'identifier les modes d'usures propres à ceux-ci. Ces analyses vont permettre une meilleure compréhension des phénomènes survenant lors de l'usinage d'empilages.

Partie 4 - EMPILAGE

Après avoir étudié le perçage de l'alliage Ti6Al4V et du CFRP IMA M21E séparément, il convient de se focaliser sur l'empilage. Pour cela, trois configurations ont été retenues. La première approche consiste à percer alternativement les deux matériaux avec le même outil, alors qu'ils ne sont pas disposés en empilage. Les deux autres configurations correspondent à l'empilage Ti6Al4V/IMA M21E percés dans un sens ou dans l'autre.

Chapitre 10 - ETUDE DU PERÇAGE DE L'ALTERNANCE DES MATERIAUX

La première approche de l'usinage de l'empilage est le perçage des deux matériaux l'un après l'autre avec le même outil. Ainsi, le foret percera dans un premier temps un trou dans le Ti6Al4V, puis percera un trou dans l'IMA M21E, ensuite, un trou sera fait dans le Ti6Al4V, et ainsi de suite... Il sera ainsi possible d'évaluer étape par étape l'impact de chaque matériau usiné sur l'usure et les efforts [Poutord_2013b ; Wang_2014]. Les résultats seront comparés aux essais de perçage des matériaux usinés individuellement (Partie 3).

1 - DEFINITION DES ESSAIS

Le perçage en alternance des matériaux est réalisé par l'usinage de 18 trous dans chacun des deux matériaux, soit un total de 36 trous pour un foret. L'instrumentation permet un relevé des efforts et de la position de l'outil par rapport à la pièce lors du perçage. Tous les deux trous, des observations de l'outil, ainsi que des mesures du rayon d'arête en trois points sur chacune des arêtes sont réalisées.

L'objectif de cette démarche est d'imposer à l'outil alternativement les contraintes de chacun des deux matériaux, mais en les dissociant. Cela pour mieux comprendre les effets de l'usure causée par un matériau lors de l'usinage du second. Cette étude est donc l'étape intermédiaire entre le perçage de matériaux de manière indépendante et le perçage de l'empilage.

| Matériau usiné | Ti6Al4V | CFRP |
|-----------------------------|---------------|---------------|
| Vc (m/min) | 10 | 100 |
| f (mm/tr) | 0.2 | 0.05 |
| Lubrification | Usinage à sec | Usinage à sec |
| Epaisseur de la plaque (mm) | 25.5 | 20 |

Tableau 19 : Tableau des conditions de coupe retenues pour l'usinage en alternance de matériaux

Le Tableau 19 indique les conditions opératoires retenues pour les opérations de perçage dans chacun des matériaux. Les paramètres sont adaptés à chaque matériau afin de représenter les variations de vitesses de coupe et d'avance qui seront appliquées lors du perçage d'empilage.

L'étude se focalisera dans un premier temps sur les efforts globaux, afin de les comparer à ceux mesurés lors du perçage de chacun des matériaux seuls. Puis, une étude de la qualité du trou sera menée en lien avec l'usure de l'outil.

2 - EVOLUTION DES EFFORTS AVEC L'USURE

Afin d'effectuer la première approche de l'empilage et de la comparer aux perçages des matériaux seuls, les efforts de coupe sont analysés. La Figure 113 et 114 représentent les efforts lors du perçage en fonction du nombre de trous réalisés dans chacun des matériaux. Ainsi, au niveau de l'abscisse 1 (trou N°1), le premier trou réalisé dans le Ti6Al4V et dans le CFRP sont présentés. Le premier matériau percé par le foret est le Ti6Al4V.

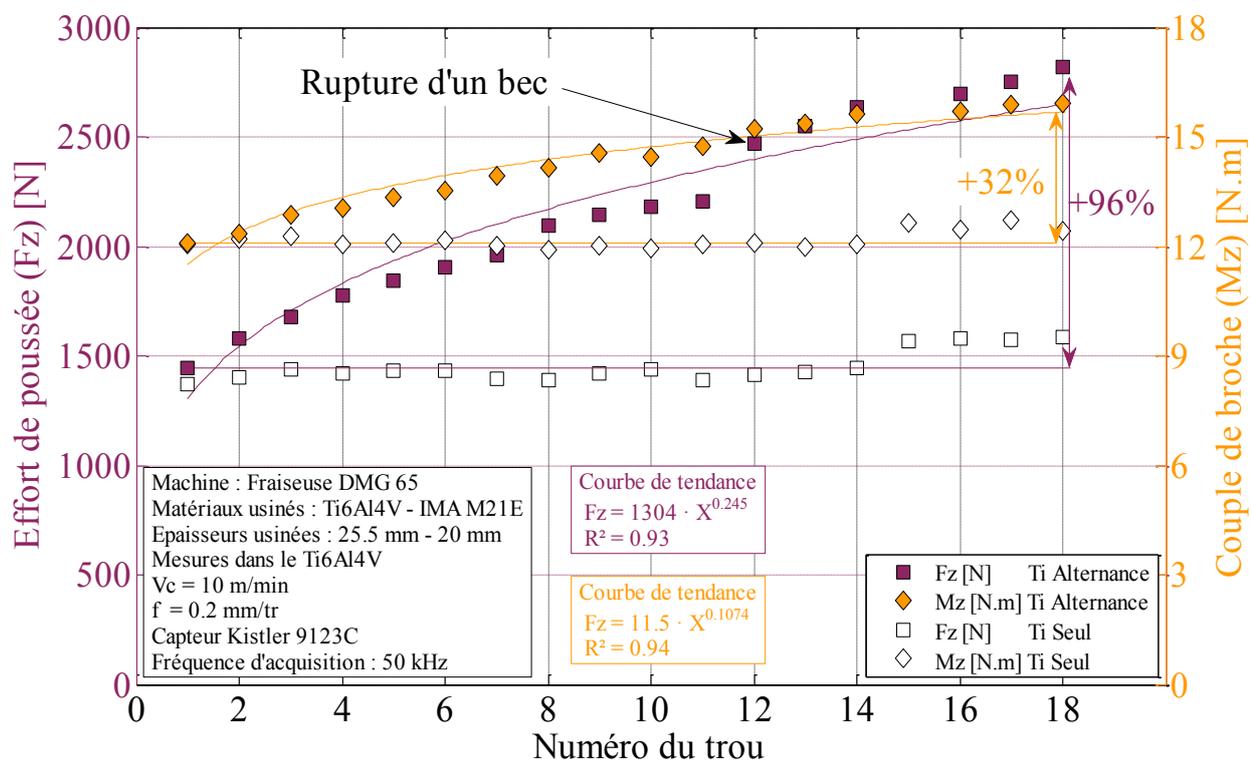


Figure 113 : Evolution des efforts dans le Ti6Al4V en fonction du nombre de trous réalisés en alternance

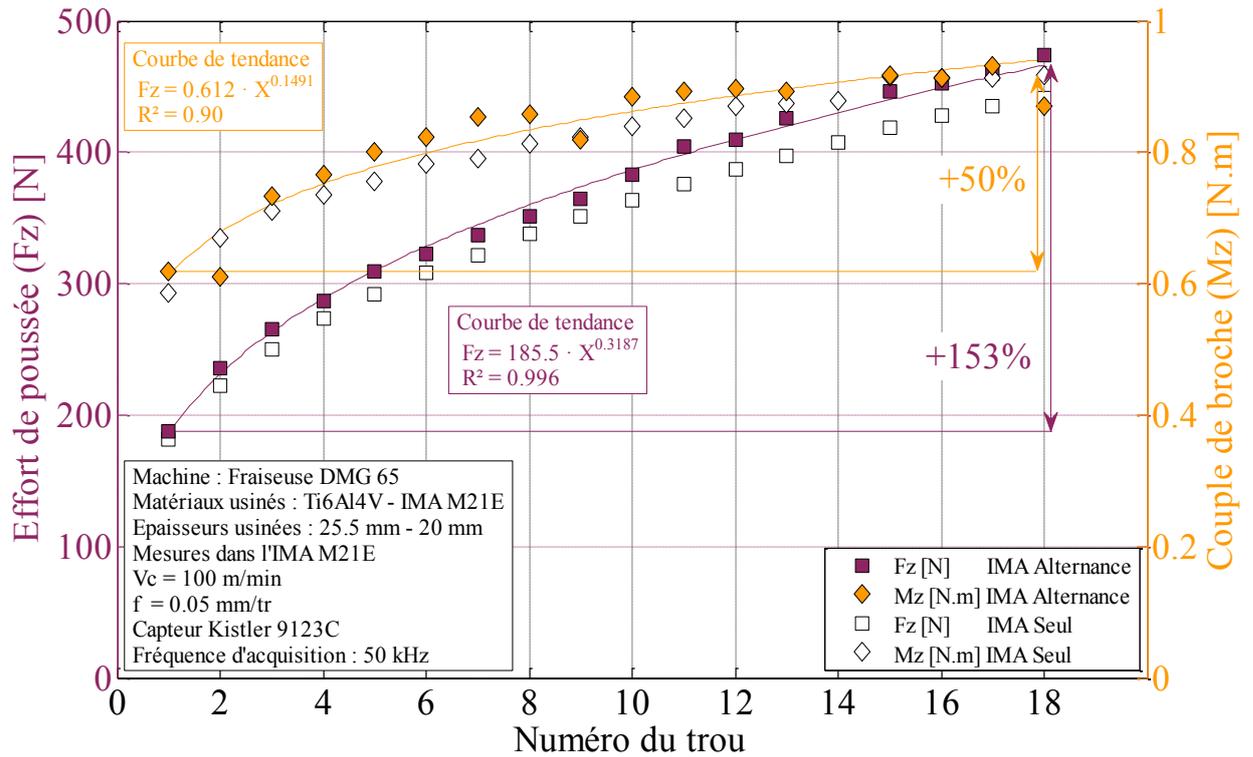


Figure 114 : Evolution des efforts dans l'IMA M21E en fonction du nombre de trous réalisés en alternance

Les efforts mesurés lors de l'usinage du Ti6Al4V (Figure 113) augmentent de manière importante (+ 96 % après 18 trous pour l'effort de poussée et + 32 % pour le couple). Lors des essais d'usure dans ce matériau seul, l'usure avait été très peu marquée (seulement quelques pourcents). Cette augmentation est donc liée au fait que le foret usine du composite à fibre de carbone, générant une usure qui se répercute au niveau des efforts dans le Ti6Al4V.

Les mesures d'efforts dans l'IMA M21E (Figure 114), mettent en évidence que l'outil semble suivre la même courbe d'effort, qu'il perce un trou dans le Ti6Al4V entre deux trous ou non. Cette tendance semble indiquer que seul le composite a un effet sur l'usure de l'outil.

3 - ETUDE DE L'USURE DE L'OUTIL

Si l'analyse des niveaux d'efforts indique que l'usure du foret dans l'IMA M21E seul et dans la configuration en alternance sont similaires, l'observation de l'outil au microscope et l'analyse des profils d'arêtes permettent d'identifier des différences.

L'observation au microscope permet de relever des ruptures de becs, qui se traduisent par une hausse des efforts (Figure 113), principalement visible sur la composante Fz dans le Ti6Al4V. Un autre point identifié par les vues au microscope et la mesure du profil, est la formation d'une couche adhérente lors de l'usinage du Ti6Al4V qui est ensuite retirée lors de l'usinage de l'IMA M21E comme cela est visible sur la Figure 115 et 116.

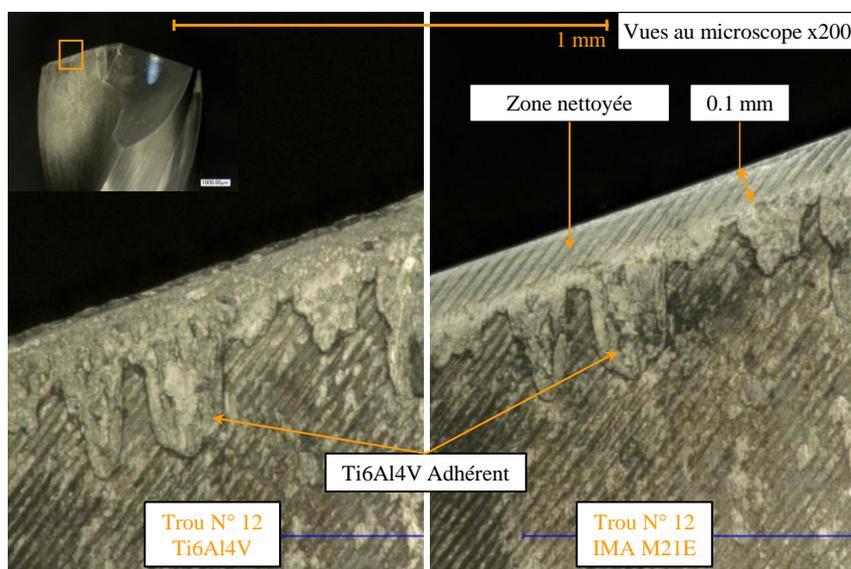


Figure 115 : Face de coupe du foret avant et après avoir usiné de l'IMA M21E

Une couche adhérente de Ti6Al4V est déposée lors de l'usinage. Néanmoins, cette couche n'est pas suffisamment résistante pour assurer une protection face à l'abrasion lors du perçage du CFRP. En effet, la zone correspondant à la longueur de contact au niveau de la face de coupe est nettoyée de toute matière adhérente. Lors de perçages plus courts, cette couche peut potentiellement résister et jouer le rôle de revêtement protecteur.

L'ensemble des vues réalisées permettent de suivre l'usure en dépouille. Ainsi il est possible de déterminer deux zones Figure 117. La première considérée correspond à une disparition des marques d'affûtage, qui aura été causé par un frottement important de la pièce sur l'outil. La seconde zone correspond à la limite de frottement de la matière en dépouille du foret. Cette seconde limite est bien plus difficile à déterminer de manière répétable. L'ensemble des

images traitées lors de l'étude auront donc été analysées en même temps afin de garantir une bonne répétabilité de ces valeurs.

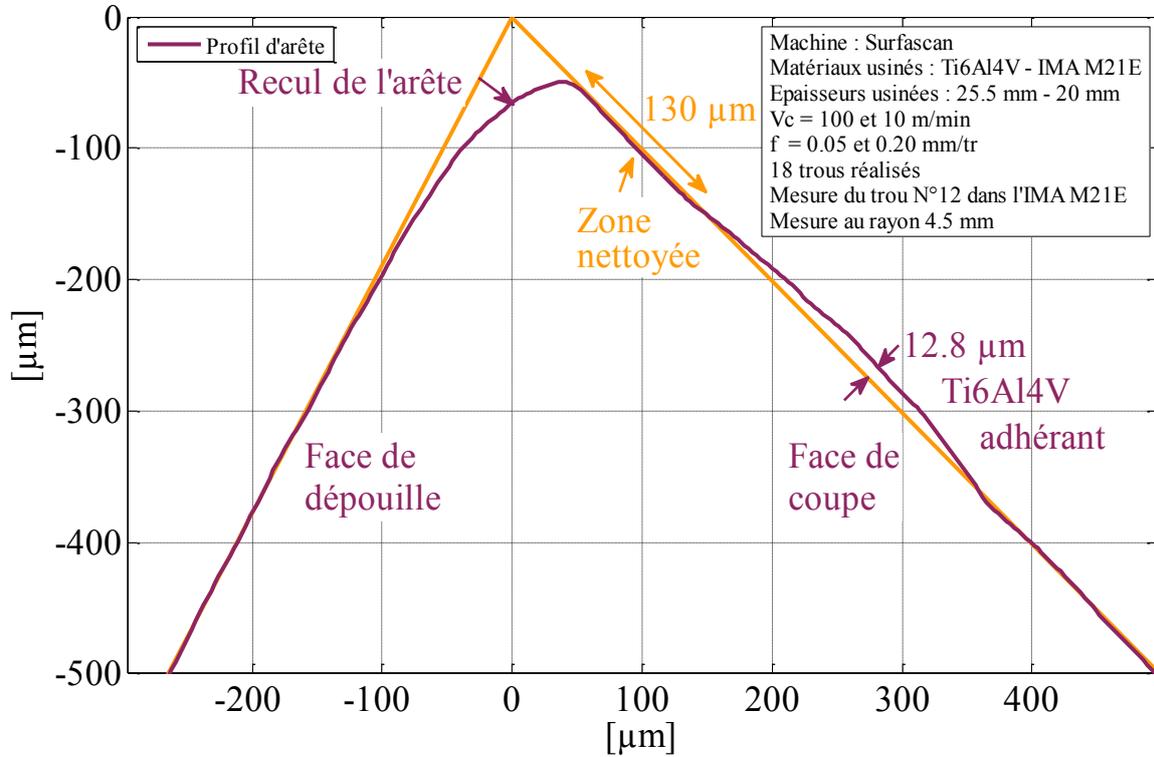


Figure 116 : Profil d'arête lors du perçage d'alternance des matériaux après 12 perçages dans chacun des deux matériaux (dernier matériau percé : IMA M21E)

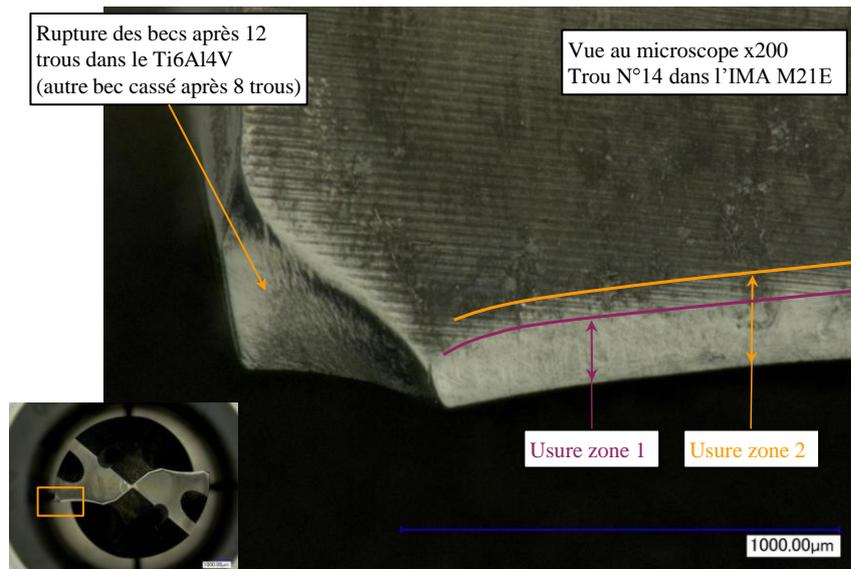


Figure 117 : Définition des zones d'usure sur l'outil

Afin d'assurer la répétabilité et les comparaisons des valeurs d'usure en dépouille, les mesures sont effectuées à 5.5 mm et 4.5 mm de rayon, la valeur est prise dans la direction de la vitesse de coupe locale. Ces deux valeurs permettent de poursuivre les mesures alors qu'un bec a été ébréché, comme cela a pu être noté lors de la campagne d'essais dans le Ti6Al4V ou en alternance. La Figure 118 indique l'évolution de l'usure mesurée dans la zone 1 à 4.5 mm de rayon, suite à un perçage dans le Ti6Al4V (points en violet) ou dans l'IMA M21E (points en orange).

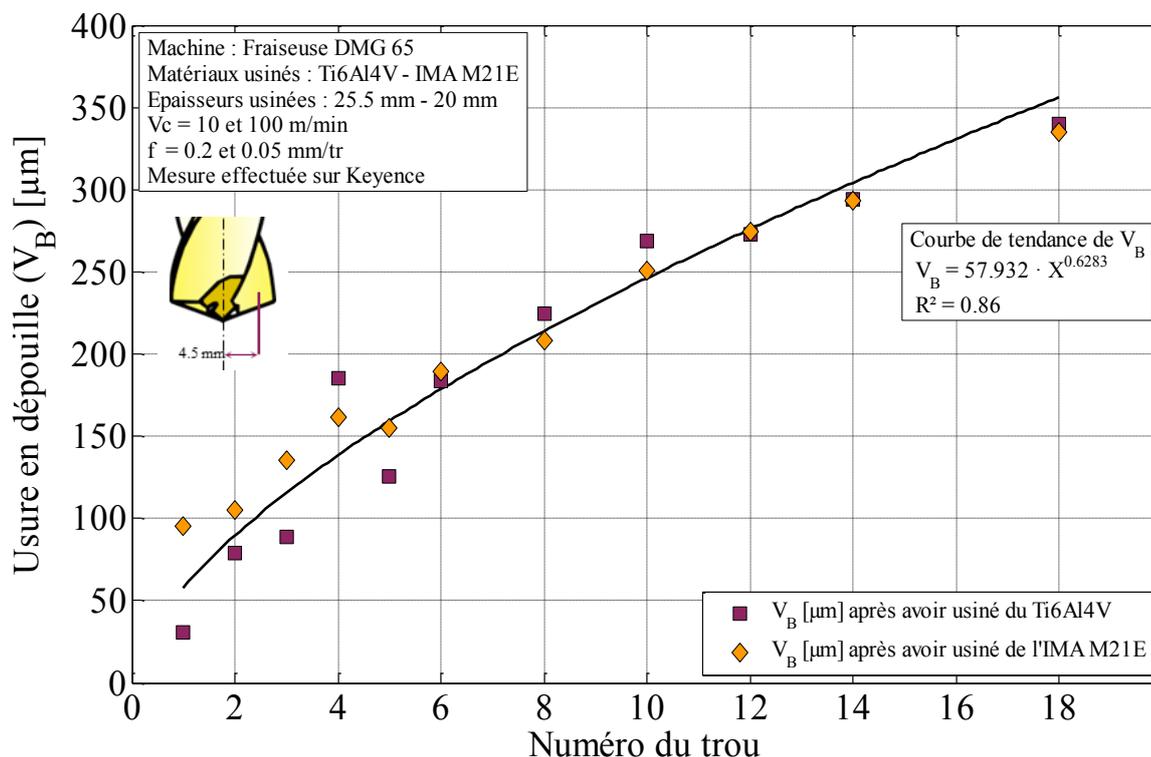


Figure 118 : Evolution de l'usure de l'outil suite au perçage du Ti6Al4V et au CFRP

Si l'effort de poussée est en grande partie lié à la géométrie de l'âme du foret, la capacité à couper de l'arête intervient également pour une part non négligeable. L'évolution de l'effort de poussée avec l'usure en est d'ailleurs une preuve. Un lien a donc été recherché entre l'effort de poussée de l'outil en usinage et l'usure de l'arête. Pour cela, le critère de l'usure précédemment tracé a été retenu, ainsi, la Figure 119 représente les efforts de poussées F_z (présentés dans la partie précédente) tracés en fonction de l'usure relevée (celle correspondant à la zone 1 à 4.5 mm de rayon).

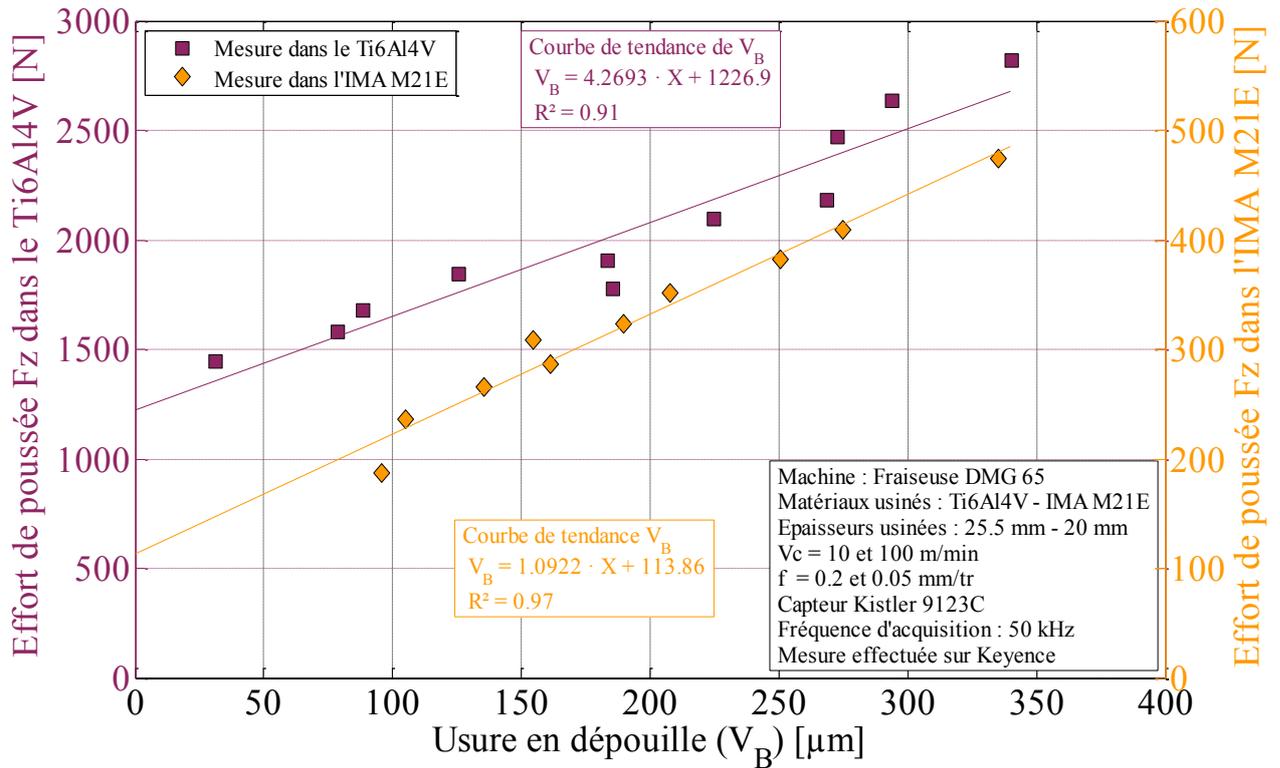


Figure 119 : Efforts de poussée F_z dans les deux matériaux de l'alternance en fonction de l'usure en dépouille

Le lien entre les efforts et la mesure de l'usure en dépouille suit une loi affine, les coefficients de corrélation étant proches de 1. Ces résultats tendent à montrer que l'effort de poussée pour un foret donné est directement lié à son usure en dépouille. L'ordonnée à l'origine est probablement liée à la géométrie de l'outil et principalement de la pointe. Un outil neuf aurait donc un effort de poussée de 1127 N dans le Ti6Al4V et de 114 N dans l'IMA.

Les prochains essais confirmeront ce lien existant entre l'usure en dépouille de l'outil et l'effort de poussée.

4 - ETUDE DE LA QUALITE DES TROUS

Suite à l'étude des efforts et de l'usure de l'outil, une étude a été menée sur la qualité des trous. Pour cela, l'ensemble des trous réalisés a été mesuré à l'aide d'un Talyrond TR585. Les mêmes paramètres identifiés au Chapitre 8 ont été retenus pour le Ti6Al4V et pour l'IMA M21E, ceux du Chapitre 9 ont été sélectionnés.

Cette étude a permis de remarquer que les trous dans le Ti6Al4V présentent encore une fois une forme de trilobe et que ce défaut n'est pas présent sur la surface du trou réalisé dans l'IMA M21E, comme le montre la Figure 120.

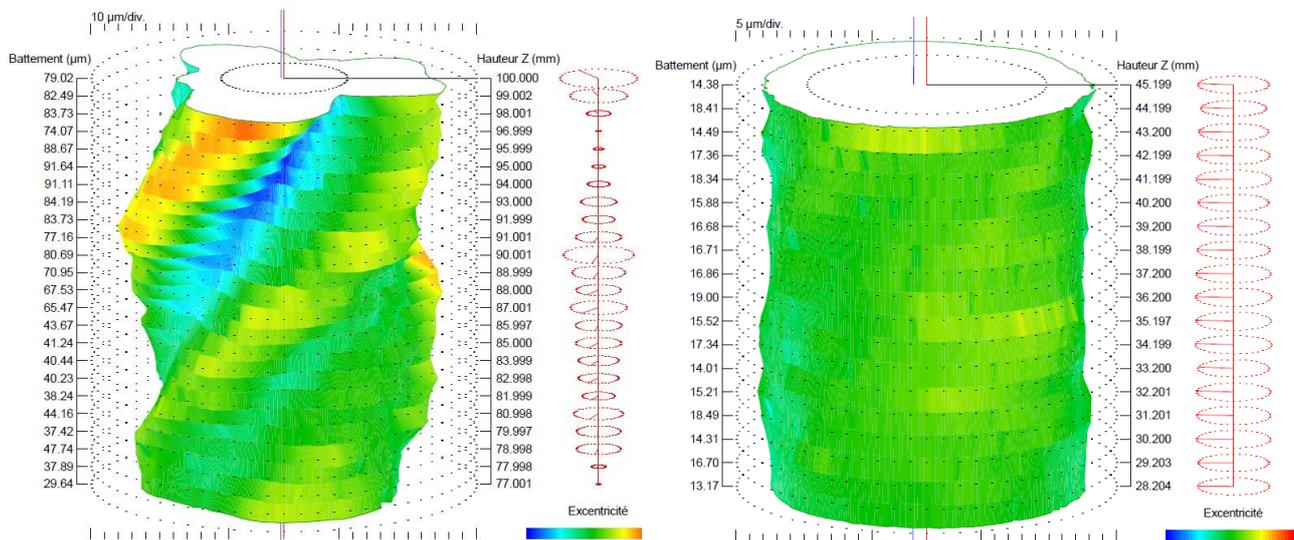


Figure 120 : Profil des surfaces dans le Ti6Al4V (à gauche) et l'IMA M21E (à droite) suite au perçage en alternance des matériaux

La première mesure a porté sur les rayons des trous réalisés (le trou correspondant au critère des moindres carrés a été retenu). La Figure 121 indique les rayons moyens des trous mesurés dans chacun des deux matériaux. Le premier point intéressant est la différence de diamètre pour un même outil dans les deux matériaux. Les trous dans le Ti6Al4V sont environ 30 µm plus grand au diamètre que ceux dans l'IMA M21E. Cet écart peut être causé par les échauffements thermiques de l'outil et l'aspect fibreux du composite. L'élévation de température de l'outil de plusieurs centaines de degrés tend à le dilater, ainsi que la matière à proximité du trou, de ce fait l'outil réalise un perçage d'un diamètre plus important que celui de l'outil. L'aspect fibreux du composite fait que les fibres fléchissent lors du passage de l'arête et se redressent ensuite, réduisant le diamètre percé réel. L'usure de l'outil tend à réduire son diamètre, néanmoins les arêtes coupent moins bien, générant une hausse des

efforts nécessaires à la coupe du Ti6Al4V ainsi qu'une élévation plus importante de la température du foret et de celle de la matière à proximité du trou, amplifiant le phénomène précédemment présenté. Par conséquent, il est compréhensible que le diamètre du trou dans l'alliage de titane n'évolue que peu avec l'usure de l'outil alors que celui dans l'IMA M21E évolue d'avantage.

La réduction du diamètre de l'alésage dans le composite est d'environ 0.8 μm par trou réalisé. Cela correspond probablement à la réduction du diamètre au niveau des becs de l'outil causé par l'abrasion des fibres de carbone sur les listels et les becs du foret.

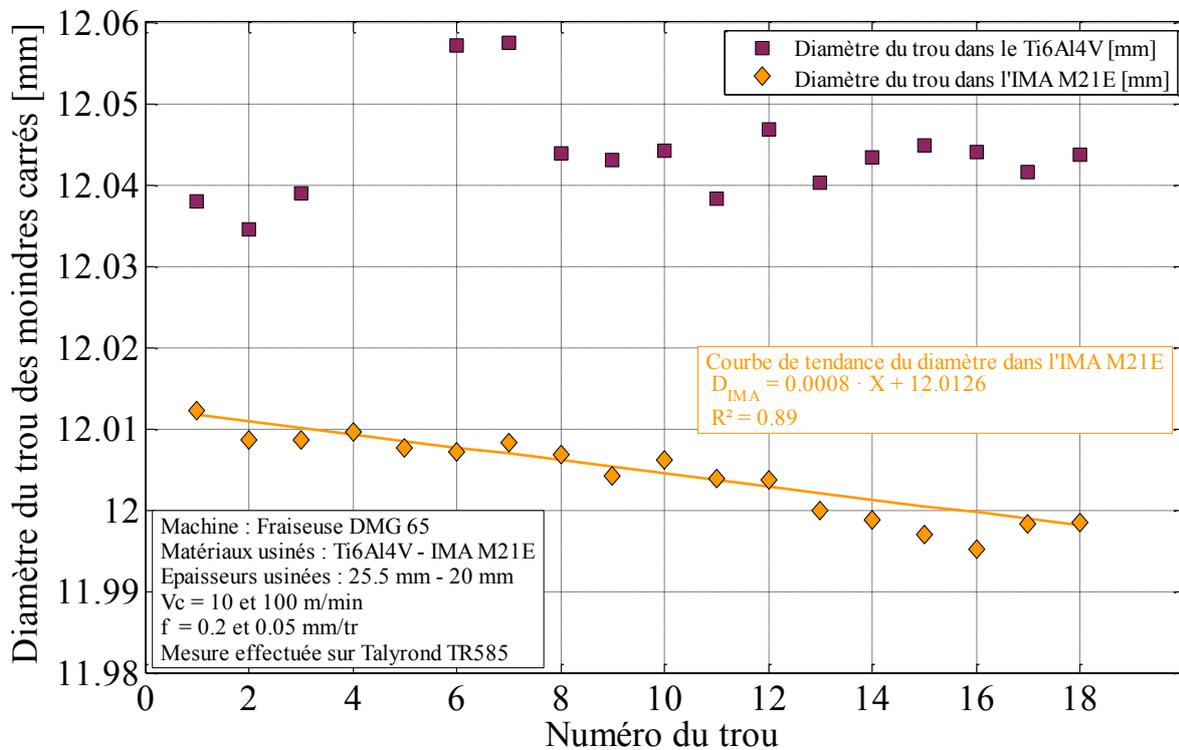


Figure 121 : Evolution des rayons des trous dans chacun des deux matériaux

Suite à cette étude des diamètres, une étude portant sur les défauts de forme du trou ont mis en évidence que la distance du pic à vallée global (écart entre les deux cylindres englobant l'ensemble de la surface mesurée) évolue avec le nombre de perçage réalisé par le foret. La Figure 122 représente ce défaut en fonction du nombre de trous réalisés pour chacun des deux matériaux analysés. La valeur dans le Ti6Al4V ne semble pas indiquer de variation notable. En effet, cette valeur est en partie liée à l'amplitude du trilobe. Dans l'IMA, même si la valeur relevée est plus faible, l'amplitude de ce défaut augmente avec le nombre de trous réalisés. Dans le composite, ces mesures correspondent probablement aux fibres non coupées.

Néanmoins le relevé de ces valeurs est lissé par le palpeur, ce dernier étant constitué d'une bille de 2 mm de diamètre.

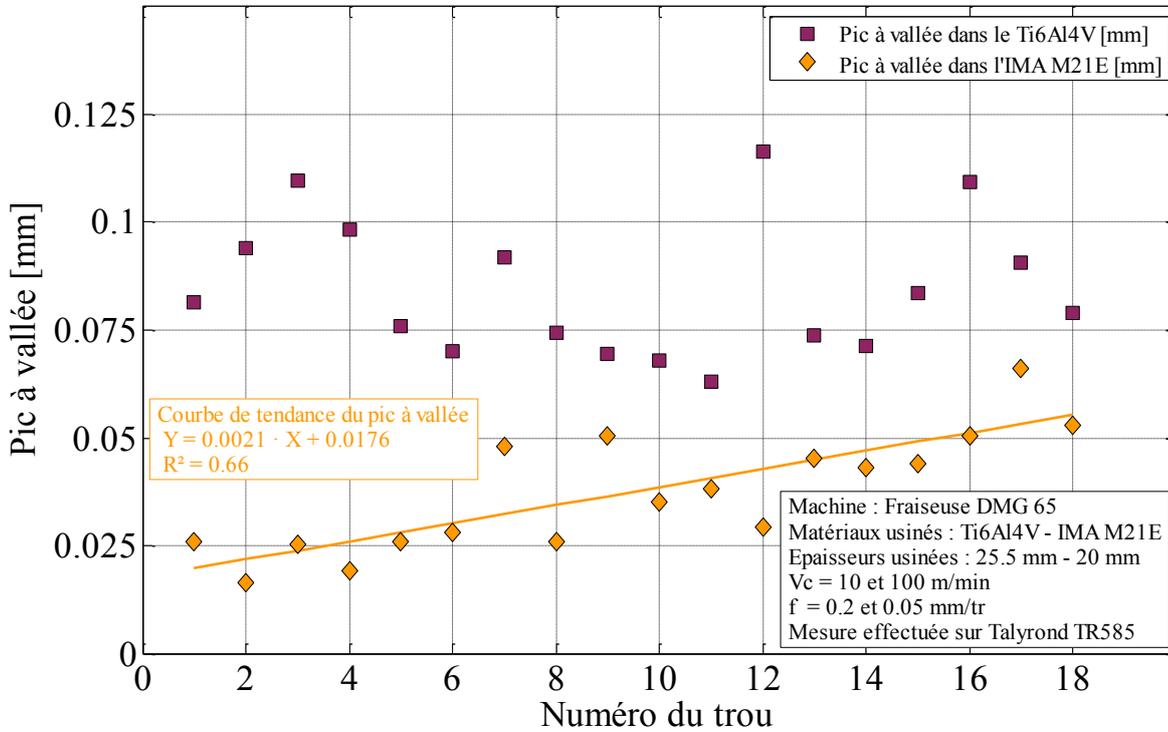


Figure 122 : Evolution de la distance du pic à vallée global en fonction du nombre de trous usinés

5 - CONCLUSIONS

En conclusion, cette campagne de perçage par alternance des matériaux permet une première approche des phénomènes présents lors de l'usinage des empilages. Une très forte augmentation des efforts de coupe a été identifiée dans les deux matériaux, pouvant endommager le foret, notamment dans le Ti6Al4V. Une variation de diamètre est également identifiée entre les deux matériaux. Ce défaut peut être la cause de rebut de pièces, les trous étant néanmoins alésés suite au perçage, l'impact de ce défaut est limité d'un point de vue industriel.

