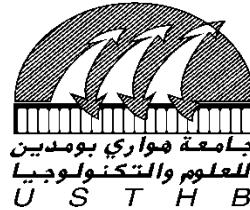


N° d'ordre : 15/2016-D/PH

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène**

**Faculté de Physique**



**THESE Doctorat en sciences**

Présentée pour l'obtention du grade de  
**DOCTEUR EN PHYSIQUE**

**Spécialité : ENERGETIQUE ET MECANIQUE DES FLUIDES**

**Présentée par**  
Mme AGGOUNE Samia

**Sujet**

**CARACTERISTIQUES DE L'ECOULEMENT DU METAL  
EN FUSION LORS D'UNE DECOUPE LASER SOUS GAZ  
D'ASSISTANCE**

Soutenue publiquement le : 14/07/2016 devant le jury composé de

<b>M. O. Ziane</b>	Professeur à l'USTHB, Alger	Président
<b>M. E. H. Amara</b>	Directeur de recherche au CDTA, Alger	Directeur de thèse
<b>M. M. Debiane</b>	Professeur à l'USTHB, Alger	Co-directeur
<b>Mme C. Abid</b>	Professeur à l'IUSTI, Marseille, France	Examinatrice
<b>Mme H. Kahalerras</b>	Professeur à l'USTHB, Alger	Examinatrice
<b>Mme Dj. Doumaz</b>	Directrice de recherche au CDTA, Alger	Examinatrice

## *Je dédie ce travail*

*A la mémoire de ma très chère mère, et à celles de toutes les victimes du séisme du 21 mai 2003. Ma mère qui s'est sacrifiée pour nous permettre de nous consacrer entièrement à nos études, elle est partie avant d'avoir assisté à la concrétisation de toutes ses attentes.*

*A mon cher père, pour sa patience, son aide, son soutien et son encouragement constant, je lui offre ce manuscrit et que Dieu nous le garde.*

*A mes sœurs : Malika, Sihem et Amel.*

*A mes frères.*

*A tous mes proches.*

*A toutes mes amies, en particulier Ghania Oularbi, Karima Annou, Sabrina Messaoud,..... pour leur soutien constant et leur encouragement durant tout le trajet de ma recherche.*

*A tous ceux qui m'ont aidée et encouragée.*

## **Remerciements**

*Ma première pensée va à mon directeur de thèse qui a été à la base de la réalisation de ce mémoire, qu'il trouve là l'expression de ma profonde gratitude. Ce travail a été effectué au sein de l'équipe Traitement des Matériaux par Laser du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) de Baba-Hassen.*

*A Monsieur O. ZIANE, Professeur à l'USTHB, je le remercie pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury.*

*Ma grande reconnaissance va à Madame C. ABID, c'est elle qui m'a donné la clef qui a permis la résolution analytique du sujet. Elle s'est toujours montrée disponible pour m'éclairer, son aide m'a été précieuse. Je la remercie aussi de m'avoir accueillie dans son laboratoire (IUSTI de Marseille) et pour avoir accepté de faire partie du jury.*

*Mes remerciements vont aussi à Monsieur le Professeur M. DEBIANE, mon enseignant du module de transfert thermique et de l'énergétique durant ma graduation. Son module bien enseigné a été la base pour la compréhension de plusieurs phénomènes physiques apparus lors du processus de la découpe laser, qu'il trouve l'expression de ma sincère reconnaissance.*

*Mes remerciements vont aussi à Madame H. KAHLLERAS et à Madame D. DOUMAZ pour l'intérêt qu'elles ont porté à mon travail et pour avoir accepté de faire partie du jury, qu'elles trouvent là, l'expression de mes profonds sentiments, chargés de respects.*

*Je n'oublie pas Monsieur E. H. CHAIB et Monsieur R. YOUNSI (de l'université de Montréal) pour leur aide et leurs conseils. Je remercie enfin tous mes collègues de la division (MIL) et ceux du laboratoire de mécanique des fluides de l'USTHB.*

# Sommaire

<b>NOMENCLATURE</b> .....	4
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	7

## CHAPITRE 1- *DECOUPES THERMIQUES & REVUES BIBLIOGRAPHIQUES*

### Partie 1

<b>1. Les différentes techniques de découpage thermique</b> .....	9
1.1 Oxicoupage.....	10
1.2 Découpe par plasma d'arc.....	11
1.3 Découpe par laser.....	14
<b>2. La découpe laser et ses variantes</b> .....	17
3.1 Oxicoupage laser.....	17
3.2 Découpe laser par fusion.....	18
3.3 Découpe laser par évaporation ou sublimation.....	18
<b>3. Qualités des découpes et critères de choix</b> .....	18
- ZAT.....	20
- Largeur de trait.....	20
- Dépouille.....	21
- Bavures.....	21
- Scories.....	22
- Stries.....	22

### Partie 2

<b>Revue Bibliographique</b> .....	24
------------------------------------	----

## CHAPITRE 2 - *LASERS & INTERACTION LASER-MATIERE*

### 1. Les lasers

1.1 Historique des lasers.....	32
1.2 La lumière, la lumière laser et ses principaux composants.....	33
1.3 Caractéristiques de la lumière laser.....	37
1.4 Régimes de fonctionnement : continu ou pulsé.....	38
1.5 Lasers de puissance.....	38
1.6 Modes et qualités du faisceau laser.....	42
1.7 Applications laser.....	45
1.8 Principaux lasers utilisés en découpe par laser.....	46
1.9 Le laser et la sécurité, mesure de prévention.....	46

### 2. Interaction laser-matière

2.1 Absorption, réflexion, diffusion et transmission du faisceau laser.....	48
2.2 Effets de la lumière laser sur les métaux .....	49

2.3 L'acier inoxydable et ses caractéristiques.....	50
---	----

**CHAPITRE 3 - GAZ D'ASSISTANCE**

<b>1. Caractéristiques du gaz d'assistance</b>	
1.1 Principaux gaz d'assistance utilisés en découpe laser.....	54
1.2 Influence de la nature du jet de gaz (réactif ou neutre).....	55
1.3 Le rôle du jet de gaz d'assistance.....	55
1.4 Régime gazeux (laminaire ou turbulent) .....	56

**CHAPITRE 4 - APPROCHE ANALYTIQUE**

<b>1. Introduction</b> .....	59
<b>2. Modélisation</b>	
2.1 Description du système .....	59
2.2 Rappel sur la théorie de la couche limite.....	59
2.3 Caractéristiques des métaux liquides (acier inoxydable fondu).....	60
<b>A. Début du processus et bilan énergétique</b> .....	61
1. Calcul des températures de surface et des vitesses de découpe.....	62
2. Calcul du pourcentage des pertes par conduction, convection et évaporation.....	63
3. Estimation de la pression de recul dans le cas d'une découpe laser par fusion.....	64
4. Mouvement latéral du métal fondu au début du processus.....	67
5. Calcul des vitesses de découpe et des vitesses du métal fondu sous l'influence d'un jet de gaz d'azote.....	67
6. Bilan énergétique.....	68
7. Conduction et choix du modèle 2D.....	69
8. Calcul des pertes par conduction et des intensités seuils.....	74
<b>B. Caractéristiques de l'écoulement du métal fondu dans la saignée</b> .....	76
Hypothèses simplificatrices .....	76
- <b>I-Aspect hydrodynamique</b> .....	78
1. Equations de la couche limite métallique .....	78
2. Calcul des longueurs d'entrée hydrodynamiques du jet de gaz.....	80
3. Influence des couches limites gazeuses sur l'épaisseur du film métallique.....	82
4. Cisaillement à l'interface film/gaz en fonction de la nature du gaz et de son nombre de Reynolds.....	83
- <b>II- Aspect thermique</b> .....	85
1. Calcul des longueurs d'entrée thermiques de l'écoulement gazeux.....	85
2. Influence des épaisseurs thermiques du jet de gaz sur l'épaisseur thermique du film métallique.....	85
3. Refroidissement et transfert thermique.....	87

## CHAPITRE 5 - APPROCHE NUMERIQUE

1. <b>Introduction</b> .....	93
2. <b>Modélisation</b> .....	93
2.1 Présentation des logiciels : Gambit et Fluent.....	93
2.2 Maillage et résolution numérique .....	97
2.3 Nécessité et calcul d'un domaine étendu.....	98
3. <b>Résultats numériques et leur interprétation</b> .....	99
3.1 Influence des vortex créés sur la qualité de découpe.....	99
3.2 Influence de la nature et de la vitesse du jet de gaz sur la qualité de découpe : apparition d'un point de décollement.....	104
3.3 Influence de la variation de la vitesse de découpe sur le film métallique.....	111
4. <b>Instabilités</b> .....	117
5. <b>Choix du laser pour diminuer les instabilités</b> .....	120
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	124
<b>REFERENCES</b> .....	128
<b>VALORISATIONS</b> .....	132

## NOMENCLEATURE

$D$  – largeur de saignée [m]

$d$  – épaisseur de la pièce [m]

$k$  - conductivité thermique [ $\text{W K}^{-1}\text{m}^{-1}$ ]

$C_p$  – chaleur spécifique [ $\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$P$  – pression du gaz [Pa]

$T$  – température [K]

$t$  - temps [s]

$U_m$  - vitesse du métal fondu [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$U_g$  - vitesse du jet de gaz [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$V_c$  - vitesse de découpe [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$V_d$  - vitesse de perçage [ $\text{ms}^{-1}$ ]

$Q$  - taux de refroidissement [W]

$q_{\text{cond}}$  - Le flux de chaleur par conduction nécessaire pour la fusion [ $\text{W m}^{-1}$ ]

$r_0$  - rayon de la saignée.

$Pr$  - Nombre de Prandtl

$P_l$  - Puissance laser [W]

$D_h$  - diamètre hydraulique ( $D_h=4A_c/P_w$ )

$A_c$  - section droite ( $\pi D^2/4$ )

$P_w$  - périmètre mouillé ( $\pi D/2$ )

$D_g$  - diamètre moyen du jet de gaz

$Re_d$  - nombre de Reynolds gazeux le long du front de découpe

$Re_D$  - nombre de Reynolds gazeux à l'intérieur de la saignée

$Q_{cd}$  - flux de chaleur conductif [W]

$Q_{cv}$  - flux de chaleur convectif [W]

$h_{\text{avg}}$  - coefficient de transfert convectif moyen [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]

$Nu_{\text{avg}}$  - nombre de Nusselt moyen

$L$  - longueur de la pièce ( $L=2e$ ) [m]

$L_e$  - longueur d'entrée [m]

$L_{\text{ex}}$  - Extension [m]

$L_f$ – Chaleur latente de fusion [J/kg]

**Symboles grecs :**

$\mu$ – viscosité dynamique [ $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]

$\rho$  –masse volumique [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

$\delta$ – épaisseur de couche limite [m]

$\tau$  – contrainte de cisaillement [ $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$ ]

$\alpha$ –diffusivité thermique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\gamma$ – viscosité cinématique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

**Indices**

m- métal fondu

g- gaz

s–solide

x, y, z- coordonnées cartésiennes

h - hydrodynamique

t – thermique

f- fusion

## ***INTRODUCTION GENERALE***

Les techniques de découpe industrielle des matériaux métalliques de différentes compositions et épaisseurs sont toujours en plein développement, où la compétitivité des entreprises impose l'utilisation de procédés souples et efficaces, capables de s'adapter à n'importe quel matériau et n'importe quelle épaisseur. Les lasers qui sont des sources de chaleur pouvant délivrer de fortes puissances ont permis d'élargir le champ des applications en particulier dans leur utilisation dans le traitement des matériaux en industrie. On s'intéresse dans le cadre de ce travail à la découpe par laser des aciers, cette dernière technique a été développée pour pallier aux insuffisances des procédés conventionnels.

Lors d'un traitement de matériaux par laser plusieurs phénomènes physiques interagissent. Parmi ces phénomènes on retrouve : l'interaction du faisceau laser avec le matériau, les échanges de chaleur par conduction, convection, rayonnement, diffusion, les transformations métallurgiques subies par le matériau, les contraintes de déformations et les changements de phases engendrées par les cycles thermiques. Ces nombreux phénomènes physiques relativement complexes font intervenir plusieurs disciplines telles que la mécanique des fluides, la physique du solide, le rayonnement, la métallurgie et l'énergétique dans le but d'expliquer et de comprendre ce processus. Quant à la modélisation des phénomènes physiques, elle permet de traduire mathématiquement ou numériquement la physique du procédé. Lors de la rédaction de ce mémoire de thèse, une attention particulière a été accordée aux rappels et aux présentations des logiciels utilisés.

Notre thèse qui consiste en l'étude des caractéristiques de l'écoulement de l'acier inoxydable en fusion lors d'une découpe laser sous un gaz d'assistance neutre ou inerte comporte cinq chapitres :

- Une introduction qui récapitule les différents processus de découpes thermiques ainsi qu'une étude bibliographique des travaux antérieurs font l'objet du premier chapitre.
- Le second chapitre est consacré essentiellement d'une part, aux principaux lasers utilisés dans le processus de découpe, et d'autre part, à l'interaction laser-matière. Le chapitre est terminé par une présentation succincte du comportement des métaux et en particulier de l'acier inoxydable à travers les phénomènes d'absorption, de diffusion, de réflexion et de transmission du faisceau laser.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents gaz d'assistance utilisés sous forme de jets pour évacuer le métal en fusion, ainsi que leurs régimes d'écoulements.
- Les quatrième et cinquième chapitres englobent l'introduction de notre modélisation, qui s'appuie sur deux modèles complémentaires, l'un analytique basé sur la théorie des couches limites et l'autre numérique basé sur les logiciels de dynamique des fluides

**Gambit** et **Fluent**. Notre contribution à cette recherche est présentée dans ces deux chapitres. En effet, on étudie la contribution de la pression de recul dans l'éjection latérale du métal fondu lors d'une découpe laser par fusion. Nous avons calculé les pertes par conduction et les puissances exigées dans le but de déterminer l'intensité seuil en fonction de la vitesse de découpe. Nous allons aussi présenter les résultats obtenus ainsi que leur interprétation pour les deux approches différentes de résolutions suivies. Une conclusion générale clôturera le travail accompli dans cette thèse et présentera quelques perspectives.

***CHAPITRE 1***

***DECOUPES THERMIQUES  
& REVUES BIBLIOGRAPHIQUES***

## **Partie 1**

Dans l'industrie, lors de l'usinage, la mise en forme des matériaux traités passe souvent par une phase de découpe. Le découpage mécanique utilisant généralement des phénomènes de cisaillement de la matière donne des qualités de coupe tout à fait acceptables mais qui ne répondent pas aux critères de rapidité et de précision. La technologie des fraises, des plaquettes, des forets et autres se base sur un principe d'arrachement de matière, ce qui provoque des échauffements et contribue à détériorer les propriétés physiques et chimiques des matériaux en bord de coupe (transformation de phase, destruction de liaisons chimiques, écrouissage...). Or, les applications à haute valeur ajoutée dédiées aux technologies avancées, exigent une haute qualité des matériaux à utiliser. Cela nécessite la mise au point d'autres techniques de découpe qui imposent l'utilisation de procédés souples, capables de s'adapter à n'importe quel matériau d'épaisseurs variables en vue d'allier précision, qualité et rapidité.

Parmi les procédés existants pour découper les métaux et les alliages métalliques voire les matières plastiques ou les polymères, nous pouvons distinguer trois catégories :

- La découpe mécanique (cisailage, poinçonnage, jet d'eau avec et sans abrasifs),
- La découpe thermique (laser, plasma, oxycoupage),
- La découpe par usure (électroérosion).

Suivant la composition du matériau, son épaisseur, son utilisation, le coût de la découpe, certaines méthodes sont mieux adaptées que d'autres.

Nous laisserons de côté les procédés mécaniques qui ne répondent pas au critère de rapidité pour des épaisseurs de métaux supérieures à 5mm et ne sont donc pas directement concurrents de la découpe laser. En fait, ils sont plus lourds à mettre en place et aussi ne permettent pas la découpe de formes complexes.

### **1. Les différentes techniques de découpage thermique et leurs limites**

Les techniques de découpe thermique ont été développées pour pallier aux insuffisances des procédés déjà existants. Celles-ci se caractérisent en effet par le fait qu'elles ne nécessitent pas un contact direct entre la pièce à découper et l'outil de découpe. Ce point constitue déjà un avantage non négligeable des outils de découpe thermique.

Ces techniques sont au nombre de trois: l'oxycoupage, la découpe plasma et la découpe laser. Elles sont concurrentes et le choix de l'une ou l'autre se fera suivant les critères que nous détaillerons dans ce paragraphe. Tout d'abord, il est à noter que chacun de ces procédés possède ses domaines d'application propres. En particulier, les précisions obtenues par découpage plasma et oxycoupage sont de l'ordre de 1mm alors que le laser permet de réaliser des coupes au dixième de millimètre (0.1mm). De plus il faut rappeler que l'oxycoupage n'est utilisable que sur les aciers non alliés ou faiblement alliés (les aciers inoxydables, le cuivre, les alliages sont donc écartés) d'épaisseurs supérieures à 3mm. En découpe laser, les limites sont dues à la réflexion de certains matériaux comme l'aluminium. Ces réflexions vont limiter la découpe à des épaisseurs inférieures à 5mm.

Nous introduisons dans la suite de façon plus détaillée ces différentes techniques de découpage thermique.

## 1.1 Oxycoupage

Ce procédé est le plus ancien relativement aux procédés de découpe par plasma et par laser. Bien qu'il ne permette la découpe que d'aciers non ou faiblement alliés, il occupe encore actuellement une grande place dans l'industrie.

Dans ce procédé, l'énergie de fusion est fournie par la réaction d'oxydation du fer. Il s'agit d'une réaction exothermique se produisant préférentiellement dans une gamme de températures allant de 1600K à 1800K. Le métal liquide se détache laissant le métal solide assez chaud pour que la réaction continue. L'oxyde formé et le fer, tous deux à l'état liquide, s'écoulent en permanence, drainés par la force vive du jet d'oxygène qui éjecte alors le métal fondu hors de la saignée tout en laissant le métal solide en son front à une température suffisante pour entretenir la réaction pendant que l'outil avance. La distance entre la buse et la pièce est comprise entre 5 et 10mm. C'est dans cette zone que s'effectue la flamme de préchauffe.

Si ce n'est l'énergie nécessaire pour déplacer la tête de découpe, l'oxycoupage ne consomme aucune énergie électrique. Il permet de découper tous les métaux non alliés ou faiblement alliés contenant du fer avec une plus ou moins bonne précision dans une plage d'épaisseur allant de 3 à 300 mm. Tous les autres types de métaux, ou de matériaux ne pourront pas être traités. Les paramètres caractéristiques qui influent sur cette découpe sont :

- ✓ la composition du métal, son épaisseur et ses propriétés thermiques (conductivité, diffusivité, chaleur latente, température de fusion),
- ✓ la vitesse d'avancée,
- ✓ la pureté de l'oxygène,
- ✓ la température de préchauffage.

Ce procédé reste, néanmoins une méthode assez couramment employée en entreprise car il est peu coûteux et peut être facilement automatisé.

Pour l'oxycoupage, les vitesses de découpe se situent autour d'une cinquantaine de centimètres par minute (50cm/min). La largeur de trait est de l'ordre de 2 à 3mm et la précision finale de l'ordre de 1 à 2 mm.

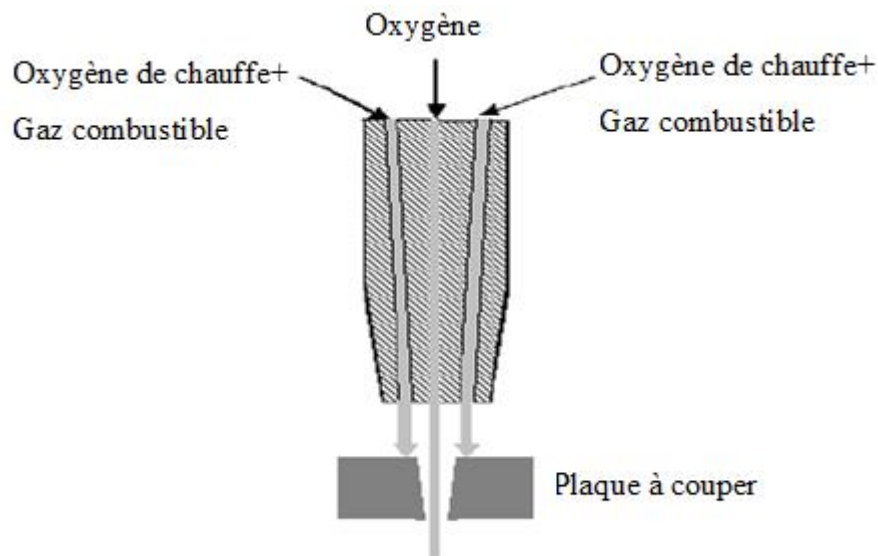


Figure 1. Dispositif d'oxycoupage

## Avantages :

- ✓ Ce procédé peut être facilement automatisé.
- ✓ La présence d'oxygène a tendance à fluidifier le métal liquide, évitant que des scories s'accrochent en bas de saignée [1]. L'oxycoupage a ainsi l'avantage de créer des saignées aux bords bien lisses et aucun retraitement de la pièce coupée n'est nécessaire.
- ✓ Le chanfrein créé est quasi inexistant.
- ✓ l'oxycoupage permet de découper des épaisseurs de plaque variant de 20cm à 2m.
- ✓ Le très faible coût de l'installation se situe autour de quelques centaines d'euros.

## Inconvénients :

- ✓ Pour l'oxycoupage, la rouille provoque des défauts profonds, diminue la vitesse de découpe, voire la stoppe.
- ✓ La zone affectée thermiquement (ZAT) produite est très importante, elle est de l'ordre de 6mm autour de la saignée. Cette très large ZAT est principalement due à la présence des flammes de préchauffage qui portent le métal autour de la saignée à une température avoisinant les 1600K pour amorcer la réaction d'oxydation. Une autre raison provient de la réaction chimique exothermique s'effectuant au sein de la plaque de métal. Ceci modifie de manière importante la structure du métal dans la ZAT et favorise l'apparition de fortes déformations thermiques.
- ✓ L'oxycoupage d'un métal reste lié à son aptitude à s'oxyder, à la chaleur produite lors de la réaction d'oxydation et à sa température de fusion. Cette dernière doit être inférieure à la température d'amorçage, condition sans laquelle la réaction d'oxydation n'a pas lieu.
- ✓ La présence d'impuretés comme la rouille, nuit à l'auto-entretien de la réaction et impose la présence d'une flamme de chauffe à l'avant du jet.
- ✓ la vitesse d'avancée est fixée par la rapidité de la réaction d'oxydation. Si la vitesse de déplacement est plus rapide que la réaction d'oxydation, le front de saignée présente un retard. Au contraire si la vitesse de déplacement de la buse est plus lente que la combustion, le bord de coupe présente une avance.

Finalement, la qualité de découpe de l'oxycoupage est moyenne et les caractéristiques de la saignée sont bonnes mais la précision est médiocre et les déformations thermiques importantes. Malgré cela, l'oxycoupage est beaucoup utilisé dans l'industrie car c'est un procédé très robuste avec un coût très faible. La pollution de ce procédé se limite à la production de gaz toxiques du type  $Nx-Oy$ , et cette pollution est bien maîtrisée et traitée par des systèmes d'extraction et de filtrage des fumées [2].

### 1.2 Découpage par plasma d'arc

Le principe de base des procédés par plasma consiste en la création d'un arc qui est transféré entre une cathode, autour de laquelle est soufflé un gaz, et une pièce métallique à découper

constituant l'anode. La formation de cet arc est facilitée par un gaz conducteur d'électricité comme par exemple l'argon pris à 7000K et à la pression atmosphérique. Il se forme alors un plasma, gaz partiellement ionisé mais électriquement neutre. Grâce à ce plasma, le matériau atteint rapidement sa température de fusion et la force vive du jet éjecte le métal liquide hors de la saignée. Les puissances mises en jeu varient de quelques kilowatts à plus de 100kW. Le courant fourni par les alimentations électriques est généralement continu.

Le découpage par plasma d'arc, permet de découper un éventail important de matériaux d'épaisseurs variables et ce rapidement, d'où son intérêt croissant pour les industriels. La possible présence de bavures, de rugosité ou d'un non parallélisme des faces de coupe, obligent une reprise mécanique, ce qui réduit la rapidité du procédé. Eventuellement il peut y avoir même formation de stries plus ou moins importantes selon les conditions expérimentales utilisées.

Les gaz plasmagènes doivent posséder des propriétés physiques particulières. Il faut tout d'abord qu'ils aient une conductivité thermique et une enthalpie élevées de manière à favoriser un transfert rapide d'importantes quantités de chaleur du plasma vers la plaque. Cela permet d'avoir une vitesse de découpe élevée. Les gaz doivent aussi être denses afin que le jet de plasma puisse éjecter le métal fondu hors de la saignée.

Ainsi, ce sont plutôt des mélanges argon-hydrogène qui sont utilisés, chaque gaz apportant ses "bonnes" caractéristiques au plasma : l'argon, son faible potentiel d'ionisation et sa densité de masse élevée, et l'hydrogène sa conductivité thermique importante. Les mélanges habituellement utilisés se situent dans des proportions aux alentours de 80% Ar et 20% H<sub>2</sub>.

Pour le procédé plasma, la vitesse de découpe dépasse 5 m/min pour les plus faibles épaisseurs et n'atteint que quelques dizaines de centimètres par minute (10 cm/min) pour les plus fortes. On peut découper de manière rentable des épaisseurs de métal allant de quelques dixièmes de millimètres à plus de 150 mm.

Dans le cas où le gaz utilisé est de l'oxygène, on pourrait penser que comme pour l'oxycoupage une action d'oxydation est couplée à l'action du plasma. En fait les ordres de grandeurs des températures en haut de la saignée (15000K) ne permettent pas l'oxydation qui ne se fait qu'à des températures voisines de 2000K. Par contre en bas de saignée, l'oxydation a lieu et semble dans une certaine mesure éviter la formation de scories. Les bords de la saignée obtenus avec l'oxygène sont beaucoup plus lisses qu'avec les autres gaz. Cependant, l'emploi de l'oxygène n'empêche pas la formation de stries.

Les paramètres caractéristiques de cette technique sont :

- ✓ La géométrie de la torche (longueur du canal et diamètre de la tuyère, méthode d'injection du gaz plasmagène, axiale ou vortex...),
- ✓ Intensité du courant d'arc,
- ✓ Nature, pression et débit de gaz,
- ✓ La composition du matériau à découper, son épaisseur et ses propriétés thermiques,
- ✓ La vitesse de déplacement de la torche par rapport à la pièce.

Sachant que la plaque sert d'anode, il est donc évident qu'avec ce procédé, seuls les matériaux conducteurs peuvent être traités. Ainsi, le plasma d'arc transféré ne sert à découper que des matériaux conducteurs électriques tandis que pour les matériaux non conducteurs électriques un plasma d'arc soufflé doit être utilisé.

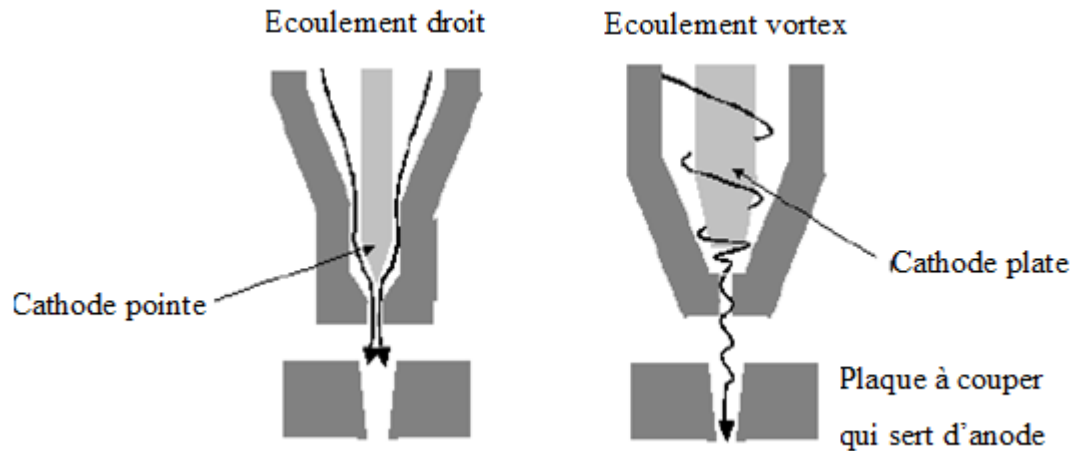


Figure 2. Géométries de torches à plasma pour la découpe.

#### Avantages :

- ✓ Depuis les années 70, les mélanges (argon-hydrogène) ont été peu à peu remplacés par de l'azote ou de l'air. Ces deux gaz regroupent toutes les caractéristiques nécessaires pour une découpe rapide et présentent l'avantage d'être largement disponibles sur le marché (ils sont donc moins chers).
- ✓ Pour pallier aux inconvénients de l'azote (bavures et solidification), la dernière génération de torche utilise de l'oxygène. Ce gaz possède une enthalpie, une densité de masse et une conductivité thermique élevées. Il permet de plus de découper plus rapidement le métal avec des puissances électriques moins importantes [1].
- ✓ Avec les nouveaux procédés à l'oxygène, on arrive à obtenir des largeurs de trait inférieures au millimètre et une précision de découpe de quelques dixièmes de millimètres, comparable à celle du laser [1].
- ✓ Suivant la configuration de la torche et les conditions opératoires, la ZAT varie de 1 à 2mm. Elle est beaucoup moins importante que dans le cas de l'oxycoupage. Lorsque la découpe est réalisée sous l'eau, la ZAT est quelque peu diminuée.

#### Inconvénients :

- ✓ Dans le cas de l'utilisation de l'azote, il y a formation de bavures sous la plaque et absorption d'azote par le métal qui se solidifie. Il faut alors retraiter chimiquement la pièce pour la décharger de son azote.
- ✓ Difficulté à réduire l'accrochage de scories à la sortie de la saignée telles que celles présentées sur la figure 8 ci-dessous.

- ✓ Une intervention supplémentaire est généralement nécessaire et implique un accroissement non négligeable du prix de revient du produit.
- ✓ Le coût d'une installation plasma est de quelques dizaines de milliers d'euros. Si on utilise de l'oxygène comme gaz de découpe, il faut aussi compter un surcoût important dû aux consommables [1].
- ✓ La pollution engendrée par le procédé plasma est à peu près de même nature que celle du laser (bruit + rayonnement).
- ✓ L'inconvénient majeur de cette technique est l'usure très rapide des consommables. En effet, dans le cas de l'utilisation de l'oxygène, une érosion très importante est engendrée au niveau des cathodes et des tuyères.
- ✓ Cette technique ne permet pas une utilisation en continu de plus de 3 heures.

Pour conclure, la découpe plasma permet de traiter des métaux dans une gamme d'épaisseurs variant de quelques dixièmes de millimètres à 150 mm. L'apparition des nouvelles torches à oxygène permet d'accroître la précision et la vitesse de découpe tout en consommant moins d'énergie. Par rapport à l'oxycoupage, la ZAT est fortement réduite et la précision est meilleure. La technique plasma, peu fragile permet de découper tous les types de métaux et le coût d'une installation est à peu près dix fois moindre que celui d'un banc de découpe laser.

### 1.3 Découpage laser

Dès lors, les lasers ont intégré le monde de l'industrie et de la recherche. Le laser est très approprié pour l'usinage des matériaux durs, tels que les métaux, les céramiques et les polymères. La découpe laser consiste en la focalisation d'un faisceau laser sur une surface de l'ordre du  $\text{mm}^2$ . L'énergie qui sert à la fusion du métal est apportée par le faisceau laser. L'apport d'énergie doit alors être suffisant pour fusionner ou vaporiser une partie du métal. L'éjection des produits fusion/vaporisation hors de la saignée est effectuée par un soufflage simultané d'un gaz de découpe. La nature de ce gaz peut être changée suivant les matériaux envisagés. Ainsi, pour des aciers faiblement alliés, on utilisera de l'oxygène de manière à obtenir sur les tranches de la saignée un effet chimique d'oxydation (qui rend plus lisses les bords de saignée) alors que pour les aciers inoxydables ou des métaux contenant par exemple du chrome, on utilisera des gaz plus inertes tels que l'argon ou l'azote. Ce gaz a aussi pour but de protéger les composants optiques du système laser en évitant que des particules de métal fondues viennent se coller dessus.

Des trois procédés thermiques, la découpe laser est la technique qui est apparue le plus récemment dans l'industrie (autour des années 80). Malgré cette récente apparition, elle occupe aujourd'hui une place prépondérante sur le marché, concurrençant fortement la découpe plasma, l'oxycoupage et évidemment les procédés mécaniques.

Cette technologie s'est imposée grâce à sa grande souplesse, à la diversité de fabrication offerte et à la très bonne qualité de découpe. Le faisceau laser permet de découper pratiquement tous les matériaux, mais différents paramètres doivent être pris en compte comme le pouvoir d'absorption

de la surface (réflectivité), la température d'inflammation, la température de fusion et la température de vaporisation ainsi que la conductivité thermique du matériau. Les types de lasers utilisés sont généralement le laser à gaz carbonique (laser CO<sub>2</sub>) et le laser à solide Yttrium Aluminium Garnet dopé au Néodyme (laser Nd:YAG). Le diamètre de sortie de la tuyère est d'environ 1mm. L'épaisseur de la plaque que l'on peut découper de manière rentable varie du dixième de millimètre à 4-5 millimètres.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser en particulier à la découpe laser, il est donc judicieux de détailler plus ce procédé par rapport aux deux autres décrits précédemment.

**Avantages :**

- ✓ La précision par ce procédé d'usinage est de l'ordre du micromètre allant parfois jusqu'au nanomètre. En particulier, elle est de 0.1 mm pour les lasers CO<sub>2</sub> et va jusqu'au micron pour les lasers Nd : YAG.
- ✓ Le procédé laser peut découper n'importe quel type de métal (à condition d'un choix approprié du type de laser) sur des épaisseurs allant de vingt-cinq à moins de un millimètre.
- ✓ Le laser permet aussi à l'industriel de diversifier son activité grâce à la découpe d'autres matériaux tels que le bois, le cuir ou le plastique.
- ✓ Le matériau à découper subit peu de déformations thermiques et la ZAT est plus réduite comparée aux autres procédés de découpe thermique.
- ✓ La largeur de trait est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres.
- ✓ Les bords de saignée sont presque droits et le chanfrein quasiment négligeable.
- ✓ Avec de bons réglages, la formation de scories est inexistante.
- ✓ Le procédé permet la découpe de formes très complexes avec une grande précision.
- ✓ La vitesse de découpe des matériaux est rapide. Le tableau ci-dessous regroupe quelques exemples de matériaux découpés avec un laser CO<sub>2</sub>.

**Tableau 1 :** Vitesse de découpe recommandée par laser CO<sub>2</sub> pour différents matériaux.

Matériau	Epaisseur (mm)	Puissance laser (Watt)	Vitesse de découpe (m/min)
Acier	12	3000	0.8
Inox	12	2000	0.6
Nylon	3	400	3
Epoxy/fibre de verre	3.2	250	0.2
Kevlar	25	150	1.5
Papier	0.075	250	160
Carton ondulé	3	400	25
Carton rigide	3	400	8
Cuir	2	800	35

**Inconvénients :** Les avantages présentés dans les paragraphes précédents sont cependant accompagnés de nombreuses limitations directement associées à la technique. Nous en développerons les principales dans le paragraphe suivant.

