

## Perçage quelques généralités importantes

### 1.1.1. L'opération de perçage : son importance, ses spécificités

Le perçage est la technique d'usinage la plus courante dans l'industrie mécanique et vise à réaliser un trou dans une pièce, celui-ci pouvant être débouchant ou non. L'étude s'intéressera exclusivement au perçage conventionnel, c'est-à-dire que par opposition aux cas particuliers du perçage profond ( $5 < L_{\text{percée}}/\varnothing_{\text{foret}} < 20$ ) et du forage ( $20 < L_{\text{percée}}/\varnothing_{\text{foret}}$ ), le ratio longueur percée sur diamètre usiné  $L_{\text{percée}}/\varnothing_{\text{foret}}$  restera inférieur à 5. De manière générale, les spécificités notables de l'opération sont les suivantes :

- C'est une opération dite axiale, c'est-à-dire que la trajectoire d'usinage avec laquelle on le réalise est colinéaire à l'axe de rotation de l'outil.
- La forme du trou réalisé est directement liée à la géométrie de l'outil et il est impossible de jouer sur la trajectoire de celui-ci pour en modifier la forme finale.
- La géométrie complexe de l'outil fait que les mécanismes et conditions de coupe varient en continu le long des arêtes.
- C'est une opération confinée et par conséquent les problématiques d'évacuation des copeaux et de génération de chaleur ont une importance capitale dans la maîtrise du procédé.

### 1.1.2. Géométrie globale d'un foret : selon la norme NF E 66-502

Afin de pouvoir par la suite parler sans ambiguïté des différentes parties qui composent un foret, la Figure I.1, directement tirée de la norme [NF E 66-502, 1997] servira de référence au lecteur de ce document.

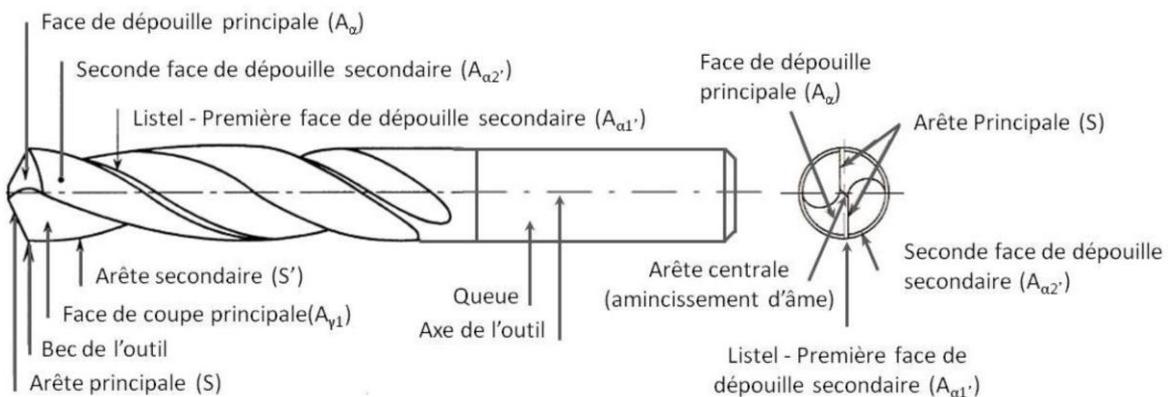


Figure I.1 : Désignations générales des parties d'un foret selon la norme [NF E 66-502, 1997]

## ***1.2. Alliages de Titane***

### ***1.2.1. Le titane et ses alliages : cas particulier du Ti6Al4V traité $\beta$***

Les propriétés du titane étant bien connues depuis plusieurs décennies, les informations qui suivent et qui concernent le titane et ses alliages de manière générale sont toutes issues d'ouvrages ou d'articles de référence dont les informations se recoupent. Ainsi, les sources utilisées pour rédiger ces paragraphes contenant des généralités ne seront citées qu'une seule fois ici et sont les suivantes : [Combres, 1999], [Combres, 2015a], [Combres, 2015b], [Davis, 1990] , [Donachie, 1988].

#### ***1.2.1.1. Généralités sur le titane et ses alliages : propriétés et utilisation***

Découvert en tant qu'élément en 1790, il aura fallu attendre plus d'un siècle avant de pouvoir commencer à exploiter le titane sous forme métallique et en faire profiter l'industrie. En effet, l'extraction de celui-ci étant difficile, il aura fallu attendre 1940 pour la découverte d'un procédé viable d'extraction du titane pur et 1950 pour la généralisation de celui-ci. Les difficultés d'extraction et de mise en forme de ce métal expliquent d'ailleurs son prix élevé. Néanmoins, ces difficultés sont un mal nécessaire pour pouvoir profiter du potentiel d'utilisation de ce matériau dont les caractéristiques particulières le rendent extrêmement intéressant, notamment dans les domaines aéronautiques, aérospatial, industrie chimique, armement et biomédical.

En effet, parmi les particularités qui en font un matériau très prisé, le titane et ses alliages possèdent des caractéristiques mécaniques élevées, le tout en conservant une densité environ 40% inférieure à celle de l'acier. De plus, leurs caractéristiques mécaniques se conservent bien à hautes températures pouvant aller jusqu'à 600°C ainsi qu'à très basses températures allant jusqu'au domaine de la cryogénie. Ils possèdent une résistance à la fatigue supérieure aux matériaux usuels ainsi qu'une bonne ténacité. Son module d'Young vaut environ la moitié de celui de l'acier, ce qui assure une bonne compatibilité avec des matériaux non métalliques comme le composite (dans le domaine aéronautique : cas de l'étude) ou l'os (dans le domaine biomédical). Le titane a aussi pour particularité dans tout milieu (eau de mer, corps humain, etc.) d'être extrêmement résistant à la corrosion et à l'érosion de par sa tendance à s'oxyder très facilement et à former une couche protectrice qui a en plus la capacité de s'auto-régénérer.

#### ***1.2.1.2. Eléments de métallurgie du titane et de ses alliages***

Afin de mieux comprendre comment sont sélectionnés les alliages de titane destinés aux applications aéronautiques, il est nécessaire de s'intéresser dans un premier temps aux aspects métallurgiques qui conditionnent les caractéristiques du matériau final. Ainsi, cette section propose un résumé rapide des connaissances à avoir en ce qui concerne la métallurgie du titane et de ses alliages.

L'une des caractéristiques remarquables du titane est de posséder deux formes allotropiques distinctes ; c'est-à-dire que celui-ci a la possibilité, en tant que corps simple, d'exister sous deux formes cristallines qui sont communément appelées phase  $\alpha$  (structure quasi hexagonale compacte) et phase  $\beta$  du titane (structure cubique centrée). La température de transformation allotropique entre ces phases est appelée Transus  $\beta$  ( $T_\beta$ ) et se situe aux alentours de 883°C lorsque le titane est pur. Ainsi, à température ambiante, celui-ci est constitué à 100% de phase  $\alpha$ , tandis qu'une fois  $T_\beta$  dépassée, il est constitué à 100% de phase  $\beta$ .

Néanmoins, la situation devient plus complexe lorsque ce sont les alliages de titane qui sont concernés et non plus le titane pur. En effet, les éléments d'addition utilisés dans l'alliage peuvent avoir pour effet de stabiliser une phase ou l'autre et ainsi il est possible pour les deux phases de coexister. C'est pourquoi il est courant de classer les alliages de titane selon 3 grandes catégories :

- Les alliages  $\alpha$  (100% de phase  $\alpha$  à 20°C)
- Les alliages  $\beta$  (100% de phase  $\beta$  à 20°C)
- Les alliages  $\alpha+\beta$  qui sont classiquement classés en 3 sous-catégories :
  - Les alliages quasi  $\alpha$  (peu de phase  $\beta$  stable à 20°C)
  - Les alliages quasi  $\beta$  (majorité de phase  $\beta$  stable à 20°C)
  - Les alliages  $\alpha+\beta$  (coexistence des phases à 20°C) : c'est le cas du Ti6Al4V.

Les éléments d'addition utilisés dans les alliages de titane se classent en 3 catégories :

- **Les éléments dits  $\alpha$ -gènes**  
Ils stabilisent la phase  $\alpha$  du titane et augmentent la valeur de  $T_{\beta}$ .  
(Couramment utilisés : Al, O, C, N)
- **Les éléments dits  $\beta$ -gènes**  
Ils stabilisent la phase  $\beta$  du titane et diminuent la valeur de  $T_{\beta}$ .  
Ils sont séparés en 2 sous-catégories :
  - **Les éléments  $\beta$ -isomorphes**  
Ils forment une solution solide avec le titane, et ce en toute proportion : la miscibilité des éléments est totale.  
(Couramment utilisés : H, Mo, V, Nb)
  - **Les éléments  $\beta$ -eutectoïdes**  
Ils peuvent former des précipités (composant intermétallique) : permet le durcissement structural.  
(Couramment utilisés : Mn, Fe, Cr, Si, Ni, Cu)
- **Les éléments dits neutres**  
Ils ne favorisent la stabilité d'aucune phase  
(Couramment utilisé : Zr)

De plus, même si la transformation  $\beta \rightarrow \alpha$  du titane pur se fait sans diffusion, ce n'est pas le cas pour les alliages et c'est ce qui permet, par traitement thermique, d'obtenir des composants hors équilibre et de faire varier la taille et la forme des grains du titane lorsque celui-ci est allié.

Dans le cas des alliages  $\alpha+\beta$ , on distingue 3 grands types de morphologies pour les grains de phase  $\alpha$  :

- **Phase  $\alpha$  à morphologie équiaxe.**  
C'est une structure globulaire : les grains de la phase  $\alpha$  forment des nodules sphériques.
- **Phase  $\alpha$  à morphologie aciculaire**  
C'est une structure aiguillée fine qui est obtenue par un refroidissement rapide de la phase  $\beta$ .
- **Phase  $\alpha$  à morphologie lamellaire.**  
C'est une structure en lamelles qui est obtenue par un ralentissement du refroidissement de la phase  $\beta$  comparativement à la vitesse nécessaire pour obtenir une morphologie aciculaire.

Chaque type de morphologie a ses avantages comparativement aux autres et sont répertoriés dans le Tableau I.1 :

Morphologie Equiaxe	Morphologie Aciculaire ou Lamellaire
Meilleure ductilité et facilité de mise en forme.	Meilleure résistance au fluage.
Seuil de contrainte plus haut pour la corrosion chaude sous contrainte (fluxage)	Meilleure ténacité.
Limite d'élasticité plus haute (à traitement thermique équivalent)	Limite d'élasticité légèrement plus basse (à traitement thermique équivalent)
Meilleure résistance à l'amorçage de fissures en fatigue oligocyclique. (solicitation cyclique avec chargement proche de Re)	Meilleure résistance à la corrosion sous contrainte
	Meilleure résistance à la propagation de fissure.

