
-

Etudes préliminaires

II.1. Introduction

Comme souligné dans l'étude bibliographique, l'état de l'art ne comporte quasiment pas de références en ce qui concerne le perçage de Ti6Al4V avec assistance cryogénique. Par conséquent, il apparaissait nécessaire de réaliser en premier lieu des études préliminaires afin de récolter des résultats concernant les effets de cette assistance sur le perçage. D'autre part, étant donné que le phénomène de resserrement du trou pendant et après l'opération avait été ciblé à l'issue de l'étude bibliographique, ces études préliminaires se devaient de permettre de justifier ce choix par la confirmation de l'importance du phénomène.

Ainsi, ce chapitre fait état des différentes actions qui ont été menées en adéquation avec les objectifs présentés ci-dessus. Sont notamment présentés :

- Les mesures réalisées sur les outils ISCAR utilisés pendant l'étude
- Les essais préliminaires de comparaison entre le perçage à sec et sous assistance cryogénique.
- Les essais d'usure comparant les potentiels en durée de vie et productivité pour les techniques de perçage à sec et avec assistance cryogénique.

II.2. Moyens de mesure et procédures utilisées

II.2.1. Moyens de mesure utilisés et procédures associées

Cette partie a pour objectif de décrire succinctement les moyens utilisés dans le cadre des essais présentés dans ce chapitre. En outre, certains protocoles de mesure et méthodes de traitement des données seront explicités dans cette partie.

II.2.1.1. Mesures hors usinage

Mesure des outils : Alicona InfiniteFocus Real 3D

Le moyen de mesure utilisé pour scanner la géométrie des outils est un Alicona InfiniteFocus Real 3D (cf. Figure II.1). L'InfiniteFocus est une machine à mesurer tridimensionnelle optique pour la mesure de forme et de rugosité. Les mesures peuvent atteindre une résolution verticale allant jusqu'à 10 nm. L'utilisateur bénéficie sur un même instrument des avantages d'une machine à mesurer tridimensionnelle ainsi que de ceux d'un instrument de mesure d'états de surface.

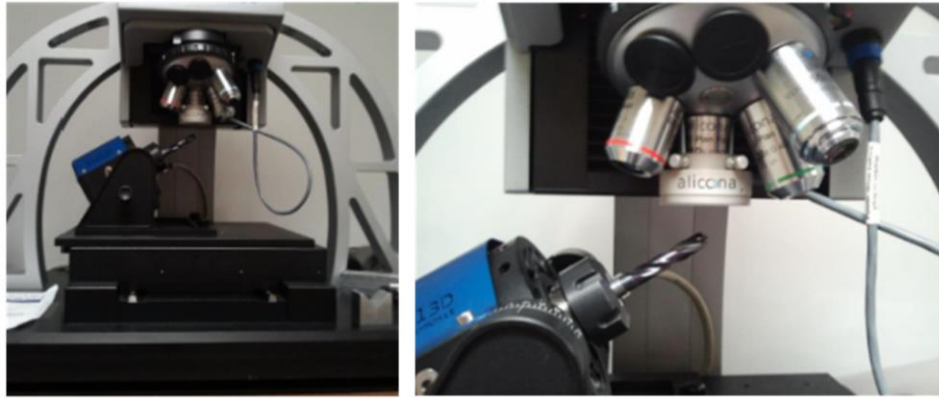


Figure II.1 : Alicona InfiniteFocus Real 3D

L'InfiniteFocus utilise le principe de variation focale. Cette méthode optique fournit une densité de points de plus de 100 millions de points de mesure ce qui permet des mesures de forme et de rugosité même sur des zones et des volumes de mesure de grande dimension. Le principe de la variation focale, en tant que méthode de mesure matricielle, est inclus dans la norme EN ISO 25178 la plus récente.

L'InfiniteFocus Real3D est un système de mesure de coordonnées 3D pour la mesure de forme complète d'arêtes de coupe. La forme, le contour et la rugosité sont mesurées avec une haute résolution et sous tous les angles. Ainsi, la mesure à 360° de forets, fraises et tarauds est réalisée par le biais du système standard InfiniteFocus équipé de l'unité de rotation Real3D.

Mesures sur les trous réalisés : système de mesure sans contact Sentronics i-Dex-tf

Une fois les essais de perçage réalisés, les mesures visant à déterminer les dimensions et forme finales des trous, ainsi que les rugosités arithmétique Ra et totale Rt , sont réalisées sur le système de mesure sans contact Sentronics i-Dex-tf qui est disponible sur le site d'Airbus.

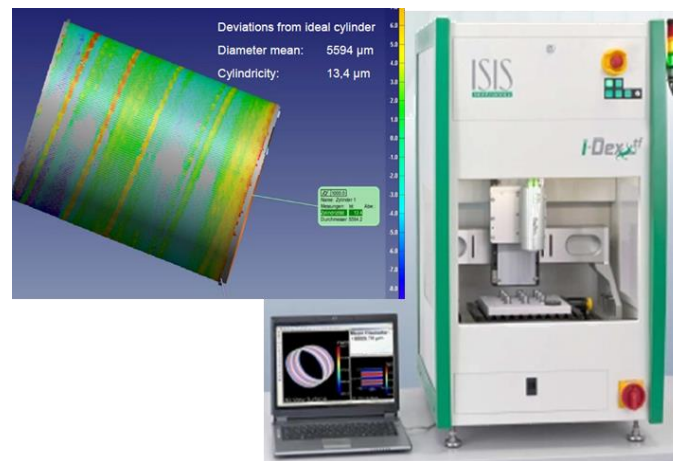


Figure II.2 : Système de mesure de trous sans contact Sentronics i-Dex-tf

Dans le cadre de ces essais préliminaires, les mesures classiquement exploitées sont explicitées sur la Figure II.3 et concernent les points suivants :

- **La forme du trou (qualitatif)**
 Dans le but d'avoir une idée de la forme du trou mesuré, 15 diamètres sont mesurés sur la hauteur de l'éprouvette, selon la méthode des moindres carrés. Ces mesures permettent ensuite de reconstituer la morphologie générale du trou réalisé.

- Les dimensions générales du trou (quantitatif)**
 Afin de quantifier les constatations faites sur la forme du trou, des mesures dont la trajectoire est hélicoïdale avec un pas de 0,02 mm sont réalisées. Cette mesure permet de quantifier le diamètre du cylindre inscrit \varnothing_{ins} , correspondant au diamètre maximum de pièce cylindrique pouvant entrer dans le trou réalisé. En outre, cette mesure permet de déterminer la cylindricité du trou qui donne une indication chiffrée sur l'écart de forme.
- La topologie de la surface du trou (quantitatif)**
 Le dernier type de mesures réalisées concerne l'état de surface et plus particulièrement la topologie des trous réalisés par la détermination des rugosités arithmétiques et totales, respectivement Ra et Rt , en entrée, milieu et sortie du trou percé.

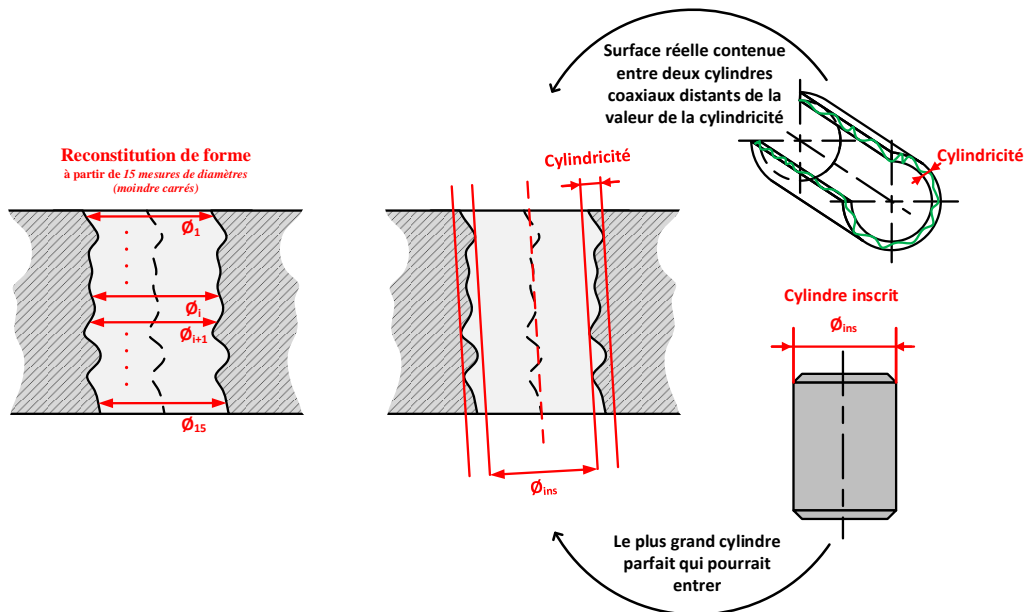


Figure II.3 : Mesures réalisées sur les trous percés

Remarque

Les tolérances appliquées au diamètre dans le cas industriel d'Airbus pour les applications d'assemblage d'empilages hybrides sont telles que $19,995 \text{ mm} < \varnothing_{trou} < 12,05 \text{ mm}$. Cependant comme aucun des cas étudiés sont comparables au cas industriel où les trous sont réalisés avec MQL et assistance vibratoire simultanément, la comparaison avec ces dimensions ne sera pas réalisée dans le cadre de ce mémoire.

II.2.1.2. Mesures pendant l'usinage

Mesures d'effort axial F_z et de couple M_z : Platine KISTLER type 9255B

Etant donné l'impossibilité d'utiliser un dynamomètre rotatif lors d'essais d'usinage avec assistance cryogénique il a fallu trouver un autre moyen d'obtenir la mesure du couple de perçage M_z . Au vu du matériel disponible, l'idée a été la suivante : utiliser les efforts acquis par le biais d'une platine d'efforts fixe pour calculer le couple M_z appliqué par le foret pendant l'usinage. Ainsi, la platine dynamométrique utilisée dans le cadre des essais de ce chapitre est une KISTLER type 9255B.

Comme l'illustre la Figure II.4, le calcul du couple est possible grâce à la manière dont sont disposés les capteurs piézoélectriques sur la platine : il y en a 4 en tout, placés à chaque coin de la platine et mesurant chacun les efforts perçus selon les axes x , y et z . Dans les faits, les signaux qui peuvent être communiqués par la platine correspondent à F_{x1+2} , F_{x3+4} , F_{y2+3} , F_{y1+4} , F_{z1} , F_{z2} , F_{z3} et F_{z4} .

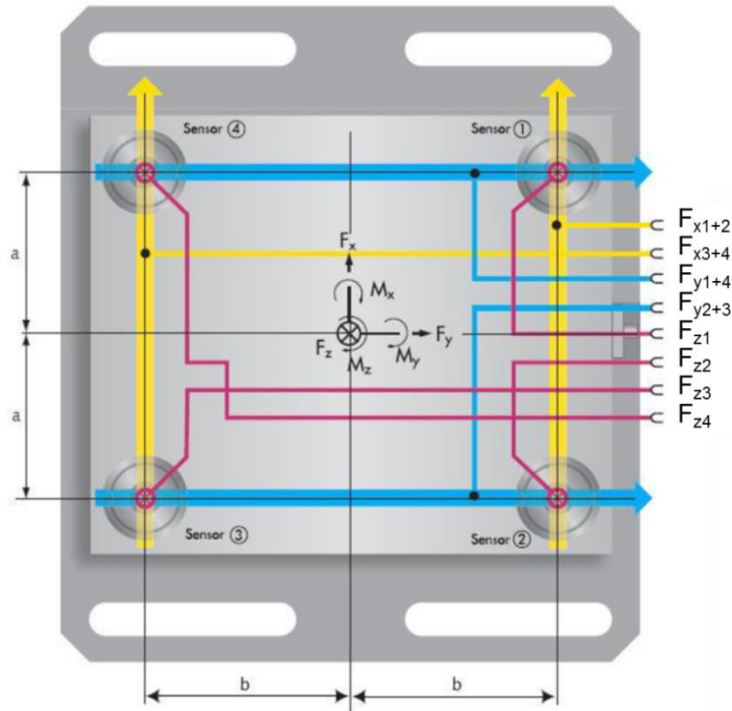


Figure II.4 : Platine d'efforts fixe et répartition des capteurs piézoélectriques [KISTLER]

Ainsi, à condition de connaître les coordonnées du trou percé (x_M, y_M) par rapport au centre de la platine $(0,0)$, le couple M_z se calcule de la manière suivante :

$$M_z = k_{M_z} (-F_{x1+2} |b - y_M| + F_{x3+4} |b + y_M| + F_{y1+4} |a + x_M| - F_{y2+3} |a - x_M|) \quad (eq. II.1)$$

Où k_{M_z} est un coefficient permettant de calibrer la valeur du couple obtenu par le calcul comparativement au couple que l'on obtiendrait avec le dynamomètre rotatif. Ce coefficient a été calibré en perçant des trous à sec tout en mesurant F_z et M_z par le biais de la platine fixe ainsi qu'un capteur rotatif KISTLER type 9123C simultanément.

Pour précisions, il est à noter que dans le cadre des essais présentés dans ce chapitre, les signaux de F_x , F_y et F_z ont été acquis à une fréquence de 5 kHz, sans filtrage pendant l'acquisition. Les gains utilisés étaient de 100 N/V pour les composantes de F_x et F_y et de 400 N/V pour celles de F_z , menant respectivement à des résolutions de 0,031 N et de 0,12 N. En ce qui concerne le traitement des signaux, celui-ci a été réalisé directement sur F_z et M_z qui ont été filtrés à l'aide d'un filtre Butterworth d'ordre 5 pour lequel la fréquence de coupure a été adaptée en fonction de la fréquence de rotation de l'outil.

La Figure II.5 est un exemple de signal de couple M_z en fonction de la profondeur percée Z pour un perçage à sec dans une plaque de Ti6Al4V épaisse de 25,5 mm. Elle permet d'illustrer la manière dont ont été exploités les résultats qui seront présentés dans cette section. En l'occurrence, pour chaque trou percé, 7 profondeurs caractéristiques seront repérées grâce aux informations provenant des mesures géométriques réalisées sur les inserts utilisés et présentées ultérieurement dans la section II.2.2 :

- **$Z_0 = 0$ mm**
Le moment où la pointe du foret commence à entrer dans la matière.
- **$Z_1 = 1,84$ mm**
Le moment où les arêtes sont entièrement rentrées dans la matière et que les listels commencent à y rentrer.

- $Z_2 = 6,96 \text{ mm}$
Le moment où les listels de l'insert sont entièrement entrés dans la matière.
- $Z_3 = 25,5 \text{ mm}$
Le moment où la pointe du foret commence à sortir de la matière.
- $Z_4 = 27,34 \text{ mm}$
Le moment où les arêtes sont entièrement sorties et que les listels de l'insert commencent à sortir.
- $Z_5 = 32,46 \text{ mm}$
Le moment où les listels de l'insert sont entièrement sortis.
- $Z_6 = 35 \text{ mm}$
Le moment où le foret a atteint sa profondeur programmée et remonte en avance rapide.