- ✓ Le procédé est très consommateur d'énergie.
- ✓ L'apparition de stries persiste dans le cas de l'utilisation d'un gaz inerte.
- ✓ Les installations laser font un bruit important (autour de 100dBA à un mètre de l'installation) et dégagent beaucoup de rayonnement [2].
- ✓ Le coût d'entretien des installations laser est très élevé.
- ✓ L'inconvénient principal du procédé est le phénomène de dissipation thermique qui entraîne la formation d'une Zone Fondue (ZF) et d'une ZAT dans le matériau (figure 6). Elle peut prendre la forme d'une transformation de phase dans les métaux, on parle alors de zone affectée métallurgiquement (ZAM), ou de carbonisation dans les polymères.
- ✓ La zone ZAT qui, dans la majorité des cas, a une taille moyenne comprise entre 0,05 et 1 mm, est d'autant plus importante que les coefficients d'absorption et de diffusivité thermique sont grands. Ces zones d'affaiblissement mécanique peuvent être des points de départ pour les fissurations.
- ✓ Il est nécessaire de prendre en compte la réflectivité des matériaux, c'est un inconvénient majeur, d'où la nécessité de disposer de différents types de laser pour pouvoir usiner tous les matériaux. En effet, les métaux ont un coefficient de réflexion qui dépend de la longueur d'onde laser utilisée. Ainsi, on ne pourra pas découper du cuivre avec un laser CO<sub>2</sub>, car le cuivre réfléchit en grande partie la lumière laser dont la longueur d'onde est proche de 10 μm; il faudra donc pour ce matériau utiliser un laser Nd:YAG ( $\lambda = 1064$  nm). A l'inverse, la découpe du verre est impossible avec un laser Nd:YAG, mais sera possible avec un laser CO<sub>2</sub>.
- ✓ Il est nécessaire de procéder à la décontamination des gaz d'assistance, c'est un autre inconvénient lié à leur utilisation. Ces gaz peuvent s'avérer toxiques en emportant avec eux des poussières et des copeaux nanométriques, qui doivent donc être canalisés et traités. Il faut rajouter à cela la possible vaporisation partielle du matériau coupé créant des composés toxiques par réaction chimique.
- ✓ Limitation en épaisseur de la pièce à découper, en effet, cette technique permet uniquement la découpe de faibles épaisseurs: 25 mm maximum à l'heure actuelle dans les aciers de construction (dans le cas idéal de découpe), 15 mm dans les aciers inoxydables, et 6 mm dans les alliages d'aluminium.

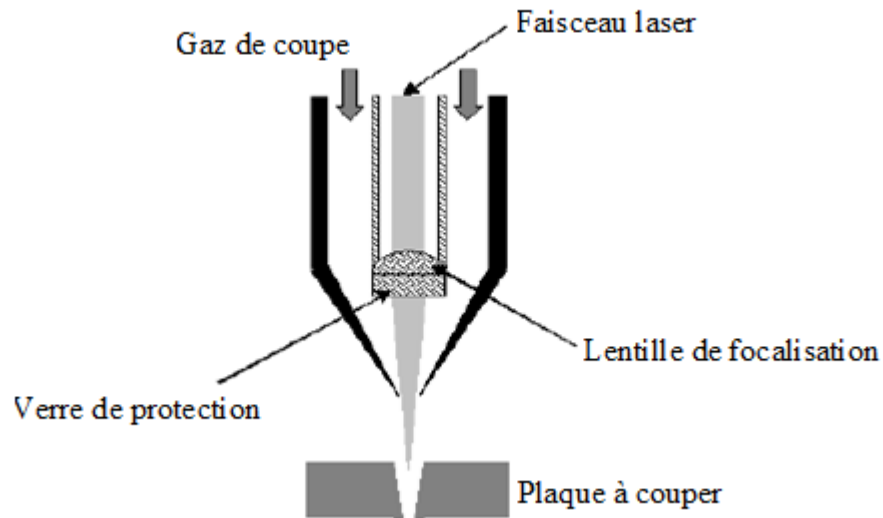


Figure 3. Découpage laser.

Le découpage laser est moins limité dans le choix des matériaux mais davantage dans celui des épaisseurs (maximum 20-25mm). Son excellente qualité de découpe fait de lui un procédé intéressant mais le prix élevé d'une installation modère son utilisation. Pour ce procédé, la vitesse de découpe varie de 0.3m/min à 10m/min suivant l'épaisseur de la plaque et la puissance du laser. L'apport d'énergie se faisant sur une surface de quelques dixièmes de mm<sup>2</sup>.

En conclusion, on peut dire qu'en termes de qualité de découpe, le laser présente de nombreux avantages: une très bonne précision, une ZAT très étroite et une grande diversité de matériaux traitables. Mais en termes de pollution, les installations laser font un bruit important (autour de 100dBA à un mètre de l'installation) et dégagent beaucoup de rayonnement [2]. Des solutions peu pratiques pour éviter cela, consistent à encapsuler la tête laser ou à séparer l'utilisateur de l'endroit où se fait la découpe. Ceci a pour conséquence d'augmenter le coût de l'installation, d'abaisser la productivité et donc d'accroître le coût de la découpe. Des solutions individuelles peuvent aussi être mises en place. Le prix d'une installation complète se situe aux alentours de 500 kilo-euros. Cela représente un investissement de départ lourd pour une entreprise. De plus les installations laser restent tout de même relativement fragiles.

## 2. La découpe laser et ses variantes

Nous distinguons trois variantes de ce procédé:

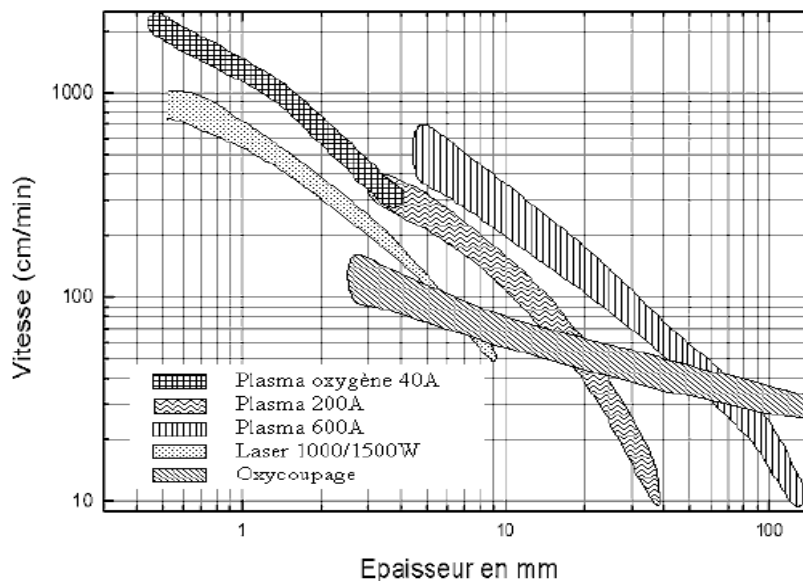
- Oxycoupage laser
- Découpe laser par fusion
- Découpe laser par évaporation ou sublimation

**2.1 Oxycoupage laser:** Le matériau est porté à la température d'inflammation par le laser, l'oxygène introduit provoque la combustion du métal et expulse la matière fondue. Cette combustion génère un supplément d'énergie qui accélère le processus de découpe.

**2.2 Découpe laser par fusion:** Le faisceau laser localisé fait fondre directement le matériau qui est expulsé par un jet de gaz neutre ou inerte. Ce procédé s'impose de plus en plus pour la découpe des aciers inox sans formation d'oxydes.

**2.3 Découpe laser par évaporation ou sublimation:** Le matériau est vaporisé au point de focalisation du faisceau laser. Un gaz inerte, comme l'azote ou l'argon, chasse les produits de découpe hors de la saignée. Ce procédé est utilisé pour les matériaux n'ayant pas de phase liquide tels que le papier, le bois, certaines matières synthétiques, les textiles et la céramique.

**Gammes de fonctionnement des trois procédés thermiques :** La figure 4 présente les différentes gammes de fonctionnement pour les procédés thermiques déjà cités. On peut noter que la découpe plasma sous oxygène se place comme un concurrent direct de la découpe laser. En effet, ces deux techniques opèrent dans la même plage d'épaisseur, la découpe sous oxygène étant deux à trois fois plus rapide. De plus son coût de revient et d'entretien est bien inférieur à celui d'une installation laser.



**Figure 4.** Vitesse de découpe suivant les épaisseurs pour les procédés de découpe présentés.

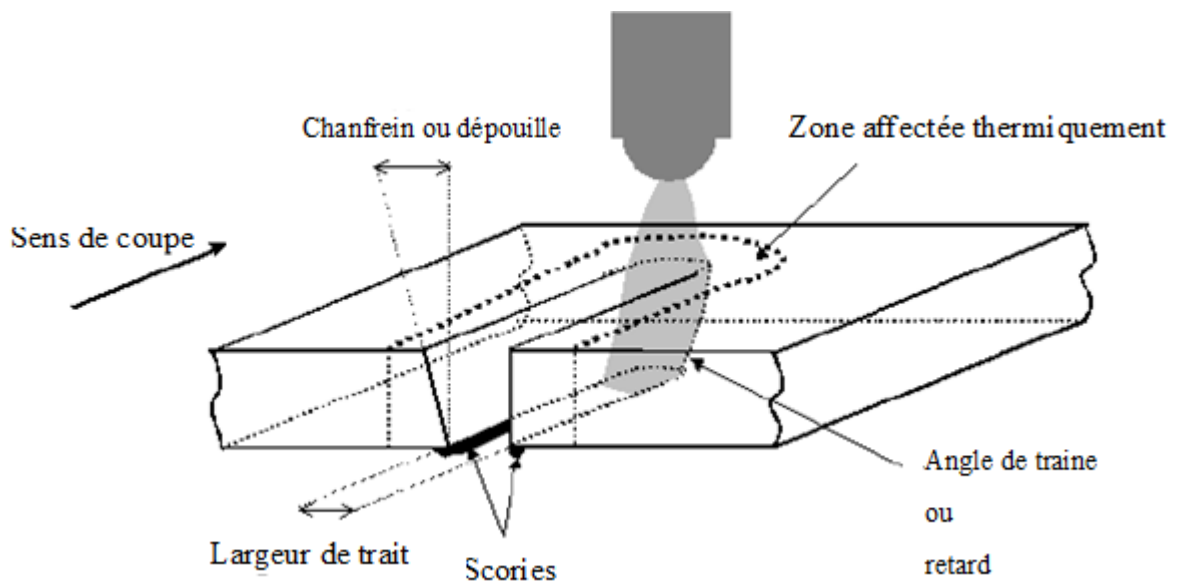
### 3. Qualités des découpes et critères de choix

Après avoir présenté le fonctionnement des trois procédés thermiques, nous nous intéressons dans ce paragraphe à la qualité de découpe et de manière plus générale, aux critères de choix par l'utilisateur d'une technique ou d'une autre.

Cette qualité peut se définir par rapport aux défauts rencontrés sur les faces découpées c'est-à-dire :

- Les bavures formées par le métal fondu puis re-solidifiées sous la plaque,
- de la dépouille (ou chanfrein), pour quantifier cette dépouille, on mesure l'angle formé par le bord et la normale à la surface de la pièce,
- la largeur de saignée, celle-ci représente la quantité de matière enlevée par le procédé et donc la précision d'une découpe. Plus cette largeur est fine plus c'est précis,
- des stries, caractérisées par leur fréquence spatiale et leur profondeur (rugosité),
- de la zone affectée thermiquement (ZAT) et qui caractérise le gradient thermique subit par le matériau. En effet le bord de la coupe définit l'isotherme de fusion, et la limite de la ZAT représente l'isotherme à partir de laquelle la structure du matériau n'est plus modifiée par le flux thermique.

Le paragraphe suivant montre les diverses grandeurs et termes techniques utilisés pour une découpe thermique ainsi que les définitions de chaque terme.



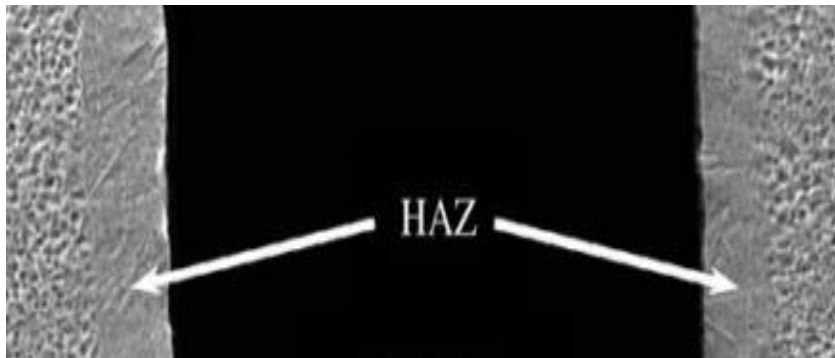
**Figure 5.** Définition de diverses grandeurs et termes techniques utilisés pour la découpe thermique.

- **Retard** : Ce terme désigne l'angle créé par l'outil sur le front de fusion du métal. Cet angle dépend principalement de la vitesse de déplacement de l'outil et du flux thermique reçu par la pièce. Ramakrishna [3] a étudié pour une torche à plasma les retards engendrés par différentes vitesses de découpe. Pour des vitesses de torches trop élevées, il a montré que la puissance fournie à la pièce à découper est réduite et que cela entraîne un retard sur le front de fusion. Si par contre, la vitesse est trop faible, un retard est aussi créé mais dans l'autre sens, la courbure du front de fusion s'inversant alors vers l'avant. Pour la séparation de plaque de métal en deux, le retard a peu d'incidence sur la qualité de la découpe. Par contre, pour des applications plus complexes comme la découpe de formes

en deux dimensions, il sera primordial de bien adapter la vitesse de l'outil pour éviter au maximum une courbure positive ou négative du front de fusion.

- **ZAT** : La largeur de la zone affectée thermiquement comme la largeur de la saignée, vont dépendre de l'épaisseur de la plaque et de sa nature, mais également du flux de chaleur apporté par le procédé et naturellement du temps d'exposition à ce flux thermique. D'autres paramètres, comme la pression du gaz et la distance entre la tuyère et la pièce à découper, influent sur la ZAT [4-7].

En effet, lors de la découpe, une certaine quantité d'énergie est fournie au métal par l'outil. Suivant les cas, ce flux thermique peut modifier la structure du métal autour de la saignée sur plusieurs millimètres. Par définition, la ZAT représente l'isotherme à partir de laquelle la structure du métal est inchangée. Plus la ZAT est réduite, meilleure est la qualité du produit fini. La ZAT peut être vue comme l'image de l'effet thermique de l'outil sur le matériau. Si elle est étendue, cela traduit le fait que le flux de chaleur s'est propagé profondément dans le matériau entraînant des déformations thermiques indésirables (voir figure 6).



**Figure 6.** Zone affectée thermiquement.

Il est intéressant de noter, par ailleurs, que la taille de cette zone diffère d'une face à l'autre de la plaque.

- **Largeur de trait** : Suivant les procédés, la largeur moyenne de saignée varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres. Cette largeur de trait va jouer sur la précision du procédé. Plus elle sera petite, plus le procédé sera précis et plus l'on pourra découper de petites pièces.

Les largeurs de la saignée et de la ZAT, du fait de leur importance et de leur facilité d'accès, sont bien connues pour les trois techniques de découpe thermique, comme on peut le voir pour l'acier dans le tableau 2.

**Tableau 2** : Comparaison à titre indicatif, de la largeur de saignée et de la ZAT pour les différents types de découpes thermiques d'un acier effectuées dans des conditions opératoires différentes.

	Découpe laser	oxycoupage	Découpe par plasma
Epaisseur (mm)	10	13	13
ZAT (mm)	0.25 à 0.75	6	2.5
Largeur de saignée (mm)	0.4 à 0.6	2	2 à 5

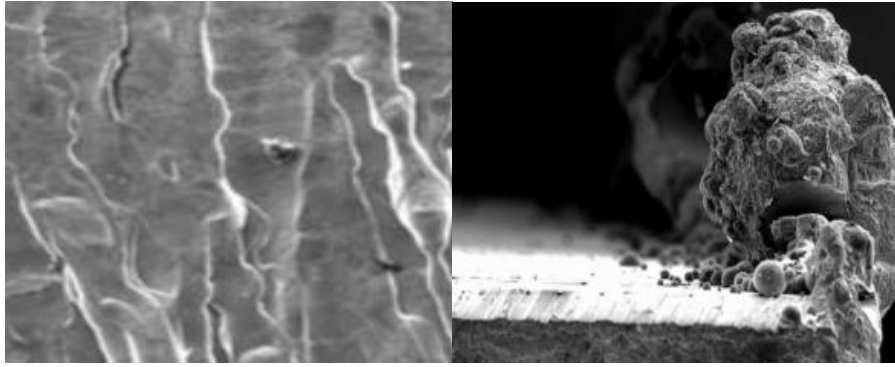
- **Dépouille (ou chanfrein)**: Après une découpe, les deux bords peuvent présenter un défaut de parallélisme nommé dépouille ou chanfrein. C'est donc l'angle que forment les bords de la saignée par rapport à la verticale. Cet angle n'est pas forcément identique à gauche et à droite de la saignée. Il dépend du procédé utilisé, des conditions opératoires (gaz, vortex, débits...), mais aussi de l'épaisseur de la pièce. Une bonne qualité de coupe correspondra à la plus petite dépouille possible (au moins sur un des bords de la saignée). Celle-ci est aussi liée à la vitesse de découpe, qui lorsqu'elle augmente, cela résulte en pratique en un angle positif de dépouille (càd qu'il y a un excès de métal enlevé dans la partie supérieure). L'écoulement du métal liquide contribue, pour des vitesses lentes, à élargir la saignée par diffusion thermique sur la partie inférieure de la plaque, ce qui correspond à une dépouille négative. Une bonne coupe présente en outre une dépouille de moins de 2°. Dans la plupart des cas, quand la saignée se forme, sa largeur en haut et en bas de plaque n'est pas la même.

Compte tenu des différentes constatations expérimentales, on peut dire que la dépouille est influencée par :

- ✓ la composition du matériau, son épaisseur et ses propriétés thermiques,
- ✓ la vitesse de découpe,
- ✓ la nature et le débit du jet de gaz d'assistance.

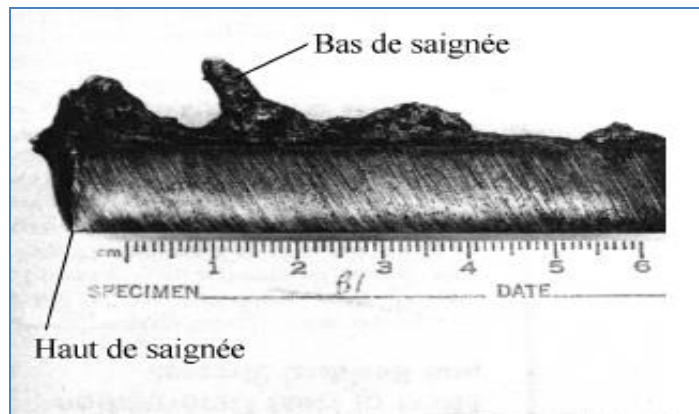
En particulier pour une découpe laser, quand les paramètres de coupe sont bien réglés les deux bords sont sensiblement parallèles.

- **Bavures** : Il y a deux types de bavures, celles dites adhérentes qui nécessite une reprise mécanique pour les enlever et celles, non-adhérentes. La hauteur résiduelle de ces bavures doit être inférieure à 0.1mm pour une bonne qualité de coupe. A faibles vitesses, les bavures ne sont généralement pas adhérentes. En général, une tension superficielle élevée empêche le bon écoulement du métal liquide, il y a donc risque d'apparition de bavures et pour les éliminer il faut augmenter leurs températures.



**Figure 7.** Bavures

- **Scories :** Lors de la fusion du métal le long de la saignée, il arrive souvent que des gouttelettes restent accrochées sous la tôle. Ce sont ces éléments de métal solidifiés sous la plaque et sur les bords de saignée que l'on appelle scories. A titre d'exemple, nous avons représenté sur la figure 8 les scories créés par un plasma d'azote. On peut observer que leur hauteur peut atteindre jusqu'à 1cm. Avec la présence de scories, il est nécessaire de retraiter la pièce après découpe en « ébavant » ses bords. Cette opération entraîne un surcoût qui influencera directement le choix du procédé de découpe.



**Figure 8.** Scories

- **Stries :** Les stries forment un réseau assez régulier de défauts de surface répartis sur les parois de découpe; leur morphologie suggère qu'elles sont engendrées par un phénomène périodique ou pseudo-périodique. Divers auteurs ont donc recherché les mécanismes cycliques ou oscillants, susceptibles d'être responsables de la formation des stries. La littérature explique ce phénomène d'une manière extensive et la similitude entre les réseaux de stries en découpe laser et en découpe plasma d'arc est notable.



**Figure 9.** Stries de découpe

En conclusion, les formations de bavures, de dépouille et de stries semblent être liées aux mêmes paramètres : La composition du matériau et ses propriétés thermiques, la nature du jet de gaz et la vitesse de découpe. Ces paramètres sont interdépendants, et de surcroît, l'apparition d'un des phénomènes peut correspondre à la disparition d'un autre.

Ainsi donc, la qualité de découpe sera jugée suivant les différents critères présentés. Ils ne sont cependant pas les seuls paramètres qui entrent en jeu dans le choix d'un procédé. En effet, le coût de l'installation, des consommables, de la formation du personnel, et celui d'un éventuel retraitement de la pièce après découpe sont d'autres critères importants. La notion de rendement avec la vitesse de découpe est aussi essentielle. Enfin n'oublions pas dans ces critères, les diverses pollutions produites par les procédés parmi lesquelles les fumées dégagées, le rayonnement et le bruit émis par l'outil. L'utilisateur devra donc bien définir ses besoins afin d'optimiser au mieux le rapport (qualité + rendement)/coût de son installation.

## Partie 2

**Revue bibliographique :** La grande vitesse d'exécution et la bonne précision font de la découpe laser un outil très efficace. C'est pour cette raison qu'elle tend à remplacer les méthodes de découpe conventionnelles dans de nombreux procédés industriels. Plusieurs travaux théoriques et expérimentaux ont été réalisés dans le but de bien comprendre ce processus et aussi pour améliorer la qualité de découpe.

Houlcroft fut le premier à réaliser que l'action combinée d'un faisceau laser focalisé, assisté par un jet coaxial d'oxygène, pourrait améliorer la précision et la vitesse des procédés thermiques. Il a aussi démontré l'action « lasante » des molécules de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). La première application apparaît dès 1965, elle a permis d'usiner un perçage de 4,7 mm de diamètre et de 2 mm de profondeur dans du diamant avec un laser à rubis. Cette opération était réalisée en 15 min, alors qu'une application classique prenait 24 heures. C'est ainsi que les industriels mesurèrent l'intérêt du laser, leur objectif principal étant de pouvoir utiliser une machine de découpe travaillant 24h/24h tout en réduisant la main d'œuvre et en augmentant la productivité.

Houlcroft conçut la première tête de découpe pour la découpe de plaques d'acier de 2,5 mm à une vitesse de 1 m/min sous dioxygène avec un laser CO<sub>2</sub> de 300 W. Les premiers résultats de découpe laser furent publiés dans le British Welding Journal par A.B.J. Sullivan et P.T. Houlcroft sous le titre : « Gas-jet laser cutting ». Le signal de départ des applications liées à la transformation des matériaux par l'utilisation d'un faisceau de lumière cohérente, était donné suites aux deux conclusions des articles [8, 9]: « With the development of higher laser powers it should be possible to cut thicker and different materials including non metals. » et «The narrowness of the cut promises a precision not previously obtained with thermal cutting techniques. »

Les lasers ont ainsi intégré le monde de l'industrie et de la recherche avec une vitesse impressionnante et leur technologie a évolué de manière importante puisque les lasers peuvent aujourd'hui atteindre des puissances de l'ordre du pétawatt (10<sup>15</sup> W).

Pendant les années 70, les britanniques, à l'instigation de William Steen qui collabora d'une manière intense avec O'Neill de l'Université de Liverpool, investirent le domaine de la découpe laser. Steen a soutenu son travail de thèse sous la direction de John Powell en 1977. Ces deux auteurs, se sont concentrés sur les méthodes et techniques s'appliquant dans les procédés laser de puissance. En effet, leur ouvrage « laser Material Processing» publié pour la première fois en 1991 et enrichi en 1998 rassemble les applications des lasers de puissance. Ce livre décrit d'une manière approfondie les procédés de soudage, de découpe et de traitement de surface. Il fournit aussi les bases relatives aux cavités laser ainsi qu'à l'optique gaussienne, c'est une excellente introduction aux méthodes et aux techniques appliquant les procédés laser de puissance. Le deuxième ouvrage « CO<sub>2</sub> laser cutting. » rédigé par John Powell et publié en 1993 [10], est une

étude exhaustive de la découpe par faisceau laser CO<sub>2</sub>. Powell est considéré, comme un des spécialistes ayant le plus d'expérience dans ce domaine. Il a passé sept années à étudier, manipuler, réfléchir, innover sur la découpe laser. Le résultat est un livre tout à fait abordable, relativement simple, utilisant une étude théorique complexe mais avec une approche simplifiée. Dans ce livre, Powell explique de façon claire la plupart des procédés relatifs à l'alignement laser, la découpe pulsée, l'influence des propriétés métallurgiques et de la vitesse de découpe. C'est un livre que les utilisateurs (dirigeants et techniciens) de lasers industriels doivent consulter. On peut dire que ces trois auteurs (Steen, O'Neill et Powell) sont des références incontournables en Grande Bretagne.

En Russie, les travaux de Golubev ont été inspirés par ceux de Kovalenko malheureusement publiés en russe, en particulier un livre traitant de la théorie de la découpe laser [11]. Vient ensuite Niziev [12] de l'Académie des Sciences Russes qui publie en 1993 : « Theory of CW Laser Beam Cutting ». Dans cet article, partant du constat qu'aucun modèle global n'existe alors, il décide de mettre en place une méthode de résolution perturbative sensée fournir non seulement le profil 2D de la saignée de découpe mais également la forme des stries générées durant le processus. Aucune validation expérimentale n'est cependant fournie.

Plusieurs articles ont été publiés par Golubev à partir de 1994, [13-15]. Il se focalise sur l'aspect non stationnaire des procédés laser tels que le soudage ou la découpe. Il développe son travail autour d'instabilités présentes dans la phase de métal liquide. Kovalev *et al.* [16], ont étudié les caractéristiques d'un écoulement de gaz subsonique théoriquement et expérimentalement dans des canaux géométriquement similaires à ceux d'une saignée de découpe laser. Ils ont visualisé de petits tourbillons juste à l'entrée du canal ainsi que de gros tourbillons à sa sortie. Bien que la plupart des travaux de chercheurs russes ne soient pas souvent enrichis de comparaisons expérimentales, les développements théoriques proposés permettent d'augmenter notre capacité de réflexion sur les problèmes physiques soulevés.

Vicanek et Simon [17] se sont intéressés aux forces qui s'exercent par le jet de gaz sur le film métallique. Dans leur résolution, ils ont appliqué la théorie de la couche limite au film métallique obtenu [18] et ont fini par déduire l'influence de la turbulence du jet de gaz sur celle-ci. Ces auteurs ont montré qu'il existe deux forces qui agissent sur ce film, l'une due aux gradients de pression et l'autre aux contraintes de cisaillement. Ils ont conclu aussi que ces deux forces sont du même ordre de grandeur et contribuent à son évacuation. Ces deux forces augmentent avec l'élévation de la vitesse du jet de gaz et avec l'angle d'inclinaison du front de découpe.

Ils ont aussi analysé le développement d'une petite perturbation qui est ajoutée à un écoulement de liquide dans un régime stationnaire. Pour un écoulement contrôlé par un gradient de pression du jet de gaz, ils ont conclu qu'une petite perturbation peut être amplifiée.

Quant aux travaux français traitant des processus fondamentaux entrant dans la découpe de métaux par laser, ils ne sont pas nombreux. Nous pouvons citer l'ouvrage du CETIM [19], dans lequel l'étude de la découpe laser occupe une partie relativement importante. Cet ouvrage fournit les grandes lignes de fonctionnement du processus de découpe mais aucun modèle n'est présenté. La thèse de C. Mas sous la direction de R. Fabbro [20], ainsi que leur article [21] aide à la compréhension du procédé de découpe des métaux par laser et fournit une approche physique

consistante de l'ensemble des phénomènes physiques qui interviennent lorsqu'un échantillon de métal est soumis à une irradiation laser intense. Dans leur modélisation, Ils ont tenu compte des éjections latérales. Ils ont déduit qu'aux faibles vitesses, cas où les températures de surface rencontrées sont relativement basses, la proportion en masse et en puissance de ces éjections latérales peut être négligée, à grande vitesse, elle devient relativement importante. La thèse de Hirano toujours sous la direction de R. Fabbro [22], avait quant à elle pour objectif l'étude du mécanisme de génération des stries habituellement observées lors de la découpe laser de l'acier, avec un gaz inerte. Ils ont conclu que les stries sont provoquées par les instabilités de l'écoulement de liquide qui apparaissent dans la partie centrale et sur le côté de la saignée [23]. Ils rapportèrent que la génération intermittente de « humps » sur la partie centrale et d'accumulations de liquide sur les bords de la saignée est la cause fondamentale de l'instabilité de l'écoulement de liquide. Ils conclurent que cette génération intermittente résulte de la force de la tension superficielle, qui tend à maintenir une gouttelette de métal fondu à la surface supérieure de l'échantillon, en s'opposant à la pression dynamique du gaz d'assistance, tant que la taille de la gouttelette est petite. Ils ont observé que les stries latérales sont générées périodiquement et résultent du déplacement vertical vers le bas de ces accumulations de liquide produites le long des côtés de la saignée. Ils ont aussi conclu que l'angle d'inclinaison du front avant est le paramètre déterminant de la stabilité de l'écoulement de liquide et de la qualité finale des stries.

De même qu'une thèse relative à la modélisation thermo-métallurgique d'Abdulhadi [24, 25] du processus consiste en l'étude de la zone affectée thermiquement (ZAT) et des transformations métallurgiques des aciers soumis à une irradiation laser. Son modèle concorde avec les résultats obtenus expérimentalement. Abdulhadi montre que le calcul de la largeur de la ZAT dépend faiblement de la variation des paramètres suivants: absorptivité, capacité calorifique du matériau, épaisseur de l'échantillon, angle d'inclinaison du front de découpe, angle d'incidence du faisceau, conductivité thermique et masse volumique. Son travail a été critiqué dans la thèse de Mas Cedric, qui affirme que certains paramètres ont de faibles influences, mais d'autres, au contraire sont à manier avec beaucoup de précaution, en particulier la valeur de l'absorptivité. A juste titre, puisque ce domaine a été peu étudié, Abdulhadi développe un modèle mathématique lui permettant de déduire l'extension spatiale de cette zone. Son modèle s'accorde très bien avec les expériences. Cependant, on a du mal à entrevoir son «auto-consistance». D'après lui, le calcul de la ZAT nécessite le calcul préalable de l'épaisseur du film liquide. Ce calcul, quant à lui, s'opère en écrivant les équations bilan habituelles et implique donc une approche cohérente de l'ensemble des processus élémentaires qui agissent au sein de la découpe laser.

En ce qui concerne les travaux américains qui ne sont pas nombreux, nous citons Lawrence Yao qui était enseignant à l'Université de Columbia à New York, qui a produit un travail intéressant sur la modélisation de la découpe laser par le biais de l'un de ses étudiants, Kai Chen. Ils ont modélisé les effets de l'action de l'oxygène dans la découpe des aciers standards [26], ont également proposé une approche du phénomène de la génération des stries de découpe [27] et ont étudié l'instabilité de l'écoulement basé sur le mécanisme d'une perturbation de la contrainte de cisaillement issue du jet. Chen [28], a aussi modélisé les effets du gaz d'assistance (oxygène) dans la découpe des aciers. Tsai de l'université du Missouri travaillait depuis plusieurs années

(années 2000) sur les problèmes de simulation d'interaction laser-matière comme le soudage ou la découpe. Son travail est essentiellement d'ordre numérique. Il a modélisé les échanges thermiques entrant dans ces deux processus.

Quant à la littérature allemande, on peut citer Schulz qui est impliqué dans le monde des technologies laser depuis plus de 20 ans. Il est l'un des instigateurs de la compréhension approfondie du procédé de découpe laser. On trouve pour la première fois un modèle de découpe complet et auto-consistant présenté dans son article « On laser fusion cutting : a closed formulation of the process. » [29]. Schulz *et al.* [30] ont analysé un modèle dynamique des procédés de fusion et d'éjection du liquide. Ils ont finalement conclu que le front avant de la saignée et la couche liquide dans ce système couplé sont intrinsèquement instables et ont proposé un paramètre qui pilote le degré de cette instabilité. Une approche qui consiste à fermer le problème par l'intermédiaire d'un ensemble d'équations couplées a été appliquée. Ce type de résolution est largement utilisé dans tous les problèmes hydrodynamiques depuis fort longtemps. Il fallait simplement faire la translation vers le cas de la découpe laser. Ce modèle permet de calculer à partir des données d'entrée (vitesse de déplacement, puissance laser, épaisseur de la plaque à découper, vitesse du gaz de découpe, rayon du faisceau laser ou encore mode du laser), l'épaisseur du bain liquide, la température de surface, l'angle moyen d'inclinaison du front avant ou encore le rayon de la saignée. La méthode employée par Schulz est très puissante, malheureusement aucune comparaison expérimentale n'est fournie. Dans ses travaux récents, l'effort est porté sur une approche dynamique du processus en vue de modéliser l'apparition d'instabilités donnant naissance aux stries de découpe. Le modèle initial a donc été approfondi, explorant des domaines plus complexes tels que la réduction de la dimension de l'espace de configuration initial (dimension infinie) vers une dimension finie, dû à la nature dissipative du problème global (systèmes dynamiques et approche non-linéaire) [31-33], et la résolution par la méthode variationnelle des équations réduites du problème de la surface libre (interface liquide-gaz). L'approche suivie dans ce travail est relativement difficile. Il faut cependant mentionner que les efforts qui ont été produits par cette équipe de l'ILT (Schulz, Michel, Kostykin, Niessen), en vue de donner une explication toujours plus proche de la réalité expérimentale, restent aujourd'hui les plus aboutis.

Un autre travail fut présenté en 1995 par D. Petring [34]. Il est basé sur une étude à trois dimensions de la découpe sous un gaz neutre (azote). Le travail de Petring qui était le chef du département « Soudage et Modélisation », reste une référence mondiale dans le domaine de la découpe laser. Une méthode quasi-identique à celle de Schulz est utilisée afin de résoudre le système d'équations bilan couplées. Ce modèle est tridimensionnel et s'applique à la découpe sous gaz inerte ou neutre (azote). L'aboutissement de ce travail a été la conception du code CALCut (Computer Aided Laser Cutting). Les paramètres d'entrée sont: type et épaisseur pour le matériau, pour le laser, sa longueur d'onde, son mode, son facteur de qualité, la nature de la polarisation, la dimension du faisceau naturel en entrée sur la lentille, la puissance incidente, pour le gaz d'assistance sa pression initiale, pour le système optique, le type de lentille, la distance focale et la vitesse de découpe. Les équations du modèle sont résolues dans une couronne élémentaire représentant un volume de contrôle fluide (avec discrétisation de la géométrie). La

vitesse du gaz en entrée dans la saignée est calculée ainsi que les caractéristiques du faisceau laser au niveau de la zone d'interaction. Pour chaque couronne élémentaire, un angle d'inclinaison local du front de découpe et un rayon de la saignée sont fixés. Les équations sont résolues par itérations successives sur les valeurs locales de l'épaisseur du film métallique et de la température de surface. Une évaluation de la puissance nécessaire sur les flancs de découpe est effectuée. Vient alors le calcul de la puissance laser absorbée, intégrée sur la couronne. Si le bilan de puissance sur les flancs de découpe n'est pas satisfait, alors il y a itération sur le rayon local de la saignée. Lorsque le « bon » rayon est atteint, si l'ensemble des bilans de masse et de puissance ne sont pas satisfaits alors on itère sur l'angle d'inclinaison local du front avant de découpe. Lorsque tous les bilans sont satisfaits pour une couronne, on passe à la suivante, jusqu'à l'obtention de la forme complète de la saignée.

Petring et Schulz s'opposent sur un point important lié à l'éjection latérale de fluide pendant la découpe. Dans le modèle de Petring, le bilan de puissance effectué sur les flancs de découpe est bâti autour de l'idée qu'une partie du fluide est en mouvement tangentiellement à la vitesse de découpe (éjection latérale). Pour Schulz, de telles éjections ne se produisent pas.