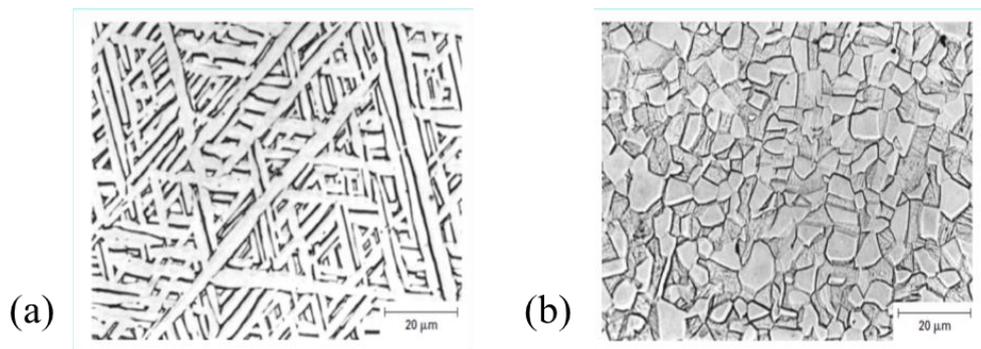
*Tableau I.1 : Avantages liés aux différentes morphologies des alliages de titane  $\alpha+\beta$*

D'autre part, quelle que soit la morphologie, l'augmentation de la taille des grains par traitement thermomécanique va influencer sur les propriétés du matériau selon les tendances suivantes :

- Diminution de la limite d'élasticité
- Diminution de la ductilité.
- Diminution de la ténacité.
- Diminution de la tenue à la fatigue.
- Augmentation de la résistance au fluage.

Cependant, ces tendances sont à nuancer en ce qui concerne la ténacité et la tenue à la fatigue dans le cas des morphologies aciculaires et lamellaires : en effet, ces morphologies ont pour conséquence la complexification du chemin de propagation des fissures et donc le ralentissement de leur propagation.

Ainsi, les éléments précédents mettent en évidence la possibilité d'obtenir pour un alliage de titane une infinité de microstructures différentes (répartition des phases, taille et forme des grains) en faisant uniquement varier les éléments d'addition de l'alliage et les conditions de traitement thermique (cf. Figure I.2 : exemple du TA6V). Or, c'est la microstructure du matériau qui régit les propriétés mécaniques de celui-ci : donc la variation de ces paramètres permet de créer des alliages adaptés à tout un panel d'utilisations différentes, selon les besoins.



*Figure I.2 : Exemples de morphologies de Ti6Al4V. (a) structure lamellaire. (b) structure équiaxe. [Combres, 1999]*

## I.2.2. Cas particulier : le Ti6Al4V traité $\beta$

### *Application destinée au matériau*

Le matériau est destiné à des applications aérospatiales nécessitant une résistance élevée à la fatigue et à l'endommagement.

### *Composition chimique*

C'est la composition d'un Ti6Al4V classique, la spécificité du « traité  $\beta$  » provenant des traitements thermiques que l'on applique au matériau et non de sa composition. Ainsi, la composition est la suivante :

		Alliage de titane – Ti6Al4V									
Composition chimique (%massique)	Elément	Al	V	Fe	C	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Autres		Ti
									Chacun	Total	
		Min.	5,50	3,50							
	Max	6,75	4,50	0,30	0,08	0,03	0,22	0,0125	0,10	0,40	

*Tableau I.2 : Composition chimique du Ti6Al4V*

Les éléments d'addition majoritaires du Ti6Al4V sont donc l'aluminium et le vanadium qui sont respectivement  $\alpha$ -gène et  $\beta$ -gène ce qui permet la coexistence des phases  $\alpha$  et  $\beta$  au sein du matériau et justifie le fait que le Ti6Al4V soit classé comme un alliage  $\alpha+\beta$ .

### *Microstructure*

La phase  $\alpha$  du matériau se doit d'être uniquement de morphologie aciculaire ou lamellaire, c'est-à-dire que l'intégralité de la phase  $\alpha$  présente doit provenir de la transformation  $\beta \rightarrow \alpha$  et que l'alliage ne doit pas contenir de phase  $\alpha$  primaire de morphologie équiaxe.

### *Conclusions quant aux spécifications présentées*

Le matériau tel qu'il est présenté est destiné à des applications aérospatiales et nécessitent donc de manière classique un compromis entre légèreté et caractéristiques mécaniques ce qui justifie le choix du Ti6Al4V qui est connu et très largement utilisé pour ces raisons.

Néanmoins, la réelle spécificité de cet alliage provient des traitements thermiques qui lui sont appliqués et ont pour objectif d'obtenir une morphologie exclusivement aciculaire et lamellaire. En effet, les matériaux constituant les avions se doivent de présenter une résistance accrue à la fatigue et l'endommagement or cette morphologie a justement la particularité de complexifier le chemin de propagation des fissures ce qui a pour conséquence le ralentissement de leur propagation dans le matériau.

Ainsi, sans donner d'informations précises et chiffrées sur les caractéristiques attendues par Airbus dans le matériau, les quelques spécificités présentées permettent de mieux comprendre les raisons qui ont poussé à choisir ce matériau. D'autre part, cela permet de soulever la problématique de l'intégrité de surface de ces matériaux et notamment le besoin de savoir si les opérations de perçage de ces plaques ont une influence sur la microstructure de l'alliage où tout était initialement prévu pour assurer une bonne tenue en service.

### I.2.3. DIFFICULTES RENCONTREES LORS DU PERÇAGE DES ALLIAGES DE TITANE (Ti6Al4V)

#### I.2.3.1. Concernant la Pièce

##### Dimensions & Forme du Trou

Afin de pouvoir être acceptable du point de vue des spécifications qui lui sont imposées, chaque trou percé doit répondre à des critères de dimensions et de forme. Or, les essais menés sur le Ti6Al4V par [Demangeon et Lepinière, 2009] et [Bonnet, 2010] mettent en évidence que le cylindre inscrit dans le trou percé est d'un diamètre plus petit que le diamètre enveloppe décrit par le foret. [Bonnet, 2010] a démontré qu'il était important de limiter le resserrement du trou qui se produit pendant le perçage afin d'optimiser l'usinage du Ti6Al4V, car celui-ci contraint fortement les listels dont les passages successifs génèrent de plus une quantité importante de chaleur par frottements. Les mesures réalisées par [Brinksmeier et Janssen, 2002] et présentées Figure I.3 montrent que le diamètre usiné peut varier selon la profondeur de perçage et ce sans changement des conditions de coupe.

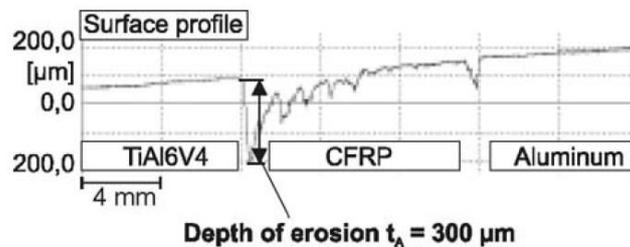


Figure I.3 : Evolution du profil de la surface d'un trou percé dans un empilage Ti6Al4V/CFRP/Aluminium [Brinksmeier et Janssen, 2002]

Le resserrement du trou en perçage de Ti6Al4V a été peu étudié dans la littérature, mais il existe néanmoins quelques travaux réalisés sur des alliages d'aluminium. Notamment, ceux de [Kalidas et al., 2001] où l'influence des conditions de coupe ainsi que celle de la lubrification sont étudiés et ceux de [Bono et Ni, 2001] qui étudie l'influence des variations dimensionnelles d'origines thermiques sur les dimensions de l'outil et de la pièce pendant et après l'usinage. Il est à noter que malgré l'intérêt de leurs travaux, leurs conclusions divergent quant à la forme des trous réalisés sans lubrification, comme le montre le Tableau I.3 qui fait la synthèse des différentes géométries de trous obtenues par ces chercheurs :

Géométrie			
Lubrification	Avec	Sans	Sans
Si $V_c \uparrow$	$\varnothing \uparrow$	$\varnothing \uparrow$	$\varnothing_{\text{trou}} > \varnothing_{\text{outil}}$
Si $f \uparrow$	$\varnothing \uparrow$	$\varnothing \downarrow$	-
Sources	[Kalidas, 2002] [Kalidas, 2001]	[Kalidas, 2002] [Kalidas, 2001]	[Bono, 2001]

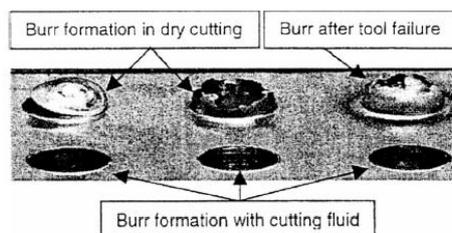
Tableau I.3 : Géométries de trous obtenues pour des alliages d'aluminium [Demangeon et Lepinière, 2009]

Finalement, L'approfondissement des recherches concernant le resserrement du trou pendant et après le perçage a permis de comprendre que celui-ci est le fruit de la composition de plusieurs phénomènes menant à des déformations de l'outil et de la pièce :

- La relaxation des contraintes résiduelles initialement présentes dans la pièce ([Naneix, 2010], [Demangeon et Lepinière, 2009]) ;
- Les variations dimensionnelles d'origine thermique dans la pièce et l'outil ([Bonnet, 2010], [Naneix, 2010], [Demangeon et Lepinière, 2009], [Bono et Ni, 2001]) ;
- Les déformations élastiques dans la pièce et l'outil ([Bonnet, 2010]) ;
- Les déformations plastiques dans la pièce ([Bonnet, 2010]) ;
- Les contraintes résiduelles induites par le perçage ([Nobre et Outeiro, 2015]).

### **Bavures**

Les bavures font partie des défauts récurrents dans le perçage de matériaux métalliques et nécessitent d'être éliminées par des opérations d'ébavurage de la pièce afin d'en permettre l'assemblage. [Dornfeld et al., 1999] et [Cantero et al., 2005] se sont intéressés à la formation des bavures en perçage de Ti6Al4V et ont conclu que, la taille des bavures est directement liée aux températures atteintes en zone de coupe lors de la sortie du foret. La Figure I.4, illustre ce défaut et fait la comparaison entre les conditions à sec et avec lubrification : cela permet de se rendre compte de l'impact de la génération de chaleur sur la formation de la bavure qui est bien plus importante dans le cas à sec.



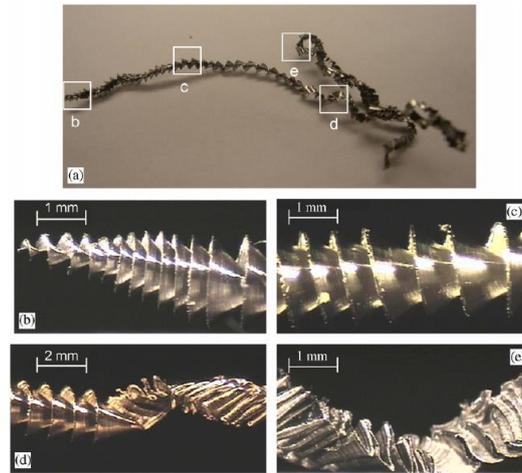
*Figure I.4 : Génération de bavures en perçage de Ti6Al4V [Dornfeld et al., 1999]*

De plus, il est important de noter que comme l'usure des outils va de pair avec une génération de chaleur plus importante en zone de coupe, la taille des bavures augmente elle aussi avec le nombre de trous percés.

### **Etat de surface/Rugosité**

L'état de surface du trou usiné dépend avant tout du foret usinant et des conditions de coupe utilisées (vitesse de coupe, avance) et se dégrade progressivement au fur et à mesure que le foret s'use. Dans le cas de [Cantero et al., 2005] qui utilisent un foret en carbure de tungstène revêtu TiN, la rugosité du trou ne se dégrade réellement qu'en fin de vie du foret. De plus, [Kalidas et al., 2002], ayant réalisé des essais avec et sans lubrification, font le lien entre génération de chaleur et rugosité, ce qui est contradictoire avec les observations de [Cantero et al., 2005] qui ne relèvent pas de différences significatives en fonction des températures atteintes dans les conditions testées.