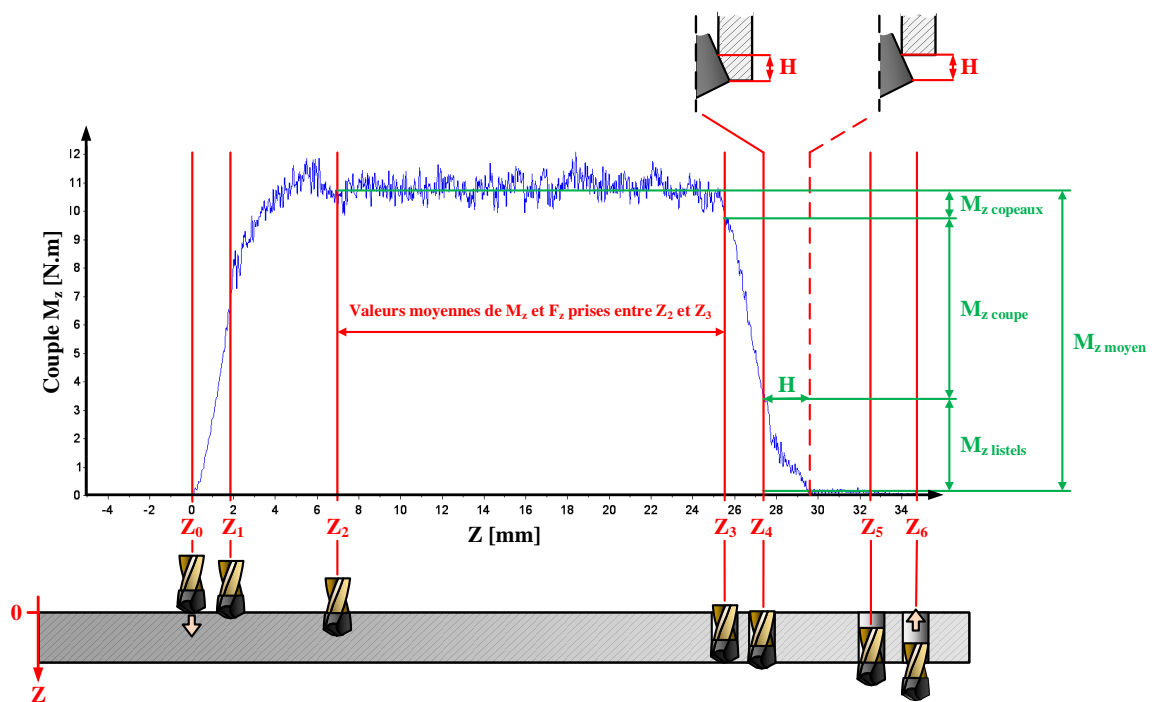


Figure II.5 : Exemple de signal de M_z en fonction de la profondeur percée Z - pour un perçage à sec dans une plaque de Ti6Al4V épaisse de 25,5 mm

A partir de ces repérages, plusieurs résultats pourront être tirés de ces signaux :

- Des calculs de moyennes pour l'effort axial F_z et le couple M_z , réalisés entre Z_2 et Z_3 , ce qui correspond à la période de temps pendant laquelle le foret est dit « en pleine matière », autrement dit pendant que l'intégralité des arêtes et des listels de l'outil sont en train d'usiner.
- La décomposition du couple moyen $M_{z \text{ moyen}}$ en fonction des contributions dues aux arêtes, listels et évacuation des copeaux, respectivement $M_{z \text{ arêtes}}$, $M_{z \text{ listels}}$ et $M_{z \text{ copeaux}}$. En effet, tel que décrit sur la Figure II.5, ces données sont extraites en s'intéressant au signal de M_z pendant la sortie du foret, ce qui permet de décorréler ces différentes contributions.
- Le calcul de la hauteur de contact H de par sa manifestation au travers du couple M_z lorsque les listels ressortent de la matière, autrement dit lorsque le resserrement du trou sur les listels

est la seule cause restante d'efforts sur l'outil. Il est à noter que la détermination de H , qui s'appuie sur des paramètres purement géométriques, est affectée par plusieurs sources d'imprécision telles que l'intervalle de tolérance sur l'épaisseur de la plaque, la formation de bavures qui n'est pas prise en compte par la méthode et les imprécisions sur la détermination de la profondeur percée.

II.2.2. Mesures préliminaires réalisées sur les outils de coupe

Dans le cadre des essais préliminaires présentés dans ce chapitre, les trous ont été percés à l'aide d'outils ISCAR composés d'un corps d'outil en acier SUMOCHAM (référence DCN 120-060-16-5D) et de plusieurs inserts interchangeables en carbure de tungstène (référence ICM 120 IC908) de diamètre 12 mm. La Figure II.6 montre cet outil avec insert monté et démonté afin que le lecteur puisse se représenter ce dont il s'agit.



Figure II.6 : Corps d'outil et insert ISCAR, monté et démonté

Cette section a pour objectif la détermination des caractéristiques géométriques qui servent notamment à la détermination de certaines grandeurs comme les profondeurs de coupe caractéristiques présentées dans la section II.2.1.2, mais servent aussi pour d'autres analyses qui seront présentées au fil de ce mémoire.

II.2.2.1. Diamètres, angles de pointe et hauteurs caractéristiques

L'exploitation des données résultantes d'essais de perçage nécessite la connaissance d'un certain nombre de paramètres géométriques et notamment ceux concernant l'insert utilisé pour l'opération. Ainsi, le système Alicona InfiniteFocus Real3D a été utilisé pour scanner la géométrie 3D des outils de coupe et des mesures ont été réalisées à posteriori sur le logiciel accompagnant le système de mesures. La Figure II.7 montre le résultat d'un des scans réalisés. L'Annexe 3 donne quelques détails sur les mesures réalisées et leur traitement avec le logiciel dédié au dispositif de mesure.

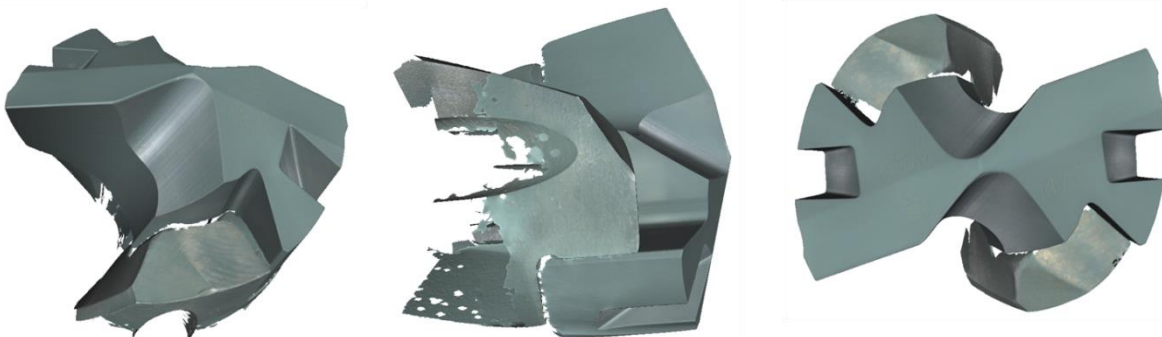


Figure II.7 : Scan 3D de l'insert en place sur son corps d'outil

Finalement, après avoir réalisé ces mesures sur 6 inserts différents, les valeurs moyennes retenues sont celles du Tableau II.1.

| | |
|--|---------|
| Hauteur bec-pointe | 1,84 mm |
| Hauteur insert | 6,96 mm |
| Diamètre insert | 12 mm |
| Diamètre transition central/principal | 5,4 mm |
| Angle de pointe arête centrale | 154,2 ° |
| Angle de pointe arête principale | 142,7 ° |

Tableau II.1 : Valeurs moyennes retenues pour les mesures géométriques des inserts de coupe ISCAR

II.2.2.2. Conicité arrière

Dans le cadre du perçage de Ti6Al4V, la conicité arrière du foret est un paramètre géométrique qu’il est important de connaître. En effet, comme le montre la Figure II.8, le resserrement diamétral et la hauteur de contact paroi-listels sont directement liés par la conicité arrière du foret.

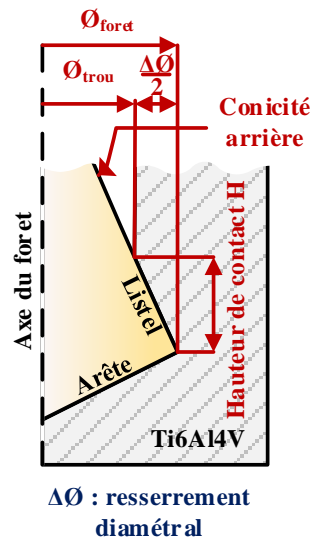


Figure II.8 : Resserrement diamétral, hauteur de contact listel-paroi et conicité arrière

Comme l’indique la Figure II.9, ISCAR donne une valeur nominale de la conicité arrière de 0,3° avec une tolérance de $\pm 0,1^\circ$ pour les inserts utilisés. Cela correspond à une conicité arrière de $1,05\% \pm 0,35\%$ au diamètre.

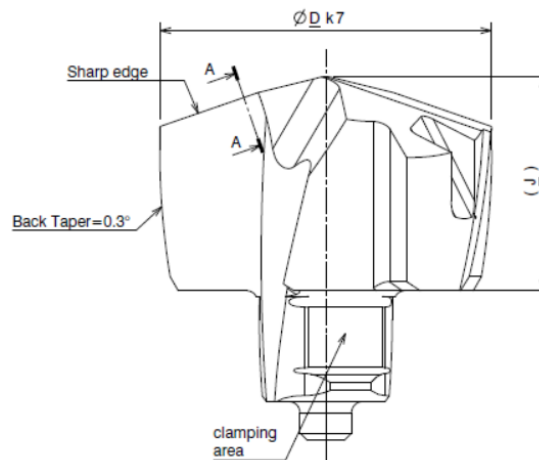


Figure II.9 : Plan de l’insert ISCAR ICM 120 IC908

Dans le but de vérifier cette spécification, 6 inserts d'un même lot ont été scannés à l'aide du système Alicona InfiniteFocus Real3D puis les fichiers de points ont été importés sur le logiciel CATIA afin de mesurer la conicité arrière du foret. Les valeurs mesurées étaient comprises entre 0,7 % et 0,9 % de conicité arrière au diamètre pour une moyenne de 0,82 %, ce qui équivaut à 0,23° de conicité moyenne et est en accord avec les spécifications annoncées par ISCAR.

II.2.2.3. Reconstitution complète de l'arête et des listels (macro CATIA)

Afin de connaître la position des points des arêtes et des listels, un modèle CAO de l'insert, fourni par ISCAR, a été utilisé. Comme l'illustre la Figure II.10, la première étape a été de reconstruire les arêtes et les listels à partir du fichier CAO.

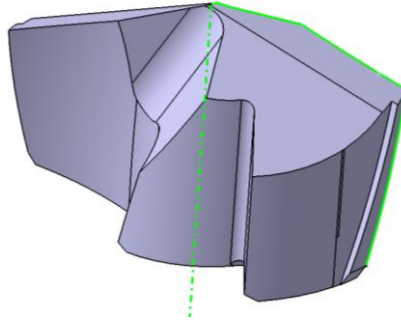


Figure II.10 : Reconstitution des arêtes et des listels sur CATIA

Une fois l'arête et les listels reconstitués, une macro CATIA a été développée pour déplacer automatiquement un point sur l'axe du foret (axe Z), mesurer les coordonnées polaires du point correspondant à cette altitude sur l'arête ou le listel et écrire les résultats dans un fichier. Ces informations permettent de reconstituer l'arête et les listels dans l'espace. Un exemple de mesure de R et θ à Z=-3 mm de la pointe est donné sur la Figure II.11 ci-dessous.

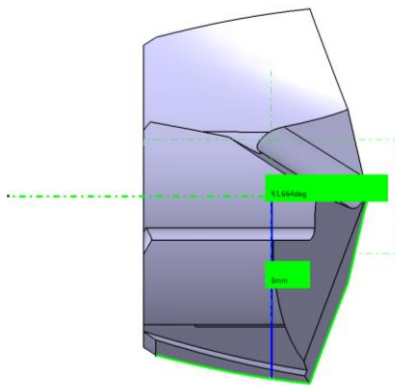


Figure II.11 : Mesure des coordonnées polaires d'un point sur le listel

II.3. Essais de détermination des effets de l'assistance cryogénique

II.3.1. Dispositif expérimental et objectifs

Les essais de perçage ont été réalisés sur une machine-outil à commande numérique 3 axes HURON KX10. Les trous ont été percés à l'aide d'outils ISCAR composés d'un corps d'outil en acier SUMOCHAM (référence DCN 120-060-16-5D) et de plusieurs inserts interchangeables en carbure de tungstène (référence ICM 120 IC908) de diamètre 12 mm et dont les caractéristiques géométriques ont été explicitées dans la section II.2.2.

Les éprouvettes percées étaient des plaques de Ti6Al4V traité β , ce qui correspond au matériau utilisé dans les empilages hybrides. Deux éprouvettes ont été utilisées, une pour la condition à sec et l'autre pour la condition avec assistance cryogénique. Chaque éprouvette a permis de percer 54 trous, les 27 premiers étant réalisés par un insert et les 27 suivants avec un second. En effet, tester chaque condition avec deux inserts permettait de s'affranchir d'une potentielle variabilité due à l'outil de coupe. L'épaisseur des plaques de Ti6Al4V était de 25,5 mm

Pour chaque trou, l'effort axial F_z et le couple M_z ont été mesurés par le biais d'une platine de mesure d'efforts KISTLER 9255B, permettant d'en extraire les valeurs moyennes de F_z et M_z ainsi que les différentes contributions du couple ($M_{z\text{arêtes}}$, $M_{z\text{listels}}$ et $M_{z\text{copeaux}}$) et la hauteur de contact H . Lors de l'utilisation de l'assistance cryogénique, les perçages ont été réalisés avec une pression de 10 bars en sortie du réservoir d'azote liquide, sur l'installation d'Airbus. La Figure II.12 recense les conditions de coupe qui ont été testées pour ces essais.

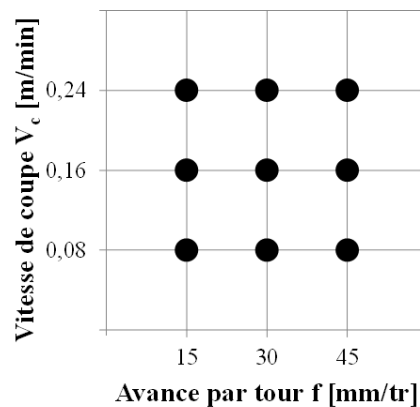


Figure II.12 : Conditions de coupe testées, à sec et avec assistance cryogénique

De plus, une fois les essais réalisés, des mesures visant à déterminer les dimensions et forme finales des trous, ainsi que la topologie des surfaces, ont été réalisées sur le système de mesure sans contact Sentronics i-Dex-tf.

L'objectif de ces essais était de réaliser un premier comparatif entre les conditions à sec et avec assistance cryogénique et notamment de voir les différences constatables au niveau du phénomène de resserrement du trou en perçage de Ti6Al4V afin d'en justifier ou non l'étude approfondie dans le cadre de ce projet de thèse.

II.3.2. Résultats et discussion

Il est à noter que pour tous les résultats présentés, les barres d'erreur sont d'une longueur égale à l'écart-type standard et centrées sur la moitié de celui-ci.

En outre, les mesures de topologie des trous (Ra , Rt) ne sont pas présentées dans ce chapitre par manque d'explications en découlant et d'intérêt vis-à-vis du phénomène de resserrement. Celles-ci sont tout de même disponibles en Annexe 4.

II.3.2.1. Hauteur de contact H

La Figure II.13 présente les hauteurs de contact H obtenues selon les différentes vitesses de coupe V_c et avances par tour f testées, et ce pour les conditions à sec et avec assistance cryogénique.