Par ailleurs Alexander Kaplan professeur à l'université de Vienne en Autriche, publiait régulièrement des articles traitant des applications fondamentales des lasers de puissance: soudage, découpe et plus récemment prototypage laser. Initialement, un modèle relatif au soudage laser (1994) [35], puis un article axé sur la découpe où il fournit un modèle complet de la découpe laser. L'année 96 vit la publication dans le Journal of Applied Physics, de son article analytique : « An analytical model of metal cutting with a laser beam » [36]. Son article de 1996 aborde le problème dans son ensemble, en utilisant comme d'habitude l'ensemble des équations de conservation (masse, énergie). Dans le cas d'une découpe sous gaz réactif (oxygène), il prend également en considération les réactions d'oxydation. Son modèle tridimensionnel fonctionne sur le principe d'un volume de contrôle unique, où le front de découpe présente un seul angle d'inclinaison moyen, et où le rayon de la saignée est un paramètre de sortie. Il calcule la diffusion de la chaleur pour une source cylindrique en déplacement à la vitesse de découpe et égalise les flux diffusifs axiaux et transversaux avec le flux de chaleur provenant de l'absorption de l'onde laser. Cette approche a le mérite d'être particulièrement claire. On ne retrouve pas de telles explications dans les travaux de Schulz et Petring. Les résultats obtenus fournissent des valeurs de paramètres de sortie, comme l'épaisseur du film métallique, la vitesse d'éjection longitudinale du fluide, l'angle d'inclinaison moyen du front de découpe et la température de surface. Ces résultats sont en accord avec ceux de Petring. Il a aussi travaillé sur le procédé de rechargement laser [37]. Kaplan est devenu une personnalité dans la communauté scientifique des « laseristes ». Quant à l'étude de l'écoulement gazeux, différentes modélisations numériques et semi-analytiques ont été développées. Parmi ces travaux, il existe ceux qui ont suivi une approche purement numérique à l'aide de logiciels de calculs par éléments finis tels que Duan, Horizawa et Chen [38-40]. La résolution des équations de Navier-Stokes a été utilisée pour le cas d'écoulements compressibles. L'équipe de Schulz a aussi travaillé sur cette thématique. L'étude de l'influence de la forme de la buse sur le comportement dynamique de l'écoulement gazeux a été menée par Fieret [41]. Des expériences de striescopie permettant d'observer la structure des

chocs au cœur de la saignée ont également été faites par Horizawa et Duan [42,43]. Une étude très instructive sur les conditions expérimentales requises permettant d'optimiser la qualité de la découpe en ajustant la pression initiale du jet de gaz et la distance buse-échantillon a été menée par Chen et Yao, [44].

Récemment, plusieurs travaux liés aux caractéristiques du front de découpe, à l'apparition du point de séparation, aux instabilités et à l'effet de la longueur d'onde du faisceau laser sur la découpe ont été développés. L'étude de l'hydrodynamique du métal fondu durant le processus de découpe laser assistée avec un jet de gaz inerte est d'une grande importance pour le contrôle de la qualité de la surface découpée. Dans leur travail, Tamsaout *et al.* [45] ont développé un modèle numérique pour le calcul du comportement tridimensionnel de l'écoulement d'un métal fondu sur le front de découpe. La résolution numérique a été faite avec le logiciel Fluent. Cet écoulement révèle des oscillations à l'interface film / gaz qui démontrent l'apparition de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz. Ils ont démontré que cette instabilité dépend de la vitesse de découpe et de celle du jet de gaz pris dans un régime laminaire.

Chen *et al.* [46], ont étudié la découpe d'un alliage d'aluminium avec un laser à fibre. Il a été constaté que l'augmentation de la température au front de découpe réduit la dimension des scories ainsi que la rugosité des stries. Une qualité de découpe acceptable a été obtenue pour une gamme de température variant entre 1800~1950°C. En outre, le mécanisme de formation de ses stries et scories a été lié au refroidissement du métal fondu.

Un second travail récent est celui de Zhang *et al.* [47], qui consiste en l'étude d'une découpe assistée avec un jet de gaz d'oxygène. L'oxygène fournit non seulement une énergie supplémentaire à la découpe mais aussi contribue à l'évacuation du métal fondu. La séparation de l'écoulement à l'intérieur de la saignée est l'un des problèmes principaux qui détériorent la qualité de découpe, en particulier des pièces métalliques épaisses. Cette séparation affaiblit de manière significative la contrainte de cisaillement du jet et ceci mène à une variation du gradient de pression le long du front de découpe. Dans ce papier un modèle de saignée est mis en place de telle sorte que ce point de séparation puisse être observé. La distance d'impasse, la pression à l'entrée, l'angle d'inclinaison et la largeur de saignée sont prises comme des variables dans le but d'arriver à visualiser ce point. En se basant sur la théorie dynamique des gaz, l'effet des paramètres cités a été discuté largement dans cet article. Il a été donc démontré que la largeur de la saignée et l'inclinaison de la tuyère sont des facteurs clés pour l'apparition de ce point. Par contre, ce dernier a tendance à disparaître en augmentant la largeur de saignée, dans leur cas de 1 à 3mm. Il a été aussi observé qu'avec l'élévation de la pression du jet de gaz que ce point se déplace vers le bas de la saignée.

Enfin, Amara *et al.* [48] ont développé une étude sur la découpe laser des métaux assistée avec un jet de gaz. Leur objectif principal est l'étude de l'influence de la longueur d'onde sur la formation des stries. Le logiciel Fluent basé sur la méthode des volumes finis a été utilisé pour la résolution numérique tridimensionnelle du problème. Le suivi des interfaces liquide/gaz a été réalisé par la mise en œuvre de la méthode VOF (Volume Of Fluid). Une approche enthalpique a été utilisée pour prendre en compte les phénomènes de fusion et de re-solidification. Les résultats obtenus ont démontré que la longueur d'onde utilisée peut jouer un rôle important dans la formation des

stries. Ils ont conclu qu'une meilleure qualité de découpe a été observée pour une grande longueur d'onde. Leurs résultats sont en bon accord avec ceux trouvés expérimentalement. Après cette présentation sommaire du processus de découpe laser et des principaux travaux qui lui ont été consacrés, nous allons dans la suite aborder la partie liée à l'interaction laser-matière et aux principaux lasers généralement utilisés durant ce processus.

## ***CHAPITRE 2***

### ***LASERS & INTERACTION LASER-MATIÈRE***

# 1. Les lasers

## 1.1 Historique des lasers

Le développement de la technologie laser vient d'entrer dans sa sixième décennie. Cela fait plus de cinquante années que les ingénieurs et les chercheurs se penchent sur les développements et les applications relatives à l'utilisation des sources de lumière cohérente.

En 1917, Albert Einstein fut le premier à décrire le concept de « Laser » comme acronyme de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » soit, en français, amplification de la lumière par émission stimulée de radiations. Albert Einstein a pu démontré la possibilité d'obtenir une émission stimulée de photons à partir d'un matériau électroniquement excité [49]. Les caractéristiques bien particulières de ce type de rayonnement ainsi que ses interactions avec la matière en ont fait un outil précieux notamment en industrie et en médecine.

Il faudra ensuite attendre 1950 pour voir une avancée concrète, avec la découverte du pompage optique par le physicien français Alfred Kastler (Prix Nobel de Physique en 1966) [50], qu'il expérimentera et validera avec succès deux ans plus tard avec Bossel et Winter [51]. En 1953 le premier MASER « Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation » à ammoniac, délivrant un rayonnement à des longueurs d'onde situées dans le domaine des microsecondes, a été conçu par Gordon, Zeiger et Townes [52]. Bassov, Prokhorov et Townes contribuèrent à adapter ces théories dans le domaine du visible [53]. Et ce n'est qu'en 1964 que ces chercheurs partagent le Prix Nobel de Physique pour leurs travaux fondamentaux dans le domaine de l'électronique quantique, qui mènent à la construction d'oscillateurs et d'amplificateurs basés sur le principe du Maser-Laser.

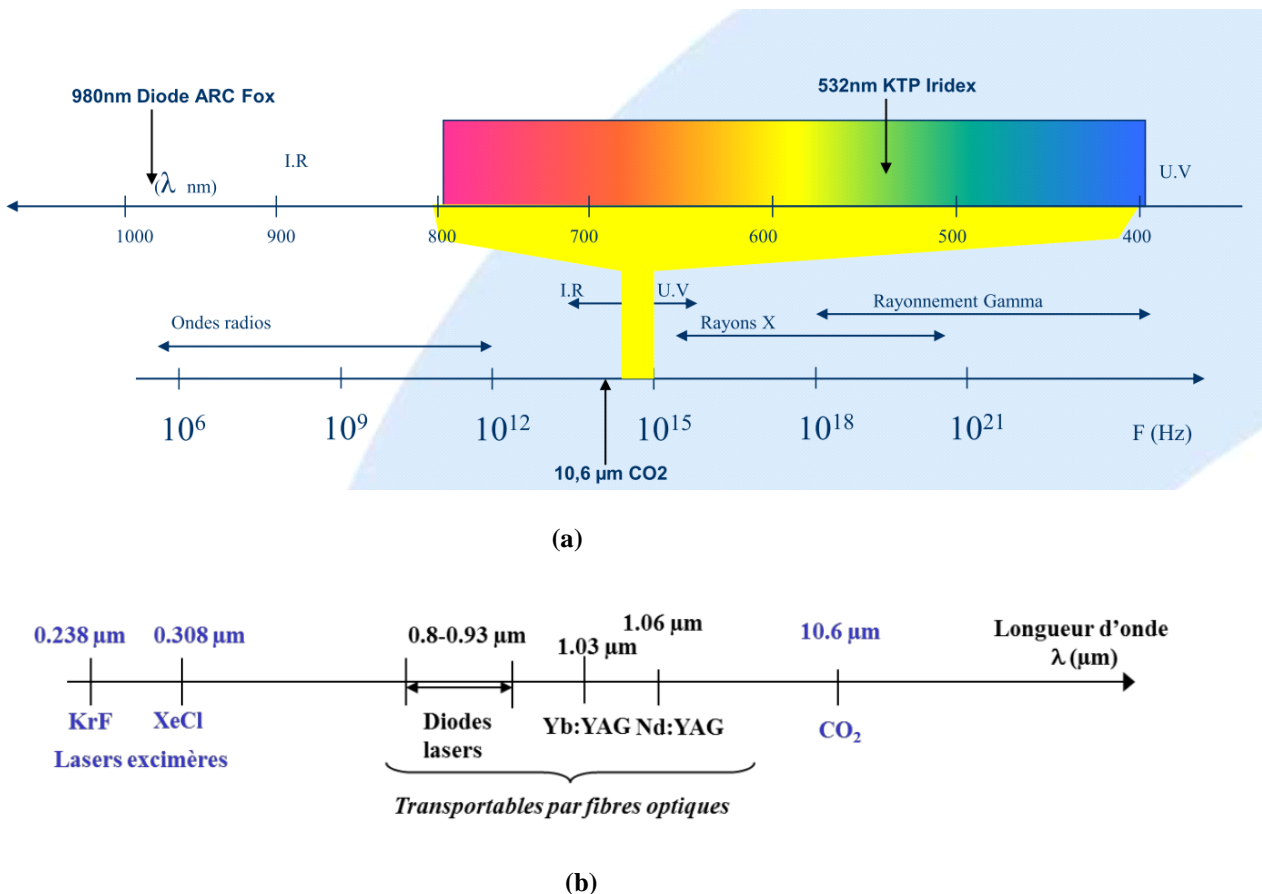
Pourtant c'est en 1960 que le physicien américain Théodore Maiman obtient pour la première fois une émission laser au moyen d'un cristal de rubis dans les laboratoires Hughes [54], pour lequel il n'obtint aucune distinction en reconnaissance à son invention. Ce premier laser solide se caractérisait par ses dimensions réduites qui ont été possible de par l'idée de Maiman d'entourer le barreau (le rubis) d'un flash héliocoïdal pour créer la source lumineuse de pompage. Un an plus tard, Ali Javan met au point un laser à gaz (hélium néon) [55] qui amenait les atomes à un état excité à partir d'un pompage par décharge électrique. Le premier laser à liquide fut mis au point en 1966 par Peter Sorokin [56]. Ainsi avant la fin des années 60, plusieurs lasers furent mis au point, où le milieu actif (amplificateur) pouvait être dans un des trois états de la matière (solide, gaz, liquide), excités par un flash lumineux ou par décharges électriques.

Les premiers lasers étaient des outils encombrants et coûteux et cela rendait en pratique leur utilisation irréalisable. Cependant durant les dernières décennies, les avancées technologiques ont permis l'apparition de lasers plus compacts, plus réduits, plus pratiques et portables dont l'acquisition est devenue économiquement abordable pour les utilisateurs notamment en médical (hôpitaux, cabinets privés,...), dans l'industrie (automobile, aéronautique,...), dans la défense

(missiles guidés par laser embarqué, télémétrie,...), dans le grand public (lecteurs CD/DVD, pointeurs, spectacles,...).

## 1.2 La lumière, la lumière laser et ses principaux composants

**La lumière** est produite par une source lumineuse thermique normale, par exemple le soleil ou une ampoule électrique est constituée de vibrations électromagnétiques à plusieurs longueurs d'ondes émises d'une manière complètement aléatoire. Ces longueurs d'ondes sont étendues sur des spectres de lumière du visible et de l'invisible. L'œil humain peut percevoir uniquement les ondes électromagnétiques comprises entre 380 nm (violet) et 780 nm (rouge). Au-delà de la lumière du visible, existent le domaine de l'infrarouge (> 800 nm) et celui de l'ultraviolet (< 400 nm), (voir Figure 10).



**Figure 10.** (a) Spectre électromagnétique et longueurs d'ondes associées. (b) : Différents types de lasers et longueurs d'onde associées (en bleu : lasers à gaz, en noir : lasers solides) [57].

Les ondes électromagnétiques sont constituées de photons qui n'ont ni la même direction, ni la même phase, ni la même polarisation. Ces photons sont des « paquets » d'énergie élémentaires ou quanta de rayonnement électromagnétique qui sont échangés lors de l'absorption ou de l'émission de lumière par la matière. L'émission peut être soit spontanée ou stimulée.

Dans ce qui suit nous allons nous intéresser à la lumière laser.

**La Lumière laser** est due à l'émission stimulée qui est à la base du fonctionnement des lasers. Il s'agit d'un effet inverse à celui de l'absorption. Il faut donc exciter les électrons pour que la couche de niveau électrique la plus élevée comporte plus d'électrons que la couche énergétique inférieure, ce qui est contraire à l'équilibre naturel de l'atome mais permet ainsi de posséder une «réserve» d'énergie qui va permettre l'amplification, c'est-à-dire l'émission d'un nombre de photons supérieur au nombre qui arrive. Un laser est donc fondamentalement un amplificateur de lumière (fonctionnant grâce à l'émission stimulée).

Précisons, tout d'abord qu'une référence incontournable concernant la théorie des lasers a été publiée par A.E. Siegman [58].

Les lasers sont appelés du nom de leur milieu actif, ce dernier pouvant être solide, liquide ou gazeux. C'est le milieu actif qui impose la longueur d'onde, donc la couleur du faisceau laser.

Gaz :  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Kr}^+$ , HeNe,  $\text{CO}_2$ , Excimère

Liquide : Colorants

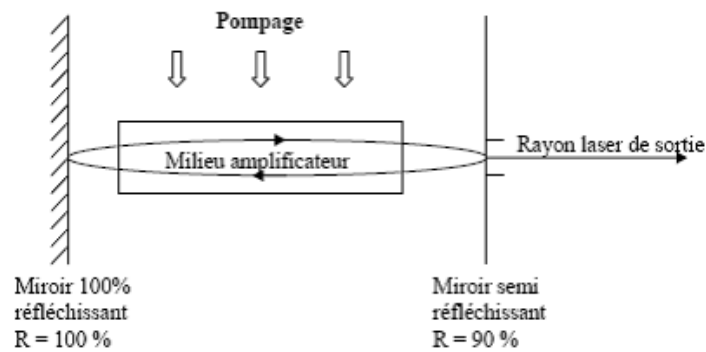
Solide : Nd-YAG, Er-YAG, Rubis, Saphir, Alexandrite, Semi-conducteur.

### Les principaux composants

Les trois composants suivants sont nécessaires pour obtenir l'émission d'une lumière laser :

- **Le milieu laser:** est un milieu qui possède des niveaux d'énergie discrets, qui s'excitent et qui possèdent la capacité de stocker l'énergie reçue de l'extérieur. Une transition entre au moins deux niveaux d'énergie auxquels la radiation laser provient, est nécessaire. Le milieu peut être solide, liquide ou gazeux.
- **La source de pompage:** est une source d'énergie capable de porter les atomes, molécules, électrons ou ions à un état exigé d'excitation; cette source peut être optique ou électrique. Pour les lasers à gaz on utilise le pompage électrique.
- **Le résonateur (cavité résonante) :** est constitué de deux miroirs parallèles dont l'un est totalement réfléchissant, et l'autre semi réfléchissant. Ils renvoient l'onde électromagnétique (photons) qui effectue des va-et-vient, en traversant le milieu actif.

La source de pompage excite le milieu laser, et les éléments associés externes (par exemple miroirs) forment un résonateur où l'oscillation laser peut avoir lieu (voir figure 11).

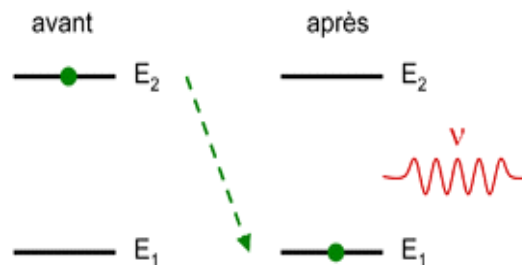


**Figure 11.** Schéma simplifié du fonctionnement du laser

Le résonateur est le siège des mécanismes suivants :

- **Inversion de la population :** La source de pompage produit l'inversion de population nécessaire. Il en résulte que dans le milieu laser, il y a plus d'atomes dans le plus haut niveau d'énergie (dans un état excité) que dans le bas niveau d'énergie.

**Émission spontanée et stimulée:** Pour l'émission spontanée, les atomes dans le milieu actif atteignent le niveau d'énergie inférieur. Dans ce phénomène, la désexcitation de l'atome se produit de façon spontanée et s'accompagne de l'émission d'un photon (pour une seule désexcitation) dans une direction aléatoire.



**Figure 12.** Émission spontanée.

Dans le processus d'émission stimulée, quand un photon qui a exactement la différence d'énergie ( $E_2 - E_1$ ) entre deux états  $E_1$  et  $E_2$  passe à proximité d'un électron dans l'état  $E_2$ , ce dernier peut faciliter la transition de l'électron vers l'état  $E_1$ . Cette transition est accompagnée d'une émission d'un nouveau photon d'énergie ( $E_2 - E_1$ ). Ces deux photons sont identiques.

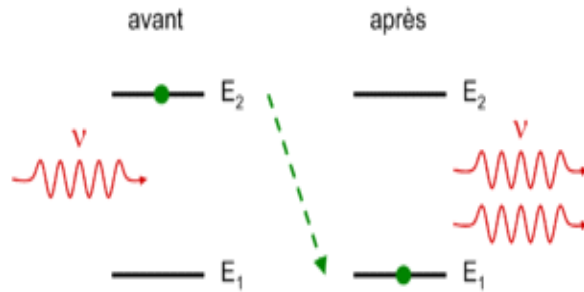


Figure 13. Émission stimulée.

- **Émission spontanée amplifiée dans une direction préférée** : Si le milieu laser est renfermé dans un espace cylindrique, l'émission spontanée se produit horizontalement le long de l'axe optique. Si maintenant les miroirs sont placés dans les cotés latéraux du milieu laser, les photons se déplaçant parallèlement à l'axe cylindrique restent dans le milieu laser pour une longue période, stimulant les atomes voisins. Les deux miroirs forment le résonateur : les ondes électromagnétiques des photons forment des ondes stationnaires dans le résonateur; et l'oscillation laser se produit.

Pour que la lumière laser soit exploitée comme lumière cohérente, directionnelle et monochromatique (la monochromaticité est due au fait que les photons émis sont identiques en terme de quanta d'énergie puisque  $E=h\nu=hc/\lambda$ , où  $\lambda$  représente la longueur d'onde, un des deux miroirs doit être transparent partiellement pour laisser sortir le laser sous forme d'un faisceau très directif. Les miroirs doivent donc avoir une certaine courbure pour empêcher le faisceau laser de sortir du résonateur.

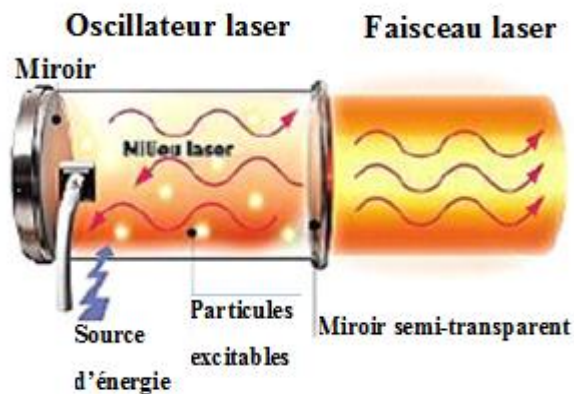


Figure 14. Schéma de principe d'un laser

### 1.3 Caractéristiques de la lumière laser

Les propriétés qui distinguent la lumière laser des autres sources de lumières sont :

- **La monochromaticité** (une seule longueur d'onde) : En général le laser émet dans une seule longueur d'onde. Dans ce cas on parle de pureté spectrale. Une seule longueur d'onde, unique pour chaque type de laser. En fait, certains lasers peuvent émettre dans plusieurs couleurs séparées les unes des autres (lasers à colorant par exemple).
- **Le quasi-parallélisme (monodirectionnelle)**: Du fait de la conception technique des lasers, le faisceau est très peu divergent (faible angle de divergence des photons). Ceci permet de le focaliser de façon très précise en un point très petit (le point focal) pour apporter une grande énergie par unité de surface grâce à des lentilles convergentes.
- **La cohérence** (photons en phase, dans le temps et l'espace) : Elle est à la fois temporelle et spatiale, c'est-à-dire qu'elle est organisée et très directive. La cohérence est un terme décrivant un état dans lequel les ondes électromagnétiques oscillent en phase, c.-à-d. "synchronisés". La cohérence temporelle est liée au milieu et à la cavité laser. Ceci correspond au fait que les photons ont la même longueur d'onde, même direction, même amplitude et même phase.
  - ✓ **Cohérence temporelle** : Les éléments des lasers engendrent des vibrations synchrones, pendant un temps très long par rapport à leur période. Le temps de cohérence est donc défini comme étant un temps pendant lequel l'amplitude de l'onde électromagnétique en un point donné est une fonction sinusoïdale du temps, à égale distance de la source à des temps différents.
  - ✓ **Cohérence spatiale** : cette propriété de cohérence permet de concentrer l'énergie délivrée sur une surface extrêmement réduite, ce qui est d'un intérêt majeur pour le traitement des matériaux. Cette cohérence s'effectue en différentes positions mais en même temps.
- **Durée d'impulsion ultracourte (puissante)** : Un laser pulsé cumule une énorme énergie. Par exemple pour un laser Nd:YAG ophtalmologique, la durée d'impulsion est de 5 nanosecondes, c'est-à-dire que pour une durée de vie de 5 ans d'un tel laser, il délivrera au total 2 s de lumière. Sa puissance moyenne est de 0,15 Watt mais sa puissance instantanée est de 3000 Watts. C'est parce qu'elle est pulsée que la lumière laser peut être si puissante, puisque la puissance est donnée par le rapport de l'énergie par le temps du pulse.

## 1.4 Régime de fonctionnement : continu et pulsé

Deux types de fonctionnement des lasers peuvent être distingués : le régime continu et le régime pulsé.

- a- **Régime continu:** Quand un laser est utilisé en mode continu, il émet une lumière d'intensité uniforme. L'énergie laser est délivrée sans interruption et la puissance ne dépasse que très rarement quelques dizaines de kilowatts.
- b- **Régime pulsé :** En mode pulsé, le faisceau laser est alors émis en une série d'impulsions d'une durée plus ou moins courte (allant de la microseconde à la femtoseconde) selon les lasers. La puissance crête atteinte peut alors être extrêmement élevée (atteignant le pétawatt= $10^{15}$ W).

## 1.5 Lasers de puissance

De nombreux types de lasers existent : lasers à solide, lasers à colorant, lasers à gaz, diodes laser et plus récemment les lasers à fibre. Certains de ces lasers de puissance sont devenus des outils incontournables de l'industrie (laser CO<sub>2</sub>, laser Nd : YAG et laser à fibre).

### a- Lasers continus

- **Laser à CO<sub>2</sub> :** Ce laser émet dans l'infrarouge lointain (à 10.6 et 9.6  $\mu$ m). Son milieu actif est constitué d'un mélange gazeux à basse pression composé à l'origine, de gaz carbonique CO<sub>2</sub>, puis a évolué pour devenir un mélange CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> et He.

S'agissant d'un mélange gazeux, le pompage est alors réalisé par décharge électrique. Ce type de laser qui fonctionne généralement en mode continu peut fournir un faisceau atteignant des puissances de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. Il est idéal pour découper et vaporiser les métaux, et peut aussi être utilisé en mode pulsé (laser TEA).

De par son fonctionnement relativement simple et son efficacité dans de nombreuses applications, il est un des lasers préférés dans le milieu industriel. Il est utilisé pour le traitement de surface, la soudure et la découpe des métaux, des matières plastiques et des verres.

Il présente néanmoins certains inconvénients :

- Un encombrement souvent important malgré les efforts des constructeurs.
- L'impossibilité de transporter le faisceau par fibre optique.
- Une focalisation limitée de par sa longueur d'onde élevée.

Ses applications sont surtout militaires. Cependant il est également utilisé dans le domaine civil pour le secteur médical (dentisterie, dermatologie).

Il est très performant quand il est utilisé dans le procédé de découpe de faibles épaisseurs, et offre un bon état de surface. Se caractérise en découpe par une très bonne tolérance dimensionnelle ( $\pm 0,05\text{mm}$ ) et une faible dépouille ( $0,3^\circ$  pour un acier d'épaisseur 8mm). Cependant pour des épaisseurs allant de 8 à 20mm, l'application de ce laser doit être vue au cas par cas.

- **Caractéristiques :**

- Découpe des géométries complexes avec une très haute précision ( $\pm 0.1\text{mm}$ ).
- Vitesses plus importantes par rapport aux autres procédés avec une excellente qualité de découpe pour les faibles épaisseurs.
- Difficultés avec les matériaux réfléchissants tels que l'aluminium, le cuivre ou l'argent ainsi que les pièces creuses et multicouches.
- Pour les matériaux inorganiques (non-métaux) (céramiques, verres, ...), les lasers  $\text{CO}_2$  sont les plus utilisés.
- Les découpes de polymères se font uniquement avec ces lasers.

- **Matériaux découpés :**

- Aciers non alliés et faiblement alliés ( $1 < e < 25\text{mm}$ )
- Acier inoxydables ( $1 < e < 20\text{mm}$ )
- Aluminium ( $1 < e < 12\text{mm}$ )
- Nickel, titane et ses alliages
- Cuivre et ses alliages (performances limitées, épaisseurs faibles)
- Papier, carton, bois, composites, plastiques, céramiques, plexiglas, tissus, cuir.

## **b- Lasers impulsionsnels**

- **Laser Nd :YAG:** Le milieu amplificateur est un barreau de grenat d'aluminium et d'yttrium ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) dopé par des ions néodyme  $\text{Nd}^{3+}$ . Ce laser émet dans le proche infrarouge à 1064nm ( $1.06\mu\text{m}$ ), et il est possible en utilisant des cristaux non linéaires d'accéder aux harmoniques 532, 355 et 266 nm par conversion de fréquence. Le pompage optique est assuré par lampes flash ou diodes. Ces lasers fonctionnent essentiellement en mode impulsionsnel (déclenché ou relaxé). En régime déclenché (Q-switch), ils délivrent

des impulsions crêtes très élevées de l'ordre du gigawatt dont la durée varie de quelques nanosecondes à plus de 700ns. En mode relaxé, les impulsions peuvent atteindre des énergies de quelques joules pour des durées de 0,1 à 20ms.

C'est un laser de grande importance pour l'industrie, il fonctionne en régimes impulsionnel ou continu. Il est massivement présent dans la métallurgie pour la découpe, le perçage et la soudure de l'acier et des super alliages. Il est également employé comme outil de gravure sur de nombreux métaux et plastiques ou pour le marquage sub-surface dans les matériaux transparents, tels que les verres. D'autre part, ces lasers sont largement utilisés dans le domaine de la médecine esthétique: épilation par laser, élimination de tatouages ou traitement de lésions vasculaires mineures. Ces lasers sont aussi couramment utilisés en ophtalmologie comme moyen de traitement des post-cataractes ou de glaucome aigu. Les qualités de ce laser sont la précision et la facilité de mise en œuvre, en plus de l'investissement raisonnable.

Ce laser diffère grandement du laser CO<sub>2</sub> car il est mieux absorbé par les métaux, et peut délivrer des rayonnements de puissance très importante.

Pour la découpe de l'aluminium, le laser Nd:YAG est aussi performant que le laser CO<sub>2</sub> en terme d'état de surface avec des vitesses de découpe plus importantes.

Le laser Nd:YAG est mieux adapté que le laser CO<sub>2</sub> pour la découpe des matériaux réfléchissants, car la lumière laser du Nd:YAG est moins facilement réfléchi par une surface métallique. Pour cette raison ce laser est approprié pour être utilisé pour des métaux hautement réfléchissant tel que l'argent.

La lumière laser Nd : YAG peut traverser le verre (impossible avec le laser CO<sub>2</sub>). Cela signifie que des lentilles de haute qualité de verre peuvent être utilisées pour focaliser la lumière et donc pour minimiser la taille du spot laser. L'avantage de ce dernier est la découpe de précision.

- **Caractéristiques :** Les principales applications des lasers Nd:YAG continus sont: le soudage, le perçage et la découpe fine de précision. Sa puissance crête, qui est plus élevée que celle du laser CO<sub>2</sub>, rend le laser Nd:YAG pulsé plus performant pour le perçage. La plupart des matériaux organiques tels que : le plastique, le bois, le cuir, le papier et le caoutchouc, sont transparents à la lumière Nd:YAG, et donc ne peuvent être découpés avec cette lumière, cette dernière passe à travers le matériau sans le chauffer.

#### **Matériaux pouvant être découpés :**

- Aciers non alliés et faiblement alliés.
- Aciers inoxydables.

-Alliages d'aluminium, de cuivre.

- Céramiques.

- **Laser Excimère:** Le terme « excimère » est la contraction de «excited dimer », qui désigne une molécule composée de deux atomes identiques qui n'existent qu'à l'état excité. Ces lasers sont apparus en 1975. Le Laser Excimère est un laser à gaz émettant uniquement en mode impulsionnel dans l'UV entre 157nm et 351nm selon le mélange gazeux utilisé. Le milieu est composé d'un gaz rare (Ar, Xe, Kr) et d'un halogène (F, Cl). Son fonctionnement repose sur la formation de molécules excitées [F<sub>2</sub>, ArF, KrF, XeCl, XeF] grâce à une décharge électrique. Les énergies délivrées sont de l'ordre du joule et les durées d'impulsions varient entre 10 et 150ns pour une fréquence d'émission pouvant atteindre quelques kHz.

Le laser Excimère présente de nombreux avantages, et grâce à une longueur d'onde courte, et à des effets thermiques très limités, il permet de faire de la gravure. Ce type de laser est aussi utilisé en chirurgie oculaire pour corriger les troubles de la vision (myopie, presbytie, astigmatisme) et dans l'industrie microélectronique.

- **Laser Titane-Saphir :** Le laser Titane-Saphir est le plus utilisé pour générer des impulsions en régime femtoseconde. Le milieu actif est un cristal de saphir dopé par des ions de Titane. Il peut émettre sur un spectre allant de 700 à 1080nm et est plus souvent utilisé à 800nm.

Contrairement aux lasers précédents, l'interaction laser matière est athermique en régime femtoseconde, ce qui lui confère des propriétés très intéressantes pour des applications industrielles. En effet le matériau n'est plus chauffé par le laser, la découpe est plus précise et ses bords plus nets. Cette découpe "propre " est également très intéressante dans le domaine médical, en particulier pour la chirurgie de l'œil ou du cerveau, car elle n'altère pas le voisinage de la zone traitée.

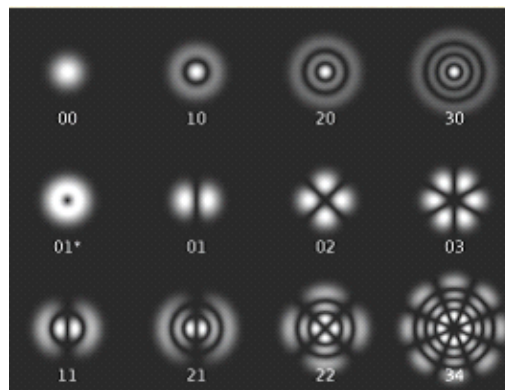
- **Laser à fibre:** C'est un laser solide qui peut fonctionner en régime impulsionnel, et avec des fréquences d'impulsions de centaines de kHz, le faisceau devient quasi-continu. Le milieu amplificateur de ce laser est une fibre optique qui est dopée avec des ions de terres rares. La technologie est relativement récente, et il existe aujourd'hui des lasers monomodes dont la puissance est de l'ordre de la dizaine de kilowatts. Les lasers à fibre produisent un diamètre focal particulièrement petit, ce qui amplifie leur intensité jusqu'à être 100 fois plus élevée que les lasers CO<sub>2</sub> de même puissance moyenne délivrée. Ces lasers produisent un faisceau laser au moyen de ce que l'on appelle un laser 'seed' et l'amplifient dans des fibres de verre montées spécialement, auxquelles de l'énergie est amenée via des diodes de pompage. La longueur d'onde délivrée est de l'ordre de 1,064 micromètre.

Ces lasers ont l'avantage de coûter moins cher, de posséder un encombrement réduit et d'être résistant aux vibrations. Par ailleurs il n'est pas nécessaire de les refroidir en dessous de 10 kW.

Le laser à fibre convient idéalement pour le marquage des métaux, pour les gravures sur métal et les marquages riches en contrastes des plastiques. Les lasers à fibre se distinguent par leur longue durée de vie. Ils conviennent pour les métaux, les métaux revêtus et les plastiques.

### 1.6 Modes et qualité du faisceau laser

Les ondes électromagnétiques qui sont constituées par le mouvement des photons forment des ondes stationnaires dans le résonateur. La caractéristique de l'oscillation dans le résonateur est appelée "mode", et la qualité du faisceau laser dépend de son mode. La lumière émise par un laser contient une ou plusieurs fréquences que l'on associe aux modes propres de la cavité. On distingue généralement deux types de modes : les modes longitudinaux et les modes transverses. Les modes longitudinaux diffèrent par leur fréquence d'oscillation tandis que les modes transverses diffèrent, non seulement par leur fréquence d'oscillation mais aussi par la répartition de leurs champs, électrique et magnétique, dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Le mode est une caractéristique du résonateur optique utilisé dans les oscillateurs laser. La forme du champ électromagnétique créé dans le résonateur dépend fortement de la longueur d'onde des photons et aussi de l'alignement des miroirs, de leur courbure et de leur espacement. Le champ peut avoir différentes formes de sections transverses appelées modes électromagnétiques transverses désignés par les lettres TEM pour traduire : Transverse Electric et Magnétique. La qualité du faisceau sortant de la cavité peut être définie par son mode traduisant la configuration du champ électromagnétique lié à l'onde émise. A la sortie d'un laser, nous avons la superposition des différents modes transverses produits :  $TEM_{xy}$ , plus le mode est élevé (x, y grand), plus la tache focale est grossière.



**Figure 15.** Les différents modes transverses  $TEM_{xy}$ .

Parmi tous les modes possibles de la cavité, celui qui est intéressant pour la plupart des applications industrielles, et en particulier la découpe laser, est le mode transverse fondamental TEM<sub>00</sub>. Il se caractérise par une symétrie axiale, une distribution gaussienne de l'énergie à l'intérieur du faisceau et est souvent utilisé pour de faibles puissances. Lorsque la puissance augmente, les répartitions énergétiques sont plus complexes et peuvent présenter des fluctuations dans le temps. En effet, le mode TEM<sub>01</sub> qui présente deux faisceaux séparés est utilisé en général dans le perçage de trous larges.

La qualité du faisceau laser, est déterminée par la variable M<sub>2</sub>, M<sub>2</sub> est basée sur une mesure de la divergence du faisceau dans le résonateur :  $M^2 = 4 \lambda f D_0 / d_0 \pi$ .

Avec :

- M<sup>2</sup> = facteur de qualité du faisceau,
- λ = longueur d'onde en mm,
- f = distance focale en mm,
- D<sub>0</sub> = diamètre du faisceau sur l'optique de focalisation.
- d<sub>0</sub> = diamètre du point de focalisation en mm,

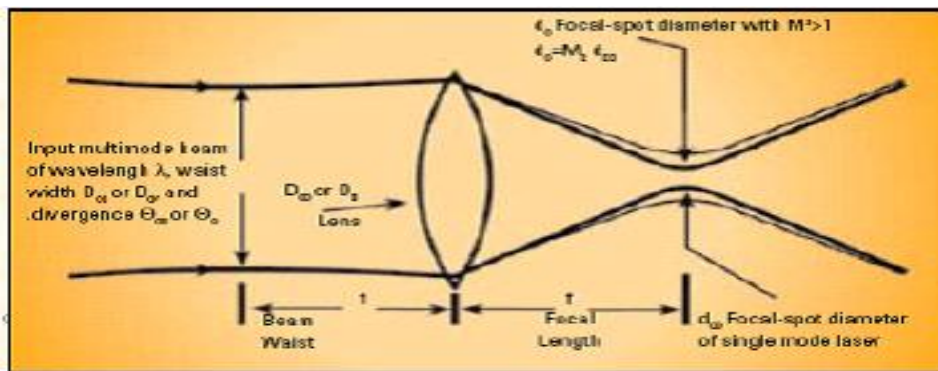


Figure 16. Mesure du facteur de qualité d'un laser [57].