Une autre explication concernant les états de surfaces constatés en perçage de Ti6Al4V provient des difficultés d'évacuation des copeaux qui peuvent survenir à partir d'une certaine profondeur de perçage. [Li et al., 2007] ont mis ce phénomène en évidence en corrélant morphologie de copeau et état de surface constaté : lorsque l'évacuation du copeau devient difficile, celui-ci se replie sur lui-même et a tendance à rayer la surface du trou fraîchement usiné. Les morphologies observées en fonction de la profondeur de perçage sont présentés sur la Figure I.5.

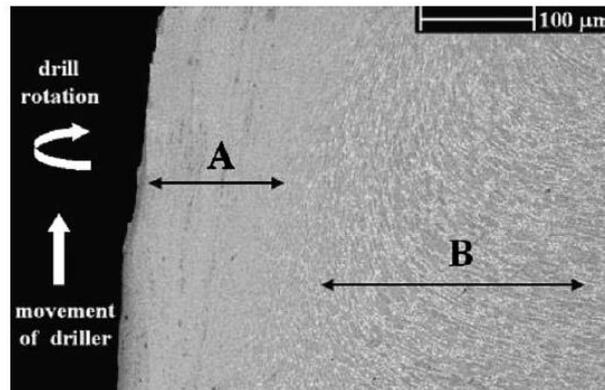


*Figure I.5 : Morphologie de copeaux de Ti6Al4V en fonction de la profondeur percée (outil Wc-Co de diamètre 4 mm dans une plaque de Ti6Al4V épaisse de 6,35 mm) [Li et al., 2007]*

- (a) vue générale d'un copeau*
- (b) initialisation du copeau (début du perçage)*
- (c) copeau en spirale, régime permanent*
- (d) transition entre copeau en spirale et copeau replié*
- (e) copeau replié sur lui-même, régime permanent*

### **Changements de Microstructure**

Même si peu souvent évoqués dans la littérature, le perçage du Ti6Al4V peut engendrer des changements de microstructures sur une faible épaisseur de la surface usinée. A l'aide d'un MEB, [Cantero et al., 2005] ont pu observer ce type de changements dans le cadre du perçage du Ti6Al4V. Le résultat qu'ils ont obtenu est présenté sur la Figure I.6 où l'on distingue deux régions différentes : la région notée « A », d'une épaisseur d'environ 125  $\mu\text{m}$  en partant de la surface, où il y a eu de fortes contraintes mécaniques ainsi qu'une forte élévation de température qui ont entraîné un changement de microstructure, et la région notée « B » où l'élévation était plus modérée.



*Figure I.6 : Observation des changements de microstructure en perçage de Ti6Al4V [Cantero et al., 2005]*

De plus, l'analyse chimique menée par spectrométrie des rayons X par [Cantero et al., 2005] leur a permis de confirmer qu'il y avait eu une transformation allotropique de la phase  $\alpha$  en phase  $\beta$ . En complément, ils ont réalisé des mesures de microdureté, présentées Figure I.7, qui démontrent qu'il y a eu un durcissement dans la zone affectée, d'autant plus important que la mesure est proche de la surface usinée.

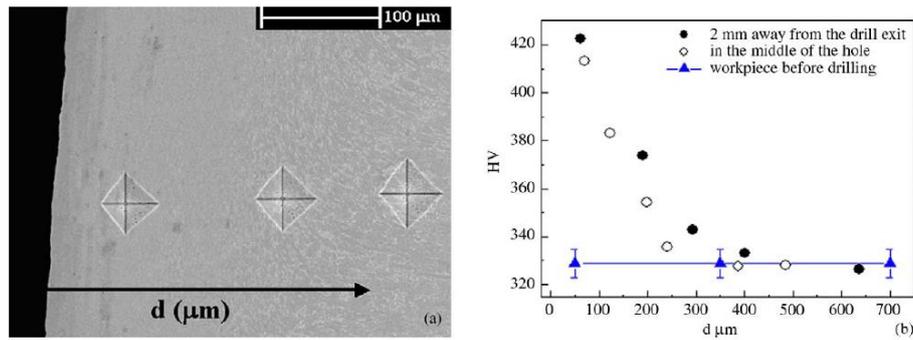


Figure I.7 : Mesures de microdureté après perçage de Ti6Al4V [Cantero et al., 2005]

### **Remarque :**

Dans le cas du Ti6Al4V traité  $\beta$ , qui est le matériau de l'étude, ce type de transformation pourrait être problématique. En effet, le dit matériau subit un traitement spécifique permettant d'obtenir uniquement de la phase  $\beta$  et de la phase  $\alpha$  à morphologie lamellaire ou aciculaire. S'il s'avère que ce type de transformation donne naissance à une autre morphologie de phase  $\alpha$ , il se pourrait que la pièce finale ait des propriétés de résistance à la naissance et à la propagation de fissure inférieures à celles qui sont demandées dans les spécifications aéronautiques. C'est donc un point sur lequel il faut être vigilant.

### **1.2.3.2. Concernant l'outil**

L'usinage des alliages de titane fait intervenir les mêmes mécanismes d'usure que pour les autres matériaux métalliques plus classiques. Ainsi, [Leroy, 1984] identifie trois mécanismes d'usure dominants en usinage :

#### L'usure par abrasion

Lors du processus de coupe, il peut y avoir des arrachements de matière de l'outil lorsque celui-ci rencontre des particules de grande dureté : celles-ci peuvent soit provenir du matériau usiné, et dans ce cas elles sont renouvelées lors du processus de coupe, soit provenir de la dégradation de l'outil lui-même et dans ce cas on parle d'usure par attrition. L'importance de l'usure par abrasion croît lorsque la taille et le nombre des particules abrasives augmentent. La Figure I.8 donne un exemple de stries d'abrasion en face de dépouille dans le cas du tournage à sec de Ti6Al4V avec outil carbure.

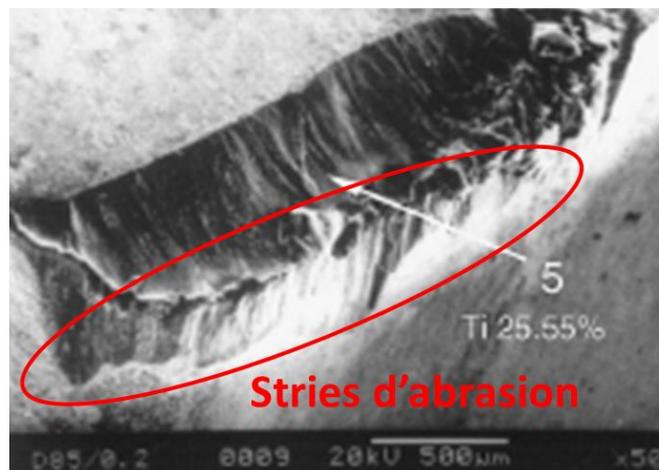


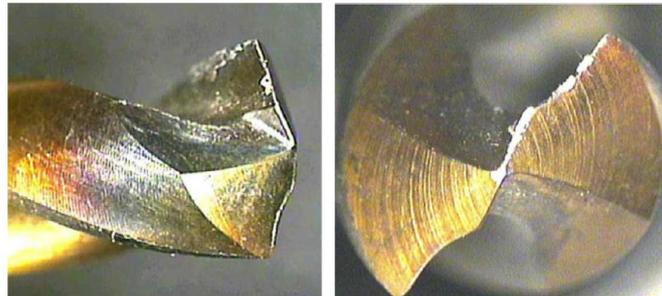
Figure I.8 : Stries d'abrasion en face de dépouille dans le cas du tournage à sec de Ti6Al4V avec outil carbure [Venugopal et al., 2007a]

### ***L'usure par adhésion***

L'usure par adhésion provient elle aussi d'un arrachement de matière de l'outil, sauf que dans le cas présent, il y a dans un premier temps formation de microsoudures sur l'outil à cause des conditions extrêmes de température et de pression qui règnent à l'interface outil-copeau. Dans un second temps, ces jonctions peuvent se rompre de trois manières différentes qui d'après [Leroy, 1984] sont les suivantes :

- La jonction formée est plus résistante que le métal du copeau, alors la rupture survient dans la masse du copeau, laissant une couche adhésive sur l'outil : c'est le mécanisme de formation d'arête rapportée.
- La jonction formée est moins résistante que le métal avoisinant (copeau et outil), alors la rupture survient dans la jonction, l'usure de l'outil est négligeable.
- La jonction formée est plus résistante que le métal de l'outil ainsi que celui du copeau, alors les ruptures surviennent à la fois sur l'outil et sur le copeau, de façon non négligeable : c'est l'usure par adhésion.

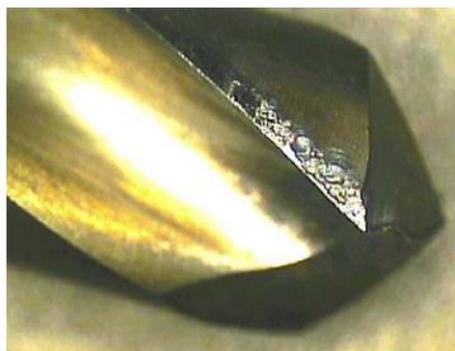
La Figure I.9 donne un exemple d'adhésion de Ti6Al4V dans le cas du perçage à sec.



*Figure I.9 : Adhésion de Ti6Al4V en perçage à sec [Cantero et al., 2005]*

### ***L'usure par diffusion***

Aux grandes vitesses de coupe, les températures à l'interface outil-copeau peuvent atteindre des valeurs très élevées, ce qui est favorable à la diffusion chimique de l'outil vers le copeau et inversement. Lors du processus de diffusion, le copeau est constamment renouvelé, ce qui fait que du point de vue de l'outil, la demande en éléments diffusants reste constante au cours de l'usinage : les éléments de l'outil sont absorbés en continu par les copeaux qui se renouvellent, cela a pour conséquence la formation d'un cratère dans la zone de contact outil-copeau. La Figure I.10 donne un exemple de cratérisation des listels en perçage à sec de Ti6Al4V.



*Figure I.10 : Cratérisation des listels en perçage à sec de Ti6Al4V [Cantero et al., 2005]*

### ***1.3. Empilages Hybrides***

La raison d'être de cette étude étant initialement la recherche d'un moyen d'améliorer les conditions de perçage de l'empilage hybride Ti6Al4V/CFRP, il semblait nécessaire de donner un minimum d'informations à ce sujet. En effet, les problématiques concernant le perçage d'empilages restent indissociables de l'étude menée dans le cadre de ce projet et même si les effets de l'assistance cryogénique sont ici analysés pour le Ti6Al4V, la dimension de l'empilage doit être prise en compte, d'autant plus que l'analyse menée dans les paragraphes suivants justifie l'idée de l'utilisation de l'assistance dans ce contexte.