La contrainte qui n'a pas pu être considérée dans cette configuration disjointe est celle liée aux changements de conditions de coupe lorsque le foret débouche dans le second matériau. Une augmentation brutale de vitesse de coupe peut avoir pour effet de charger les arêtes au point d'entraîner une rupture de celles-ci. La seconde contrainte non envisagée est l'évacuation des copeaux. Le fait d'effectuer l'opération sans déburrage, ni lubrification est un choix qui complexifie grandement cette évacuation. La dernière contrainte qui n'est pas envisagée par le perçage en alternance est le fait qu'un foret chauffé par l'opération de perçage dans le Ti6Al4V puisse endommager le composite à fibres de carbone.

L'impact de ces contraintes sera en partie étudié dans les deux chapitres suivants.

Chapitre 11 - ETUDE DU PERÇAGE DE L'EMPILAGE Ti6Al4V/CFRP

L'objectif des travaux de thèse est la compréhension des phénomènes survenant lors de l'usinage de l'empilage Ti6Al4V/CFRP (dans les deux sens). Par conséquent, il convient d'étudier cette configuration après avoir étudié les opérations dans chacun des deux matériaux. Ce Chapitre 11 se focalisera sur l'étude menée dans le sens Ti6Al4V/CFRP, et le Chapitre 12 portera sur le second sens.

1 - DEFINITION DES ESSAIS

Les perçages précédents dans les deux matériaux séparés (Chapitre 5) ont permis de définir les conditions de coupe optimales pour le perçage de chacun des deux matériaux. Le perçage des empilages se fera en modifiant les conditions de coupe au passage de l'interface des deux matériaux. Les stratégies de changement de conditions de coupe feront l'objet d'une attention particulière.

L'augmentation de la vitesse de rotation de la broche engendre des contraintes supplémentaires au niveau des listels, que ceux-ci soient en prise dans le CFRP ou le Ti6Al4V. Or, les outils instrumentés en température présentent une rainure derrière le listel permettant le passage des fils thermocouples (Figure 60). Cette rainure fragilise les becs, par conséquent, une rupture de cette zone du foret a été observée lors d'essais dans le Ti6Al4V en passant des conditions de coupe du Ti6Al4V à celles du CFRP alors que la pointe de l'outil avait débouché depuis 5 mm. Par conséquent, les outils employés lors de ces perçages ne seront pas du même lot et ne disposeront pas thermocouples, ni de rainure derrière les listels.

Un premier perçage dans le Ti6Al4V a permis de mesurer les efforts de poussée et de couple afin de les comparer à ceux obtenus dans le Ti6Al4V dans le Chapitre 8. Les valeurs de couple et d'effort de poussée, représentées dans le Tableau 20 sont très inférieures à celles relevées précédemment dans le Ti6Al4V. La réduction des efforts est de l'ordre de 15 % pour l'effort de poussée et plus de 30 % pour le couple.

| Foret | Foret SECO Tools Ø 12 mm (Employé dans ce chapitre) | Foret SECO Tools Ø 12 mm avec rainure pour les TC |
|------------------------|--|--|
| Effort de poussée (Fz) | 1196 N | 1373 à 1440 N |
| Couple de broche (Mz) | ≈ 8 N.m | ≈ 12 N.m |

Tableau 20 : Tableau des efforts de coupe des forets dans le Ti6Al4V

Suite à ce choix d'outil, il convient de définir le point et la stratégie de changement des conditions opératoires, et pour cela plusieurs points ont dû être considérés. Le premier est la qualité de la surface finie. Il conviendrait d'effectuer le changement de paramètre lors du passage des becs d'un matériau à l'autre, permettant ainsi d'assurer une surface finie de bonne qualité et constante sur toute la hauteur du trou, les becs étant la partie de l'outil définissant la surface finie. Néanmoins, cette très forte augmentation de la vitesse de coupe risque de solliciter fortement l'outil au niveau des becs et des listels, générant une usure ou une rupture prématurée.

Pour définir une zone d'évolution des conditions opératoires, des essais de transition de conditions opératoires à diverses profondeurs ont été menées. Lorsque ce changement est mené à l'interface, les becs de l'outil cassent immédiatement. Les listels étant encore en prise dans le matériau supérieur (Ti6Al4V) sur environ 5 mm suivant l'axe Z, l'augmentation de la vitesse de coupe a généré une hausse des efforts sur cette zone du foret provoquant sa destruction.

Afin de réduire les risques de rupture de l'outil lors du changement de conditions de coupe, la longueur en prise des listels dans le Ti6Al4V, définie dans le Chapitre 8, a été prise en compte. Par conséquent, le changement de conditions de coupe est choisi lorsque la pointe est située 6 mm sous l'interface Ti6Al4V/IMA M21E. Ce changement de conditions, une fois les becs dans le composite à fibres de carbone, a pour effet d'usiner ce matériau avec des conditions opératoires qui ne lui sont pas favorables, la vitesse de coupe étant faible et l'avance élevée. Le changement de vitesse impactera la coupe des fibres et l'usure de l'outil, alors que l'avance importante aura un effet sur les risques de délaminage. Néanmoins, dans le cas présent, l'épaisseur de composite est suffisamment importante pour assurer un maintien des plis et empêcher le délaminage en sortie. Le délaminage en entrée de trou est quant à lui, contenu par la plaque de Ti6Al4V maintenue sur celle de CFRP. Il sera néanmoins possible de visualiser un impact sur l'outil, en effet, le listel et la partie derrière ce listel aura des marques d'échauffement comme le présente la Figure 128.

La Figure 123 indique les conditions de coupe en fonction de la profondeur de perçage.

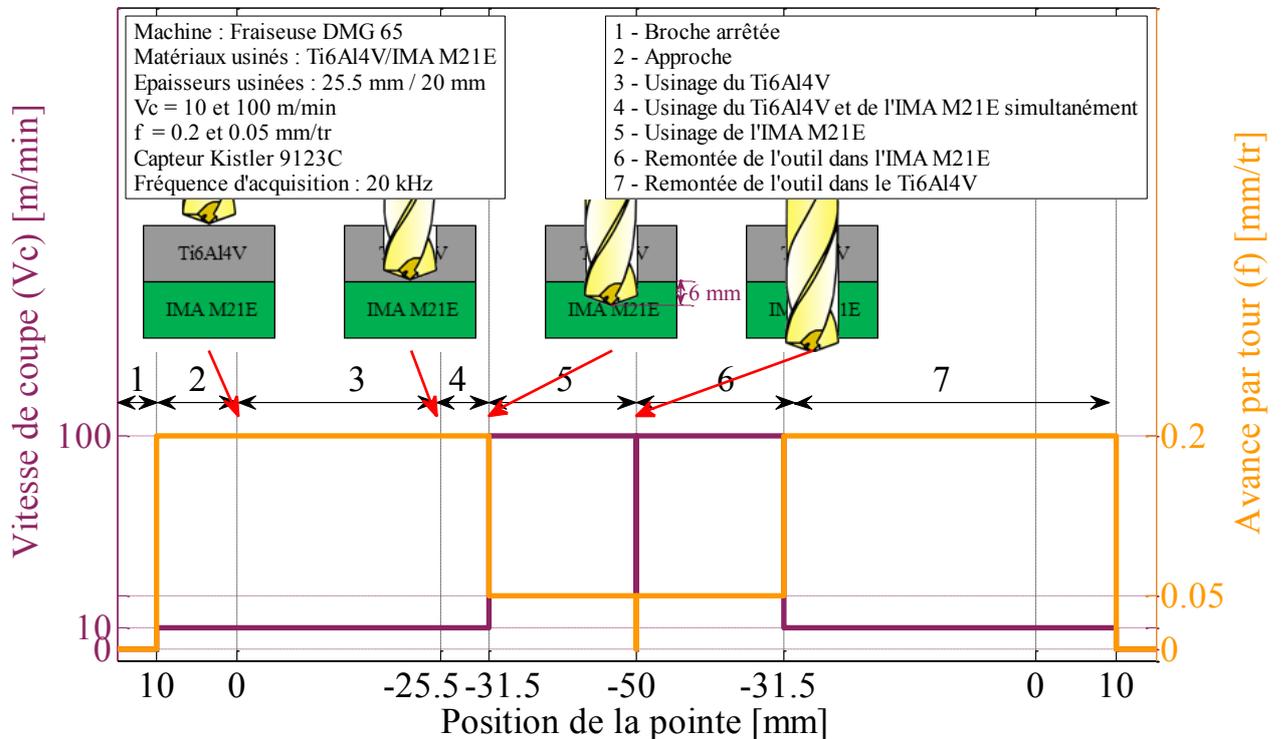


Figure 123 : Evolution des paramètres de coupe

Les conditions de coupe en fonction de la profondeur étant décrites sur la Figure 123, il a été choisi d'effectuer une série de 34 trous en configuration d'empilage. La mesure des efforts est effectuée pour l'ensemble des perçages alors que des vues au microscope du foret ainsi que des mesures des profils d'arête sont effectués tous les deux trous. La mesure de la température dans l'outil n'a pas été possible pour des raisons de tenue mécanique de l'arête.

L'ensemble de l'étude ayant été réalisé en perçage continu sans déburrage, ni lubrification ou soufflage d'air, il a été choisi de poursuivre de la même manière malgré les 45.5 mm de perçage de l'empilage, soit plus de quatre fois le diamètre. Ce choix a entraîné une difficulté d'expulsion des copeaux lors de l'usinage du CFRP qui se sont alors agglomérés dans les goujures, comme cela est présenté sur la Figure 124. Néanmoins, la tenue mécanique de ce « copeau » est très réduite. Ce dernier s'effritant aisément à la main, il n'est pas jugé pénalisant pour la coupe.

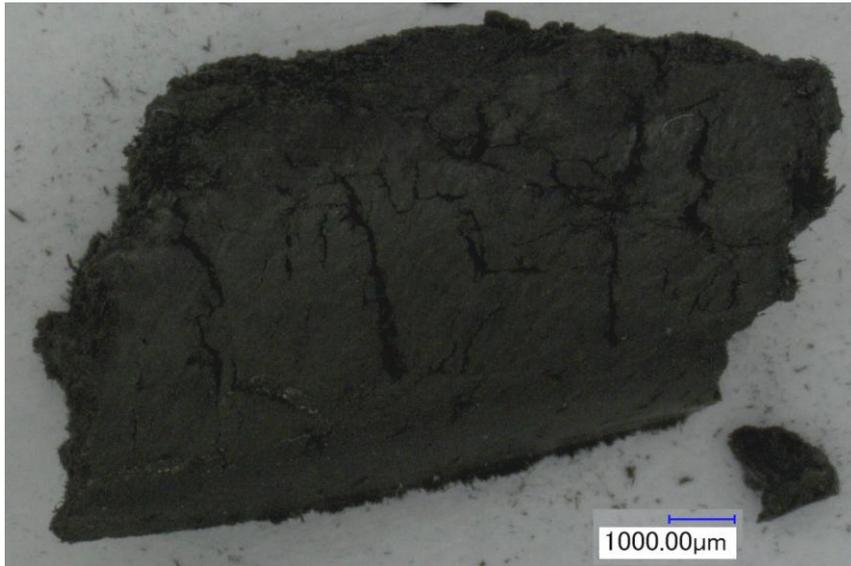


Figure 124 : « copeau » de CFRP dans le cas de perçage profonds

2 - ÉTUDE DES EFFORTS LORS DU PERÇAGE DE L'EMPILAGE

L'outil retenu pour cette opération en empilage n'est pas issu du lot initial, néanmoins la géométrie est supposée identique (même géométrie d'affutage). Néanmoins les niveaux d'efforts ne correspondent pas, par conséquent, seules les évolutions seront comparées aux opérations précédentes.

Dans un premier temps, les évolutions des efforts lors d'un perçage seront analysées, puis les efforts de coupe en fonction de l'usure seront étudiés.

2 - 1 - ÉVOLUTIONS DES EFFORTS AU COURS D'UN PERÇAGE EN CONFIGURATION D'EMPILAGE

La Figure 125 représente l'évolution des efforts de coupe lors du perçage d'empilage. La première zone correspond au perçage de l'alliage de titane. Les courbes présentent des évolutions similaires à celles obtenues dans le Chapitre 8. Il arrive que le couple augmente en fin de perçage avant que l'outil ne débouche, à cause du frottement des listels qui augmente lors du rétreint de l'alliage de titane. Dans un second temps, l'outil change progressivement de matériau, en gardant les conditions de coupe utilisées dans le Ti6Al4V. La pointe s'enfonce dans l'IMA M21E alors que les listels sont toujours en contact avec l'alliage de titane. Cette transition génère une forte baisse des efforts de coupe car le composite est bien moins contraignant et génère des efforts très inférieurs (quatre à cinq fois plus faibles pour l'effort de poussée et le couple de broche) à ceux causés par l'alliage de titane à conditions de coupe

équivalentes. Dans un troisième temps, lorsque la pointe est 6 mm sous l'interface, les conditions de coupe changent pour correspondre à celles définies pour l'IMA M21E. Par conséquent, il y a une nouvelle évolution des efforts à la baisse, puis qui se stabilisent jusqu'à ce que l'outil débouche. Les conditions de coupe à la remontée sont identiques à celles employées lors de l'usinage pour une altitude donnée, cela afin de pouvoir compenser la dérive du capteur rotatif, comme présenté au Chapitre 5.

La faible variation de couple et d'effort de poussée lors des changements de conditions de coupe est l'élément qui permet de garantir l'intégrité de l'outil lors de cette phase. Les changements des conditions de coupe à des profondeurs de trous inférieures (lorsque les becs ou les listels du foret sont encore dans l'alliage de titane) génèrent une augmentation importante du couple, entraînant systématiquement une rupture des becs.

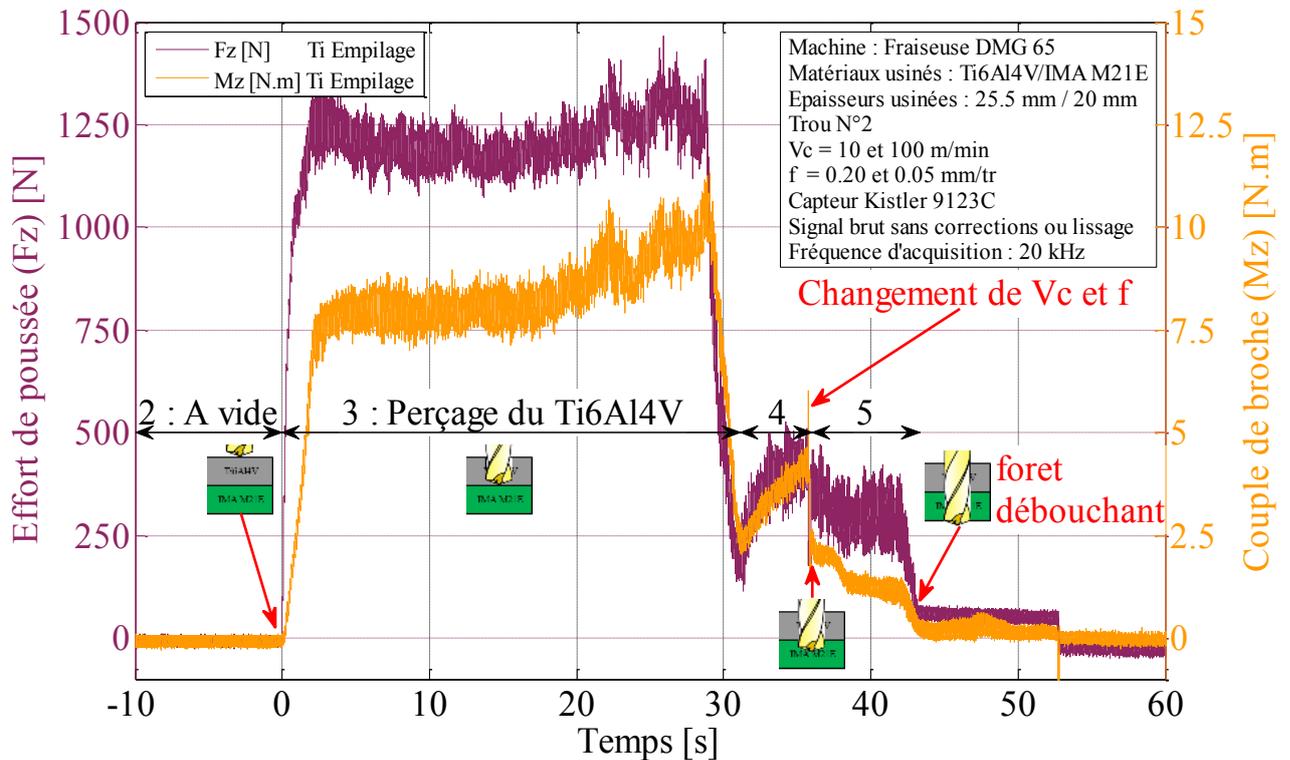


Figure 125 : Evolution des efforts au cours d'un perçage dans l'empilage Ti6Al4V/IMA M21E

2 - 2 - EVOLUTION DES EFFORTS DE PERÇAGE EN EMPILAGE

Les efforts mesurés lors du perçage de l'alliage de Ti6Al4V sont représentés sur la Figure 126. Un problème lors de l'acquisition n'a pas permis la mesure des efforts lors du premier trou. Lors des 18 premiers perçages, l'augmentation de l'effort de poussée est de l'ordre de 60 % tandis que le couple augmente de plus de 20 %. Après les 34 perçages, l'effort de poussée a doublé et le couple de broche a augmenté de près de 40 %.

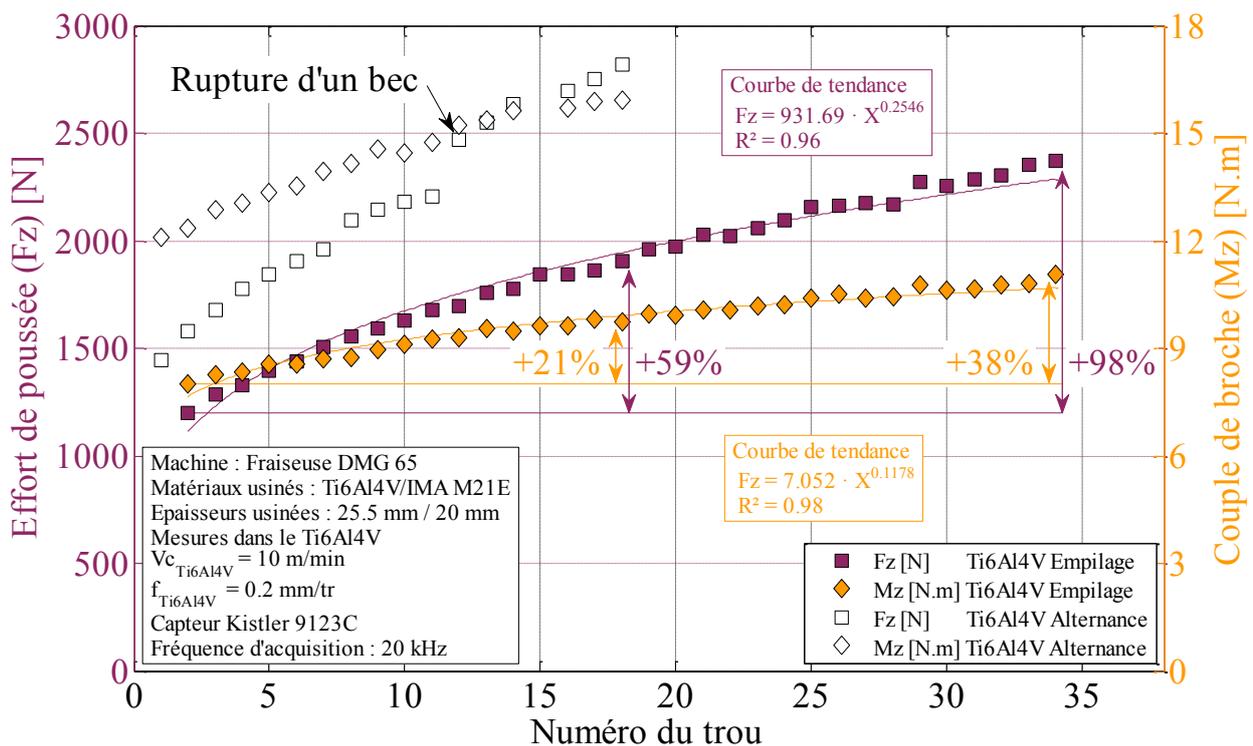


Figure 126 : Evolution des efforts dans le Ti6Al4V lors du perçage d'empilage Ti6Al4V/IMA M21E

Ces augmentations sur les 18 premiers trous sont bien moins importantes que celles relevées dans le cadre des essais en alternance des matériaux.

La Figure 127 représente l'évolution des efforts de poussée et du couple de coupe dans l'IMA M21E alors que les conditions de coupe sont les suivantes : $V_c = 100$ m/min et $f = 0.05$ mm/tr. Le couple de broche relevé présente de très importantes variations d'un trou à l'autre, par conséquent les tendances ne sont pas claires, même si le couple semble augmenter. Ces variations semblent être liées au défaut de coaxialité des trous, visible sur la Figure 132. Lors du perçage de l'empilage, il semble que le foret dévie lors de l'entrée dans le composite, générant un frottement des listels contre les parois du trou dans le Ti6Al4V. L'angle de

déviations du foret variant aléatoirement d'un trou à l'autre, le frottement du listel n'est pas constant, et génère donc des efforts supplémentaires.

L'effort de poussée quant à lui n'est que très faiblement impacté par ce défaut. L'évolution et les niveaux d'efforts sont semblables à ceux mesurés lors des autres configurations sur les 18 premiers trous (alternance de matériaux et usinage du composite à fibres de carbone seul). L'augmentation des efforts est sensiblement moins marquée, en effet, l'effort de poussée n'augmente que de 72 % entre les trous 2 et 18 alors que l'augmentation de ces efforts lors des essais précédents dépassait les 100 %.

Cette plus faible augmentation peut être liée au fait qu'une forte avance a été employée pour les premiers 4.2 mm (au niveau des listels) du perçage dans le CFRP, ce qui réduit le nombre de passage des arêtes pour couper une même profondeur de matière. Et comme la vitesse de coupe est réduite, la puissance consommée par la coupe est plus faible, d'après la Figure 99. Par conséquent, l'usure par abrasion se retrouve réduite sur cette portion de l'usinage. Donc l'évolution des efforts est plus faible, malgré les contraintes induites par la présence de Ti6Al4V au-dessus.

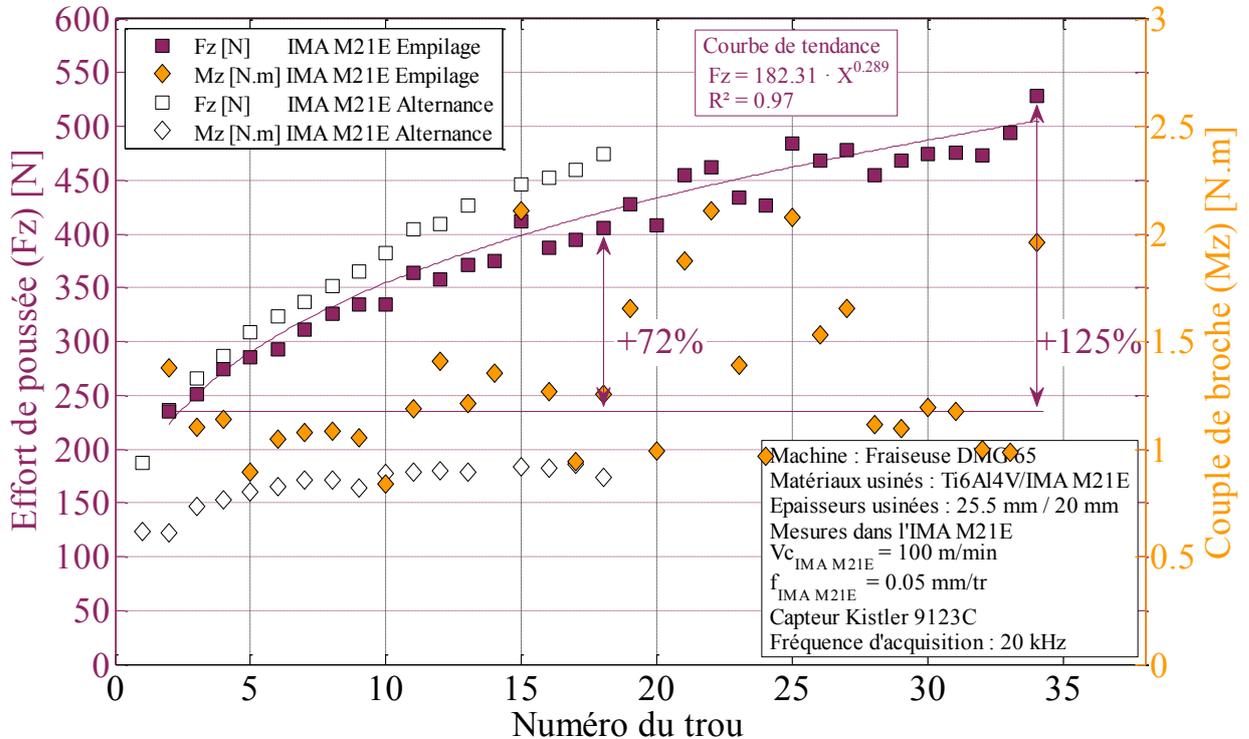


Figure 127 : Evolution des efforts dans l'IMA M21E lors du perçage d'empilage Ti6Al4V/IMA M21E

3 - ETUDE DE L'USURE DE L'OUTIL

Les efforts évoluant de manière importante, les images du foret prises à l'aide d'un microscope permettent de caractériser d'une autre manière l'usure subie par l'outil lors de l'usinage.

Le Ti6Al4V étant percé avant le composite à fibres de carbone, la surface de l'outil est « nettoyée » du Ti6Al4V adhérent comme cela a pu être relevé dans le Chapitre 10. Néanmoins, comme l'avance par dent employée lors du début de perçage du CFRP est importante (0.1 mm), la quasi-totalité de l'alliage de titane adhérent sur l'outil a été retiré, contrairement à ce qui a pu être observé lors de l'usinage de l'alternance où seule une « bande » sur la face de coupe était nettoyée. De plus les « copeaux » de CFRP sous forme de blocs, comme présentés dans la Figure 124 frottent dans les goujures, retirant encore une partie du Ti6Al4V collé sur la face de coupe et dans les goujures. Pour finir, il ne reste plus que des traces d'alliage de titane sur l'outil comme cela peut se voir sur la Figure 128.

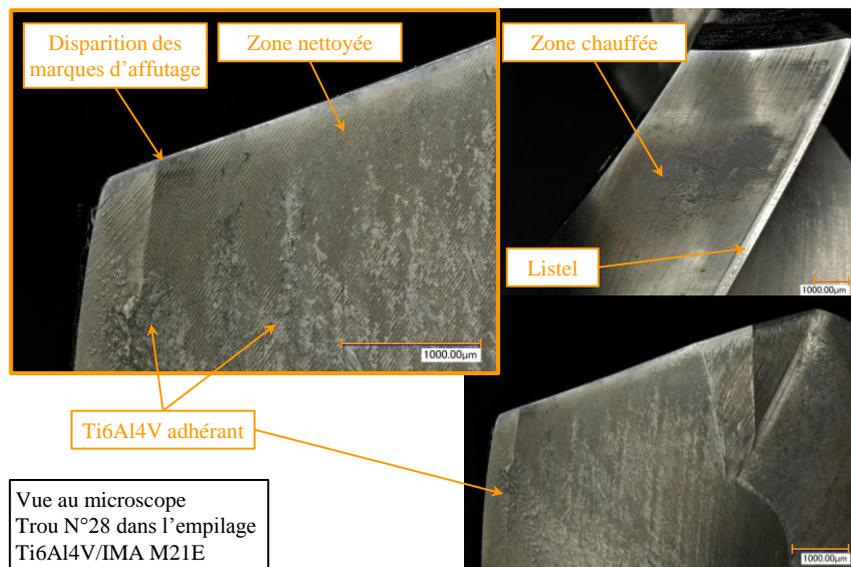


Figure 128 : Vue de l'outil après 28 perçages dans l'empilage Ti6Al4V/IMA M21E

Le fait d'effectuer une vue tous les deux perçages permet un suivi de l'usure en dépouille. Comme dans le chapitre précédent, deux zones sont distinguées pour l'usure et seule celle correspondant à la disparition des marques d'affûtage est retenue pour la suite. Les rayons de mesure sont 4.5 mm et 5.5 mm afin de pouvoir assurer des comparaisons avec les autres configurations et outils. Seules les mesures à 4.5 mm de rayon sont présentées. Néanmoins,

les tendances indiquées par la suite se vérifient pour les mesures aux deux rayons. La Figure 117 présente les zones retenues ainsi que les mesures effectuées.

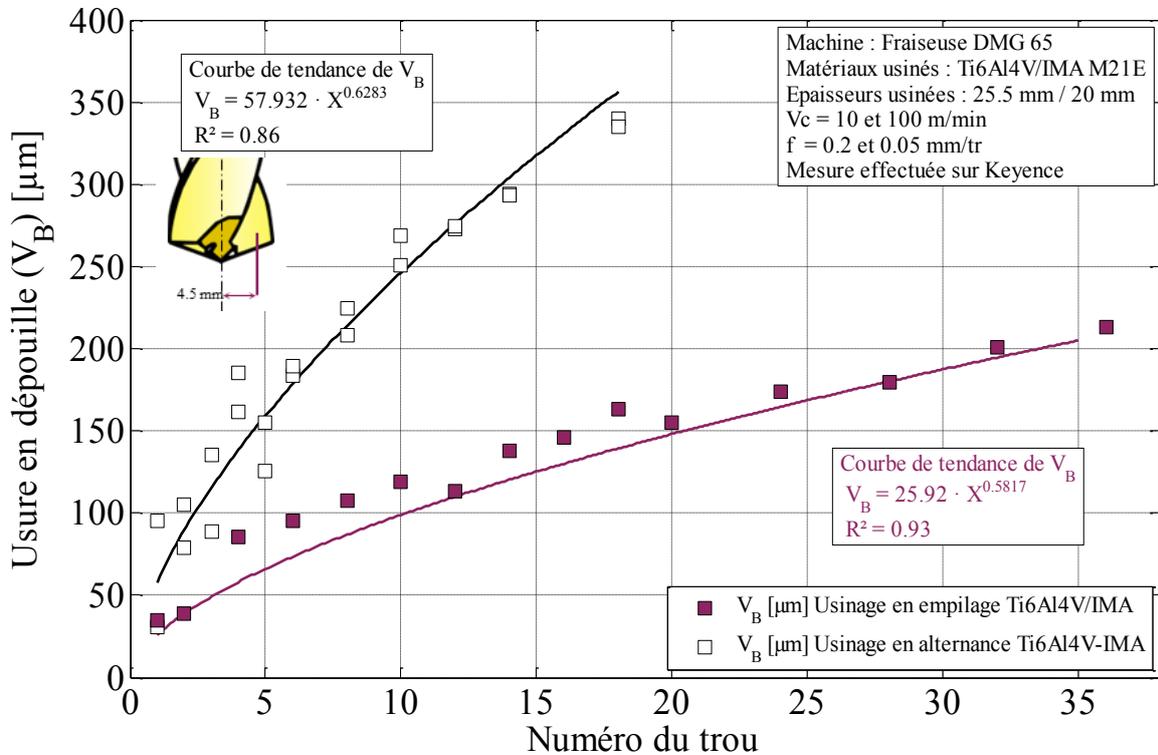


Figure 129 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de trous réalisés, comparaison entre le perçage en alternance et en empilage

Comme pour les efforts, l'usure en dépouille de l'outil est moins marquée que lors du perçage d'alternance de matériaux. Cela peut être mis en parallèle avec les augmentations des efforts de coupe, moins marquées avec cet outil lors du perçage d'empilage que lors de l'alternance. Lors de l'analyse au microscope des trous, il a été relevé que le lot de composite se décomposait en deux sous lots avec des agencements de plis différents. Le premier a été employé dans les chapitres précédents, alors que le second est employé dans les configurations en empilage. Malgré ces variations d'enchaînement, la référence indiquée par le fournisseur est identique pour les deux nuances de composite, par conséquent la nature des fibres et le nombre de plis sont identiques. L'alternance des matériaux n'ayant pas de raisons d'user davantage le foret que l'empilage, il semblerait que l'agencement des plis impacte cette usure.

La géométrie de l'âme du foret conditionne grandement l'effort de poussée, mais la capacité à couper de l'arête (notamment son acuité, l'usure en dépouille ...) intervient également. La

Figure 130 représente les efforts de poussée Fz (présentés dans la partie précédente) tracés en fonction de l'usure relevée (celle correspondant à la zone 1 à 4.5 mm de rayon, Figure 117). Il convient de noter que la courbe de tendance affine assure un coefficient de corrélation de plus de 0.96, à la fois pour le composite à fibre de carbone, et pour l'alliage de titane. Par conséquent, ces résultats tendent à montrer que l'effort de poussée pour un foret donné est directement lié à l'usure en dépouille. Le fait que les coefficients soient différents semble indiquer que les valeurs retenues sont fortement liées à la géométrie de l'outil.

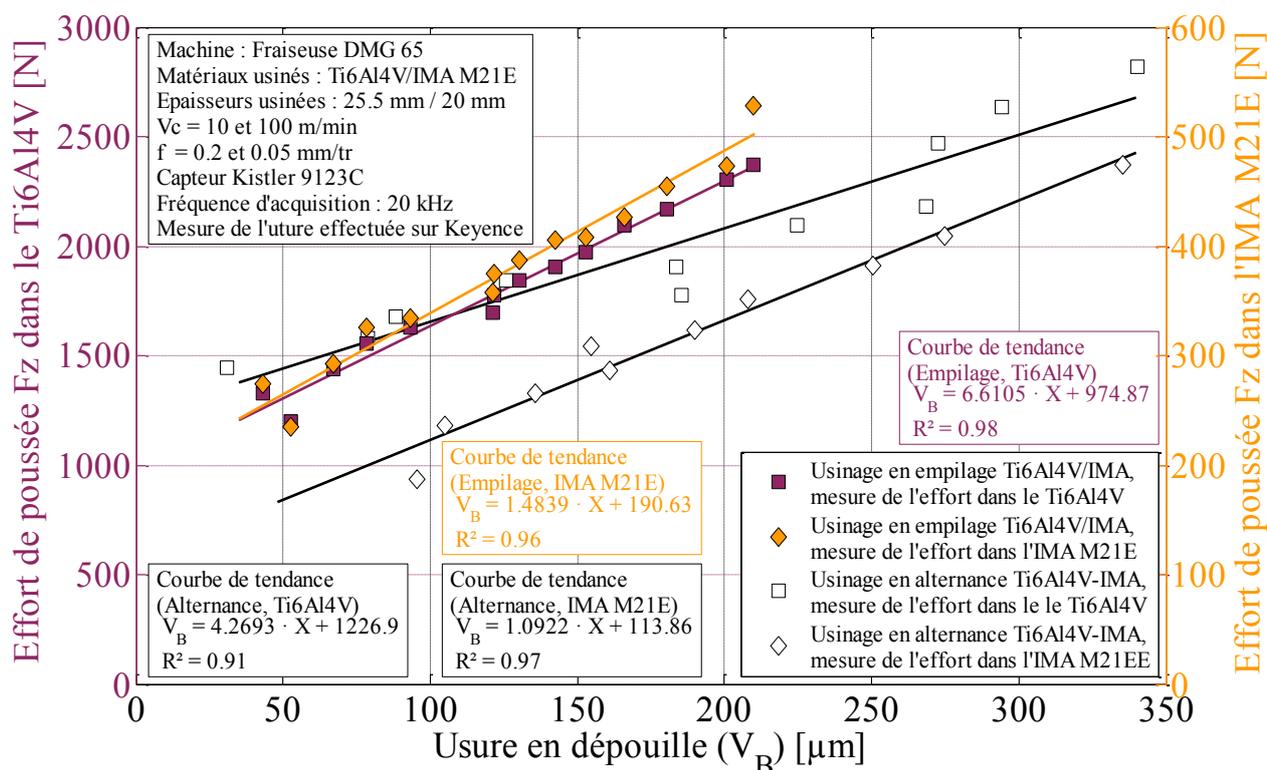


Figure 130 : Lien entre l'usure et l'effort de poussée en empilage

Afin de compléter l'étude de l'usure en dépouille, des profils de l'arête ont été mesurés à l'aide d'un profilomètre décrit dans le Chapitre 4. Les profils ont ensuite été recalés en considérant les parties de l'outil n'usinant pas, les droites formées par les faces de dépouille et les faces de coupe se croisant au point de coordonnées (0,0). Les mesures effectuées en trois rayons et sur chacune des deux arêtes ont permis de visualiser les phénomènes d'usure, que ce soit la création d'un plat en dépouille ou l'augmentation du rayon d'arête. La Figure 131 reprend les mesures effectuées lors de ces essais pour un côté de l'outil.