On notera que :

- pour un ordre donné du mode, une longueur d'onde plus courte du faisceau laser donne une meilleure qualité de ce dernier.

- un ordre élevé du mode du faisceau laser donne une mauvaise qualité du faisceau.

Il faut préciser que le facteur de qualité, peut être modifié lors du passage de l'onde laser à travers un système optique [59]. En effet, l'interaction de l'onde avec les particules constituant la lentille induit une légère dispersion et le volume de l'espace des phases représenté par le produit (dimension transverse- divergence) du faisceau augmente, induisant une augmentation de M<sub>2</sub>. En général, on néglige ce phénomène.

- **Types de faisceaux**

Il existe trois types de faisceaux laser :

- Les faisceaux divergents : c'est le cas des faisceaux laser en sortie de fibre optique.
- Les faisceaux focalisés : on utilise en général un système convergent en sortie de fibre qui focalise le rayon laser. Ce faisceau a une puissance optimale au point de convergence des rayons, c'est-à-dire au niveau de la distance focale de la lentille convergente par exemple.
- Les faisceaux collimatés (un faisceau dont les rayonnements sont quasiment parallèles) : sont des faisceaux qui conservent la même puissance que le laser que ce soit à 5 cm ou à 1 mètre de la cible. Ils peuvent donc être utilisés à n'importe quelle distance sans perte de puissance.

On retiendra aussi qu'un faisceau gaussien présente la propriété de fournir la plus petite tache focale, et maintient cette distribution même s'il est focalisé ou transmis par des systèmes optiques (miroirs, fibres optiques).

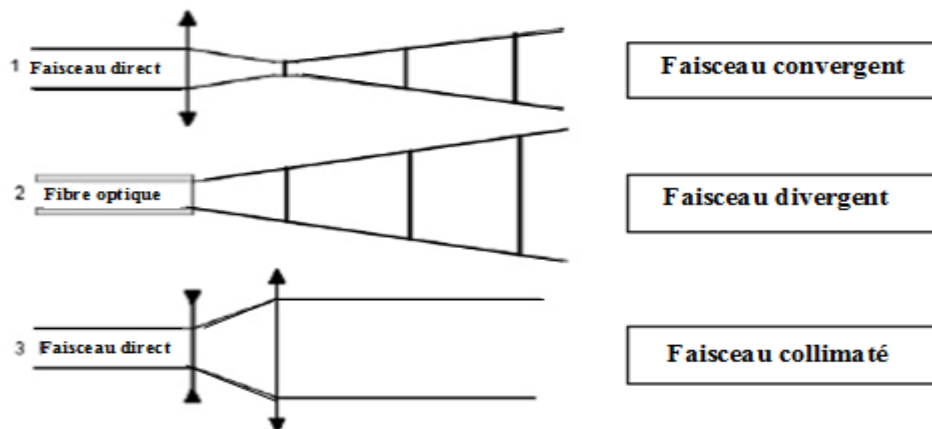


Figure 17. Différents faisceaux laser

- **Faisceau Laser et direction de polarisation** : Une onde à polarisation transversale est une onde plane monochromatique où les champs électrique et magnétique sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. La lumière issue d'un laser se caractérise par sa polarisation qui est la restriction selon laquelle les vibrations du champ électromagnétique ont lieu suivant un seul plan. Cette propriété permet d'éviter les pertes optiques aux interfaces entre le milieu amplificateur et les éléments optiques. La polarisation peut être plane, verticale, horizontale, elliptique, circulaire, ou aléatoire [60, 61]. Il existe deux composantes de la polarisation appelées S et P, la composante P se caractérise par des pertes nulles à l'angle de Brewster.

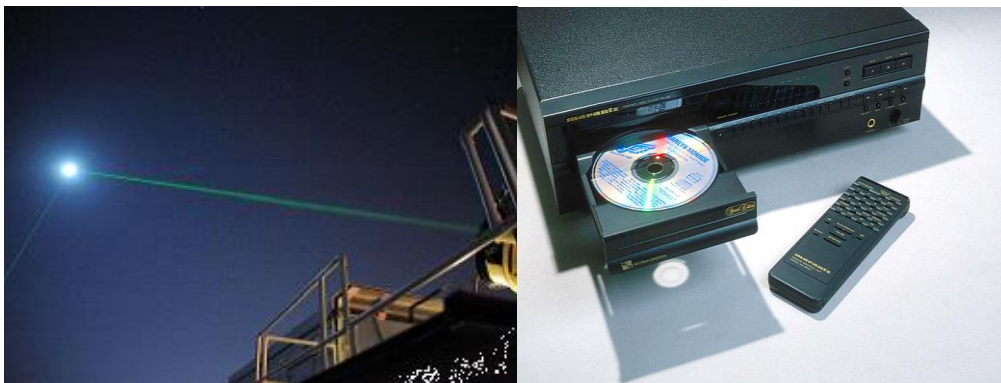
- **Principaux facteurs affectant la dimension de la tâche focale :** En découpe laser par exemple, il est nécessaire d'obtenir des tâches focales de faibles dimensions afin de maximiser la densité de puissance au niveau de l'échantillon. Plusieurs facteurs influent sur la dimension transverse du faisceau après le passage au travers d'une lentille. Ces facteurs sont :

- ✓ le mode laser de par l'influence du facteur de qualité  $M_2$
- ✓ la diffraction
- ✓ l'aberration sphérique

## 1.7 Applications du laser

Les applications du laser sont très nombreuses:

- ✓ dans le domaine médical, en médecine esthétique, en ophtalmologie (pour les traitements de la myopie) et en chirurgie du cerveau.
- ✓ dans le domaine industriel, le laser permet de découper, de percer, de souder, de graver et de faire des traitements de surface. Le laser est un outil multifonctionnel.
- ✓ dans le refroidissement des atomes, (technique qui permet de refroidir un gaz atomique, jusqu'à des températures de l'ordre du milli-Kelvin, voire de l'ordre du micro-Kelvin ou encore du nano-Kelvin).
- ✓ pour la mesure de distances (distance Terre-Lune par exemple).
- ✓ pour la lecture et la gravure de disques compacts CD et DVD.



**Figure 18.** Mesure de la distance Terre-Lune et gravure de disques compacts CD et DVD.

## 1.8 Les principaux lasers utilisés en découpe

Pour les applications de découpe, ce sont les lasers de puissance qui sont très utilisés, en particulier les lasers CO<sub>2</sub> et Nd:YAG.

**Tableau 3** : Avantages et inconvénients des lasers YAG et CO<sub>2</sub>

	<b>YAG</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Courte longueur d'onde (1.064µm)</li><li>- Transmission par fibre de silice</li><li>- Bonne résolution spatiale</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Bonne qualité du faisceau</li><li>- Puissance élevée</li></ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Puissance limitée et rendement faible</li><li>- Qualité du faisceau médiocre</li><li>- Ne coupe pas les matériaux organiques</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Longueur d'onde élevée (10 µm)</li><li>- Mauvaise absorption par les matériaux</li><li>- Mauvaise résolution spatiale.</li></ul>

## 1.9 Le laser et la sécurité, mesures de prévention

- **Les risques pour l'œil** : Les lasers sont des outils puissants et dangereux et doivent être utilisés avec précaution. Un passage accidentel ou intentionnel du rayon laser sur l'œil, que ce soit un rayon direct ou réfléchi peut créer des dommages sur la cornée, la conjonctive, l'iris, le cristallin ou la rétine. Ces dommages peuvent aller d'une simple brûlure conjonctivale à des troubles de la vision et jusqu'à sa perte définitive. Les rayons dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 1400 nm sont ceux qui ont les effets les plus néfastes car ils détériorent directement la rétine. Les lasers puissants tels les lasers CO<sub>2</sub> (longueur d'onde dans l'infrarouge) entraînent surtout des brûlures et des opacifications cornéennes.

- **Les risques pour la peau** : L'irradiation cutanée peut entraîner des brûlures sévères quand des lasers puissants sont utilisés. Une exposition plus longue à des lasers de faible ou moyenne puissance entraîne des lésions comparables à des coups de soleil. Les rayons, qu'ils soient ultraviolets ou infrarouges ont des effets néfastes pour la peau.

- **Le risque chimique** : Un danger chimique peut apparaître lorsque la lumière laser interagit avec les solvants organiques: éther, alcool, produits iodés... Les liquides et les gaz de refroidissement du laser peuvent aussi être directement dangereux. Certains déchets produits lors de l'émission de la lumière laser peuvent être toxiques, c'est le cas notamment des lasers Excimères.

### Mesures de prévention :

- Eviter les rayons réfléchis.

- Porter des lunettes de sécurité, prévues à cet effet, munies de protections latérales. Ces lunettes dépendent de la longueur d'onde du laser. Certaines lunettes protègent de plusieurs longueurs d'onde en cas de l'utilisation de différents lasers. Les lunettes de vue ainsi que les lentilles de contact sont évidemment insuffisantes, bien qu'elles puissent suffire pour certains lasers (CO<sub>2</sub> par exemple).
- Eviter l'exposition de la peau aux rayons directs et réfléchis.
- Porter des gants et protéger les zones qui ne font pas partie de l'intervention par des compresses humides.



**Figure 19.** Port des lunettes et gants de protection contre les rayons lasers.

## 2. Interaction laser-matière

### 2.1 Absorption, réflexion, diffusion et transmission du faisceau laser

Le laser peut être utilisé pour effectuer un transfert d'énergie entre le rayonnement et un matériau cible. L'effet obtenu est fonction de la densité d'énergie du faisceau, de son temps d'application sur le matériau, de sa longueur d'onde, de son mode et de son régime (continu ou pulsé).

Après irradiation laser, quatre types d'interactions peuvent survenir (Figure 20):

- l'absorption,
- la réflexion,
- la transmission,
- la diffusion.

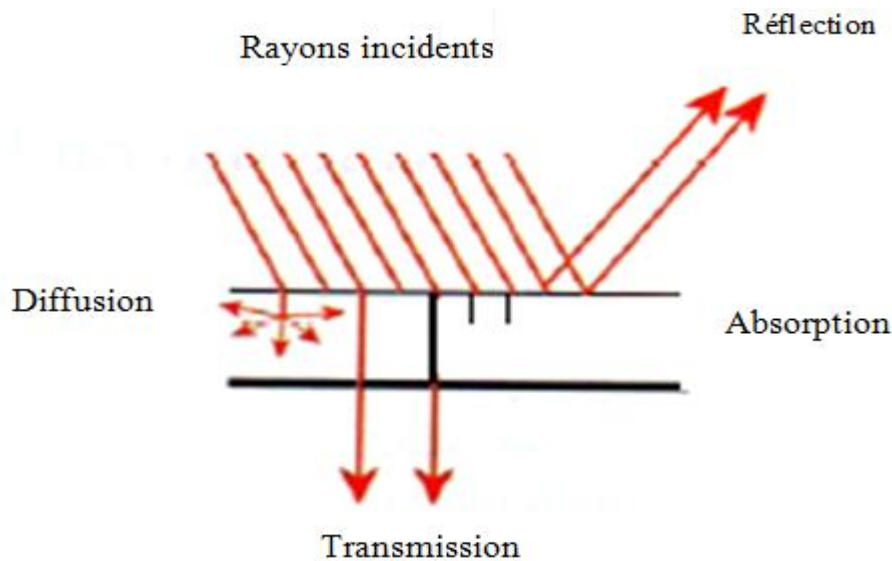


Figure 20. Effet de l'impact de la lumière sur un matériau.

- ✓ **L'absorption** est caractéristique d'un milieu. Pour chaque milieu, le coefficient d'absorption est fonction de la longueur d'onde. Plus le coefficient d'absorption est grand, plus vite le rayonnement sera absorbé et converti en chaleur par le matériau, et donc moins la profondeur de pénétration sera grande.
- ✓ **La réflexion** fait que le laser peut-être réfléchi sur la surface de la cible comme s'il s'agissait d'un miroir. La réflexion peut être spéculaire ou diffuse.
- ✓ **La transmission** dépend du matériau (opaque ou transparent). Le rayon laser peut-être transmis ou pas au travers de la matière comme la lumière peut traverser le verre et non pas un métal massif.

- ✓ **La diffusion** est une réflexion particulière, où le photon est dévié dans le milieu sans être absorbé. Il peut y avoir des diffusions multiples avant absorption. La diffusion est caractérisée par le coefficient de diffusion et par le coefficient d'anisotropie (angle moyen de diffusion).

Un grand nombre de paramètres intervient lors de l'interaction laser-matière :

- ✓ **Paramètres liés au laser:** Les paramètres qui caractérisent le faisceau laser peuvent être intrinsèques (fréquence, longueur d'onde, énergie du photon), énergétique et temporels (état de polarisation, structure de mode et répartition d'énergie, puissance et intensité...) et géométriques (divergence, taille du spot...)
- ✓ **Paramètres liés au matériau:** Parmi les plus importants de ces paramètres on cite, la structure, la composition chimique, les caractéristiques mécaniques, les propriétés électriques et thermiques.
- ✓ **Paramètres liés à l'environnement :** Procédé effectué en atmosphère normale (pression et température de la pièce) ou contrôlée.

L'interaction du laser avec le substrat tient compte des paramètres optiques du matériau irradié ; et la conduction de la chaleur va agir sur le comportement thermodynamique du matériau dans ses états solide et liquide, et en conséquence sur le profil de température dans le matériau. Selon le type de laser utilisé (longueur d'onde, durée d'impulsion...), cette interaction n'aura pas les mêmes effets.

## 2.2 Effets de la lumière laser sur les métaux

Nous allons nous intéresser en particulier aux métaux et à l'interaction laser-métal. Comme vu précédemment les lasers produisent des faisceaux de longueur d'onde et de puissances différentes. Lorsqu'une onde irradie une surface métallique, seule une partie est absorbée. Le reste sera réfléchi, diffusé ou transmis.

Durant le processus d'interaction on distingue plusieurs étapes :

- l'absorption de l'onde dans le matériau ;
- le transfert de l'énergie au réseau cristallin ;
- la diffusion de la chaleur dans le matériau ;
- le changement de phase : fusion ou évaporation.

En plus, la lumière laser est transformée en d'autres formes d'énergie quand elle est absorbée par la cible. Dans un ordre croissant de magnitude, la lumière absorbée est transformée en énergie chimique, thermique ou mécanique/acoustique.

- ✓ **Absorptivité des métaux :** Il est primordial de connaître le coefficient d'absorption du métal afin de quantifier le transfert d'énergie pendant l'interaction laser-métal. Ce coefficient est bien déterminé pour tous types de matériaux à l'état solide. Il dépend de la longueur d'onde, de l'état de surface (géométrie locale), de sa température et de sa phase. L'absorption de l'énergie par le faisceau laser se faisant dans une couche du matériau très mince (10 à 100 nm), le transfert d'énergie se fait surtout par excitation des photons (effet thermique) ce qui entraîne une élévation de température à la surface. Cette augmentation de température provoque par conduction un échauffement. Les propriétés physiques du métal utilisé, tel que sa réflectivité, sa densité, sa conductivité thermique, sa température de fusion et de vaporisation ainsi que son énergie d'ionisation influent sur l'absorption de l'énergie laser. Il faut noter que le choix de la source laser se fait en fonction du coefficient d'absorption du matériau à traiter.
- ✓ **Réflectivité des métaux :** Pour un matériau opaque (métal) soumis à un rayonnement électromagnétique, une partie du rayonnement est absorbée, l'autre partie est réfléchi. La réflectivité des métaux est très élevée et est au dessus d'une certaine longueur d'onde critique. Au dessous de cette valeur critique la réflectivité chute rapidement. La réflectivité des métaux dépend de la fréquence, de l'état de surface de la cible, des gaz de protection utilisés dans le procédé, ainsi que de l'épaisseur du matériau.
- ✓ **Les changements de phase :** Lorsque la température de fusion est atteinte, une interface solide/liquide se crée. Cette transformation est caractérisée par l'absorption ou la libération d'une certaine quantité d'énergie, qui provient de la modification de l'énergie de liaison interatomique entre les phases liquide et solide. Cet échange d'énergie se traduit par une évolution de l'enthalpie du matériau. Dans le cas des métaux purs, cette évolution se fait à température constante et correspond à une discontinuité de l'enthalpie.

### 2.3 L'acier inoxydable et ses caractéristiques

Nous avons utilisé l'acier inoxydable comme matériau cible dans le cadre de notre travail de thèse. Un petit aperçu sur sa constitution chimique et sur son comportement est nécessaire pour pouvoir analyser nos résultats ultérieurement.

**Constitution de l'acier :** Un acier est un alliage métallique qui est constitué principalement de fer et de carbone. Le pourcentage du fer est le plus élevé. Sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique. Le carbone est dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la dureté de l'alliage.

Des éléments chimiques peuvent être ajoutés à la composition initiale de l'acier en plus du carbone dans le but de résister à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou une combinaison des deux. Ces éléments sont principalement métalliques et ils tendent à modifier les propriétés

des aciers. Ces derniers, on les appelle : Aciers alliés. Les principaux éléments d'addition sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le molybdène (Mo).

### **Importance de chaque élément :**

- ✓ **Le carbone** est l'élément le plus important car c'est lui qui, associé au fer, confère à l'alliage le nom d'acier. Il influe directement sur les propriétés mécaniques de ce dernier. Il agit sur la dureté de l'acier et l'addition de carbone est trente fois plus efficace que l'addition de manganèse.
- ✓ **Le chrome** joue un rôle déterminant dans la résistance à la corrosion lorsqu'il est présent à une teneur de plus de 12 à 13 % (selon la teneur en carbone). Il est aussi l'élément d'addition qui confère à l'acier la propriété de résistance mécanique à chaud et à l'oxydation.
- ✓ **Le manganèse** forme des sulfures qui améliorent l'usinabilité. Il augmente modérément la trempabilité.
- ✓ **Le molybdène** augmente la température de surchauffe, la résistance à haute température et la résistance au fluage. Il augmente aussi la trempabilité.
- ✓ **Le nickel**, il sert à produire des aciers de trempabilité modérée ou élevée (selon les autres éléments présents), à basse température d'austénitisation et à ténacité élevée. C'est l'élément d'alliage par excellence pour l'élaboration des aciers ductiles à basses températures. C'est aussi un élément qui confère de bonnes propriétés mécaniques.

**Aciers inoxydables :** Notre matériau cible est l'acier inoxydable. Ces aciers présentent une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage (déformation irréversible). Ils sont essentiellement alliés au chrome, élément qui confère la propriété d'inoxidabilité, et au nickel, élément qui confère de bonnes propriétés mécaniques. Ces aciers contiennent au moins 10,5 % de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

Leurs applications sont multiples : chimie, nucléaire, alimentaire, coutellerie et équipements ménagers.

Rappelons que le fer, constituant majoritaire des aciers, s'oxyde facilement; le produit de corrosion est la rouille qui se dissout dans l'eau, ce qui crée une dégradation de la pièce. Une des manières d'éviter la corrosion consiste à mettre une quantité importante de chrome (Cr) dans l'acier (plus de 10,5 % en masse). Sachant que le chrome réagit avec le dioxygène de l'air, il forme une couche d'oxyde de chrome. Cette couche, compacte, adhérente et donc protectrice, forme une barrière qui sépare l'acier de son milieu extérieur, elle est appelée : couche passive.

En temps normal, elle est invisible car très fine. Ainsi, contrairement à son nom, l'acier n'est pas inoxydable, il s'oxyde rapidement, mais forme un oxyde protecteur, contrairement à la rouille.

L'addition de divers éléments d'alliage permet de s'adapter au milieu spécifique dans lequel doit être utilisé l'acier, et de modifier ses propriétés mécaniques :

- L'ajout de nickel améliore les propriétés de la couche passive; celui-ci s'intègre à la couche d'oxyde.
- Le carbone en haute teneur permet de tremper l'acier et d'obtenir un acier très dur; mais le carbone nuit à la soudabilité, et par ailleurs, il peut piéger le chrome et gêner la formation de la couche passive.
- D'autres éléments d'alliage, comme le molybdène, le titane, le cuivre améliorent encore la résistance chimique.

Il existe de très nombreuses nuances d'aciers inoxydables et le choix est parfois difficile, car ils n'ont pas tous le même comportement dans un milieu donné.

Nous citons les deux exemples suivants :

**INOX 304:** Convient aux sites ruraux et urbains, ou sites industriels peu pollués. Un rinçage régulier des surfaces exposées est recommandé afin de maintenir une bonne apparence pour les composants architecturaux.

**INOX 304L:** Possède les mêmes propriétés que le 304, mais plus faible en carbone (Low carbon). Non recommandé pour les sites industriels fortement pollués et les zones côtières. Cette nuance est nécessaire uniquement dans le cas de risques de corrosion inter-granulaire à la soudure (p.ex. : acides)

La principale différence entre le 304 et 304L est sa meilleure résistance à la soudabilité.

Les produits inox nécessitent un entretien régulier. La fréquence de nettoyage est de 6 à 12 mois en milieu non agressif, et 3 à 6 mois en milieu agressif (air marin, atmosphère urbaine ou industrielle, projection de sels suite au sablage des routes verglacées, etc.)

Pour notre étude nous allons nous intéresser à la découpe de l'acier inoxydable 304L avec un laser CO<sub>2</sub>. Le tableau ci-dessous donne la composition massique de chacun de ces éléments.

**Tableau 4 :** Composition massique de l'acier inoxydable 304L.

Elément	Fe	Cr	Ni	Mn	C
Composition (%)	69.8	18	10	2	0.02
Masse (g/mol)	55.845	51.996	58.69	54.938	12.011

La masse atomique de l'acier inoxydable est :  $M_{\text{acier inox}} = 55.17\text{g}$

## ***CHAPITRE 3***

### ***GAZ D'ASSISTANCE***

**Gaz d'assistance :** Dans la découpe de métaux au laser, un jet de gaz émanant d'une buse permet de générer une force qui est utilisée pour évacuer le film de métal fondu produit lors de l'absorption de l'énergie laser sur le front de découpe, voir figure 21. Ce jet de gaz permet aussi de protéger les composants de l'optique de focalisation présents généralement dans une buse coaxiale servant à acheminer le laser et le gaz. Ce gaz refroidit aussi les bords de la saignée.

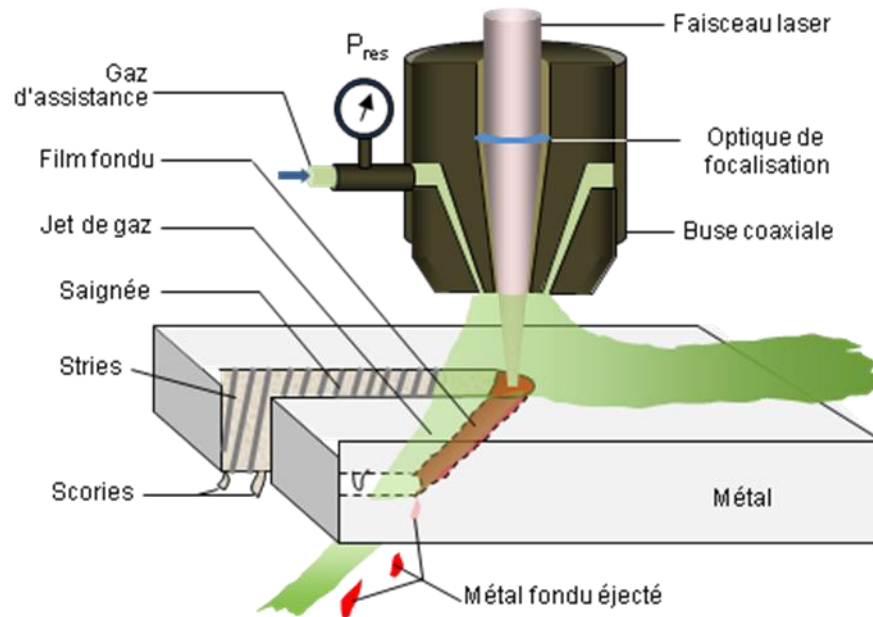


Figure 21. Découpe laser assistée avec un jet de gaz.

## 1. Caractérisation du gaz d'assistance

La découpe laser est une technologie qui associe puissance et haute précision. La pureté des gaz utilisés est déterminante pour que l'opération se déroule de manière optimale.

Pour un matériau donné, la qualité de découpe est différente suivant la nature du gaz utilisé. Par exemple pour des alliages légers ainsi que pour les aciers inoxydables, des gaz neutres ou inertes, donnent une qualité de découpe relativement bonne alors que pour les aciers doux, l'oxygène conviendrait le mieux.

Pour obtenir une découpe de bonne qualité, la vitesse de découpe doit être équilibrée avec la puissance et le taux de l'écoulement gazeux.

### 1.1 Principaux gaz d'assistance utilisés en découpe laser

L'argon, l'azote, l'oxygène ou les mélanges gazeux air, argon/hydrogène sont choisis suivant des critères précis. Nous allons détailler dans ce qui suit les avantages de chacun.

- **L'argon (Ar)** caractérisé par sa masse atomique importante va permettre d'augmenter l'énergie cinétique du mélange dans lequel il est utilisé. En revanche sa faible enthalpie spécifique qui correspond à l'énergie contenue dans le fluide

dans un état déterminé et sa faible conductivité thermique font qu'il ne soit pas recommandé dans certains cas comme gaz de découpe.

- **L'azote ( $N_2$ )**, son enthalpie spécifique et sa masse moléculaire élevée font de lui un bon gaz de découpe. Il peut être également associé à l'hydrogène afin d'améliorer ses performances.
- **L'argon/hydrogène (Ar/H<sub>2</sub>)** est un mélange généralement composé de 80% en volume d'argon et de 20% en volume d'hydrogène. L'hydrogène possède une excellente conductivité thermique et une enthalpie spécifique élevée, qui apporte à l'argon ce qui lui manque en potentialité de transfert énergétique. De plus, il a un rôle réducteur qui empêche partiellement la formation d'oxydes sur les faces découpées.
- **L'oxygène ( $O_2$ )** permet de diminuer la tension superficielle et la viscosité du métal liquide, ce qui facilite l'éjection du métal fondu. Néanmoins l'oxygène est beaucoup plus utilisé pour la découpe d'aciers non alliés d'épaisseurs allant jusqu'à 15mm car la vitesse de découpe dans ce cas est très rapide.
- **L'air** qui constitue l'atmosphère terrestre, avec 79% d'azote et 21% d'oxygène, regroupe deux gaz diatomiques et doit être sec et déshuilé.

L'argon et l'azote sont des gaz qui ont une faible interaction métallurgique avec le métal fondu.

## 1.2 Influence de la nature du gaz (réactif ou neutre)

Sous un gaz neutre tel que l'azote, la découpe laser est beaucoup moins rapide que celle assistée par de l'oxygène (réactif).

- **Découpe laser avec un gaz neutre** : en utilisant un gaz d'assistance inactif, une haute puissance laser doit être utilisée pour fusionner le volume de la saignée. Dans ce cas le rôle du gaz est simplement l'évacuation du métal fondu de la saignée.

Pour des aciers contenant du chrome, tel que l'acier inoxydable, on utilise des gaz inertes ou neutres pour l'obtention d'une meilleure qualité de découpe.

- **Découpe laser avec un gaz réactif** : L'oxygène sert à fluidiser le métal fondu et donc va éviter l'apparition de scories en bas de saignée, exemple de l'acier doux. Mais les déformations thermiques sont importantes. En plus cet oxycoupage laser est rapide, ce qui permet de découper de grandes épaisseurs (20cm à 2m).

### 1.3 Le rôle du jet de gaz d'assistance

Le jet de gaz d'assistance joue un rôle important dans le processus de découpe laser. Il fournit la force mécanique nécessaire pour évacuer le métal fondu de la saignée et refroidit la zone de découpe par convection forcée.

Toutefois, comme le gaz d'assistance a également pour rôle de protéger les optiques de remontées éventuelles (métal en fusion, fumées,...) lors de l'ouverture de la saignée et seulement après celle-ci, le gaz peut pénétrer à l'intérieur de la cavité et aider à l'éjection de la phase liquide par la face arrière.

Dans le cas d'une découpe laser par évaporation, le gaz d'assistance joue trois rôles : refroidir les bords de découpe, évacuer la matière fondue et protéger les optiques de remontées de métal en fusion et de vapeur métallique. Dans ce cas particulier de découpe par évaporation et pour une configuration donnée de la buse, la distance de travail 'buse – pièce' la plus grande reste la plus appropriée. Sezer et al. [62] montrent l'effet de la collision du gaz d'assistance avec la vapeur métallique.

- **Tuyère :** la forme de la tuyère doit permettre d'obtenir un écoulement de gaz idéal (optimum) dans la zone de découpe. En général, le diamètre de cette dernière est compris entre 0.8 et 3 mm et est relié à l'épaisseur du matériau. Une tuyère avec un grand diamètre de l'orifice fournit un écoulement de gaz insuffisant dans la zone de découpe pour évacuer le métal fondu. Au contraire, un orifice trop petit conduit à une difficulté de l'alignement de la lumière laser et augmente les risques de brûlure de la tuyère. Par conséquent, pour une buse donnée, les paramètres déterminants pour contrôler l'influence du gaz d'assistance sont la distance buse pièce et la pression en réservoir. Ces deux paramètres déterminent entièrement l'écoulement et la pression d'arrêt sur cible.

Les travaux de Fieret *et al.* [63, 64] montrent l'influence de la forme de la buse sur la structure de l'écoulement. Pour chaque buse une structure interne au jet est associée et dépend de la pression statique en réservoir. Dans leurs articles ils décrivent les différentes natures d'écoulements gazeux possibles en sortie de buse. Ils donnent les grandeurs caractéristiques à maîtriser pour avoir une connaissance complète de l'écoulement en fonction de la buse utilisée.

- **Distance d'impasse (Stand-of distance) :** Cette distance influence la turbulence et la vitesse de découpe et donc la qualité de découpe.

### 1.4 Régimes d'écoulement gazeux et viscosité

Les écoulements gazeux sont typiquement classés en deux catégories qui dépendent de la nature du jet de gaz par l'intermédiaire de sa viscosité, de sa vitesse et du diamètre hydraulique que nous allons définir ultérieurement. Un nombre sans dimension, appelé nombre de Reynolds caractérise le régime de cet écoulement: laminaire ou turbulent. Entre les deux régimes se trouve la zone de transition. Le régime laminaire est caractérisé par des couches de fluide qui glissent les

unes sur les autres et dans ce cas l'échange d'impulsion est faible et la viscosité du fluide évite en général la présence d'instabilités. Au-delà d'une certaine valeur de ce nombre, la turbulence surgit. Elle se caractérise avec un écoulement aléatoire accompagné d'un échange d'impulsion violent. Le gaz se déplace sous forme de vortex ou tourbillons de différentes tailles qui favorisent le transfert thermique mais mènent généralement à des instabilités.

**Viscosité du jet de gaz :** Pour un gaz, la viscosité augmente avec la température, ainsi l'agitation moléculaire se fait d'une manière intense rendant son transport plus difficile. L'augmentation de la viscosité du jet de gaz avec la température dans la saignée de découpe accroît le coefficient de frottement et donc la contrainte de cisaillement.

Rappelons que le gaz est coaxial au faisceau laser, il vient donc interagir directement dans la zone d'interaction avec les atomes du métal. Une action tangentielle qui se traduit par un processus de cisaillement du film métallique au niveau de l'interface liquide/gaz apparaît. Au contact direct, les molécules du jet de gaz transfèrent de l'énergie au liquide par frottement : c'est cet effet qui sera à l'origine de l'évacuation de la matière durant le processus de découpe.

## ***CHAPITRE 4***

### ***APPROCHE ANALYTIQUE***

## 1. Introduction

Le procédé de découpe laser des métaux avec un gaz inerte peut être présenté en trois étapes. Au début la puissance laser du faisceau incident est absorbée à la surface du matériau, puis un transfert de chaleur dans le matériau et une fusion à la surface se produisent, et enfin le matériau fondu est expulsé de la saignée de découpe par le jet de gaz d'assistance. En fait, ces trois étapes se présentent en même temps et sont fortement liées entre elles.

Les processus physiques qui se déroulent lors du procédé de découpe par laser dépendent d'un grand nombre de paramètres opératoires qui influent sur le produit de découpe et sa qualité. Une étude purement expérimentale pourrait s'avérer très coûteuse, et de ce fait, la modélisation permet à moindre coût d'optimiser le procédé. Néanmoins, celle-ci reste délicate à mener car elle devrait prendre en compte des mécanismes physiques complexes tels que la fusion et l'évaporation éventuelle du matériau, les forts gradients thermiques présents sur de courtes distances, les déformations de la surface libre,....

Ce genre de problème est aussi très fortement non-linéaire et ceci pour plusieurs raisons, dont celles liées aux paramètres thermo-physiques, comme la densité du fluide et la conductivité thermique qui dépendent de la température.

Dans le but de rendre ce procédé, théoriquement plus compréhensible et accessible, nous avons mené deux études : une étude analytique et une étude numérique complémentaire.

## 2. Modélisation

### 2.1 Description du système

Nous nous intéressons aux caractéristiques du métal fondu produit lors d'une découpe laser par fusion de l'acier inoxydable. En effet, la fusion du métal due à l'irradiation laser est accompagnée d'une évacuation par le jet de gaz, et il ne subsiste qu'une fine couche adhérente au front de découpe. L'épaisseur de celle-ci est très faible, d'environ quelques dizaines de micromètres et elle est caractérisée par d'importants gradients de vitesse. Elle est donc comparable comme nous l'avons déjà signalé à une couche limite. Il est donc judicieux de revoir le concept de la théorie des couches limites pour pouvoir l'appliquer à notre étude.

### 2.2 Rappels sur la théorie de la couche limite

Selon cette théorie, l'écoulement autour d'un corps solide peut se diviser en deux régions: région de la couche limite dynamique et région extérieure.

- ✓ **La couche limite dynamique:** La couche limite est la zone d'interface entre un corps solide et le fluide environnant lors d'un mouvement relatif entre les deux. Lorsqu'un fluide s'écoule le long d'une paroi supposée fixe, les vitesses sur la paroi sont nulles et loin de l'obstacle (paroi) elles sont égales à la vitesse de l'écoulement non perturbé. À l'intérieur de cette couche fine, la vitesse relative du fluide change rapidement. La viscosité et le gradient de la vitesse donnent

naissance aux contraintes tangentielles à la paroi et donc à la résistance par frottement.

- ✓ **La région extérieure:** c'est la région où l'écoulement n'est pas affecté par les effets de la viscosité, et où le fluide peut être considéré comme parfait.

Le profil de vitesse au sein de la couche limite dépend de sa nature laminaire ou turbulente. Le régime laminaire est caractérisé par des filets fluides parallèles et qui ne se mélangent pas : l'écoulement a donc une structure en couches superposées. Par contre l'écoulement turbulent est aléatoire. La transition du régime laminaire au régime turbulent est caractérisée par la valeur d'un paramètre adimensionnel appelé *nombre de Reynolds*.

Le film métallique est un fluide visqueux et du moment que ces fluides sont capables d'exercer des contraintes tangentielles, la résultante de celles-ci, sur le front de découpe, est une force en direction contraire au courant (donc une résistance à l'avancement).

#### **Propriétés de la viscosité du film métallique liquide:**

- ✓ Très peu sensible à la pression.
- ✓ Très sensible à la température, la viscosité diminue avec la température.
- ✓ Auto échauffement : une partie de l'énergie mécanique sert à vaincre les frottements visqueux donc cette énergie est transformée en chaleur (plus il est visqueux plus il y a frottement)
- ✓ Sa caractéristique est la dissipation de l'énergie.

**Couche limite thermique :** Supposons que la température du gaz  $T_g$  diffère de celle du front de découpe  $T_s$  (supposé isotherme) avec  $T_s \gg T_g$ . On assiste alors à l'apparition d'une couche limite thermique, c'est-à-dire d'une zone dans laquelle le gradient de température perpendiculaire à la paroi est non nul. Le front de découpe porté à la température de fusion cède alors de la chaleur aux particules du gaz qui sont à son contact immédiat, qui elles mêmes communiquent une partie de cette énergie aux particules des couches supérieures, et ainsi de suite. De là apparaît un gradient de température (gradient thermique) et donc d'une couche limite thermique.