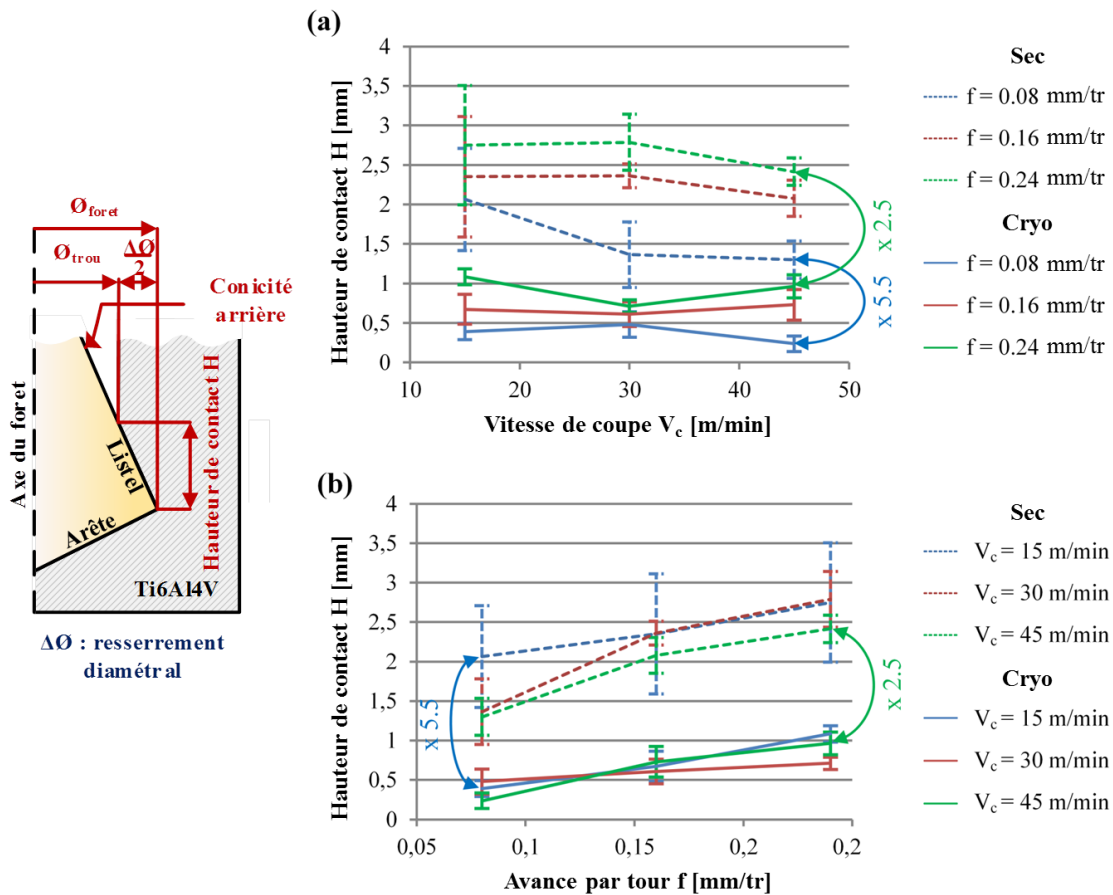


Figure II.13 : Hauteur de contact H en fonction (a) de la vitesse de coupe V_c et (b) de l'avance par tour f - Pour les conditions à sec et avec assistance cryogénique

Avec ou sans assistance cryogénique, il est difficile d'apercevoir des tendances lorsque la hauteur de contact H est exprimée en fonction de la vitesse de coupe V_c , d'autant plus que la dispersion est particulièrement élevée à faible vitesse de coupe ($V_c = 15$ m/min) et à sec. Par contre, dans le cas où elle est exprimée en fonction de l'avance par tour f , il est observable que la hauteur de contact a tendance à augmenter lorsque l'avance par tour augmente.

Finalement, il est important de souligner que de manière générale et pour toutes conditions de coupes confondues, la hauteur de contact est significativement plus grande lorsque le perçage est réalisé à sec, les valeurs de H étant entre 2,5 et 5,5 fois plus grandes que dans le cas avec assistance cryogénique. Ainsi, au vu du nombre de trous réalisés avec et sans assistance cryogénique, il est raisonnable de conclure que celle-ci permet effectivement d'atténuer le phénomène de resserrement du trou et de confirmer par la même occasion le rôle majeur des conditions de refroidissement sur celui-ci.

II.3.2.2. Effort axial F_z

La Figure II.14 présente les efforts axiaux $F_{z, \text{moyen}}$ obtenus selon les différentes vitesses de coupe V_c et avances par tour f testées, et ce pour les conditions à sec et avec assistance cryogénique.

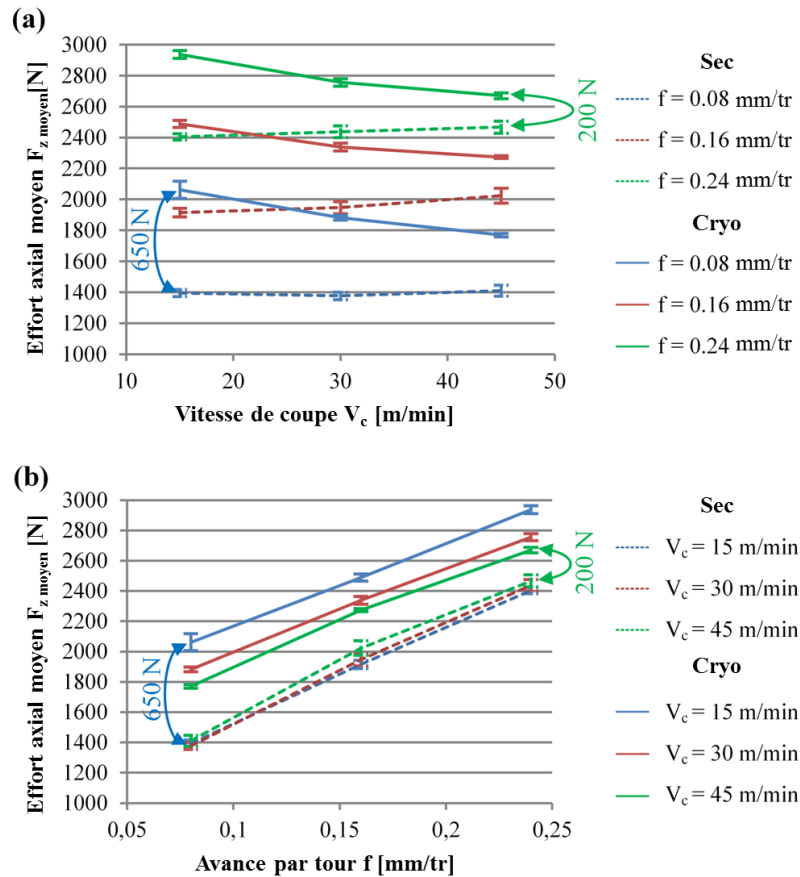


Figure II.14 : Effort axial F_z moyen en fonction (a) de la vitesse de coupe V_c et (b) de l'avance par tour f - Pour les conditions à sec et avec assistance cryogénique

Les résultats montrent qu'à sec, l'effort axial a tendance à légèrement augmenter avec la vitesse de coupe tandis qu'avec assistance cryogénique, les efforts axiaux ont tendance à diminuer lorsque la vitesse de coupe augmente. Concernant l'effet de l'avance par tour, l'effort axial augmente dans tous les cas lorsque celle-ci augmente. De plus il est important de noter que de manière générale, l'effort axial est plus grand lorsque l'assistance cryogénique est utilisée, la différence avec la condition à sec étant comprise entre 200 et 650 N, représentant une augmentation allant de 10 à 50 % selon les paramètres de coupe utilisés.

En effet, le resserrement du trou n'ayant pas d'impact sur les efforts axiaux, ici seul les changements de propriétés mécaniques du matériau, ont une influence. C'est ce qui peut expliquer l'augmentation de l'effort axial moyen, mais aussi la diminution de celui-ci lorsque la vitesse de coupe augmente et que l'assistance cryogénique est utilisée. En effet, le perçage dure moins longtemps, l'azote a moins de temps pour refroidir la matière, ce qui rend l'impact du refroidissement sur les propriétés mécaniques moins important.

II.3.2.3. Couple M_z

La Figure II.15 présente les couples $M_{z, moyen}$ obtenus selon les différentes vitesses de coupe V_c et avances par tour f testées, et ce pour les conditions à sec et avec assistance cryogénique.

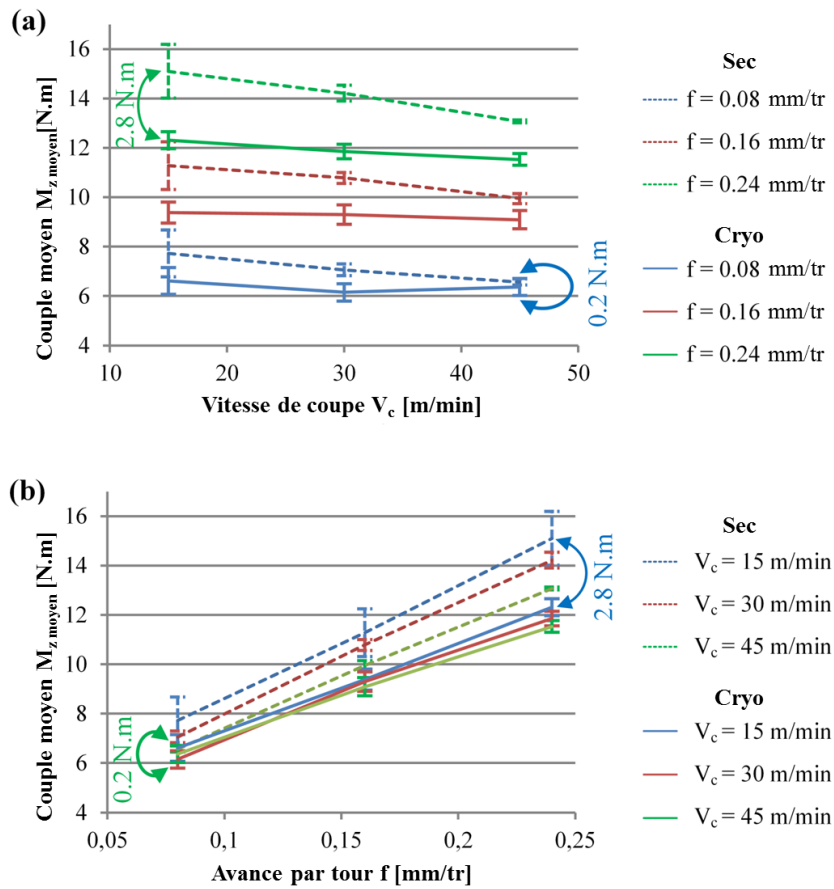


Figure II.15 : Couple M_z moyen en fonction de la vitesse de coupe V_c et de l'avance par tour f - Pour les conditions à sec et avec assistance cryogénique

Les résultats montrent qu'à sec, le couple $M_{z, moyen}$ a tendance à diminuer lorsque la vitesse de coupe augmente : cela pourrait être expliqué par le phénomène d'adoucissement thermique. La tendance est aussi observable avec assistance cryogénique mais de manière beaucoup moins marquée. Concernant l'effet de l'avance par tour, il est clair que le couple de coupe moyen a tendance à augmenter lorsque l'avance augmente. Néanmoins, il est surtout intéressant de noter que de manière générale, le couple $M_{z, moyen}$ est inférieur lorsque l'opération est réalisée avec assistance cryogénique, la différence avec la condition à sec étant comprise entre 0,2 et 2,8 N.m, représentant une diminution allant de 3 à 18 % selon les paramètres de coupe utilisés.

Afin de comprendre la cause de ces variations et comme expliqué précédemment par la Figure II.5, la décomposition du couple $M_{z, moyen}$ en $M_{z, arêtes}$, $M_{z, listels}$ et $M_{z, copeaux}$ est donnée sur la Figure II.16. Celle-ci permet d'observer que la portion du couple due aux arêtes $M_{z, arêtes}$ ne change pas lorsque l'assistance cryogénique est utilisée étant donné que les valeurs obtenues sont similaires à celles déterminées dans le cas à sec. Cela prouve que les changements des propriétés du matériau induits par le refroidissement n'ont pas d'effet significatif sur le couple nécessaire à l'enlèvement de matière ou autrement dit sur la coupe en elle-même. En ce qui concerne la contribution des listels $M_{z, listels}$, les valeurs extraites étaient de 22 à 42 % inférieures dans le cas avec assistance cryogénique, sauf pour le couple de paramètres opératoires $V_c = 45$ m/min et $f = 0,08$ mm/tr où $M_{z, listel}$ était 5 % supérieur au cas à sec. Pour $M_{z, copeaux}$, les valeurs extraites étaient dans la plupart des cas inférieures lorsque l'assistance cryogénique était utilisée, particulièrement à basse vitesse de coupe ($V_c = 15$ m/min) où la contribution au couple due à l'évacuation des copeaux était de 40 à 46 % plus petite que dans le cas à sec. Cependant, la

contribution de $M_{z\text{ copeaux}}$ dans le cas avec assistance était tout de même supérieure de 25 % pour les paramètres $V_c = 30$ m/min et $f = 0,16$ mm/tr, et supérieure de 30 % pour les paramètres $V_c = 45$ m/min et $f = 0,16$ mm/tr.

Finalement, pour tous les jeux de paramètres (V_c, f), excepté ($V_c = 45$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr), la différence de couple moyen $M_{z\text{ moyen}}$ qui a été mise en évidence s'explique par une diminution de la contribution des listels lorsque l'assistance cryogénique est utilisée. Cela s'explique par le fait que le resserrement du trou est limité de manière significative lorsque l'opération est refroidie à l'azote liquide, ce qui mène à une zone de contact plus petite entre les listels et la paroi du trou et par conséquent à un couple induit par frottement lui aussi moins important.

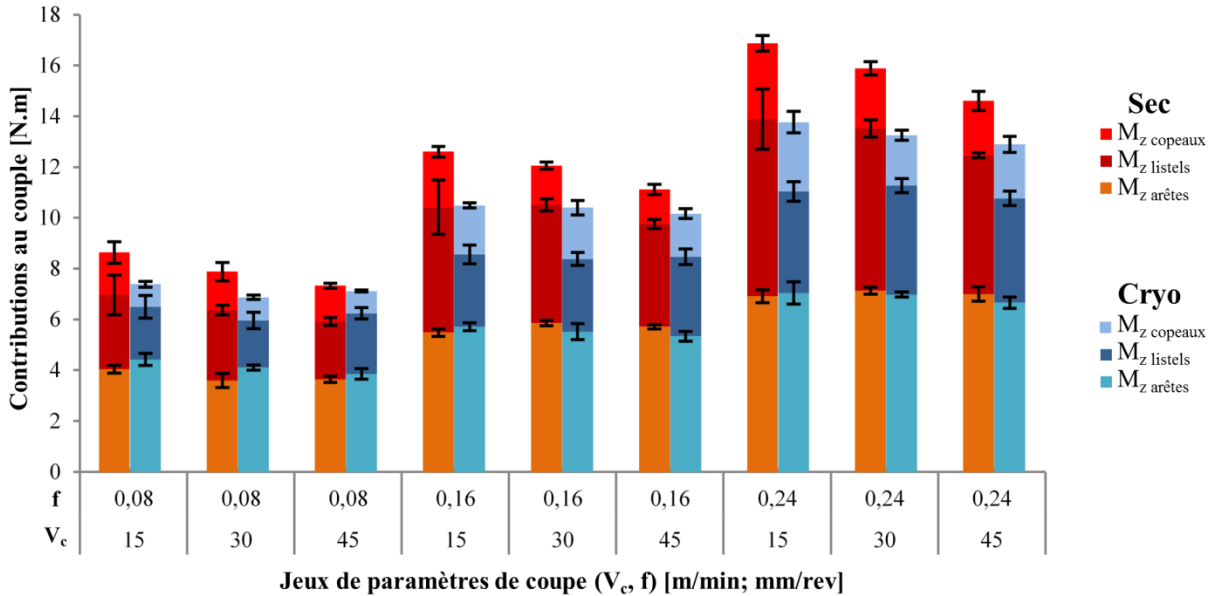


Figure II.16 : Contributions au couple M_z en fonction des paramètres de coupe V_c et f – Pour les conditions à sec et avec assistance cryogénique

II.3.2.4. Formes des trous réalisés

Les mesures réalisées sur les trous consistent en la mesure de 15 diamètres entre l'entrée et la sortie du trou, ce qui permet ensuite de reconstituer la forme générale du trou. Etant donné que chaque condition de coupe a été répétée 6 fois et que le profil des trous est peu stable, les formes de ceux-ci seront présentées moyennées comme l'illustre la Figure II.17 où $Z = 25,5$ mm correspond à l'entrée du trou et $Z = 0$ mm à la sortie de celui-ci. Ainsi, l'impact des conditions de coupe sur la forme finale du trou peut être étudié plus facilement.