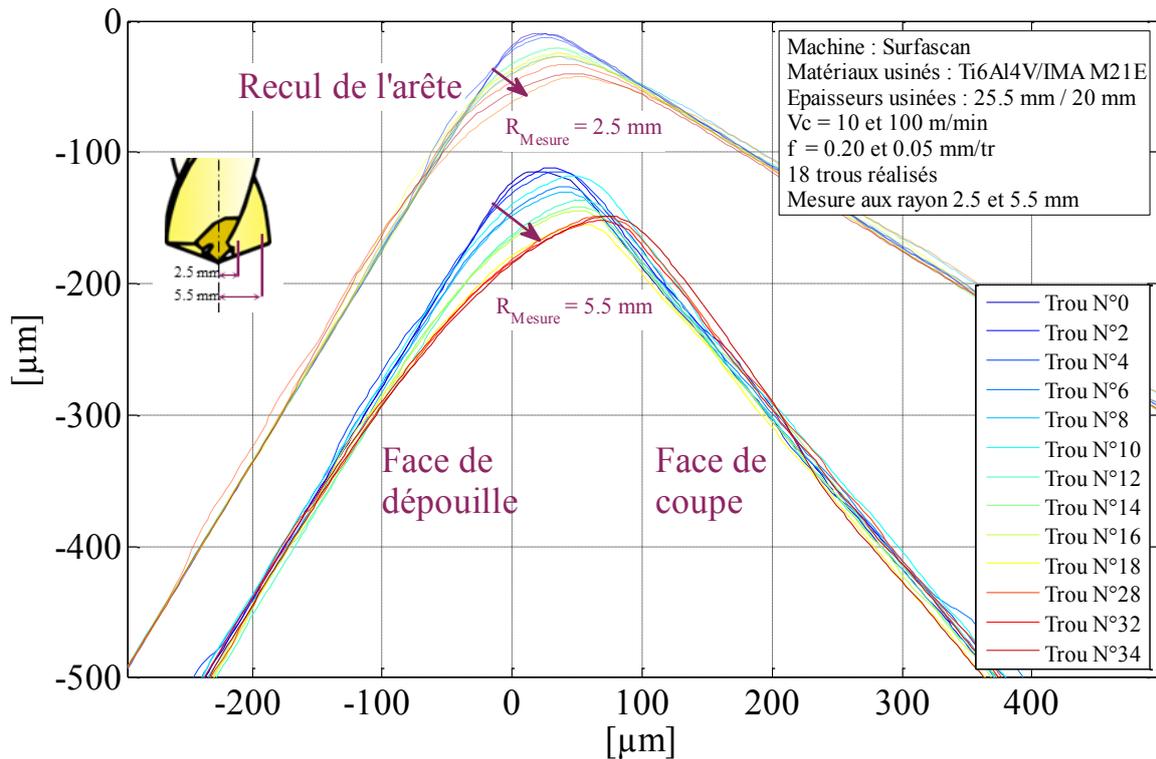


Figure 131 : Evolution du profil de l'arête à deux rayons du foret en fonction du nombre de perçages réalisés

La Figure 131 retrace les profils d'arête mesurés entre les perçages, pour des rayons de 2.5 mm et 5.5 mm. Pour l'ensemble de ces courbes de profils, l'angle de dépouille de l'outil reste le même, mais l'angle de coupe augmente avec le rayon. Cette variation de la morphologie, couplée avec l'évolution des conditions de coupe explique que les efforts ne soient pas constants le long de l'arête.

Le recul de l'arête maximal est de près de 50 µm pour les 34 trous réalisés à un rayon de 5.5 mm. De plus, l'acuité de l'arête diminue fortement avec le nombre de perçage. Ces deux facteurs cumulés tendent à expliquer l'augmentation du couple de perçage. L'arête étant moins vive, les efforts de coupe locaux sont plus importants, ce qui engendre une augmentation du couple de broche lors de l'usinage. L'augmentation de l'effort de poussée peut également trouver sa source dans la modification de la géométrie de l'arête. Un plat se forme sur la face de dépouille, ce qui a pour effet d'augmenter la surface du foret en contact avec la matière à usiner. Ce talonnage lors de l'usinage a pour effet d'augmenter l'effort de pénétration de l'outil lors du perçage. Ces deux phénomènes d'usure interviennent presque uniquement lors de l'usinage du composite.

4 - ETUDE DE LA QUALITE DES TROUS

L'étude de la qualité des trous a été menée à l'aide d'un Talysond (Chapitre 4). L'épaisseur percée de Ti6Al4V a été mesurée par 24 sections et celle de composite à fibres de carbone a été mesurée à l'aide de 19 sections. Chaque section est représentée par un cercle qui est composé de 3600 points (un point tous les 0.1°). L'ensemble de ces points a permis de reconstituer la surface en trois dimensions et de calculer les défauts associés.

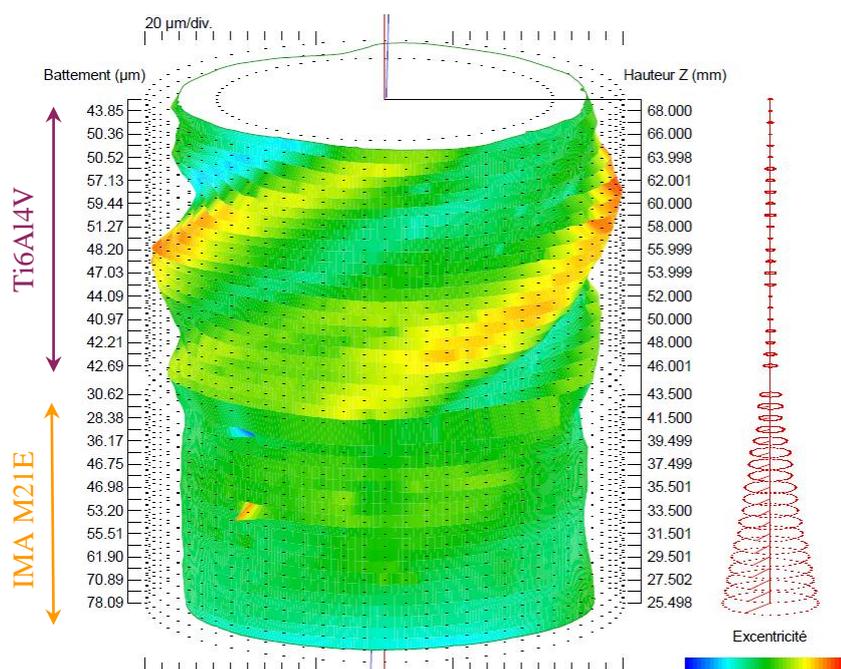


Figure 132 : Représentation de la surface percée lors du premier trou en empilage de Ti6Al4V/CFRP

L'étude du perçage du Ti6Al4V (Chapitre 8) a mis en évidence que la surface formée présente une forme trilobée en hélice le long du trou. Ce matériau étant le premier percé, il n'est pas surprenant de retrouver ce défaut lors de l'étude de la surface, dans la couche supérieure de l'empilage, comme le présente la Figure 132. La seconde partie de l'empilage, ne présente pas ce défaut de trilobe, mais les deux axes des deux parties du trou forment un angle, comme si le foret avait dévié en entrant dans l'IMA M21E. Les cercles sur la droite de la figure représentent les positions des centres des différentes sections (en considérant le cercle des moindres carrés pour chacune des sections) par rapport à l'axe du trou. Le rayon tracé indique sa position angulaire. Il est donc possible de relever ces défauts angulaires entre les deux sections du perçage. Cet angle formé par les deux parties de l'alésage est contenu entre 0.02° et 0.2°, ce qui pour une hauteur de 20 mm percée génèrera une excentration de la section inférieure comprise entre 7 µm et 70 µm.

La première caractéristique souhaitée pour un perçage est le diamètre du trou réalisé. Si aucune évolution en fonction du nombre de perçage n'est remarqué, cela est lié à de multiples facteurs, incluant notamment le défaut angulaire présent entre les deux parties du trou, mais également la disposition du trilobe (plus ou moins marqué suivant les perçages). Ainsi les variations de diamètres mesurés d'un trou au suivant peuvent aller jusqu'à 7 μm de différence avec le suivant (en plus ou en moins). La tendance semble néanmoins indiquer une réduction du diamètre du trou moyen, ce qui est en accord avec les mesures réalisées lors de l'usinage de CFRP seul, qui semblait indiquer une abrasion des becs et des listels générant ainsi une réduction du diamètre obtenu.

Les diamètres mesurés dans les deux matériaux, indiquent que le trou dans la partie Ti6Al4V a un diamètre supérieur à celui mesuré dans le CFRP, d'environ 7 μm pour un outil neuf. Cette valeur augmente progressivement jusqu'à approcher 20 μm après les 34 perçages réalisés. Cette tendance identifiée dans la configuration en alternance (Figure 121) se confirme pour cette configuration de perçage en empilage.

Suite à cette étude des diamètres et des défauts de coaxialité, la distance de pic à vallée est calculée. Si dans le Ti6Al4V, la valeur est relativement constante et se situe entre 60 et 80 μm , les mesures dans l'IMA M21E présente une évolution bien plus marquée, comme la Figure 133 le met en évidence. Cette évolution a également été notée lors de l'usinage de l'alternance de matériaux (Figure 122) et est indiquée sur le graphique. Les évolutions et les ordres de grandeur de ce défaut sont similaires entre ces deux configurations, qui semble être une image de l'arrachement des fibres, malgré le fait que le palpeur employé ait un rayon important (2 mm) par rapport aux défauts. L'emploi de palpeurs servant à mesurer la rugosité aurait permis de mettre en évidence de manière plus importante ce défaut. Ces évolutions tendent à confirmer que l'alternance de matériaux est un modèle correct pour prendre en compte l'usure et la qualité de la surface générée lors du perçage d'empilage avec changement de conditions de coupe à proximité de l'interface.

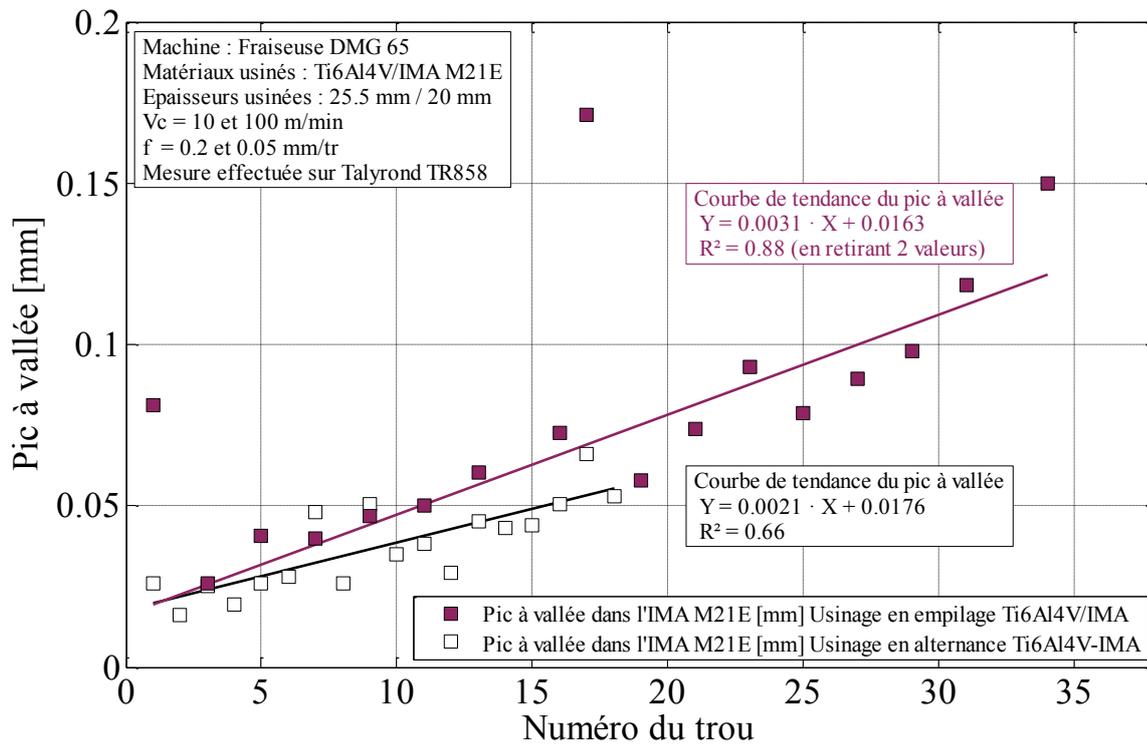


Figure 133 : Evolution du pic à vallée du cylindre dans l'IMA M21E

5 - CONCLUSION

Le perçage de l'empilage Ti6Al4V/CFRP avec un changement de conditions de coupe en cours d'usinage représente une complexité plus importante que le perçage des deux couches séparées. La rupture de l'outil, imposant un changement de conditions opératoires uniquement lorsque les listels de l'outil sont engagés dans l'IMA M21E en est la preuve. Néanmoins, pour un certain nombre de points comme l'usure de l'outil ou encore les défauts présents dans le trou, le perçage de l'alternance constitue une bonne première approche.

Chapitre 12 - ETUDE DU PERÇAGE DE L'EMPILAGE CFRP/Ti6Al4V

L'objectif de l'étude est l'amélioration de la compréhension des phénomènes survenant lors de l'usinage de l'empilage Ti6Al4V/CFRP (dans un sens et dans l'autre). Après avoir étudié les matériaux séparément, l'alternance des matériaux puis l'empilage dans un sens, il convient d'étudier l'empilage dans le second sens, ce qui sera présenté ici.

1 - DEFINITION DES ESSAIS

Les conditions de coupe retenues pour ces opérations sont identiques à celles retenues précédemment :

| Matériau usiné | Ti6Al4V | IMA M21E |
|-----------------------------|---------------|---------------|
| Vc (m/min) | 10 | 100 |
| f (mm/tr) | 0.2 | 0.05 |
| Lubrification | Usinage à sec | Usinage à sec |
| Epaisseur de la plaque (mm) | 25.5 | 20 |

Tableau 21 : Tableau des conditions de coupe retenues pour l'usinage empilage IMA M21E/Ti6Al4V

D'une manière similaire à ce qui a été présenté dans la partie précédente, des essais préliminaires ont permis de déterminer l'altitude à laquelle il est préférable de changer de conditions de coupe. La Figure 134 représente les conditions de coupe en fonction de la position de la pointe du foret suivant l'axe Z. Les changements de conditions de coupe s'effectuent lorsque celle-ci arrive au niveau de l'interface.

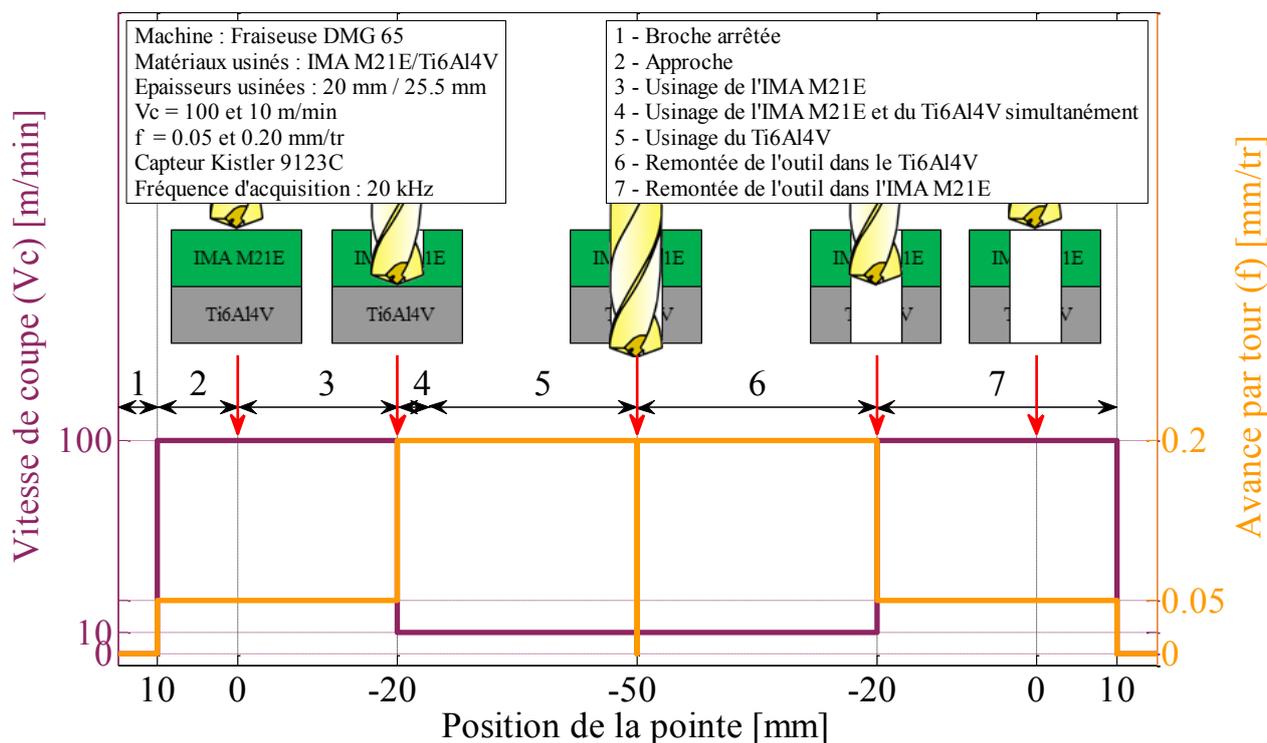


Figure 134 : Evolution des conditions de coupe en fonction de la position de la pointe

Contrairement à l'empilage dans le sens Ti6Al4V/CFRP, il n'y a pas ici de problématique de tenue de l'outil. En effet, lorsque le foret est en prise dans le Ti6Al4V, les conditions de coupe sont adaptées à ce matériau (le changement de condition ayant lieu lorsque la pointe est en contact avec l'alliage de titane). Et lorsque l'outil est en prise avec les deux matériaux, les conditions de coupes, adaptées à l'usinage de Ti6Al4V assurent un niveau d'effort plus faible dans l'IMA M21E. Lors des essais préliminaires en empilage ou des essais de perçage, aucun outil n'a cassé lors des changements de conditions opératoires.

Cette bonne tenue mécanique de l'outil permet l'emploi de forets instrumentés à l'aide de thermocouples. Le système de transmission des informations de température installé est celui utilisant des balais, détaillé dans le Chapitre 6. Le reste de l'instrumentation est similaire à ce qui a été employé précédemment (mesure d'efforts à l'aide du capteur Kistler 9123C, mesure de la position et des conditions de coupe effectuées grâce à la CN, prises de vue du foret et mesure de l'arête au profilomètre tous les deux trous).

La problématique d'évacuation des copeaux est toujours présente. La morphologie froissée du copeau de Ti6Al4V, présentée sur la Figure 135, indique que l'effort nécessaire pour sa sortie est important. Cette contrainte supplémentaire sur l'outil génère des efforts de coupe supplémentaires, une usure accentuée du foret, une détérioration de la surface du trou dans le composite et une température d'usinage plus élevée. SenthilKumar [SenthilKumar_2013] a relevé des morphologies de copeaux similaires dans le perçage en empilage.



Figure 135 : Morphologie du copeau de Ti6Al4V lors du perçage de l'empilage IMA M21E/Ti6Al4V

Comme pour les autres configurations de perçage, la qualification des efforts sera présentée dans un premier temps, suivi de l'analyse de la température dans l'outil, puis de l'usure du foret pour finir par la qualification de la qualité des trous.

2 - ETUDE DU PERÇAGE DANS LES CONDITIONS DE L'EMPILAGE

L'outil retenu pour cette opération en empilage est issu du même lot que ceux utilisés précédemment exception faite de l'outil employé en empilage dans le sens Ti6Al4V/CFRP. Par conséquent, les évolutions des efforts lors d'un perçage seront analysées, puis les efforts de coupe en fonction du nombre de trous seront étudiés et comparés aux autres configurations étudiées.

2 - 1 - EVOLUTIONS DES EFFORTS AU COURS D'UN PERÇAGE EN CONFIGURATION D'EMPILAGE

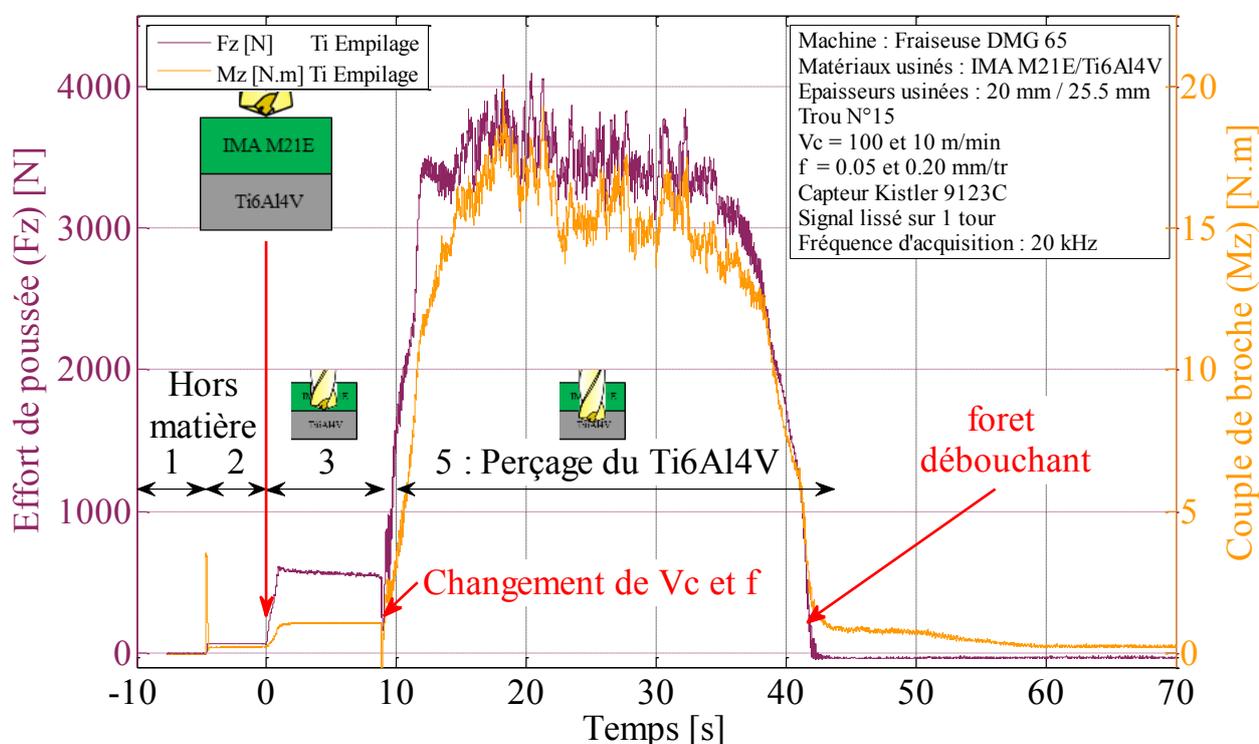


Figure 136 : Evolution des efforts au cours du perçage de l'empilage IMA M21E/Ti6Al4V

La Figure 136 représente les évolutions des efforts au cours du temps lors du perçage n°15. Les données ne sont pas compensées, mais un lissage en moyennant sur un tour est effectué afin de mieux distinguer les différentes zones du signal.

La mise en rotation du capteur génère un décalage du zéro comme cela a pu être relevé dans le Chapitre 5. Ces variations seront compensées par la suite pour les évolutions et la comparaison des efforts avec les autres configurations.

Lors du perçage du composite, la morphologie de la courbe des efforts est similaire à celle déjà relevée lors du perçage d'alternance ou de l'IMA M21E seul. Le couple et l'effort de poussée sont constants sur toute la plage de perçage.

Dans la zone 4 (zone non indiquée sur la figure, entre les zones 3 et 5), le foret est toujours dans le composite et les conditions de coupe passent à celles employées dans le Ti6Al4V en marquant un arrêt de l'avance (mais pas de la rotation de broche). Les efforts chutent alors brutalement (F_z tombe à 200 N) pour revenir à une valeur légèrement plus élevée que lors des conditions de coupe précédentes (environ 750 N). Ensuite, l'outil passe de l'IMA M21E à l'alliage de titane, ce qui génère une hausse des efforts lors de l'insertion de la pointe, puis une stabilisation des efforts.

Lorsque l'outil est entièrement dans le Ti6Al4V, les efforts peuvent présenter plusieurs morphologies : ils peuvent être stables, croissants ou encore décroissants. Ces variations sont probablement liées au défaut de coaxialité des deux sections du trou comme cela a pu être relevé dans l'empilage Ti6Al4V/IMA M21E (Chapitre 11).

La partie décroissante des efforts correspond au moment où le foret débouche. Cette partie de la courbe est similaire à ce qui a pu être relevé lors de l'usinage du Ti6Al4V seul ou lors du perçage d'alternance de matériaux.

Afin de considérer l'évolution avec l'usure des efforts, une moyenne de la valeur des efforts lorsque l'arête principale du foret est dans chaque matériau est calculée.

2 - 2 - EVOLUTION DES EFFORTS EN EMPILAGE

Suite à l'étude de l'évolution des efforts au cours d'un perçage de l'empilage, l'évolution des efforts au cours de l'ensemble des 34 trous prend son importance pour mieux comprendre les phénomènes intervenant lors de l'usinage.

La Figure 137 représente l'évolution des efforts lors de l'usinage de l'IMA M21E. Lors des inspections ayant lieu entre chaque perçage, il a été noté que le premier bec de l'outil a cassé dès la fin du premier trou. Le second bec a pour sa part cassé en fin de 4^{ème} perçage, ce qui explique l'évolution importante de l'effort de poussée entre les trous 4 et 5, que ce soit pour les efforts dans l'IMA M21E ou le Ti6Al4V (voir la Figure 138). L'augmentation de l'effort de poussée dans le composite a ainsi été de 80 N, ce qui représente une hausse de plus de 30 % par rapport à l'outil neuf. Dans le Ti6Al4V cette augmentation est encore plus marquée avec près de 45 % de hausse (soit plus de 750 N)

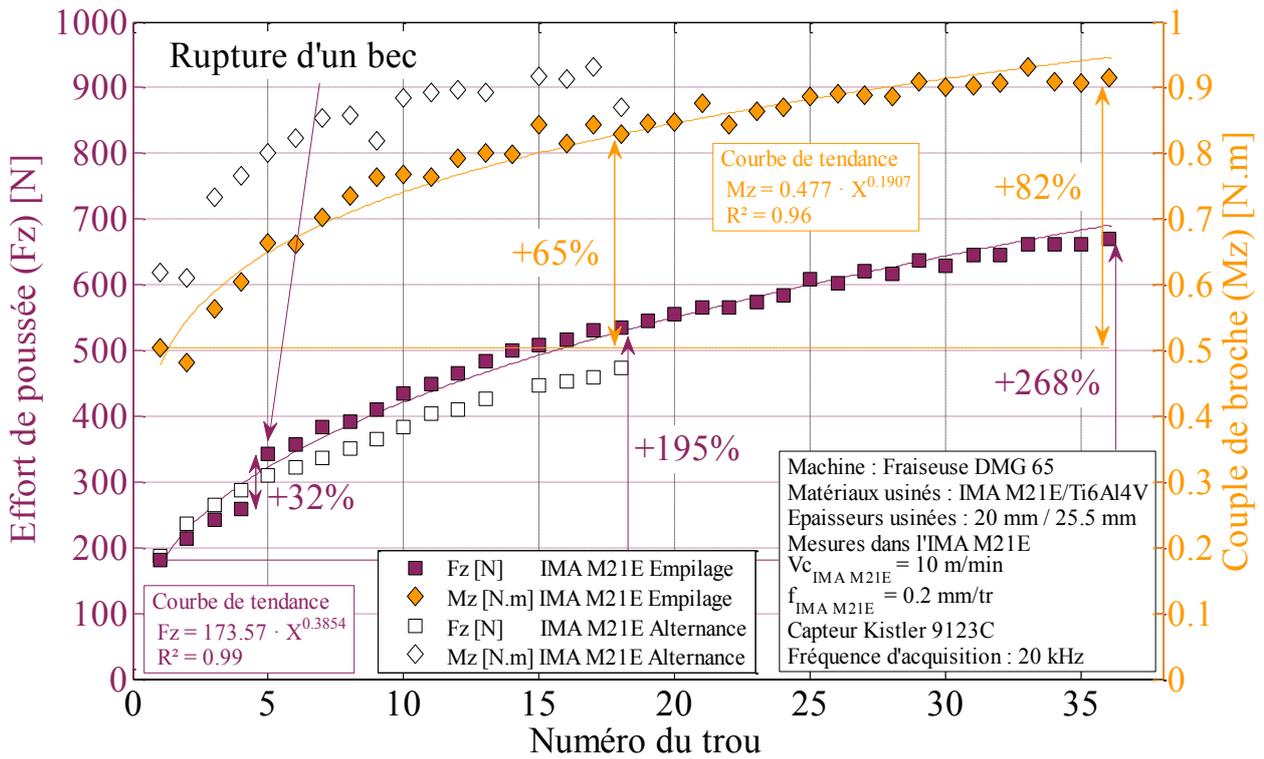


Figure 137 : Evolution des efforts dans le CFRP lors du perçage de l'empilage IMA M21E/Ti6Al4V

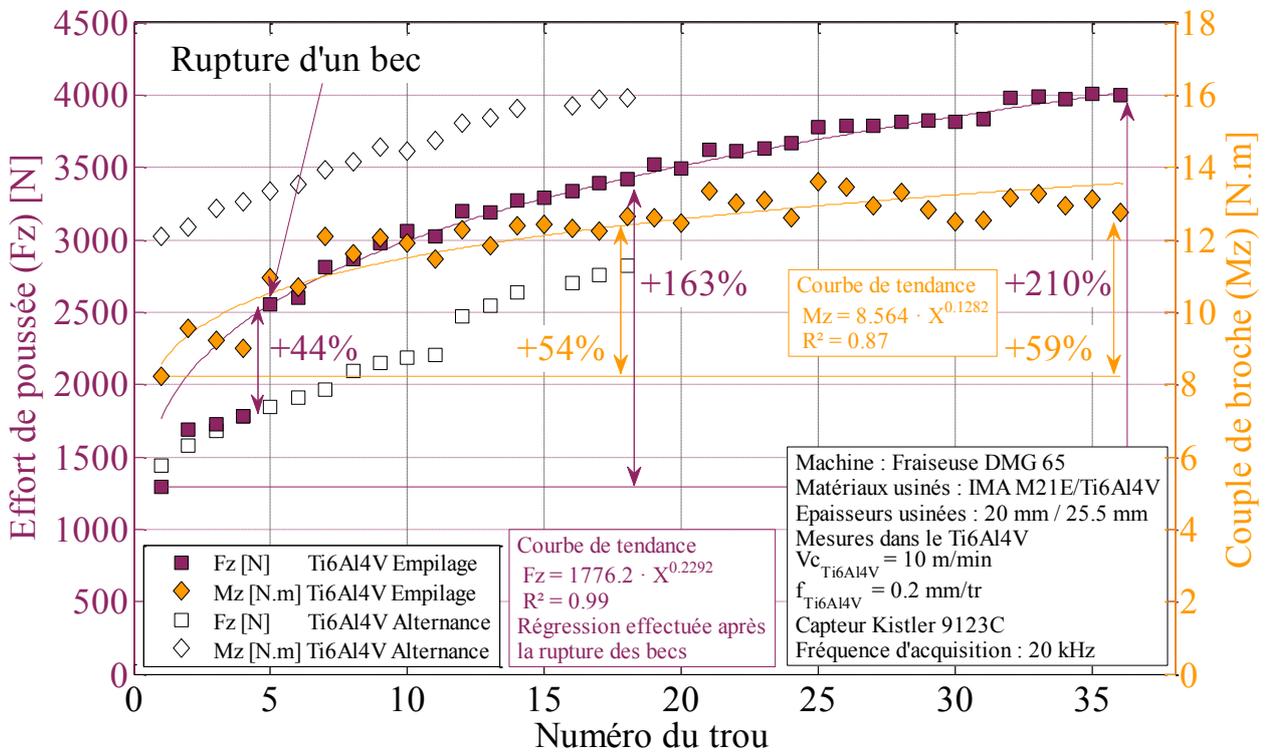


Figure 138 : Evolution des efforts dans le Ti6Al4V lors du perçage de l'empilage IMA M21E/Ti6Al4V

Les évolutions des efforts dans l'IMA M21E avec le nombre de perçages réalisés est relativement proche entre la configuration en empilage et celle en alternance de matériaux. Seule la rupture des becs semble avoir d'avantage affectée les efforts lors du perçage en empilage alors que la rupture des becs a été remarquée pour les deux configurations.

Concernant les évolutions dans le Ti6Al4V, les mêmes remarques sont possibles. Sans le décalage produit par la rupture des becs au cours du 4^{ème} perçage, les courbes d'efforts de poussée seraient très proches.

Cette remarque tend à confirmer que l'alternance des matériaux peut constituer une première approximation valable pour modéliser les contraintes subies par l'outil lors de l'usinage de l'empilage dans le sens CFRP/Ti6Al4V. Si les couples d'usinage sont plus élevés lors de l'alternance, le fait que ce soit le cas dès le premier perçage, indique que cet écart est probablement due à une différence d'affûtage des deux outils.

Les courbe des efforts tendent à montrer que la phase de rodage de l'arête s'effectue sur les 10 à 15 premiers trous, après quoi l'évolution des efforts est linéaire, voire presque nulle pour le couple mesuré dans le Ti6Al4V.

3 - ETUDE DE LA TEMPERATURE DANS L'OUTIL

L'instrumentation à l'aide de thermocouples a permis de mesurer la température de l'outil au cours du perçage. Les six thermocouples sont placés 2 mm derrière l'arête, comme cela a été décrit dans le Chapitre 6 sur la Figure 60.

3 - 1 - ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU COURS D'UN PERÇAGE

La Figure 139 représente un relevé des températures mesurées lors du perçage, avec et sans compensation de la soudure froide. La compensation de la soudure froide est effectuée grâce à la mesure des températures des manchons comme indiqué dans le Chapitre 6. La courbe est décomposée en zones qui sont ensuite détaillées.

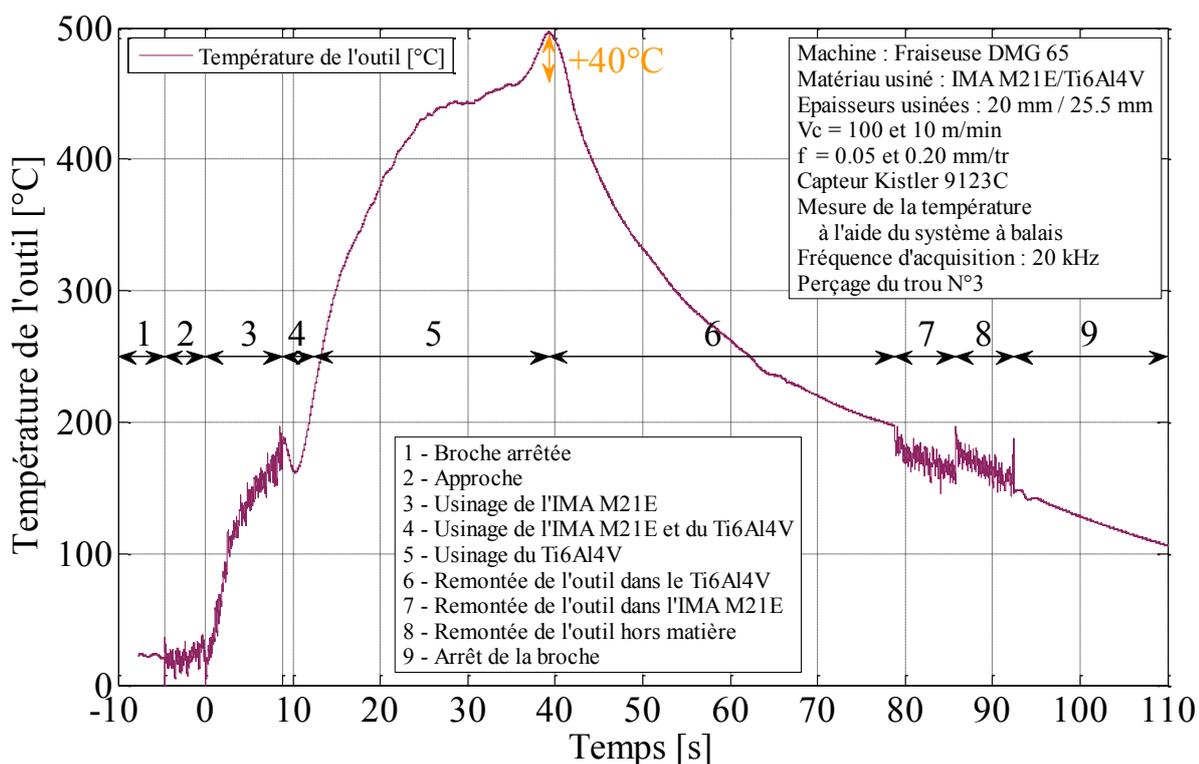


Figure 139 : Evolution de la température de l'outil au cours du perçage de l'empilage IMA M21E/Ti6Al4V

Afin de simplifier la lecture, la Figure 139 présente un découpage en 9 zones, les 7 premières sont également définies dans la Figure 134.

Dans la première zone, la température relevée de 20°C correspond à la mesure lorsque l'outil n'est pas en mouvement. La température de soudure froide est donc celle correspondant à la température ambiante. La seconde et la troisième zone sont plus bruitées. Elles correspondent au signal obtenu lorsque les conditions de coupe sont celles retenues dans l'IMA M21E, à savoir une vitesse de coupe de 100 m/min.

Cette troisième zone représente la partie perçage de l'IMA M21E, il est donc normal que la température évolue en augmentant de manière relativement importante. Ainsi lors du 3^{ème} perçage, la température augmente jusqu'à atteindre une valeur de 156°C dans l'outil pour une profondeur de perçage de 15 mm. Cette profondeur de perçage servira de référence pour étudier l'évolution de la température de l'outil dans le composite avec le nombre de perçages.

Après la troisième zone, les conditions de coupe deviennent celles associées au Ti6Al4V, par conséquent il y a une forte baisse de la vitesse de coupe alors que le foret est toujours engagé dans le composite, ce qui constitue la zone 4. Ce changement de vitesse a pour effet de faire baisser la température au sein de l'outil lorsque celui-ci est toujours en contact avec l'IMA M21E. La seconde explication qui s'ajoute à celle de la baisse des conditions de coupes, est l'arrêt pendant un court temps de l'avance de l'outil (de l'ordre de 0.12 secondes), ce qui génère un bref arrêt de la coupe et permet donc un refroidissement de l'outil. Ce phénomène de baisse lors du changement de conditions de coupe a également été relevé lors de l'analyse des efforts.

La cinquième zone correspond à l'usinage du Ti6Al4V. Dans cette partie, la température augmente fortement en suivant une loi exponentielle. La température est ainsi de 452°C à une profondeur de l'outil de 41 mm. Cette profondeur sera ensuite utilisée comme référence pour la mesure de l'évolution avec l'usure de la température au sein de l'outil lors du perçage du Ti6Al4V.

A la fin de cette zone 5, il est intéressant de noter qu'il y a une augmentation de la température correspondant à la sortie de l'outil de la matière. Lors de l'analyse des perçages, il a été remarqué qu'il y avait systématiquement une formation de capsules [Ko_2003]. Lors de cette formation, l'outil vient frotter sur cette matière en la repoussant sans la couper, ce qui génère un frottement important sur la face de dépouille du foret, augmentant la température. Cette élévation de 40°C reste stable pour l'ensemble des essais.

Les zones suivantes correspondent au refroidissement de l'outil lorsqu'il remonte dans le trou, puis hors matière.