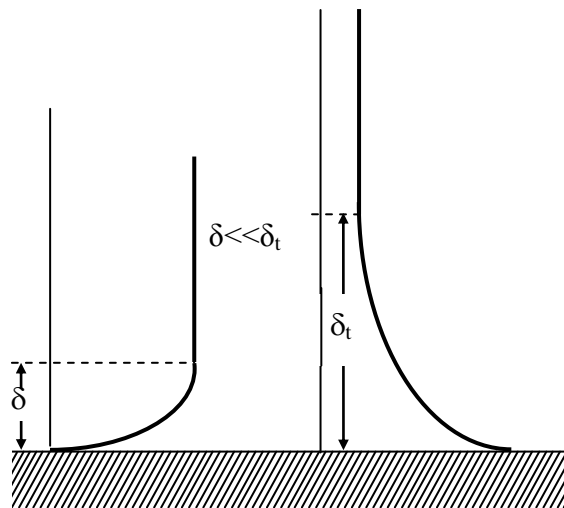
La compréhension et la modélisation des équations de la couche limite sont peut être une des plus importantes avancées de la dynamique des fluides. En utilisant l'analyse d'échelle, les équations de Navier-Stokes peuvent être écrites sous forme simplifiée. En effet, les équations de Navier-Stokes d'origine sont elliptiques alors que les équations simplifiées sont paraboliques. Cela simplifie efficacement la résolution de nos équations. La simplification repose sur la division en deux de l'espace dans lequel repose le fluide : la couche limite et le reste de l'espace. La couche limite est donc gouvernée par des équations différentielles faciles à résoudre.

### **2.3 Caractéristiques des métaux liquides (acier inoxydable fondu)**

L'acier inoxydable fondu se caractérise par :

- une conductivité thermique (W/mK) élevée, et une faible capacité de chaleur spécifique.
- une faible viscosité cinématique, ainsi la couche limite visqueuse est fine et la couche limite thermique est épaisse (voir figure 23).
- des effets visqueux et thermiques qui diffusent simultanément.
- un faible *nombre de Prandtl* ( $Pr \ll 1$ ). Les métaux liquides représentent la plus grande classe de fluides à faible *nombre de Prandtl*.

Le *nombre de Prandtl*, est un nombre non dimensionnel essentiel dans les problèmes de transfert de chaleur convectifs. Il caractérise uniquement les propriétés thermo-physiques du fluide ( $Pr = \gamma / \alpha$  avec  $\gamma = \mu / \rho$  et  $\alpha = k / \rho C_p$ ). Il représente le rapport de la viscosité cinématique  $\gamma$  à la diffusivité thermique  $\alpha$ . La viscosité cinématique est le taux de diffusion pour la quantité de mouvement (vitesse) et la diffusivité thermique est le taux de diffusion pour la chaleur (température). Il compare donc la rapidité des phénomènes thermiques et hydrodynamiques d'un fluide. Un *Prandtl* élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Par contre, un *Prandtl* faible (cas des métaux liquides) indique que la conduction thermique est plus rapide que le profil de vitesse ainsi ce profil de vitesse a peu d'effet sur celui de la température. Nous allons utiliser ce nombre ultérieurement dans l'analyse de nos résultats.



**Figure 23.** Couches limites thermique et dynamique pour un  $Pr \ll 1$

## A. Début du processus et bilan énergétique

La découpe par laser est un processus physique violent. L'étude des effets thermodynamiques engendrés par l'irradiation laser sont complexes aussi bien théoriquement qu'expérimentalement et sont donc difficiles à quantifier. Nous allons dans ce qui suit simplifier le problème en faisant quelques suppositions.

**Echanges thermiques pendant le procédé :** Les échanges thermiques pendant le procédé interviennent lorsque le faisceau laser est absorbé en surface et se font sous trois formes :

- un échange par conduction dans la phase liquide et solide.
- un échange par convection dans la phase liquide en mouvement. Celle-ci déplace alors une quantité de chaleur vers les bords extérieurs de la saignée.
- une perte énergétique correspondant à l'enthalpie de changement de phase.

**1. Calcul des températures de surface et des vitesses de perçage:** Le modèle développé par Semak et Matsunawa [65] a permis de décrire simplement le phénomène d'enfoncement de l'interface irradiée. Ce modèle propose d'estimer la vitesse de perçage en fonction de l'intensité absorbée dans une approximation 1D. Il considère un volume élémentaire avec l'hypothèse qu'un état stationnaire est atteint. Il s'agit de faire un bilan de puissance et de masse sur ce volume où l'interface va s'enfoncer dans la matière à vitesse et à épaisseur constante.

L'un des intérêts de cette analyse est de déterminer le seuil d'intensité absorbée (ou encore la puissance seuil, pour une surface d'irradiation donnée) défini comme étant l'intensité minimum nécessaire à la réalisation d'une découpe laser, c'est-à-dire l'obtention de la température de fusion sur la surface irradiée. Appliquons ce modèle à la surface d'une pièce d'acier inoxydable irradiée par un laser ayant un diamètre de 0.05cm (500 $\mu$ m) en fonction de l'intensité absorbée.

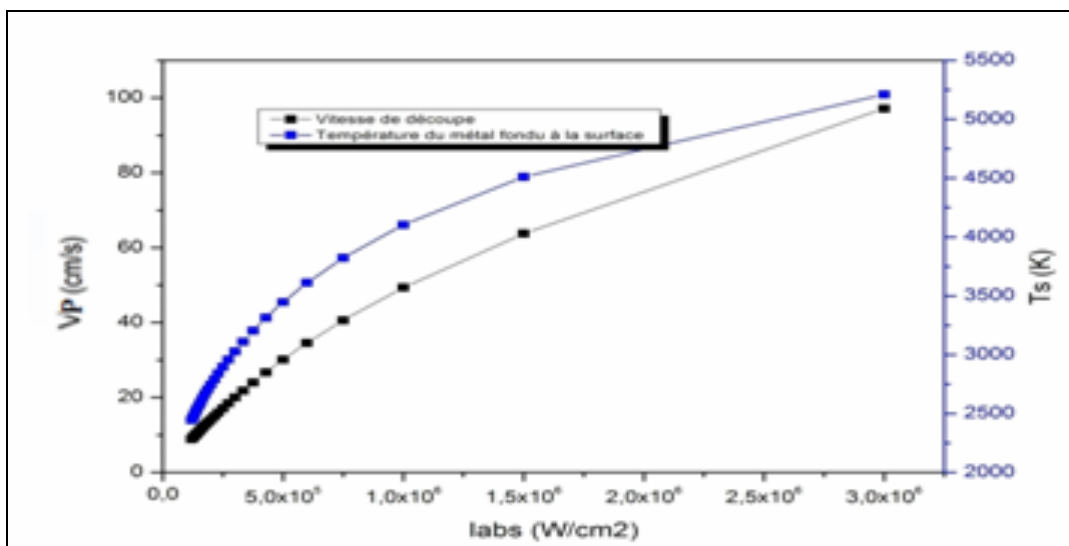


Figure 24. Vitesses de perçage et températures de surface en fonction de l'intensité absorbée pour  $d_1=2r_1=0.5$ mm.

En agrandissant sur la figure la zone de découpe laser par fusion, où on considère une évaporation nulle ou négligeable, on remarque que dans ce cas, pour des températures inférieures à celle de la vaporisation  $T_v (=2770\text{K})$ , la vitesse de perçage de l'acier inoxydable est comprise entre 0.02 et 0.11m/s). Avec

$$V_p = \sqrt{\frac{(\rho_m \alpha_m v_{gm})}{(\rho_s r_l)}} \quad [66]$$

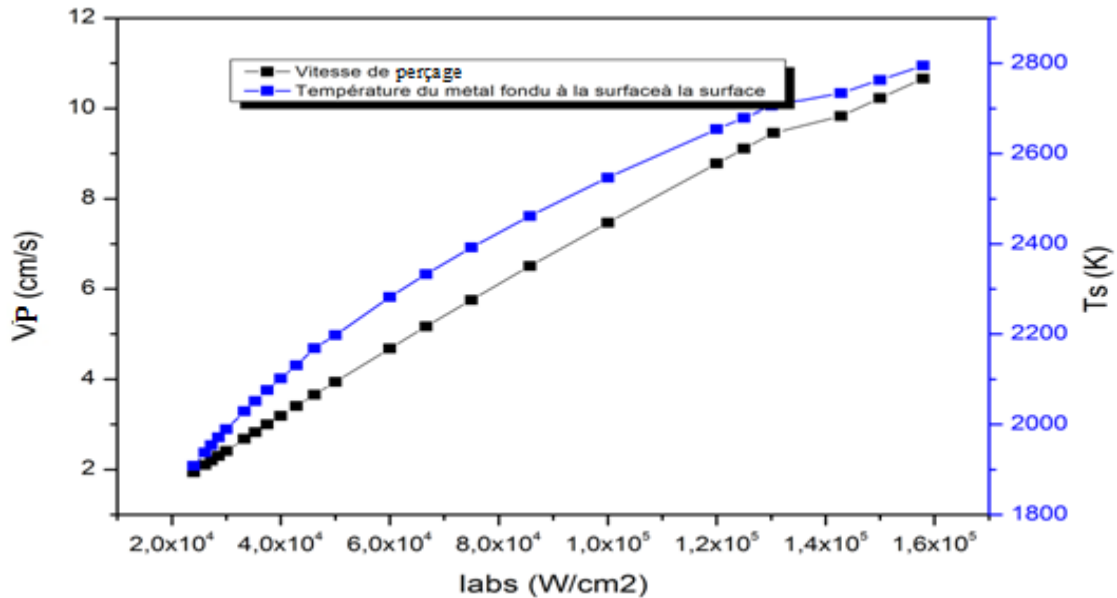


Figure 25. Agrandissement de la zone où l'évaporation est négligeable.

## 2. Calcul du pourcentage des pertes par conduction, convection et évaporation

En suivant toujours le modèle développé par Semak et Matsunawa [65], les pourcentages de transfert par conduction, convection et évaporation sont représentés sur la figure ci-dessous en fonction de l'intensité laser absorbée.

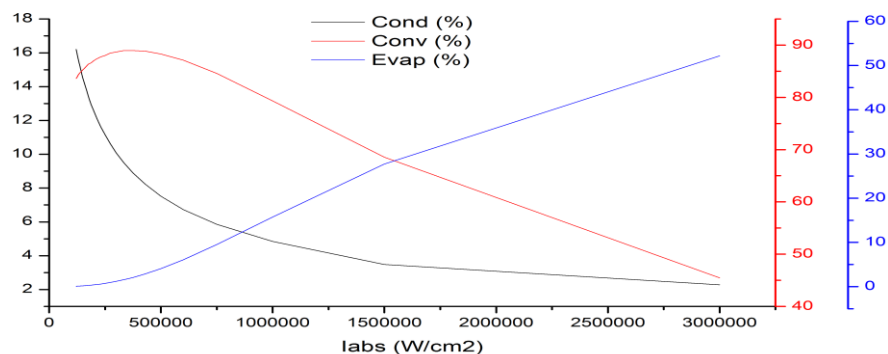
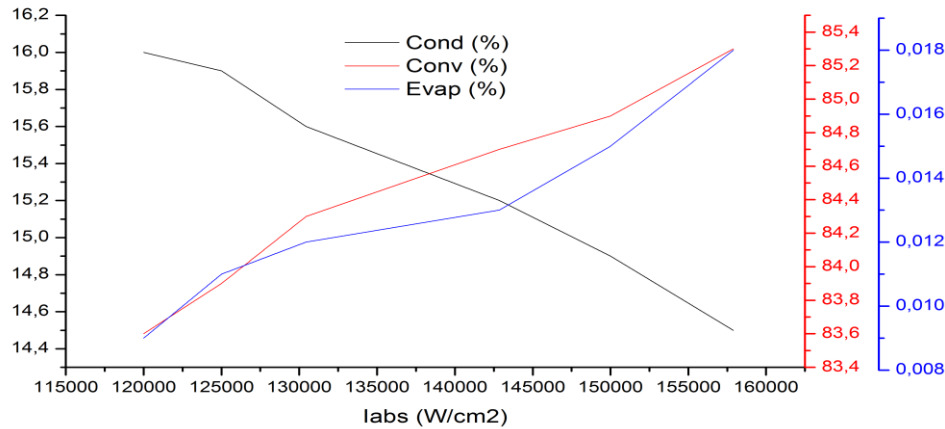


Figure 26. Pourcentage des pertes par conduction, convection et évaporation en fonction de l'intensité absorbée.

L'agrandissement de la zone où peut se réaliser une découpe laser par fusion (l'évaporation est négligeable), correspond à  $I_{abs}$  inférieure à  $1.6\text{MW/cm}^2$ .



**Figure 27.** Agrandissement de la zone où l'évaporation est négligeable.

Dans la zone où peut se présenter une découpe laser par fusion et où l'évaporation est négligeable (prenons un pourcentage d'évaporation faible de : 0.5% par exemple), c'est la convection qui domine entre 83 et 87%, ce qui signifie qu'il y a présence d'un métal fondu en mouvement. Cette quantité de métal devient de plus en plus présente avec l'augmentation de l'intensité absorbée, ce qui entraîne une diminution légère de la conduction (de 16.3 à 12.2 %) et une augmentation de la convection puisque le métal liquide devient de plus en plus présent.

**Remarque importante :** Si on utilise le jet de gaz pour évacuer le métal liquide, la convection naturelle sera alors négligée et il n'y aura que la conduction qui domine ainsi que la convection forcée due au jet de gaz d'assistance.

### 3. Estimation de la pression de recul dans le cas d'une découpe laser

Il est essentiel d'estimer la pression de recul lors du processus de découpe laser afin de décrire convenablement les phénomènes physiques qui rentrent en jeu. Dans quelques modèles analytiques la pression de recul a été prise comme étant le mécanisme fondamental de l'éjection latérale du métal fondu [66, 21, 67]. Il a été aussi démontré que l'éjection latérale peut être du même ordre que l'éjection longitudinale malgré que la température de surface soit en dessous de la température d'évaporation  $T_v$  [66, 20]. Mais, une étude expérimentale sur la distribution de la température sur le front avant de la saignée [68] indique que  $T_s$  atteint  $T_v$  dans une région située dans la partie basse de la saignée. Une autre étude expérimentale récente, faite par Hirano et Fabbro en 2012 [22], a montré que le liquide s'écoule vers le bas avec pratiquement aucune composante de vitesse latérale, excepté pour une gamme de vitesses de découpe élevées où  $T_s$  est probablement proche de  $T_v$ . Ces observations ont été suivies d'un article rédigé par Hirano et Fabbro apparu en (2014) [23]. Il a été démontré que la température de surface limite qui permet

la déformation initiale de la surface du matériau doit au moins atteindre la température de vaporisation. D'ailleurs cette pression de recul est quelquefois appelée pression d'évaporation ou pression d'ablation. Dans l'article de Semak et Matsunawa [65] la conclusion trouvée et qui s'avère en contradiction avec les conclusions de Hirano et Fabbro [23] précise que la pression de recul peut jouer un rôle significatif dans l'éjection du métal fondu se trouvant dans la zone d'interaction même pour des températures de surface proche du point de fusion. On se doit donc de tenir compte de certaines interprétations sur le rôle de la pression de recul dans le processus de découpe laser.

Bien évidemment l'éjection latérale induite par la pression de recul peut devenir importante lorsque  $T_s$  est plus élevée que  $T_v$ . Par exemple, dans la découpe laser à distance de l'acier, où le gaz assistant n'est pas utilisé,  $T_s$  doit être élevée et l'éjection par la pression de recul doit être alors le mécanisme principal de l'éjection du liquide.

Ainsi en découpe laser par fusion, pratiquement tout le métal fondu produit dans la zone d'interaction est extrait sous un régime hydrodynamique et assuré par le jet de gaz.

**Pression de recul dans notre cas d'étude :** Dans le cas d'une découpe laser de l'acier inoxydable, il est essentiel d'estimer la pression de recul afin de décrire convenablement les phénomènes physiques mis en jeu (fig 28).

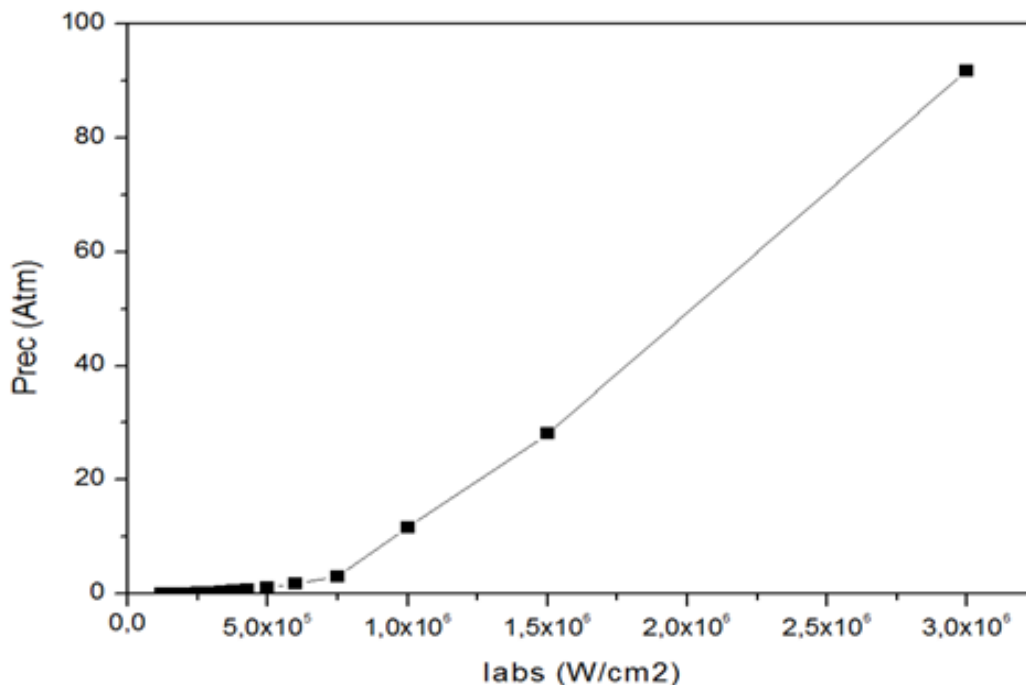
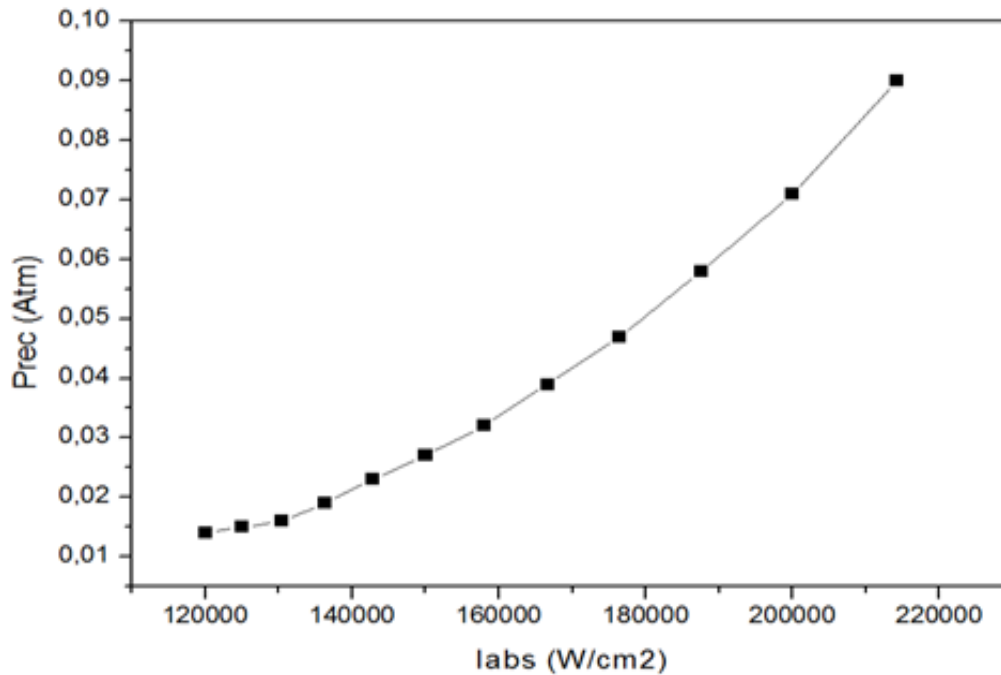


Figure 28. Pression de recul en fonction de l'intensité absorbée.



**Figure 29.** Agrandissement de la zone où l'évaporation est négligeable dans la figure 28.

Dans le cas d'une découpe laser par fusion de l'acier inoxydable, si la température au fond de la saignée atteint celle de la vaporisation  $T_v$ , la pression de recul, existe mais elle reste négligeable, elle est de l'ordre de 0.09 atm maximum (voir figure 29). Si par contre la température de surface est strictement inférieure à la température de vaporisation  $T_s < T_v = 2770K$  tout en restant proche de celle-ci (ce qui correspond à  $I_{abs}$  inférieure à  $1.6 \cdot 10^5 W/cm^2 = 1.6 \cdot 10^9 W/m^2$ ), la pression de recul reste toujours négligeable et est inférieure ou égale à 0.03atm.

Nous avons donc démontré que durant le processus de découpe laser par fusion, la pression de recul contribue faiblement à l'éjection du matériau car la température de surface est inférieure à celle de la vaporisation ( $T_s < T_v$ ).

C'est un résultat important car dans certains modèles analytiques de découpe laser assistée avec un jet de gaz, la pression de recul a été prise en considération comme mécanisme contrôlant l'éjection latérale du liquide sur le front avant de la saignée, du centre vers les côtés. L'absence de l'éjection latérale suggère donc que le gaz d'assistance soit le seul mécanisme d'éjection du liquide de la saignée. Ainsi on peut dire que la déformation initiale de la surface supérieure du matériau est due essentiellement au gaz et seulement au gaz d'assistance.

Ce résultat, nous permet alors de nous concentrer uniquement sur l'éjection par le gaz d'assistance dans les discussions suivantes, ce qui simplifiera considérablement nos analyses et nos interprétations.

#### 4. Mouvement latéral du métal fondu au début du processus

Au niveau du front avant de la saignée de découpe, le métal est présent sous les trois phases thermodynamiques, solide, liquide et éventuellement vapeur. Rappelons que dans le cas d'une découpe laser par fusion, la phase vapeur est inexistante.

L'irradiation laser gaussienne du front de découpe génère un champ de température hétérogène sur la face supérieure de la pièce. En conséquence il y a création d'une tension de surface responsable du mouvement latéral de métal fondu. Ainsi on peut dire que pour la surface libre du bain, la force de la tension superficielle est le moteur principal des mouvements de convection dus aux importants gradients de température présents en découpe. Cette tension tend à fermer la saignée tandis que l'action du jet de gaz tend à l'ouvrir.

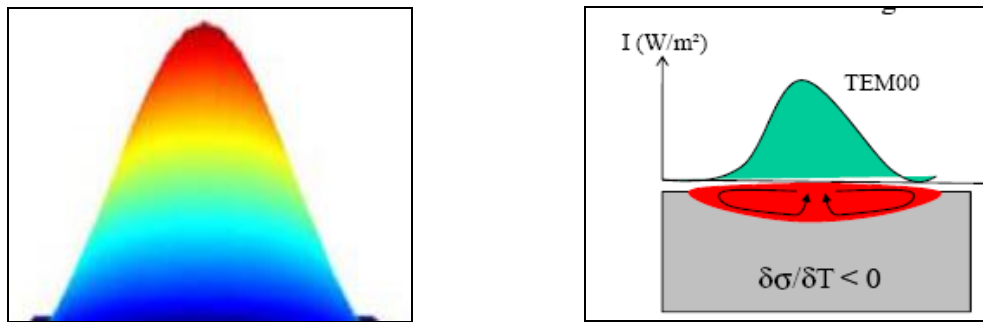


Figure 30. Distribution gaussienne et mouvement latéral du métal fondu pour un mode TEM<sub>00</sub>.

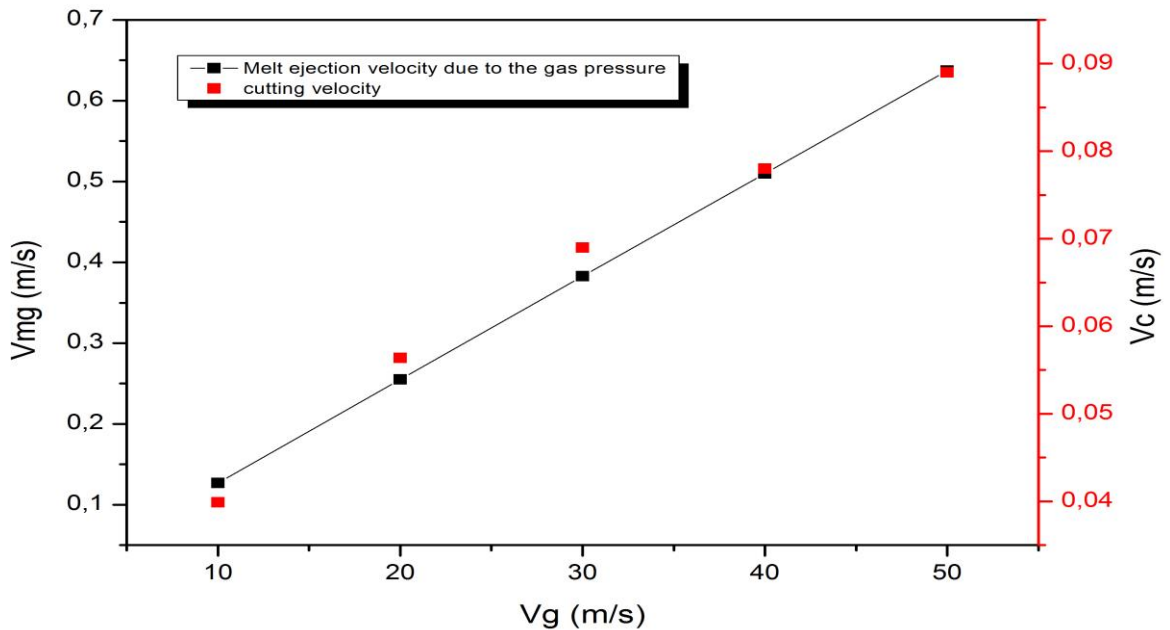
Notons que le mode fondamental TEM<sub>00</sub> d'un laser gaussien est le plus utilisé pour la découpe laser. Comme l'acier inoxydable fondu est caractérisé d'un coefficient thermocapillaire inférieur à zéro, il s'ensuit un élargissement de la zone fondu qui se produit par l'effet des mouvements centrifuges comme le montre la figure ci dessus.

Lorsque l'action du jet de gaz ainsi que l'action éventuelle de la pression de recul agissent sur la face supérieure de l'échantillon, nous observons une déformation progressive de l'interface liquide/gaz : un puits se forme progressivement et quand la température de la surface inférieure de l'échantillon atteint celle de fusion du métal, le puits débouche et le liquide peut être éjecté sous l'action tangentielle du jet de gaz. Supposons maintenant que l'échantillon soit en mouvement relatif par rapport au laser, nous générons alors une saignée de découpe.

#### 5. Calcul des vitesses de perçage et des vitesses du métal fondu sous l'influence d'un jet de gaz d'azote

Calculons en valeur absolue les vitesses d'éjection du métal fondu produites lors d'une découpe laser par fusion d'une pièce d'acier inoxydable assistée avec un jet de gaz d'azote en régime laminaire ( $U_g=10, 20, 30, 40, 50$  m/s). La vitesse exercée par le jet de gaz sur le métal s'écrit

comme suit:  $V_{mg} = \sqrt{(2P_g / \rho_m)} = |U_g \sqrt{(\rho_g / \rho_m)}|$  et la vitesse de perçage:  $V_p = \sqrt{\frac{(\rho_m \alpha_m v_{gm})}{(\rho_s r_l)}}$



**Figure 31.** Vitesses de cisaillement du film métallique par le jet de gaz et vitesses de perçage en fonction de la vitesse du jet de gaz.

On remarque que pour les vitesses choisies du gaz d'assistance (10-50m/s), la vitesse de l'écoulement du métal fondu reste dans la gamme de vitesse (0.15-0.65m/s). Puisque cette vitesse est très faible et que l'écoulement est dirigé le long du front de découpe, il est raisonnable de prédire que la puissance laser absorbée à la surface du film métallique est transférée dans le matériau solide principalement par conduction.

On peut aussi remarquer que les vitesses de perçage sont largement inférieures aux vitesses du métal entraîné par le jet de gaz ( $V_p \ll V_{gm}$ ).

**Remarque :** Lorsque l'état stationnaire est atteint, le front de découpe se propage dans le matériau avec une vitesse qui peut être déterminée par l'intensité laser absorbée. Cette vitesse peut être plus petite ou plus grande que la vitesse de translation de la source laser. Mais pour la découpe laser, par soucis de simplifier, on suppose que ces deux vitesses sont égales.

## 6. Bilan énergétique

Durant le processus de découpe en général, lorsque la lumière laser est répartie sur la surface supérieure de la pièce, une grande partie de la radiation lumineuse pénètre dans la pièce à travers la saignée, tandis qu'une autre partie est réfléchiée par la surface non fondue. Les principales pertes d'énergie à travers la saignée consistent en :

- 1) une transmission directe de la puissance laser.
- 2) une lumière laser réfléchiée intérieurement et extérieurement.

Le bilan énergétique peut s'écrire dans sa forme générale comme:

$$P_1 = P_c + P_{\text{pert1}} + P_{\text{pert2}}$$

$P_1$  : est la puissance laser globale arrivant sur le matériau.

$P_c$  : est la puissance consommée par le processus de découpe.

$P_{\text{pert1}}$  : est la première perte de puissance (primaire).

$P_{\text{pert2}}$  : est la seconde perte de puissance (secondaire).

$$P_c = P_d + P_m + P_v$$

$P_d$  : est l'énergie nécessaire pour chauffer le matériau en volume dans la zone de découpe.

$P_m$  : est l'énergie exigée pour fusionner le volume du matériau dans la zone de découpe.

$P_v$  : est l'énergie éventuelle consommée en cas de vaporisation du matériau fusionné.

$$P_{\text{pert1}} = P_{\text{trans}} + P_{\text{refle}}$$

$P_{\text{trans}}$  : est la partie de l'énergie entrante dans la pièce mais qui quitte cette dernière sans interaction avec le front de découpe.

$P_{\text{refle}}$  : est l'énergie réfléchiée intérieurement et extérieurement par le front de découpe.

$P_{\text{pert2}}$  : est l'énergie qui quitte le front de découpe par des mécanismes de transformations thermiques tels que la conduction, la convection et la radiation.

$$P_{\text{pert2}} = P_{\text{cond}} + P_{\text{conv}} + P_{\text{rad}}$$

Nous avons déjà démontré au paragraphe précédent que dans le cas d'une découpe par fusion assistée avec un jet de gaz, la portion des pertes d'énergies secondaires par conduction est plus élevée par rapport aux pertes par convection et évaporation. Ainsi  $P_v = P_{\text{conv}} \approx 0$ .

Pour une pièce d'acier inoxydable ayant une épaisseur de 4mm, les transmissions et les réflexions secondaires à l'intérieur de la saignée sont aussi négligeables.

En tenant compte des hypothèses posées précédemment, la radiation n'est pas prise en compte et ainsi notre bilan d'énergie se réduit à :

$$P_1 = P_c + P_{\text{pert1}} + P_{\text{pert2}} = P_d + P_m + P_{\text{cond}}$$

## 7. Conduction et choix du modèle 2D

Au début du processus de découpe laser par fusion et pour des paramètres opératoires bien fixés, il est toujours indispensable de calculer la puissance laser absorbée et celle qui est perdue par conduction de chaleur (pertes dominantes) dans le solide. Cette dernière n'intervient pas dans la fusion du matériau, qui est le principe fondamental du procédé. Ainsi il est nécessaire d'estimer cette perte pour pouvoir déterminer l'efficacité du procédé et aussi prévoir la vitesse maximum de découpe et l'intensité seuil.

Comme la solution de l'équation de la chaleur dépend fortement de la dimension 1D, 2D ou 3D utilisée, il est donc indispensable de savoir laquelle des géométries nous devons choisir dans notre cas d'étude.

Nous avons opté pour la dimension « 2D » (chauffage par une source de chaleur linéaire), qui est la plus adéquate. En effet, elle convient mieux à notre problème car la largeur de notre saignée ainsi que l'épaisseur de notre pièce (4mm) sont beaucoup plus grandes que la distance caractéristique de la distribution de température qui se propage à proximité du front de la saignée.

**Source mobile ( $V_c \neq 0$ ) :** Dans le cas général d'un déplacement relatif laser-pièce ( $V_c > 0$ ), la perte par conduction de chaleur latérale a été évaluée à partir de simulations numériques [22] par la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel commercial COMSOL.

L'analyse s'est donc focalisée sur la conduction de chaleur dans une section du matériau, située à l'intérieur de l'échantillon et dont la surface de la saignée est quasi-parallèle à l'axe du faisceau laser. En raison toujours de la faible épaisseur du film métallique comparé à la largeur de la saignée, on peut considérer que le transfert de chaleur est unidirectionnel.

Dans ce qui suit nous allons considérer une source laser en mouvement et une fusion continue de l'interface solide/liquide. Après fusion le métal fondu est évacué immédiatement en laissant une épaisseur de film métallique très fine, de telle sorte qu'on puisse supposer que la température de fusion est située sur le front de découpe.

Nous avons aussi supposé que :

- le front de découpe est un demi-cercle de rayon  $r_0$ , presque égal au rayon de la source laser.
- l'interface liquide /solide est une isotherme de fusion et est une ligne droite parallèle à l'axe du faisceau laser.
- l'isotherme de fusion se déplace dans le matériau solide à la vitesse de fusion  $V_f$  et cette vitesse  $V_f$  est considérée comme étant la vitesse de découpe  $V_c$ .
- les propriétés physiques du matériau dans les deux phases liquide et solide sont constantes.

La découpe d'une épaisseur donnée d'une pièce métallique nécessite la détermination de la puissance laser seuil qui est la puissance nécessaire à la fusion. Elle se compose d'une puissance dépensée pour la fusion de la partie centrale de la saignée et de la puissance perdue par conduction vers les parties latérales, à l'extérieur donc de la saignée.

Introduisons la puissance  $P_s$ , qui est la puissance nécessaire pour augmenter la température de surface du front de la saignée à la température de fusion  $T_f$ . Ce terme est divisé en deux composantes :

$$P_s = P_{\text{chaleur axiale}} + P_{\text{pertes cond}}$$

$P_{\text{chaleur axiale}}$  est l'énergie nécessaire pour chauffer la région axiale.

$P_{\text{pertes cond}}$  est l'énergie perdue latéralement par conduction.

Introduisons un facteur  $f$  qui relie les deux puissances :

$$f = P_{\text{pertes cond}} / P_{\text{chaleur axiale}}$$

$$P_s = (1+f) P_{\text{chaleur axiale}} = (1+f) \rho_m C_{pm} (T_f - T_0) V_c (2r_0)$$

Avec  $P_s$  : puissance par unité de longueur ( $d$ ) de la pièce qui peut s'écrire en fonction du *nombre de Peclet* comme suit :

$$P_s = 2 (1+f) K_m (T_f - T_0) Pe \text{ avec } Pe = r_0 V_c / \alpha : \text{ nombre de Peclet}$$

Le *nombre de Peclet*  $Pe$ , est un nombre sans dimension utilisé en transfert thermique. Il représente le rapport de deux temps caractéristiques : celui du transfert par convection et celui du transfert par conduction. Il est équivalent au produit du *nombre de Reynolds* et du *nombre de Prandtl* dans le cas du transfert thermique.

Dans notre cas, le *nombre de Peclet* est un nombre adimensionnel qui représente le rapport entre le rayon  $r_0$  de la saignée à la distance caractéristique du champ de température ( $\alpha/V_c$ ) qui est créée dans la partie solide située à proximité de la source laser.