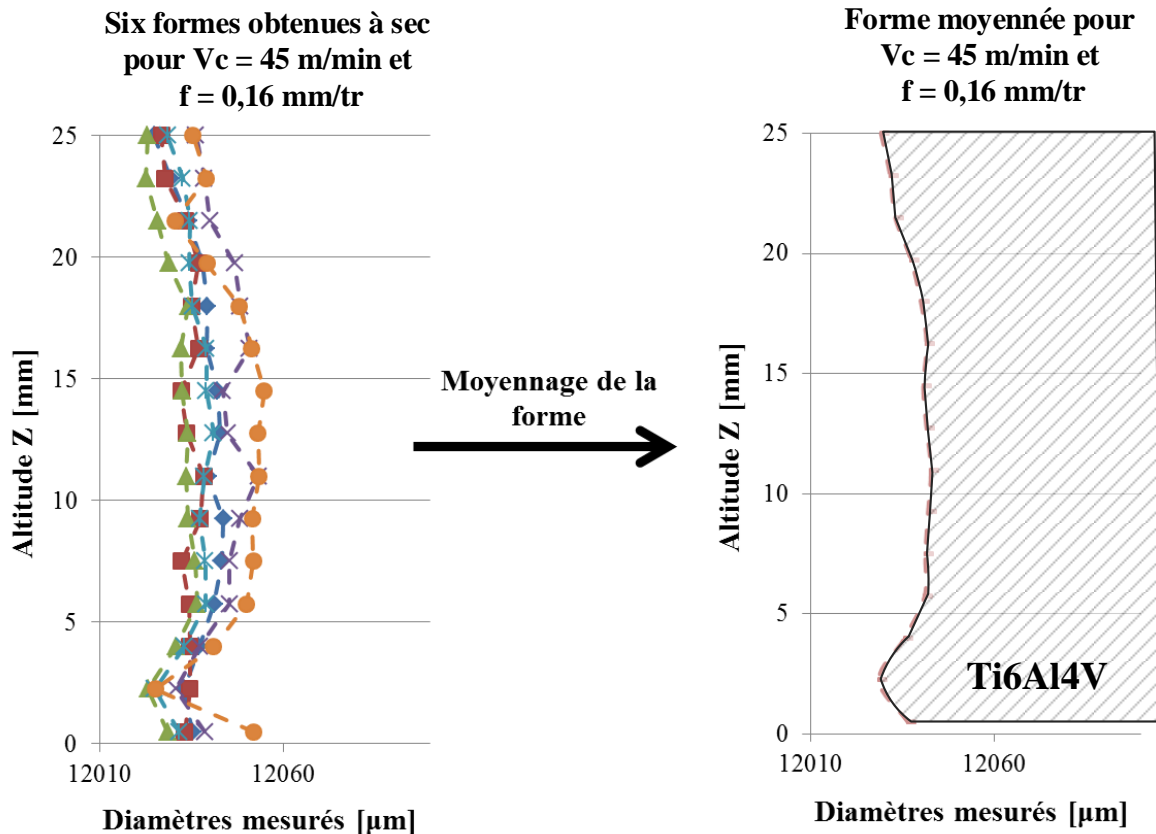


Figure II.17 : Moyennes des formes de trous par condition de coupe

La Figure II.18 permet de voir l'effet de la vitesse de coupe V_c sur la forme finale des trous percé à sec et avec assistance cryogénique. A sec, les résultats montrent que l'augmentation de V_c mène à une diminution du diamètre général du trou et que l'influence de V_c est plus marquée en entrée de trou. Avec assistance cryogénique, les résultats montrent encore une fois que la forme du trou est bien plus stable lorsque l'opération est refroidie à l'azote liquide et dans ce cas, la vitesse de coupe a peu d'effet sur la forme obtenue au final. Ceci étant dit, l'augmentation de V_c semble tout de même entraîner une petite diminution de diamètre en entrée de trou lorsque l'assistance cryogénique est utilisée.

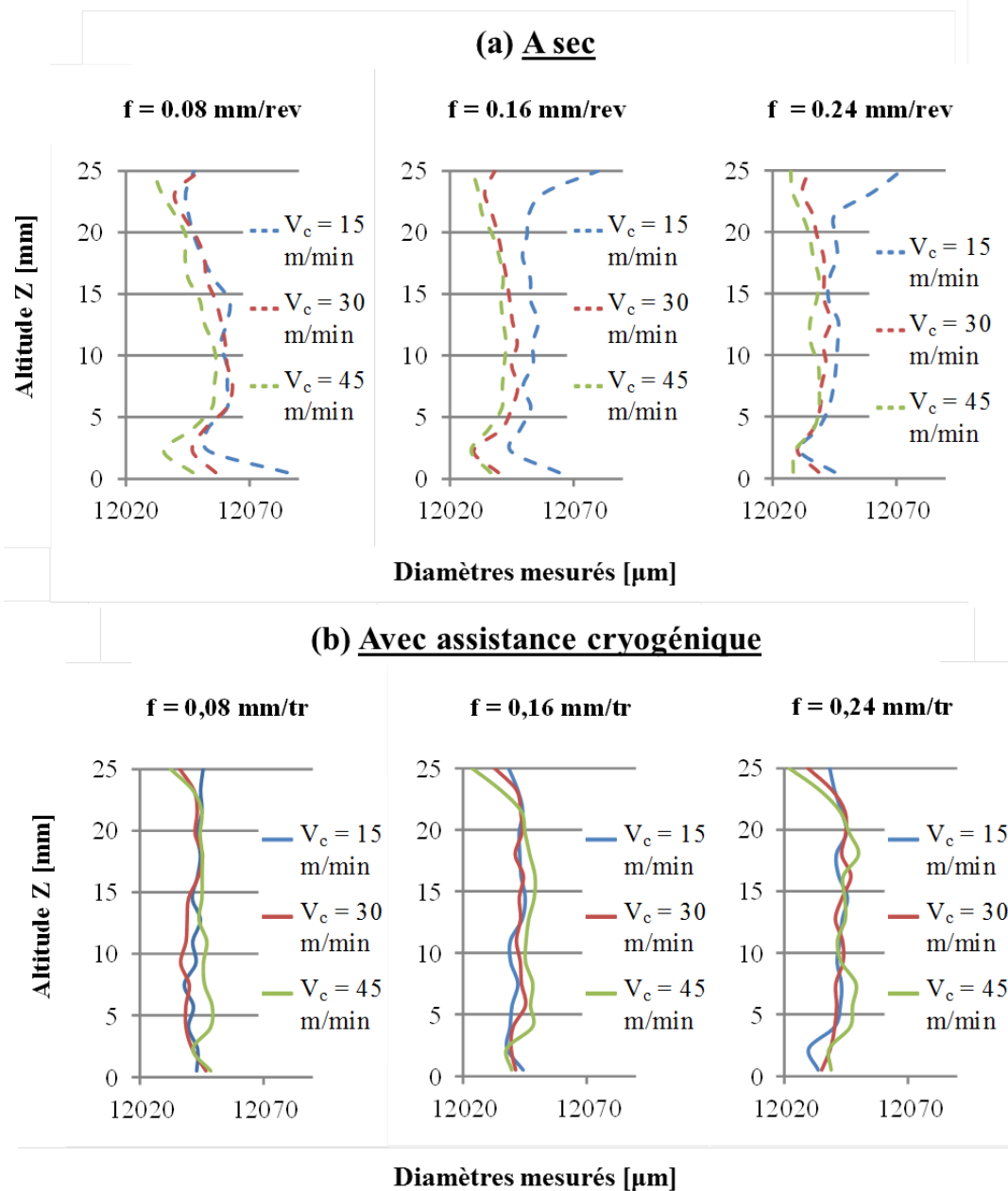


Figure II.18 : Influence de la vitesse de coupe V_c sur la forme finale du trou percé (a) à sec et (b) avec assistance cryogénique

La Figure II.19 quant à elle permet de voir l'effet de l'avance par tour f sur la forme finale des trous percés à sec et avec assistance cryogénique. A sec, les résultats indiquent que l'augmentation de f mène à une diminution du diamètre général du trou et que l'influence de f est plus marquée en milieu de trou. En outre, les mesures réalisées démontrent un effet beaucoup moins important de f lorsque le perçage est réalisé avec assistance cryogénique. Il semblerait tout de même que l'augmentation de f mène à une petite diminution de diamètre en entrée et en sortie de trou.

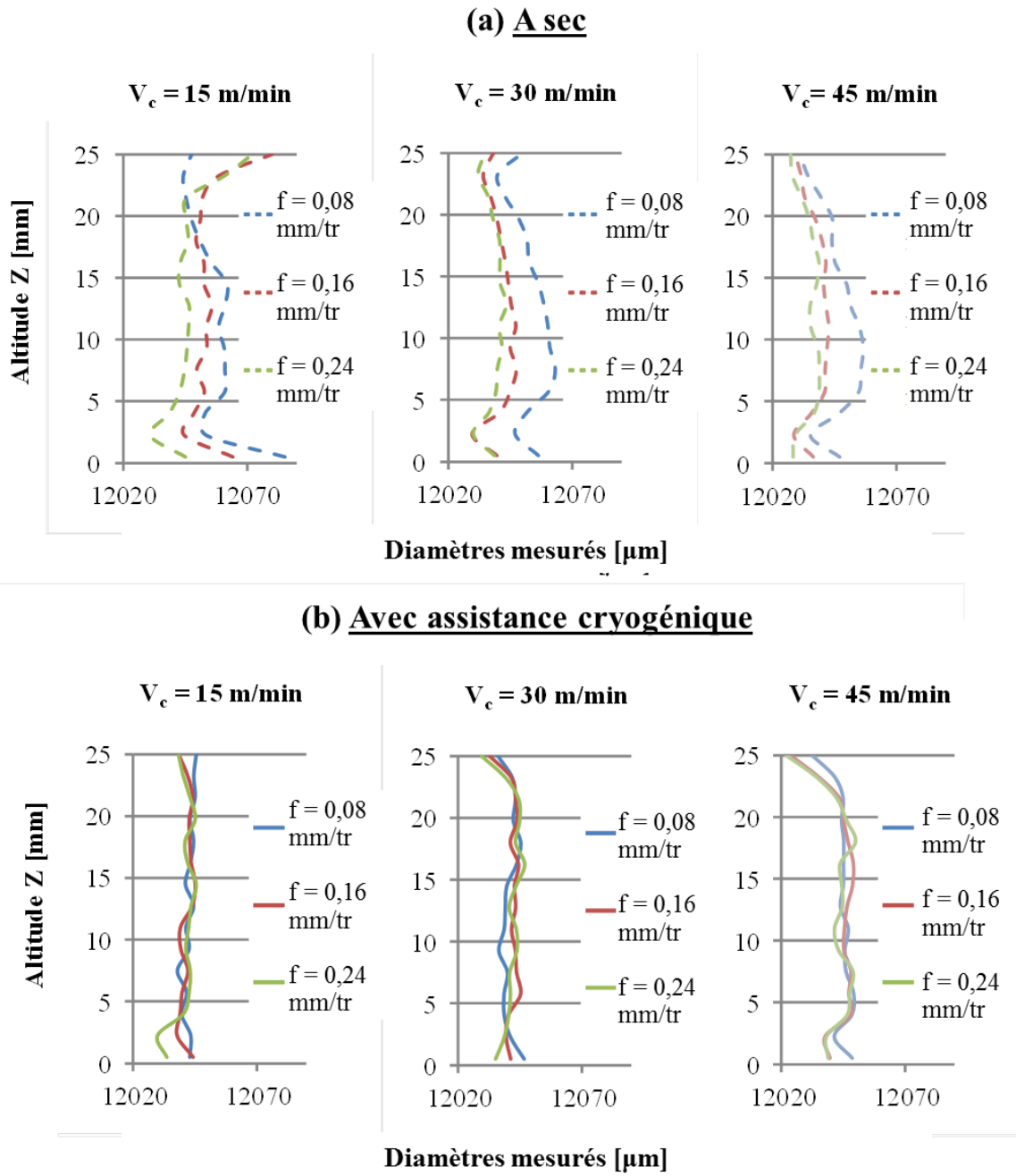


Figure II.19 : Influence de l'avance par tour f sur la forme finale du trou percé (a) à sec et (b) avec assistance cryogénique

Afin de retrouver les tendances énoncées précédemment, il est possible de regarder l'influence de V_c pour tout f confondu ainsi que l'influence de f pour tout V_c confondu. Pour cela, des moyennes des formes de trou par V_c et par f ont été réalisées et sont exposées sur la Figure II.20.

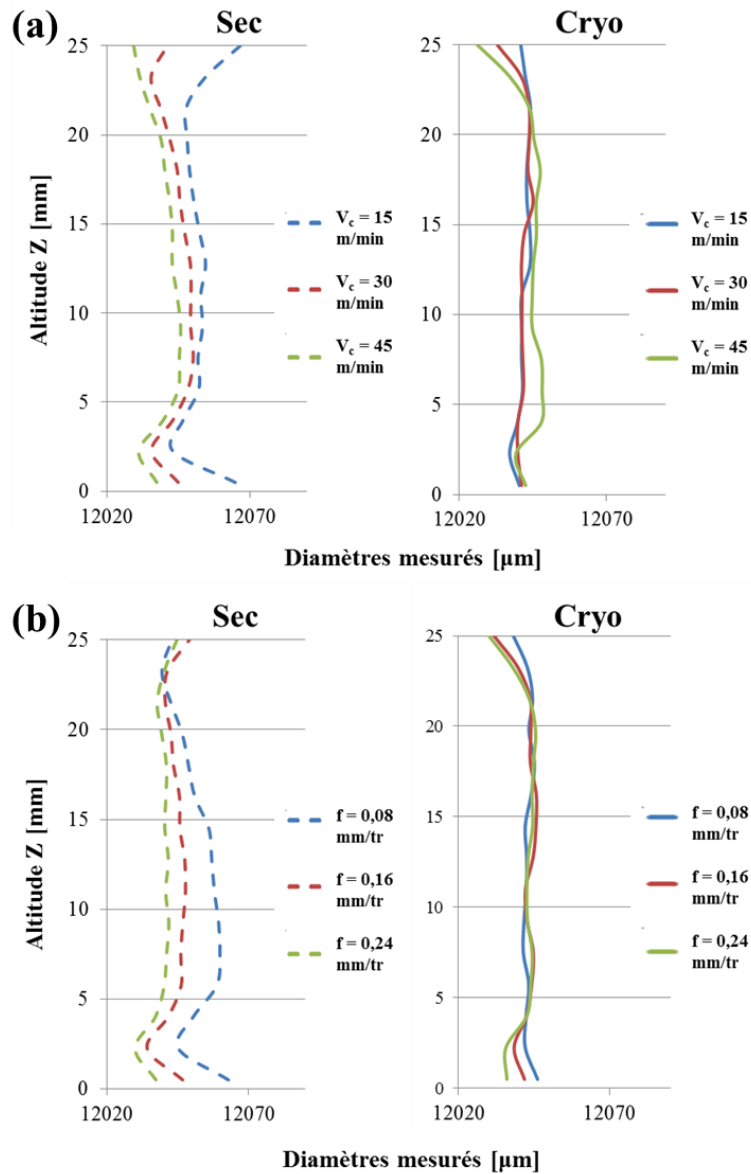


Figure II.20 : Influence des variations de (a) la vitesse de coupe V_c (toutes avances f confondues) et (b) l'avance par tour f (toutes vitesses de coupe V_c confondues) sur la forme finale du trou, à sec et avec assistance cryogénique

Les tendances à sec sont bien remises en évidence :

- L'augmentation de V_c mène à une diminution générale du diamètre avec une influence plus marquée en entrée de trou ;
- L'augmentation de f mène à une diminution générale du diamètre avec une influence plus marquée en milieu de trou.

