



HAL
open science

Impact du procédé de perçage dans de l'aluminium 2024-T351 sur les sollicitations thermomécaniques subies par la pièce percée

Alexandra Lacombe, Yann Landon, Manuel Paredes, Clément Chirol, Audrey
Benaben

► To cite this version:

Alexandra Lacombe, Yann Landon, Manuel Paredes, Clément Chirol, Audrey Benaben. Impact du procédé de perçage dans de l'aluminium 2024-T351 sur les sollicitations thermomécaniques subies par la pièce percée. MUGV & Manufacturing'21, Jun 2018, Bordeaux, France. hal-02127597

HAL Id: hal-02127597

<https://hal.science/hal-02127597>

Submitted on 13 May 2019

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.



Impact du procédé de perçage dans de l'aluminium 2024-T351 sur les sollicitations thermomécaniques subies par la pièce percée

**Alexandra LACOMBE^(a), Yann LANDON^(a), Manuel PAREDES^(a),
Clément CHIROL^(b), Audrey BENABEN^(b)**

(a) ICA, Université de Toulouse, UPS, INSA, ISAE-SUPAERO, MINES-ALBI, CNRS, Toulouse, France

Mail : alexandra.lacombe1@univ-tlse3.fr, yann.landon@univ-tlse3.fr, paredes@insa-toulouse.fr

(b) Airbus France, D41, 18 rue Marius Tercé, 31300 Toulouse, France

Mail : clement.chirol@airbus.com, audrey.benaben@airbus.com

Résumé :

Dans les structures mécaniques, les trous percés constituent des zones critiques majeures à partir desquelles des endommagements peuvent s'initier en fatigue. Les industriels, notamment dans le domaine aéronautique, constatent des différences significatives en termes de tenue en fatigue des structures percées en fonction des paramètres et des procédés de perçage employés. L'optimisation du comportement des assemblages aéronautiques passe par la compréhension de l'impact du procédé de perçage sur les caractéristiques matériau de la pièce percée qui sont liées aux sollicitations thermomécaniques.

L'objectif de l'étude, en collaboration avec Airbus, est donc de comprendre et d'identifier les phénomènes et mécanismes qui pilotent la durée de vie en fatigue des pièces percées en alliage d'aluminium. Pour cela, un plan d'expériences est conduit, dans lequel certains paramètres de perçage sont testés (perçage axial ou orbital, réalisation d'un avant-trou), avec une instrumentation en effort, couple et température. Ces acquisitions sont corrélées aux paramètres de process.

Cela permettra ensuite d'envisager une modélisation numérique du procédé de perçage qui permette la simulation de l'état du matériau suite à cette opération. Une étude de la durée de vie en fatigue sera envisagée, afin de relier la performance en fatigue (quantifiée par l'IQF) aux caractéristiques matériau.

Mots clés : Perçage, aluminium, sollicitations thermomécaniques

1 Introduction

Les trous percés dans les structures mécaniques constituent des zones critiques majeures quant à l'initiation des endommagements sous charge, notamment en fatigue. Dans le domaine aéronautique, les industriels constatent que la tenue en fatigue des structures percées est fortement dépendante des paramètres et des procédés de perçage employés. Afin d'optimiser la tenue en service des assemblages aéronautiques sous chargement cyclique, il est nécessaire d'identifier l'impact du procédé de perçage sur les caractéristiques matériau de la pièce percée. L'objectif de l'étude, en collaboration avec Airbus, est donc de comprendre et d'identifier les phénomènes et mécanismes qui pilotent la durée de vie en fatigue des pièces percées en alliage d'aluminium.

Dans cet article, seule la partie expérimentale de l'étude est présentée. Elle a pour objectif de fournir des données qui peuvent être corrélées à l'évolution de caractéristiques matériau en fonction des conditions opératoires, ainsi qu'à des simulations numériques. Un plan d'expériences est conduit dans lequel certains paramètres de perçage sont testés notamment le type de perçage (axial ou orbital) et la réalisation d'un pré-perçage ou non. Ce plan d'expériences est instrumenté en effort, en couple et en température afin d'apporter des données pertinentes pour la compréhension des phénomènes qui influencent l'état matériau de la pièce percée.