#### ***1.3.1. Les empilages : cas particulier du Ti6Al4V/CFRP***

Le développement récent des empilages hybrides par l'industrie aérospatiale provient du souhait d'améliorer les performances des structures de nouvelle génération tout en étant le plus économe possible en énergie. L'empilage hybride typique est l'assemblage de plusieurs couches de composites à matrice polymère renforcée par des fibres (carbone, verre, etc.) et de métal (alliages de titane, d'aluminium, etc.) qui permet de profiter des avantages des deux matériaux tout en s'affranchissant de leurs défauts respectifs. L'exemple auquel l'étude s'intéresse est celui de l'empilage composé de CFRP et d'alliage de titane, reconnu pour l'association qu'il permet entre caractéristiques mécaniques spécifiques élevées, bonne résistance à la naissance et à la propagation de fissures ainsi qu'à la corrosion.

#### ***1.3.2. Le CFRP : un matériau composite***

##### ***1.3.2.1. Généralités sur les composites : propriétés et utilisation***

[Gay, 1991] définit dans son ouvrage le composite comme des « arrangements de fibres –continues ou non – d'un matériau résistant (le renfort) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. ». Concrètement, le résultat est un matériau hétérogène et anisotrope adapté aux besoins du concepteur qui selon ses besoins choisit la matrice, les renforts, le procédé d'élaboration, etc. Dans les faits, un matériau composite est constitué de différents éléments qui remplissent chacun un rôle particulier :

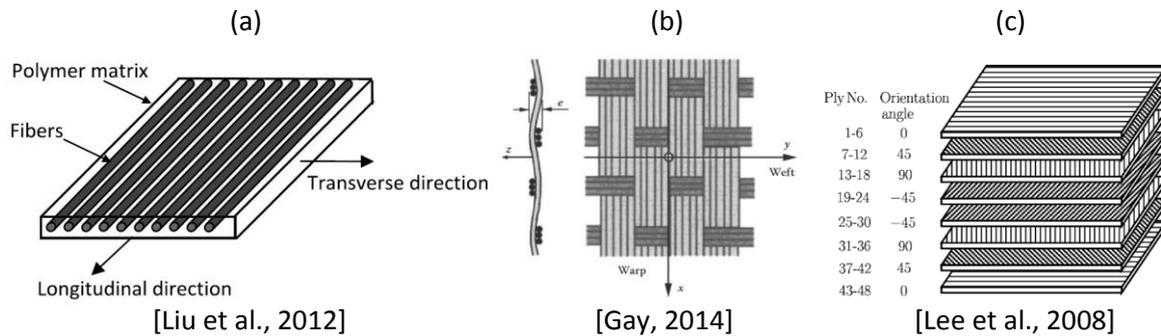
- **Les renforts**  
Ils constituent l'armature du matériau composite et ont pour rôle de garantir la tenue mécanique de celui-ci. Les renforts, pouvant être organiques ou inorganiques, sont présentés sous forme de particules ou de fibres qui peuvent être continues ou discontinues. Les propriétés finales du matériau sont directement liées à leur agencement dans la matrice.
- **La matrice**  
Celle-ci peut être de nature organique ou minérale et a pour rôles principaux d'assurer la liaison entre les renforts et de distribuer les efforts dans le matériau final. Elle donne de plus des avantages non négligeable que l'on apprécie aux composites et notamment une bonne protection chimique du matériau ainsi qu'une bonne aptitude à limiter la propagation et l'apparition de fissures.
- **L'interface renforts-matrice**  
Elle joue un rôle primordial dans la qualité du matériau final puisqu'elle est chargée d'assurer la compatibilité entre les renforts et la matrice et de transmettre les contraintes de l'un sur l'autre sans qu'il ne puisse y avoir de déplacement relatif entre les constituants du composite.

A ces éléments peuvent être ajoutés des charges qui apportent des propriétés supplémentaires ou des additifs permettant de catalyser et d'accélérer la polymérisation de la matrice dans le cas d'une matrice organique.

**1.3.2.2. Le CFRP : cas du IMA M21E multidirectionnel**

Le CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) est un composite à matrice polymère renforcé aux fibres de carbone qui suscite aujourd'hui un grand intérêt dans le domaine aérospatial de par ses très bonnes caractéristiques mécaniques spécifiques qui lui permettent d'offrir un bon compromis entre légèreté et résistance. Ainsi, son utilisation dans le domaine aérospatial est principalement motivée par le gain de masse qu'il permet, mais aussi par ses propriétés de résistance à la corrosion et sa quasi-insensibilité à la fatigue en comparaison aux matériaux métalliques. De plus, les techniques de fabrication utilisées permettent la réalisation de formes complexes qui seraient impossibles à obtenir sans assemblage de sous-ensembles dans le cas des matériaux métalliques.

Les propriétés du CFRP dépendent grandement de l'agencement des fibres de carbone dans la matrice polymère. En effet, dans le cas d'un composite dit « unidirectionnel » où toutes les fibres sont parallèles et donc orientées selon une direction unique, les caractéristiques mécaniques du composite sont bien plus élevées dans la direction longitudinale aux fibres que dans la direction transversale. C'est pour cela que selon l'emploi prévu pour le composite utilisé, il n'est pas rare de structurer celui-ci par plis que l'on superpose selon différentes orientations de fibres pour obtenir un composite dit « multidirectionnel » qui selon la séquence de superposition peut constituer un matériau quasi isotrope. Une autre manière de réaliser les plis est d'utiliser une structure de fibres dite « tissée » permettant d'obtenir un pli aux caractéristiques mécaniques équivalentes dans les deux directions principales. Les différents agencements de fibres sont illustrés Figure I.11.



*Figure I.11 : Exemples d'agencements de fibres et de plis  
 (a) Pli unidirectionnel  
 (b) Pli tissé  
 (c) Composite multidirectionnel : superposition de plis unidirectionnels*

Le CFRP IMA M21 avec arrangement de fibres multidirectionnel est le matériau utilisé dans l'étude, IMA désigne la fibre de carbone et M21E la matrice en résine époxyde.

### I.3.3. Difficultés rencontrées lors du perçage d'empilages

Lors du perçage d'empilages CFRP/Ti6Al4V, les problématiques rencontrées sont les mêmes que dans les matériaux pris séparément, mais avec l'addition des difficultés propres à l'empilage. De plus, lorsque pris indépendamment, le perçage de ces deux matériaux a déjà été bien étudié et optimisé, que cela soit du point de vue des forets ou des conditions de coupe utilisées. Cependant, les deux matériaux étant très différents, ces solutions sont totalement incompatibles et il n'existe donc pas d'outils coupants ou de paramètres de coupe optimisés pour les deux matériaux en même temps. Ainsi, il n'est pas étonnant que la problématique suscite l'intérêt et aie débouché sur plusieurs projets de thèse au cours des dernières années. Par exemple, [Roudgé, 2011] a développé une méthode s'appuyant sur les réseaux de neurones et permettant de prédire le moment où la qualité du perçage s'approche des bornes des spécifications aéronautiques. [Jallageas, 2013] a quant à lui étudié le perçage d'empilages par le biais d'Unités de Perçage Automatiques (UPA) avec assistance vibratoire, ce qui correspond aux dispositifs effectivement utilisés dans l'industrie, montrant une fois de plus le lien fort entre industriels et académiques sur ces problématiques. Ainsi, le perçage avec assistance vibratoire, consistant à ajouter un mouvement de vibration axiale au mouvement de la coupe a été étudié en détail par [Ladonne, 2016] qui prend en compte l'environnement Pièce-Outil-Machine dans ses modélisations.

La Figure I.12 réalisée par [Bonnet, 2010] compare les conditions de coupes optimisées pour les matériaux pris séparément et met clairement en évidence que celles-ci sont disjointes. C'est pourquoi certains chercheurs, comme [Poutord, 2014] ont étudié la possibilité de faire varier les conditions de coupe pendant le perçage afin de s'adapter en temps réel au matériau percé. Ceci étant dit, il faut garder à l'esprit qu'à l'heure actuelle, la plupart des perçages réalisés sur empilages dans le secteur aéronautique se font au moyen d'Unités de Perçage Automatiques (UPA), de par leur nature purement mécanique, ne permettent pas de variations des conditions de coupe en cours de perçage. Quoiqu'il en soit, une étude préliminaire sur la variation des conditions de coupe à l'interface Ti6Al4V/CFRP et ses potentiels effets bénéfiques a été réalisée au cours du projet et est présentée succinctement en Annexe 1.

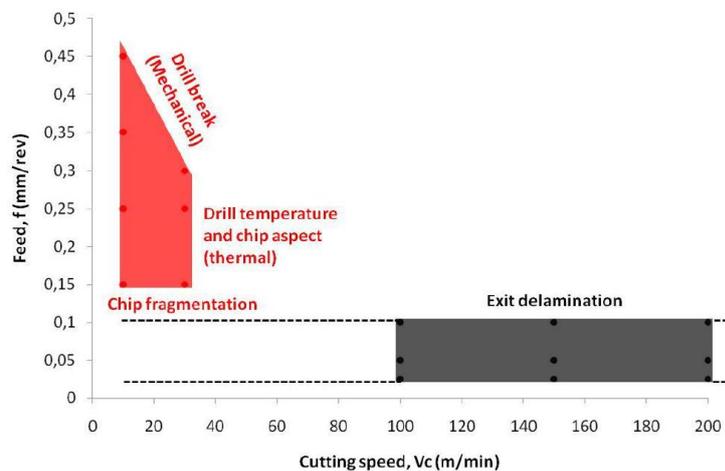


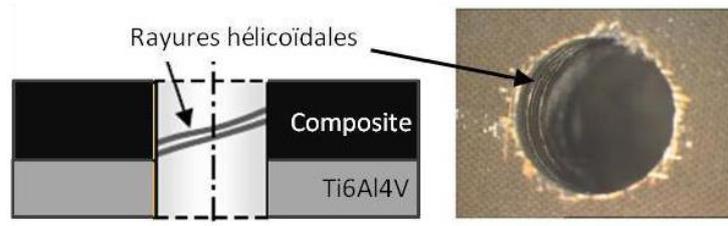
Figure I.12 : Comparaison des conditions de coupe optimisées pour le perçage à sec de Ti6Al4V (en rouge) et de CFRP (en gris) [Bonnet, 2010]

Une autre problématique majeure du perçage des empilages CFRP/Ti6Al4V est l'interaction qui existe entre les difficultés rencontrées dans les deux matériaux pris indépendamment. Par conséquent, les défauts occasionnés lors du perçage des empilages dépendent du sens dans lequel on les perce, ce qui mène régulièrement les scientifiques travaillant sur le sujet à étudier les deux configurations.

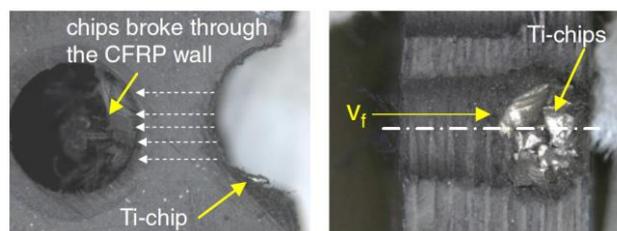
Dans le cas du perçage d'empilage en allant du Ti6Al4V vers le CFRP, la température du foret s'élève de manière importante pendant l'usinage de Ti6Al4V, ce qui favorise dans un second temps la brûlure

de la matrice du CFRP à l'interface entre les deux matériaux, celle-ci survenant à partir d'environ 180 °C. En outre, la formation de bavures de Ti6Al4V à l'interface peut également mener à des dégradations de la partie composite.