3 - 2 - ETUDE DE LA TEMPERATURE AVEC L'USURE

La mesure de la température en fonction de la profondeur pour chaque trou permet de retracer l'évolution de la température à une profondeur donnée en fonction de l'usure. Ainsi, la Figure 140 met en évidence l'évolution de la température dans les deux matériaux, comme cela a été indiqué dans la section précédente. Afin de minimiser les erreurs de mesures, les six valeurs des thermocouples ont été moyennées et les points aberrants ont été retirés.

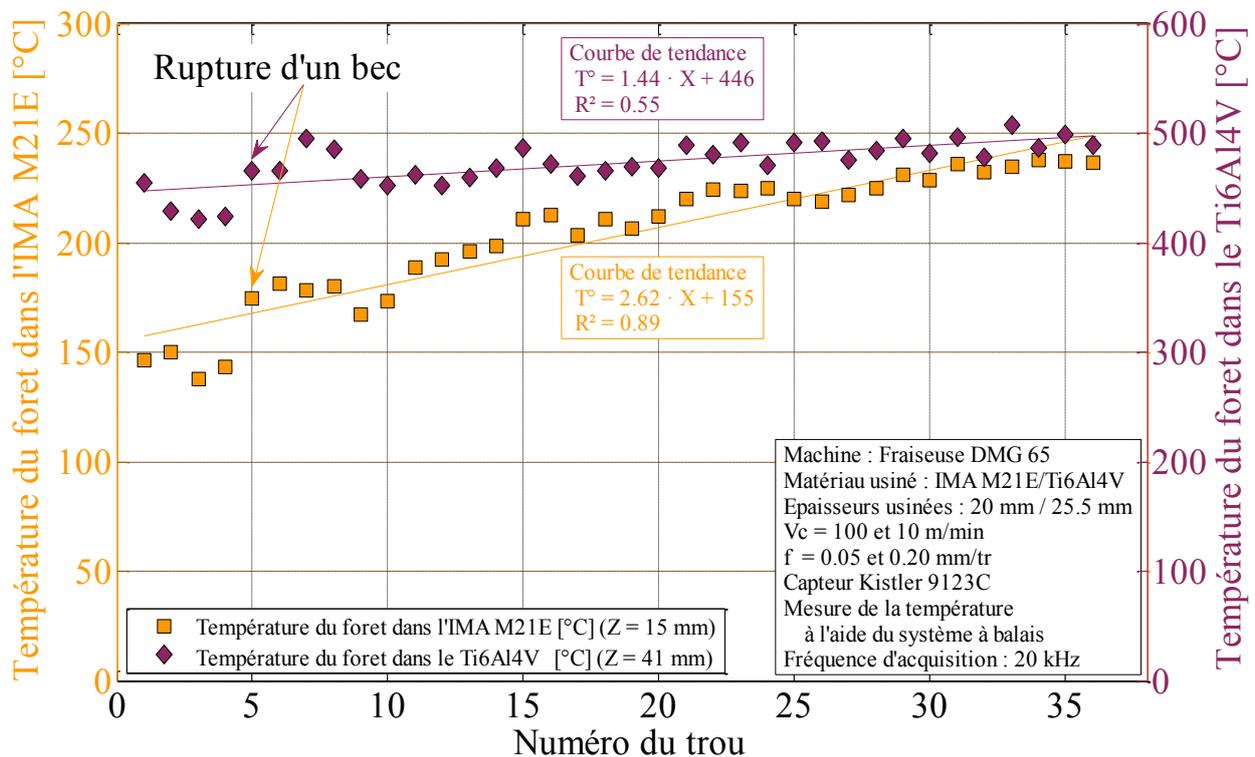


Figure 140 : Evolution de la température dans l'outil lors de l'usinage de l'empilage

L'évolution de la température mesurée augmente avec le nombre de perçages réalisés, et ce de manière quasi-linéaire. Ainsi, la température passe d'environ 150°C pour le premier perçage dans le composite à presque 250°C pour le dernier perçage. L'augmentation de la température dans le Ti6Al4V est plus réduite, d'environ 50°C, passant de 450°C à 500°C.

Sur les deux courbes, il est possible de noter une augmentation importante de la température entre les essais 4 et 5 ($\approx 40^{\circ}\text{C}$). Cette augmentation a également été remarquée sur les courbes d'efforts et correspond à la rupture d'un bec. Ce type de mesure de température peut donc permettre, comme pour l'analyse des niveaux d'efforts, d'effectuer de la surveillance afin de repérer des bris outils.

4 - ETUDE DE L'USURE DE L'OUTIL

Pour l'ensemble des essais réalisés précédemment, des prises de vues de l'outil sous tous les angles ont été réalisées à intervalles réguliers. Ces clichés ont permis d'effectuer des mesures d'usure en dépouille comme dans les chapitres précédents.

Afin de pouvoir comparer les résultats entre eux, la Figure 141 représentant les mesures des usures en dépouille dans les différentes configurations de perçage (alternance des matériaux, et empilage dans les deux sens). Si les efforts sont proches de ceux mesurés lors de l'usinage de l'alternance, la valeur de l'usure en dépouille se rapproche d'avantage de celle mesurée en empilage dans le second sens. En effet, les deux évolutions sont très proches. Ces similitudes pourraient induire que les phénomènes d'usure en empilage sont relativement proches, que l'empilage soit considéré dans un sens ou dans l'autre.

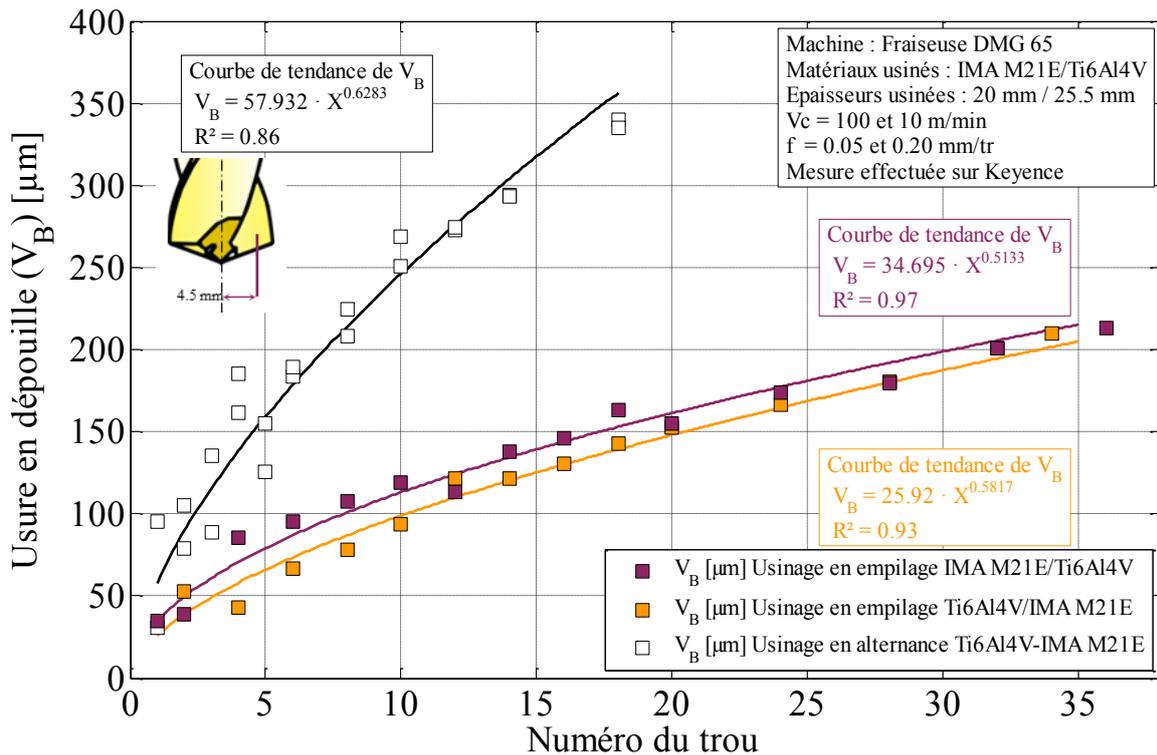


Figure 141 : Evolution des usures en dépouille dans les diverses configurations de perçage

Comme pour les configurations précédentes, il a été possible de créer une relation entre l'usure en dépouille et l'effort de poussée du foret. Cette corrélation est présentée sur la Figure 142.

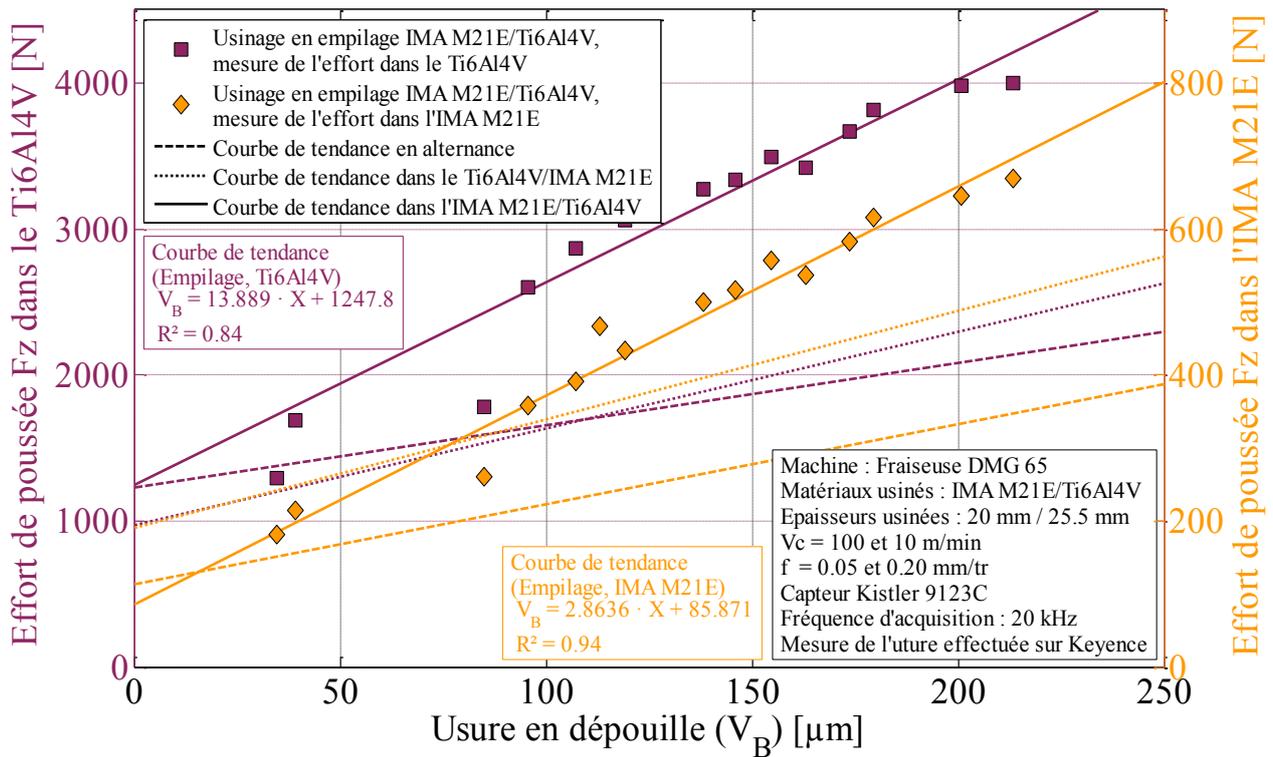


Figure 142 : Lien entre l'usure de l'outil et l'effort de poussée dans les deux matériaux percés

Si la répétabilité de cette relation permet de déterminer que les deux facteurs (valeur de l'usure en dépouille et effort de poussée) sont intimement liés, la grande variation des valeurs des coefficients de l'approximation linéaire d'une configuration à l'autre ne permet pas de faire de modèle prédictif. Le Tableau 22 représente les valeurs de ces coefficients dans les diverses configurations d'empilage. Une source de variation des coefficients peut être la profondeur du trou. Il a été remarqué que lors des perçages d'empilage, l'extraction des copeaux de la couche inférieure est difficile. Ce phénomène se répercute probablement sur les efforts de coupe.

| Matériau | Ti6Al4V | IMA M21E |
|------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Essai en alternance | $F_z = 4.3 \cdot V_b + 1227$ | $F_z = 0.86 \cdot V_b + 169$ |
| Essai Ti6Al4V/IMA M21E | $F_z = 6.6 \cdot V_b + 974$ | $F_z = 1.48 \cdot V_b + 265$ |
| Essai IMA M21E/Ti6Al4V | $F_z = 13.9 \cdot V_b + 1247$ | $F_z = 2.86 \cdot V_b + 86$ |

Tableau 22 : Tableau des relations entre l'usure en dépouille et l'effort de poussée dans les diverses configurations de perçage

Lors de l'usinage, le dernier matériau percé est le Ti6Al4V. Or, il a été noté précédemment que ce matériau a tendance à constituer une couche adhérente au niveau de l'arête de coupe. Ce phénomène est gommé lorsque le composite est usiné après l'alliage de titane, ce qui explique que les profils d'arêtes soient lisibles dans le Chapitre 11. Dans le cas présent, le profil d'arête n'évolue que très peu avec l'usure comme le présente la Figure 143. Il est néanmoins intéressant de noter que suite à la rupture des becs, les observations du foret montrent du Ti6Al4V qui se loge au niveau de la rupture, ce qui n'empêche pas l'abrasion dans l'IMA M21E de faire reculer l'arête. Après le 16^{ème} trou, un dépôt de titane peut être remarqué sur la face de dépouille.

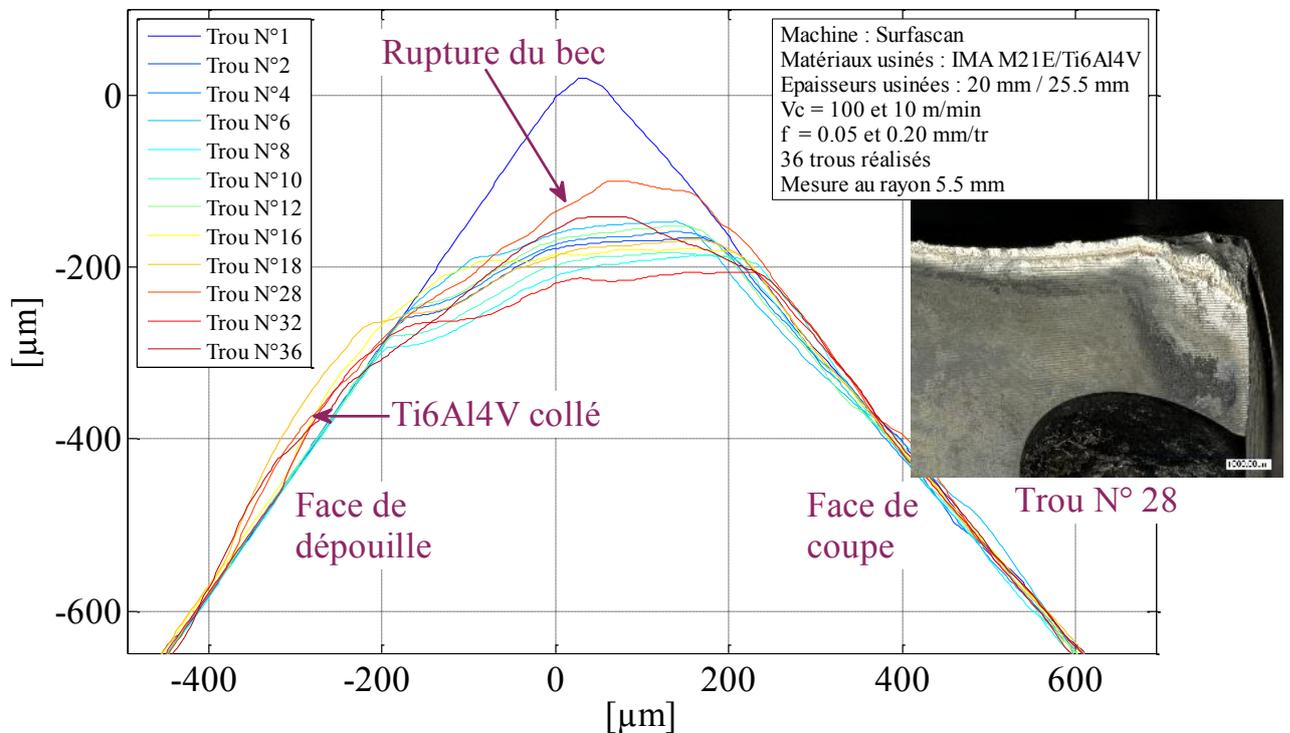


Figure 143 : Profil d'arête de l'outil au rayon 5.5 mm au cours du perçage de l'empilage IMA M21E/Ti6Al4V

5 - ETUDE DE LA QUALITE DES TROUS

Dans les chapitres précédents, le Talyrond TR585 a été utilisé pour qualifier la qualité des trous. Le même intervalle (1 mm) entre les sections est employé pour chacun des deux matériaux, ce qui permet de mesurer 24 sections pour le Ti6Al4V et 19 pour l'IMA M21E avec un ensemble 3600 points pour chaque section. Ces mesures ont permis de reconstituer l'ensemble de la surface en trois dimensions afin de calculer les défauts associés.

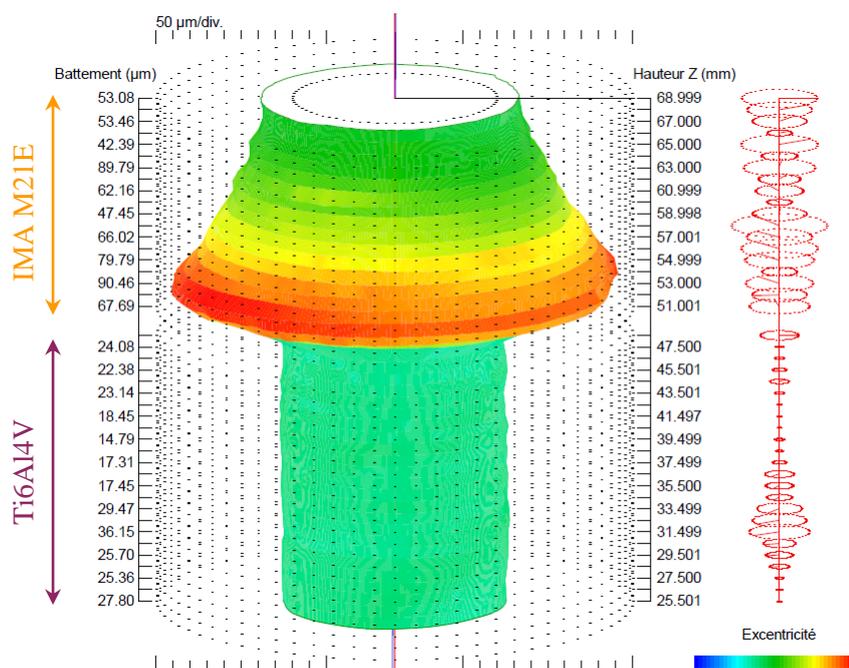


Figure 144 : Profil du trou dans l'empilage IMA M21E/Ti6Al4V trou N°33

La Figure 144 présente la morphologie d'un trou dans l'empilage IMA M21E/Ti6Al4V. La section inférieure correspond au Ti6Al4V et ne présente pas de forme en trilobe grâce à la présence de l'IMA M21E placé juste au-dessus. L'explication qui peut être avancée pour expliquer l'absence de trilobe est que l'outil est guidé par le composite, ainsi que les copeaux de Ti6Al4V qui sont comprimés contre la paroi du trou, ce qui explique leur morphologie froissée. Ce guidage empêche les oscillations radiales du foret qui sont l'origine des trilobes observés lors du perçage du Ti6Al4V seul.

La seconde remarque concernant cette figure concerne le défaut présent dans la couche supérieure de l'empilage, l'IMA M21E. Ce défaut, semblant au premier abord à un défaut de conicité, n'en est pas un en réalité. En effet, dans la partie inférieure du composite, le diamètre est du même ordre de grandeur que celui relevé dans le Ti6Al4V. L'écart de diamètre entre la

couche de Ti6Al4V et la partie la plus creusée dans l'IMA M21E oscille entre 0.17 mm et 0.35 mm. Le défaut constaté dans le composite se produit lors de l'usinage de l'alliage de titane. Les copeaux chauds et coupants remontent le long de la goujure avec difficulté, ce qui génère leur morphologie particulière. En se recourbant, ces copeaux frottent contre la paroi du trou et si le Ti6Al4V n'est pas impacté par ces frottements, il n'en est pas de même pour l'IMA M21E comme l'atteste la Figure 144.

6 - CONCLUSIONS

En conclusion, lors de l'usinage d'empilages dans le sens IMA M21E/Ti6Al4V, le point clef à résoudre est l'évacuation des copeaux. En effet, cette dernière génère une hausse très importante des efforts (avec plus de 500 N pour l'effort de poussée) et une dégradation importante de la surface dans le composite (ré-usinée par les copeaux de Ti6Al4V sur environ 0.1 mm de profondeur).

Afin de permettre une bonne évacuation des copeaux en trous profonds, plusieurs méthodes peuvent être envisagées. La première serait d'avoir recours à une interruption de la coupe, que ce soit en réalisant des cycles de déburrage ou en installant un dispositif de perçage vibratoire. L'aspect discontinu de la coupe permet à la fois l'extraction des copeaux, mais également de casser le cycle thermique et par conséquent, de limiter l'élévation de température de l'outil, qui pourrait brûler la matrice de composite. Une seconde méthode qui pourrait être employée pour faciliter l'évacuation des copeaux est la réalisation d'un avant-trou qui permettrait de diminuer la dimension du copeau, facilitant par la même son extraction. Néanmoins, cette technique peut engendrer une instabilité de la coupe comme cela a été remarqué dans le Chapitre 8. Les autres possibilités résideraient dans l'envoi de fluide via les canaux de lubrification, soit de l'air (soufflage) ou du fluide de coupe permettant l'extraction simplifiée des copeaux. Ces deux méthodes permettraient de réduire les problèmes liés à l'abrasion de la surface du composite par les copeaux, mais également les risques de brûlure de la résine du composite par les copeaux et l'outil. Les inconvénients résident dans le traitement du fluide de coupe contaminé par des fibres de carbone ou celui de l'atmosphère chargée en fibres de carbone dans le cas du soufflage.

**Partie 5 - CONCLUSIONS GENERALES
ET PERSPECTIVES**

L'étude du perçage de matériaux aéronautiques en empilage est un domaine de recherche en pleine expansion. La preuve en est, le nombre d'études sur le sujet augmente d'année en année depuis 10 ans. Les travaux se sont articulés autour de deux axes : le premier traite du développement de moyens spécifiques au perçage, et le second concerne des résultats adaptés au perçage d'empilage de Ti6Al4V et d'IMA M21E.

Afin d'améliorer la compréhension des phénomènes survenant en usinage, deux dispositifs principaux ont été développés. Le premier a porté sur la mesure en température du foret in-situ. Pour cela plusieurs systèmes ont été développés, permettant notamment d'acquérir cette information sur un outil tournant. Ces moyens de mesure permettent de générer des données d'entrées afin d'alimenter des simulations prenant en considération les aspects thermiques en perçage. De nouvelles recherches vont d'ailleurs dans ce sens avec Mr Lazoglu (Université d'Istanbul). Ces dispositifs peuvent également servir aux carburiers de base de comparaison pour certains leurs outils.

Une nouvelle version du moyen de mesure in-situ est en cours de développement, profitant des apprentissages réalisés à l'aide des dispositifs déjà réalisés. Il permettra des acquisitions plus rapides et précises des informations de température dans l'outil. De plus, il sera possible de coupler ces informations avec celles issues de la mesure de température dans la pièce pour mieux appréhender les phénomènes survenant lors du perçage.

Le second développement concerne la mise en œuvre et la validation de moyens pour de décomposer les efforts le long de l'arête du foret. Un soin particulier y a été accordé, permettant notamment le développement d'un programme interfacé. Ce software permettra non seulement d'alimenter des simulations numériques avec une multitude de configurations d'usinage, mais également de rendre plus aisé le développement de nouvelles géométries de forets. Cette capacité à multiplier les configurations provient du fait qu'il est désormais possible de remonter aux efforts locaux après un unique perçage pour des conditions opératoires données.

Les résultats de perçages permettent de mettre en évidence un certain nombre de relations et d'évolutions, que ce soit dans le Ti6Al4V ou l'IMA M21E. Un fort lien entre l'usure en dépouille et l'augmentation de l'effort de poussée a ainsi été mis en évidence. Cet effort est la source de nombreux défauts dans les pièces usinées, que ce soit en générant des bavures dans le Ti6Al4V, ou avec les risques de délaminages dans l'IMA M21E. Ce lien peut être un premier pas vers une modélisation de l'usure des outils dans le composite.

Les modes d'usure des forets ont conduit à envisager l'emploi de matériau d'outils plus durs. L'Annexe 10 reprend les premiers essais réalisés dans cette voie à l'aide d'outils en diamant polycristallin massif. Si la géométrie de coupe permettant l'usinage de Ti6Al4V à l'aide de tels outils n'a pas encore été finalisée, ce matériau d'outil a déjà fait ses preuves dans le perçage de composites, et dans le tournage des alliages de titane, ce qui semble donc très prometteur pour le perçage de l'empilage. L'avantage principal de tels outils réside, outre la très grande dureté du PCD, dans la grande liberté d'affûtage puisque, l'extrémité du foret étant entièrement en PCD (PolyCrystalline Diamond), il est possible de l'affûter à souhait.

La poursuite des travaux pourrait s'orienter vers la définition de la qualité des trous, principalement dans le composite où la notion d'état de surface reste à perfectionner. L'emploi du Talyrond TR585 muni d'un palpeur de rugosité peut permettre d'étudier la rugosité soit circonférentielle, soit suivant l'axe du trou. Ces analyses pourraient conduire à l'adoption de critères d'état de surface mesurés suivant une certaine direction, dépendante de l'agencement des plis du composite.

Lors de l'étude de l'état de surface circonférentiel, l'arrachement localisé des fibres aura été mis en évidence par un état de surface dégradé dans certaines zones de la paroi du trou. Ces remarques pourront conduire à mener une étude plus fondamentale, en rabotage, portant sur la coupe des composites. Le développement d'un dispositif de micro-rabotage instrumenté en efforts et inclut dans l'enceinte d'un microscope électronique à balayage (MEB) a d'ailleurs été très récemment finalisé au sein du LaBoMaP. Ce moyen permettra probablement de mieux comprendre les phénomènes survenant lors de la coupe en considérant des configurations particulières. L'incidence de l'orientation des fibres par rapport à l'arête sur les efforts de coupe, ou le profil de l'arête de l'outil, ainsi que leurs évolutions pourront ainsi être mises en évidence.

Partie 6 - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Abrão_2007] Abrão, A.M., Faria, P.E., Rubio, J.C.C., Reis, P., Davim, J.P. 2007 Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology* 186, 1–7.
- [Abrão_2008] Abrão, A.M., Rubio, J.C.C., Faria, P.E., Davim, J.P. 2008 The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Materials & Design* 29, 508–513.
- [Abrate_1992] Abrate, S., Walton, D.A. 1992 Machining of composite materials. Part I: Traditional methods. *Composites Manufacturing* 3, 75–83.
- [Almond_1981] Almond, E.A. 1981 Towards improved tests based on fundamental properties. *Proceedings of the International Conference on Improved Performance of Tool Materials*, Teddington, Middlesex 161–169.
- [AMC3_2009] AMC3. 2009 AMC3. Référence dépôt APP : IDDN.FR.001.130026.000.S.P.2010.000.30600.
- [Armendia_2010] Armendia, M., Garay, A., Iriarte, L.-M., Arrazola, P.-J. 2010 Comparison of the machinabilities of Ti6Al4V and TIMETAL® 54M using uncoated WC–Co tools. *Journal of Materials Processing Technology* 210, 197–203.
- [Arrazola_2009] Arrazola, P.-J., Garay, A., Iriarte, L.-M., Armendia, M., Marya, S., Le Maître, F. 2009 Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *Journal of Materials Processing Technology* 209, 2223–2230.
- [Baizeau_2013] Baizeau, T. 2013 Modélisation des flux de températures dans un matériau explosif lors des opérations d’usinage. Application au perçage. (Master Thesis). Arts et Métiers ParisTech, Cluny, France. Arts et Métiers ParisTech, Cluny, France.
- [Barrow_1973] Barrow, G. 1973 Review of experimental and theoretical techniques for assessing cutting temperatures. *Ann CIRP* 22, 203–211.
- [Barrow_1982] Barrow, G., Graham, W., Kurimoto, T., Leong, Y.F. 1982 Determination of rake face stress distribution in orthogonal machining. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 22, 75–85.
- [Battaglia_2005] Battaglia, J.-L., Kusiak, A. 2005 Estimation of heat fluxes during high-speed drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 26, 750–758.
- [Belotserkovsky_1994] Belotserkovsky, E., Bar-Or, O., Katzir, A. 1994 Infrared fibreoptic temperature monitoring during machining procedures. *Measurement Science and Technology* 5, 451–453.
- [Benezech_2011] Benezech, L. 2011 Etude des défauts d’usinage de optimisation de geometrie outils pour le perçage multimateriaux. *Journée Manufacturing* 21, Lyon.
- [Bhaumik_1995] Bhaumik, S.K., Divakar, C., Singh, A.K. 1995 Machining Ti-6Al-4V alloy with a wBN-cBN composite tool. *Materials & Design* 16, 221–226.
- [Bissey_2005] Bissey, S. 2005 Développement d’un modèle d’efforts de coupe applicable à des familles d’outils : Cas du fraisage des aciers traités thermiquement. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Cluny.

- [Bonnet_2010] Bonnet, C. 2010 Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Cluny.
- [Bonnet_2011] Bonnet, C., Benmohammed, B., Poulachon, G., Rech, J., Girard, Y. 2011 CFRP Drilling Model: Fiber Orientation Influence on Mechanical Load and Delamination. *Advanced Materials Research* 223, 111–121.
- [Bono_2002] Bono, M., Ni, J. 2002 A method for measuring the temperature distribution along the cutting edges of a drill. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* 124, 921–923.
- [Brinksmeier_1996] Brinksmeier, E., Brockhoff, T. 1996 Utilization of Grinding Heat as a New Heat Treatment Process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 45, 283 – 286.
- [Brinksmeier_2011] Brinksmeier, E., Fangmann, S., Rentsch, R. 2011 Drilling of composites and resulting surface integrity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, 57–60.
- [Brinksmeier_2002] Brinksmeier, E., Janssen, R. 2002 Drilling of Multi-Layer Composite Materials consisting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP), Titanium and Aluminum Alloys. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51, 87–90.
- [Calamaz_2008a] Calamaz, M. 2008 Approche expérimentale et numérique de l'usinage à sec de l'alliage aéronautique TA6V. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1. Université de Bordeaux 1.
- [Calamaz_2008b] Calamaz, M., Coupard, D., Girot, F. 2008 A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti–6Al–4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48, 275–288.
- [Cantero_2005] Cantero, J.L., Tardío, M.M., Canteli, J.A., Marcos, M., Miguélez, M.H. 2005 Dry drilling of alloy Ti–6Al–4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45, 1246–1255.
- [Chambers_1995] Chambers, A., Bishop, G. 1995 The drilling of carbon fiber polymer matrix composites. *Tenth International Conference on Composite Materials. III. Processing and Manufacturing* 565–572.
- [Che-Haron_2001] Che-Haron, C.. 2001 Tool life and surface integrity in turning titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 118, 231–237.
- [Childs_2001] Childs, P.R. 2001 Practical temperature measurement. Butterworth-Heinemann.
- [Claudin_2006] Claudin, C. 2006 Influence des conditions opératoires sur le procédé de perçage: application aux structures mécano-soudées en acier bas carbone. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Cluny.
- [Combres_1999] Combres, Y. 1999 Propriétés du titane et de ses alliages. *Technique de l'Ingénieur M* 557, 16.
- [Cong_2013] Cong, W.L., Pei, Z.J., Deines, T.W., Liu, D.F., Treadwell, C. 2013 Rotary ultrasonic machining of CFRP/Ti stacks using variable feedrate. *Composites Part B: Engineering* 52, 303 – 310.
- [Cong_2014] Cong, W.L., Pei, Z.J., Treadwell, C. 2014 Preliminary study on rotary ultrasonic machining of CFRP/Ti stacks. *Ultrasonics* 54, 1594 – 1602.

- [Davies_2007] Davies, M.A., Ueda, T., M'Saoubi, R., Mullany, B., Cooke, A.L. 2007 On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56, 581–604.
- [Denkena_2008] Denkena, B., Boehnke, D., Dege, J.H. 2008 Helical milling of CFRP–titanium layer compounds. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1, 64–69.
- [Destefani_2000] Destefani, J.D. 2000 Introduction to Titanium and Titanium Alloys. *Metals Handbook* 2, 586–591.
- [DeVries_1967] DeVries, M., Wu, S., Mitchell, J. 1967 Measurement of Drilling Temperature by Garter Spring Thermocouple Method. *Microtecnic* 21, 583.
- [DeVries_1970] DeVries, M., Wu, S.-M. 1970 Evaluation of the effects of design variables on drill temperature responses. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 92, 699–705.
- [Dornfeld_1999] Dornfeld, D.A., Kim, J.S., Dechow, H., Hewson, J., Chen, L.J. 1999 Drilling Burr Formation in Titanium Alloy, Ti-6Al-4V. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 48, 73–76.
- [Dörr_2003] Dörr, J., Mertens, T., Engering, G., Lahres, M. 2003 “In-situ”temperature measurement to determine the machining potential of different tool coatings. *Surface and Coatings Technology* 174, 389–392.
- [Dupupet_2008] Dupupet, G. 2008 Fibres de carbone. *Technique de l'Ingénieur AM 5* 134, 15.
- [Ezugwu_1997] Ezugwu, E.O., Wang, Z.M. 1997 Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of Materials Processing Technology* 68, 262–274.
- [Ezugwu_2003] Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamane, Y. 2003 An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 134, 233–253.
- [Ezugwu_2005a] Ezugwu, E.O. 2005 Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45, 1353–1367.
- [Ezugwu_2005b] Ezugwu, E.O., Da Silva, R.B., Bonney, J., Machado, á. R. 2005 Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45, 1009–1014.
- [Faraz_2009] Faraz, A., Biermann, D., Weinert, K. 2009 Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49, 1185–1196.
- [Fernandes_2005] Fernandes, M., Cook, C., Alici, G. 2005 Empirical modelling of force profiles produced during drilling of carbon composites. *CIRP international workshop on modeling of machining operations* 8, 251–258.
- [Gélas_1976] Gélas, B., Armand, M., Séraphin, L., Tricot, R. 1976 Titane et alliage de titane. *Technique de l'Ingénieur M* 557, 14.
- [Gouleau_2007] Gouleau, S., Garnier, S., Furet, B. 2007 Perçage d'empilages multi-matériaux. *Mécanique & Industries* 8, 463–469.
- [Guegan_1994] Guegan, P. 1994 Contribution à la qualification de l'usinage de matériaux composites à matrice organique. Université de Nantes. Université de Nantes.
- [Hammadi_2010] Hammadi, M. 2010 Présentation Sandvik. Journée Intercut.

- [Hartung_1982] Hartung, P.D., Kramer, B.M., von Turkovich, B.F. 1982 Tool Wear in Titanium Machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 31, 75–80.
- [Hickey_1987] Hickey, J. 1987 Drilling Graphite Composites. Modern Machine Shop Gardner Publication, 84–90.
- [Hocheng_2005] Hocheng, H., Tsao, C.C. 2005 The path towards delamination-free drilling of composite materials. *Journal of Materials Processing Technology* 167, 251–264.
- [Iliescu_2008] Iliescu, D. 2008 Approche expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbone/epoxy. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech ParisTech - Centre de Bordeaux.
- [Iliescu_2010] Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M.E., Girot, F. 2010 Modeling and tool wear in drilling of CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50, 204–213.
- [Jallageas_2013] Jallageas, J., K'nevez, J.-Y., Chérif, M., Cahuc, O. 2013 Modeling and optimization of vibration-assisted drilling on positive feed drilling unit. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67, 1205–1216.
- [Kalidas_2002] Kalidas, S., Kapoor, S.G., DeVor, R.E. 2002 Influence of thermal effects on hole quality in dry drilling, Part 1: A thermal model of workpiece temperatures. *Journal of manufacturing science and engineering* 124, 258–266.
- [Kato_1972] Kato, S., Yamaguchi, K., Yamada, M. 1972 Stress Distribution at the Interface Between Tool and Chip in Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 94, 683–689.
- [Khashaba_2004] Khashaba, U.A. 2004 Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Composite Structures* 63, 313–327.
- [Kim_1992] Kim, K.S., Lee, D.G., Kwak, Y.K., Namgung, S. 1992 Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning. *Journal of Materials Processing Technology* 32, 553–570.
- [Kim_2004] Kim, D., Ramulu, M. 2004 Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks. *Composite Structures* 63, 101–114.
- [Kim_2008] Kim, D. (Dae-W.), Kwon, P. 2008 Evaluation of advanced cutting tool materials for drilling Composite-Metal stacks. IAB Meeting (10-14-08).
- [Komanduri_1982] Komanduri, R. 1982 Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys. *Wear* 76, 15–34.
- [Ko_2003] Ko, S.-L., Chang, J.-E., Yang, G.-E. 2003 Burr minimizing scheme in drilling. *Journal of Materials Processing Technology* 140, 237–242.
- [Krishnamurthy_1992] Krishnamurthy, R., Santhanakrishnan, G., Malhotra, S.K. 1992 Machining of polymeric composites. *Machining of composite materials(A 95-15178 02-37)* Chicago 1-5 Nov, 139–148.
- [Kuo_2014] Kuo, C.L., Soo, S.L., Aspinwall, D.K., Thomas, W., Bradley, S., Pearson, D., M'Saoubi, R., Leahy, W. 2014 The Effect of Cutting Speed and Feed Rate on Hole Surface Integrity in Single-shot Drilling of Metallic-Composite Stacks. *Procedia CIRP* 13, 405 – 410.
- [Lachaud_2001] Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., Surcin, L. 2001 Drilling of composite structures. *Composite Structures* 52, 511–516.