Le procédé de perçage, qui fait intervenir à la fois des phénomènes mécaniques et thermiques, est un procédé complexe à simuler. Dans la littérature, différentes stratégies de modélisation sont adoptées. Jrad (Jrad, 2007), dans ses travaux, développe un MEF représentant la géométrie détaillée du foret et simule la géométrie précise du copeau généré. Girinon (Girinon, 2017), dans sa thèse, choisit de développer un modèle « découplé » composé d'un premier modèle ALE rigide simulant la coupe lui permettant d'obtenir un chargement thermique qu'il applique dans un second modèle lagrangien directement sur la pièce finie. Nouari (Nouari, 2003) fait lui l'hypothèse de coupe orthogonale au niveau d'une petite portion d'arête de coupe au niveau des becs et développe un modèle simplifié de coupe basé sur cette hypothèse. Enfin d'autres auteurs, comme Valiorgue (Valiorgue, 2007) dans ses travaux sur la simulation du tournage, s'affranchissent de la modélisation de la coupe de la matière et identifient expérimentalement les chargements thermomécaniques équivalents à appliquer sur leur MEF. Cette dernière stratégie de modélisation semble intéressante car elle limite le temps de calcul en s'affranchissant de la simulation de l'enlèvement de matière et elle paraît plus exacte que la méthode de Nouari qui ne prend pas en compte la variation des sollicitations de long de l'arête de coupe. Cependant, cette stratégie nécessite de bien appréhender les efforts et les températures mis en jeu lors de l'usinage afin d'identifier le chargement équivalent à appliquer dans le MEF. Dans cet article, les sollicitations thermomécaniques induites par le perçage sur une pièce en aluminium AA2024 sont étudiées expérimentalement et corrélées aux paramètres de perçage.

2 Procédure expérimentale

Les essais de perçage sont réalisés sur un centre d'usinage DMG DMU85eVo. Pour réaliser le perçage orbital, une broche PRECISE France – ORBIBOT, équipée d'une tête orbitale, est fixée sur l'axe Z du centre d'usinage.

L'ensemble des perçages réalisés possèdent un diamètre de 6,35 mm. Le perçage axial est réalisé avec un foret hélicoïdal monobloc en carbure de tungstène (2 lèbres). Une vitesse de coupe de 80 m/mn (soit une vitesse de broche de 4010 tr/mn) et une avance de 0,1 mm/tr (soit une vitesse d'avance de 401 mm/mn) sont employées avec cet outil (paramètres issus d'une analyse COM – Couple Outil-Matière – réalisée dans le matériau étudié).

Le perçage orbital est réalisé avec une fraise orbitale à quatre dents en carbure de tungstène non revêtu de diamètre 4,8 mm. Les paramètres d'usinage appliqués à cet outil sont les paramètres optimaux conseillés par le fabricant et par PRECISE FRANCE : une vitesse de rotation outil de 40000 tr/mn (soit une vitesse de coupe de 603 m/mn), une vitesse de rotation orbitale de 1000 tr/mn (soit une avance tangentielle de 0,122 mm/tr au centre outil), une vitesse d'avance axiale de 40 mm/mn (soit une avance axiale de 0,001 mm/tr) et un usinage en opposition.

Les essais dédiés à l'étude de l'influence du type de perçage (axial ou orbital) sont menés sans lubrification sur des éprouvettes d'épaisseur 5 mm. Les essais dédiés à l'étude de l'influence du pré-perçage sont réalisés avec micro-lubrification sur des éprouvettes d'épaisseur 12 mm.

Pour chaque essai, les efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) et le couple de perçage (M_z) sont mesurés à l'aide d'une platine d'effort six composantes Kistler 9257B et d'une carte d'acquisition NI 9201 avec une fréquence d'acquisition de 10 kHz. Ces efforts sont mesurés dans un repère fixe lié à la platine, F_z étant l'effort selon l'axe du perçage. Pour l'ensemble de l'étude, les efforts interprétés sont obtenus en appliquant un filtre passe bas de 10Hz aux efforts mesurés.

En perçage orbital, la puissance de la broche de rotation outil est relevée à partir de la mesure du courant de broche (système Montronix) et d'une carte d'acquisition NI 9215 également avec une fréquence d'acquisition de 10 kHz.