Dans le cas du perçage d'empilage en allant du CFRP vers le Ti6Al4V, les difficultés concernent plus particulièrement l'évacuation des copeaux de Ti6Al4V qui, de par leurs caractéristiques mécaniques et la température qu'ils atteignent ont tendance à dégrader la surface du CFRP pendant leur évacuation. Ainsi, comme illustré par la Figure I.13, cela peut entraîner l'apparition de rayures hélicoïdales sur la surface du trou dans le CFRP. La Figure I.14, provenant des travaux de [Pecat et Brinksmeier, 2014] montre que dans les cas où l'évacuation des copeaux de Ti6Al4V est très difficile, certains peuvent rester incrustés dans la paroi du composite.



*Figure I.13 : Rayures hélicoïdales sur la surface du trou dans la partie CFRP de l'empilage en perçage à sec dans le sens CFRP vers Ti6Al4V [Bonnet, 2010]*



*Figure I.14 : Incrustation d'un copeau de Ti6Al4V dans la paroi du CFRP en perçage à sec dans le sens CFRP vers Ti6Al4V [Pecat et Brinksmeier, 2014]*

D'autre part, [Pecat et Brinksmeier, 2014] ont montré qu'il pouvait se produire des arrachements de CFRP à l'interface lors de la formation du copeau de titane initial qui a la possibilité d'être temporairement coincé entre les plaques des deux matériaux. Ce phénomène est illustré sur la Figure I.15 où le premier pli de CFRP à l'interface a subi un tel arrachement.



*Figure I.15 : Arrachement de CFRP à l'interface en perçage à sec dans le sens CFRP vers Ti6Al4V [Pecat et Brinksmeier, 2014]*

Finalement, au vu des éléments mentionnés dans l'état de l'art, il semblerait que la majorité des problématiques rencontrées dans le cadre du perçage d'empilages hybrides Ti6Al4V/CFRP soient liées à la forte génération de chaleur induite par le perçage de la partie alliage de titane et aux difficultés d'évacuation des copeaux de température élevée qui sont produits par l'opération.

## I.4. Assistance Cryogénique

### I.4.1. Assistance cryogénique : principes

Les assistances en usinage fonctionnent toutes sur le principe d'un apport thermique et/ou mécanique supplémentaire dans la zone de coupe qui ont pour conséquence la modification des mécanismes de formation du copeau. Par zone de coupe il est ici fait référence aux trois zones de cisaillement classiquement utilisée pour décrire les phénomènes observés en configuration de coupe orthogonale :

- **La zone de cisaillement primaire (ZCP)**  
Elle correspond à la zone initiale de formation du copeau où la matière subit une déformation plastique intense à des vitesses très élevées.
- **La zone de cisaillement secondaire (ZCS)**  
Elle correspond à l'interface outil-copeau, autrement dit la zone où le copeau est en contact avec l'outil et où de fortes pressions accompagnent l'écoulement de la matière ainsi qu'un frottement intense qui mènent tous deux à une forte élévation de la température à l'interface.
- **La zone de cisaillement tertiaire (ZCT)**  
Elle correspond à la zone de la surface fraîchement usinée qui est en contact avec l'outil et qui subit des déformations dues à son frottement avec l'outil. Elle est souvent négligée dans les études réalisées mais c'est néanmoins la zone qui a le plus d'impact sur la qualité de la surface finale.

Ces zones, en configuration de coupe orthogonale, sont illustrées Figure I.16. Les assistances en usinage permettent de jouer sur les mécanismes mis en jeu dans ces trois zones.

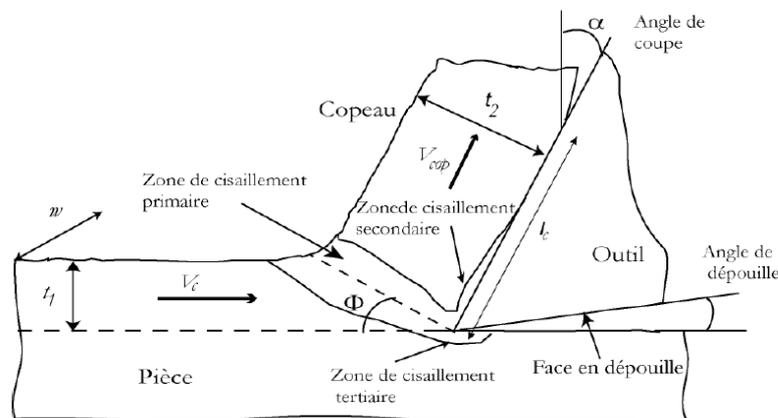


Figure I.16 : Modélisation de la coupe orthogonale – zones de cisaillement [List, 2004]

En l'occurrence, l'assistance cryogénique constitue un apport thermique puisque son principe repose sur la projection d'un fluide réfrigérant pour refroidir l'outil et/ou la pièce dans le cas de matériaux difficiles à usiner de par la forte production de chaleur générée pendant l'usinage. L'objectif est d'augmenter la durée de vie des outils en s'affranchissant des phénomènes d'usure activés thermiquement comme, par exemple, la diffusion qui est le phénomène d'usure principal dans l'usinage des matériaux réfractaires.

Le projet de thèse s'intéresse exclusivement à l'assistance cryogénique en utilisant de l'azote liquide et ce principalement pour les raisons suivantes :

- C'est un liquide dont la température est très basse, celui-ci s'évapore à environ  $-196^{\circ}\text{C}$  lorsqu'il est soumis à la pression atmosphérique. De plus, celui-ci absorbe une quantité importante de chaleur lors de sa vaporisation.
- De par sa capacité à s'évaporer dans un environnement à température ambiante, l'azote permet de s'affranchir de tout nettoyage de pièces, de copeaux et même d'atelier, ce qui n'est pas le cas avec les fluides de coupe classiques.
- C'est un fluide avantageux du point de vue hygiène, sécurité et environnement. En effet, l'air contenant environ 78% d'azote, son évaporation dans l'environnement ne pose pas de problèmes écologiques

La suite du chapitre servira à synthétiser l'étude bibliographique en ce qui concerne l'utilisation de l'assistance cryogénique avec azote liquide en usinage d'alliages de titane, principalement en tournage car il n'existe quasiment aucune publications sur les autres techniques comme le fraisage ou le perçage. Concernant l'assistance cryogénique en tournage, il existe plusieurs approches possibles à sa mise en place qui ont notamment été comparées par [Hong et Ding, 2001] et sont illustrées Figure I.17. Par la suite, seuls les résultats obtenus pour l'approche où les jets d'azote sont localisés sur la face de coupe et/ou dépouille seront présentés car il a été démontré que les autres méthodes étaient peu efficaces en comparaison pour augmenter la durée de vie des outils. Quoiqu'il en soit, l'utilisation des autres techniques de refroidissement reste dans tous les cas anecdotique, avec notamment les travaux de [Wang et Rajurkar, 2000] où seul l'outil est refroidi par l'arrière.

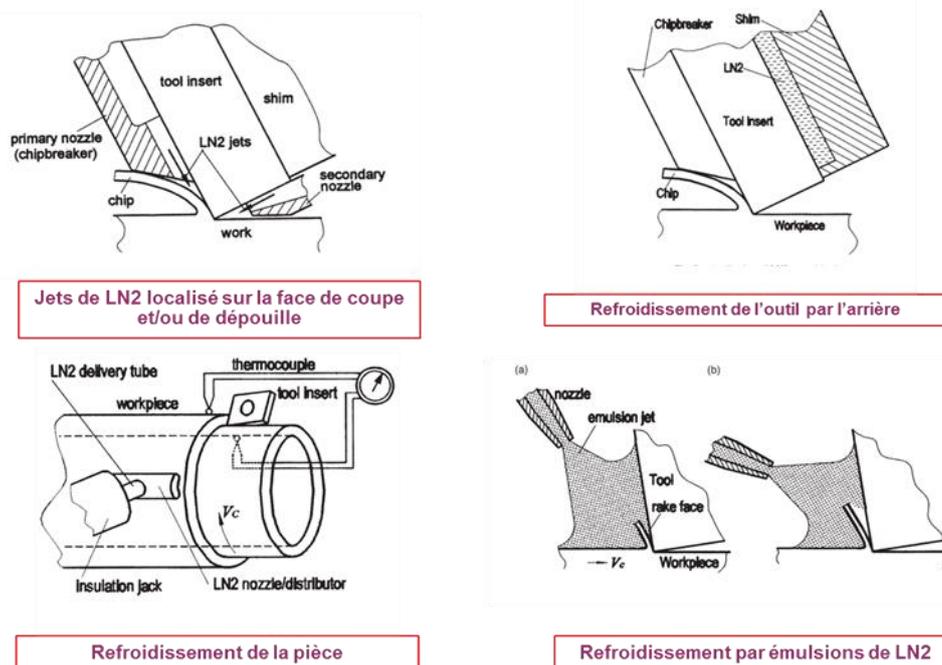


Figure I.17 : Approches existantes pour la mise en place de l'assistance cryogénique en tournage [Hong et Ding, 2001]

## 1.4.2. Résultats concernant les effets de l'assistance cryogénique sur l'usinage des alliages de titane

### 1.4.2.1. Flux de chaleur reçu et températures atteintes par l'outil

L'objectif premier associé à l'utilisation de l'assistance cryogénique est de diminuer les températures atteintes pendant la coupe de matériaux dont la coupe génère une chaleur importante et impacte directement la durée de vie des outils. C'est donc naturellement que [Hong et Ding, 2001], faisant partie des premiers auteurs ayant travaillé sur le sujet, ont implanté des thermocouples dans des plaquettes de coupe et réalisé des essais d'usinage sur Ti6Al4V en utilisant plusieurs méthodes de refroidissement pour vérifier que l'assistance permettait bien de réduire l'énergie calorifique totale reçue par l'outil. Les résultats de leur expérience ainsi que leur dispositif expérimental sont exposés Figure I.18 et semblent confirmer l'efficacité de l'assistance cryogénique pour diminuer les températures atteintes dans l'outil. Ces essais ont aussi servi à comparer les différentes approches de refroidissement et comme annoncé précédemment, l'efficacité maximale est obtenue lorsque l'on refroidit directement les faces de coupe et/ou de dépouille.