- [Ladonne_2013] Ladonne, M., Landon, Y., Chérif, M., K'Nevez, J.-Y., Cahuc, O., De Castelbajac, C. 2013 Modélisation du procédé de perçage assisté par vibrations. 21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013, Bordeaux, France (FR).
- [Lampman_1990] Lampman, S. 1990 Wrought titanium and titanium alloys. ASM International, Metals Handbook, Tenth Edition. 2, 592–633.
- [Langella_2005] Langella, A., Nele, L., Maio, A. 2005 A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 36, 83–93.
- [Li_2007a] Li, R., Hegde, P., Shih, A.J. 2007 High-throughput drilling of titanium alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47, 63–74.
- [Li_2007b] Li, R., Shih, A.J. 2007 Spiral point drill temperature and stress in high-throughput drilling of titanium. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47, 2005–2017.
- [Liu_2012] Liu, D., Tang, Y., Cong, W.L. 2012 A review of mechanical drilling for composite laminates. Composite Structures 94, 1265 – 1279.
- [Malot_2001] Malot, T. 2001 Usinage assisté par laser du bore. Thèse de doctorat, Université de bourgogne.
- [Matsumura_2013] Matsumura, T., Tamura, S. 2013 Cutting Force Model in Drilling of Multi-layered Materials. Procedia CIRP 8, 182 – 187.
- [Melkote_2010] Melkote, S.N., Newton, T.R., Hellstern, C., Morehouse, J.B., Turner, S. 2010 Interfacial Burr Formation in Drilling of Stacked Aerospace Materials. Burrs - Analysis, Control and Removal 89–98.
- [Mills_1981] Mills, B., Mottishaw, T.D., Chisholm, A.W.J. 1981 The Application of Scanning Electron Microscopy to the Study of Temperatures and Temperature Distributions in High Speed Steel Twist Drills. CIRP Annals - Manufacturing Technology 30, 15 – 20.
- [Montoya_2013] Montoya, M. 2013 Optimisation du perçage d'empilages CFRP/Titane et/ou Aluminium. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Bordeaux.
- [Nicholas_2001] Nicholas, J.V., White, D.R. 2001 Traceable temperatures: an introduction to temperature measurement and calibration. 1997.
- Norme NF E 66-502**
Norme NF E 66-520
- [Ozcelik_2006] Ozcelik, B., Bagci, E. 2006 Experimental and numerical studies on the determination of twist drill temperature in dry drilling: A new approach. Materials & Design 27, 920–927.
- [Park_2011] Park, K.-H., Beal, A., Kim, D. (Dae-W., Kwon, P., Lantrip, J. 2011 Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools. Wear 271, 2826–2835.
- [Pecat_2014a] Pecat, O., Brinksmeier, E. 2014 Tool Wear Analyses in Low Frequency Vibration Assisted Drilling of CFRP/Ti6Al4V Stack Material. Procedia CIRP 14, 142 – 147.
- [Pecat_2014b] Pecat, O., Brinksmeier, E. 2014 Low Damage Drilling of CFRP/Titanium Compound Materials for Fastening. Procedia CIRP 13, 1 – 7.

- [Piquet_1999] Piquet, R. 1999 Contribution à l'étude des réparations provisoires structurales aéronautiques. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- [Piquet_2000] Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P. 2000 Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 31, 1107–1115.
- [Poutord_2013a] Poutord, A., Rossi, F., Poulachon, G., M'Saoubi, R., Abrivard, G. 2013 Study of the local forces along a drill edge—comparison of two methodologies. *Congrès français de mécanique*, Bordeaux.
- [Poutord_2013b] Poutord, A., Rossi, F., Poulachon, G., M'Saoubi, R., Abrivard, G. 2013 Local Approach of Wear in Drilling Ti6Al4V/CFRP for Stack Modelling. *Procedia CIRP* 8, 316 – 321.
- [Procédé pour optimiser les conditions de travail d'un outil coupant_2009] Brevet, Procédé pour optimiser les conditions de travail d'un outil coupant. 2009 . Numéro de brevet : 09 05926, Pays : Allemagne, Espagne, France, Italie, Japon, Royaume-Uni, Suisse, USA.
- [Qi_2014] Qi, Z., Zhang, K., Li, Y., Liu, S., Cheng, H. 2014 Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks. *Composite Structures* 107, 604 – 609.
- [Quinn_1983] Quinn, T.J. 1983 *Temperature*. Academic Press Inc. Orlando, Florida, USA.
- [Rahim_2008] Rahim, E.A., Kamdani, K., Sharif, S. 2008 Performance Evaluation of Uncoated Carbide Tool in High Speed Drilling of Ti6Al4V. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 2, 522–531.
- [Rahme_2008] Rahme, P. 2008 Contribution à l'étude de l'effet des procédés Perçage - Alésage sur l'apparition du délaminage dans les structures composites épaisses. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- [Ramulu_1999] Ramulu, M. 1999 Cutting-edge wear of polycrystalline diamond inserts in machining of fibrous composite material. *Manufacturing Engineering and Materials Processing* 53, 357–410.
- [Ramulu_2001] Ramulu, M., Branson, T., Kim, D. 2001 A study on the drilling of composite and titanium stacks. *Composite Structures* 54, 67–77.
- [Reissig_2004] Reissig, L., Völkl, R., Mills, M.J., Glatzel, U. 2004 Investigation of near surface structure in order to determine process-temperatures during different machining processes of Ti6Al4V. *Scripta Materialia* 50, 121 – 126.
- [Ribeiro_2003] Ribeiro, M.V., Moreira, M.R.V., Ferreira, J.R. 2003 Optimization of titanium alloy (6Al–4V) machining. *Journal of Materials Processing Technology* 143-144, 458–463.
- [Risse_2005] Risse, K., Klocke, F., Gerschwiler, K. 2005 3DSimulation des Bohrozesses zur Bestimmung von Größeneffekten. *Kolloquium Processskalierung*, 27:261-271.
- [Roudgé_2008] Roudgé, M., Cherif, M., Cahuc, O., Darnis, P., Danis, M. 2008 Multi-layer Materials. Qualitative Approach of the Process. *International Journal of Material Forming* 1, 949–952.

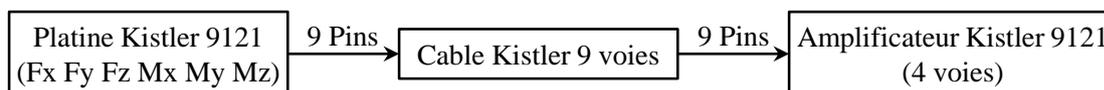
- [Roux_2012] Roux, B. 2012 PJE Rapport : Development of a thermal measurement device: application to the Ti6Al4V machining with PCD and carbide tools (No. CL-M12005).
- [Rujikietgumjorn_1978] Rujikietgumjorn, S. 1978 Development of predictive models for drilling composite materials. Ph. D. Thesis, Texas Tech University.
- [Rumford_1798] Rumford, B.C.O. 1798 An Inquiry concerning the Source of the Heat Which is Excited by Friction. By Benjamin Count of Rumford, FRSMRIA. Royal Society of London Philosophical Transactions Series I 88, 80–102.
- [Salguero Gomez_2011] Salguero Gomez, J., Batista Ponce, M., Sanchez Galindez, J.A., Marcos Barcena, M. 2011 An XPS Study of the Stratified Built-up Layers Developed onto the Tool Surface in the Dry Drilling of Ti Alloys. *Advanced Materials Research* 223, 564–572.
- [SANDVIK-COROMANT_2001] SANDVIK-COROMANT. 2001 Perçage. *Technique de l'Ingénieur* BM 7 088, 21.
- [Schmidt_1949] Schmidt, A., Roubik, J. 1949 Distribution of heat generated in drilling. *Trans. ASME* 71, 245–252.
- [SenthilKumar_2013] SenthilKumar, M., Prabukarthi, A., Krishnaraj, V. 2013 Study on Tool Wear and Chip Formation During Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)/Titanium Alloy (Ti6Al4V) Stacks. *Procedia Engineering* 64, 582 – 592.
- [Shyha_2011] Shyha, I.S., Soo, S.L., Aspinwall, D.K., Bradley, S., Perry, R., Harden, P., Dawson, S. 2011 Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51, 569–578.
- [Taylor_1906] Taylor, F.W. 1906 On the art of cutting metals. *Transactions of the ASME*, 28:31-350.
- [Thangaraj_1984] Thangaraj, A., Wright, P.K., Nissle, M. 1984 New Experiments on the Temperature Distribution in Drilling. *Journal of Engineering Materials and Technology* 106, 242–247.
- [Trent_1988] Trent, E.M. 1988 Metal cutting and the tribology of seizure. *Wear* 128, 29–81.
- [Trent_2000] Trent, E.M., Wright, P.K. 2000 *Metal cutting*. Butterworth-Heinemann. Butterworth-Heinemann.
- [Tsao_1997] Tsao, C.-C., Chen, W.-C. 1997 Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates. *Journal of Materials Processing Technology* 70, 185–189.
- [Tsao_2003] Tsao, C.C., Hocheng, H. 2003 The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43, 1087–1092.
- [Tsao_2004] Tsao, C.C., Hocheng, H. 2004 Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44, 1085–1090.
- [Venugopal_2007] Venugopal, K.A., Paul, S., Chattopadhyay, A.B. 2007 Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling. *Wear* 262, 1071–1078.
- [Wang_1995] Wang, D.H., Ramulu, M., Arola, D. 1995 Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 35, 1623–1638.

- [Wang_2014] Wang, X., Kwon, P.Y., Sturtevant, C., Kim, D. (Dae-W., Lantrip, J. 2014 Comparative tool wear study based on drilling experiments on CFRp/Ti stack and its individual layers. *Wear* 317, 265 – 276.
- [Yang_1999] Yang, X., Richard Liu, C. 1999 Machining Titanium and its Alloys. *Machining Science and Technology* 3, 107–139.
- [Yoshioka_2004] Yoshioka, H., Hashizume, H., Shinn, H. 2004 In-process microsensor for ultraprecision machining. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology* 151, 121–125.
- [Zeilmann_2006] Zeilmann, R.P., Weingaertner, W.L. 2006 Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant. *Journal of Materials Processing Technology* 179, 124–127.
- [Zhang_2008] Zhang, P.F., Churi, N.J., Pei, Z.J., Treadwell, C. 2008 Mechanical drilling processes for titanium alloys: A literature review. *Machining Science and Technology* 12, 417–444.
- [Zitoune_2005] Zitoune, R., Collombet, F., Lachaud, F., Piquet, R., Pasquet, P. 2005 Experiment-calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase. *Composites Science and Technology* 65, 455–466.
- [Zitoune_2007] Zitoune, R., Collombet, F. 2007 Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38, 858–866.
- [Zitoune_2010] Zitoune, R., Krishnaraj, V., Collombet, F. 2010 Study of drilling of composite material and aluminium stack. *Composite Structures* 92, 1246–1255.
- [Zitoune_2011] Zitoune, R., S. Elam Bouacif, B., Collombet, F., Krishnaraj, V., Zindulka, O., Jolin, A. 2011 Etude de la qualité d’usinage lors du perçage d’un multi-matériau de type CFRP/Aluminium. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17) 101.

Partie 7 – ANNEXES

Annexe 1 METHODOLOGIE DE CALIBRATION DE LA PLATINE KISTLER 9121 DE TOURNAGE POUR LA MESURE DES COUPLES

L'étalonnage de la platine Kistler 9121 associé à l'amplificateur de charge quatre voies 5019 permet de retourner des informations au niveau des trois efforts ainsi que du couple dans l'axe de la broche.



La documentation technique de la platine indique les équations suivantes, donnant le lien entre les efforts appliqués sur la platine et les valeurs en sortie de platine :

| Valeur mesurée (dans el repère de la platine) | Pins à lire coté platine |
|---|--------------------------------------|
| Fx | Pin 2 + 3 |
| Fy | Pin 4 + 5 |
| Fz | Pin 6 + 7 + 8 + 9 |
| My | $K \times \text{Pin } 6 - 7 - 8 + 9$ |

Tableau 23 : Relations entre efforts sur la platine et valeurs des broches de sortie de la platine

L'amplificateur de charge indique effectuer les associations suivantes (somme des valeurs de divers pins du câble d'entrée) :

| Voie de l'amplificateur | Pins à lire coté platine |
|-------------------------|--------------------------|
| Voie 1 | Pin 2 + 3 |
| Voie 2 | Pin 4 + 5 |
| Voie 3 | Pin 6 + 9 |
| Voie 4 | Pin 7 + 8 |

Tableau 24 : Sommes réalisées dans l'amplificateur de charge Kistler 5019

Etant donné qu'il est possible de raccorder la platine et l'amplificateur à l'aide d'un câble 9 voies, les éléments suivants correspondent aux sorties de l'amplificateur de charge, correspondant aux entrées de la carte d'acquisition :

| Valeur mesurée (dans el repère de la platine) | Sortie de l'amplificateur |
|---|--------------------------------|
| Voie 1 | Voie 1 |
| Voie 2 | Voie 2 |
| Voie 3 | Voie 3 + 4 |
| Voie 4 | $K \times (\text{Voie 3} - 4)$ |

Tableau 25 : Sommutations réalisées dans l'amplificateur de charge Kistler 5019

La variable K reste à définir, pour cela, le montage suivant a été développé dans le cadre de la thèse :

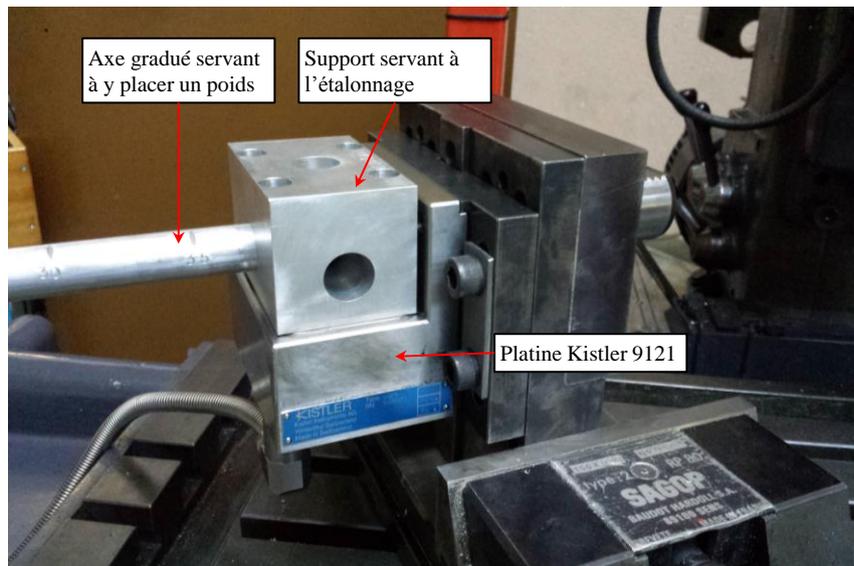


Figure 145 : Etalonnage de la platine 9121 en couple

Une feuille de calcul Excel permet de calculer les valeurs des gains en plaçant un poids à plusieurs points de la barre graduée.

La valeur suivante a été retenue : $K = 3.5 \times 10^{-3}$.

La seconde étape consiste en un déplacement du point d'application du couple. Initialement le couple est donné en un point situé dans la platine, il convient donc de déplacer ce point. Pour cela l'étalonnage se réalise en plaçant la platine suivant un autre axe et en réitérant les mesures des quatre voies en plaçant un poids en diverses positions. La figure suivante présente la position dans laquelle la platine devra se trouver.

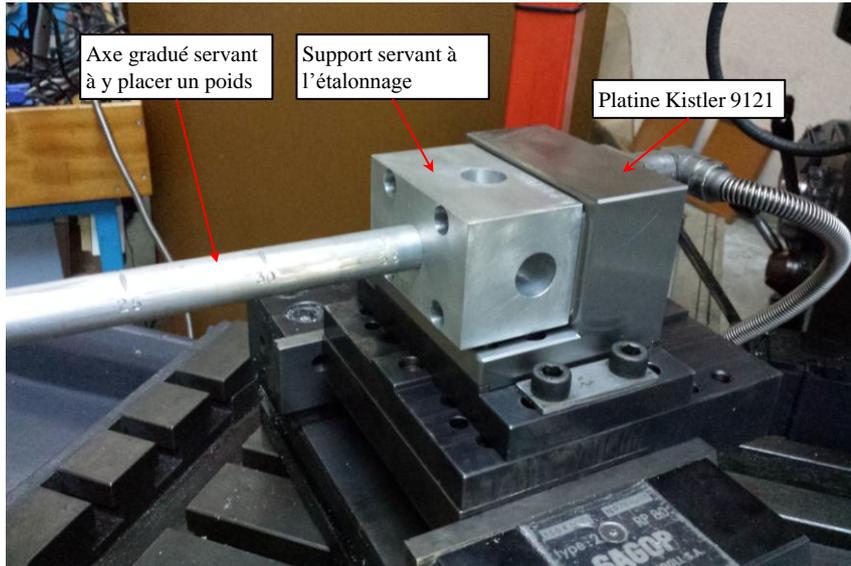


Figure 146 : Etalonnage du point d'application du couple mesuré par la platine 9121

La valeur de 4.375×10^{-2} pour ce gain doit donner de bons résultats.

L'emploi de cette platine initialement non prévue pour mesurer les couples, associé à un câble spécifique pour cette utilisation et un réétalonnage des valeurs de sorties, a permis de mesurer les efforts suivant les trois directions et le couple suivant l'axe de broche. Il est désormais possible de procéder à des perçages sur tour en mesurant le couple avec le matériel disponible au sein du LaBoMaP sans avoir à employer de wattmètre.

Annexe 2 TABLEAU DES ESSAIS POUR LE COM DANS LE Ti6Al4V

| Numéro de l'essai | Vc (m/min) | F (mm/tr) | Commentaire |
|-------------------|------------|-----------|-------------------------------|
| 1 | 10 | 0.2 | Essai de caractérisation |
| 2 | 10 | 0.1 – 0.3 | f croissant |
| 3 | 10 | 0.3 – 0.1 | f décroissant |
| 4 | 20 | 0.1 – 0.3 | f croissant |
| 5 | 20 | 0.3 – 0.1 | f décroissant |
| 6 | 10 | 0.2 | Essai de caractérisation |
| 7 | 30 | 0.1 – 0.3 | f croissant |
| 8 | 30 | 0.3 – 0.1 | f décroissant – rupture outil |

Tableau 26 : Tableau des essais de COM dans le Ti6Al4V

Annexe 3 TABLEAU DES ESSAIS POUR LE COM DANS LE CFRP

| Numéro de l'essai | Vc (m/min) | f (mm/tr) | Commentaire |
|-------------------|------------|------------|------------------------------|
| 1 | 100 | 0.05 | Rodage de l'arête |
| 2 | 100 | 0.05 | Rodage de l'arête |
| 3 | 100 | 0.01 | Point de vérification du COM |
| 4 | 100 | 0.2 | Point de vérification du COM |
| 5 | 50 | 0.05 | Point de vérification du COM |
| 6 | 150 | 0.05 | Point de vérification du COM |
| 7 | 100 | 0.05 | Essai de caractérisation |
| 8 | 100 | 0.01 – 0.2 | f croissant |
| 9 | 100 | 0.2 – 0.01 | f décroissant |
| 10 | 100 | 0.05 | Essai de caractérisation |
| 11 | 150 | 0.01 – 0.2 | f croissant |
| 12 | 150 | 0.2 – 0.01 | f décroissant |
| 13 | 100 | 0.05 | Essai de caractérisation |
| 14 | 50 | 0.01 – 0.2 | f croissant |
| 15 | 50 | 0.2 – 0.01 | f décroissant |
| 16 | 100 | 0.05 | Essai de caractérisation |
| 17 | 200 | 0.01 – 0.2 | f croissant |
| 18 | 200 | 0.2 – 0.01 | f décroissant |
| 19 | 100 | 0.05 | Essai de caractérisation |
| 20 | 25 | 0.01 – 0.2 | f croissant |
| 21 | 25 | 0.2 – 0.01 | f décroissant |
| 22 | 100 | 0.05 | Essai de caractérisation |
| 23 | 250 | 0.01 – 0.2 | f croissant |
| 24 | 250 | 0.2 – 0.01 | f décroissant |
| 25 | 100 | 0.05 | Essai de caractérisation |

Tableau 27 : Tableau des essais pour le COM dans le CFRP

Annexe 4 ESSAIS DE VALIDATION DU COM DANS LE Ti6Al4V

| Numéro de l'essai | Vc (m/min) | f (mm/tr) | Commentaire |
|-------------------|------------|-----------|--------------------------|
| 1 | 10 | 0.2 | Rodage de l'arête |
| 2 | 10 | 0.2 | Rodage de l'arête |
| 3 | 10 | 0.2 | Essai de caractérisation |
| 4 | 10 | 0.1 | |
| 5 | 10 | 0.3 | |
| 6 | 10 | 0.15 | |
| 7 | 10 | 0.25 | |
| 8 | 10 | 0.2 | Essai de caractérisation |
| 9 | 20 | 0.2 | |
| 10 | 30 | 0.2 | |
| 11 | 5 | 0.2 | |
| 12 | 10 | 0.2 | Essai de caractérisation |
| 13 | 20 | 0.1 | |
| 14 | 20 | 0.3 | |
| 15 | 20 | 0.15 | |
| 16 | 20 | 0.25 | |
| 17 | 10 | 0.2 | Essai de caractérisation |
| 18 | 30 | 0.1 | |
| 19 | 30 | 0.15 | |
| 20 | 30 | 0.25 | |
| 21 | 30 | 0.3 | |
| 22 | 10 | 0.2 | Essai de caractérisation |

Tableau 28 : Tableau des essais de validation du COM à l'aide de paramètres fixes dans le Ti6Al4V

Annexe 5 CALCULS DE L'EFFET DOPPLER

La distance entre l'émetteur et le récepteur Bluetooth varie de manière cyclique à la fréquence de la rotation de broche, influençant la fréquence perçue par le récepteur. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Doppler (ou effet Doppler-Fizeau), dont la formule est la suivante :

$$f_{rec} = \frac{c - v_{rec}}{c - v_{em}} \cdot f_{em} = \frac{1 - (v_{rec}/c)}{1 - (v_{em}/c)} \cdot f_{em}$$

Avec :

- f_{rec} la fréquence reçue,
- f_{em} la fréquence émise,
- v_{rec} la vitesse du récepteur dans un référentiel galiléen
- v_{em} la vitesse de l'émetteur dans le même référentiel galiléen
- c la vitesse de l'onde, dans notre cas, assimilé à la vitesse de la lumière

En considérant que la fréquence émise par l'émetteur est la porteuse, donc une onde à 2.4 GHz, il est possible de considérer la variation de la fréquence de la porteuse en fonction de la vitesse de rotation de la broche.

Dans la position 1 (rapprochement) : $f_{rec} = f_{em} \cdot \frac{c}{c - r \cdot \omega}$

Dans la position 2 (éloignement) : $f_{rec} = f_{em} \cdot \frac{c}{c + r \cdot \omega}$

Donc les variations de fréquence seront de :

$$\Delta f_{rec} = f_{em} \cdot \frac{c}{c - r \cdot \omega} - f_{em} \cdot \frac{c}{c + r \cdot \omega}$$

L'ensemble des valeurs sont données avec les unités du système international.

Ce qui après simplification, donne :

$$\Delta f_{rec} = 2 \times f_{em} \cdot \frac{c \times r \times \omega}{c^2 - r^2 \cdot \omega^2}$$

Or les valeurs suivantes sont connues :

- $f_{em} = 2.4 \times 10^6 \text{ Hz}$
- $c = 300 \times 10^6 \text{ m/s}$
- sur notre modèle de collecteur r , qui correspond à la distance entre l'axe de rotation et l'émetteur, est d'environ 0.06 m

La variation de la fréquence de la porteuse est donc de l'ordre de 4 Hz autour de 2.4 GHz. Ce faible écart n'est probablement pas la source de la perte de la communication entre les deux modules. En effet, la variation de la fréquence employée est d'environ $2 \times 10^{-4} \%$.

Néanmoins, ces calculs ne prennent en considération que la variation de la fréquence de la porteuse dans le cas où l'onde se propage directement de l'émetteur au récepteur, ce qui n'est pas le cas dans le montage présenté. De multiples réflexions ont lieu sur les parois de la machine avant que l'onde n'arrive au récepteur. Il n'est pas possible de le modéliser dans l'état actuel des choses.

Annexe 6 METHODE DE MESURE A L'AIDE DE COUPE DE FILS THERMOCOUPLES CONFIDENTIEL (DEPOT DE BREVET EN COURS)

Le principe retenu pour effectuer cette mesure est de couper deux fils thermocouples avec l'arête afin de fermer le circuit électrique. La Figure 147 présente le fonctionnement de la mesure. Deux fils thermocouples isolés sont introduit dans le matériau usiné à une très faible distance l'un de l'autre, lors du perçage, le foret va venir couper en même temps le fil K^+ et le fil K^- , permettant la formation d'un thermocouple dont la valeur de tension sera alors relevée et convertie en température.

Cette conversion de la tension en température ne sera possible que si l'on considère que la température sur l'arête est la même au niveau des contacts des fils thermocouples. Cette hypothèse permet de considérer la valeur relevée comme provenant d'un thermocouple standard.

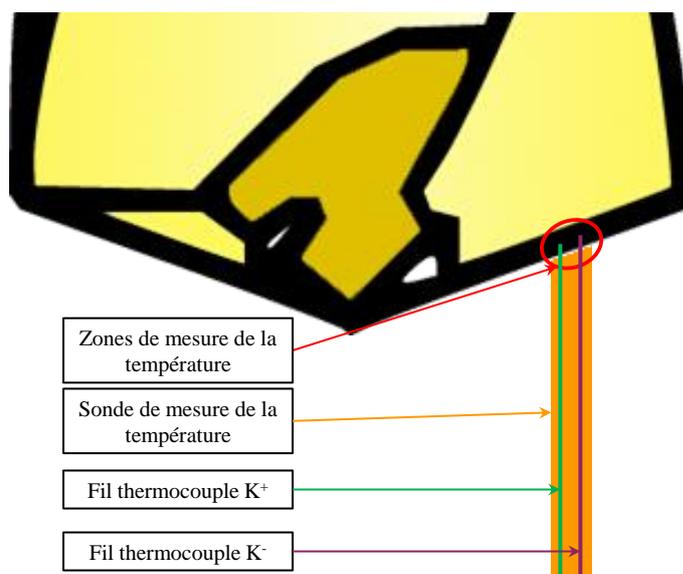


Figure 147 : Fonctionnement de la mesure de température de l'arête par la coupe des fils thermocouples par l'arête

La Figure 148 présente la disposition retenue pour les sondes de température dans le matériau, un premier groupe de thermocouples est orienté suivant l'axe de l'outil, permettant une mesure à un point de l'arête en fonction de la profondeur percée. Tandis que d'autres sondes sont disposées perpendiculairement à l'axe du foret permettant de relever la température en fonction du rayon pour une altitude de perçage donnée.

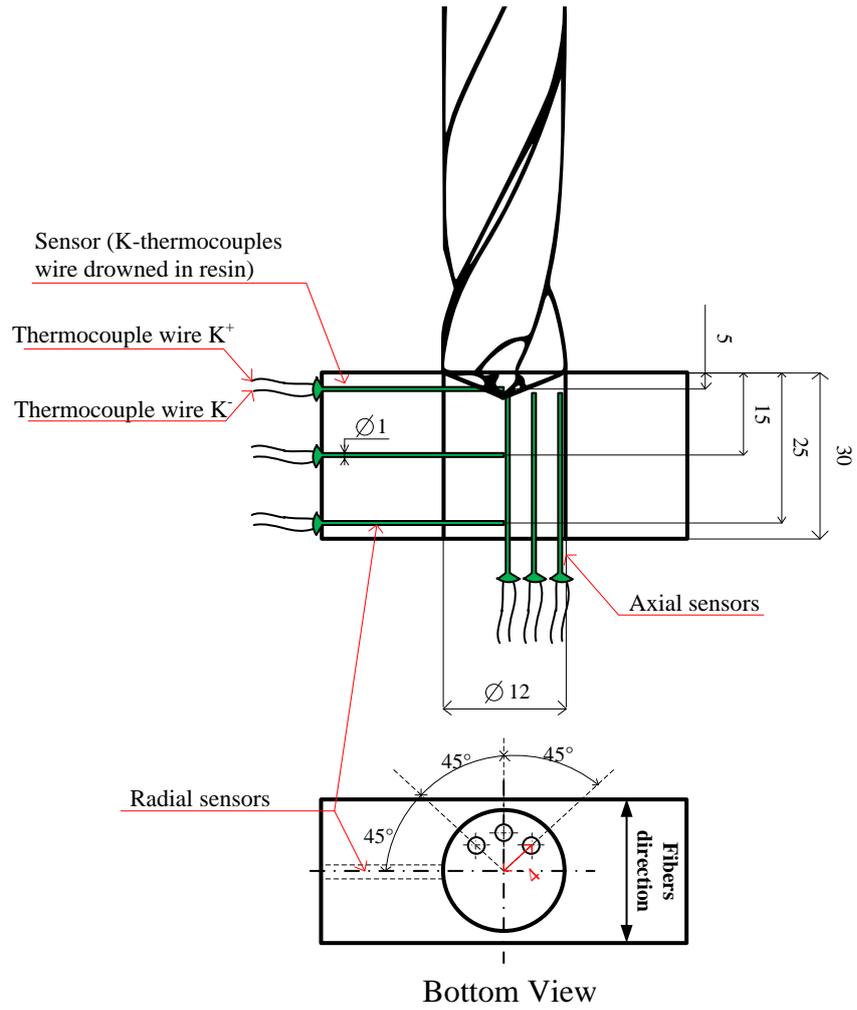


Figure 148 : Disposition des thermocouples dans le composite unidirectionnel T800 M21

Annexe 7 DECOMPOSITION DE LA POINTE SUR TOUR, ESSAIS A L'AIDE DE FORETS MONODENT

Afin de remonter à l'ensemble des efforts sur l'outil, il fut envisagé d'effectuer des essais à l'aide d'outil monodent. Le fait de retirer une arête à l'outil permet de mesurer les efforts s'appliquant radialement par rapport à l'outil et qui se compensent sur les deux arêtes dans le cas d'un outil ayant deux arêtes équilibrées. Pour obtenir ces outils, une arête du foret a été meulée.

Les efforts sur un outil n'ayant qu'une dent n'étant pas équilibrés, une mesure de la flexion de l'outil en usinage a été faite. Pour cela, un comparateur a été placé sur le foret monodent visible sur la Figure 149 et a permis de mesurer la déviation de l'axe de l'outil.

Cette déviation mesurée étant importante (0.2 à 0.3 mm), la simulation des efforts de coupe à l'aide de poids placés à l'extrémité de l'outil et des comparateurs placés à divers endroits ont permis de mesurer la flexion de l'outil. Ainsi, en conclusion, la bride permettant de fixer notre foret à la platine est trop souple et génère une rotation de l'outil suivant l'axe Y de la machine.

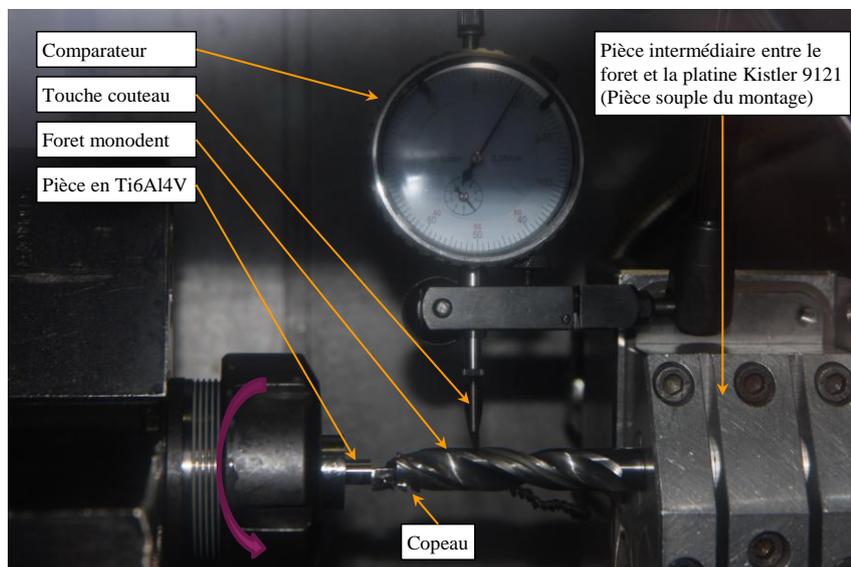


Figure 149 : Mesure de la déviation lors du perçage à l'aide d'outil monodent

Au final, seuls les essais réalisés à l'aide d'un outil ayant les deux arêtes ont été retenus pour l'exploitation des données. Les essais réalisés à l'aide de forets monodent sont présentés en Annexe 8.

Annexe 8 ESSAIS REALISES DANS LE Ti6Al4V POUR LE CAM

| Numéro de l'essai | Foret | Diamètre intérieur (mm) | Diamètre extérieur (mm) | Commentaire |
|-------------------|-------|-------------------------|-------------------------|--|
| 5 | C07 | 3 | 20 | |
| 6 | C07 | 3 | 11.9 | |
| 7 | C07 | 3 | 11 | |
| 8 | C07 | 3 | 9 | |
| 9 | C07 | 3 | 7 | |
| 10 | C07 | 3 | 20 | |
| 11 | C07 | 3 | 5 | |
| 12 | C07 | 0 | 20 | |
| 13 | C07 | 0 | 11.9 | |
| 14 | C07 | 0 | 11 | |
| 15 | C07 | 0 | 7 | |
| 16 | C07 | 0 | 9 | |
| 17 | C07 | 0 | 5 | |
| 18 | C07 | 0 | 3 | Casse outil (pièce usinée flambe) |
| 19 | C08 | 3 | 5 | Foret monodent |
| 20 | C08 | 3 | 7 | Foret monodent |
| 21 | C08 | 3 | 9 | Foret monodent |
| 22 | C08 | 3 | 5 | Foret monodent |
| 23 | C08 | 3 | 7 | Foret monodent |
| 24 | C08 | 3 | 9 | Foret monodent |
| 25 | C08 | 3 | 11 | Foret monodent |
| 26 | C08 | 3 | 11.9 | Foret monodent : flexion trop importante générant une destruction de l'outil |

Tableau 29 : Tableau des essais pour le CAM dans le Ti6Al4V

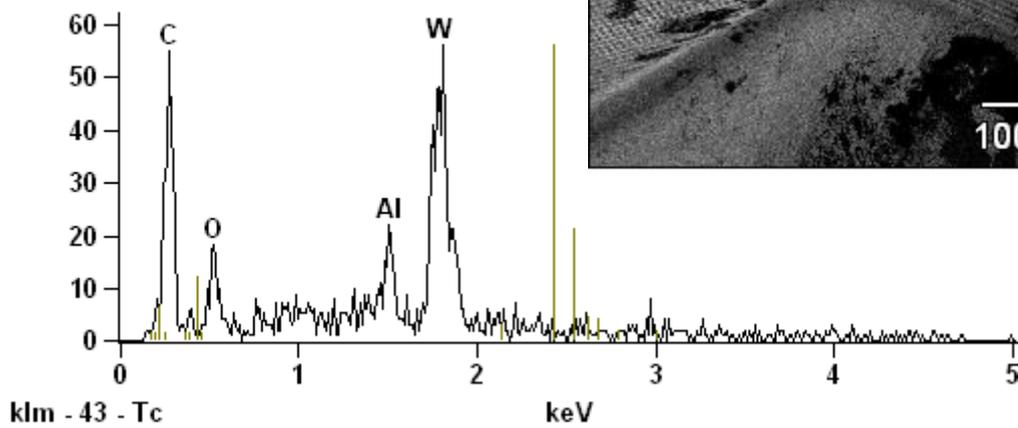
Annexe 9 ANALYSE EDX DU FORET APRES AVOIR USINE DE L'IMA M21E

Image Name 3(2)

Accelerating Voltage : 5.0 kV

Magnification 700

Full scale counts: 56



3(2)

15 62471

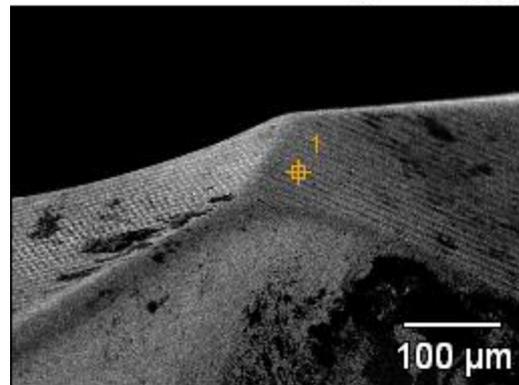
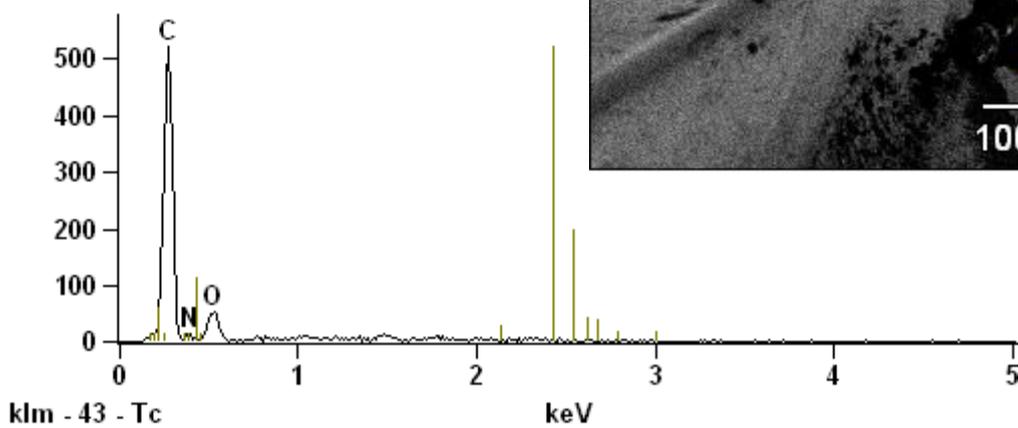


Image Name 3(3)

Accelerating Voltage : 5.0 kV

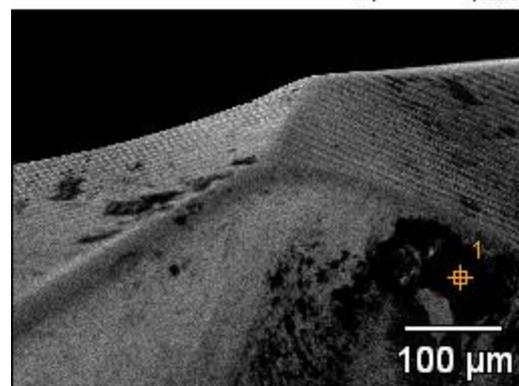
Magnification 700

Full scale counts: 520



3(3)

15 62559

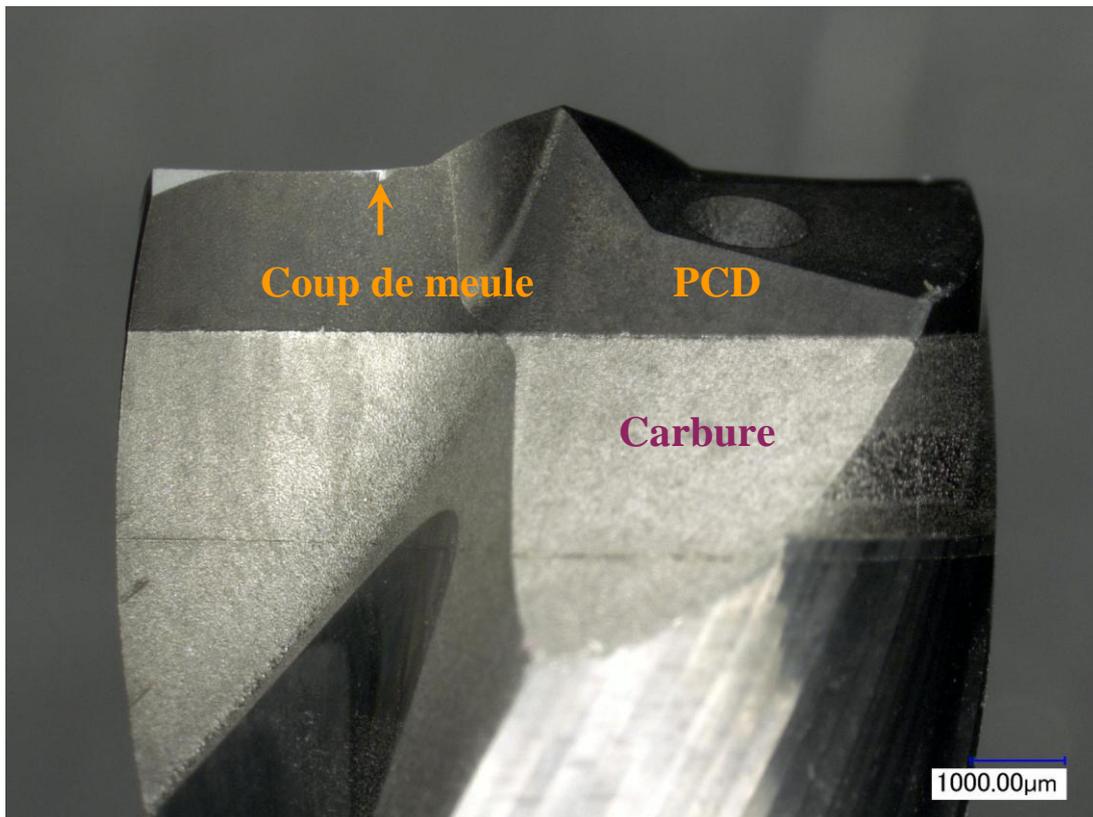


Annexe 10 ESSAIS DE PERÇAGES A L'AIDE D'OUTILS EN PCD MONOBLOCS

1 - FORET AVANT USINAGE

Foret CX2 en dôme PCD de diamètre 9.545mm.