Les essais relatifs à l'étude de l'influence du pré-perçage sont instrumentés en température à l'aide de trois thermocouples introduits perpendiculairement à l'axe du trou selon sa hauteur (Figure 1) et d'une carte d'acquisition NI 9211. Les températures mesurées par les thermocouples TC1, TC2 et TC3 sont nommées respectivement $T_{entrée}$, T_{milieu} et T_{sortie} et sont obtenues avec une fréquence d'acquisition de 3,57 Hz. De la pâte conductrice thermique chargée argent (Heat Away 641) est utilisée pour combler le vide entre les thermocouples et les trous prévus à leur effet. Cette pâte possède une conductivité thermique (5,58 W/m.K) bien supérieure à celle de l'air (0,025 W/m.K). Cela permet de réduire l'erreur de mesure associée au trou des thermocouples en se rapprochant de la conductivité de l'aluminium (121 W/m.K).

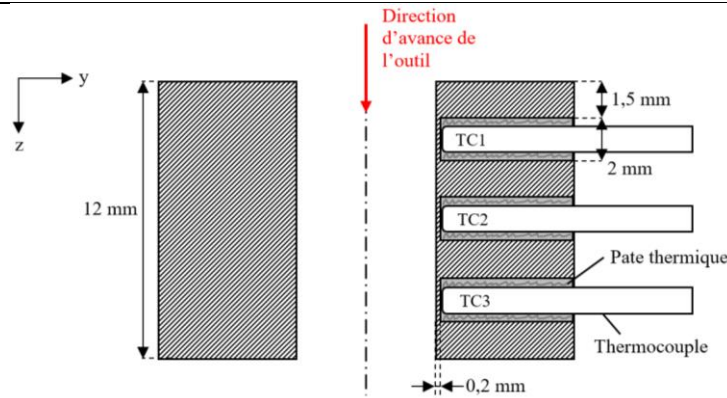


Figure 1 : Position des thermocouples pour les mesures de température

2 Influence du type de perçage (axial ou orbital) sur les actions mécaniques

Les efforts de coupe relevés au cours du perçage axial et orbital sont comparés (Figure 2). F_z représente l'effort de poussée. F_x et F_y sont les composantes dont dépendent l'effort tangentiel et l'effort radial.

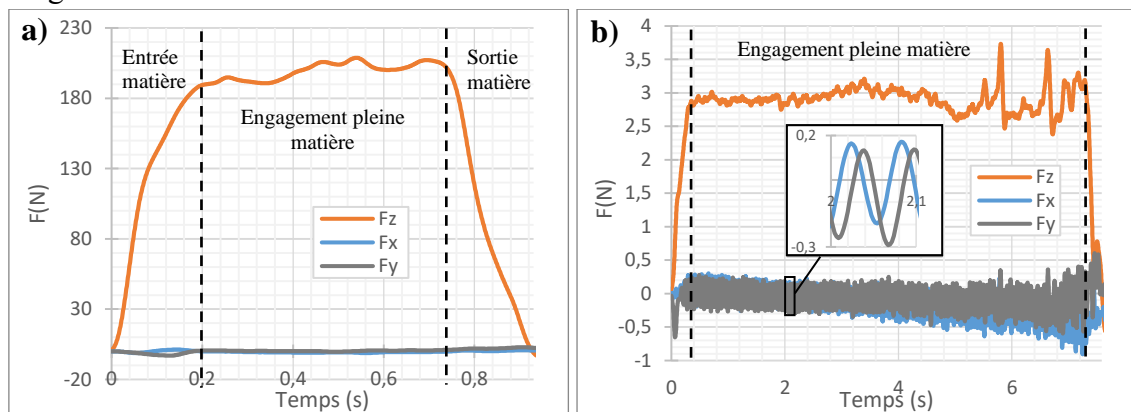


Figure 2 : Efforts de coupe au cours du perçage axial (a) et orbital (b)

Les efforts F_x et F_y mesurés au cours du perçage axial sont quasiment nuls. Cela est cohérent avec la propriété d'auto-centrage du foret qui est associée à un équilibre théorique entre l'ensemble des efforts radiaux. Les efforts F_x et F_y relevés lors du perçage orbital présentent une allure sinusoïdale et ils sont négligeables devant l'effort de poussée. D'après une analyse fréquentielle menée sur le signal brut, ces efforts sont modulés en fréquence : un premier pic apparaît à la fréquence de rotation de l'outil (667 Hz), et présente des pics latéraux distants de plus ou moins 17 Hz (fréquence de rotation orbitale). L'effort de poussée F_z engendré par le perçage axial présente une allure cohérente avec celle décrite dans la littérature (Laporte, 2003). Les trois phases caractéristiques du perçage sont observées. La première, correspondant à la phase d'entrée en matière de la pointe du foret, est associée à une augmentation de F_z . Cette augmentation n'est pas linéaire, cela indique que chaque portion des arêtes de coupe de fournit pas le même effort axial, faisant notamment apparaître l'effet de centre outil qui génère une augmentation brutale de l'effort. La deuxième, représentant la phase d'enlèvement constant de matière