Le flux de chaleur par conduction sur le front de la saignée s'écrit comme suit :  $q_{\text{cond}}(\mathcal{D}) = -K_m$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0}$$

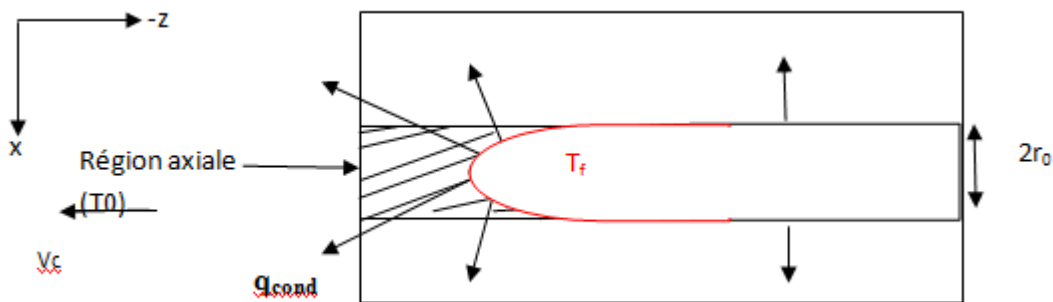


Figure 32. Transfert de chaleur par conduction

Cette figure est une coupe transverse représentant l'intérieur de la pièce à découper (les faces supérieure et inférieure ne sont pas montrées), ainsi la distance caractéristique devant le front de découpe est très inférieure aux dimensions de la pièce elle-même. Il s'ensuit, une conduction négligeable dans ce sens ( $z$ ) et on ne tiendra compte uniquement que de la conduction latérale (selon  $x$ ). Nous confirmons le choix de la dimension 2D sur le plan ( $x, y$ ) pour le traitement de notre problème. Sachant que le deuxième terme  $P_m$  du bilan de puissance est la puissance nécessaire pour la fusion :

$$P_m = \rho_m L_f V_c (2r_0)$$

La somme s'écrit :  $P_s + P_m = Pe [2 (1+f) K_m (T_f - T_0)] + St_e^{-1} K_m (T_f - T_0) Pe$

Avec  $St_e = C_{pm} (T_f - T_0) / L_f$

$St_e$  est le nombre de Stefan qui est sans dimension et utilisé en transfert thermique lors d'un changement de phase solide-liquide. Il représente le rapport entre la chaleur sensible et la chaleur latente.

Comme mentionné précédemment, seulement la partie solide est prise en compte car la partie fondue du matériau est supposée évacuée instantanément une fois que sa température atteint  $T_f$  (température de fusion).

En tenant compte du terme convectif, qui correspond à la vitesse de déplacement de la source laser, nous obtenons l'équation de transfert de chaleur à l'état stationnaire suivante:

$$V_c \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (*)$$

Dans ce cas, les conditions aux limites (voir figure 32) sont:

- $T=T_f$  sur les bords de la saignée
- $T=T_0$  à l'entrée du volume de contrôle (entrée de la partie centrale)
- $q_{\text{cond}}(\mathcal{D}) = -K_m \frac{\partial T}{\partial r} |_{r=r_0}$  (\*\*), sur le front de la saignée (en réalité négligeable comparé à la conduction latérale)

La puissance  $P_s$  exigée par unité d'épaisseur est obtenue en intégrant le flux  $q_{\text{cond}}$  à travers l'arc du front de la saignée.

Avec l'introduction des paramètres et variables adimensionnels pour simplifier nos calculs:

$$X' = x/r_0, \quad y' = y/r_0, \quad T' = T/(T_f - T_0)$$

$$q'_{\text{cond}} = q_{\text{cond}}/K_m(T_f - T_0)/r_0 = [r_0/K_m(T_f - T_0)] q_{\text{cond}}$$

Ainsi (\*) et l'intégrale de (\*\*) sur l'angle  $\beta$ , peuvent être réécrites en fonction de ces nouvelles variables.

Lorsque  $Pe$  est donnée, la puissance  $P_s$  exigée pour maintenir la température du front de la saignée à  $T_f$  peut être déterminée sans tenir compte de la combinaison de  $r_0$  et  $V_c$ .

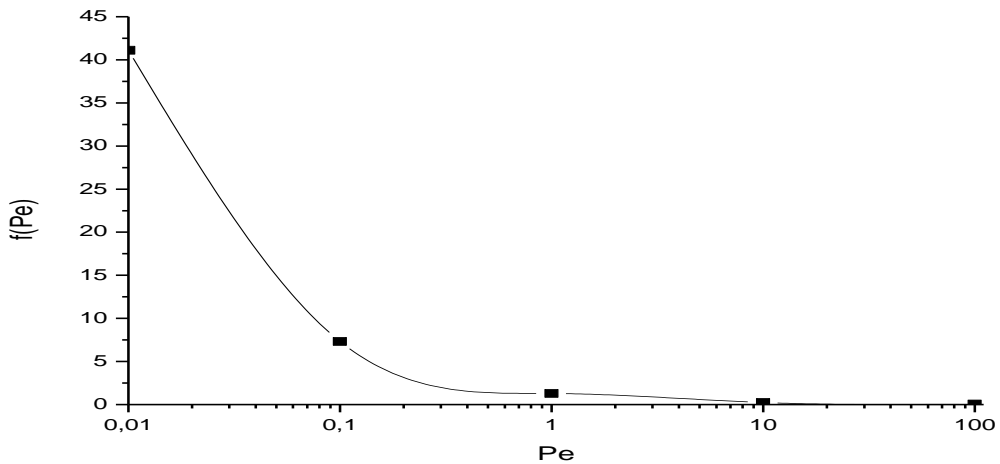
En conclusion nous pouvons dire que la puissance seuil exigée par unité d'épaisseur de la pièce dans le cas d'une découpe laser en 2D dépend uniquement du nombre de Peclet. De même que pour les pertes  $P_{\text{pertes cond}}$  et donc  $f$ .

Le flux de chaleur par conduction sur le front de découpe est alors intégré pour obtenir  $P_s$  (W/m), et il s'ensuit les deux expressions de  $f$  et  $P_s$  suivantes :

$$f(Pe) = 1.3 Pe^{-0.75}$$

$$P_s = (1 + 1.3 Pe^{-0.75}) K_m (T_f - T_0) Pe$$

Cette équation montre bien que quand  $V_c$  tend vers zéro (de même pour  $Pe (V_c)$ ), la puissance  $P_s$  approche zéro. Cela signifie que l'intensité seuil ne peut être définie pour  $V_c=0$  pour le cas 2D. En conclusion, dans le cas de la géométrie (2D), bien que des pertes par conduction latérales existent, une intensité seuil ne peut pas être définie à  $V_c = 0$ . Ainsi, on peut dire que même pour une faible intensité absorbée, la température de surface peut atteindre la température de fusion si on attend suffisamment longtemps.

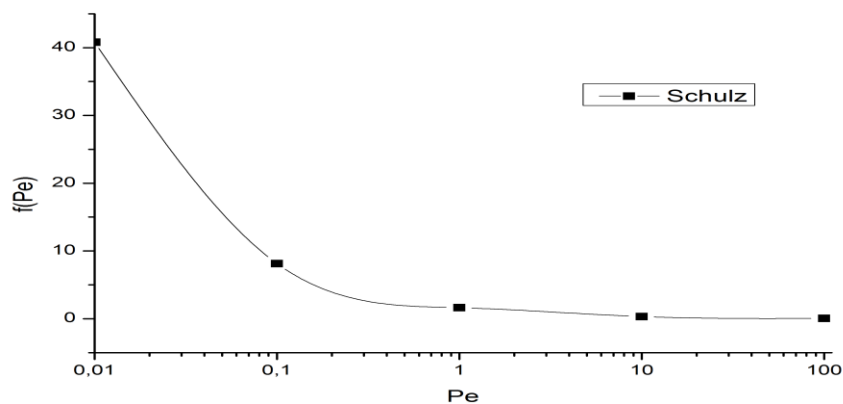


**Figure 33.** Variation de la fonction  $f$  avec le nombre de Peclet.

Les résultats obtenus en utilisant le logiciel COMSOL sont proches de ceux trouvés par la méthode analytique de Schulz *et al.* (1993) [30] :

$$f(Pe) = 2^{0.7} Pe^{-0.7}$$

$$P_s = 4K_m (T_f - T_0) \left[ (Pe/2) + (Pe/2)^{0.3} \right]$$

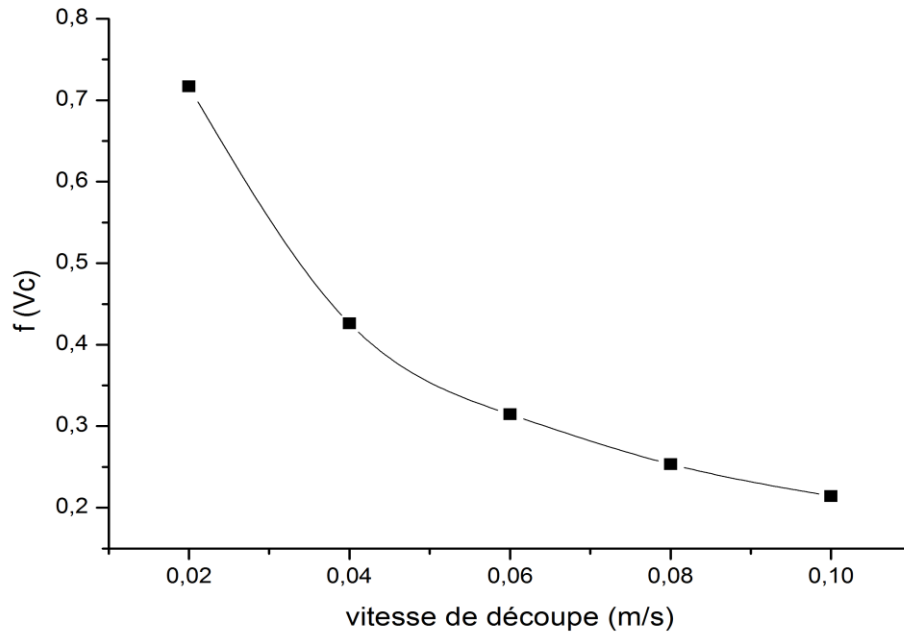


**Figure 34.** Variation de la fonction  $f$  avec le nombre de Peclet [Schulz].

La figure ci-dessus montre bien que la fonction  $f$  diminue lorsque  $Pe$  augmente, c'est à dire que lorsque la vitesse de découpe  $V_c$  augmente les pertes par conduction deviennent plus faibles, ce qui est normal.

### 8. Calcul des pertes par conduction et des intensités seuils

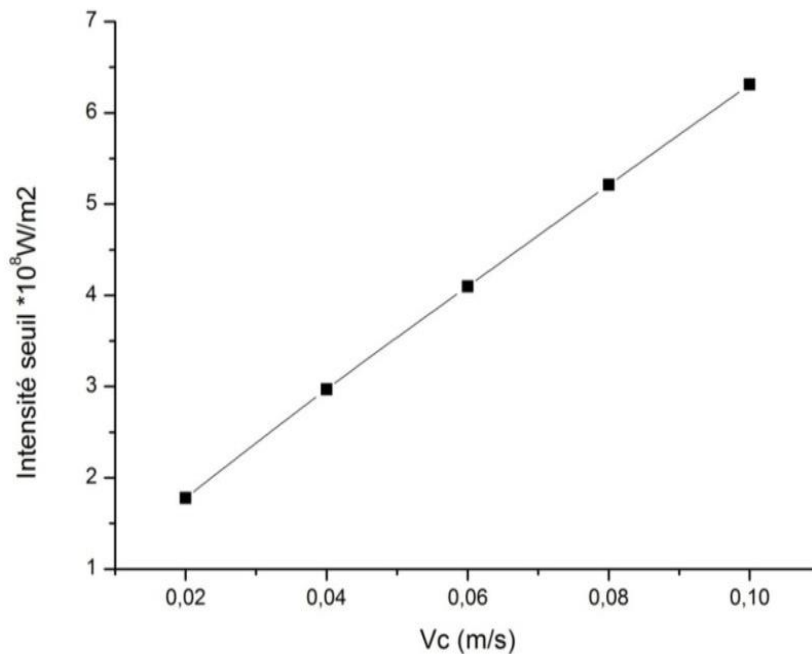
Appliquons le raisonnement précédent à notre cas de découpe laser d'une pièce d'acier inoxydable de 4mm d'épaisseur avec les vitesses de découpe  $V_c$  qui varient entre 0.02 et 0.1m/s (conditions expérimentales). Nous obtenons les figures ci-dessous :



**Figure 35.** Variation de la fonction  $f$  avec la vitesse de découpe.

**Exemple :** Pour un matériau d'acier inoxydable ayant une saignée de rayon  $r_0=0.5\text{mm}$ , le calcul des pertes par conduction dans le cas où  $V_c=0.01$  et  $0.1\text{m/s}$  donnent :

- Si  $V_c= 0.01\text{m/s}$ ,  $Pe =1.111$ ,  $f(V_c)= 0.75$
- Si  $V_c= 0.1\text{m/s}$ ,  $Pe= 11.1$ ,  $f(V_c)= 0.22$



**Figure 36.** Variation de l'intensité seuil en fonction de la vitesse de découpe.

Nous remarquons que lorsque la vitesse de découpe augmente, les pertes par conduction diminuent (voir figure 35). Par contre l'intensité (seuil) (par unité de longueur  $d$  de la pièce) nécessaire pour augmenter la température de surface du front de découpe à la température de fusion  $T_f$  croît linéairement avec  $V_c$  (voir figure 36).

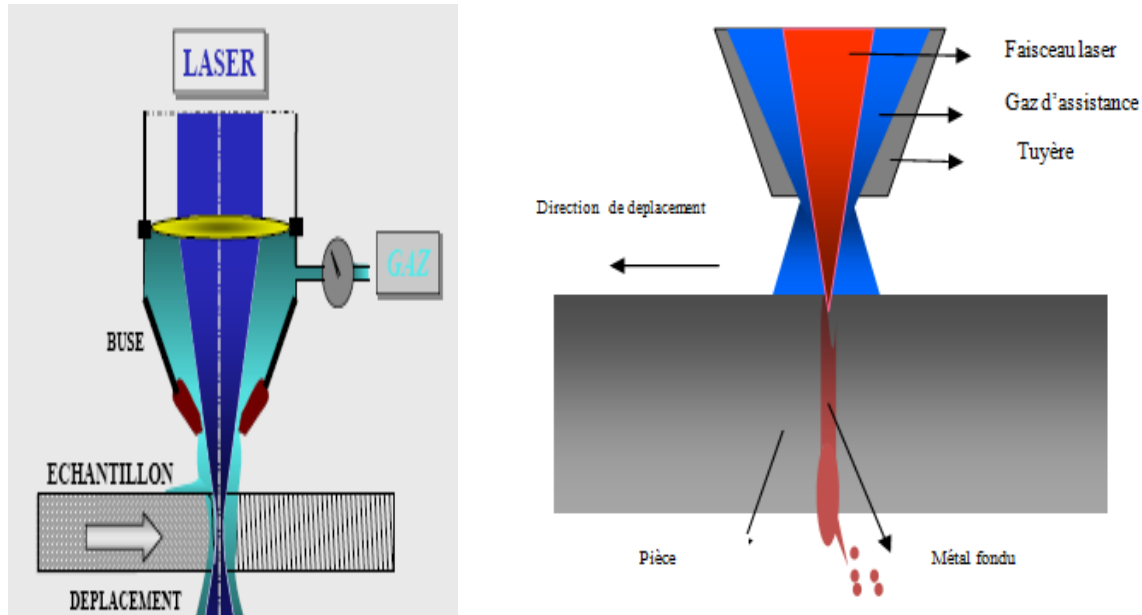
Nous pouvons ainsi conclure que la puissance  $P_s$  exigée est fonction uniquement du nombre de Peclet et la détermination du seuil d'intensité pour une surface d'irradiation donnée (ou puissance seuil) est définie comme étant l'intensité minimum nécessaire à la réalisation d'une découpe laser, c'est-à-dire à l'obtention de la température de fusion sur la surface irradiée.

Lorsque la vitesse de découpe augmente, l'intensité seuil augmente. Nos résultats se rapprochent de ceux trouvés par Fabbro et Mas Cedric [20]. En effet, pour l'acier inoxydable 304L, et pour une vitesse de découpe  $V_c=0.02\text{m/s}$ , la valeur d'intensité seuil obtenue par ces auteurs est  $I_s=2 \cdot 10^8\text{W/m}^2$  et celle que nous obtenons est de  $I_s=1.78 \cdot 10^8\text{W/m}^2$ .

**Remarque :** L'usinage des métaux se fait à des densités de puissance situées entre  $10^9$  et  $10^{12}\text{W/m}^2$  et nous avons constaté que pour l'acier inoxydable, les intensités seuils sont de l'ordre de  $10^8\text{W/m}^2$ . L'intensité seuil reste dépendante de la vitesse de découpe qui varie dans notre cas entre 0.02 et 0.1m/s.

## B. Caractéristiques de l'écoulement du métal fondu dans la saignée

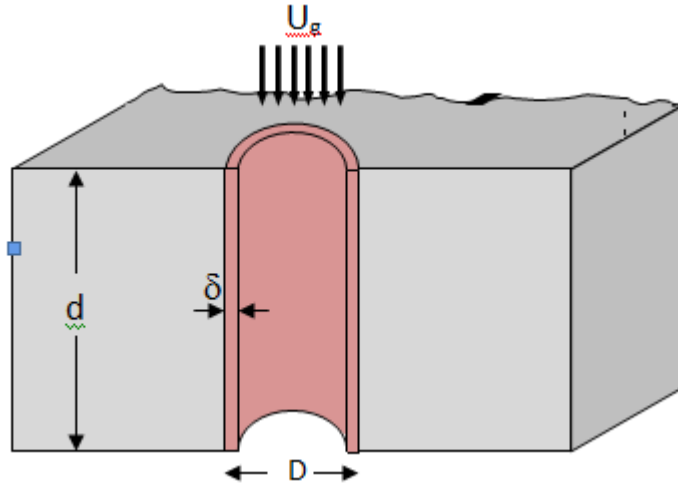
Nous nous intéressons dans ce qui suit à l'aspect hydrodynamique et thermique du métal fondu dans la saignée d'une découpe laser par fusion [69-71] de l'acier inoxydable. Rappelons que le métal fondu est obtenu en focalisant un rayon laser sur une petite surface de la pièce. Le laser et le jet de gaz d'assistance sont disposés coaxialement (voir figure 37). En raison de la convection forcée résultante, une éjection de ce dernier et un refroidissement du front et des bords de découpe sont observés.



### Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier le problème de l'écoulement du métal fondu (liquide) et celui du jet de gaz d'assistance, nous posons les hypothèses suivantes:

- Le film métallique est supposé déjà formé avec une épaisseur très petite comparée à la largeur de la saignée, ainsi nous pouvons considérer l'éjection comme un problème à deux dimensions (voir figure 38).
- L'inclinaison du front de découpe est négligeable.
- Les tensions de surface, la vaporisation et la radiation sont négligées.
- Le liquide métallique est supposé être un fluide incompressible laminaire et visqueux.
- Le jet de gaz est laminaire et subsonique.
- Les propriétés du gaz et du film métallique sont considérées comme constantes.



**Figure 38.** Représentation du domaine étudié

Notre objectif est d'étudier l'effet d'un jet de gaz subsonique et laminaire sur les caractéristiques de l'écoulement du métal fondu. Nous avons donc développé une approche purement analytique basée sur la théorie des couches limites. Pour cela, des gaz neutres et inertes, tels que l'azote, l'hélium et l'argon sont utilisés dans le but d'analyser et de déduire lequel est le plus efficace pour l'évacuation de ce métal fondu et le refroidissement des bords de découpe. Ces gaz ne fournissent aucun apport thermique et sont donc introduits simplement pour l'évacuation. Expérimentalement, il a été prouvé que l'argon et l'azote donnent des bords de découpe assez brillants et propres dans le cas d'un jet turbulent. Il est cependant difficile de faire une découpe de l'acier inoxydable avec de l'oxygène.

En supposant que les bords de découpe sont parallèles et droits, et sachant que la largeur de la saignée est d'une dimension micrométrique, celle-ci peut donc être assimilée à un micro-canal. Les micro-canaux, sont caractérisés par des effets à l'entrée qui risquent d'être significatifs et doivent donc être pris en compte.

Plusieurs auteurs ont étudié l'écoulement laminaire et le transfert de chaleur dans la région d'entrée hydrodynamique et thermique des micro-canaux ayant différentes géométries : circulaire, annulaire, rectangulaire et entre deux plans parallèles, à température constantes et à flux uniforme [72-76]. Il a été trouvé que les profils hydrodynamiques et thermiques progressent pour rejoindre asymptotiquement les valeurs de l'écoulement développé et que la distribution du coefficient de transfert de chaleur dépend non seulement du régime d'écoulement (laminaire et turbulent), mais aussi des conditions aux limites thermiques.

Le film métallique très fin adhérent au front de découpe de la saignée rend celle-ci semblable à un micro-canal porté à une température constante. La caractérisation de sa longueur d'entrée est donc indispensable.

À notre connaissance, et selon la littérature, on ne retrouve aucune étude purement analytique, qui serait basée sur la mécanique des fluides et plus précisément sur la théorie des couches limites traitant ce problème d'écoulement gazeux dans la saignée. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes intéressés aux effets de la nature et de la vitesse du jet de gaz (azote, argon et

hélium) sur la qualité de cette découpe. A travers cette étude, nous allons donc analyser et déduire le plus efficace de ces gaz pour l'obtention du meilleur cisailant et le plus adéquat pour le refroidissement du front et des bords de découpe de la pièce.

L'approche analytique consiste en la variation des nombres de Reynolds (vitesse) et de Prandtl gazeux (nature du gaz), dans le but d'étudier les aspects hydrodynamique et thermique de l'écoulement du métal fondu en fonction du jet de gaz dans la saignée.

Nous supposons donc que la saignée est déjà formée avec une largeur de  $500\mu\text{m}$ , et que le front de découpe est porté uniformément à la température de fusion ( $1712\text{K}$ ). Le gaz entre dans la saignée avec une température de  $300\text{K}$  et des vitesses constantes en régime laminaire comprises entre  $(10-50)\text{ m/s}$  : voir figure (39).

## I- Aspect hydrodynamique

**1. Equations de la couche limite métallique :** l'étude dynamique de la couche métallique liquide formée revient à étudier la qualité de la découpe. Il n'y a qu'une fine couche métallique d'environ quelques dizaines de micromètres, et similaire à une couche limite, qui reste adhérente au niveau du front de découpe, et ceci appuie la supposition de l'approche bidimensionnelle [77]. Nous supposons que la saignée formée est uniforme.

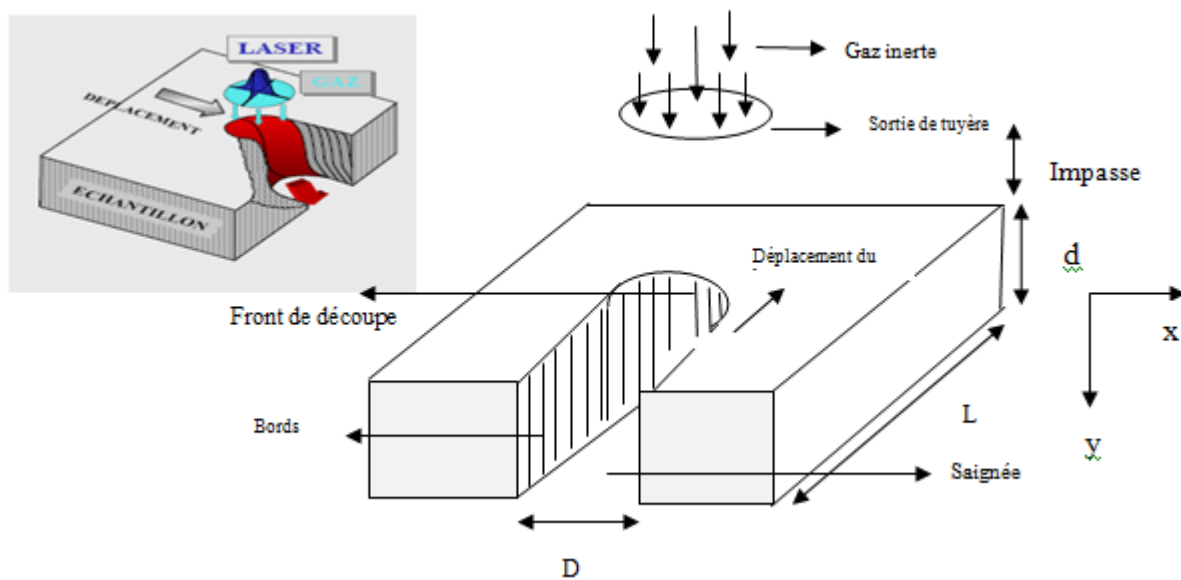


Figure 39. Représentation d'une saignée uniforme de découpe laser

L'éjection du métal fondu est principalement conduite par deux forces exercées par le jet de gaz d'assistance, incluant: la force de cisaillement à l'interface et le gradient de pression.

Pour l'obtention d'une découpe complète d'une pièce de 4mm d'épaisseur avec un faisceau laser CO<sub>2</sub> (10.6µm), un mode fondamental (TEM<sub>00</sub>), un facteur de qualité M<sup>2</sup> de 2.17 et une puissance d'environ 2kW, il est recommandé de procéder avec une vitesse de découpe faible (0.02m/s) (thèse de C. Mas [20]). Dans ce qui suit nous avons fixé l'axe des y dans la direction de l'écoulement et l'axe x est perpendiculaire au front de découpe, comme illustré sur la figure ci-dessus.

Les équations de la couche limite du métal fondu (Équations de Navier- Stokes), s'écrivent alors comme suit:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + \rho_m (u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_m (\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + \rho_m (u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_g \frac{\partial u_y}{\partial x}) + \mu_m (\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2})$$

$u_x$  et  $u_y$  sont les composantes du vecteur vitesse dans les directions x et y respectivement.  $\rho_m$  est la masse volumique du film métallique,  $\mu_m$  sa viscosité dynamique, et  $\mu_g$  la viscosité dynamique du jet de gaz.

L'éjection du métal fondu se fait principalement dans la direction y, il s'ensuit une composante de vitesse transversale négligeable.

Dans ce cas l'équation de continuité se réduit à :

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

En négligeant la vaporisation et les termes convectifs devant ceux de la dissipation visqueuse et en considérant l'équation réduite de la continuité, les équations à un instant bien déterminé se réduisent à:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial x} &= 0 (P = P(y)) \\ 0 &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_g \frac{\partial u_y}{\partial x}) + \mu_m (\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}) \end{aligned} \quad (4)$$

Les conditions aux limites prises à la paroi solide et à l'interface film/gaz s'écrivent de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
x = 0, u_x &= 0 \\
x = \delta_m, \mu_g \left. \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|_{x=\delta_m} &= \tau
\end{aligned}
\tag{5}$$

Nous pouvons donc déduire la vitesse du métal fondu ( $u_m$ ) en fonction de la contrainte de cisaillement  $\tau$  et de la force de pression ( $\frac{\partial P}{\partial y}$ ) exercées par le jet de gaz :

$$\begin{aligned}
0 &= -\frac{\partial P}{\partial y} + (\mu_g + \mu_m) \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \Rightarrow \\
u_m = u_y &= \frac{1}{(\mu_g + \mu_m)} \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right) \left[ \frac{x^2}{2} - \delta_m x \right] + \frac{\tau}{\mu_g} x
\end{aligned}
\tag{6}$$

Dans ce qui suit nous allons nous focaliser sur l'évolution de la couche limite métallique puisque son comportement a un rôle dans la détermination de la qualité de découpe.

## 2. Calcul de la longueur d'entrée hydrodynamique du jet de gaz

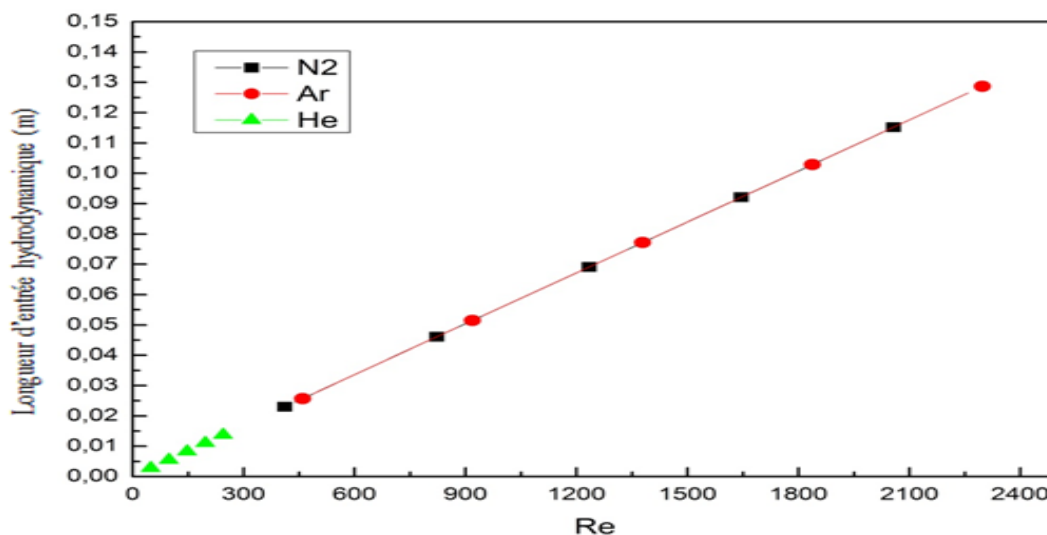
La région d'entrée hydrodynamique est une région qui est en voie de développement, où le profil de vitesses change. Une fois que ce profil devient constant, la région développée ou établie est atteinte. Il est en effet nécessaire de savoir si l'écoulement du gaz à l'intérieur de la saignée est développé ou s'il est en voie de développement. Pour cela, une corrélation donnée par Incropera et Dewitt [78] pour le calcul des longueurs d'entrée hydrodynamiques pour chaque gaz a été utilisée. Cette corrélation est valide uniquement dans le cas d'un écoulement laminaire dans une conduite et est exprimée comme suit :  $L_{ch} \approx 0.05 R_{e-D} D_h$ , où  $R_{e-D} = \rho_g U_g D_h / \mu_g = \rho_g U_g 2D_g / \mu_g$  est le nombre de Reynolds. L'écoulement laminaire est une hypothèse raisonnable puisque le calcul des nombres de Reynolds gazeux est en-dessous de la valeur critique de 2300.

Le Tableau 5 récapitule les longueurs d'entrée hydrodynamiques pour les deux nombres de Reynolds correspondants aux vitesses extrêmes choisies (10-50m/s) et pour les trois gaz utilisés.

**Tableau 5 :** Longueurs d'entrées hydrodynamiques pour les vitesses extrêmes des gaz utilisés.

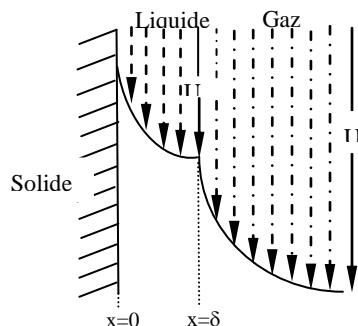
Vitesse (m/s)	10	50
$L_{ch}$ (Azote) (m)	0.0138	0.069
$L_{ch}$ (Argon) (m)	0.0154	0.077
$L_{ch}$ (Helium) (m)	0.0041	0.008

Nous remarquons que toutes les longueurs d'entrée hydrodynamiques calculées sont plus grandes que l'épaisseur de la pièce ( $d=4\text{mm}$ ), et nous pouvons ainsi conclure qu'à l'intérieur de la saignée, l'écoulement est dans une région en voie de développement. A titre d'exemple, dans le tableau 5, et pour ( $U_g=10\text{m/s}$ ,  $Re_D \approx 49$ ), l'écoulement d'hélium peut être considéré comme étant en développement hydrodynamique avec une faible valeur du rapport  $L_{eh}/d = 1.025$ . Mais lorsque le nombre de Reynolds augmente à ( $U_g=50\text{m/s}$ ,  $Re_D \approx 245$ ), ce rapport prend la valeur 2, ceci signifie que l'effet d'entrée hydrodynamique se prolonge doublement en dehors de la saignée. La figure 40 illustre l'évolution linéaire de ces longueurs d'entrée en fonction du nombre de Reynolds et pour les trois gaz.



**Figure 40.** Longueurs d'entrées hydrodynamiques en fonction du nombre de Reynolds gazeux et les trois gaz d'assistance.

Les calculs ont démontré qu'à l'intérieur de la saignée, la région entièrement développée n'est pas encore atteinte; et nous pouvons ainsi conclure que nous traitons un écoulement gazeux laminaire en convection forcée de type couche limite. Comme le profil de vitesses du métal fondu est parabolique, on peut aussi conclure que nous sommes en présence de deux couches limites superposées ayant des profils de vitesses paraboliques comme le montre la figure 41.



**Figure 41.** Profils de vitesse des couches limites métallique et gazeuse.

Ainsi, il faut noter qu'à l'entrée de la saignée, l'écoulement gazeux se divise en deux parties : un écoulement central irrotationnel et un écoulement de type couche limite où les effets de la viscosité ne peuvent être négligés.

### 3. Influence des épaisseurs de couches limites gazeuses sur l'épaisseur du film métallique

Comme les écoulements du gaz et du métal fondu sont de type couche limite, ceci implique que les approximations de ce type de couches peuvent être appliquées aux équations ci-dessus liées au film métallique et qui restent valides pour la couche limite gazeuse (équations semblables mais sans la contrainte de cisaillement).

$$\frac{U_\varepsilon^2}{d} \sim \frac{U_\varepsilon}{\delta_m^2 \rho_m} (\mu_m + \mu_\varepsilon) \Rightarrow \delta_m \sim \sqrt{\frac{d(\mu_m + \mu_\varepsilon)}{\rho_m U_\varepsilon}} \quad (7)$$

$$\delta_\varepsilon \sim \sqrt{\frac{d\mu_\varepsilon}{\rho_\varepsilon U_\varepsilon}} \quad (8)$$

À partir de ces deux relations nous pouvons estimer l'évolution des deux épaisseurs le long de l'axe des ordonnées en substituant  $d$  par  $y$  dans les expressions (7) et (8). Au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entrée de la saignée vers le bas, les épaisseurs  $\delta_g(y)$  et  $\delta_m(y)$  croissent (voir figure 42).

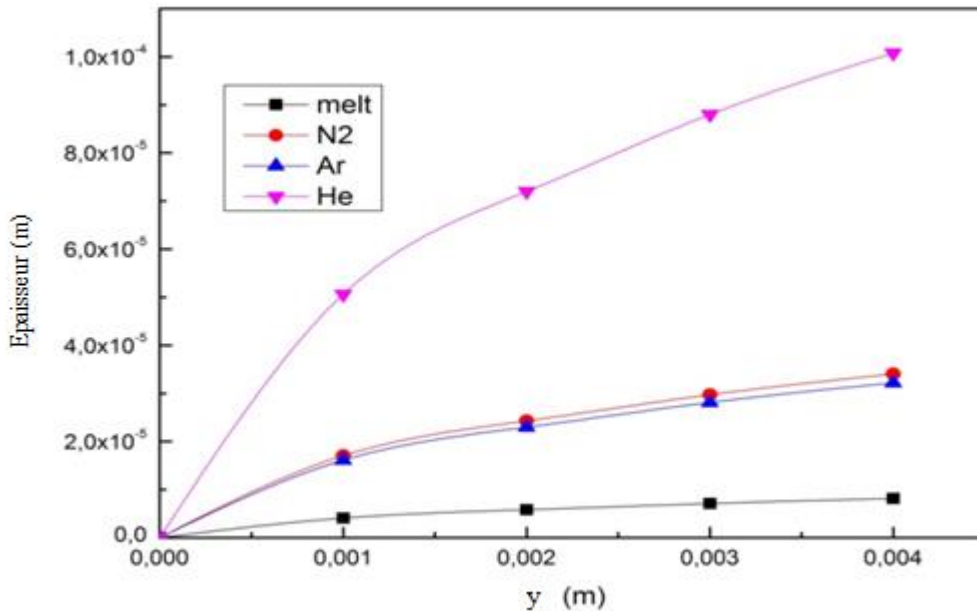
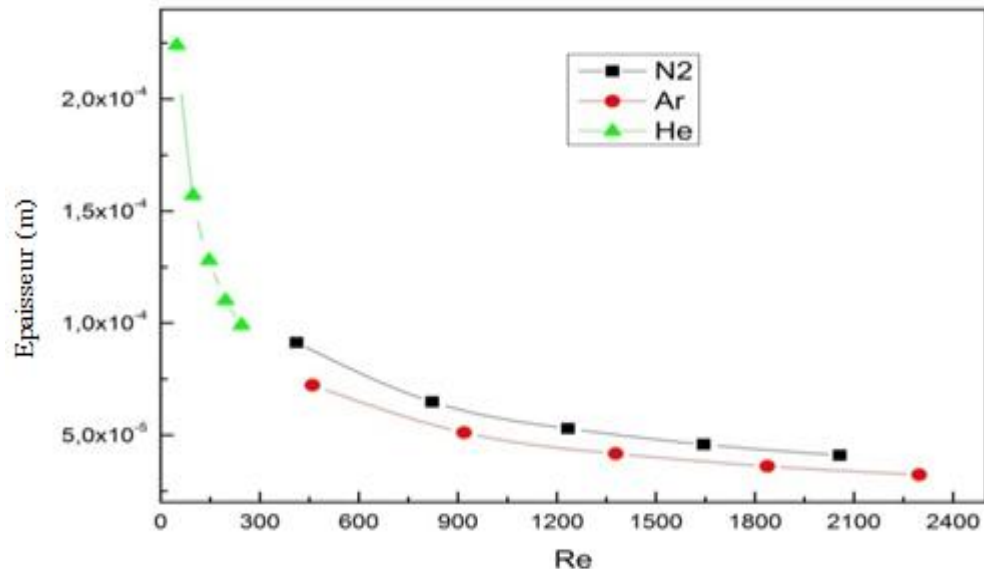


Figure 42. Epaisseurs des couches limites hydrodynamiques le long de la saignée pour  $U_g=50\text{m/s}$ .