De la même manière, pour les tendances avec assistance cryogénique :

- L'augmentation de V_c mène à une petite diminution du diamètre en entrée de trou ;
- L'augmentation de f mène à une petite diminution du diamètre en entrée et en sortie de trou ;
- Il y a une bien meilleure stabilité de la forme du trou avec assistance cryogénique que dans le cas à sec.

II.3.2.5. Dimensions générales des trous réalisés

Comme cela a été indiqué dans la section II.2.1.1, les mesures réalisées avec le système de mesure sans contact Sentronics SemDex 101 permettent de déterminer les diamètres des cylindres inscrits ainsi que les cylindricités correspondant aux trous percés. Ainsi, les Figure II.21 et Figure II.22 qui suivent présentent respectivement :

- Le diamètre du cylindre inscrit \varnothing_{ins} des trous en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance. Celui-ci permet de connaître les dimensions maximales d'une pièce cylindrique destinée à être insérée dans le trou : c'est donc une quantité fonctionnelle.
- La cylindricité des trous en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance. Cette information permet de quantifier l'écart de forme constaté dans la partie précédente.

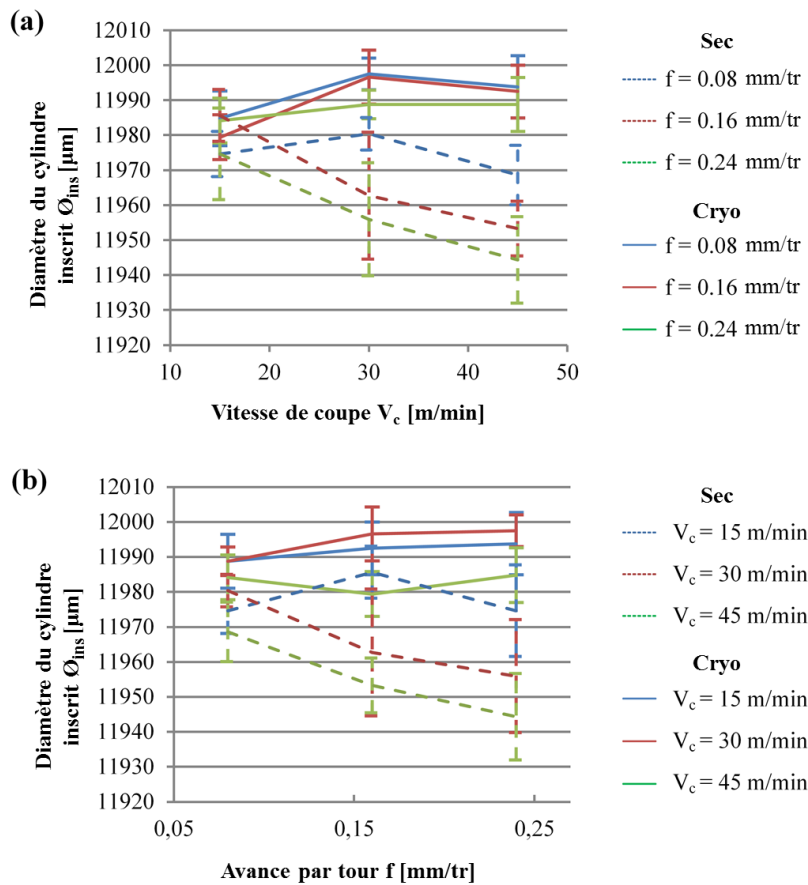


Figure II.21 : Diamètre du cylindre inscrit en fonction (a) de la vitesse de coupe V_c et (b) de l'avance - Pour les conditions à sec et avec assistance cryogénique

En ce qui concerne le diamètre du cylindre inscrit \varnothing_{ins} , celui-ci est peu impacté par les variations de conditions de coupe dans le cas avec assistance cryogénique. Dans le cas à sec par contre, l'augmentation de V_c ou de f a tendance à provoquer une diminution de \varnothing_{ins} comme cela avait été constaté dans la partie précédente sur l'analyse qualitative de la forme du trou. Il est à noter que dans le cas à sec, les valeurs des diamètres \varnothing_{ins} comparant l'influence de f et de V_c se ressemblent beaucoup et sont même quasiment identiques : ce n'est pas une erreur, simplement une coïncidence qui correspond à la réalité expérimentale.

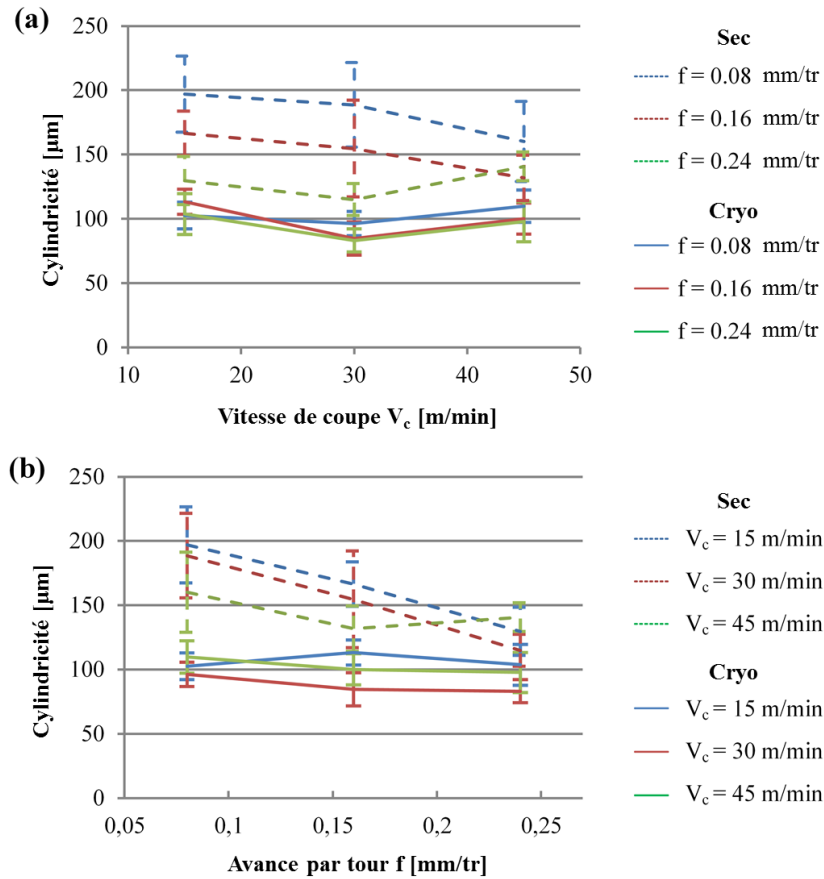


Figure II.22 : Cylindricité des trous en fonction (a) de la vitesse de coupe V_c et (b) de l'avance par tour f - Pour les conditions à sec et avec assistance cryogénique.

La comparaison des cylindricités permet quant à elle de quantifier les écarts de forme constatés précédemment lors de l'analyse qualitative des formes de trous obtenues. En effet, les tendances observées sont retrouvées, notamment la stabilité de la forme du trou dans le cas avec assistance cryogénique où la cylindricité est d'environ 0,1 mm. Par ailleurs, dans le cas à sec, la valeur de la cylindricité peut être jusqu'à deux fois plus élevée et est dans tous les cas plus grande que dans le cas avec assistance. En outre, l'augmentation de l'avance à sec mène à une diminution significative de la cylindricité, conséquence qui est un peu moins marquée dans le cas où c'est la vitesse de coupe qui est augmentée.

II.3.3. Conclusions

Cette première campagne d'essais préliminaires visant à déterminer les effets de l'assistance cryogénique sur le perçage du Ti6Al4V a permis de dégager un certain nombre de tendances vis-à-vis des points d'intérêt suivants :

- **La hauteur de contact H**
Ces essais ont permis de prouver que le resserrement du trou, qui se manifeste ici par la hauteur de contact, est bien plus important dans le cas à sec. Ainsi, le rôle de la thermique dans ce phénomène encore peu étudié a pu être confirmé.
- **L'effort axial F_z**
Le resserrement du trou n'ayant pas d'effet sur l'effort axial, un effort axial moyen plus important a été constaté dans le cas avec assistance cryogénique. Cette augmentation de l'effort pourrait être causée par l'absence d'adoucissement thermique dans le cas où la matière est refroidie pendant le perçage.
- **Le couple M_z**
L'analyse des signaux de couple M_z ont montré que le couple moyen était plus important dans le cas à sec malgré un couple dû aux arêtes équivalent au cas avec assistance cryogénique. Ce surplus de couple dans le cas à sec a pu être imputé à ce qu'il se passe au niveau des listels, autrement dit à l'importance du resserrement du trou dans cette condition, ce qui est en totale adéquation avec les tendances constatées pour la hauteur de contact.
- **Dimensions et forme des trous**
Outre la mise en évidence de l'impact des conditions de coupe dans le cas à sec, ces mesures ont permis de montrer que les dimensions et forme finales des trous sont bien plus stables dans le cas avec assistance cryogénique. Cette constatation est cohérente avec les résultats concernant le resserrement du trou pendant l'opération, qui en toute logique influe sur les dimensions finales du trou réalisé.

Finalement, si l'un des objectifs de cette campagne était de faire un état des lieux des effets de l'assistance cryogénique sur le perçage du Ti6Al4V, l'objectif de mettre en évidence l'importance du phénomène du resserrement du trou a lui aussi été rempli. Ainsi, l'étude poussée du resserrement du trou dans le cadre de ce projet de recherche se voit ici justifiée.

II.4. Essais d'usure

II.4.1. Campagne d'usure n°1 : approche orientée vers l'augmentation de la productivité ($V_c = 45 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$)

II.4.1.1. Dispositif expérimental et objectifs

Les essais de perçage ont été réalisés sur la même machine-outil à commande numérique 3 axes HURON KX10 que pour les essais de comparaison préliminaire des conditions à sec et avec assistance cryogénique (cf. section II.3). De même pour les outils de coupe ISCAR dont il est rappelé que les caractéristiques géométriques ont été explicitées dans la section II.2.2. Le matériau percé était des plaques de Ti6Al4V traité β d'épaisseur 30 mm, chaque éprouvette permettant de réaliser 63 trous. Lors de l'utilisation de l'assistance cryogénique, les perçages ont été réalisés avec une pression de 10 bars en sortie du réservoir d'azote liquide sur l'installation cryogénique du site d'Airbus.

Pour chaque trou, l'effort axial F_z et le couple M_z ont été mesurés par le biais d'une platine de mesure d'efforts KISTLER 9255B. Les arêtes de coupe des inserts ont été scannées sur le système Alicona InfiniteFocus Real 3D avant, pendant et après les essais d'usure. Une fois les essais réalisés, des mesures visant à déterminer les dimensions finales des trous, leurs cylindricités et leurs topologies de surface ont été réalisées sur le système de mesure sans contact Sentronics.

L'objectif de ces essais étant de faire état du potentiel de l'assistance cryogénique, les conditions de coupe ont volontairement été choisies difficiles avec une vitesse de coupe de 45 m/min, soit trois fois supérieure aux conditions usuelles, l'idée étant de favoriser la génération de chaleur afin de jauger l'efficacité du refroidissement de l'opération. L'avance a été fixée à 0.08 mm/tr, ce qui correspond à une condition acceptable pour le CFRP et classique dans le cadre du perçage d'empilages hybrides. De plus, une temporisation de 5 secondes a été mise en place entre le perçage de chaque trou dans le but d'avoir une cadence soutenue permettant de simuler un contexte de production et de prendre en compte l'effet d'accumulation de chaleur au fil des perçages. Il est à noter que le foret est mis à l'écart de la zone d'usinage pendant la temporisation afin de ne pas projeter d'azote sur l'éprouvette ou la platine dans le cas où l'assistance cryogénique est utilisée.

II.4.1.2. Résultats et discussion

Déroulement général de la campagne

Pour cette première campagne d'usure, l'épaisseur des éprouvettes, la vitesse de coupe élevée ainsi que la cadence soutenue des perçages devait permettre d'amplifier les difficultés liées à la génération de chaleur pendant le perçage du Ti6Al4V. En ce qui concerne le déroulement général de la campagne, une éprouvette complète de 63 trous a été percée avec assistance cryogénique, tandis que seulement 18 trous ont pu être percés à sec avant qu'un départ de feu se soit déclaré au sein de la machine, mettant un terme aux essais. En outre, il est à noter qu'un arrêt long (plus de 2h) a été réalisé entre les 28^{ème} et 29^{ème} trous dans le cas avec assistance cryogénique.

Ainsi, et sans analyse complémentaire, le déroulement général de ces essais est déjà un résultat en soi qui permet de confirmer sans équivoque le potentiel de l'assistance cryogénique lorsqu'il s'agit de combattre les élévations de température pendant l'opération de perçage.

Evacuation des copeaux

En ce qui concerne l'évacuation des copeaux, la Figure II.23 montre un cliché réalisé à l'aide de la caméra thermique pendant la sortie du foret durant un perçage à sec. Cette photographie illustre bien les difficultés d'évacuation constatées pendant la campagne où les copeaux atteignaient des dimensions excessives par manque de fragmentation, menant à la formation de pelotes autour de l'outil.

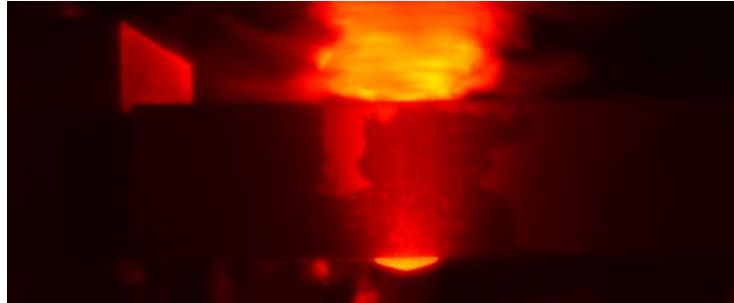


Figure II.23 : Image thermique d'un outil débouchant pendant le perçage de Ti6Al4V à sec pour $V_c = 45$ m/min et $f = 0,08$ mm/tr

En complément, la Figure II.24 montre une de ces pelotes, prise en photo après un perçage, et sur laquelle on peut voir la coloration du copeau qui atteste des conditions extrêmes de montée en température de l'opération due au caractère réfractaire de l'alliage de Ti6Al4V.



Figure II.24 : Copeaux dans le cas à sec pour $V_c = 45$ m/min et $f = 0,08$ mm/tr

Pour ce qui est de l'évacuation des copeaux dans le cas avec assistance cryogénique, une bien meilleure fragmentation a été constatée, permettant d'éviter la formation de pelotes. La Figure II.25, photographie thermique prise au même moment que pour le cas à sec, montre un foret vierge de tout amas de copeaux, ce qui correspond à la situation habituellement constatée lors de la campagne.