entre l'entrée et la sortie des becs du foret correspond à un palier où F_z est presque stationnaire. Enfin, la dernière phase représente la sortie de la pointe du foret avec une diminution de F_z à nouveau non linéaire. Ces trois phases sont retrouvées en ce qui concerne l'évolution du couple axial au cours du perçage axial (Figure 3-a). Dans ce cas, l'augmentation et la diminution de M_z au cours des phases d'entrée et de sortie en matière sont quasi-linéaires (hormis la phase d'indentation qui ne génère quasiment pas de couple et explique le pied de courbe), ce qui signifie que chaque portion des arêtes de coupe apporte une contribution identique sur le couple axial.

Les trois phases caractéristiques du perçage sont également observées au cours du perçage orbital. La différence de durée des phases d'entrée et de sortie de matière entre les deux types de perçages (environ 0,2s pour le perçage axial et 0,3 s pour le perçage orbital) sont dues à la différence de vitesse d'avance axiale (rapport 10) et à la différence de géométrie de l'outil au niveau de la pointe (pointe à 135° pour le foret, et bout plat pour la fraise orbitale). Les variations de F_z au cours de la phase quasi-stationnaire, notamment les augmentations en fin de phase, peuvent être liées au phénomène de collage observé dans les deux cas puisque les perçages sont réalisés sans lubrification.

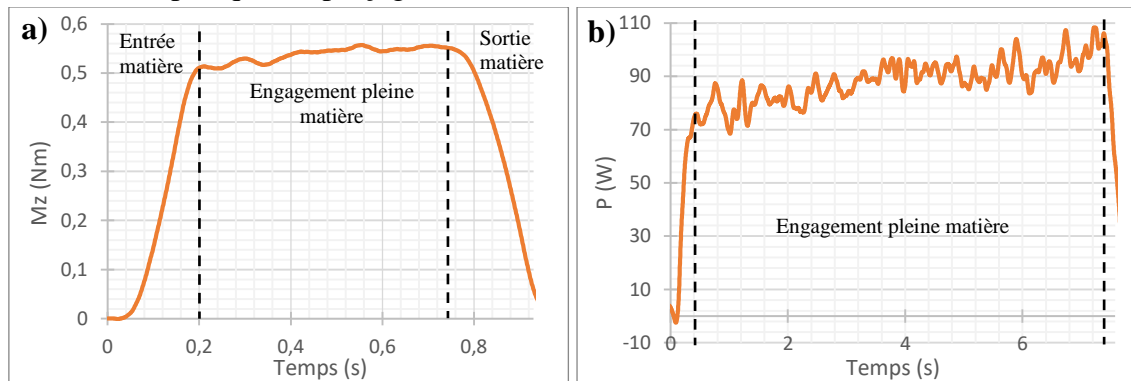


Figure 3 : Couple axial au cours du perçage axial (a) et puissance de broche de rotation outil au cours du perçage orbital (b)

La comparaison directe des niveaux d'efforts de coupe mis en jeu lors des deux types de perçage ne peut être réalisée car les deux procédés possèdent des cinématiques différentes. En revanche, l'énergie spécifique qui représente le rapport entre la puissance de coupe et le débit de matière usinée peut être prise comme élément de comparaison. Le calcul de l'énergie spécifique fait intervenir deux termes de puissance : celle associée à l'effort de poussée et celle associée au couple axial.