Nous pouvons remarquer à partir de la figure 42, que puisque  $\mu_g$  est approximativement le même pour les trois gaz, il s'ensuit que l'épaisseur du film métallique  $\delta_m$  dépendra uniquement du nombre de Reynolds et non pas du nombre de Prandtl (nature du gaz).

La figure 43, illustre la variation de l'épaisseur de la couche limite gazeuse en fonction du nombre de Reynolds. Il est évident que pour une vitesse élevée du jet de gaz (grands nombres de Reynolds) correspond une couche limite gazeuse fine et par conséquent un film métallique plus fin. Ceci est dû à un cisaillement plus important à l'interface film/gaz.

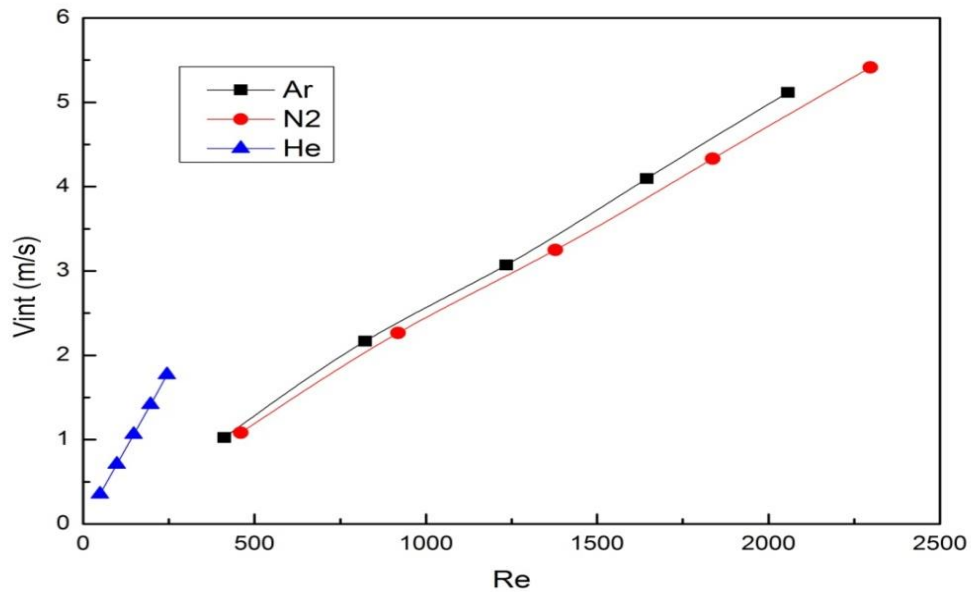


**Figure 43.** Epaisseurs des couches limites hydrodynamiques en fonction du nombre de Reynolds gazeux pour les trois gaz d'assistance.

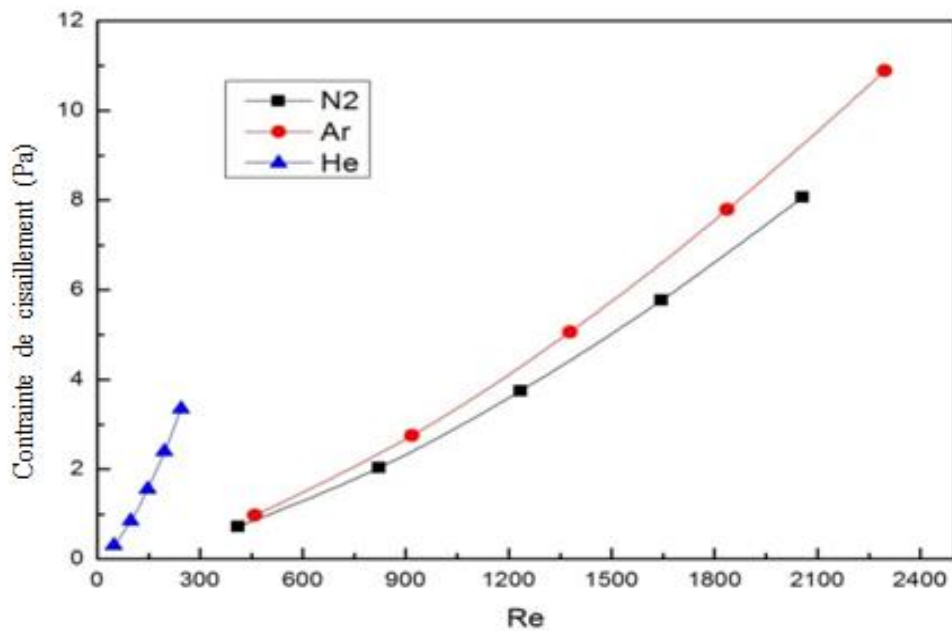
#### 4. Le cisaillement à l'interface gaz/film liquide en fonction du nombre de Reynolds

Pour déterminer la capacité du gaz dans l'évacuation du métal fondu, il est plus pratique de calculer la contrainte de cisaillement, ainsi que la vitesse à l'interface film/gaz. On sait que la vitesse à la paroi solide est nulle et atteint progressivement son maximum à l'interface. En utilisant l'équation (6) nous avons tracé le profil de vitesse à l'interface en fonction du nombre de Reynolds comme le montre la figure 44. L'allure de cette dernière est presque linéaire puisque la composante quadratique liée au gradient de pression demeure très petite comparée au terme de la contrainte de cisaillement. Ce résultat est en contradiction avec celui trouvé par Vicanek *et al.* [18] qui conclut que les deux contributions sont du même ordre. Nous pouvons alors nous attendre à avoir un écoulement plus stable puisqu'il est conduit par des forces de cisaillement. La figure 45 illustre l'effet du nombre de Reynolds gazeux sur la variation de la contrainte de cisaillement à l'interface (film/gaz). Il est évident aussi de conclure que pour de grandes vitesses du jet de gaz (grands Re) il s'ensuit un cisaillement plus intense. Dans ce cas on peut dire que la couche limite gazeuse est responsable de l'effort appliqué sur le film métallique et donc sur le front de découpe.

Nous remarquons à partir des figures 44 et 45, que le cisaillement du film d'acier inoxydable avec de l'argon et de l'azote est approximativement identique, par contre, nous observons un faible cisaillement avec de l'hélium qui est caractérisé par une faible densité volumique et donc ne peut entrainer facilement le métal fondu lent et visqueux.



**Figure 44.** Vitesse à l'interface métal/gaz en fonction du nombre de Reynolds gazeux pour les trois gaz.



**Figure 45.** L'intensité de la contrainte de cisaillement en fonction du nombre de Reynolds gazeux pour les trois gaz d'assistance.

## II- Aspect thermique

**1. Calcul des longueurs d'entrée thermiques de l'écoulement gazeux :** La longueur d'entrée thermique est définie comme étant la longueur le long de la saignée à laquelle le coefficient de transfert de chaleur local  $h_y$ , ainsi que la forme du profil de température deviennent constants. La région d'entrée thermique est suivie d'une région thermiquement développée et pour des écoulements laminaires un fluide est thermiquement développé à la longueur suivante:  $L_{et} \approx 0.05 Pr R_{eD} D_h$  [78].

La relation ci-dessus indique que la longueur d'entrée thermique peut être reliée à la longueur d'entrée hydrodynamique par le nombre de Prandtl. Ce nombre de Prandtl est un paramètre non-dimensionnel essentiel dans les problèmes de transfert de chaleur convectifs. En effet, il est le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique. Ce nombre caractérise uniquement les propriétés du fluide et il compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques. Dans un fluide, un nombre de Prandtl élevé indique que le profil de température dans ce fluide sera fortement influencé par son profil de vitesse, par contre, un nombre de Prandtl faible (tels que les métaux liquides) indique que la conductivité thermique est tellement rapide que le profil de vitesses a peu d'effet sur le profil de température. En d'autres termes, pour  $Pr \ll 1$  la chaleur diffuse plus rapidement que la quantité de mouvement et donc la couche limite thermique est plus épaisse que la couche limite dynamique et l'inverse est vrai si  $Pr \gg 1$ . Mais si  $Pr = 1$ , les deux couches limites sont identiques ( $L_{ch} = L_{et}$ ).

Puisque les gaz traités sont l'azote, l'argon et l'hélium, nous sommes dans le cas où le nombre de Prandtl est inférieur mais proche de 1 (voir tableau 6). Ainsi nous pouvons considérer qu'à l'intérieur de la saignée nous sommes toujours dans le cas d'un écoulement en convection forcée dominante de type couche limite thermique.

**Tableau 6:** Propriétés des jets de gaz d'assistance.

<b>Gaz</b>	<b>Azote</b>	<b>Argon</b>	<b>Helium</b>
$\mu_g$ (kg/m-s)	$1.78 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$1.99 \cdot 10^{-5}$
$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.123	1.623	0.1625
$K_g$ (W/m-K)	0.0259	0.018	0.152
$C_p$ (J/kg-K)	1041	520.64	5193.0
$v_g$ (m <sup>2</sup> /s)	$1.586 \cdot 10^{-5}$	$1.356 \cdot 10^{-5}$	$12.2 \cdot 10^{-5}$
Pr	0.72	0.64	0.68

## 2. Influence des épaisseurs thermiques de couche limite gazeuse sur l'épaisseur thermique du film métallique

En négligeant le terme de la dissipation visqueuse et en considérant que la découpe laser est dans un état stationnaire, l'équation d'énergie du jet de gaz peut être écrite comme suit :

$$\rho_g C_{pg} \left( u_{gx} \frac{\partial T}{\partial x} + u_{gy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_g \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

Sachant que l'épaisseur thermique est très petite comparée aux dimensions de la pièce, et en utilisant les approximations de couches limites suivantes :

$$\begin{aligned} u_g(x, y) &\approx U_g, \\ \delta_{gT} &\ll d, \\ u_{gx} &\approx 0 \end{aligned} \quad (10)$$

L'équation ci-dessus peut être simplifiée comme suit:

$$\frac{U_g}{\alpha_g} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (11)$$

Au niveau des couches limites, un fort gradient de température peut être observé et au fur et à mesure que l'on s'éloigne des bords de découpe, la température diminue progressivement pour atteindre celle du jet principal.

Comme,  $\delta_T \ll d$ , nous déduisons que :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \ll \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (12)$$

Et l'équation de conservation de l'énergie est alors simplifiée telle que:

$$\frac{U_g}{\alpha_g} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (13)$$

À partir de la dernière équation, on peut facilement obtenir l'épaisseur thermique de la couche limite :

$$\delta_T \ll \sqrt{\frac{\alpha_g d}{U_g}} \ll \sqrt{\frac{\alpha_g \gamma_g d}{U_g \gamma_g}} \quad (14)$$

Ce qui peut être écrit en fonction du nombre de Prandtl et de l'épaisseur d comme suit :

$$\delta_T \sim \sqrt{\frac{\gamma_\varepsilon d}{U_\varepsilon Pr}} \quad (15)$$

De la figure 46, nous remarquons comme prévu que l'épaisseur thermique du film d'acier inoxydable est plus épaisse que l'épaisseur hydrodynamique  $\delta_{tm} > \delta_{hm}$ , et ceci est dû au fait que le nombre de Prandtl correspondant est très faible pour les métaux liquides ( $Pr_m = 0.04$  pour l'acier inox). Nous pouvons également observer que la couche limite thermique de l'hélium est la plus épaisse comparée aux deux autres gaz (argon, azote), puisqu'elle est caractérisée par une grande viscosité cinématique.

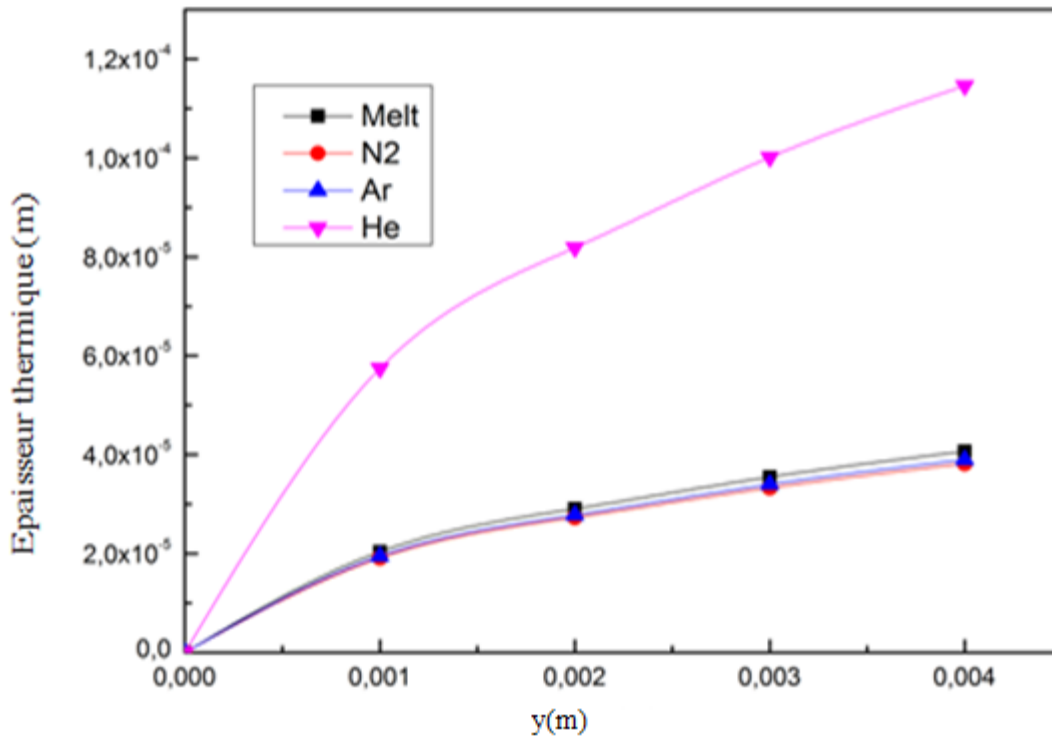


Figure 46. Epaisseurs des couches limites thermiques le long de la saignée.

### 3. Refroidissement et transfert thermique

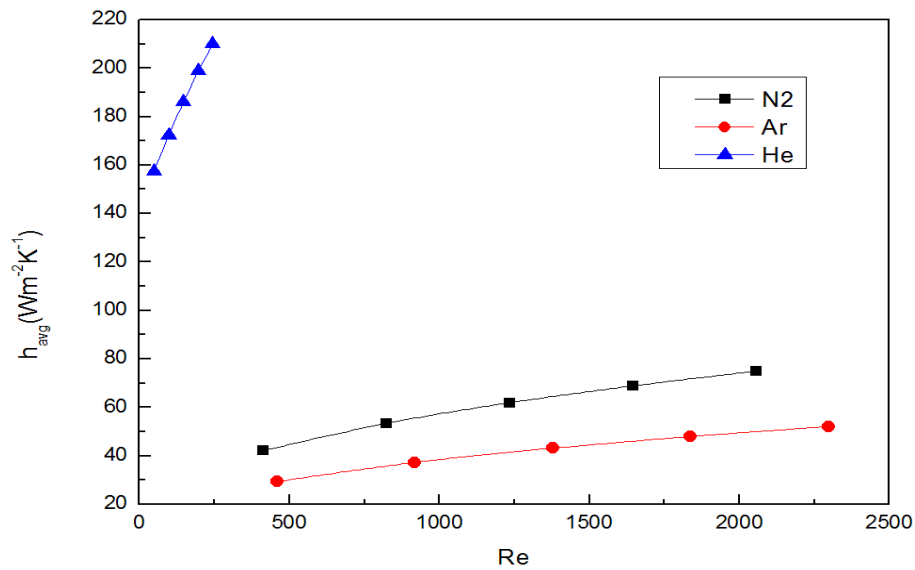
Comme nous sommes dans la configuration où les épaisseurs des couches limites sont trop petites comparées à la largeur de la saignée, l'écoulement dans celle-ci peut donc être assimilé à un écoulement plan laminaire où la valeur du nombre de Reynolds critique est égal à :  $Re_d = U_g d / \nu_g = 5 \times 10^5$ . En conséquence, pour déterminer le transfert thermique, nous utilisons dans ce qui suit le nombre de Reynolds correspondant à une plaque plane. Ainsi la longueur caractéristique considérée est l'épaisseur  $d$  de la pièce. Sachant que le film métallique est porté à une température constante, nous allons ainsi utiliser la corrélation du nombre de Nusselt suivante [78] pour un écoulement laminaire et stationnaire :

$$Nu_{avg} = 0.664 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (16)$$

Cette corrélation implique que le transfert thermique dépend des nombres de Reynolds (vitesse de gaz) et de Prandtl (nature du gaz). Comme  $Nu_{avg} = h_{avg} d / k_g$ , nous pouvons déduire l'expression du coefficient de transfert de chaleur moyen de l'écoulement gazeux suivant :

$$h_{avg} = k_g (0.664 Re_d^{1/2} Pr^{1/3}) / d \quad (17)$$

Sur la figure 47 le coefficient de transfert de chaleur moyen est tracé en fonction du nombre de Reynolds. Il a été démontré que l'augmentation du nombre de Reynolds mène à une augmentation des valeurs de  $h_{avg}$ .



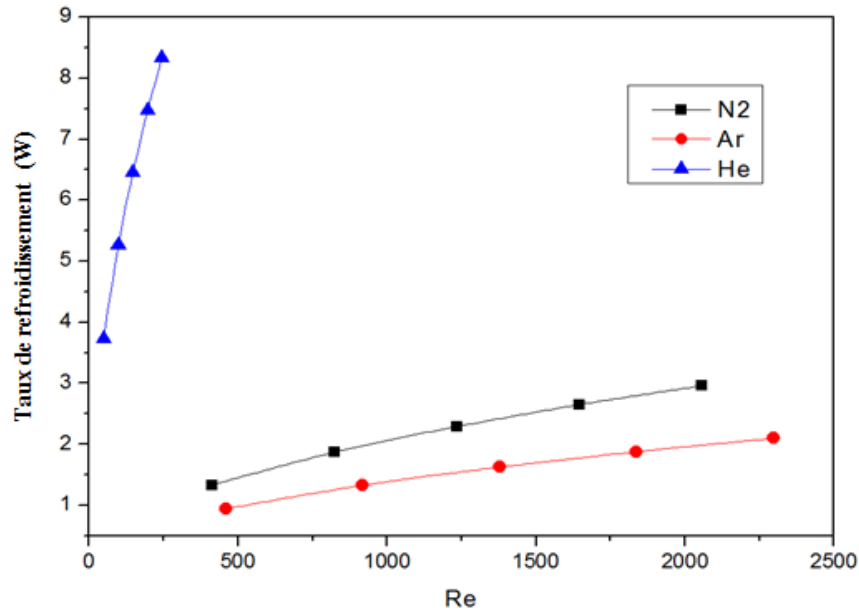
**Figure 47.** Variation du nombre de transfert de chaleur convectif en fonction du Reynolds gazeux.

Nous avons pu déduire à partir des valeurs de  $h_{avg}$  les taux de refroidissement du film métallique, ce qui est l'un des objectifs principaux de notre travail. Le taux de refroidissement  $Q$  est tiré des relations précédentes et s'écrit comme suit:

$$Q = h_{avg} S (T_m - T_g) = h_{avg} \pi D d (T_m - T_g) / 2 \quad (18)$$

Nous remarquons de la figure 48 que le taux de refroidissement le plus élevé est assuré par le gaz d'hélium puisque sa conductivité thermique et sa capacité de chaleur spécifique sont les plus grandes comparées à celles de l'azote et de l'argon. Ainsi, l'hélium possédant un haut coefficient de transfert de chaleur, il réduit donc plus rapidement la température de la couche limite

métallique; il s'ensuit une re-solidification accélérée de celle-ci. Nous notons aussi que les taux de refroidissement de l'azote et de l'argon sont approximativement identiques.



**Figure 48.** Variation du taux de refroidissement en fonction du nombre de Reynolds gazeux.

Le film métallique perd de la chaleur par convection au bénéfice de l'écoulement gazeux, mais il perd également de la chaleur par conduction vers le métal solide. En raison de la faible épaisseur du film comparée à la largeur de la saignée, nous pouvons considérer une description unidimensionnelle du transfert de la chaleur (voir figure 49). Et pour une meilleure compréhension de ce transfert de chaleur durant le processus de la découpe laser, nous allons calculer et comparer les résistances thermiques conductives et convectives qui rentrent en jeu. Dans le cas de la convection nous considérerons la vitesse la plus élevée du jet (50m/s) qui mène au plus grand coefficient de transfert de chaleur.

Nous avons donc calculé les flux de chaleur convectifs et conductifs pour voir les contributions de la conduction et de la convection durant ce processus en utilisant les relations suivantes :

$$Q_{cd} = (k_m S / e)(T_m - T_s) = (T_m - T_s) / R_{cd} \quad (19)$$

$$Q_{cv} = h_{avg} S'(T_m - T_g) = (T_m - T_g) / R_{cv} \quad (20)$$

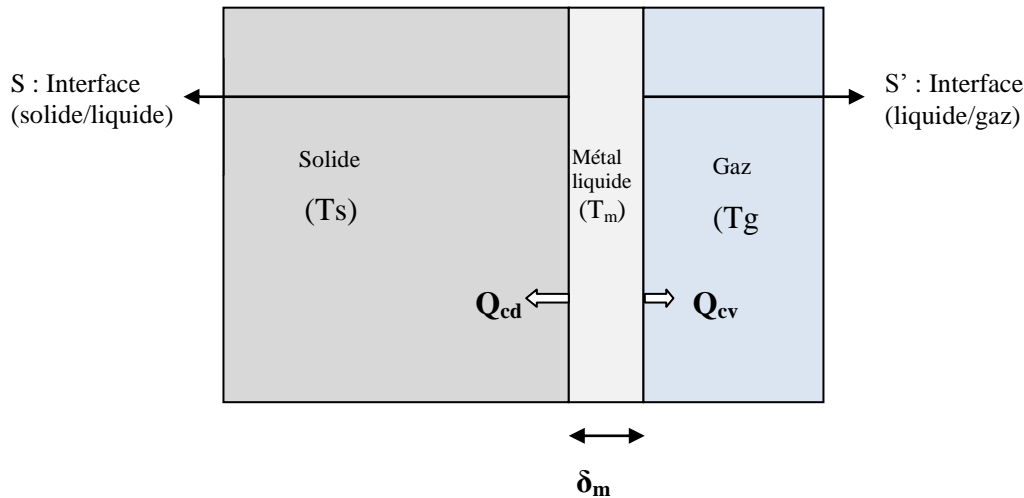
où :

$$S \text{ (interface solide/liquide)} = \pi d D / 2$$

$$S' \text{ (interface liquide /gaz)} = \pi d (D/2 + \delta_m)$$

Les surfaces des interfaces  $S$  et  $S'$  sont approximativement identiques puisque l'épaisseur  $\delta_m$  reste trop petite comparée à la largeur  $D$  de la saignée.

Rappelons que l'épaisseur de la pièce est de 4mm, sa longueur est de 8mm et la largeur moyenne de la saignée formée est de 500  $\mu\text{m}$ .



**Figure 49.** Flux de chaleur convectif et conductif.

Dans le tableau 7, nous pouvons remarquer que les résistances convectives liées au gaz d'azote et d'argon sont approximativement cinquante (50) fois plus grandes que la résistance conductive, et celle de l'hélium est 20 fois plus grande. Ainsi nous pouvons déduire que la chaleur est transférée d'une manière intensive, par conduction vers le solide et par convection vers le jet de gaz.

**Tableau 7:** Résistances convectives et conductives pour un jet gazeux de 50m/s.

Gaz	$R_{cv} = 1 / (h_{avg} \cdot S)$ (K/W)	$R_{cd} = e / (k_m \cdot S)$ (K/W)
Azote	915.1	20.1
Argon	1251.3	20.1
Helium	445.2	20.1

Le tableau 8 montre que toutes les pertes de chaleur par conduction et par convection restent négligeables comparées à la puissance laser incidente généralement utilisée dans le processus de découpe laser qui est de l'ordre de quelques kilowatts.

Comme les valeurs des taux de refroidissement obtenues sont négligeables devant la puissance laser utilisée et qui est la seule contribution de puissance dans le processus de découpe, nous pouvons conclure que le gaz d'assistance joue un rôle significatif dans l'éjection du métal fondu

(effet mécanique) plutôt que dans le refroidissement des fronts et bords de découpe (effet thermique).

**Tableau 8:** Puissances convectives et conductives pour un jet gazeux de 50m/s.

<b>Puissance convective (W)</b>	<b>Puissance conductive (W)</b>
$Q_{cv}(N_2)=1.54$	$Q_{cd}=70.3$
$Q_{cv}(Ar)=1.23$	$Q_{cd}=70.3$
$Q_{cv}(He)=3.13$	$Q_{cd}=70.3$

## ***CHAPITRE 5***

### ***APPROCHE NUMERIQUE***

## Introduction

Dans le but de mieux comprendre, interpréter et prédire des résultats expérimentaux ou même valider ou compléter quelques résultats théoriques ou analytiques, les simulations numériques basées sur des approximations des solutions sont indispensables.

Dans le cadre de notre étude sur la découpe par laser, nous avons développé une modélisation numérique pour compléter l'étude analytique présentée au chapitre 4. Notre approche numérique est basée sur la méthode des volumes finis [79] mise en œuvre par le code commercial FLUENT [80] appliqué à la dynamique des fluides numérique (CFD), qui fait partie de la large famille des logiciels ANSYS. Le solveur ou processeur FLUENT fait appel à un fichier contenant des informations sur la géométrie, le maillage et la réservation des conditions aux limites du problème traité. Ce fichier est construit par le préprocesseur GAMBIT qui fait également partie de la famille d'ANSYS.

### 1. Modélisation

#### 2.1 Présentation de GAMBIT et FLUENT

Dans la suite nous allons présenter les méthodes utilisées pour la génération du maillage du domaine de calcul, puis nous présenterons le logiciel ANSYS/FLUENT et la méthode de discrétisation par volumes finis. Enfin, nous allons établir les équations qui régissent l'écoulement dans notre cas d'étude.

- **Le pré-processeur GAMBIT** : c'est une procédure qui permet à l'utilisateur, à partir d'une fenêtre interactive, de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en volumes unitaires appelés cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. Le logiciel permet d'intégrer les conditions aux limites appropriées aux frontières du domaine étudié. Il permet en outre, après avoir spécifié les caractéristiques du fluide, d'optimiser le type de maillage en fonction de la géométrie et de spécifier le type de matériau (fluide ou solide). Le choix du maillage du point de vue du type d'éléments qui le constituent (triangles, quadrilatères pour le 2D, trièdres et hexaèdres pour le 3D), et de sa qualité (précision) constitue un facteur essentiel ayant une influence sur la fiabilité du résultat.

- **Le processeur FLUENT** : est un des logiciels les plus recommandés pour la simulation des écoulements de fluides, des transferts thermiques et des phénomènes associés tels que les écoulements turbulents, réactifs ou bien encore multiphasiques. Appelé le processeur, c'est un code CFD (Computational Fluid Dynamics), il permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression, phases...) dans lesquelles s'effectue la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites. Il permet de choisir le processus itératif en proposant plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle ainsi que pour le couplage vitesse-pression.

La méthode utilisée pour résoudre les équations de conservation, est la méthode des volumes finis qui est une méthode conservatrice, c'est à dire que tout le flux sortant d'un volume de contrôle entre dans les volumes voisins. Cette méthode permet de diviser le domaine de calcul en cellules (volumes de contrôle), permettant de discrétiser les équations. Une discrétisation en espace et en temps des équations et la substitution des dérivées partielles par des approximations en différences finies; transforment le système d'équations en système algébrique. Vient ensuite l'intégration de celles-ci sur chaque volume de contrôle. Un processus itératif pour la résolution de ce système algébrique avec l'utilisation d'un algorithme pour corriger la pression et les composantes de la vitesse afin d'assurer la conservation de la masse. C'est une méthode qui consiste donc à mettre les équations que l'on veut résoudre sous différents termes : un terme qui représente la convection, un autre la diffusion et un dernier le terme source.

FLUENT permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine en question, d'apporter des modifications locales et il permet surtout de visualiser par un post-traitement, les champs de (pression, vitesse, température...) et le calcul des grandeurs physiques (Flux, fraction massique, taux de refroidissement,...).

**Schémas numériques :** Les schémas numériques sont généralement divisés par ordres de puissances dans une direction donnée (x par exemple). Ceux du premier ordre correspondent à une estimation aux faces à l'aide d'une série de Taylor coupée au premier ordre, ceux du deuxième ordre par une série à l'ordre deux et ainsi de suite. Généralement plus l'ordre du schéma est élevé plus la solution est précise mais aussi plus la convergence est difficile. Dans FLUENT, les termes de gradients de pression sont inclus dans le terme source, et pour les termes convectifs FLUENT propose plusieurs schémas de discrétisation, parmi lesquels nous citons : le schéma *upwind* du 1<sup>er</sup> ordre, le schéma *amont* du second ordre et le schéma *quick*.

FLUENT utilise aussi le stockage « collocalisé » des variables, c.à.d. que toutes les variables sont stockées au centre des cellules. Les termes des équations sont discrétisés de manières différentes.

**Linéarisation des équations discrétisées :** FLUENT résout le système d'équations linéaires en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel.

**Facteurs de sous-relaxation :** Les facteurs de sous relaxation sont utilisés dans le cas des problèmes non linéaires. Il est nécessaire de contrôler le changement d'un paramètre du domaine fluide lors de la résolution numérique afin d'éviter la divergence du calcul numérique. Le critère de sous-relaxation réduit le changement des paramètres durant chaque itération.

**Choix du solveur :** Deux types de solveurs existent dans FLUENT :

- Le solveur découplé (Segregated) est le plus approprié pour les écoulements incompressibles, il résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie séparément.

- Le solveur couplé implicite ou explicite est plutôt réservé aux écoulements compressibles à grande vitesse et aux écoulements non stationnaires. Le solveur couplé permet la résolution simultanée des équations gouvernantes.

**Initialisation et critères de convergence:** Avant de commencer les simulations numériques avec FLUENT, il faut fournir une solution initiale à partir de laquelle le processeur commence le calcul. Le choix adéquat des conditions initiales permet d'atteindre une solution stable et une convergence accélérée. L'initialisation du calcul peut être effectuée à partir de l'entrée, de la sortie ou à partir du domaine en entier.

On dit d'un processus itératif qu'il converge quand la différence entre deux calculs successifs diminue au fil des itérations. FLUENT utilise comme critère de convergence le calcul des résidus. Ces résidus doivent être inférieurs à une certaine valeur infinitésimale fixée par l'opérateur. Le logiciel arrête alors les itérations lorsque le résidu est stabilisé et inférieur à cette valeur du critère de convergence choisie.

A chaque itération, FLUENT permet donc de juger de l'état de la convergence par le biais du calcul des résidus pour chaque variable (pression, composante de vitesse, fractions massiques des composés...).

Par définition, pour une variable donnée  $\psi$ , le résidu R s'écrit comme suit :  $|\psi^k - \psi^{k-1}| \leq \epsilon$ .

La convergence est déterminée à partir de ces résidus. Il est conseillé d'examiner d'une part, les résidus ainsi que leur évolution et d'autre part, les valeurs des quantités calculées. Le choix adéquat des conditions initiales permet d'atteindre une convergence accélérée et une solution stable.

L'état stationnaire avec une distribution initiale de deux phases peut aussi être un état initial pour améliorer la convergence.

Dans ce qui suit nous allons nous intéresser aux modèles VOF et Solidification & Melting qui interviennent dans notre cas d'étude. Ces deux modèles sont incorporés dans Fluent et précisons que le modèle VOF (Volume Of Fluid) est utilisé dans le traitement des écoulements multiphasiques pour le suivi des interfaces entre les différentes phases.

**- Ecoulements multiphasiques :** Plusieurs modèles multiphasiques sont implémentés dans FLUENT incluant le modèle VOF. Avec ce modèle, il est possible de simuler des phases compressibles et incompressibles au même temps.

**Modèle VOF :** Le fluide est repéré par la fraction volumique de l'un des deux fluides à l'intérieur de chaque cellule, d'où le nom de VOF. Le principe de la méthode est de stocker une seule information dans la cellule, c'est le taux de présence.

Ce taux de présence varie entre 0 et 1 pour repérer les deux phases. Il vaut 1 si la cellule est remplie d'une espèce donnée et 0 si elle en est vide.

Le modèle VOF peut modéliser deux ou plus de fluides immiscibles.

- VOF nécessite l'utilisation du solveur Segregated.

- Uniquement une des phases peut être compressible.
- Ne traite pas les écoulements réactifs.
- Le modèle LES (Large Eddy Simulation) de la turbulence ne peut être traité.
- La formulation du second ordre implicite en temps n'est pas valide.
- Ne traite pas les écoulements non-visqueux.

Les méthodes VOF peuvent être classées en deux grandes familles: méthode VOF avec reconstruction de l'interface et méthode VOF sans reconstruction de l'interface. Pour ce modèle, FLUENT propose quatre schémas (pour ne pas perdre leur signification, les schémas sont mentionnés en anglais) :

- Geometric reconstruction
- Donor-acceptor
- Euler explicit
- Euler implicit
- 

Le modèle VOF peut aussi inclure les effets de tension de surface le long de l'interface entre chaque paire de phases. Cette force intervient dans le terme source de l'équation de quantité de mouvement. Le calcul des effets de tensions de surface sera plus précis dans le cas où nous utilisons un maillage quadrilatéral ou hexaédrique.

Si parmi les deux phases, l'une est compressible, il est recommandé de la prendre comme phase primaire pour améliorer la convergence. Il est aussi recommandé de prendre la plus légère comme phase primaire car les variations dans la pression statique sont négligeables.

Il faut noter que le pas de temps utilisé pour la fraction volumique dans le modèle VOF n'est pas le même que celui utilisé pour la résolution globale des équations du mouvement.

**Modèle Solidification/Melting :** ce modèle traite le changement d'état d'un matériau, de l'état solide vers l'état liquide, et vice versa. Il détermine la manière dont se solidifie ou se liquéfie un matériau.

Après cette brève présentation des logiciels utilisés pour la construction de la géométrie et du maillage, et pour la résolution des équations par discrétisation par la méthode des volumes finis, nous passons à la mise en œuvre de la résolution numérique du problème qui nous concerne.

On commence par exporter le fichier écrit en format '.msh' généré par le logiciel GAMBIT, utilisé pour construire notre géométrie et son maillage. Ce fichier est importé lors du lancement de FLUENT, qui utilise les informations contenues dans le fichier '.msh', afin d'effectuer les simulations numériques par la discrétisation des équations qui gouvernent l'écoulement gazeux en présence du film métallique.

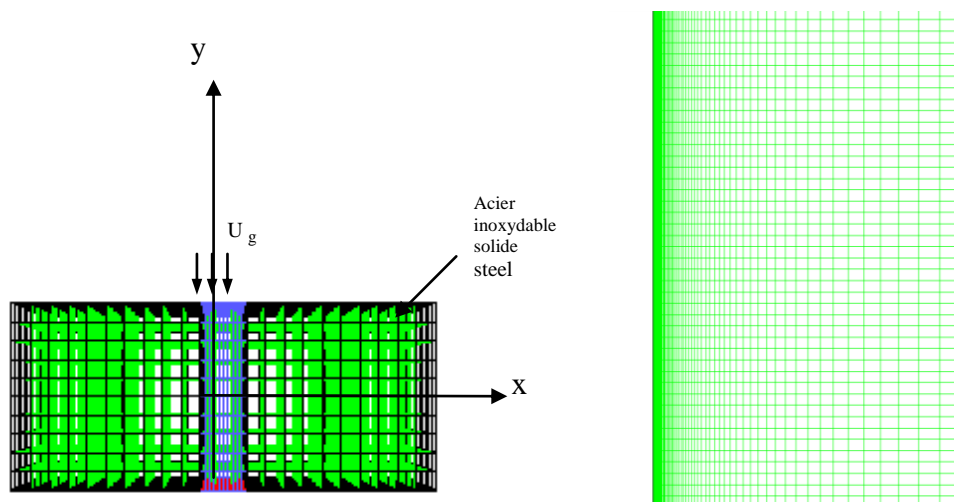
**2.2 Maillage et résolution numérique:** Nous avons réalisé une étude de convergence afin d'obtenir le maillage le plus adapté à notre modèle. Nous avons raffiné ce maillage au voisinage des parois solides chauffées (front et bords de découpe), qui correspondent à des zones où les gradients de température et de vitesses sont les plus importants. Un maillage relâché et uniforme est adopté ailleurs (voir figure 50 a et b). Le type d'éléments utilisés est quadratique pour la première étude et est hexagonal pour la seconde.