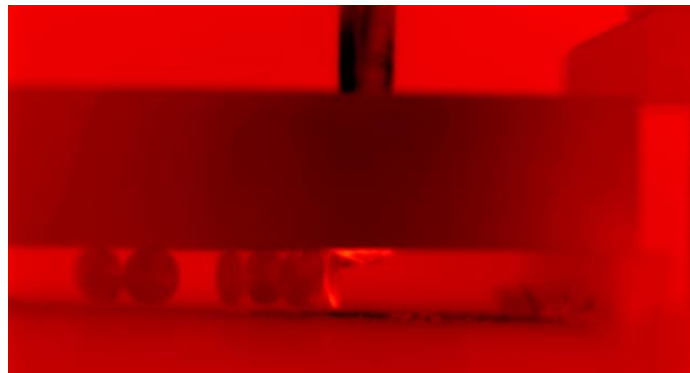


Figure II.25 : Image thermique du foret débouchant pendant un perçage de Ti6Al4V avec assistance cryogénique pour $V_c = 45$ m/min et $f = 0,08$ mm/tr

Analyse des arêtes de coupe

Dans les deux cas, à sec et avec assistance cryogénique, du Ti6Al4V a adhéré aux arêtes en quantité équivalente, empêchant de voir toute potentielle trace d'usure. L'évolution de celle-ci ne pouvait donc qu'être observée au travers des autres mesures réalisées (efforts de coupe, dimensions des trous).

Hauteur de contact H

De la même manière que pour les essais préliminaires de détermination des effets de l'assistance cryogénique, la hauteur de contact, directement liée au resserrement du trou pendant l'opération, a été extraite des données de couple M_z . La Figure II.26 présente les résultats concernant cette quantité et montre que comme les essais préliminaires l'avaient prouvé, la hauteur de contact est initialement plus grande dans le cas à sec que dans le cas avec assistance cryogénique. Au fil des perçages, la hauteur de contact évolue significativement dans le cas à sec, passant de 1 mm à 2,8 mm, soit une multiplication du resserrement diamétral par plus de 2. Dans le cas avec assistance cryogénique, la hauteur de contact évolue dans les mêmes proportions mais reste en dessous de 1 mm sauf pour quelques exceptions, le maximum étant de 1,3 mm. Ainsi, ayant d'ores et déjà identifié le rôle majeur de la thermique dans le phénomène de resserrement du trou, ces constatations s'expliquent par l'importance du phénomène d'accumulation thermique au fil des perçages. En effet, le resserrement du trou aura été de plus en plus intense au cours de la batterie d'essais à sec, allant de pair avec l'augmentation des températures due à la cadence imposée. Dans le cas avec assistance cryogénique par contre, ces élévations de température auront été combattues de manière efficace par le refroidissement procuré par l'azote, permettant de limiter le phénomène de resserrement du trou.

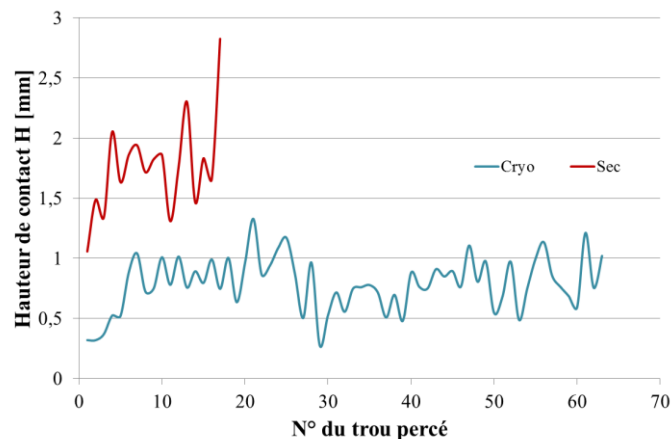


Figure II.26 : Evolution de la hauteur de contact H pendant la campagne d'usure à $V_c = 45$ m/min et $f = 0,08$ mm/tr

Effort axial F_z et couple M_z

La Figure II.27 expose l'évolution de l'effort axial $F_{z,moyen}$, du couple $M_{z,moyen}$ et de la contribution des listels $M_{z,listels}$ au cours des essais à sec et avec assistance cryogénique. Dans le cas des 18 trous réalisés à sec avant l'arrêt imprévu de la campagne, l'effort axial $F_{z,moyen}$ a subi une augmentation de 57 %, passant de 1520 N à 2390 N. Le couple $M_{z,moyen}$ quant à lui a subi une augmentation équivalente de 58 %, passant de 4,4 N.m à 7 N.m. Cette augmentation du couple peut être imputée à l'intensification du resserrement du trou sur les listels grâce à la détermination de la contribution des listels $M_{z,listels}$ dont l'évolution coïncide avec celle de $M_{z,moyen}$.

Par ailleurs, les résultats concernant les 63 trous percés avec assistance cryogénique montrent une grande stabilité de l'effort axial $F_{z,moyen}$ au fil des perçages avec une augmentation de seulement 8 % entre le début et la fin, passant de 1650 N à 1780 N après avoir réalisé une quantité de trous trois fois supérieure au cas à sec. Pour ce qui est des couples $M_{z,moyen}$ et $M_{z,listels}$, ceux-ci restent dans une fourchette comprise entre 5 et 7 N.m et 1 et 3 N.m respectivement avec des variations tout au long de la campagne sans pour autant avoir une tendance croissante à l'échelle des 63 trous. Ainsi, l'effort

axial F_z et les couples $M_{z\text{moyen}}$ ainsi que $M_{z\text{listels}}$ peuvent être considérés comme ayant été stables durant cette première campagne d'usure.

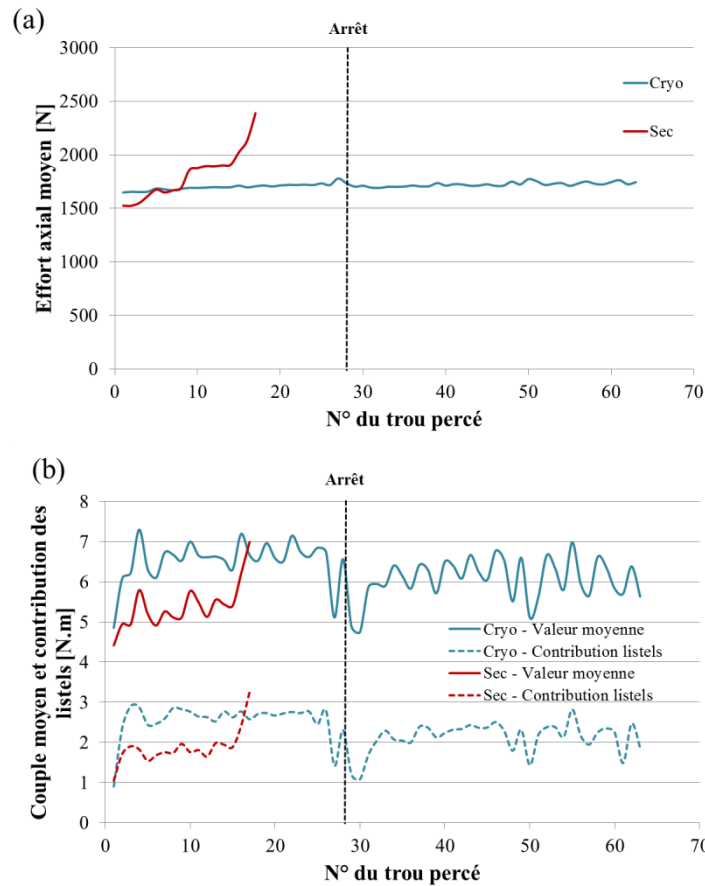


Figure II.27 : Evolution de (a) l'effort axial $F_{z\text{moyen}}$ et (b) du couple $M_{z\text{moyen}}$ ainsi que sa part due aux listels $M_{z\text{listels}}$ pendant la campagne d'usure à $V_c = 45\text{ m/min}$ et $f = 0,08\text{ mm/tr}$

Topologie de la surface des trous réalisés

En ce qui concerne les mesures de R_a et R_t réalisées en entrée, milieu et sortie des trous réalisés pendant la campagne, la Figure II.28 en donne une moyenne sur l'ensemble des perçages effectués. En effet, ces quantités n'ayant pas ou très peu évolué, il n'a pas été jugé utile d'en montrer l'évolution.

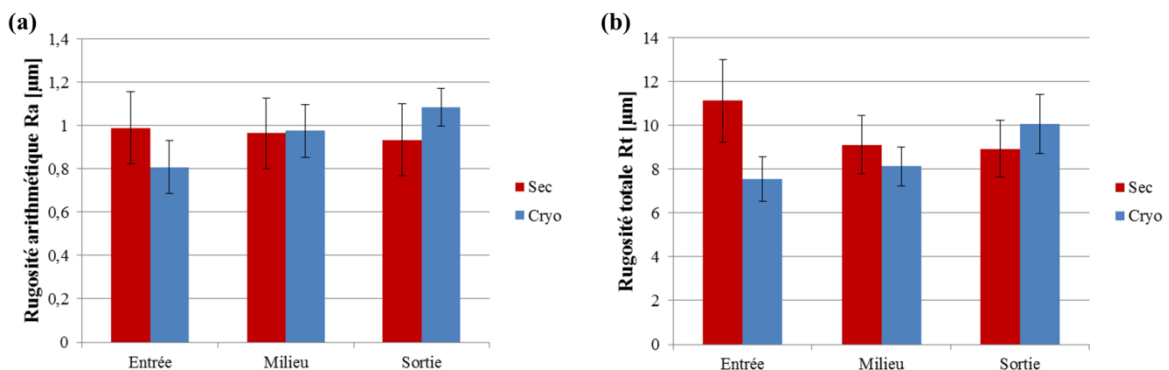


Figure II.28 : Evolution de (a) la rugosité arithmétique R_a et (b) la rugosité totale R_t pendant la campagne d'usure à $V_c = 45\text{ m/min}$ et $f = 0,08\text{ mm/tr}$

Les mesures réalisées permettent de dire que R_a est légèrement meilleur dans le cas avec assistance cryogénique en entrée de trou, équivalent au cas à sec au milieu de ceux-ci et légèrement moins bon en

sortie de trou. Les tendances sont exactement les mêmes pour la rugosité totale Rt , ce qui ne permet donc pas réellement de départager les cas à sec et avec assistance cryogénique du point de vue topologie de la surface.

Dimension et forme des trous

La Figure II.29 donne l'évolution de la forme et dimensions générale des trous pour la campagne d'essais : ces courbes ont été obtenues par un traitement identique à celui réalisé dans la section II.3.2.4., $Z = 30$ mm correspondant à l'entrée du trou et $Z = 0$ mm à la sortie. Ainsi, les 18 trous réalisés à sec permettent de constater une tendance à la diminution du diamètre en milieu et sortie de trou, ce qui est cohérent avec l'hypothèse que l'accumulation thermique au fil des perçages mène à une amplification du phénomène de resserrement de trou. En ce qui concerne les trous réalisés avec assistance cryogénique, la forme des trous reste stable tout au long de la campagne même si une faible diminution du diamètre moyen est constatée. Finalement, sur le nombre de trous réalisés, la condition à sec mène à des trous d'un diamètre général environ $20 \mu\text{m}$ plus grand que dans le cas avec assistance cryogénique.

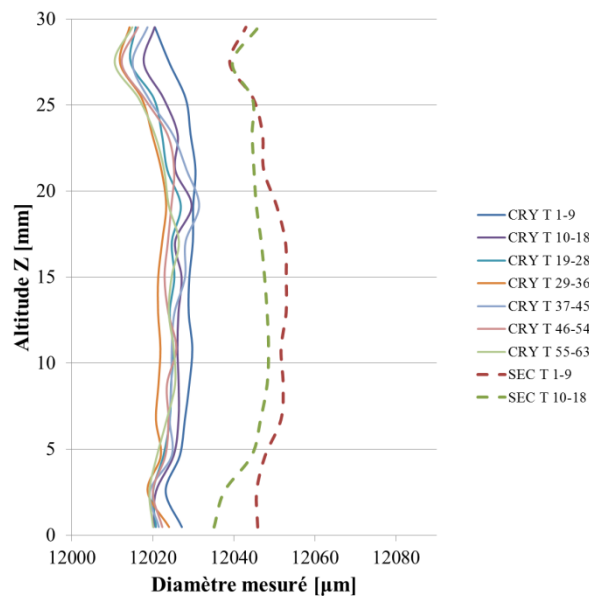


Figure II.29 : Evolution de la forme des trous pendant la campagne d'usure à $V_c = 45$ m/min et $f = 0,08$ mm/tr

La Figure II.30 expose quant à elle l'évolution des diamètres des cylindres inscrits ainsi que la cylindricité pour les trous réalisés. Il est à noter que l'indicateur le plus important est le diamètre du cylindre inscrit qui correspond au diamètre maximal d'arbre cylindrique que l'on pourrait insérer dans l'alésage correspondant au trou réalisé, que celui-ci soit matérialisé par un rivet, une vis ou tout autre élément d'assemblage mécanique. Ainsi, ces courbes permettent de retrouver de manière quantifiée les constatations faites sur la Figure II.29 vis-à-vis de la stabilité des dimensions des trous réalisés avec assistance cryogénique pour lesquels les diamètres des cylindres inscrits restent dans une plage de $0,05$ mm en dessous du $\varnothing 12$ mm et où cylindricité reste en dessous des $0,15$ mm. En revanche, il est difficile de retrouver la tendance au rétrécissement du diamètre en milieu et sortie de trou évoquée dans le cas à sec étant donné que les valeurs représentées sur ces graphes correspondent à des critères globaux ne prenant pas en compte la forme du trou réalisé. Quoiqu'il en soit, les valeurs en question montrent une fois encore que les diamètres des cylindres inscrits sont plus grands d'environ $20 \mu\text{m}$ dans le cas à sec et que la cylindricité est comparable dans les deux cas.

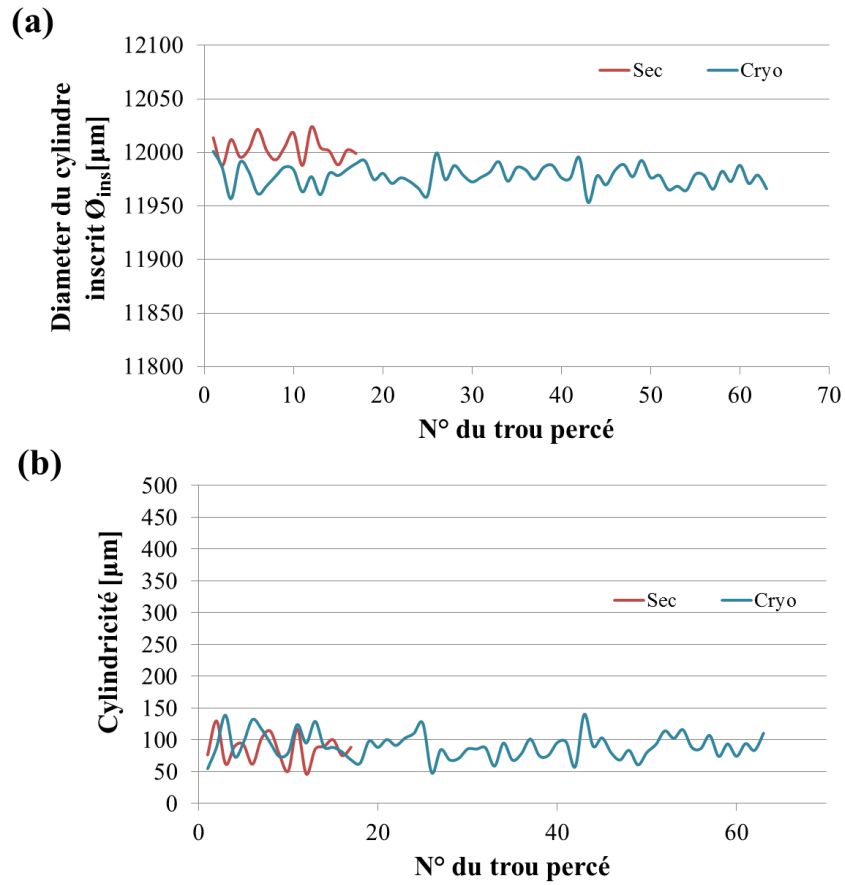


Figure II.30 : Evolution du diamètre du cylindre inscrit et de la cylindricité pendant la campagne d'usure à $V_c = 45 \text{ m/min}$ et $f = 0,08 \text{ mm/tr}$

II.4.2. Campagne n°2 : approche orientée vers l'augmentation de la durée de vie des outils ($V_c = 15 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$)

II.4.2.1. Dispositif expérimental et objectifs

Pour cette deuxième campagne, les essais d'usinage ont été réalisés dans les mêmes conditions exactement que pour la précédente dont les détails sont exposés à la section II.4.1.1, à la différence près que les conditions de coupe ont été changées et la temporisation entre les trous a été augmentée. En effet, suite aux résultats de la première campagne qui était orientée vers l'augmentation de la productivité et l'amplification des phénomènes thermiques par l'utilisation d'une vitesse de coupe élevée et d'une cadence très soutenue, il a été décidé d'utiliser une approche orientée vers l'augmentation de la durée de vie des outils pour cette deuxième campagne.