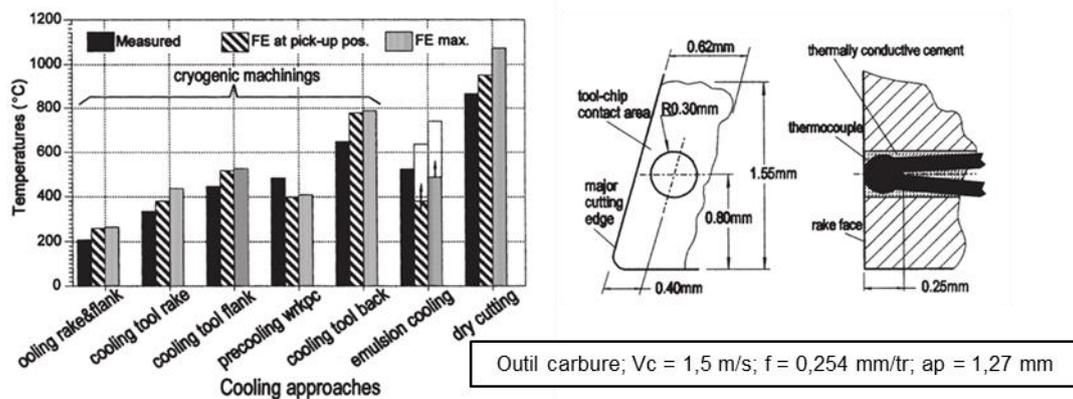


Figure I.18 : Mesure de température dans l'outil pendant une opération de tournage selon différentes méthodes de refroidissement par assistance cryogénique [Hong et Ding, 2001]

Une décennie plus tard, les travaux de [Dhananchezian et Pradeep Kumar, 2011], confirment les conclusions précédentes sur le tournage de Ti6Al4V avec outil carbure et mesurent des températures de coupe réduites de plus de 60% sur la surface de coupe en comparaison de leurs essais réalisés avec émulsions. Ces résultats ont d'ailleurs été récemment confirmés pour l'alliage de titane Ti-5553 dans le cadre des travaux de [Kaynak et al., 2018] qui ont l'avantage d'effectuer la comparaison entre les cas à sec, MQL et avec assistance cryogénique, et ce sur une plage conséquente de vitesses de coupe. Ainsi, la Figure I.19 expose ces résultats qui donnent un avantage clair à l'assistance cryogénique. Par ailleurs, les travaux réalisés il y a peu par [Lequien et al., 2018] ont permis de vérifier la validité des constatations précédentes dans le cas du fraisage de Ti6Al4V avec des plaquettes carbure, l'azote liquide étant projeté en zone de coupe par des buses intégrées au corps de fraise.

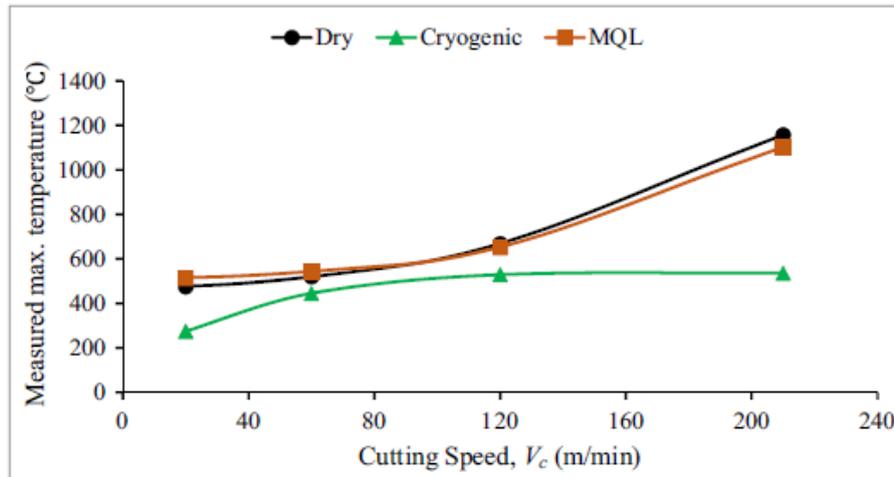


Figure 1.19 : Températures maximales mesurées pour différentes conditions de coupe ( $f = 0,1$  mm/tr)  
[Kaynak et al., 2018]

#### 1.4.2.2. Coefficient d'échange convectif entre la pièce et l'azote

L'utilisation de l'assistance cryogénique ayant pour objectif de réduire les flux de chaleur reçus par la pièce et l'outil, il semble naturel de s'intéresser à la caractérisation du coefficient d'échange convectif entre la pièce et l'azote ainsi que celui entre l'outil et la pièce. Malheureusement, il n'y a pas de références en ce qui concerne l'outil mais quelques chercheurs se sont intéressés à l'échange convectif entre l'azote et la pièce.

Ainsi, seuls [Rotella et Umbrello, 2014], [Lequien, 2017] et [Lequien et al., 2018] ont travaillé sur le coefficient d'échange convectif entre Ti6Al4V et azote dans le cadre de l'assistance cryogénique. [Rotella et Umbrello, 2014] trouvent un coefficient de  $20\,000$  W/m<sup>2</sup>.K qu'ils déterminent par méthode inverse et correspond à une valeur pendant l'usinage, tandis que [Lequien, 2017] trouve des valeurs comprises entre  $8\,615$  et  $15\,630$  W/m<sup>2</sup>.K correspondantes aux essais de projection d'azote sur une plaque de Ti6Al4V avec variation des paramètres de distance, d'inclinaison et de diamètre de buse. Du côté alliage de titane, [Sun et al., 2015] et [Kaynak et al., 2018] utilisent un coefficient valant  $10\,000$  W/m<sup>2</sup>.K pour le Ti-5553 qu'ils reprennent de [Yang, 2012] ayant travaillé sur la simulation du polissage d'un alliage Co-Cr-Mo et qui semble l'avoir déterminé en fixant la température de l'environnement de manière arbitraire puis en ayant fait varier le coefficient jusqu'à ce que la simulation coïncide avec l'expérimental.

En outre, comme le soulignent [Pusavec et al., 2016] et [Hribersek et al., 2017] ayant travaillé sur l'Inconel 718, et sans parler des conditions d'écoulement, le coefficient d'échange convectif dépend à la fois de la température de l'azote et de la température de la pièce, données qui ont été fixées, au moins pour l'une d'entre elles, de manière arbitraire dans les cas énoncés précédemment. La Figure 1.20 expose les résultats obtenus par [Pusavec et al., 2016] et montrent qu'il n'est pas étonnant d'avoir des divergences dans la littérature en ce qui concerne le coefficient d'échange convectif.

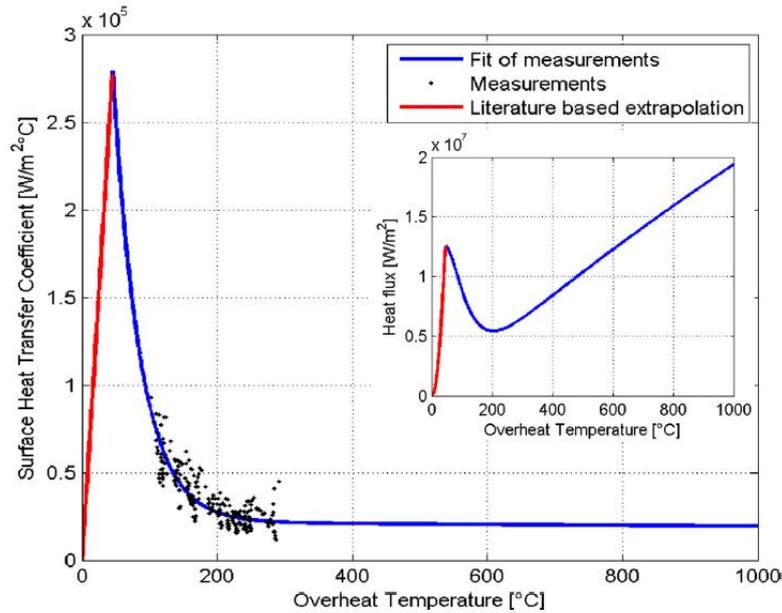


Figure I.20 : Coefficient d'échange convectif Inconel 718/LN2 en fonction de la différence de température fluide/surface [Pusavec et al., 2016]

Finalement, les résultats présents dans l'état de l'art permettent tout de même d'avoir des ordres de grandeur, ce que la Figure I.21 provenant de l'article de [Jawahir et al., 2016] propose pour différentes techniques de refroidissement et lubrification, les cas à sec et MQL compris, indépendamment du matériau, des conditions d'acheminement, etc.

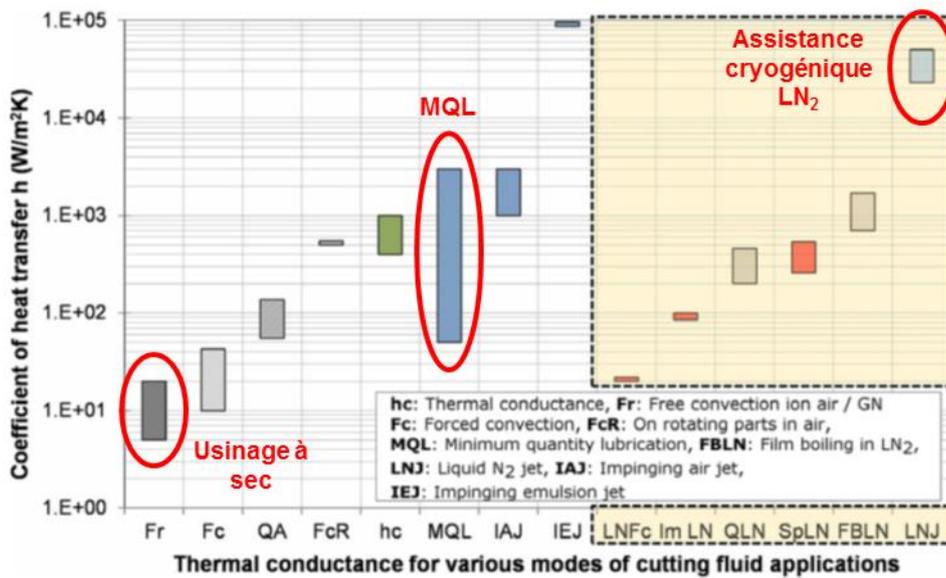


Figure I.21 : Valeurs typiques du coefficient d'échange convectif pour différents modes de refroidissement [Jawahir et al., 2016]

### 1.4.2.3. Durée de vie, usure

Après que [Hong et Ding, 2001] aient vérifié que l'assistance cryogénique permettait bien de diminuer l'intensité du chargement thermique perçu par l'outil, [Hong et Ding, 2001], [Hong, Markus et al., 2001], [Venugopal et al., 2007a], [Venugopal et al., 2007b], [Dhananchezian et Pradeep Kumar, 2011] et [Birmingham et al., 2011] se sont intéressés aux effets obtenus à l'échelle de la durée de vie des plaquettes de coupe et ont pu confirmer les effets bénéfiques de l'assistance sur l'usure des outils lors d'essais de tournage de Ti6Al4V avec plaquettes en carbure de tungstène. Par ailleurs, les essais de fraisage réalisés par [Lequien, 2017] semblent valider ces tendances dans le cas de la technique de fraisage pour laquelle il constate des gains de durée de vie allant de 75% à 142% selon le diamètre des buses de projection d'azote utilisées. La Figure I.22 fait le bilan des essais d'usure réalisés par [Venugopal et al., 2007a] : elle comprend les mesures d'usure en dépouille, d'usure en face de coupe et de recul d'arête après 5 minutes d'usinage.