Une marque sur la face de coupe de l'une des arêtes est présentée ci-dessous



2 - PERÇAGE DU CFRP

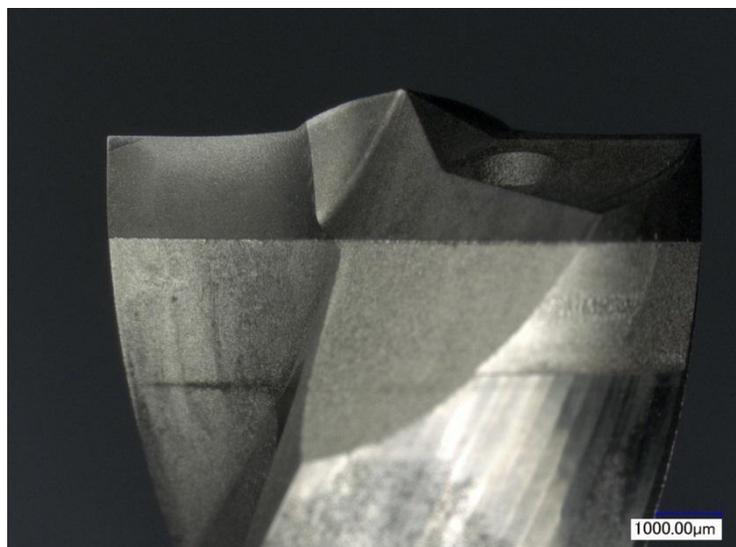
Conditions de coupe

$V_c = 100 \text{ m/min}$

$f = 0.05 \text{ mm/tr}$

Usinage à sec

Pas d'usure visible
(seulement une petite marque
sur la face de coupe).



3 - PERÇAGE DU Ti6AL4V

Conditions de coupe

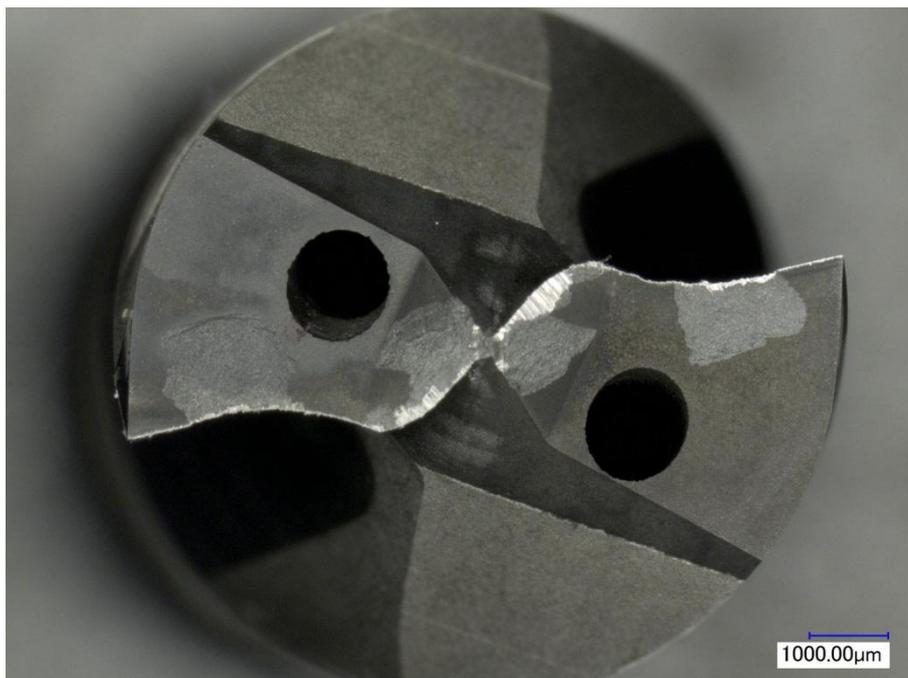
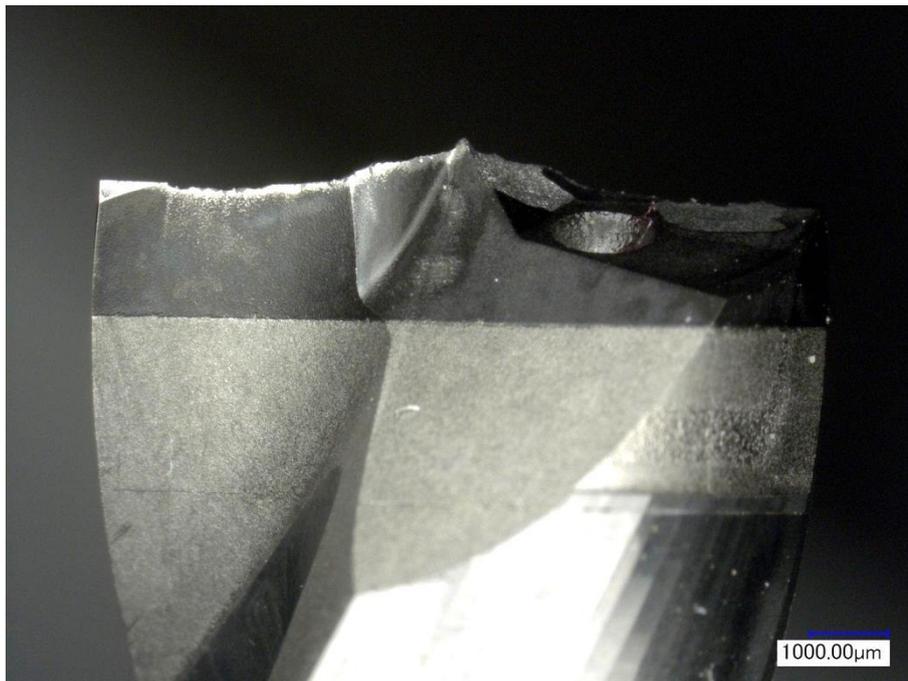
$V_c = 10 \text{ m/min}$

$f = 0.1 \text{ mm/tr}$

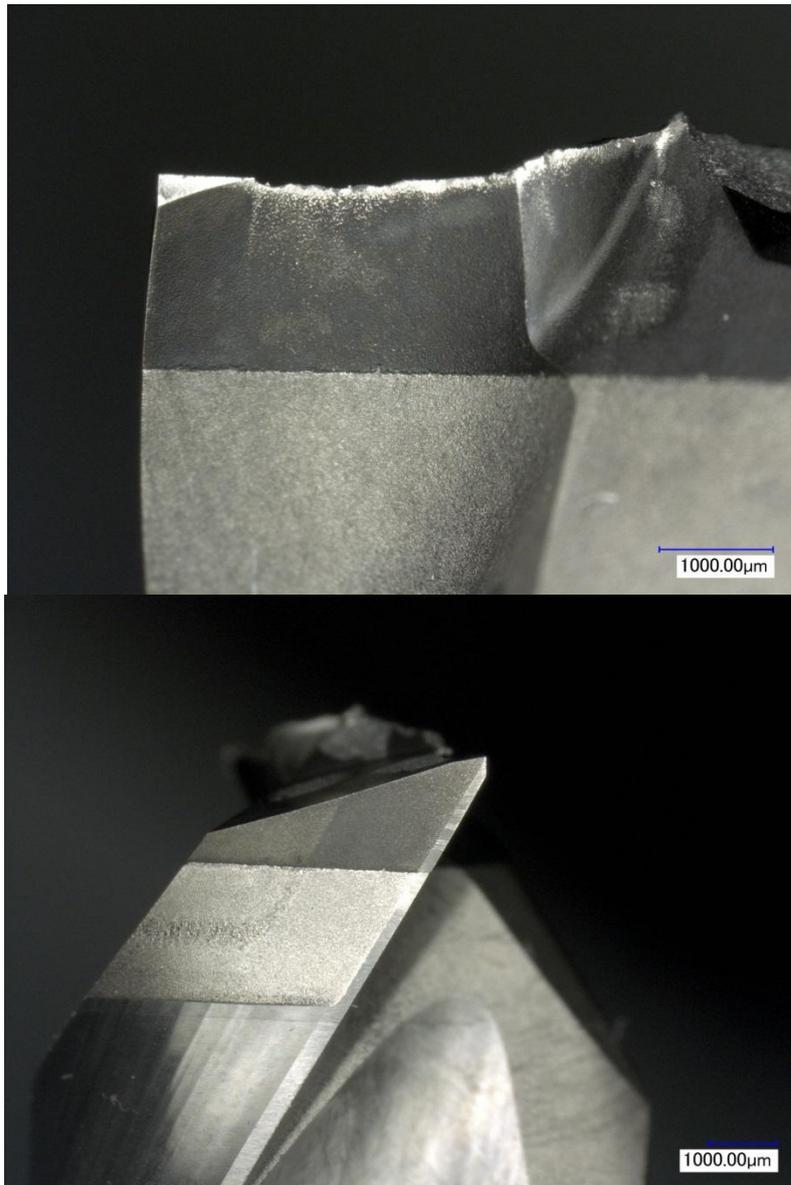
Usinage avec lubrification par le centre

Profondeur du perçage : 8mm

Usure très importante presque
sur tout le long de l'arête



Point intéressant à noter : les becs avec le renfort ont bien résisté et ne semblent pas usés.



4 - CONCLUSION

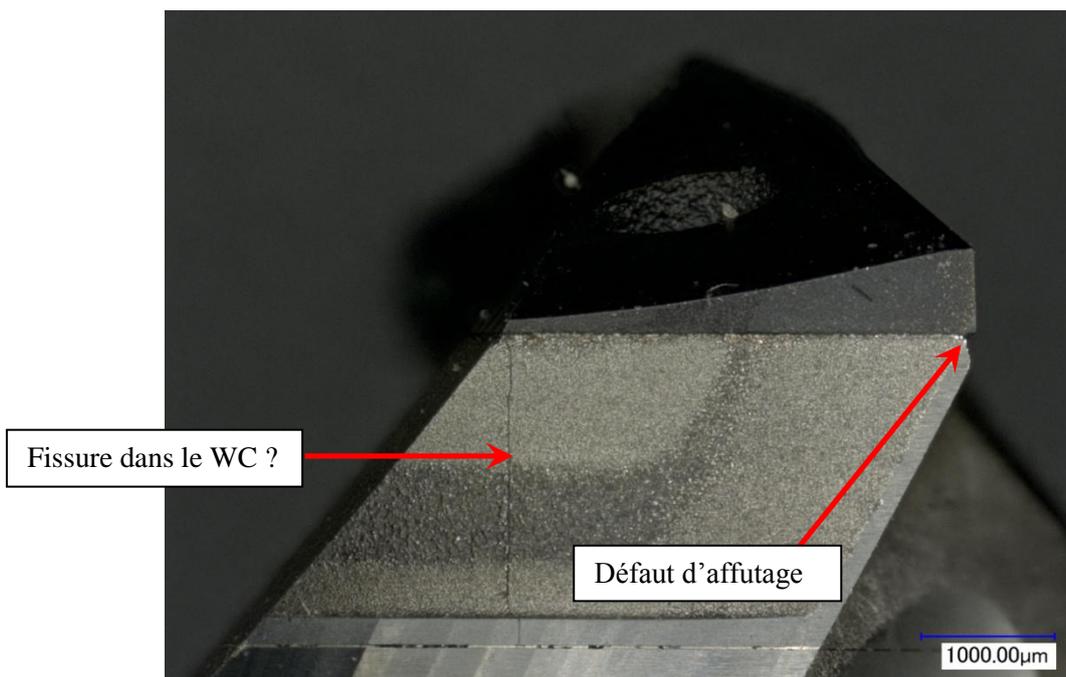
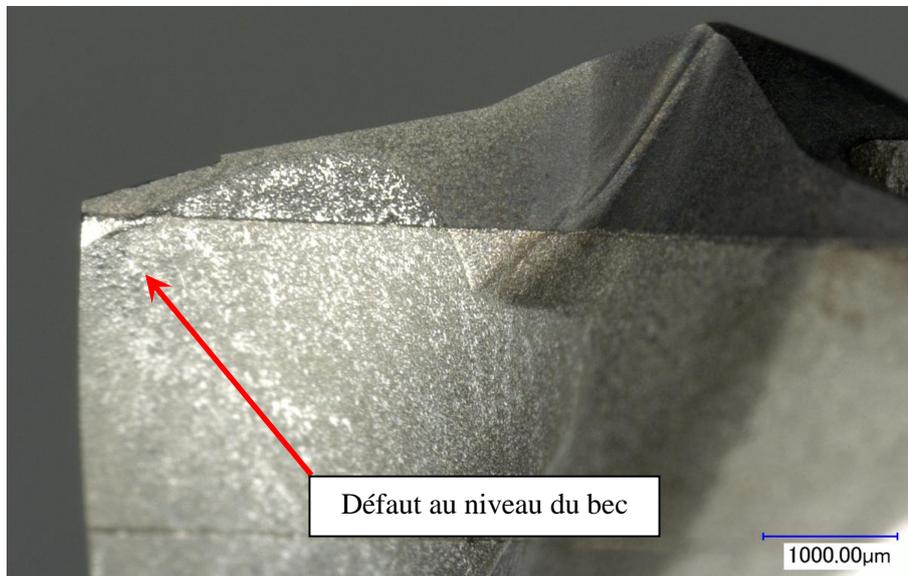
L'outil n'a pas pu effectuer un perçage à l'aide de ces conditions opératoire. Etant donné que le bec et les listels semblent intacts, il serait intéressant de tester une géométrie proche de celle fournie, mais avec un renfort tout le long de l'arête et une coupe négative au niveau de l'âme.

Une avance plus faible peut permettre de préserver davantage l'arête de coupe en générant un couple plus faible.

Annexe 11 ESSAIS DE PERÇAGES A L'AIDE D'OUTILS EN PCD MONOBLOCS MODIFIES (V2)

1 - FORET AVANT USINAGE

Foret CX2 en dôme PCD de diamètre 9.545mm. Plusieurs défauts d'affutages sont relevés et pourraient être la cause de la non tenue lors de l'essai. Une marque sur la face de coupe de l'une des arêtes est présentée ci-dessous



2 - PERÇAGE DU CFRP

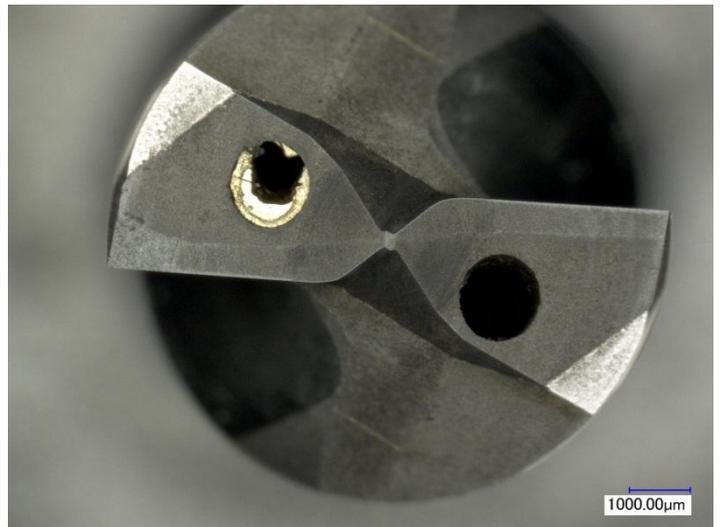
Conditions de coupe

$V_c = 100 \text{ m/min}$

$f = 0.05 \text{ mm/tr}$

Usinage à sec

Pas d'usure visible (seulement une petite marque sur la face de coupe et de dévissage).



3 - PERÇAGE DU Ti6AL4V

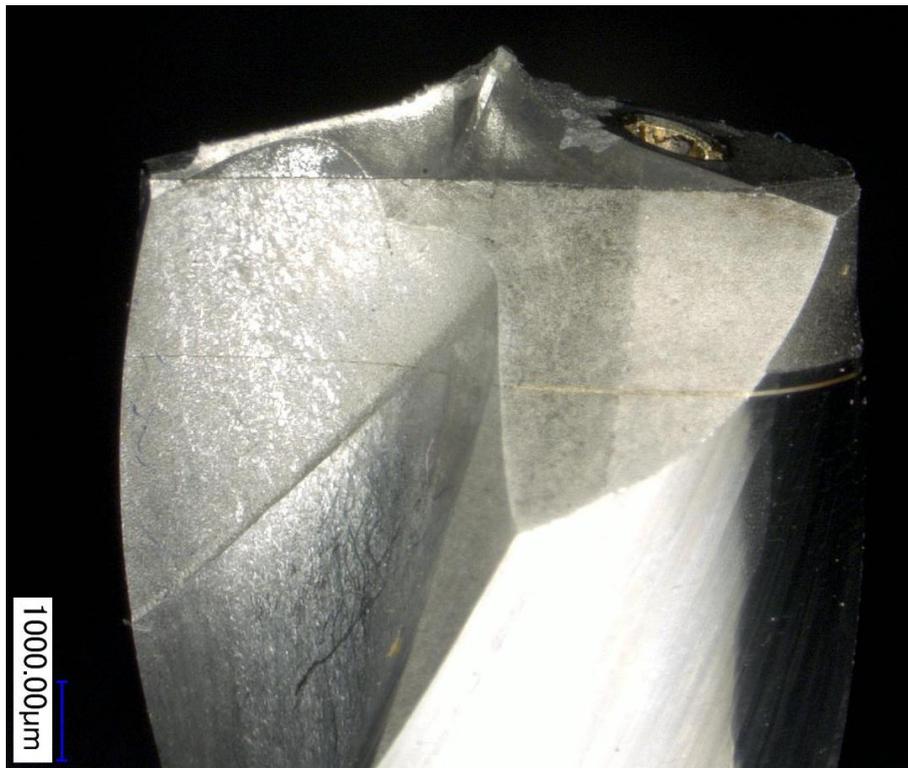
Conditions de coupe

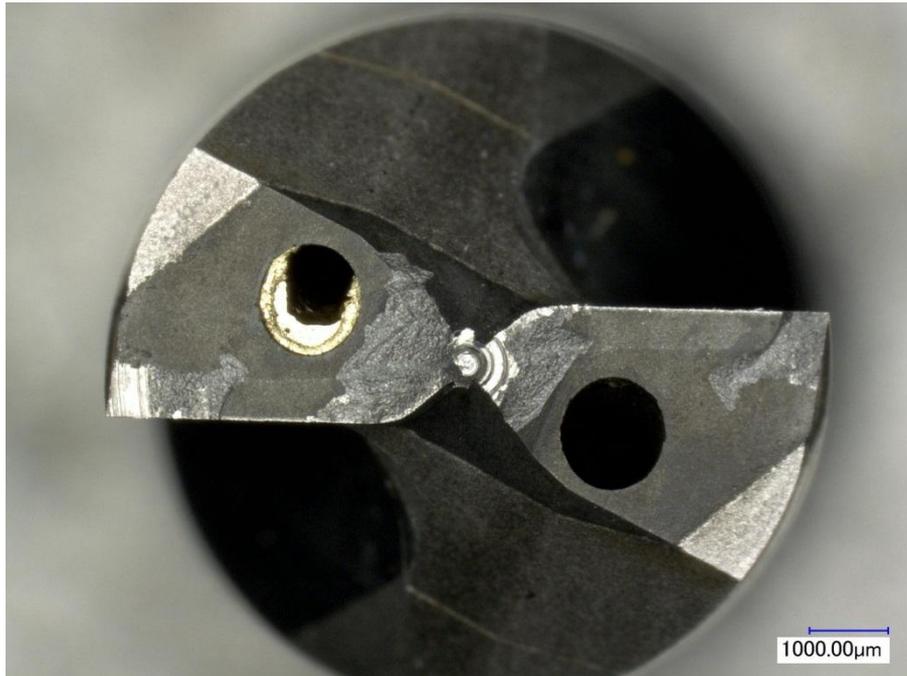
$V_c = 10 \text{ m/min}$

$f = 0.1 \text{ mm/tr}$

Usinage avec lubrification par le centre

Profondeur du perçage : 8mm





Nous pouvons remarquer deux zones dans lesquelles l'outil a cassé :

- Les becs (cela est peut avoir deux explications, soit il n'y avait plus suffisamment de PCD pour pouvoir encaisser les contraintes mécaniques, soit le défaut d'affutage et l'écaillage remarqué avant usinage à surchargé la seconde arête).
- L'âme (sur cette partie le renfort n'a visiblement pas suffi à renforcer l'arête).

4 - CONCLUSION

Nous ne pouvons affirmer qu'un outil ayant cette géométrie ne tiendrait pas dans le Ti6Al4V car il avait des défauts dès sa réception. Il faudrait que des essais soient réalisés avec l'outil n'ayant pas ces défauts.

Les défauts au niveau des becs ont pu générer les ruptures dans cette zone, néanmoins les milieux des arêtes semblent avoir tenu contrairement à la version précédente. Tout porte donc à croire que l'outil exempt de défaut au niveau des becs n'aurait subi de dommages qu'au niveau de l'âme. Il conviendra donc de porter tous les efforts de conception sur cette zone. Plusieurs géométries ont pu être proposées : un affutage sans amincissement d'âme ou avec un amincissement 2 pentes. Ces deux géométries ont pour avantage de limiter la coupe au niveau de l'âme et donc d'être plus robustes. Une autre géométrie pourrait être d'avoir un cône au niveau de l'âme qui ne couperait pas et ne ferait qu'extruder la matière.

Annexe 12 ESSAIS DE TRIBOLOGIE

1 - CONTEXTE

Les essais de tribologie prévus à l'aide de pions carbure et PCD a pour but de se placer dans les conditions de pression proches de celles rencontrées lors de d'usinage.

Un premier but est la sélection d'une nuance de PCD parmi les trois proposées par l'industriel.

Le second objectif de ces essais vise une meilleure compréhension des phénomènes aux interfaces des outils (face de coupe et de dépouille, éventuellement au niveau des listels) en vue d'améliorer les modélisations.

2 - ETUDE DU PERÇAGE A L'AIDE D'OUTILS CARBURES DANS LE Ti6Al4V

Des essais préliminaires en perçage à l'aide d'outils carbures dans du Ti6Al4V ont permis de revenir à des efforts moyens pour des sections élémentaires d'arête. En connaissant la longueur de contact entre le copeau et l'outil (mesure des marques laissées par la matière sur l'outil), on peut revenir à une pression moyenne sur des sections élémentaires de la face de coupe et de la face de dépouille.

2 - 1 - Effort de poussée

Le relevé des efforts de poussée moyens sur une zone de l'arête permet de définir les pressions moyennes sur la dépouille de l'arête primaire du foret.

| Position de la section d'arête | | Longueur de contact [mm] | Effort moyen [N] | Pression moyenne [MPa] | Vc maxi [m/min] |
|--------------------------------|-----------|--------------------------|------------------|------------------------|-----------------|
| mini [mm] | maxi [mm] | | | | |
| 0 | 0.5 | 0.065 | 350 | 10853 | 0.83 |
| 0.5 | 1 | 0.070 | 250 | 7143 | 1.67 |
| 1 | 1.5 | 0.080 | 150 | 3750 | 2.50 |
| 1.5 | 2 | 0.074 | 100 | 2703 | 3.33 |
| 2 | 2.5 | 0.083 | 50 | 1205 | 4.17 |
| 3.5 | 4 | 0.100 | 20 | 400 | 6.67 |
| 5.5 | 6 | 0.100 | 15 | 300 | 10.00 |

Les informations présentées dans le tableau ci-dessus nous indiquent que les pressions locales sont très élevées au niveau de l'âme du foret (où la vitesse de glissement est très faible) et tendent à se réduire au niveau des becs (où la vitesse de glissement est la plus élevée).

Il sera donc important dans le choix des pressions moyennes de s'assurer que nous nous approcherons de ces conditions dans la mesure du possible.

Deux plages de paramètres pourront donc être envisagées pour modéliser les phénomènes présents sur la face de dépouille : des vitesses faibles et des pressions élevées et des vitesses plus élevées avec des pressions relativement faibles.

2 - 2 - Effort de coupe

Dans le cas des efforts de coupe, nous nous intéresserons aux couples élémentaires, que nous considérerons générés par la face de coupe du foret, ce qui permet d'avoir des efforts de coupe élémentaires le long de cette face. En mesurant la longueur de contact copeau-outil le long de la face de coupe, nous pouvons donc estimer des pressions moyennes le long de la face de coupe.

| Position de la section d'arête | | Longueur de contact [mm] | Effort moyen [N] | Pression moyenne [MPa] | Vc maxi [m/min] |
|--------------------------------|-----------|--------------------------|------------------|------------------------|-----------------|
| mini [mm] | maxi [mm] | | | | |
| 0 | 0.5 | 0.200 | 525 | 5250 | 0.83 |
| 0.5 | 1 | 0.200 | 450 | 4500 | 1.67 |
| 1 | 1.5 | 0.200 | 400 | 4000 | 2.50 |
| 1.5 | 2 | 0.200 | 275 | 2750 | 3.33 |
| 2 | 2.5 | 0.200 | 200 | 2000 | 4.17 |
| 2.5 | 3 | 0.200 | 175 | 1750 | 5.00 |
| 3 | 3.5 | 0.200 | 175 | 1750 | 5.83 |
| 3.5 | 4 | 0.200 | 175 | 1750 | 6.67 |
| 4 | 4.5 | 0.200 | 175 | 1750 | 7.50 |
| 4.5 | 5 | 0.200 | 150 | 1500 | 8.33 |
| 5 | 5.5 | 0.200 | 100 | 1000 | 9.17 |
| 5.5 | 6 | 0.200 | 50 | 500 | 10.00 |

Là encore, les pressions les plus élevées se retrouvent là où les vitesses sont les plus faibles. Néanmoins la frontière est moins marquée que sur la face de dépouille.

Les ordres de grandeurs relevés dans cette étude nous permettent de sélectionner les valeurs de pressions et de vitesses pour l'étude en tribologie à l'aide de pions en carbure et PCD.

3 - ETUDE EN TOURNAGE A L' AIDE D' OUTILS CARBURE ET PCD

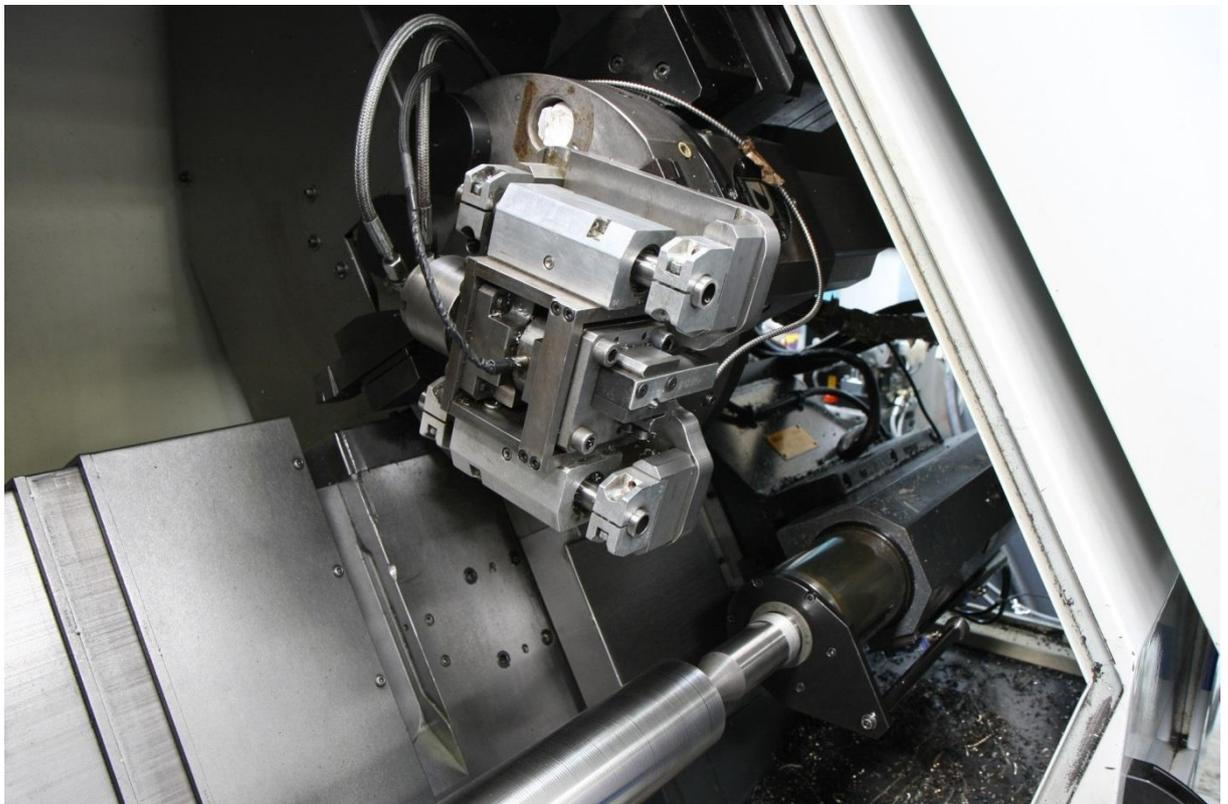
Lors d'essais précédents de tournage en PCD et en Carbure (projet de Benjamin ROUX), nous avons remarqué que la vitesse de coupe minimale est multipliée par 2 à 3, de plus, cette étude nous a montré que le K_c était légèrement supérieur (passant de 2200 MPa à 2500 MPa, soit +10% environ) pour des vitesses identiques. Les ordres de grandeurs étant sensiblement les mêmes, nous nous baserons sur les valeurs calculées à l'aide d'outils carbure pour les tests sur les pions en diamant, tout en essayant d'aller à des vitesses de glissement plus élevées.

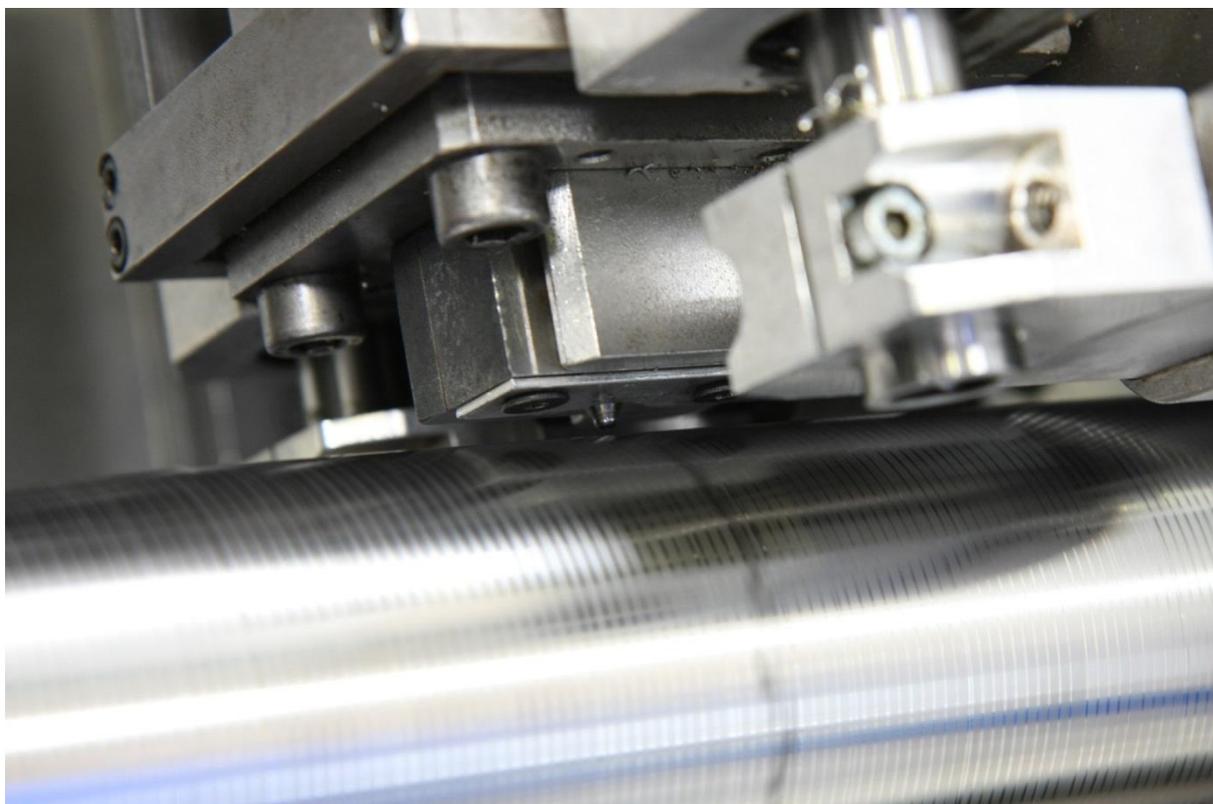
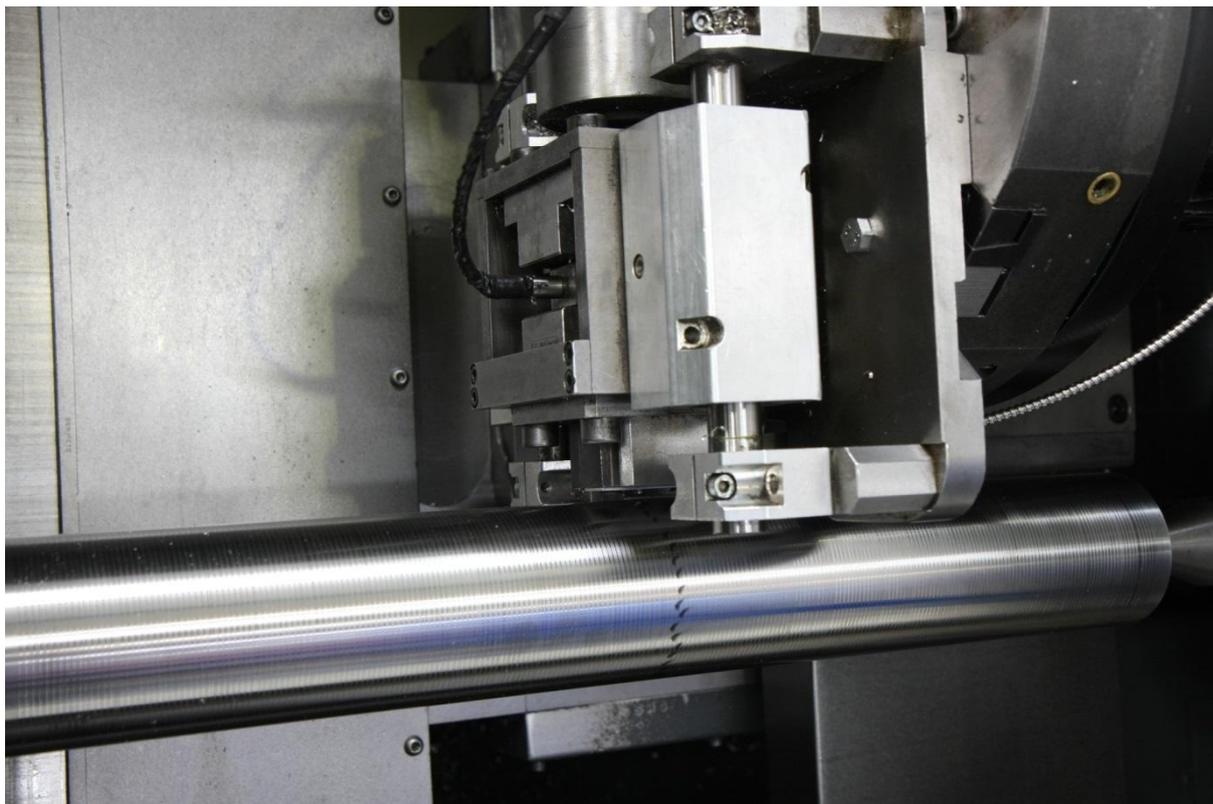
4 - DEROULEMENT DES ESSAIS DE TRIBOLOGIE

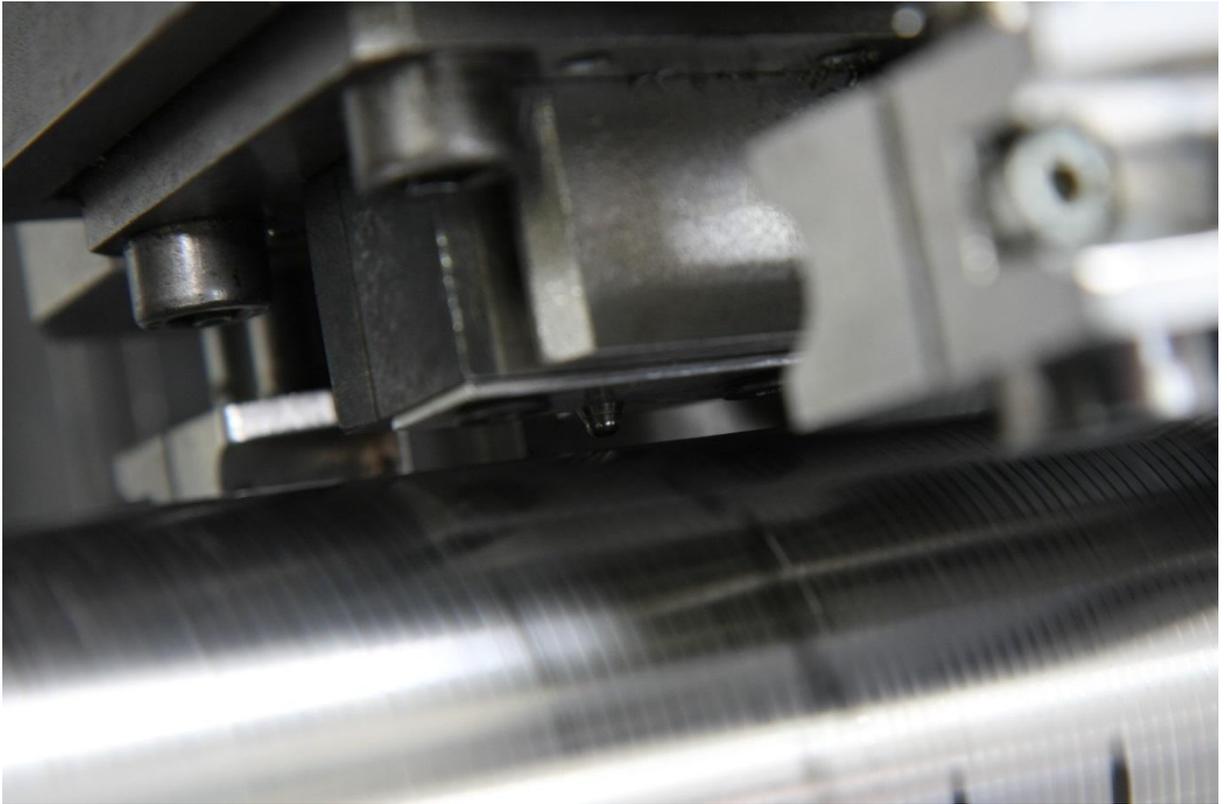
Les essais ont consistés à effectuer des essais de tribologie, en faisant frotter un pion sur une barre de Ti6Al4V de la même nuance que celle des plaques percées chez Airbus.