Ainsi, la vitesse de coupe utilisée a été divisée par trois et donc fixée à $V_c = 15 \text{ m/min}$, ce qui correspond au standard, et l'avance a été maintenue à $f = 0,08 \text{ mm/tr}$, valeur standard elle aussi de le cadre du perçage des empilages. De plus, la temporisation entre les trous a été doublée, passant de 5 à 10 s pour ces essais.

II.4.2.2. Résultats et discussion

Déroulement général de la campagne

Deux éprouvettes complètes de 63 trous, soit 126 trous au total, ont été percées avec assistance cryogénique, tandis que seulement 22 trous ont pu être percés à sec avant que l'insert ne se brise, mettant un terme à cette deuxième campagne. Deux arrêts (plus de 2 heures) ont été réalisés dans le cas avec assistance cryogénique : entre les 28^{ème} et 29^{ème} trous et entre les 63^{ème} et 64^{ème} trous.

Evacuation des copeaux

En ce qui concerne l'évacuation des copeaux, le bilan est le même que pour la campagne précédente. En effet, la tendance des copeaux à mal s'évacuer et former des pelotes dans le cas à sec est inchangée et le niveau de fragmentation est une fois encore convenable lorsque le perçage est réalisé avec assistance cryogénique, permettant d'éviter la formation de pelotes de copeaux autour de l'outil.

Analyse des arêtes de coupe

Comme lors de la première campagne, du Ti6Al4V a adhéré aux arêtes en quantité équivalente dans les cas à sec et avec assistance cryogénique, empêchant de voir toute potentielle trace d'usure. L'évolution de celle-ci ne pouvait donc ici aussi qu'être observée au travers des autres mesures réalisées (efforts de coupe, dimensions des trous).f

Hauteur de contact H

La Figure II.31 présente les résultats concernant la hauteur de contact et montre encore une fois que comme les essais préliminaires l'avaient prouvé, la hauteur de contact est initialement plus grande dans le cas à sec que dans le cas avec assistance cryogénique. Au fil des perçages, la hauteur de contact évolue significativement dans le cas à sec, passant de 0,75 mm à 4,1 mm, soit une multiplication du resserrement diamétral par plus de 5. A l'inverse, dans le cas avec assistance cryogénique, la hauteur de contact ne change pas significativement et ce malgré la quantité de trous percés bien plus élevée. Ainsi, ayant d'ores et déjà identifié le rôle majeur de la thermique dans le phénomène de resserrement du trou, ces constatations s'expliquent par l'importance du phénomène d'accumulation thermique au fil des perçages. En effet, le resserrement du trou aura été de plus en plus intense au cours de la batterie d'essais à sec, allant de pair avec l'augmentation des températures et étant probablement responsable de la casse de l'insert de coupe, ayant mené à un effort radial trop intense sur les listels. Dans le cas avec assistance cryogénique par contre, ces élévations de

température auront été combattues de manière efficace par le refroidissement procuré par l'azote, limitant le phénomène de resserrement du trou et empêchant toute évolution du resserrement diamétral.

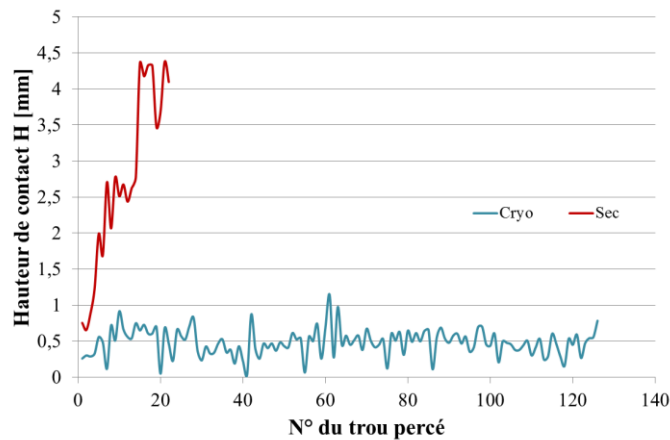


Figure II.31 : Evolution de la hauteur de contact H pendant la campagne d'usure à $V_c = 15$ m/min et $f = 0,08$ mm/tr

Effort axial F_z et couple M_z

La Figure II.32 expose l'évolution de l'effort axial $F_{z, \text{moyen}}$, du couple $M_{z, \text{moyen}}$ et de la contribution des listels $M_{z, \text{listels}}$ au cours des essais à sec et avec assistance cryogénique. Dans le cas des 22 trous réalisés à sec avant la casse de l'insert, l'effort axial $F_{z, \text{moyen}}$ n'a pas augmenté de manière significative et il a même été constaté une petite diminution de celui-ci pendant les premiers trous réalisés. En effet, les variations enregistrées entre les trous montrent une différence de 23% entre l'effort moyen maximal et minimal, valant respectivement 1315 N et 1620 N. Dans le cas du couple $M_{z, \text{moyen}}$ par contre, la tendance est clairement à l'augmentation, la différence entre maximum et minimum étant ici de 108%, faisant plus que doubler entre le début et la fin des essais, passant de 4,8 N.m à 9,9 N.m. Cette augmentation du couple peut ici aussi être imputée à l'intensification du resserrement du trou sur les listels grâce à la détermination de la contribution des listels $M_{z, \text{listels}}$ dont l'évolution coïncide avec celle de $M_{z, \text{moyen}}$.

Quant à eux, les résultats avec assistance cryogénique démontrent une fois de plus la grande stabilité de l'opération, ce en dépit de la quantité de trous percés. En effet, l'effort axial $F_{z, \text{moyen}}$ ne montre aucune tendance à l'augmentation et la différence entre la valeur maximale enregistrée et la valeur minimale, respectivement 2130 N et 1980 N, est de seulement 7%, différence qui est imputée au refroidissement progressif de l'éprouvette au cours des perçages : les longues pauses réalisées au 28^e et 63^e trou en témoignent. De même pour le couple $M_{z, \text{moyen}}$ où le constat est à l'absence de tendance après une légère augmentation durant les premiers trous. En effet, partant d'une valeur initiale de couple moyen de 5,3 N.m, les valeurs oscillent entre 6 et 8 N.m tout au long de la campagne, ce qui correspond tout de même à une différence de 51% entre maximum et minimum enregistré, mais sans tendance claire à l'augmentation. Il en va de même pour $M_{z, \text{listels}}$ qui oscille de la même manière entre 2 et 3 N.m, sans avoir de tendance à augmenter.

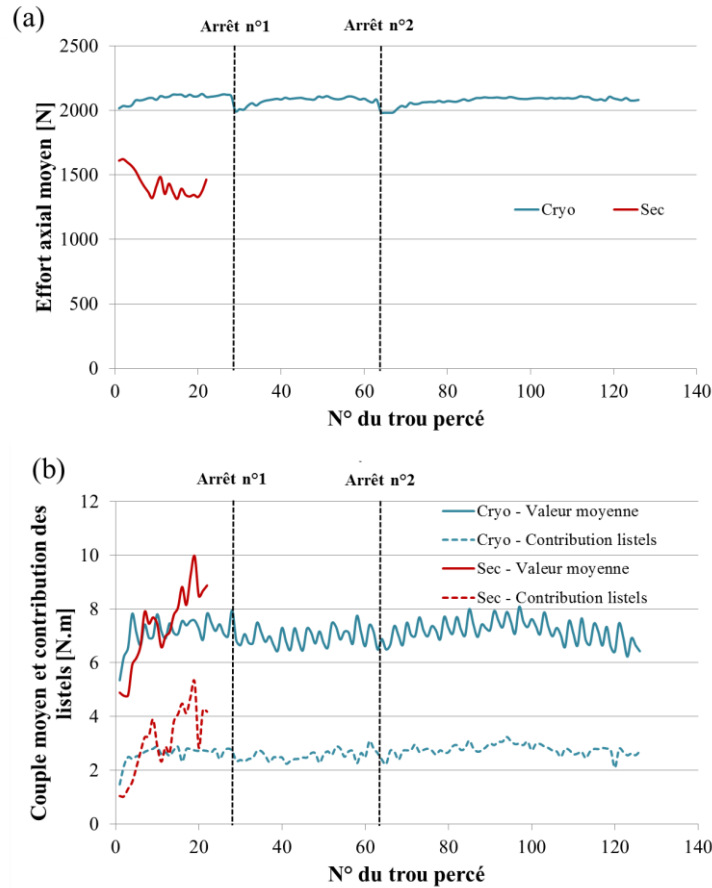


Figure II.32 : Evolution de (a) l'effort axial $F_{z\text{moyen}}$ et (b) du couple $M_{z\text{moyen}}$ ainsi que sa part due aux listels $M_{z\text{listels}}$ pendant la campagne d'usure à $V_c = 15\text{ m/min}$ et $f = 0,08\text{ mm/tr}$

Topologie de la surface des trous réalisés

La Figure II.33 donne la moyenne des mesures de Ra et Rt , en entrée, milieu et sortie des trous, pour l'ensemble de la campagne. En effet, ces quantités n'ayant pas subi d'évolution significative dans un sens où l'autre, il n'a pas été jugé utile d'en représenter l'évolution trou par trou.

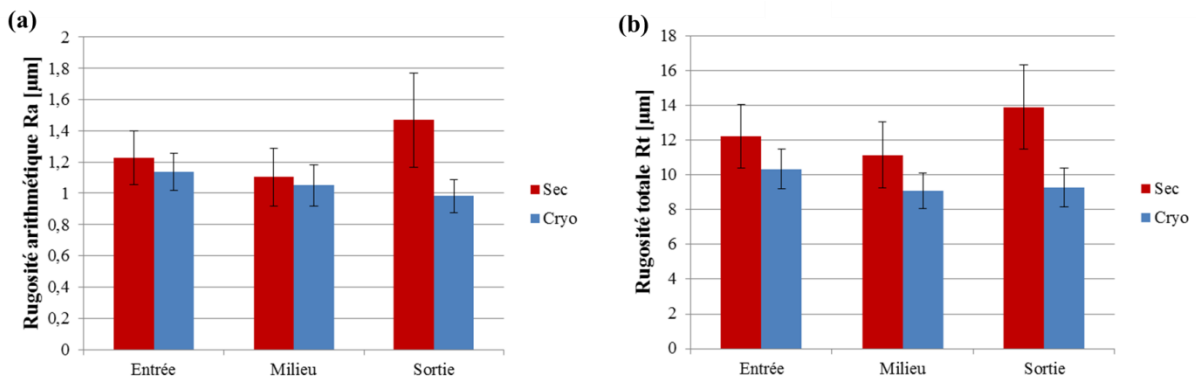


Figure II.33 : Evolution de (a) la rugosité arithmétique Ra et (b) la rugosité totale Rt pendant la campagne d'usure à $V_c = 45\text{ m/min}$ et $f = 0,08\text{ mm/tr}$

Pour cette campagne, les mesures effectuées présentent un Ra et un Rt légèrement meilleur en entrée et milieu de trou et bien meilleur en sortie de trou dans le cas avec assistance cryogénique, donnant clairement l'avantage à cette condition vis-à-vis du perçage à sec.

Dimensions et forme des trous

La Figure II.34 donne l'évolution de la forme et dimensions générale des trous pour cette seconde campagne d'essais. Ainsi, les 22 trous réalisés permettent de constater une forme très élargie en entrée et en sortie de trou tout au long des perçages ainsi qu'une diminution progressive du diamètre au milieu, ce qui est une fois de plus cohérent avec l'hypothèse que le phénomène de resserrement du trou serait amplifié par l'accumulation thermique. Concernant les trous réalisés avec assistance cryogénique, la stabilité de la forme et des dimensions des trous constatée lors de la première campagne est conservée, et ce en dépit de la quantité importante de trous réalisés.

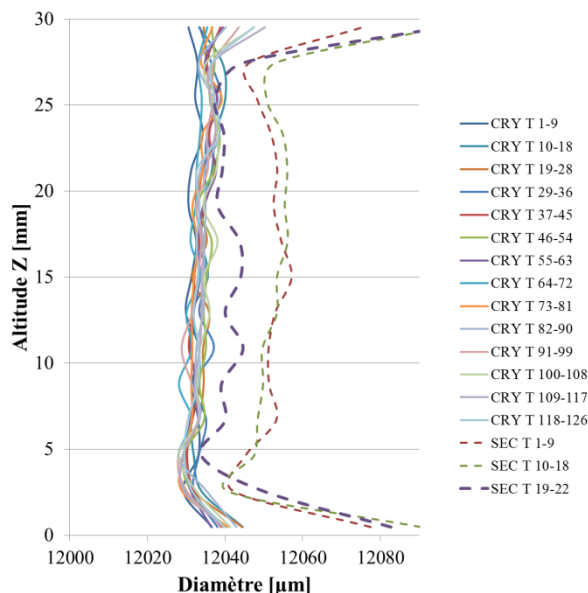


Figure II.34 : Evolution de la forme des trous pendant la campagne d'usure à $V_c = 15 \text{ m/min}$ et $f = 0,08 \text{ mm/tr}$

La Figure II.35 expose l'évolution des diamètres des cylindres inscrits ainsi que la cylindricité pour les trous réalisés. Ainsi, ces courbes permettent de retrouver de manière quantifiée les constatations faites sur la Figure II.34 vis-à-vis de la stabilité des dimensions des trous réalisés avec assistance cryogénique pour lesquels le diamètre du cylindre inscrit reste dans une plage de 0,05 mm en dessous du $\text{Ø}12 \text{ mm}$ et où cylindricité reste en dessous des 0,2 mm. De plus, la tendance au rétrécissement du diamètre en milieu de trou évoquée précédemment dans le cas à sec est aisément lisible sur le graphique faisant état de l'évolution de cette donnée au cours du temps. En effet, les premiers trous mesurés dans le cas à sec ont un diamètre de cylindre inscrit équivalent à ceux mesurés pour l'assistance cryogénique, mais celui-ci diminue rapidement après quelques perçages alors que les diamètres en entrée et sortie de trou restent identiques, menant par conséquent à une augmentation de la cylindricité.