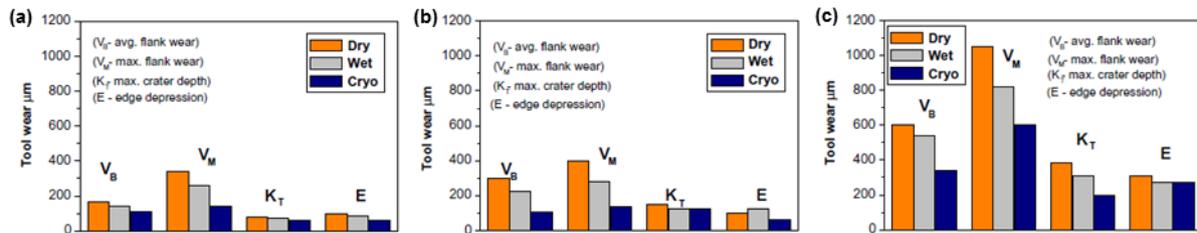
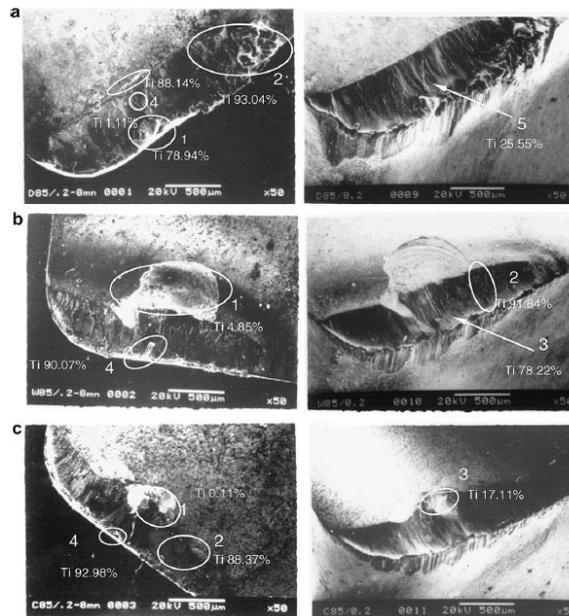


Figure I.22 : Usure d'outils après 5 min d'usinage  
 (a)  $V_c = 70$  m/min et  $f=0.20$  mm/tr  
 (b)  $V_c = 85$  m/min et  $f=0.20$  mm/tr  
 (c)  $V_c = 100$  m/min et  $f=0.20$  mm/tr  
 [Venugopal et al., 2007a]

La Figure I.23 montre des images issues de MEB des faces de coupe et de dépouille des plaquettes utilisées dans les essais de [Venugopal et al., 2007a]. Elles permettent d'avoir un aperçu visuel des effets de l'assistance cryogénique qui semble bien permettre de limiter les phénomènes de diffusion qui sont responsables de l'usure en cratère de l'outil et dépendent justement de la température atteinte pendant la coupe. Néanmoins, les travaux de [Kaynak et al., 2018] sur le Ti-5553 semblent indiquer que ni la MQL, ni l'assistance cryogénique ne permettent d'atténuer la tendance à la formation d'arête rapportée qui est imputée au phénomène d'adhésion.



*Figure 1.23 : Images MEB des faces de coupe et de dépouille après 8 minutes d'usinage à  $V_c = 85$  m/min et  $f = 0.20$  mm/tr*  
*a) Usinage à sec*  
*b) Usinage avec lubrifiant classique*  
*c) Usinage avec assistance cryogénique*  
 [Venugopal et al., 2007a]

Finalement, les résultats des différents chercheurs allant tous dans le sens d'une amélioration de la durée de vie des outils, l'usinage avec assistance cryogénique semblerait permettre d'usiner plus longtemps avec les mêmes conditions de coupe ou d'usiner avec des conditions de coupe plus élevées (augmentation de  $V_c$ ) mais sans pour autant augmenter le temps d'usinage total.

#### ***1.4.2.4. Frottement à l'interface outil/copeau***

L'utilisation de l'azote liquide en lieu et place des fluides de coupe classique soulève la question de l'impact que cela peut avoir d'un point de vue tribologique. Ainsi, [Hong, Ding et al., 2001], [Birmingham et al., 2011], [Rotella et Umbrello, 2014] et [Kim et al., 2018] ont déterminé le coefficient de frottement apparent associé à leurs essais de tournage avec outil carbure sur Ti6Al4V afin de vérifier si l'azote projeté avait un pouvoir lubrifiant sur les frottements à l'interface outil-copeau. Malheureusement, les résultats obtenus par ces différents auteurs ne concordent pas car [Hong, Ding et al., 2001] et [Kim et al., 2018] observent une diminution significative du coefficient de frottement apparent vis-à-vis du cas à sec tandis que [Birmingham et al., 2011] et [Rotella et Umbrello, 2014] n'observent pas de changement ou une légère augmentation selon les conditions de coupe, tendance qui à d'ailleurs pu être reproduite dans le cadre des essais tribologiques réalisés par [Courbon et al., 2013]. De surcroît, les essais tribologiques de [El-Tayeb et al., 2009] ne permettent pas non plus de trancher car selon les conditions utilisées ils observent une variation du coefficient de frottement comprise entre -22% et +20% par rapport au cas à sec.

Finalement, il est impossible de conclure à l'heure actuelle sur l'impact tribologique de l'utilisation de l'assistance cryogénique et s'il est certain que l'azote a bien un pouvoir refroidissant, il n'y a pas de certitudes quant à son hypothétique pouvoir lubrifiant.

#### ***1.4.2.5. Efforts de coupe***

En ce qui concerne les efforts de coupe lors de l'utilisation de l'assistance cryogénique, l'état de l'art permet difficilement de donner une tendance claire. En effet, les mesures d'efforts réalisées par [Hong, Ding et al., 2001] pendant leurs essais de tournage avec outil carbure sur Ti6Al4V mettent en évidence une légère augmentation des efforts de coupe et de poussée par rapport au cas à sec. Les essais de fraisage réalisés par [Lequien, 2017] vont dans la même direction étant donné que celui-ci enregistre une augmentation des efforts de coupe, d'avance et de pénétration, le tout pour un effort résultant pouvant être jusqu'à 25% supérieur par rapport au cas avec émulsion, et d'avantage à sec. D'un autre côté, les résultats obtenus en tournage par [Dhananchezian et Pradeep Kumar, 2011], [Birmingham et al., 2011] et [Rotella et Umbrello, 2014] indiquent une diminution de l'effort de coupe pouvant aller jusqu'à 42% de moins à conditions de coup égales.

#### ***1.4.2.6. Morphologie des copeaux***

[Birmingham et al., 2011] ont étudié l'influence de l'assistance cryogénique sur la morphologie des copeaux en tournage de Ti6Al4V avec outil carbure et ont conclu que l'utilisation de celle-ci avait tendance à diminuer la longueur de contact outil-copeau et par la même, le rayon de courbure du copeau. Néanmoins, ils n'ont relevé aucun changement notable du point de vue de l'épaisseur du copeau, de la distance entre les dentelures et de l'angle de cisaillement. De plus, ces travaux ne permettent pas de conclure quant à la fragmentation des copeaux car les outils utilisés étaient équipés d'un brise copeau. Néanmoins, les essais de coupe orthogonale réalisés par [Kaynak et al., 2018] sur le Ti-5553 semblent indiquer la formation de copeaux longs et donc une fragmentation difficile dans tous les cas testés, c'est-à-dire à sec, avec MQL et avec assistance cryogénique.

#### ***1.4.2.7. Intégrité de surface***

Avant de débiter cette sous-partie, il semble nécessaire de préciser que dans le cas présent, le mot « surface » désignera simultanément la limite physique entre la pièce considérée et son environnement extérieur et le matériau directement sous la surface. Ainsi, à l'instar de la distinction faite dans les travaux de [Mondelin, 2012], le terme « intégrité de surface » regroupera les critères suivants :

- Aspects topologiques
  - Rugosité, ondulation, forme
  - Défauts divers (fissures, etc.)
- Aspects matériau dans la couche subsurfacique
  - Microstructure (taille de grains, phases, etc.)
  - Dureté
  - Contraintes résiduelles

#### ***Rugosité de la surface***

En ce qui concerne la dureté, les résultats obtenus par les chercheurs convergent et indiquent tous une amélioration de la rugosité. En effet, [Dhananchezian et Pradeep Kumar, 2011] trouvent un Ra plus petit dans le cas du tournage avec assistance cryogénique en comparaison à l'émulsion, idem pour [Kim et al., 2018]. En outre, [Lequien, 2017] arrive aux mêmes conclusions pour la technique de fraisage. Finalement, [Rotella et al., 2014] sont les seuls à faire aussi la comparaison avec la MQL, leurs résultats sont présentés sur la Figure I.24 et donnent une fois de plus l'avantage à l'assistance cryogénique en tournage de Ti6Al4V.

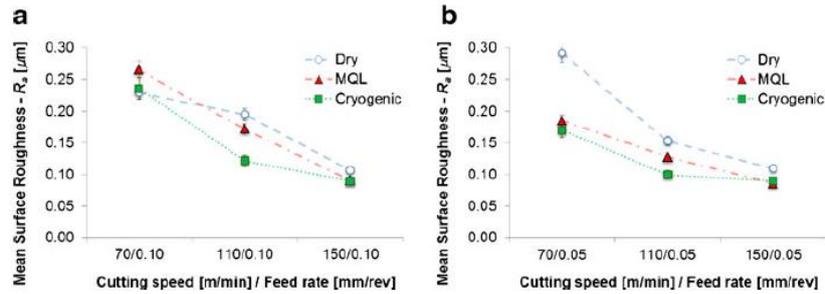


Figure I.24 : Rugosité arithmétique moyenne pour plusieurs conditions de coupe. Comparaison des cas à sec, MQL et assistance cryogénique [Rotella et al., 2014]

### Transformations de phases

[Rotella et al., 2014] ont analysé l'altération des phases présentes en surface suite à une opération de tournage de Ti6Al4V, faisant la comparaison entre le cas à sec, avec MQL et avec assistance cryogénique. Ces auteurs ont conclu que dans le cas à sec, il y a une augmentation significative de la proportion de phase  $\beta$  présente en surface à la suite de l'usinage. Dans les cas MQL et assistance cryogénique, le phénomène est plus limité mais sans être pour autant empêché, l'efficacité de cette limitation dépendant des conditions de coupe utilisées pendant l'usinage. Les travaux menés par [Kim et al., 2018] montrent que ces altérations pourraient être stoppées à partir d'une certaine vitesse de coupe dans le cas avec assistance cryogénique, mais ne font pas la comparaison avec les cas à sec et MQL. Au final, il y a peu d'informations sur cet aspect dans la littérature et les travaux réalisés sur d'autres matériaux sont difficilement transposables, empêchant par conséquent de conclure.

### Taille de grains et dureté

[Rotella et al., 2014] se sont intéressés de près aux aspects concernant l'intégrité de surface et ont notamment comparé les tailles de grains de la couche subsurface pour les cas à sec, avec MQL et avec assistance cryogénique. Dans un deuxième temps, [Rotella et Umbrello, 2014] ont essayé de reproduire les tendances observées par simulation numérique. La Figure I.25 expose une partie des résultats recueillis par [Rotella et al., 2014] et permet de constater pour l'assistance cryogénique une taille de grains 2 à 3 fois plus petits que le cas à sec et 1,5 à 2 fois plus petits que le cas avec MQL.