Les conditions de pression et de vitesses de frottement ont été sélectionnées pour représenter au mieux ce qui se passe en perçage de Ti6Al4V.

Le système employé, présent au sein de l'ENISE de Saint-Étienne, est présenté ci-dessous.







Le vérin hydraulique assure un effort pouvant varier de 100 N à 1000 N, la mesure est effectuée à l'aide d'une platine dynamométrique Kistler (permettant de s'assurer de la charge appliquée ainsi que de l'effort tangentiel, permettant de revenir au coefficient de frottement (présenté dans les résultats). La température du pion est assurée par le biais d'une thermistance.

Les acquisitions de températures et d'efforts sont effectuées par deux ordinateurs distincts (ne permettant pas de synchronisation entre les signaux).

5 - PLAN DES ESSAIS DE TRIBOLOGIE

Les pions PCD ont été testés à diverses vitesses et pressions. Les essais réalisés sont indiqués dans le tableau suivant.

| Effort presseur [N] | Vitesse de frottement [m/min] | Nuance de PCD (N° Pion) |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 100 N | 5 m/min | PCD 1 (Pion 2) |
| 100 N | 5 m/min | PCD 2 (Pion 5) |
| 100 N | 5 m/min | PCD 3 (Pion 8) |
| 100 N | 10 m/min | PCD 1 (Pion 1) |
| 100 N | 10 m/min | PCD 2 (Pion 4) |
| 100 N | 10 m/min | PCD 3 (Pion 7) |
| 100 N | 20 m/min | PCD 1 (Pion 3) |
| 100 N | 20 m/min | PCD 2 (Pion 6) |
| 100 N | 20 m/min | PCD 3 (Pion 9) |
| 250 N | 5 m/min | PCD 1 (Pion 2) |
| 250 N | 5 m/min | PCD 2 (Pion 5) |
| 250 N | 5 m/min | PCD 3 (Pion 8) |
| 250 N | 10 m/min | PCD 1 (Pion 1) |
| 250 N | 10 m/min | PCD 2 (Pion 4) |
| 250 N | 10 m/min | PCD 3 (Pion 7) |
| 250 N | 20 m/min | PCD 1 (Pion 3) |
| 250 N | 20 m/min | PCD 2 (Pion 6) |
| 250 N | 20 m/min | PCD 3 (Pion 9) |
| 500 N | 5 m/min | PCD 1 (Pion 2) |
| 500 N | 5 m/min | PCD 2 (Pion 5) |
| 500 N | 5 m/min | PCD 3 (Pion 8) |
| 500 N | 10 m/min | PCD 1 (Pion 1) |
| 500 N | 10 m/min | PCD 2 (Pion 4) |
| 500 N | 10 m/min | PCD 3 (Pion 7) |
| 500 N | 20 m/min | PCD 1 (Pion 3) |
| 500 N | 20 m/min | PCD 2 (Pion 6) |
| 500 N | 20 m/min | PCD 3 (Pion 9) |
| 1000 N | 5 m/min | PCD 1 (Pion 2) |
| 1000 N | 5 m/min | PCD 2 (Pion 5) |
| 1000 N | 5 m/min | PCD 3 (Pion 8) |
| 1000 N | 10 m/min | PCD 1 (Pion 1) |
| 1000 N | 10 m/min | PCD 2 (Pion 4) |
| 1000 N | 10 m/min | PCD 3 (Pion 7) |
| 1000 N | 20 m/min | PCD 1 (Pion 3) |
| 1000 N | 20 m/min | PCD 2 (Pion 6) |
| 1000 N | 20 m/min | PCD 3 (Pion 9) |

Tableau 30 : Tableau des essais pour la tribologie (Pions en PCD sur du Ti6Al4V)

6 - RESULTATS

Les efforts ont été relevés lors du frottement du pion sur la surface en fonction des diverses conditions.

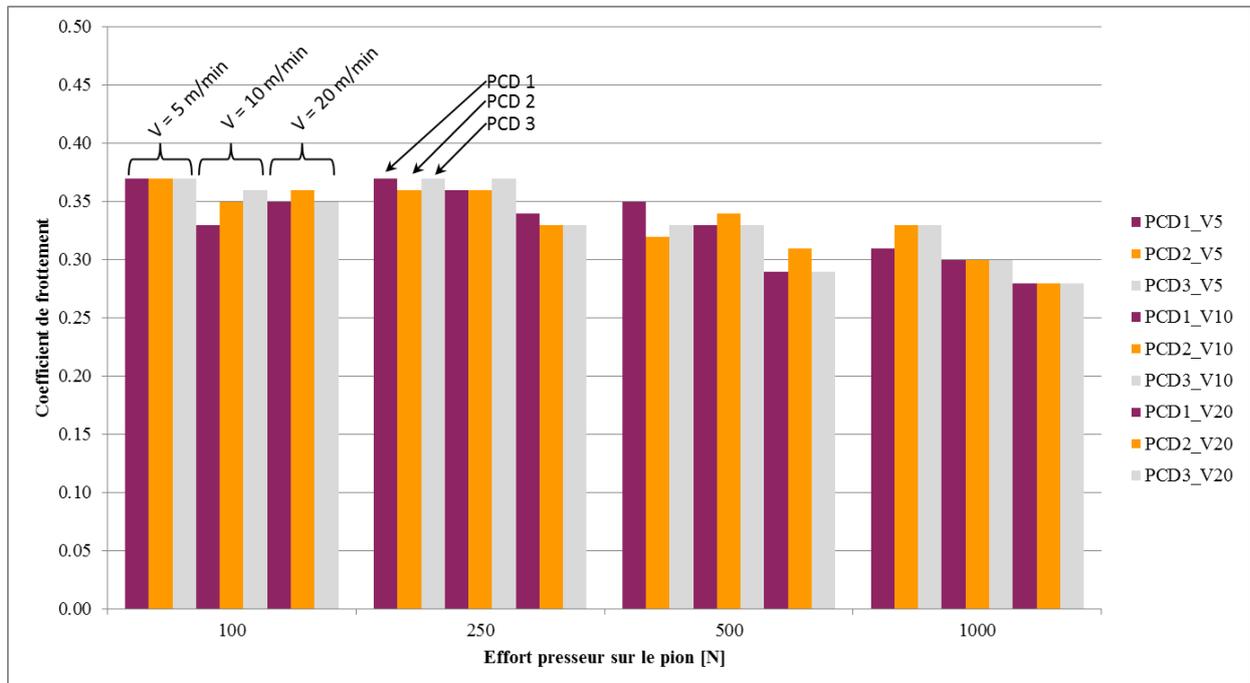
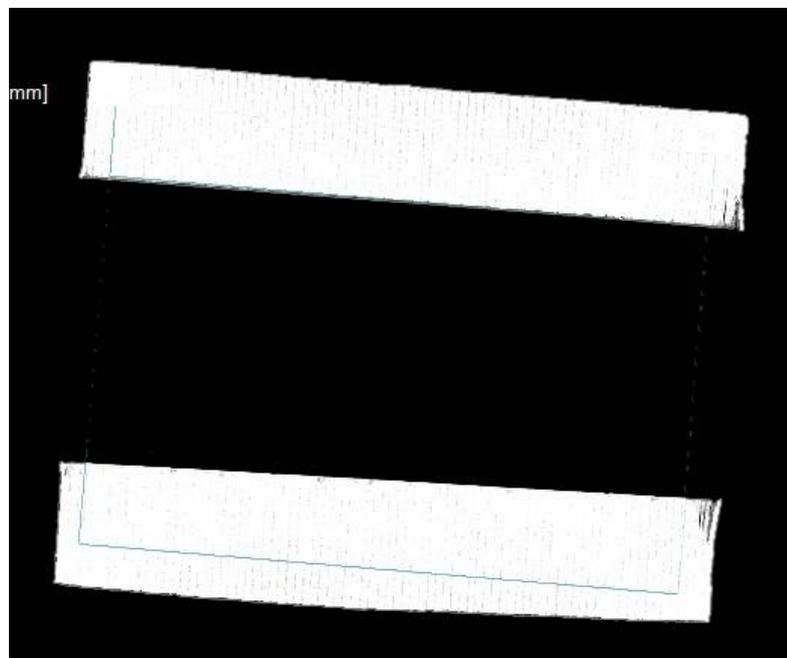
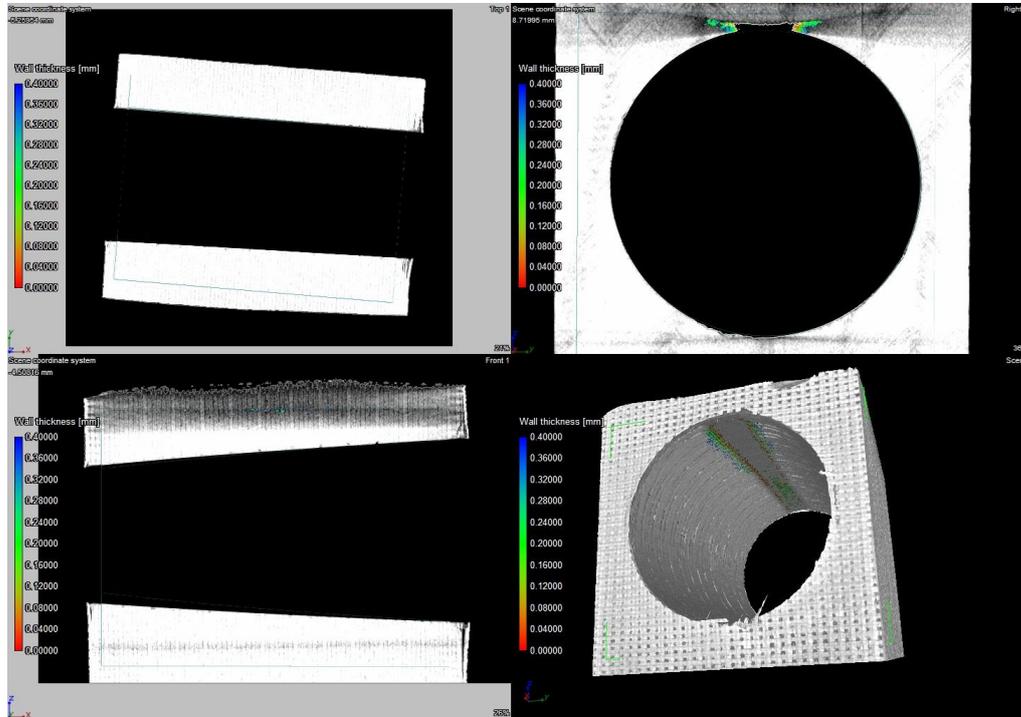


Figure 150 : Evolution des coefficients de frottement de trois PCD en fonction de l'effort sur le pion et de la vitesse de glissement

Nous ne semblons pas être en mesure de différencier un diamant par rapport à un autre par le biais de ces essais. Nous ne pouvons donc conclure sur nuance de PCD la plus appropriée à l'usinage du Ti6Al4V.

La largeur des sillons dans la pièce de Ti6Al4V ainsi que les températures ont également été relevée, mais, tout comme les efforts, ces données ne permettent pas de différencier de manière probante les nuances de PCD.

Annexe 13 RESULTATS DE TOMOGRAPHIE



Annexe 14 PRESENTATION DE THESE DU 15/12/2014



Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibres de carbone

Antoine POUTORD

Soutenance de thèse
15 décembre 2014

M. Gérard POULACHON, PR, LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech Cluny
M. Frédéric ROSSI, MCF, LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech Cluny

Directeur
Co-encadrant

M. Benoit FURET, PR, IRCCyN, Université de Nantes
M. Redouane ZITOUNE, MCF HDR, IUT GMP, Université Paul Sabatier, Toulouse
M. Joël RECH, PR, LTDS, ENISE
M. Guillaume ABRIVARD, Docteur, Airbus Group Innovations
M. Rachid M'SAOUBI, Docteur, SECO Tools Suède

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Invité



15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse
Cluny, France

Contexte

Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives

Contexte général et industriel



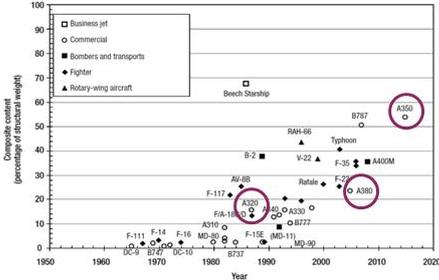
Mât de réacteur [Airbus]



De $750 \cdot 10^3$ à $1.5 \cdot 10^6$ trous [Airbus]



Répartition en masse des matériaux composant l'aéronef A350 XWB [Airbus]



Evolution de la composition en composites des structures d'aéronefs [Lantrip_08]






Antoine POUTORD

2 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Contexte Industriel

☐ Matériaux difficiles à usiner

25.5 mm
Ti6Al4V

20 mm
IMA M21E

Structure d'un composite à fibres longues [Mondelin_97]

Module d'élasticité faible (113,8 GPa)
Conductivité thermique faible ($6,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
Réactivité chimique importante

Matériau hétérogène & anisotrope
Dureté élevée des fibres
Résine époxyde $T_{\text{polymérisation}} = 180^\circ\text{C}$

Fibre de carbone

Epaisseur de plis : 250 μm

0°
+45°
-45°
90°
90°
-45°
0°

LaBoMaP. LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS

SECO EADS Antoine POUTORD 3 / 40

Résine M21E similaire à la résine M21, mais contenant des nodules de thermoplastiques.

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Contexte Industriel

☐ Une opération complexe : le perçage

- Variations le long du rayon (géométrie et V_c)
- Opération fermée

Délaminage à l'entrée

Ré-usinage par les copeaux de Ti6Al4V

Carbonisation

Fibres arrachées

Défauts géométriques et dimensionnels

Délaminage inter-fibre (MEB et Tomographie)

Bavure

Délaminage en sortie et fibres non coupées

LaBoMaP. LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS

SECO EADS Antoine POUTORD 4 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Contexte Scientifique

- Suite de l'étude de C. Bonnet 2010
 - Définition d'une géométrie outil
 - Perçage des matériaux séparément
 - Etude du délaminage

Contexte

Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives

Impact des revêtements sur les diamètres de trous [Brinkmeier_02]

Outil 1
Outil 2

Avec vibratoire Sans vibratoire

Evolution des températures CFRP/Aluminium [Jallageas_13]

Zones de conditions de coupe [Bonnet_10]

Evolution des efforts en empilage CFRP/Aluminium [Gouleau_07]

Evolution des efforts en empilage [Ramulu_01]

Logos: ARTS ET MÉTIERS ParisTech, LaBoMaP, SECO, EADS, Antoine POUTORD 5 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Première étude du perçage : l'alternance

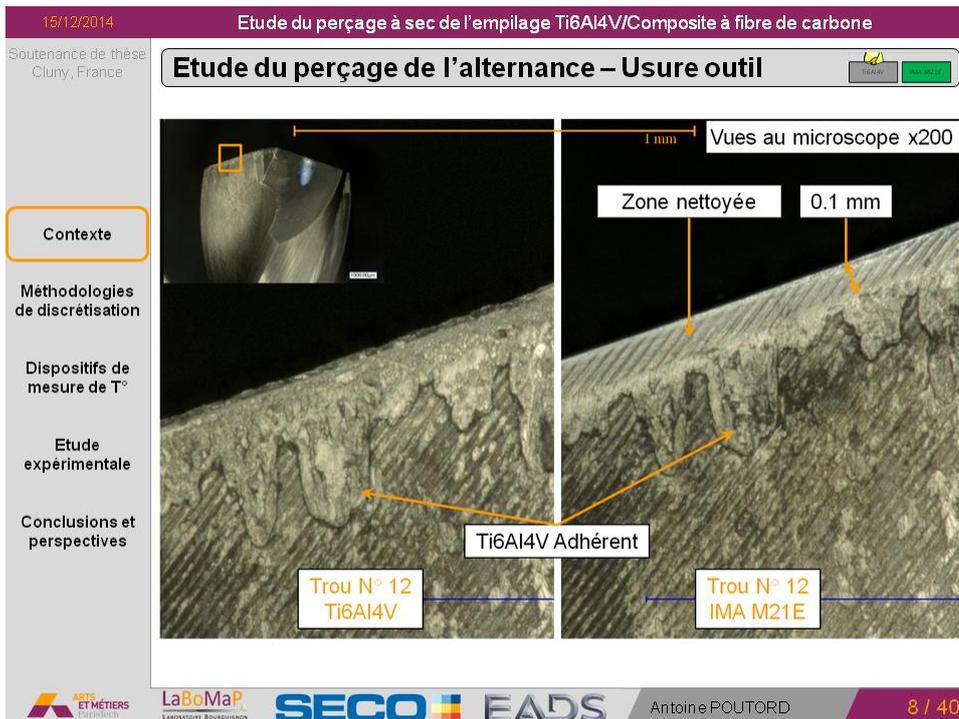
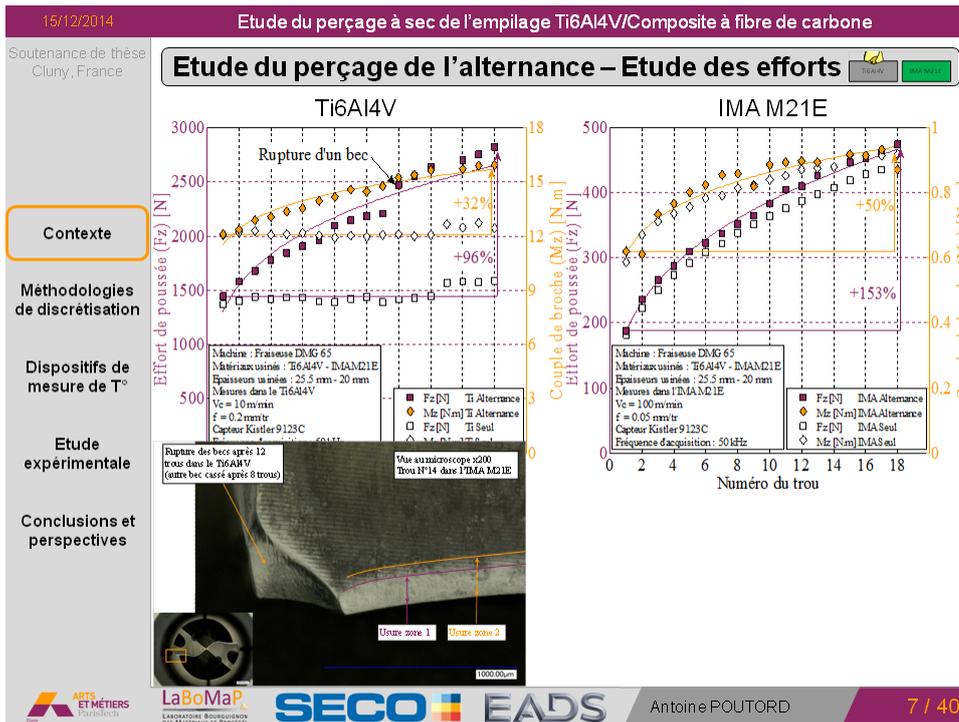
➔

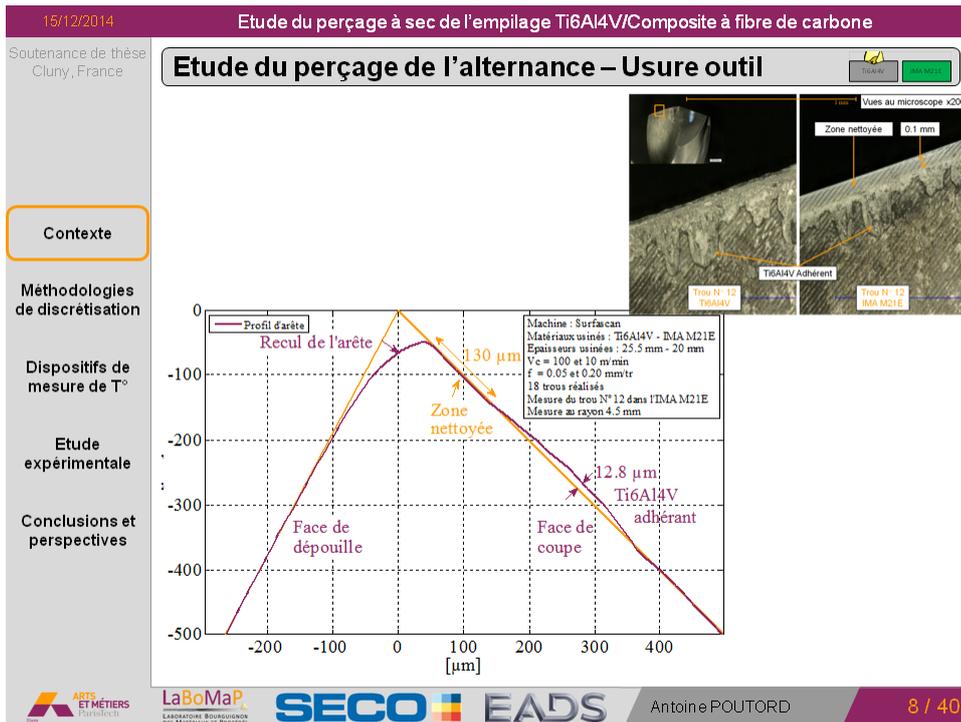
Vc = 10 m/min 100 m/min

f = 0.2 mm/tr 0.05 mm/tr

- Objectif
 - Décorrélation des effets des matériaux
- Avantages
 - Complexité réduite
 - Pas de changement de conditions de coupe
 - Extraction des copeaux simplifiée

Logos: ARTS ET MÉTIERS ParisTech, LaBoMaP, SECO, EADS, Antoine POUTORD 6 / 40





15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Etude du perçage de l'alternance – Conclusion

- Faible impact de l'usinage du Ti6Al4V sur l'usure
- Rupture des becs dans le Ti6Al4V
- Echauffement du foret avec l'usure (non mesuré)

Caractérisations locales nécessaires

- Les efforts locaux
- La température dans le foret

ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOULONNAIS DES MATÉRIELS ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 9 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Etude des efforts locaux

Contexte

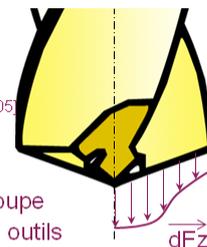
Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives

- ❑ Objectif
 - Déterminer les efforts le long de l'arête du foret
 ⇒ Notion de Couple Arête Matière (CAM) [Bissey_05]
- ❑ Intérêt
 - Pour l'amélioration de la compréhension de la coupe
 - Pour le développement de nouvelles géométries outils
 - Pour la simulation mécanique/thermique
 (Lien avec Dr. Lazoglu, Koc University, Istanbul, Turkey)
- ❑ Contraintes
 - Géométrie outil complexe
 - Outil tournant (dans la plupart des cas)
- ❑ Mise au point de trois méthodologies expérimentales
 - Décomposition physique
 - Décomposition de l'enfoncement de la pointe [Claudin_06]



ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP. LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 10 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Méthodologies de discrétisation

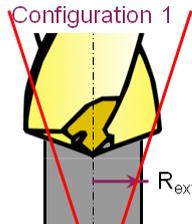
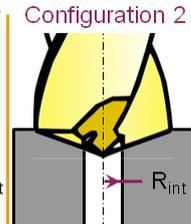
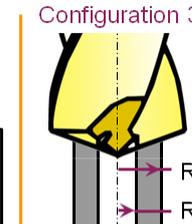
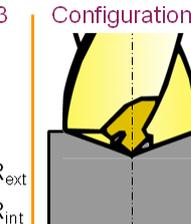
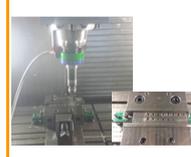
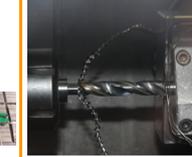
Contexte

Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives

| Configuration 1 | Configuration 2 | Configuration 3 | Configuration 4 |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| Rayon extérieur de la pièce usinée variant | Rayon intérieur variant | Rayon intérieur et extérieur variant | Décomposition en perçant en pleine matière |
| Problème lié au flambement pour R < 4 mm | Perçage d'avant-trous | Méthodologie développée sur tour | Split tool [Barrow_82] [Kato_72] |
| |  |  | Enfoncement de pointe [Claudin_06] |

ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP. LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 11 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Calcul des efforts linéiques locaux

□ Lien entre l'enfoncement de la pointe et l'engagement d'arête

Hypothèses

- Indépendance des segments
- Efforts constants sur chaque segment

Précautions

- Traitement du signal
- Détection du point de contact outil/pièce
- Détermination de l'angle de pointe

$$R_{eq} = \frac{2 \cdot (R_{ext}^3 - R_{int}^3)}{3 \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2)}$$

ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOUCANONNE DES MATÉRIELS ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 12 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Etude des efforts locaux – Comparaison et conclusion

Variations de F_c à l'âme

- Mz faible en début de perçage
- Rayon équivalent faible
- Hypothèse d'effort constant sur un segment d'arête

Fz des listels important

- Sensibilité importante au bruit de mesure
- Défaut d'alignement outil-broche
- Rigidité du montage plus faible

Machine : Tour T400 et Fraiseuse DMG 65
Matériau usiné : Ti6Al4V
 $V_c = 10$ m/min
 $f = 0.2$ mm/tr
Capteur Kistler 9121 et 9123C
Fréquence d'acquisition : 40 kHz

Couleur

- Essais sur tour (piens)
- Essais sur fraiseuse (pré-trous)
- Décomposition de l'enfoncement de pointe

Effort linéique de poussée (F_z) [N/mm]

Effort linéique de coupe (F_c) [N/mm]

Rayon du foret [mm]

90 N/mm

Variation 30 %

Values en N

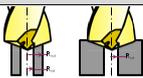
ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOUCANONNE DES MATÉRIELS ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 13 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Etude des efforts locaux – Conclusion

Décomposition physique de l'arête



- Décomposition en quelques segments d'arête
- Nombreux usinages nécessaires ⇒ Expérimentation complexe
- Dépouillement des données simples
- Sensible aux diamètres usinés
- Bruit d'acquisition et effets de peau lissés
- Pour l'usinage de pions : besoin de mesurer le couple

Décomposition de l'enfoncement de pointe



- Méthode « continue »
- Usinage unique ⇒ Expérimentation simple ⇒ Sans préparation de pièce
- Dépouillement des données complexes
- Sensible à l'angle de pointe
- Sensible aux effets de peau du matériau
- Sensible au bruit d'acquisition

Contexte

Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives



Antoine POUTORD 14 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Développement associé aux efforts le long de l'arête

Développement d'un programme Matlab interfacé pour la recomposition des efforts le long de l'arête

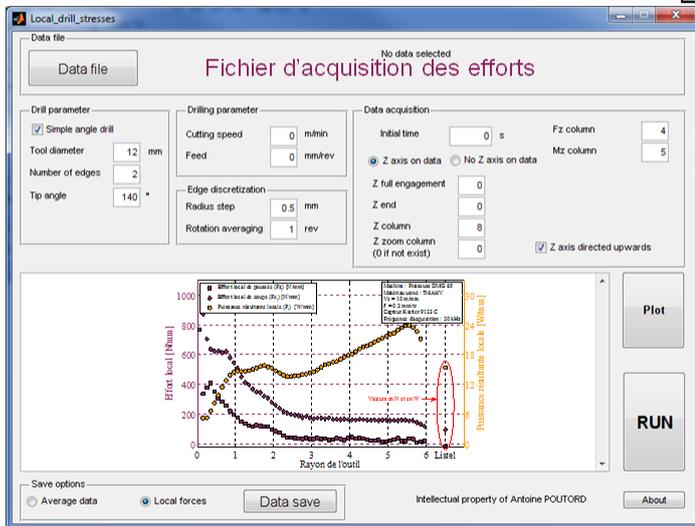
Contexte

Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives



The screenshot shows a software window titled 'Local_drill_stresses' with a 'Fichier d'acquisition des efforts' section. It includes input fields for drill parameters (tool diameter: 12 mm, tip angle: 140°), drilling parameters (cutting speed, feed), and data acquisition settings (initial time, Z-axis on data, Z-axis directed upwards). A graph plots 'Effort local [N/mm]' against 'Rayon de l'outil [mm]' from 0 to 6 mm. The graph shows two curves: a black one for 'Effort local (N/mm)' and a yellow one for 'Pression radiale (N/mm)'. A 'RUN' button is visible on the right side of the interface.



Antoine POUTORD 15 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse
Cluny, France

Dispositifs de mesure des températures

Contexte

Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives

- ❑ Objectif
 - Mesurer la température dans le foret en cours d'usinage
- ❑ Intérêt
 - Industriel
Réduction des risques de brûlure de la matrice
Meilleure maîtrise du procédé
 - Scientifique
Information d'entrée pour les modélisations
Meilleure compréhension des phénomènes
- ❑ Contraintes
 - Opération fermée
 - Opération de perçage ⇒ outil tournant
 - Implantation de 6 thermocouples dans l'outil

⇒ Développement de systèmes de mesure de températures dans le foret

[Bonnet_10]

ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOUCHELIERS DES MÉTIERS ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 16 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse
Cluny, France

Foret fixe – Expérimentation

Contexte

Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives

Acquisition non visible ici :

- Position de la tourelle (règles)
- Position angulaire de la broche
- Vitesse de broche
- Courant de broche

Outils de préparation de la surface percée

Tourelle porte outils

Câble 9 composantes

Platine Kistler 9121

Foret

6 Thermocouples K

Points techniques

- Alignement outil-broche

1.20 ± 0.05
1.20 ± 0.05
1.20 ± 0.05
2 ± 0.05
3.50 ± 0.05
5 ± 0.05

ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOUCHELIERS DES MÉTIERS ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 17 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Foret fixe – Résultats

- Avantages
 - Pas de problème de transmission
 - Possibilité d'acquérir à des fréquences élevées
 - Possibilité d'employer divers engagements d'arêtes
- Inconvénients
 - Pas de problématique de sortie de l'outil
 - Essais en série/sur des plaques
 - Alignement outil-broche
- Conclusion
 - Nécessité de développer un système pour outil tournant

Machine : Toss T400
Matériau usiné : Ti6Al4V
Vc = 10 m/min
f = 0,2 mm/tr
Capteur Kistler 9121
Fréquence d'acquisition 50 kHz

ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 18 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Dispositif Bluetooth – Développement

- Systèmes existants
(Contrainte : garder la mesure des efforts à l'aide du capteur rotatif Kistler)

| Fabricant | Atcom | BMI | LaBoMaP |
|--------------------|--------------------|-----------|-----------|
| Nb voies | 8 | 6 | 6 |
| Fréquence max/voie | 1 Hz | 1 000 Hz | 800 Hz |
| Accélération max. | 10 000 g | 1 500 g | 1 500 g |
| Transmission | HF | HF | Bluetooth |
| Alimentation | Batterie/induction | | Batterie |
| Coût | 6 k€ | 21 k€ | 500 € |
| Délais | 1 mois | 1,5 année | 5 mois |

[Roux_12]

Cahier des charges initial

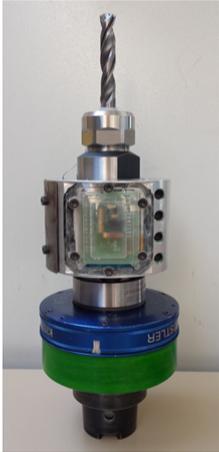
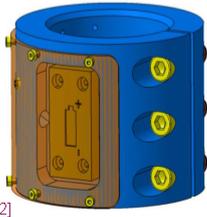
ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 19 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Dispositif Bluetooth – Développement

- ❑ Premier système – prototype – transmission Bluetooth
- ❑ Caractéristiques
 - Montage sur le capteur d'effort rotatif
 - Fréquence d'acquisition 5 Hz
 - Résolution de 0.25°C (codage 12 bits)
 - Vitesse de rotation maximale de 4000 tr/min
- ❑ Inconvénients
 - Traitement du signal important
 - Autonomie de la batterie

[Roux_12]

ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoin e POUTORD 20 / 40

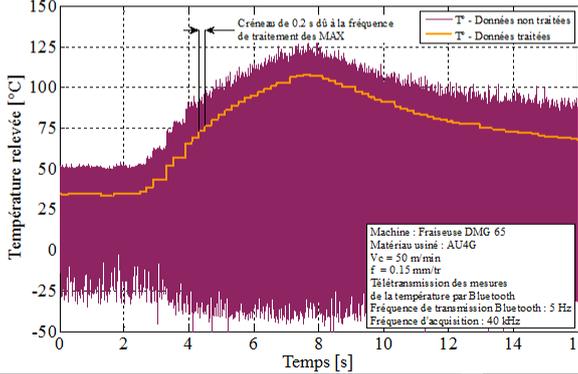
15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Dispositif Bluetooth – Résultats

- ❑ Points à améliorer
 - Fréquence de transfert
 - Système d'alimentation
 - Fiabilité de l'électronique

Fiabilité mise à mal par les forces centrifuges



Machine : Fraisuse DMG 65
 Matériau usiné : AL4G
 $V_c = 50 \text{ m/min}$
 $f = 0.15 \text{ mm/tr}$
 Télétransmission des mesures de la température par Bluetooth
 Fréquence de transmission Bluetooth : 5 Hz
 Fréquence d'acquisition : 40 kHz



ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoin e POUTORD 21 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Dispositif à collecteur – Développement

Contexte

Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives

Carte NI 9205

Cu (Fil)

T_{piste}

Cu (Piste)

K⁺

K⁻

Jonction du thermocouple

Carte NI 9205

Cu

Cu

Capteur Kistler 9123C

Branchement des TC

Lames ressort

Fistes en cuivre

ARIS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOURGOISON DES MATÉRIELS ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 22 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Dispositif à collecteur – Développement

Contexte

Méthodologies de discrétisation

Dispositifs de mesure de T°

Etude expérimentale

Conclusions et perspectives

Capteur Kistler 9123C

Système de transmission de température à balais

Aspiration

Foret SECO Tools

Bridage

Pièce à usiner (empilage CFRP/Ti6Al4V)

Support de bridage

Capteur Kistler 9123C

Branchement des TC

Lames ressort

Fistes en cuivre

ARIS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOURGOISON DES MATÉRIELS ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 22 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Dispositif à collecteur – Résultats

Avantages

- Absence de télétransmission
- Fréquence d'acquisition

Inconvénients

- Température de soudure froide
- Traitement du signal (Bruit d'acquisition élevé)
- Montage/démontage de l'outil
- Usure du système

Machine : Fraiseuse DMG 65
 Matériau usiné : IMAM21E/Ti6Al4V
 Vc = 100 et 10 m/min
 f = 0.05 et 0.2 mm/tr
 Capteur Kistler 9123C
 Mesure de la température à l'aide du dispositif à balais
 Fréquence d'acquisition 50 kHz

Température mesurée [°C]

Profondeur de perçage [mm]

Température de l'outil au niveau de l'âme

Antoine POUTORD

23 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Développement en cours : troisième système rotatif

Maintien des caractéristiques précédentes
 (Fixation sur le capteur rotatif, nombre de thermocouples, ...)