Dans notre cas, la puissance associée à l'effort de poussée est calculée directement à partir de la mesure de F_z et elle est négligée dans le cas du perçage orbital, F_z étant négligeable. En ce qui concerne la puissance liée au couple axial, l'idéal pour comparer les deux procédés de perçage serait de la déterminer dans les deux cas soit directement à partir de la mesure de la puissance de broche soit par l'intermédiaire de la mesure du couple axial. Cependant, dans notre cas, la mesure de la puissance de broche ne peut pas être mise en œuvre pour le perçage axial et la mesure du couple axial ne peut pas être réalisée par le biais de la platine dans le cas du perçage orbital, l'axe de l'outil se déplaçant dans le plan

(x, y). L'énergie spécifique consommée par le perçage axial $E_{spec,axial}$ est donc calculée à partir du couple axial mesuré par la platine, l'axe de perçage étant positionné au niveau du centre de la platine (Equ.1). Pour le perçage orbital, l'énergie $E_{spec,orbital}$ est, elle, calculée à partir de la mesure de la puissance de la broche (Figure 3-b) selon l'Equ.2.

$$E_{spec,axial} = \frac{F_{z,moy}}{\pi \cdot R_{trou}^2} + \frac{M_{z,moy} \cdot N \cdot t_u}{30 \cdot R_{trou}^2 \cdot e_p} \quad (1)$$

$F_{z,moy}$: effort de poussée moyen (N)

$M_{z,moy}$: couple axial moyen (Nmm)

N : vitesse de rotation de l'outil (tr/mn)

t_u : temps d'usinage (s)

R_{trou} : rayon du trou percé (mm)

e_p : épaisseur percée (mm) incluant la hauteur de pointe de l'outil

$$E_{spec,orbital} = \frac{P_{moy} \cdot t_u}{\pi \cdot R_{trou}^2 \cdot e_p} \quad (2)$$

P_{moy} : puissance de coupe moyenne de la broche (W)

Les énergies spécifiques correspondantes aux configurations d'essais réalisées sont respectivement de 774 Nmm⁻² pour le perçage axial et de 4054 Nmm⁻² pour le perçage orbital. Ainsi, le procédé de perçage orbital mobilise une énergie spécifique beaucoup plus importante par rapport au perçage axial. Cela est lié notamment au temps d'usinage qui est beaucoup plus long du fait de la trajectoire hélicoïdale de l'outil. Cependant, la puissance mesurée de la broche orbitale prend également en compte la puissance mécanique consommée par les mécanismes associés au fonctionnement de la broche et la puissance dissipée sous forme de chaleur au niveau de l'outil. Il faudrait donc vérifier que ces puissances soient négligeables devant la puissance de coupe pour pouvoir considérer le calcul de l'énergie spécifique selon l'Equ.2.

3 Influence du pré-perçage sur les efforts de coupe et la température de la pièce percée

Quatre essais de perçage de diamètre final 6,35 mm sont comparés : un sans pré-perçage et trois avec les diamètres de pré-perçage suivants : 2 mm, 4 mm et 5,65 mm. Pour tous ces essais, le même foret est utilisé pour le perçage final.

2.1 Influence du pré-perçage sur l'effort de poussée F_z lors du perçage final

Les efforts de poussée F_z relevés au cours des quatre perçages finaux sont tracés en fonction de la position des becs de l'outil par rapport à l'épaisseur de la pièce (Figure 4-a), les positions 0 mm et 12 mm correspondant respectivement à l'entrée et à la sortie des becs de l'outil dans la matière. L'hypothèse selon laquelle l'effort F_z s'annule à l'instant où les becs sortent de la pièce est considérée pour recaller les courbes de résultats.

L'allure des courbes d'effort de poussée obtenues pour l'ensemble des diamètres de pré-perçage est cohérente avec les trois phases de perçage évoquées dans la partie précédente.

Sur la Figure 4-a, l'entrée des becs de l'outil dans la matière correspond bien au début de la phase quasi-stationnaire pour l'effort F_z , ce que valide l'hypothèse émise précédemment. L'effort F_z moyen diminue avec la réalisation d'un pré-perçage. De plus, la diminution de F_z est d'autant plus importante que le diamètre de l'avant-trou est important. La diminution de l'effort F_z moyen sur la phase quasi-stationnaire (par rapport au perçage sans avant-trou) pour chaque diamètre de pré-perçage est quantifiée sur la Figure 4-b.