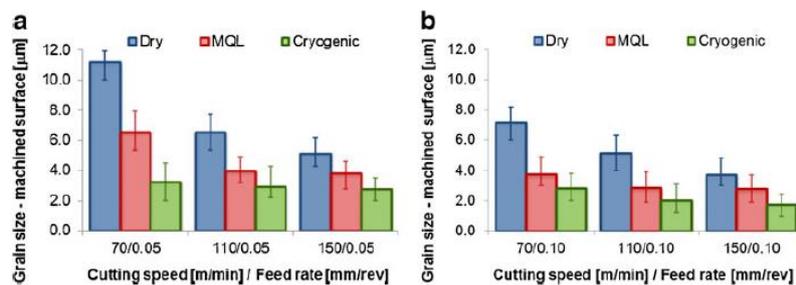


Figure I.25 : Taille de grains moyenne en surface pour plusieurs conditions de coupe. Comparaison des cas à sec, MQL et assistance cryogénique [Rotella et al., 2014]

La Figure I.26, correspondant aux duretés mesurées par [Rotella et al., 2014] donnent un avantage clair à l'assistance cryogénique sur le critère de la dureté en surface et dans la couche subsurface vis-à-vis des techniques à sec et avec MQL. En effet, la dureté constatée est deux fois supérieure dans le cas avec assistance cryogénique, ce qui est en adéquation avec les résultats présentés concernant l'affinement de la taille des grains qui est directement liée à la dureté de la surface du matériau. Par ailleurs, les travaux réalisés par [Pu et al., 2012] sur l'alliage de magnésium AZ31B et ceux de [Ambrosy et al., 2014] sur l'acier AISI 4140 arrivent aux mêmes conclusions concernant la taille des grains nettement affinée et la dureté accrue pour les surfaces usinées avec assistance cryogénique.

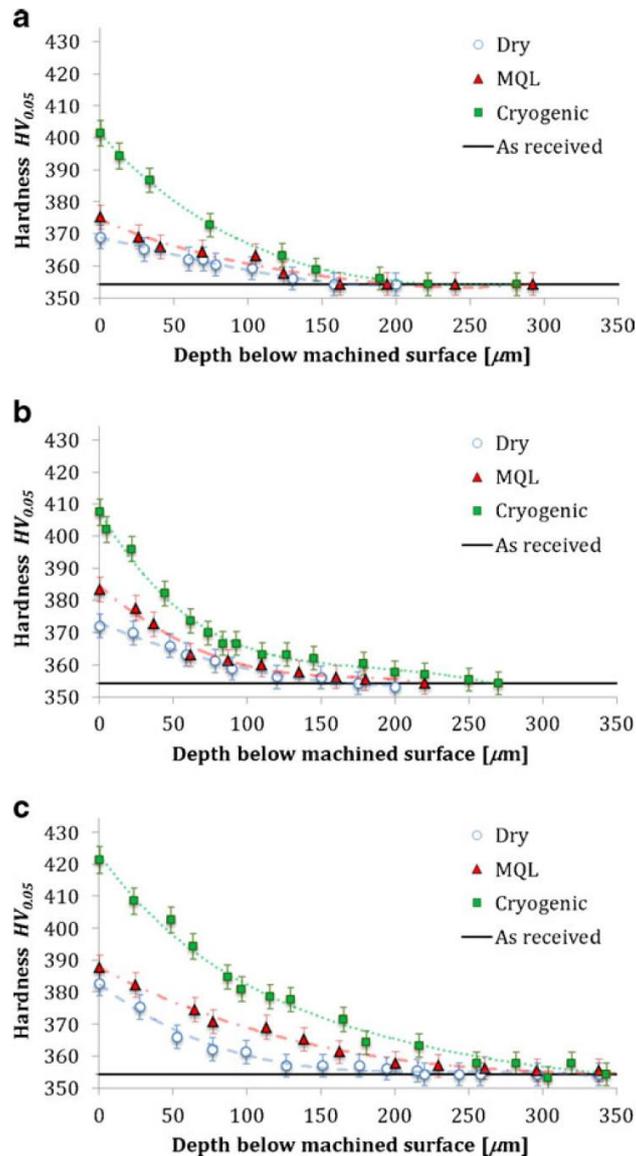


Figure I.26 : Dureté superficielle et subsurface pour plusieurs conditions de coupe. Comparaison des cas à sec, MQL et assistance cryogénique. [Rotella et al., 2014]

### Contraintes résiduelles

Malgré l'importance de la question, il n'existe pas de référence sur les contraintes résiduelles induites par l'usinage avec assistance cryogénique dans le Ti6Al4V. Néanmoins, [Pu et al., 2014], [Pu et al., 2012] et [Outeiro et al., 2013] ont étudié la question sur l'alliage de magnésium AZ31B et les résultats qu'ils ont obtenu leur ont permis de conclure que l'assistance cryogénique permettait d'obtenir des contraintes résiduelles axiales et transversales de compression plus importantes qu'à sec et ce sur une profondeur plus grande. La Figure I.27 expose les résultats obtenus par [Pu et al., 2012] pour deux rayons d'acuité d'arête différents. Par ailleurs, [Pusavec et al., 2011] arrivent aux mêmes conclusions pour l'Inconel 718 et donne un avantage clair à l'assistance cryogénique vis-à-vis de la condition à sec, mais aussi en comparaison de la MQL qui faisait ici partie de l'étude. [Biček et al., 2012] confirme les tendances précédentes pour l'acier AISI 52100 mais ne compare que les conditions à sec et avec assistance cryogénique.

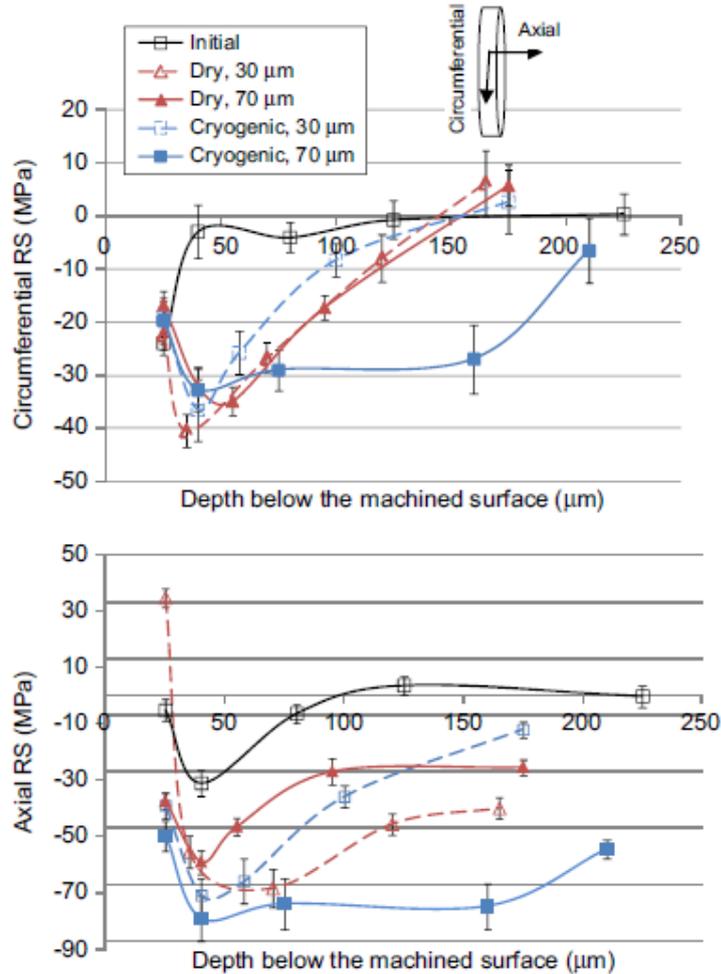


Figure I.27 : Contraintes résiduelles axiales et transversales après usinage à sec et avec assistance cryogénique, pour deux rayons d'arête différents. [Pu et al., 2012]

#### I.4.2.8. Synthèse et conclusions

Les résultats de la recherche bibliographique menée sur les effets de l'assistance cryogénique en usinage de Ti6Al4V montrent qu'il reste encore beaucoup de chemin à parcourir en ce qui concerne cette technologie émergente. En effet, le Tableau I.4, faisant la synthèse du contenu de l'état de l'art à ce sujet permet de constater qu'il reste encore une quantité conséquente de zones d'ombre, voire d'aspects encore non-explorés. Cela est d'autant plus vrai que les résultats récoltés concernent presque en totalité la technique de tournage, le fraisage et le perçage étant représentés de manière anecdotique uniquement.

Domaine	Sous domaine	Cohérence bibliographie	Tendances/Résultats	Références
Flux de chaleur reçus par l'outil et la pièce	Température de coupe	Convergence	L'assistance cryogénique permet une diminution significative de la température en zone de coupe.	[Hong et Ding, 2001], [Dhananchezian et Pradeep Kumar, 2011], [Kaynak et al., 2018], [Lequien, 2017]
	Coefficient d'échange convectif pièce/azote	Références insuffisantes	La bibliographie donne des ordres de grandeur	[Rotella et Umbrello, 2014], [Lequien, 2017], [Lequien et al., 2018], [Kaynak et al., 2018], [Sun et al., 2015], [Pusavec et al., 2016], [Hribersek et al., 2017], [Jawahir et al., 2016]
	Coefficient d'échange convectif outil/azote	Pas de références	/	/
Usure	Tenue des outils	Convergence	L'assistance cryogénique permet un allongement significatif de la durée de vie des outils utilisés	[Hong et Ding, 2001], [Hong, Markus et al., 2001], [Venugopal et al., 2007a], [Venugopal et al., 2007b], [Dhananchezian et Pradeep Kumar, 2011], [Birmingham et al., 2011], [Lequien, 2017]
	Phénomène de diffusion	Références insuffisantes	L'assistance cryogénique semblerait permettre la limitation du phénomène de diffusion	[Venugopal et al., 2007a]
	Phénomène d'adhésion	Références insuffisantes	L'assistance cryogénique semblerait n'avoir aucun effet sur le phénomène d'adhésion qui est aussi présent à sec et avec MQL	[Kaynak et al., 2018]
Efforts de coupe		Divergence	Il est impossible de conclure quant à l'impact de l'assistance cryogénique sur les efforts de coupe	[Hong, Ding et al., 2001], [Lequien, 2017], [Dhananchezian et Pradeep Kumar, 2011], [Birmingham et al., 2011], [Rotella et Umbrello, 2014]
Frottements		Divergence	Il est impossible de conclure quant à l'impact de l'assistance cryogénique sur le frottement entre l'outil et la pièce	[Hong, Ding et al., 2001], [Birmingham et al., 2011], [Rotella et Umbrello, 2014], [Kim et al., 2018], [Courbon et al., 2013], [El-Tayeb et al., 2009]
Morphologie copeaux		Références insuffisantes	L'assistance cryogénique semblerait ne pas améliorer la fragmentation du copeau par rapport aux cas à sec et avec MQL	[Birmingham et al., 2011], [Kaynak et al., 2018]
Intégrité de surface	Rugosité	Convergence	L'assistance cryogénique permet l'amélioration significative de la rugosité de la surface	[Dhananchezian et Pradeep Kumar, 2011], [Rotella et al., 2014], [Lequien, 2017], [Kim et al., 2018]
	Taille de grains et dureté	Convergence	L'assistance cryogénique induit un affinage de la taille des grains qui a pour conséquence une augmentation significative de la dureté en surface	[Rotella et al., 2014], [Rotella et Umbrello, 2014], [Pu et al., 2012], [Ambrosy et al., 2014]
	Transformation phases	Références insuffisantes	L'assistance cryogénique semblerait permettre de limiter les transformations de phase induites par l'usinage	[Rotella et al., 2014], [Kim et al., 2018]
	Contraintes Résiduelles	Références insuffisantes	L'assistance cryogénique semblerait favoriser l'apparition de contraintes résiduelles de compressions sur la surface usinée	[Pu et al., 2014], [Pu et al., 2012], [Outeiro et al., 2013], [Pusavec et al., 2011], [Biček et al., 2012]

Tableau I.4 : Synthèse de l'état de l'art sur l'assistance cryogénique en usinage d'alliages de titane