Fréquence d'acquisition des signaux plus élevée (> 1 kHz)

Stockage des données en interne
 (Limitation du Bluetooth à 800 Hz pour 6 informations de 12 bits)

Nouveau système d'alimentation

- Autre technologie d'accumulateurs
- Système à balais
- Système à induction

En développement par C. Ramirez dans le cadre d'un projet ANR (Thèse TITUS)

Antoine POUTORD

24 / 40

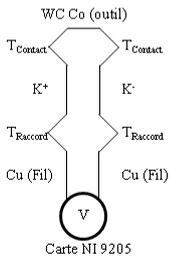
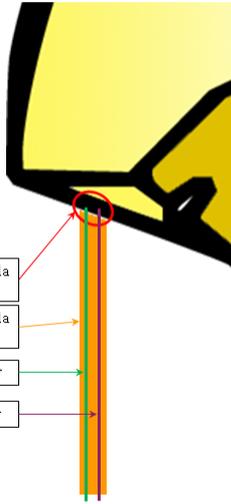
15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Dispositif de mesure de T° de l'arête par coupe de TC

[Baizeau_13]
[Ramirez_13]

- ❑ Système développé au sein du LaBoMaP
- ❑ Employé pour la mesure de température dans du T800 M21 unidirectionnel
- ❑ Précaution particulière : Nécessité d'isoler l'outil et la pièce
- ❑ Deux positionnements possibles

WC Co (outil)
T_{Contact} T_{Contact}
K⁺ K⁻
T_{Raccord} T_{Raccord}
Cu (Fil) Cu (Fil)
V
Carte NI 9205

Zones de mesure de la température
Sonde de mesure de la température
Fil thermocouple K⁺
Fil thermocouple K⁻

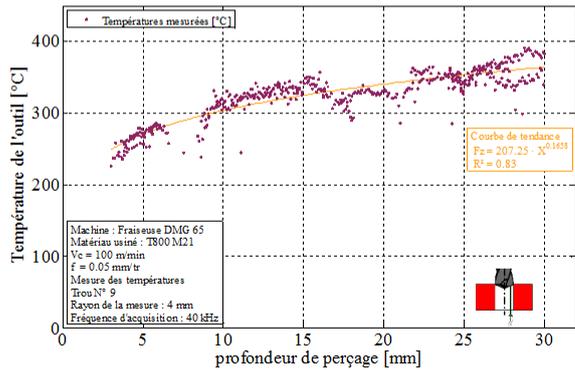
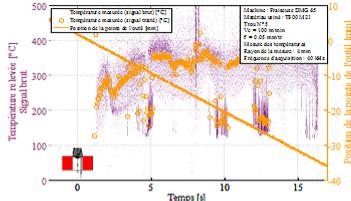
ARTIS ET MÉTIERS ParisTech
LaBoMaP LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS
SECO EADS
Antoine POUTORD 25 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Cluny, France

Coupe de TC – Résultats obtenus

- ❑ Evolution de la température de coupe avec la profondeur de perçage (Coupe des thermocouples radiaux)
- ❑ Traitement du signal important

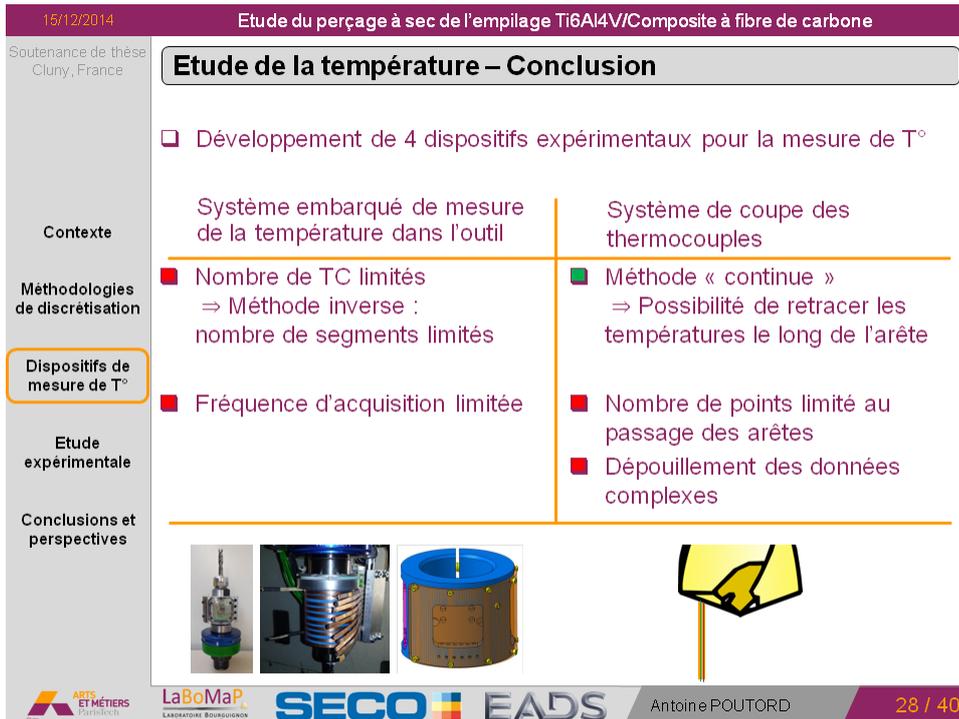
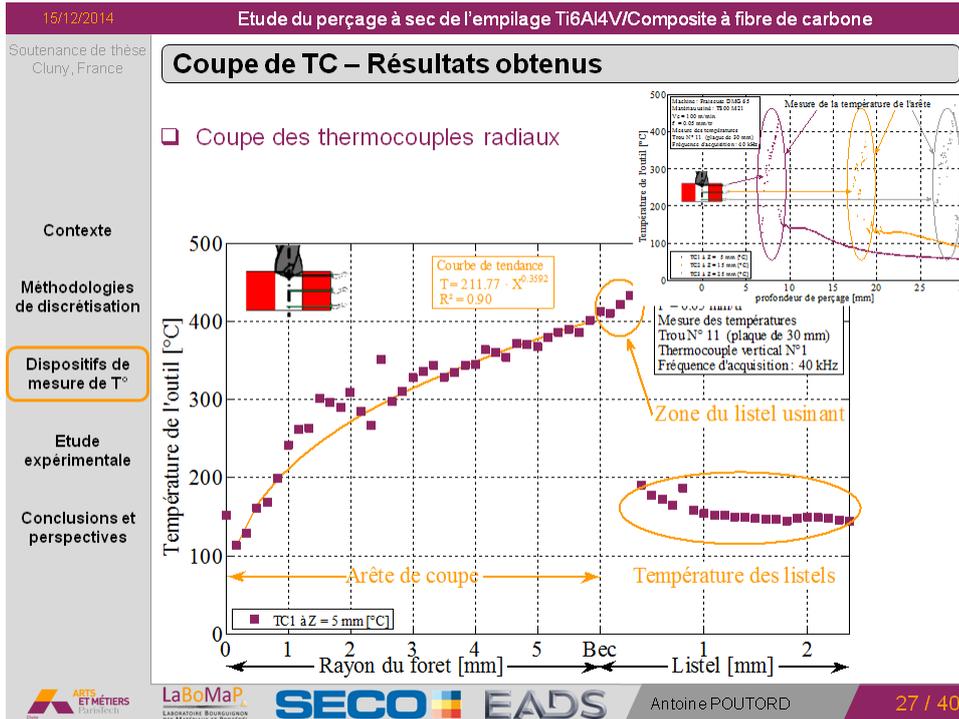



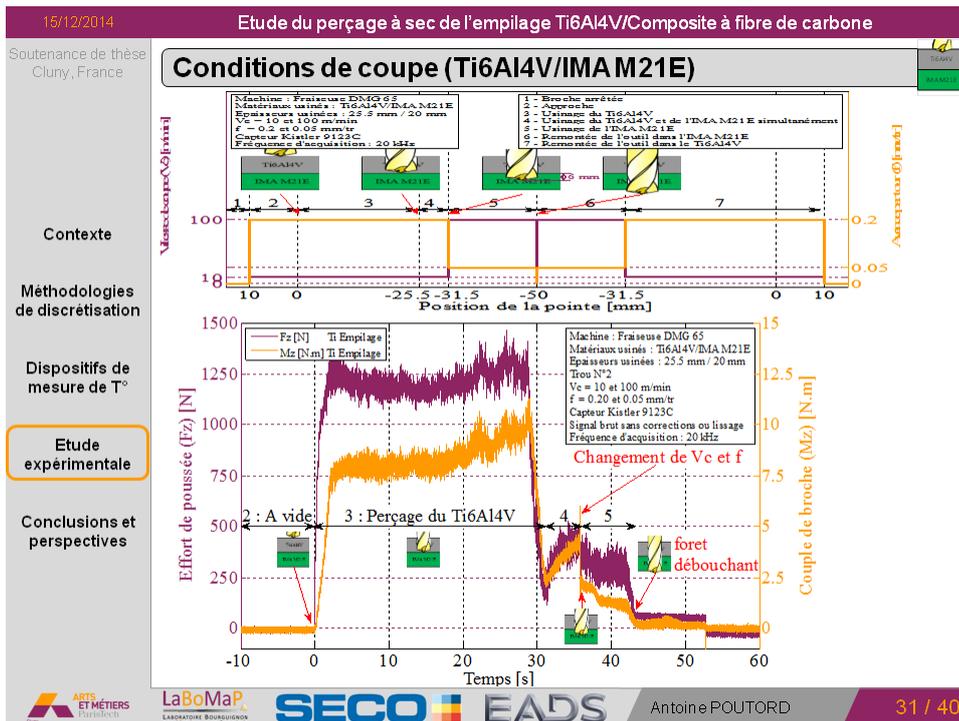
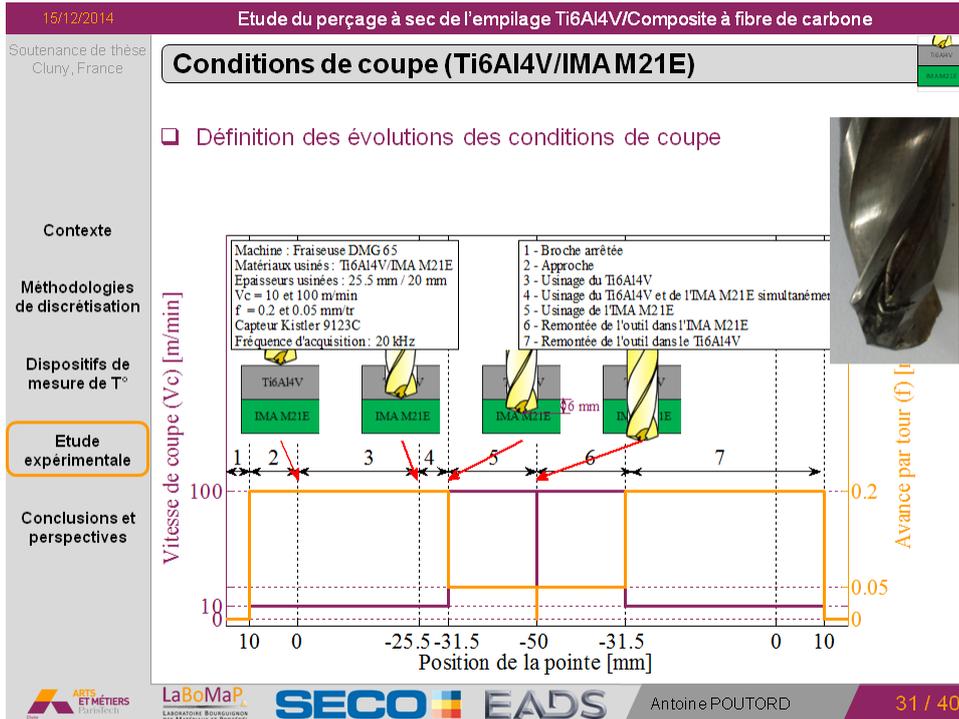
Température de l'outil [°C]
profondeur de perçage [mm]

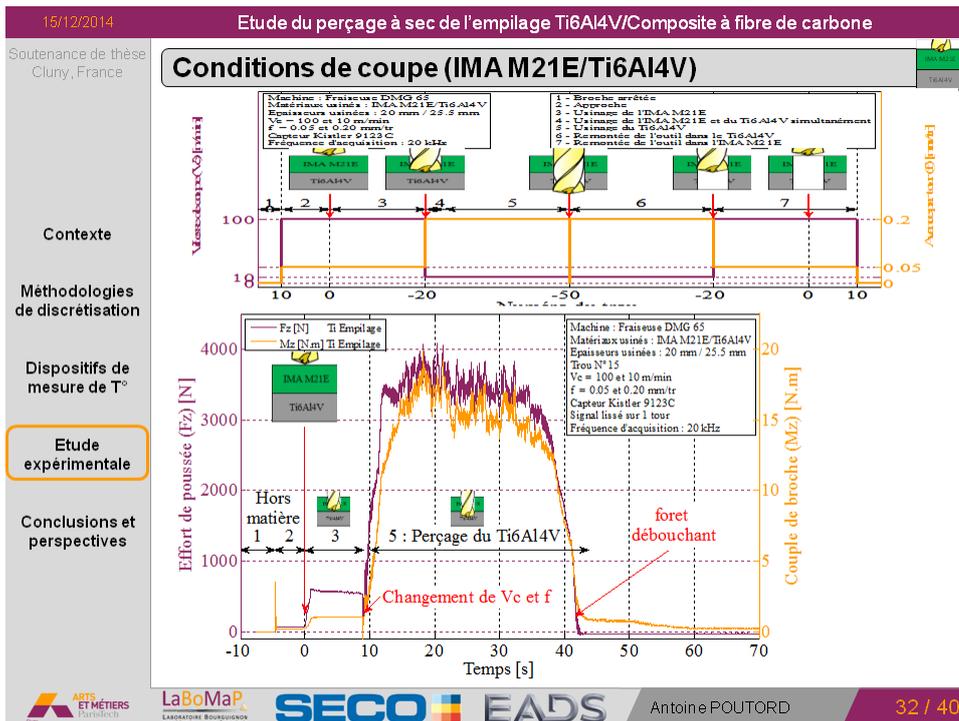
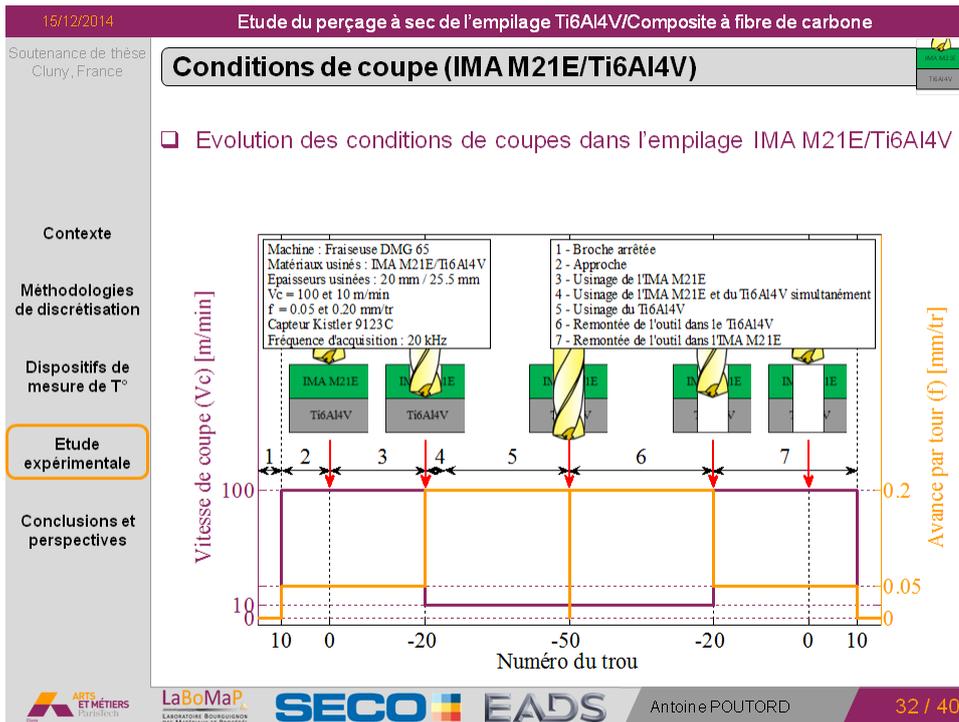
Machine : Fraisuse DMG 65
Matériau usiné : T800 M21
Vc = 100 m/min
F = 0.05 mm/r
Mesure des températures
Trou N° 9
Rayon de la mesure : 4 mm
Fréquence d'acquisition : 40 kHz

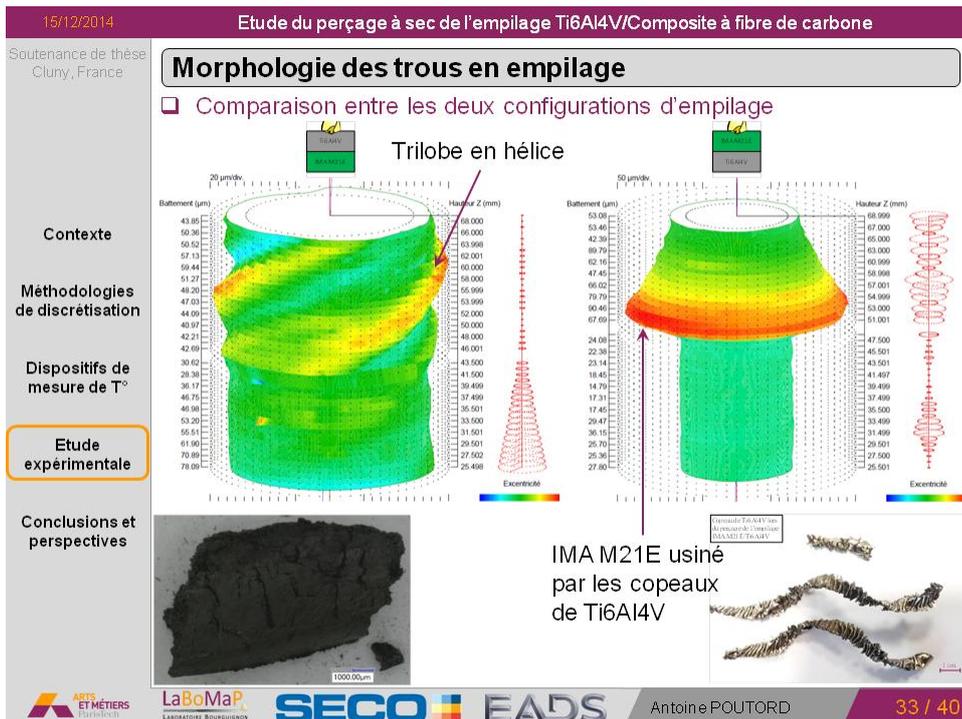
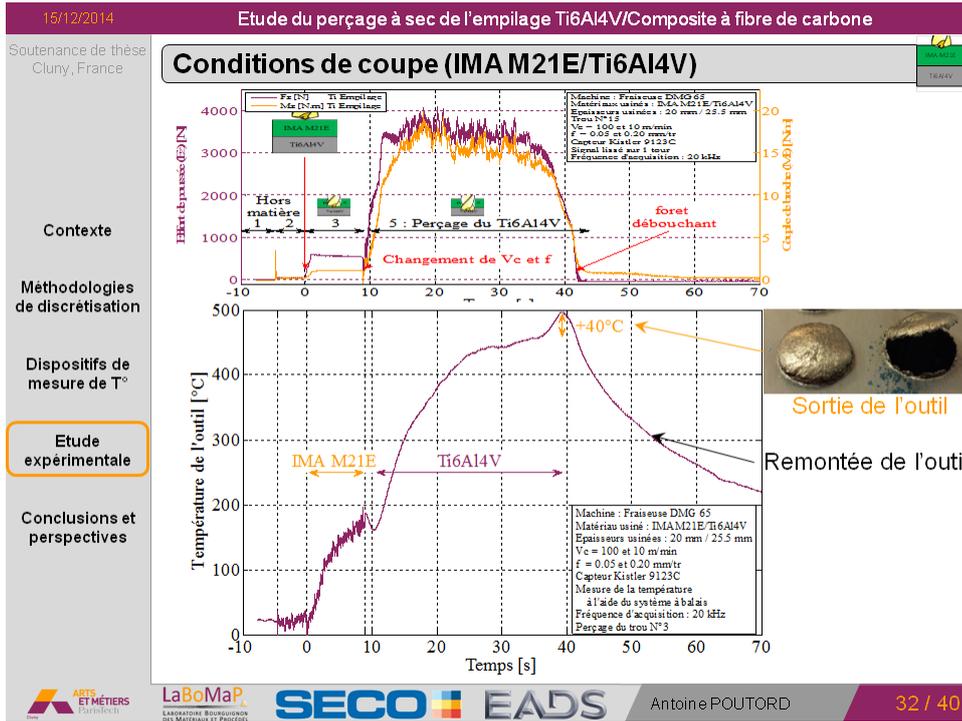
Courbe de tendance
 $Fz = 207.25 \cdot X^{0.1653}$
 $R^2 = 0.83$

ARTIS ET MÉTIERS ParisTech
LaBoMaP LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS
SECO EADS
Antoine POUTORD 26 / 40

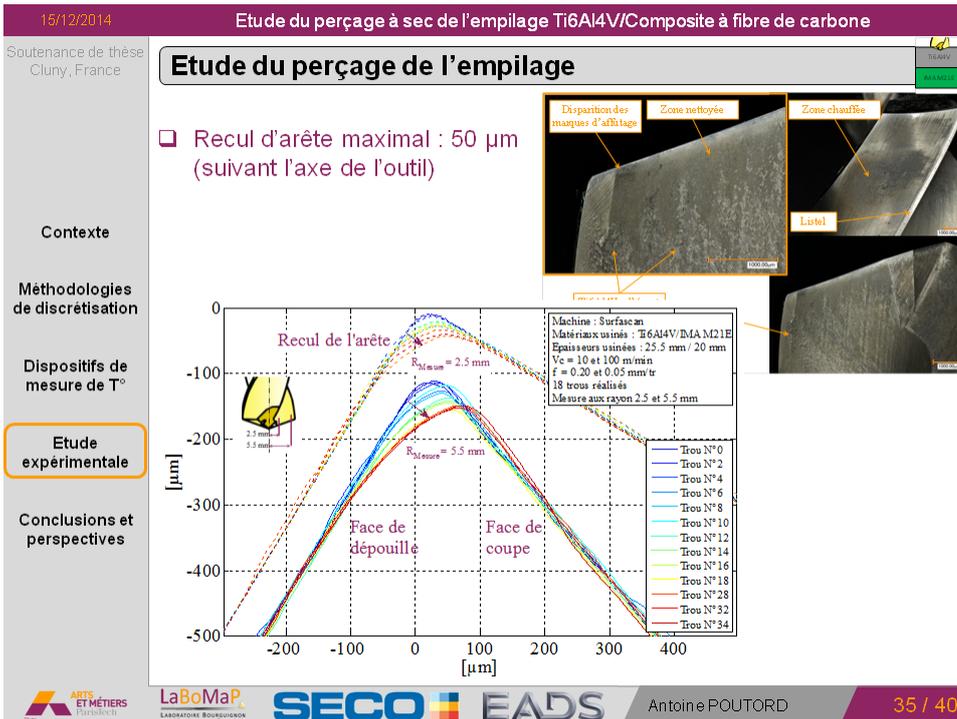
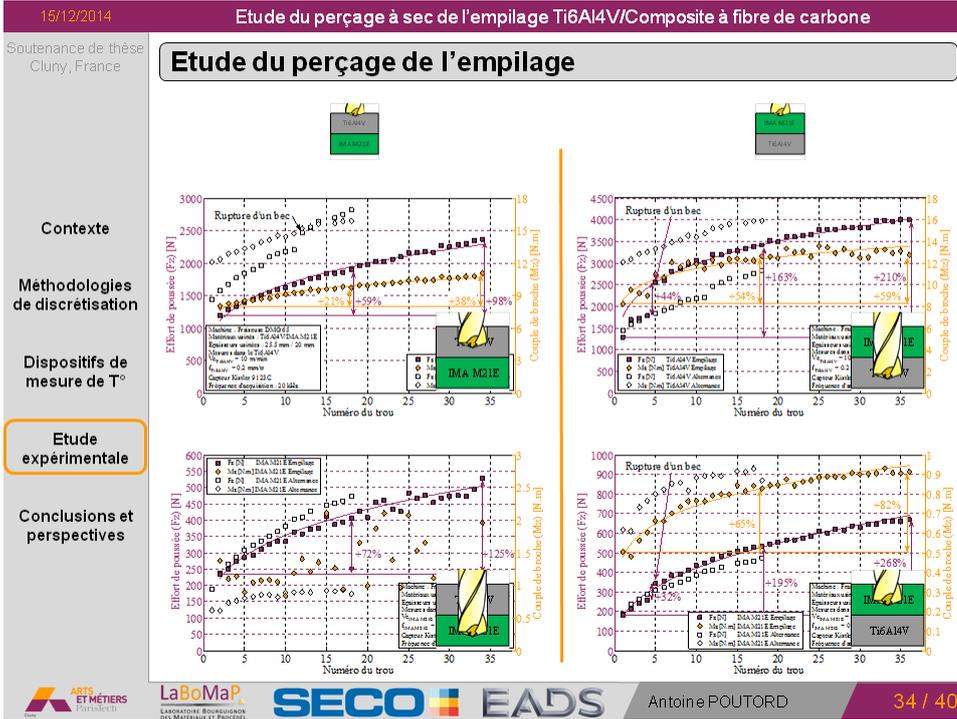


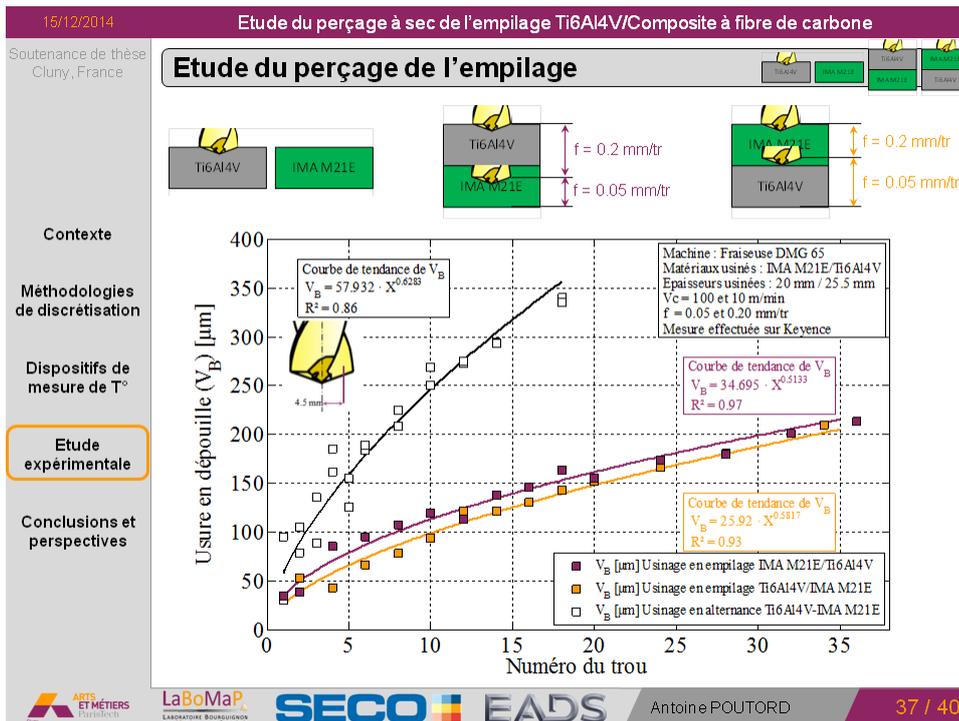
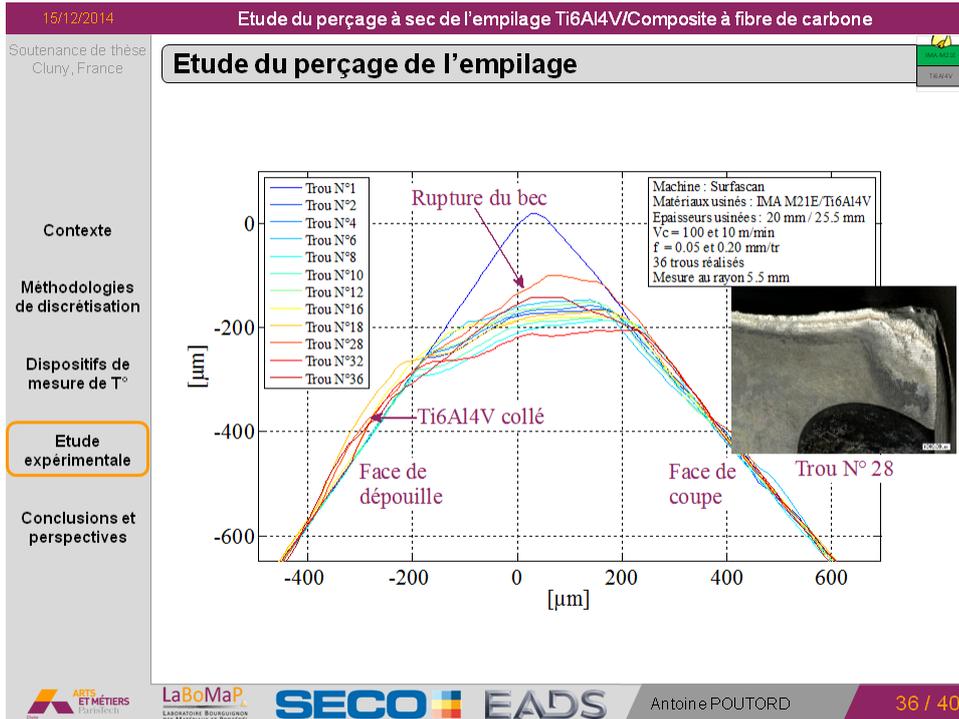


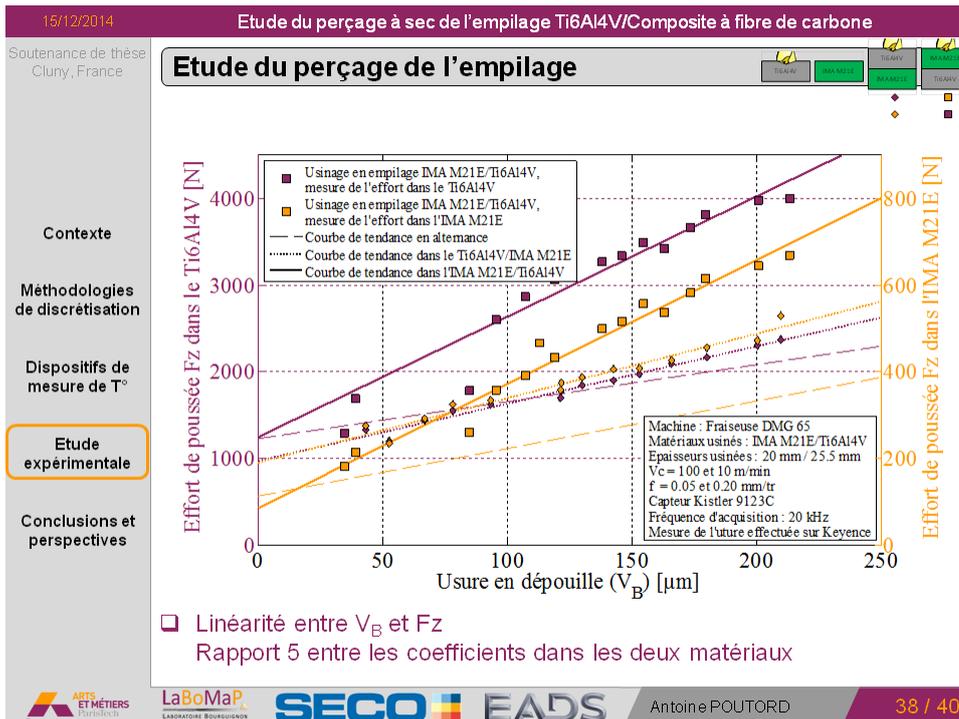




Forme en trilobe dans le Ti6Al4V liée à la forte conicité arrière qui limite le guidage du foret et à l'avance importante.







Lien fort entre l'effort de poussée et l'usure en dépouille du foret. Rapport 5 entre l'effort de poussée dans l'IMA M21E et le Ti6Al4V.

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse Clunay, France

Conclusions et perspectives

- Problématique industrielle actuelle et complexe
- Identification des problèmes propres à l'empilage
- Lien fort entre l'usure en dépouille et l'effort de poussée (source de défauts dans les pièces)
- Développement de dispositifs en vue d'effectuer des observations locales
 - Mécanique
 - Thermique
- Extraction de copeaux
 - Perçage vibratoire, orbital, lubrifié

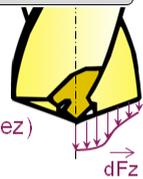
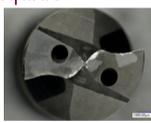
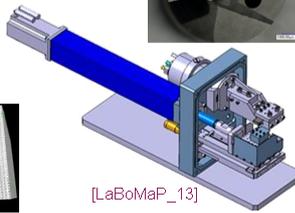
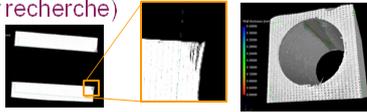
ARTS ET MÉTIERS ParisTech
 LaBoMaP. LABORATOIRE BOURGIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS
 SECO EADS
 Antoine POUTORD 39 / 40

15/12/2014 Etude du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite à fibre de carbone

Soutenance de thèse
Cluny, France

Conclusions et perspectives

- ❑ Dispositifs développés (Mécanique et Thermique)
 - Développement et caractérisation d'outils
 - Choix de conditions de coupes
 Evolutions prévue pour le système thermique (Thèse C. Ramirez)
- ❑ Simulations thermomécanique en cours
Dr. Lazoglu, Koc University, Istanbul, Turkey (Membre du CIRP)
- ❑ Besoin d'employer des outils toujours plus durs (durée de vie de l'outil)
Forets full PCD ⇒ Problèmes dans le Ti6Al4V
⇒ Perçage d'empilage à l'aide d'azote liquide (Thèse CIFRE)
- ❑ Besoin d'aller vers des échelles toujours plus fines
Caractérisation du trou
Micro-raboteuse
 - Validation du système de coupe de TC
 - Etude de la coupe de composites (CAM) (Master recherche)

[LaBoMaP_13]

ARTS ET MÉTIERS ParisTech LaBoMaP LABORATOIRE BOURGUIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS SECO EADS Antoine POUTORD 40 / 40



Merci pour votre attention.

Avez-vous des questions ?

Antoine POUTORD

Arts & Métiers ParisTech - Centre de Cluny, LaBoMaP
Equipe Usinage
Tél. : 06 79 55 64 56
antoine.poutord@gmail.com



ETUDE DU PERÇAGE A SEC DE L'EMPILAGE Ti6Al4V/COMPOSITE FIBRE DE CARBONE

RESUME : Le secteur aéronautique ayant des exigences toujours plus contraignantes, l'emploi de nouveaux matériaux pour les structures a été incontournable. C'est pourquoi le composite à fibre de carbone a fait son apparition dans les structures d'avions, épaulé par des pièces en alliage de titane, majoritairement du Ti6Al4V. Ces matériaux sont alors disposés en empilages et percés en une seule opération pour être ensuite assemblés par des rivets ou des boulons. Un certain nombre de problèmes, d'un point de vue industriel, sont soulevés par cette opération, générant des surcoûts importants. Les verrous technologiques et scientifiques liés à cette opération seront donc analysés au cours de cette étude.

La connaissance des efforts locaux exercés par l'outil sur la matière usinée constitue un premier point permettant l'amélioration de la compréhension des phénomènes survenant lors de la coupe. Pour cela plusieurs procédés seront expérimentés pour déterminer avec précision les efforts subis par l'outil tout au long du perçage. Afin de compléter les informations relatives aux efforts sur l'outil, l'analyse de la température au sein du foret est nécessaire. Plusieurs dispositifs expérimentaux de mesure de la température in-situ sont développés.

Ces dispositifs ont permis l'usinage instrumenté de trous à la fois dans chacun des deux matériaux composant l'empilage et dans l'empilage afin de comprendre au mieux les phénomènes survenant lors de ces opérations.

Mots clés : Perçage, Ti6Al4V, Composite, CFRP, Empilage, Mesure de température, Décomposition contraintes le long de l'arête, usure

STUDY ON DRY DRILLING OF Ti6Al4V/CFRP STACK

ABSTRACT : The aeronautic field has stronger and stronger requirements so the use of materials for structures has been unavoidable. That's why carbon fiber composite is appeared in plane structures, used with elements in titanium alloy, and most part of them in Ti6Al4V. These materials are also dispatched in stacks and are drilled in a "one shot" operation, in the aim of being assembled with rivets or bolts. Through the industrial point of view, many problems are highlighted by this operation, generating several over costs. Technologic and scientific locks linked with this operation will be analyzed in this study.

The knowledge of local stresses exerted by the tool on the machined matter is the first point allowing the improvement of the understanding of phenomenon that occurs during cutting. Few processes will be experimented to determine stresses submitted by the tool during drilling with accuracy. In the aim of completing the knowledge of the cutting operation, the analysis of the temperature inside the drill is needed. That's why different experimental devices of thermal measurement are developed.

These devices have allowed instrumented machining of holes in each material separately and in the stack of Ti6Al4V/CFRP in order to understanding phenomenon that occur during this operations.

Keywords : Drilling, Ti6Al4V, Composites, CFRP, Stack, Thermal measurement, Edge stresses decomposition, wear