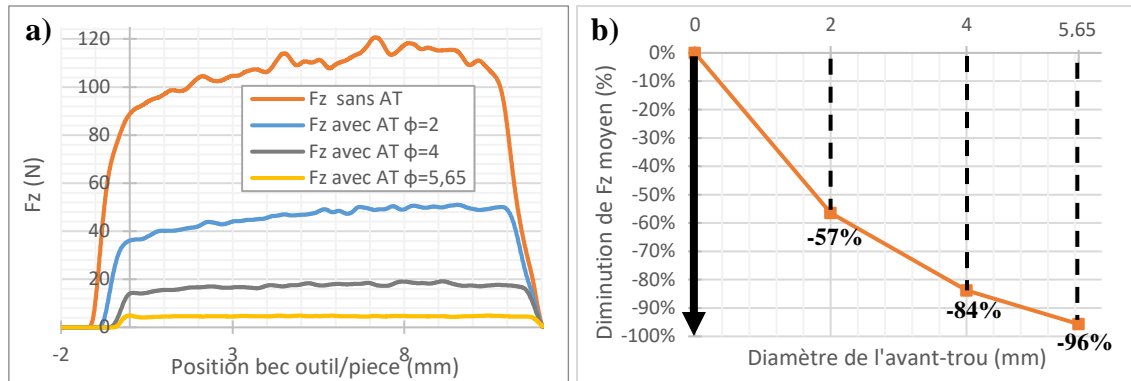


Figure 4 : Influence du diamètre de pré-perçage sur l'effort de poussée F_z

Cette diminution n'est pas proportionnelle au diamètre de l'avant-trou. Elle montre le rôle majeur du centre de l'outil dans la génération de l'effort de poussée puisqu'un pré-perçage de seulement 2 mm de diamètre (31% du diamètre du foret) entraîne une diminution de l'effort F_z de plus de la moitié (57%). L'importance des efforts de poussée engendrés par le centre de l'outil est liée aux phénomènes d'indentation localisés au niveau de l'âme.

2.2 Evolution de la température en bord de trou selon la hauteur de la pièce percée

L'évolution des températures mesurées par les trois thermocouples au cours d'un perçage sans avant-trou et d'un perçage avec avant-trou de 4 mm sont tracées en fonction de la position de la pointe de l'outil par rapport à l'épaisseur de la pièce sur la Figure 5. Pour obtenir cela, les différentes courbes de température sont recalées en temps, en faisant l'hypothèse que la température de la pièce percée commence à augmenter à l'instant où la pointe du foret entre en contact avec la pièce. Sur la Figure 5, les marques TC1, TC2 et TC3 indiquent les positions des thermocouples dans la pièce, donc l'instant où la pointe de l'outil passe devant chacun de ces thermocouples.

Les mesures de températures sont réalisées avec une faible fréquence d'acquisition par rapport à la vitesse d'avance axiale du foret et à l'épaisseur percée. Cette fréquence, qui est limitée par la capacité de la carte d'acquisition, fournit un ensemble de seulement 7 acquisitions de température par thermocouple durant la phase où la pointe de l'outil se trouve en contact avec la pièce. De plus, le système d'acquisition utilisé implique des mesures de températures asynchrones entre les trois thermocouples.

D'après la Figure 5, le perçage engendre une répartition non homogène de la température sur la hauteur de la pièce percée et pendant la durée du perçage.

Les trois températures commencent à augmenter avant que la pointe de l'outil ne passe devant le thermocouple associé et continue d'augmenter après que la pointe et les becs de l'outil aient dépassé le thermocouple. Cela signifie qu'une diffusion thermique importante se produit axialement en bord de trou à la fois dans le sens de l'avance de l'outil et dans le sens inverse.

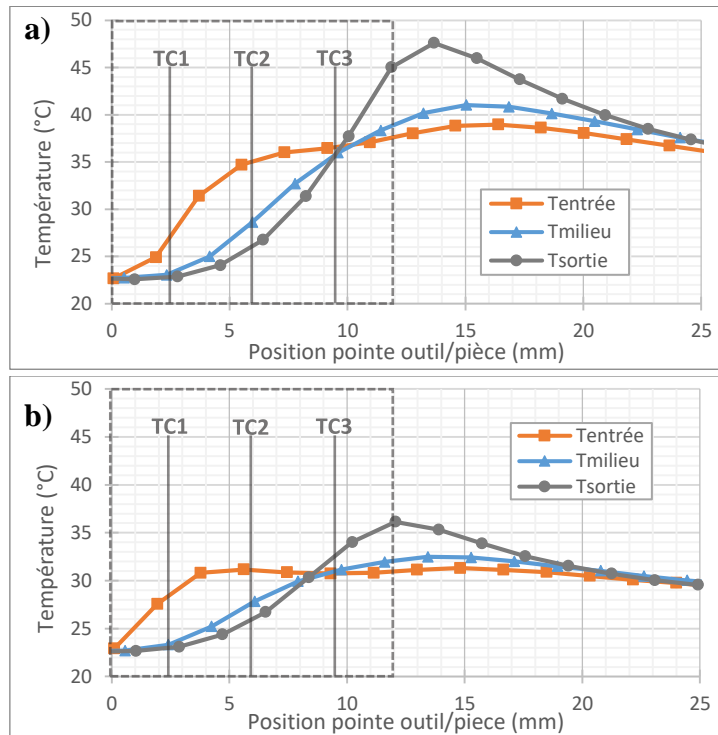


Figure 5 : Evolution des températures sur la hauteur du trou au cours du perçage sans avant-trou (a) et avec avant-trou de 4 mm de diamètre (b)