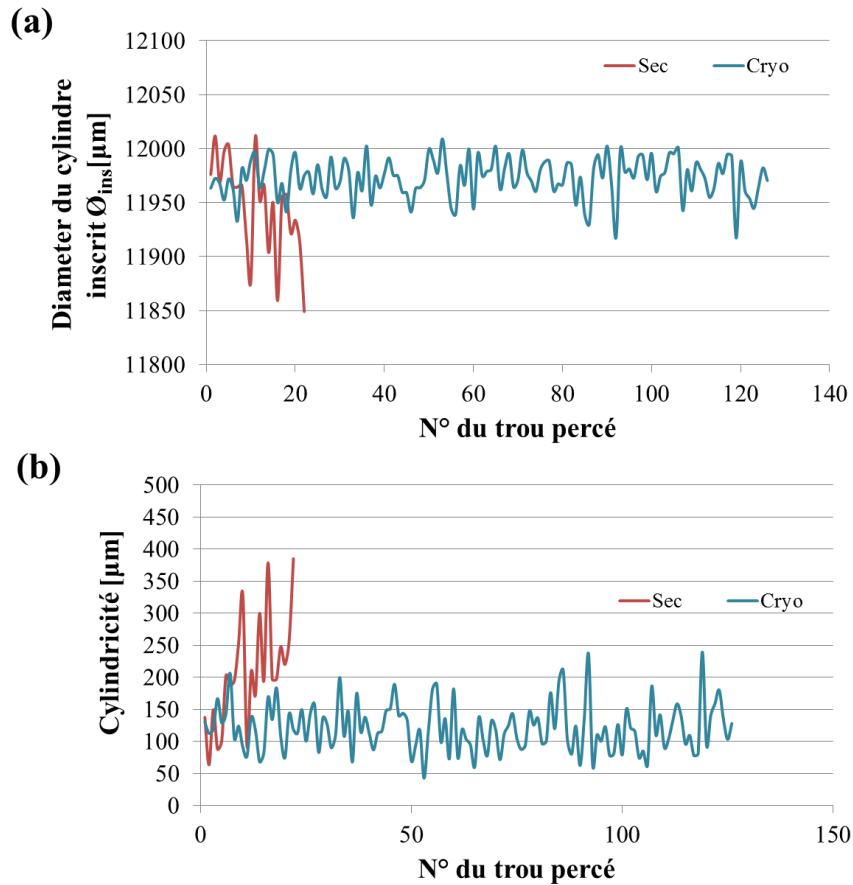


Figure II.35 : Evolution du diamètre du cylindre inscrit et de la cylindricité pendant la campagne d'usure à $V_c = 15 \text{ m/min}$ et $f = 0,08 \text{ mm/tr}$

II.4.2.3. Comparaison des mesures de trous réalisés avec assistance cryogénique pour les deux campagnes

La Figure II.36 fait la comparaison des résultats obtenus pour les mesures de cylindres inscrits et cylindricité dans le cas avec assistance cryogénique pour les deux campagnes. En effet, malgré les différences de conditions opératoires, il a été jugé intéressant de comparer les dimensions obtenues pour les trous dans ces deux cas. Les résultats semblent montrer une meilleure stabilité du diamètre du cylindre inscrit et de la cylindricité dans le cas où $V_c = 45 \text{ m/min}$.

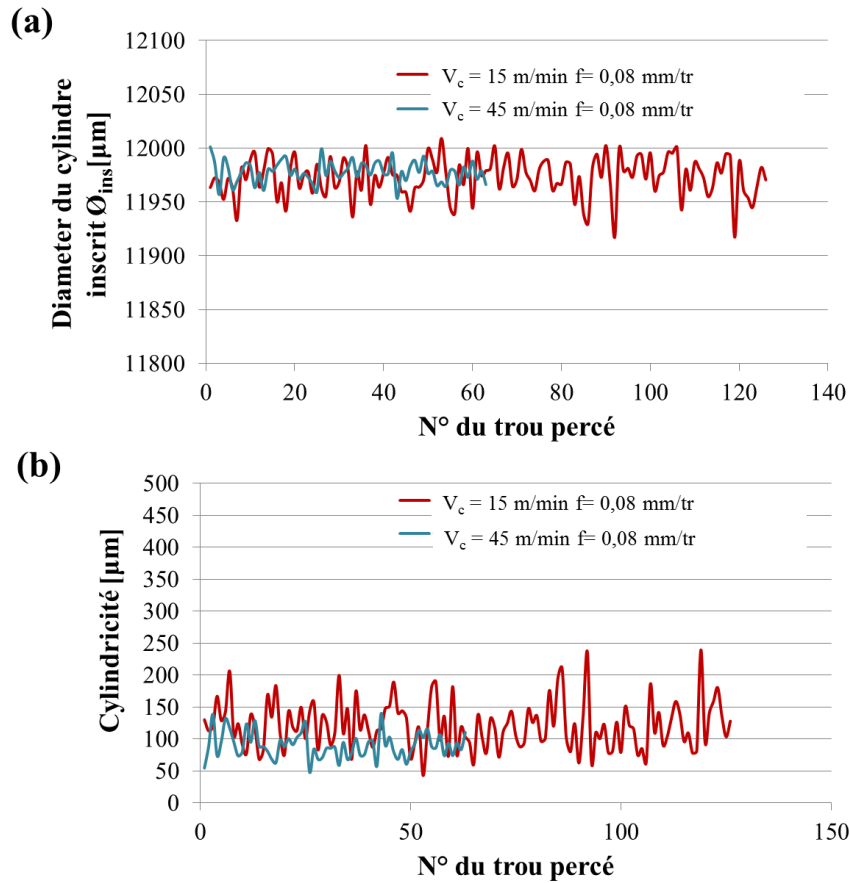


Figure II.36 : Evolution du diamètre du cylindre inscrit et de la cylindricité pour les cas avec assistance cryogénique correspondants aux deux campagnes d'usure réalisées

Par ailleurs, la Figure II.37 fait la comparaison des rugosités arithmétique et totale pour ces deux mêmes conditions. Les résultats montrent que R_a et R_t sont significativement inférieurs en entrée de trou dans le cas $V_c = 45 \text{ m/min}$ et équivalents au cas $V_c = 15 \text{ m/min}$ en milieu et sortie de trou, bien que légèrement inférieur en milieu et légèrement supérieur en sortie.

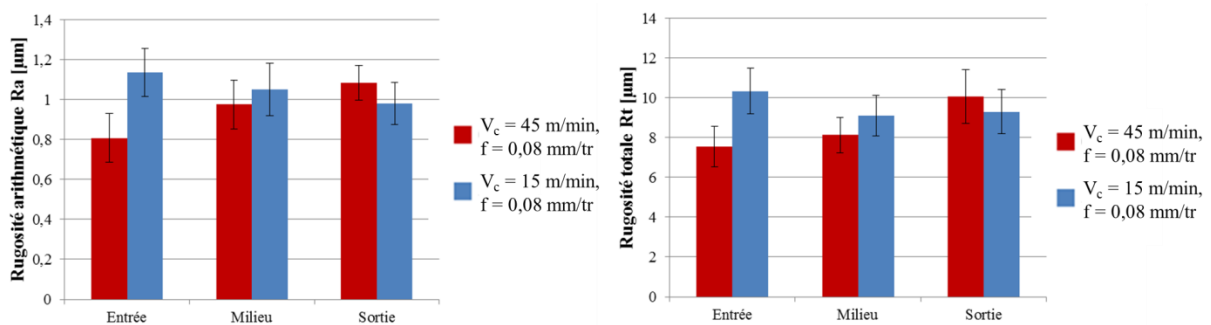


Figure II.37 : Evolution de (a) la rugosité arithmétique R_a et (b) la rugosité totale R_t pour les cas avec assistance cryogénique correspondants aux deux campagnes d'usure réalisées

Ainsi, malgré une légère diminution du diamètre cylindre moyen, qui n'a aucun intérêt pratique, le cas $V_c = 45 \text{ m/min}$ semble donner des trous de qualités dimensionnelles et topologiques légèrement meilleures tout en proposant une productivité trois fois supérieure au cas $V_c = 15 \text{ m/min}$.

II.4.3. Conclusions

La première campagne d'usure a été réalisée dans le but de montrer le potentiel de l'assistance cryogénique vis-à-vis d'une augmentation de la productivité et c'est pourquoi le choix des conditions opératoires s'est porté sur une vitesse de coupe V_c élevée (45 m/min) pour intensifier la génération de chaleur, et une avance f basse (0.08 mm/tr) pour rester en accord avec le contexte du perçage d'empilages hybrides.

Dans le cas du perçage avec assistance cryogénique, la totalité d'une éprouvette a été percée pour un total de 63 trous pour lesquels les efforts de coupe et la forme sont restés stables. En effet, le diamètre du cylindre inscrit reste dans une plage de 0,05 mm en dessous du Ø12 mm et la cylindricité reste en dessous des 0,15 mm. Dans le cas de l'usinage à sec et au vu de l'épaisseur de 30 mm de l'éprouvette ainsi que des conditions de coupe visiblement sévères, un départ de feu s'est déclaré après seulement 18 trous, marquant par conséquent l'arrêt de la campagne. Néanmoins, les 18 trous percés permettent de voir une tendance au rétrécissement de diamètre en milieu et fin de trou, soit une accentuation du phénomène de resserrement de trou que l'on peut supposer être lié à l'accumulation thermique progressive au fil des perçages et que l'on peut constater pendant le perçage par la détermination des hauteurs de contact entre les listels et la paroi du trou. De plus il est à noter que dans le cas avec assistance cryogénique, la fragmentation des copeaux s'est révélée être bien meilleure que dans le cas à sec où des difficultés d'évacuation, menant à la formation de pelotes, se sont produites. Par contre, les résultats concernant les rugosités ont été équivalents pour les deux cas, ce qui reste anecdotique lorsque le déroulement de cette campagne est pris en considération.

Au regard des résultats de cette première campagne, il a été décidé d'en faire une seconde en optant pour une approche orientée cette fois-ci vers l'augmentation de la durée de vie des outils, c'est-à-dire en conservant les conditions de coupe classiques à basse vitesse de coupe V_c (15 m/min) et basse avance f (0.08 mm/tr). De même, la temporisation entre les trous a été doublée au vu de l'importante accumulation de chaleur constatée lors de la précédente campagne.

Malgré la volonté d'utiliser des conditions moins rudes pour être en mesure de percer un plus grand nombre de trous, les résultats de cette deuxième batterie d'essais ont encore une fois montré les limites de l'usinage à sec. En effet, après une accentuation rapide du phénomène de resserrement du trou, allant de pair avec une augmentation des efforts de coupe au fil des trous percés ainsi que des variations significatives de la forme et des dimensions des trous réalisés, l'insert utilisé a subi une casse inopinée, mettant un terme à la campagne pour cette condition après 22 trous seulement. Concernant le cas de l'assistance cryogénique, deux éprouvettes entières ont été percées dans le but de vérifier que la forme et les dimensions des trous restaient stables même après un grand nombre de trous, ce que les résultats ont pu confirmer. En effet, le diamètre du cylindre inscrit est resté dans une plage de 0,05 mm en dessous du Ø12 mm et la cylindricité est restée en dessous des 0,2 mm. De plus, il est à noter que les rugosités arithmétique et totale R_a et R_t ont été meilleures dans le cas avec assistance cryogénique.

Finalement, en plus d'avoir encore une fois confirmé l'importance du rôle de la thermique dans le phénomène de resserrement du trou en perçage de Ti6Al4V, les résultats sont prometteurs en ce qui concerne l'intérêt que pourrait revêtir l'assistance cryogénique dans un contexte de production. En effet, les résultats ont été probants que ce soit en orientant les essais vers une augmentation de la productivité ou vers une augmentation de la durée de vie. De plus, il a même été prouvé que les résultats étaient encore meilleurs à haute vitesse de coupe - ici 45 m/min contre 15 m/min - en ce qui concerne la forme et les dimensions des trous réalisés, mais aussi la rugosité des surfaces usinées. Ainsi, il se pourrait que l'assistance cryogénique permette à la fois une augmentation de la durée de vie, de la productivité et de la précision dimensionnelle, tout en étant une solution propre ainsi que respectueuse de l'environnement et de la santé des opérateurs.

II.5. Conclusion générale et perspective sur les études préliminaires

Ce deuxième chapitre présentait les essais préliminaires réalisés dans le cadre de ce projet de thèse sur l'analyse et l'optimisation des effets de l'assistance cryogénique en perçage de Ti6Al4V. L'étude bibliographique menée n'ayant pas donné d'éléments concernant la technique de perçage, la première campagne d'essais qui a été menée devait permettre d'investiguer les effets de l'assistance cryogénique.

Cette première batterie d'essais aura permis de comparer le perçage à sec et avec assistance cryogénique pour neuf couples de conditions de coupe différentes, permettant non seulement de voir l'impact général de l'assistance, mais aussi l'influence des conditions de coupe sur celui-ci. De plus, ces essais auront permis de confirmer l'importance du phénomène de resserrement du trou en perçage de Ti6Al4V, que ce soit pendant le perçage au travers des efforts de coupe ou post-usinage, via les dimensions et forme des trous réalisés. Le rôle clé de la thermique sur le phénomène du resserrement du trou a lui aussi pu être mis en évidence. Ainsi, cette campagne préliminaire justifie le choix qui a été fait de s'orienter vers le phénomène de resserrement du trou au cours de cette thèse.

Dans un second temps, les campagnes d'usure réalisées avaient pour objectif de vérifier le potentiel de l'assistance cryogénique concernant les problématiques d'usure dans le Ti6Al4V. Par conséquent, deux campagnes ont été réalisées : l'une visant à déterminer la capacité de l'assistance à être utilisée pour augmenter la productivité, l'autre visant à déterminer si elle était capable de prolonger la durée de vie des outils.

Ainsi, ces campagnes ont montré la supériorité indiscutable de l'assistance cryogénique par rapport à la condition à sec lorsqu'il s'agit de s'affranchir des problèmes thermiques habituellement rencontrés dans le perçage de Ti6Al4V. En plus d'avoir percé un nombre 3 à 6 fois plus conséquent que dans le cas à sec où les essais ont dû être arrêtés soit pour casse, soit pour départ de feu, les mesures réalisées ont démontré que la stabilité de la forme et des dimensions des trous restait excellente malgré le nombre de trous réalisés, d'autant plus que rien n'indiquait que plus de trous ne pouvaient pas être percés dans les cas avec assistance cryogénique. En outre, le fait que les trous aient été de qualités dimensionnelle et topologique légèrement meilleures dans le cas $V_c = 45$ m/min par rapport au cas $V_c = 15$ m/min, pour la même avance $f = 0,08$ mm/tr, semble indiquer qu'il serait possible d'augmenter à la fois la durée de vie des outils et la productivité. Par conséquent, il faudrait multiplier les essais d'usure en condition réelle afin de définir la fenêtre opératoire réelle de l'assistance cryogénique en perçage de Ti6Al4V avec un type d'outil donné : peut-être est-il possible d'augmenter encore la vitesse de coupe sans pour autant que les bénéfices de l'assistance soient détériorés. D'autre part, ces essais d'usure ont encore une fois confirmé l'importance du phénomène de resserrement du trou qui dans le cas à sec n'a cessé de s'intensifier au fil des perçages, allant de pair avec l'accumulation thermique due à la cadence imposée, et ce jusqu'à ce qu'un incident mettant fin à la campagne survienne.

Finalement, et comme pressenti initialement, ces deux campagnes, en plus d'avoir permis de capitaliser un nombre conséquent d'informations sur les effets de l'assistance cryogénique en perçage de Ti6Al4V, ont confirmé le choix de l'étude du resserrement du trou pendant ce projet. Ainsi, le chapitre suivant présentera la stratégie adoptée pour l'étude de ce phénomène ainsi qu'une méthode expérimentale innovante permettant la détermination des chargements mécaniques induits par le phénomène.