Les trois températures présentent des cinétiques différentes. En début de perçage, lorsque la pointe du foret s'approche de TC1, $T_{entrée}$ est la température maximale et elle augmente plus rapidement que T_{milieu} et T_{sortie} . Puis, lorsque la pointe de l'outil s'éloigne de TC1, la tendance s'inverse. T_{sortie} et T_{milieu} augmentent rapidement par rapport à $T_{entrée}$ qui se stabilise dans le cas du perçage avec-trou et qui augmente faiblement dans le cas du perçage pleine matière. Les trois températures s'homogénéisent au niveau de TC3 ou juste avant. Enfin, la plupart des températures mesurées atteignent leur maximum après que la pointe de l'outil soit sortie de la pièce.

Ce maximum de température en fin de perçage peut s'expliquer par une « accumulation » de chaleur générée lors du perçage qui est diffusée axialement au cours de l'avance de l'outil et qui continue même après la sortie des becs de l'outil par rapport à la pièce. Cette accumulation de chaleur en bord de trou est maximale au niveau de la sortie de l'outil soit de la dernière zone ayant subi les sollicitations thermomécaniques dues au perçage. Le frottement des listels sur la paroi du trou, malgré une légère conicité arrière de l'outil, peut également expliquer en partie cette observation.

La réalisation d'un pré-perçage semble diminuer les niveaux de températures atteints lors du perçage, son influence est étudiée plus spécifiquement dans la partie suivante.

2.3 Influence du pré-perçage sur les températures en bord de trou lors du perçage final

L'influence du diamètre de pré-perçage sur l'évolution de la température mesurée dans la pièce au niveau de la sortie de l'outil est présentée sur la Figure 6.

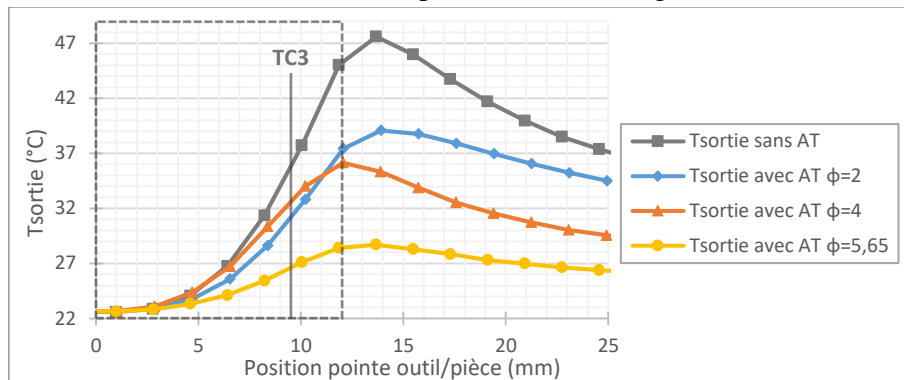


Figure 6 : Influence du diamètre de pré-perçage sur T_{sortie}

Les températures mesurées en sortie de pièce présentent des allures similaires pour tous les diamètres de pré-perçage. Elles traduisent un échauffement qui s'intensifie tout au long du perçage et qui est maximal juste après la fin du perçage.

Les températures de la pièce atteintes en bord de trou au cours du perçage diminuent avec l'augmentation du diamètre de pré-perçage. Cela est lié au fait que plus le diamètre de pré-perçage est important, moins de sollicitations mécaniques sont mises en jeu au cours du perçage final. En effet, la diminution importante de F_z avec l'augmentation du diamètre de pré-perçage a été constatée (Figure 4). La diminution des températures maximales atteintes dans l'épaisseur de la pièce (par rapport au perçage sans avant-trou) en fonction du diamètre de pré-perçage sont présentées sur la Figure 7.

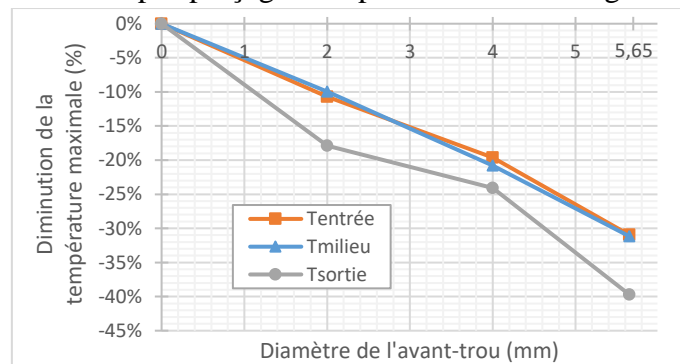


Figure 7 : Influence du diamètre de pré-perçage sur les températures maximales de la pièce atteintes lors du perçage final

Pour les trois zones de mesure des températures, la température maximale atteinte semble diminuer quasi linéairement avec l'augmentation du diamètre d'avant-trou, contrairement à l'évolution de l'effort axial. Il apparaît nettement que même un avant-trou de petit diamètre joue un rôle sur la température atteinte en proche surface du trou percé. L'action du centre outil n'est donc pas négligeable sur le chargement thermique en paroi. Pour tous les cas de pré-perçage, la température maximale est atteinte en sortie de pièce. Ainsi,

parmi toutes les acquisitions réalisées, la température maximale est relevée lors du perçage sans avant-trou au niveau de la sortie de la pièce. Elle prend une valeur de 47,6°C. Cette valeur semble très faible, cela étant probablement lié à la position des thermocouples à 0,2 mm de la paroi du trou, au fait que la chaleur diffuse rapidement dans le matériau associé à la faible fréquence d'échantillonnage et à l'utilisation d'une pâte thermique de capacité donnée.

Cependant, il faut noter que les températures maximales relevées présentent une certaine erreur liée à la faible fréquence d'acquisition. En effet, pour chaque courbe, un maximum de température légèrement supérieur à celui relevé peut se trouver entre deux points de mesure.

5 Conclusion

Le perçage dans l'aluminium AA2024 est associé à des sollicitations thermomécaniques importantes qui dépendent des paramètres du procédé de perçage. Une énergie spécifique importante liée au temps d'usinage est notée lors du perçage orbital malgré des niveaux d'effort de poussée faibles par rapport au perçage axial. Une diminution importante des sollicitations thermomécaniques est observée avec la réalisation d'un pré-perçage.

Les moyens de mesure utilisés au cours de cette étude pour quantifier les sollicitations thermomécaniques présentent certaines limites, des moyens plus adaptés sont envisagés pour la suite de l'étude. En effet, un moyen de mesure de la puissance consommée par le perçage orbital plus précis et un moyen de mesure des températures moins intrusif avec une fréquence d'acquisition plus adaptée à la vitesse de perçage sont étudiés.

L'étude des sollicitations thermomécaniques mises en jeu lors du perçage sera ainsi approfondie dans le but de déterminer un chargement équivalent (en temps et en espace) à appliquer dans un modèle numérique de prédiction des contraintes résiduelles. Ces contraintes, ainsi que d'autres paramètres matériau tel que l'état de surface et la dureté seront également investigués expérimentalement pour établir une corrélation entre ceux-ci et les sollicitations de perçage. Enfin, des essais de fatigue seront envisagés afin de corréler la tenue en fatigue à l'état matériau de la pièce après le perçage.

References

- M. Girinon (2017) Développement d'un modèle numérique sur l'étude de l'intégrité des surfaces en perçage. Thèse
- M. Jrad, A. Devillez, D. Dudzinski (2007) Analytical and Finite Element Approaches for the Drilling Modelling, The American Institute of Physics
- S. Laporte, J.Y K'Nevez, O. Cahuc, P. Darnis (2003) Etude expérimentale des efforts de coupe en perçage, 16^{ème} Congrès Français de Mécanique
- M. Nouari, G. List, F. Girot, D. Coupard (2003) Experimental analysis and optimization of tool wear in dry machining of aluminium alloys, Elsevier
- F. Valiorgue, J. Rech, H. Hamdi, P. Gilles, J.M. Bergheau (2007) A new approach for the modelling of residual stresses induced by turning of 316L. Journal of Materials Processing Technology