La génération d'une bonne qualité de maillage est primordiale pour la stabilité et la précision du calcul numérique.

Pour le problème non stationnaire traité, nous avons aussi essayé de trouver un compromis entre le nombre de cellules et le temps de calcul. Nous avons donc calculé le nombre de courant qui doit être  $\leq 1$ .

$$C = \Delta t / (\Delta x_{\text{mail}} / U_{\text{flui}}), C \leq 1: \text{condition de stabilité}$$

$\Delta t$  est le temps minimum pour chaque maille près de l'interface et  $U_{\text{flui}}$  la vitesse maximale du fluide concerné à l'interface. Dans notre cas c'est la vitesse du jet de gaz.



**Figure 50** (a) Maillage du domaine de calcul (b) Maillage fin au niveau de la couche limite

Les deux modèles incorporés dans FLUENT, auxquels on fait appel pour la résolution de notre problème sont ceux présentés auparavant, i.e. VOF et Melting/Solidification. Le modèle VOF est le plus adéquat pour le traitement des écoulements non miscibles présentant une interface. Notre étude nécessite aussi l'intervention du modèle Melting/Solidification qui va déterminer la manière dont se solidifie notre métal fondu au passage des différents jets de gaz d'assistance.

Pour le modèle VOF, nous avons choisi le schéma 'geometric reconstruction' avec un schéma explicite pour le pas de temps et le solveur 'pressure based segregated solver', car il est reconnu être le meilleur pour le traitement des interfaces et surfaces libres. De plus, le modèle prend en compte les non-linéarités dues aux variations des caractéristiques thermo-physiques avec la

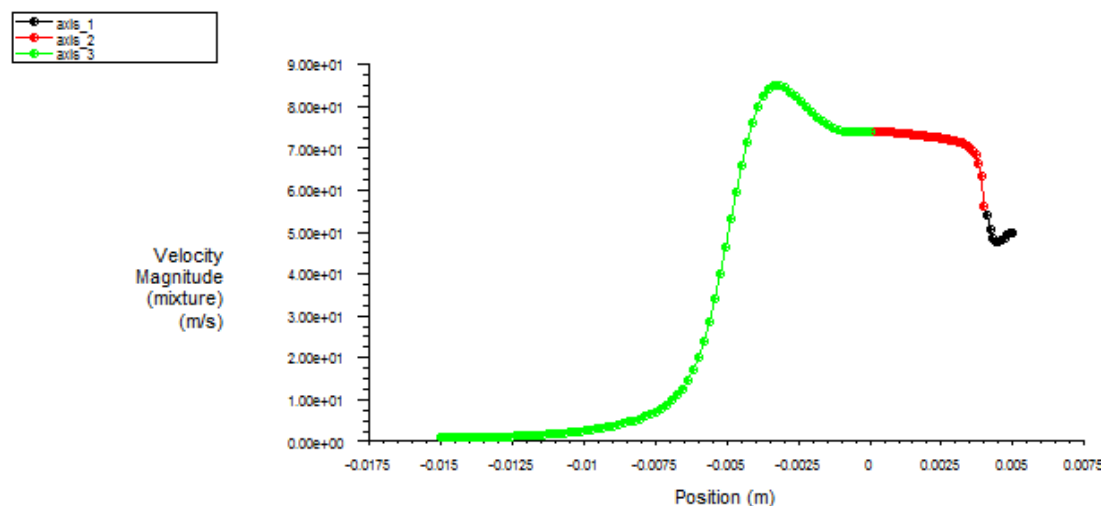
température. VOF avec reconstruction de l'interface consiste en la localisation de l'interface d'une manière satisfaisante en la reconstruisant maille par maille, tout en assurant un transport correct de la fonction du taux de présence.

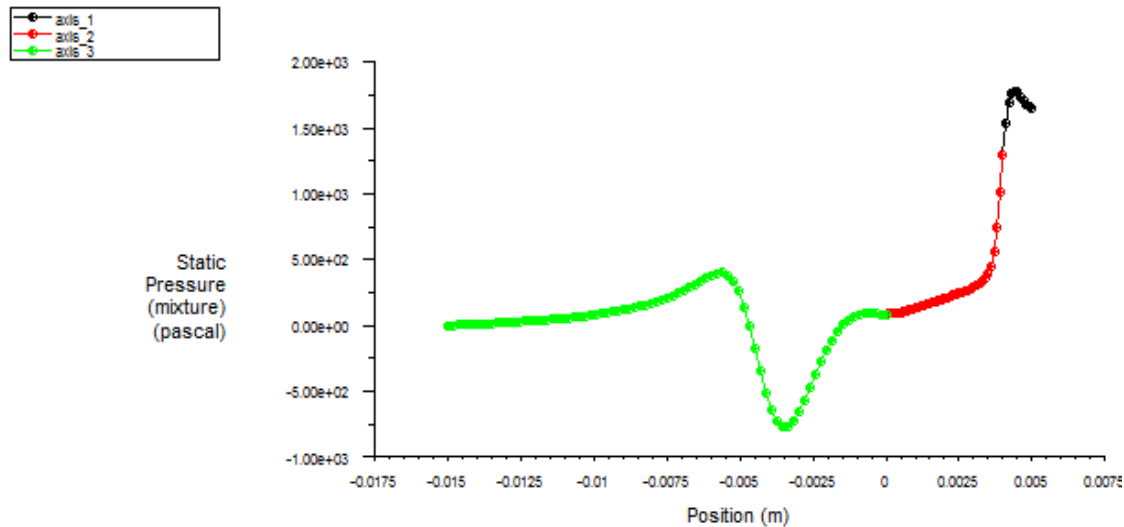
Le logiciel possède plusieurs méthodes de couplage vitesse-pression. La solution que nous avons choisie est la méthode SIMPLEC (Semi-Implicit Method for a Pressure Linked Equations Consistent). A chaque itération, cet algorithme calcule une équation de correction de pression permettant d'équilibrer à la fois l'équation de conservation de la masse et celle des quantités de mouvement. Cette correction de pression conduit à une correction de vitesse. Celle-ci se différencie des autres du fait qu'elle utilise un facteur de relaxation de la pression qui accélère la convergence mais peut parfois conduire à des instabilités de la solution.

**Critère de convergence :** Comme FLUENT utilise le critère de convergence basé sur le calcul des résidus, nous obtenons une convergence des résultats quand nos résidus atteignent  $10^{-6}$  avec un pas de temps de  $10^{-5}$ s.

**2.3 Nécessité et calcul d'un domaine étendu fictif (extension) :** Dans le cas de notre problème où les conditions à la sortie ne sont pas connues, nous sommes dans l'obligation d'introduire un domaine étendu fictif à l'extrémité duquel tous les gradients longitudinaux des différentes variables telles que la vitesse, la température, la pression...tendront asymptotiquement vers zéro. La longueur de ce domaine  $L_{ex}$ , est déterminée par la méthode des « essais et erreurs ».

Cette démarche permet aussi de suivre au cours du temps les cellules de recirculations éventuelles pouvant apparaître dans l'extension elle-même. Les figures ci-dessous (voir figure 51) liées à la vitesse et à la pression statique le long des axes de symétrie (de l'impasse, de la saignée et de l'extension) montrent bien qu'une distance de  $L_{ex}=15$ mm est suffisante pour qu'à la sortie de l'extension, les gradients de vitesses et de pression tendent asymptotiquement vers zéro.





**Figure 51.** Profils des vitesses et pressions le long de l'axe de symétrie pour une distance d'extension de 15mm.

Notons que dans l'étude où se présente l'extension, nous allons nous limiter à une résolution à deux dimensions (2D), qui s'avère suffisante car le temps de calcul nécessaire pour la résolution des équations est trop important dans le cas 3D. Cette initiative est valable puisque l'épaisseur du film liquide est très petite comparée aux dimensions de la saignée, donc on peut considérer l'éjection comme un problème à deux dimensions.

### 3. Résultats numériques et leur interprétation :

#### 3.1 Influence des vortex créés à l'intérieur et à l'extérieur de la saignée sur la qualité de découpe :

Comme nous l'avons déjà signalé, la résolution analytique que nous avons menée reste insuffisante pour l'étude complète du processus de découpe laser de l'acier inoxydable. En effet l'état de la pièce découpée ne peut être mis en évidence avec cette démarche. Nous la complétons en utilisant une approche numérique basée sur les logiciels FLUENT/GAMBIT et des différences finies. FLUENT est utilisé pour la résolution numérique des équations de Navier Stokes.

Nous nous fixons comme premier but dans cette étude, la détermination de l'influence d'un jet de gaz d'azote entrant avec une température de 300 K et une vitesse du jet de 50 m/s dans une saignée déjà formée lors d'une découpe laser par fusion d'une pièce d'acier inoxydable. Notre second but est de confirmer ou d'infirmer l'apparition de cellules de recirculation à l'intérieur de la saignée elle-même, et dans le domaine étendu, ainsi que l'apparition éventuelle d'un décollement du film métallique.

Nous avons déjà démontré dans l'approche analytique que nous sommes en présence de deux couches limites (ou de Prandtl) superposées et avec des profils de vitesse paraboliques (voir figure 52 et 53).

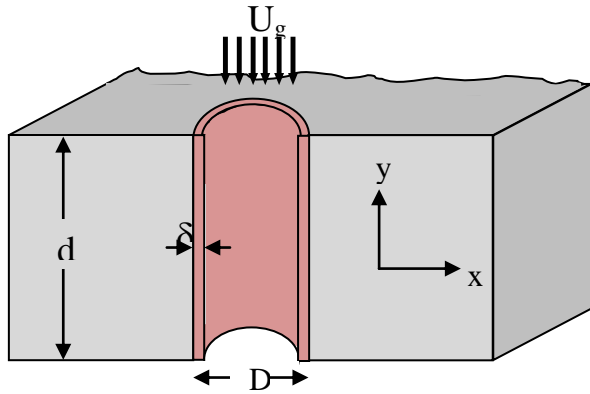


Figure 52. Domaine étudié

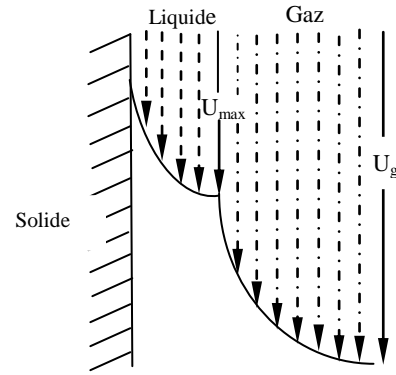


Figure 53. Profils des vitesses des deux couches limites.

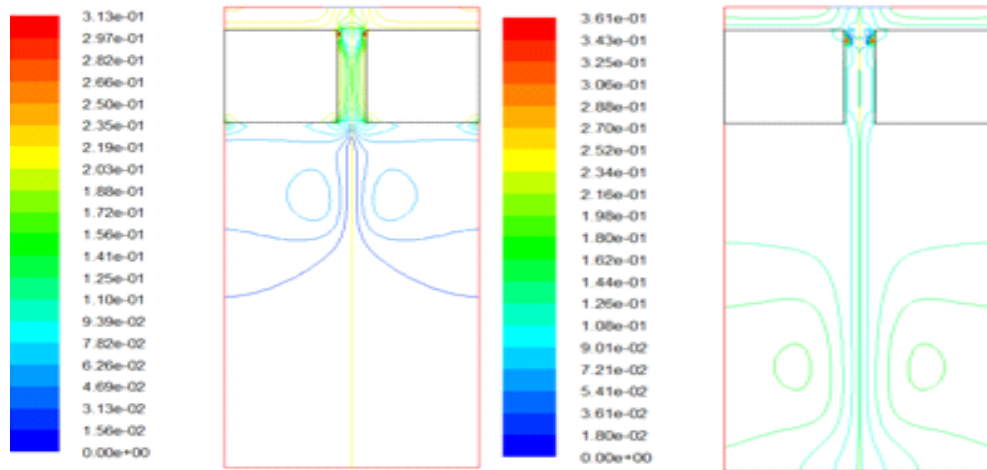
Concernant le maillage, les endroits où se présentent de forts gradients de températures et de vitesses et où se trouvent les couches limites, un raffinement du maillage a été réalisé pour distinguer les différents aspects de l'écoulement et aussi pour visualiser d'éventuelles recirculations, ce qui est l'objectif principal du présent travail. Le maillage reste uniforme ailleurs. Le modèle VOF traite les écoulements du gaz et du métal fondu non-miscibles et présentant une interface, et le modèle Melting/Solidification traite le changement d'état de l'acier inoxydable liquide vers le solide après son refroidissement par le jet de gaz. Notons que pour compléter l'étude analytique nous avons tenu compte des tensions de surfaces à l'interface et de la variation des propriétés thermo-physiques du métal fondu à travers des UDF (User Defined Function) qui sont des procédures en C++ définies par l'utilisateur et utilisées interactivement lors de l'exécution du solveur FLUENT.

Nous avons obtenu la convergence de nos résultats quand les résidus atteignent  $10^{-6}$  avec un pas de temps de  $10^{-5}$ s.

Dans le cas de notre problème où les conditions à la sortie ne sont pas connues nous avons montré que l'introduction d'un domaine étendu fictif de longueur 15mm à l'extrémité duquel tous les gradients longitudinaux des différentes variables tendent asymptotiquement vers zéro était nécessaire. Cette démarche devrait nous permettre de suivre au cours du temps les cellules de recirculation éventuelles pouvant apparaître à l'intérieur ainsi qu'à l'extérieur de la saignée.

Les figures 54 de lignes de courant montrent bien la présence d'une paire de petits vortex juste à l'entrée de la saignée et une autre paire plus grande (tourbillons) dans l'extension. Leur présence est essentiellement due à la rencontre brusque des fluides chauds et froids. En effet, à l'entrée de la saignée le gaz initialement froid devient chaud et léger, ceci provoque sa remontée et donc la formation de vortex, et inversement concernant les tourbillons qui se forment dans l'extension.

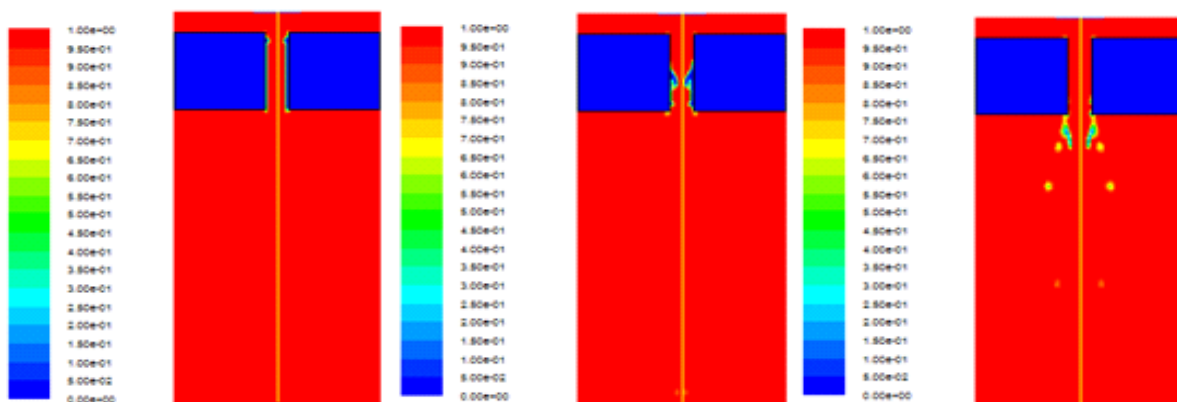
Ces mêmes vortex et tourbillons se déplacent vers le bas, ce qui peut être observé dans la saignée ou dans l'extension lorsqu'on avance dans le temps (voir figures 54).



**Figure 54.** Contours des lignes de courants à deux instants différents à savoir ( $3 \times 10^{-4}$  et  $6 \times 10^{-4}$ s).

Il y a deux mécanismes entraînant l'éjection du métal fondu par le jet de gaz d'assistance : le gradient de pression et la contrainte de cisaillement. La matière fondue ne commence à descendre en glissant sur le front de découpe que lorsque sa taille atteint une certaine valeur critique. Cette taille dépend de la pression du gaz d'assistance et du coefficient de la tension superficielle qui a été pris en compte.

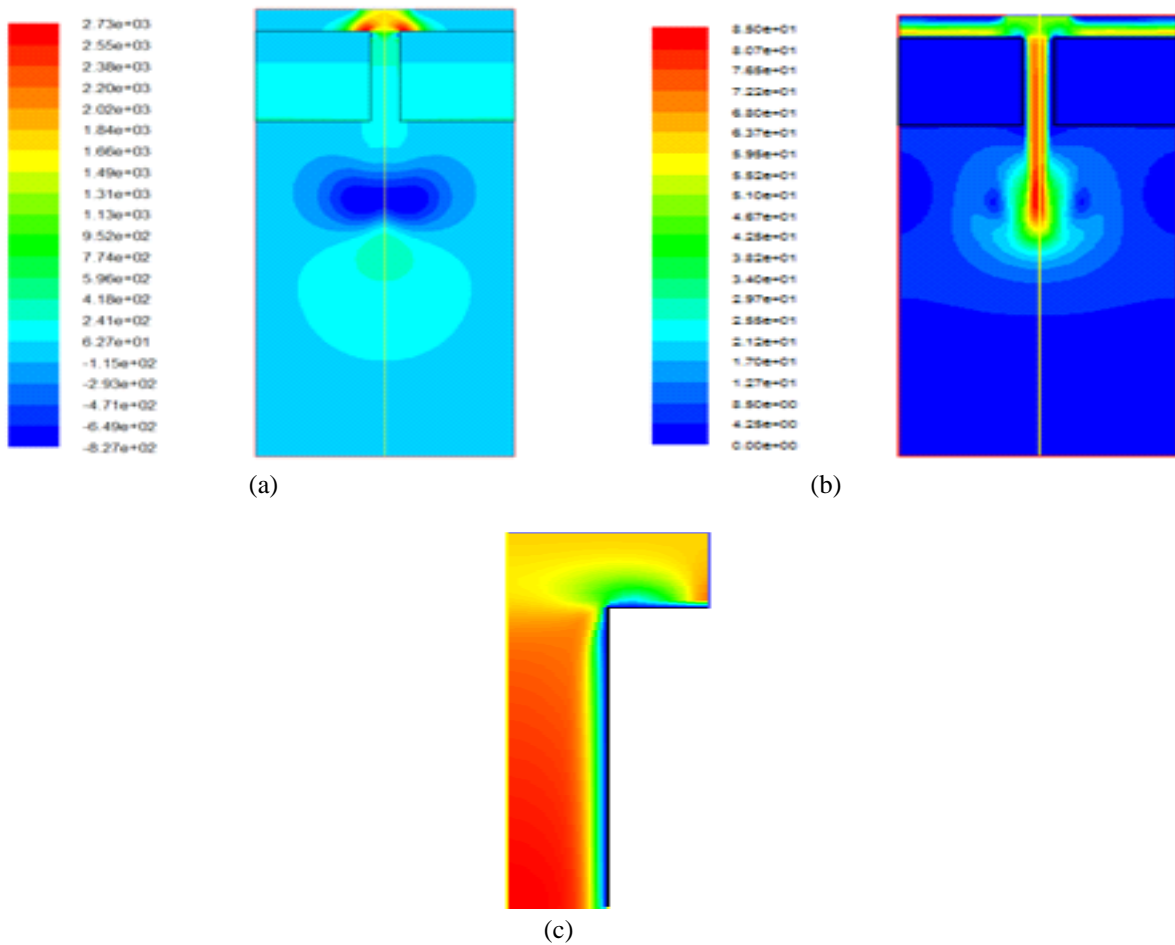
Le mécanisme concerne la force de tension superficielle, qui retient donc à la surface supérieure le matériau fondu pendant une courte période de temps, et il s'ensuit une éjection de ce dernier. Les figures 55 montrent que le film métallique met approximativement 5 ms pour être éjecté totalement avec un jet de gaz d'azote sortant avec une vitesse de 50 m/s de la tuyère.



**Figure 55.** Contours de la fraction volumique de l'acier inoxydable fondu lors de son évacuation au cours du temps ( $t=6.10^{-4}$ s,  $2.6 \times 10^{-3}$ s et  $4.97 \times 10^{-3}$ s).

- **Champ de pression et de vitesse :**

A la sortie de la tuyère, le gaz traverse l'impasse (stand off distance) et avant de rentrer en contact avec le matériau une partie du gaz d'azote éprouve une violente interaction avec la partie supérieure de la pièce métallique causant une forte compression montrée en couleur rouge sur la figure 56. Cela signifie que la vitesse du gaz dans cette région est très faible. L'autre partie, continue dans le même sens vertical pour être chauffée par le front et les bords de découpe (portés à la température de fusion) et est ainsi dilatée (couleur bleu) d'où la diminution de sa pression à l'entrée de la saignée. Il s'ensuit une augmentation de sa vitesse dans la partie centrale. Par contre au voisinage des bords de découpe où se situent les couches limites visqueuses nous observons une décélération (bleu). Les contours de vitesses montrent bien un écoulement laminaire du gaz en convection forcée dominante de type couche limite. La naissance et le développement de cette couche sont suivis d'une décélération du gaz qui compense son accélération au centre, cela est dû au phénomène cumulatif de la convection forcée.

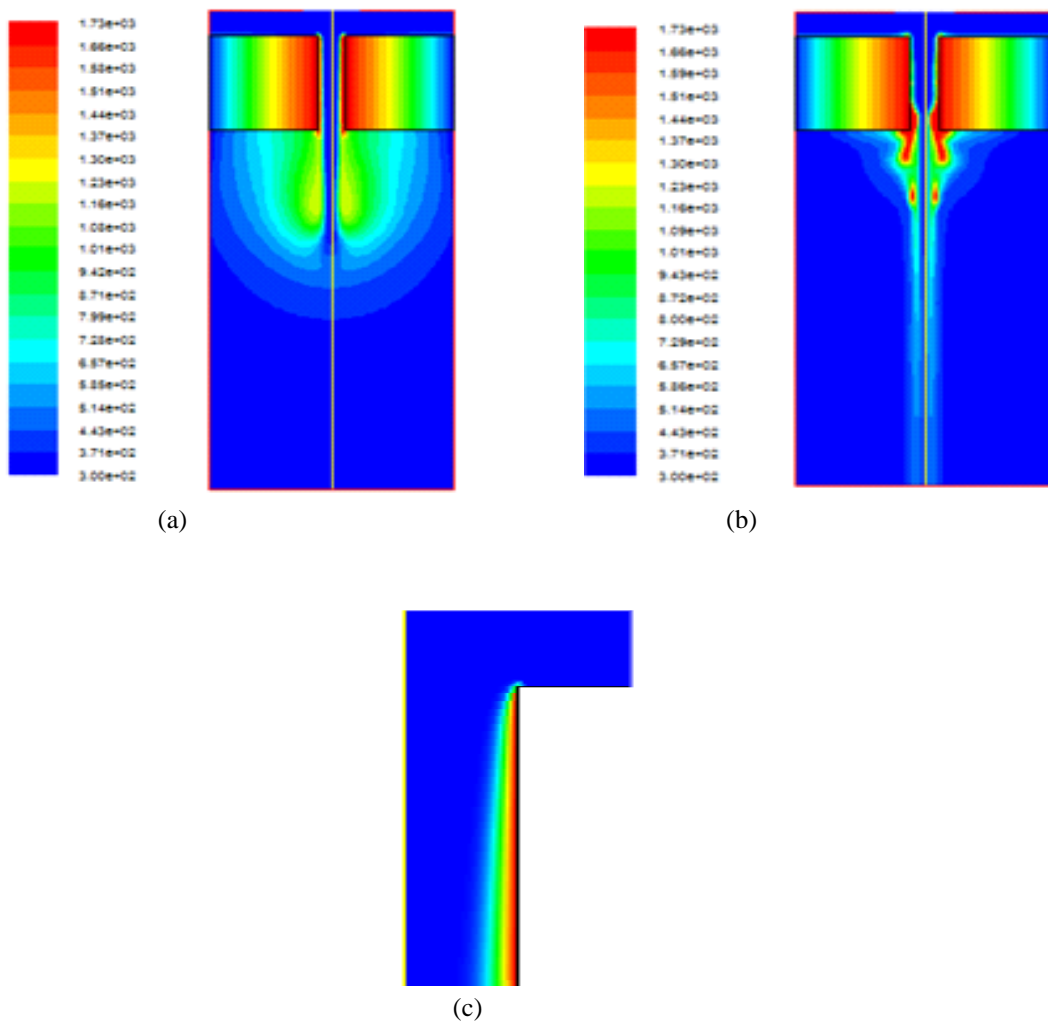


**Figure 56.** Contours de la pression statique (a) et des vitesses (b) à  $t=3e^{-04}$ s et agrandissement du contour de vitesse où se présente la couche limite dynamique (c).

- **Champ de température :**

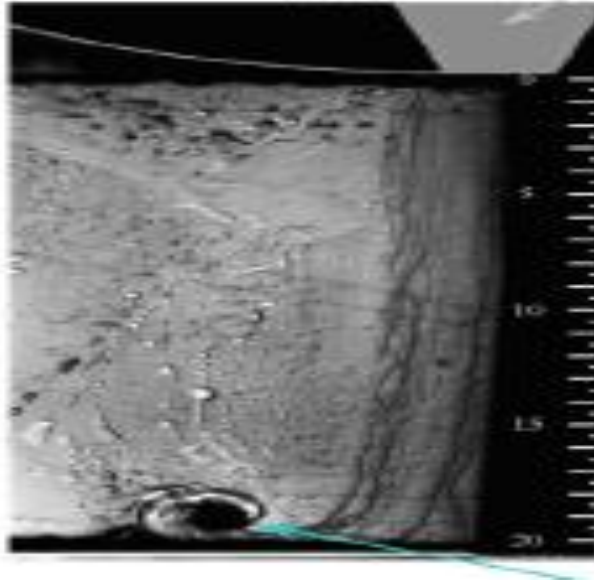
Les contours de température (figure 57) montrent bien qu'une partie de la puissance laser absorbée est perdue par la conduction de chaleur dans le solide et ne peut donc pas être utilisée pour fondre le matériau, ce qui est le principe même du procédé de découpe. Cette perte d'énergie par conduction étant intense, cela est dû au fait que l'acier inoxydable a une conductivité thermique élevée.

Ces mêmes figures liées aux contours de température confirment encore une fois que l'écoulement est de type couche limite puisque la partie centrale de la saignée reste à 300 K alors qu'au niveau des couches limites la température reste élevée.



**Figure 57.** Contours de la température statique à deux instants différents lors de l'éjection du métal fondu ((a)  $t=3 \cdot 10^{-4}$  s et (b)  $4 \cdot 10^{-3}$  s) et agrandissement du contour (a) où se présente la couche limite thermique (c).

On peut voir sur la figure expérimentale ci-dessous la mauvaise qualité de découpe laser que provoque l'apparition d'un vortex à l'extrémité inférieure d'une pièce métallique.



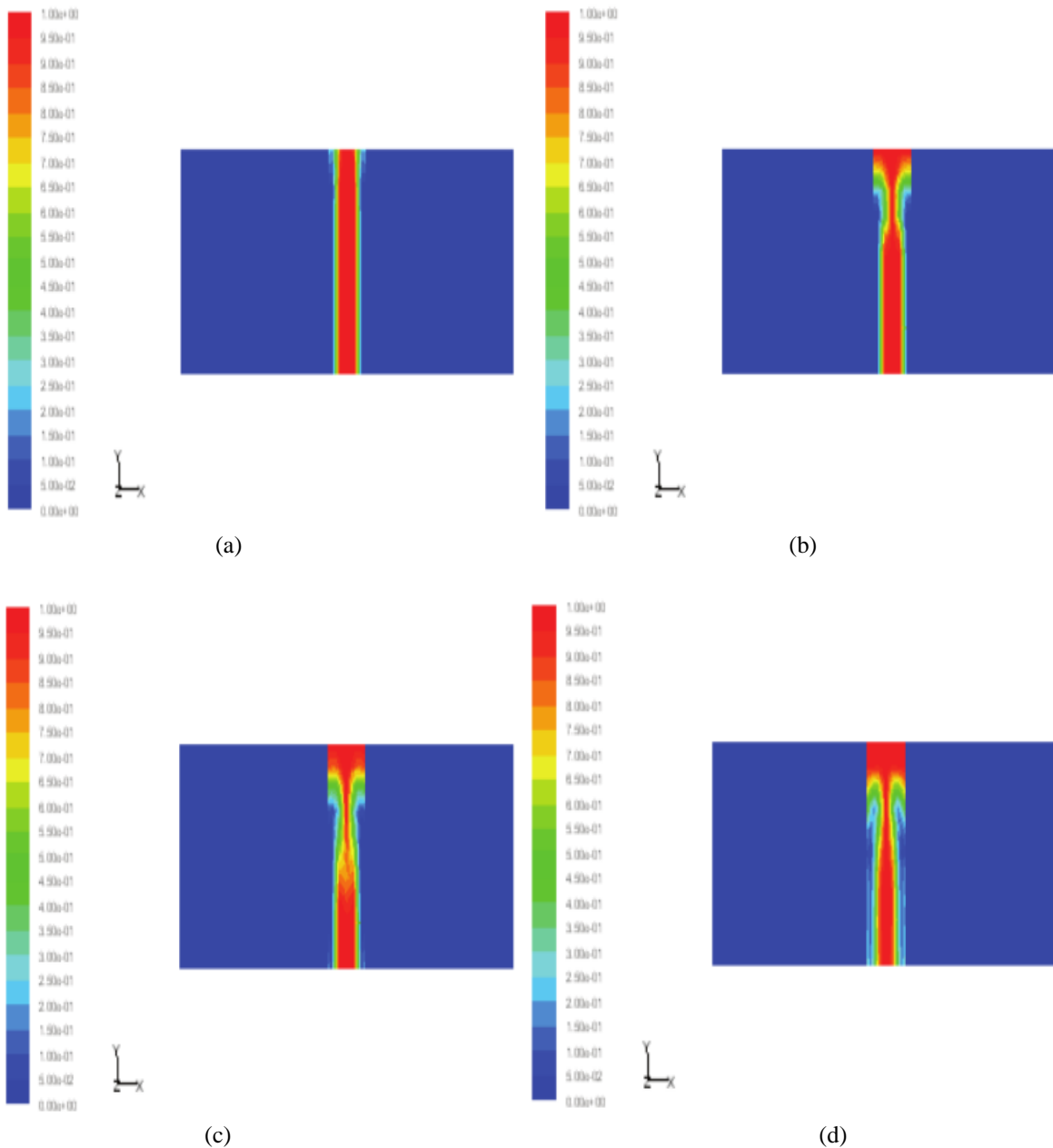
**Figure 58.** Apparition d'un vortex conduisant à une mauvaise qualité de découpe [16]

### **3.2 Influence de la nature et de la vitesse du jet de gaz sur la qualité de découpe, apparition d'un point de décollement:**

Notre travail consiste aussi en l'étude du refroidissement et du cisaillement par un jet de gaz d'un film métallique produit par fusion lors d'une découpe laser. C'est de par ce jet que la matière est évacuée de la zone d'interaction. Pour cela on se propose d'établir un modèle pour l'étude de l'influence de la nature de l'écoulement laminaire de différents gaz inertes (azote, argon et hélium) sur la qualité de la surface découpée, sans tenir compte du déplacement transversal de la pièce traitée.

La résolution numérique a été faite par les mêmes modèles VOF et Melting/Solidification. Dans un premier temps, nous nous fixons pour but de déterminer l'influence de différents jets de gaz, entrant avec une température de 300K et une vitesse de 10 m/s, sur le cisaillement et le refroidissement d'un film liquide d'acier inoxydable porté à 1712K, qui est produit lors d'une découpe laser par fusion. Pour cela, nous avons simulé l'effet des trois types de gaz pour son évacuation.

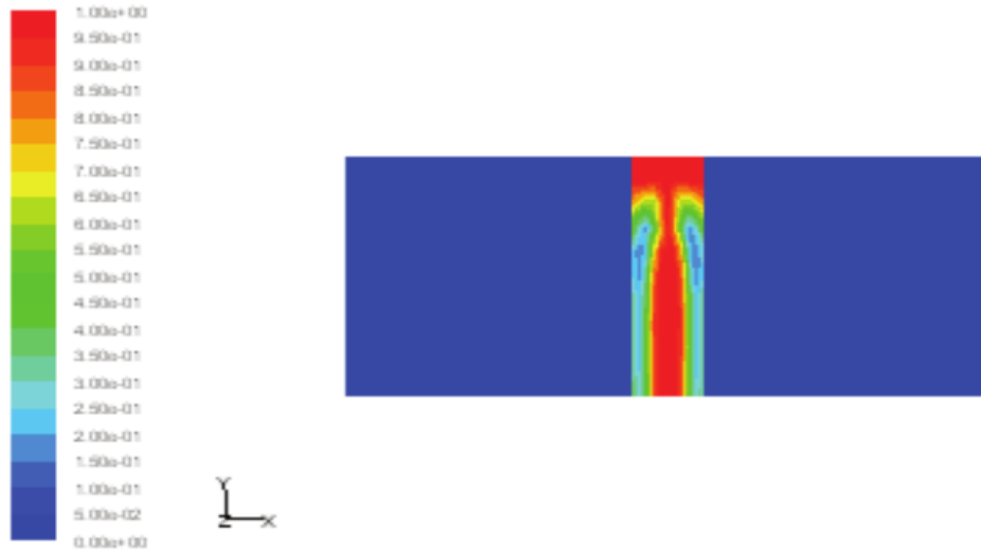
Un raffinement au niveau des couches limites est toujours pris en considération pour distinguer les différents aspects de l'écoulement à ces endroits. Le modèle Melting/Solidification traite le changement d'état de l'acier inoxydable liquide vers le solide après son refroidissement par les différents jets de gaz. Nous avons obtenu dans ce cas une convergence des résultats quand les résidus atteignent  $10^{-6}$  avec un pas de temps de  $10^{-6}$ s.



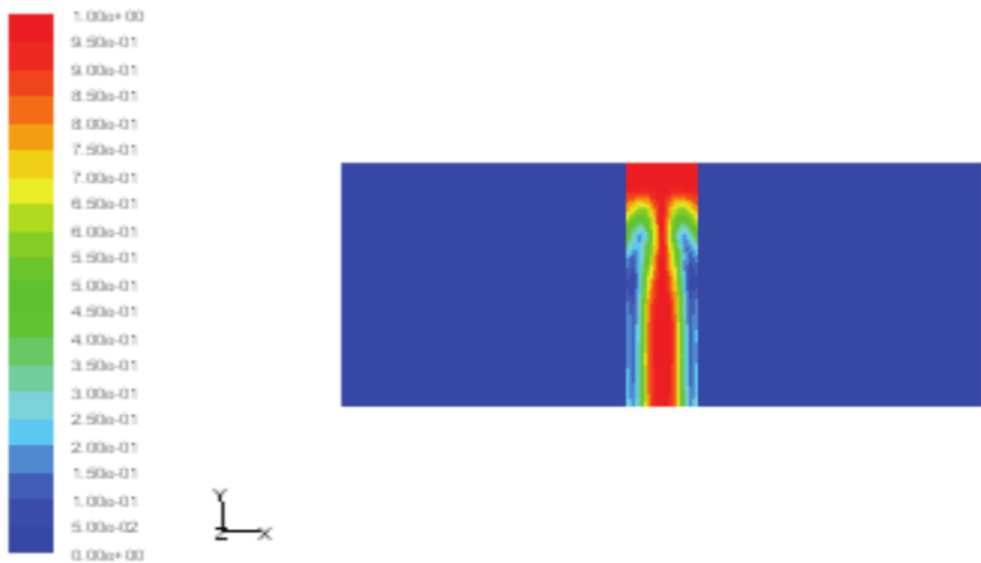
**Figure 59.** Qualité du film métallique éjecté avec un jet de gaz d'azote à différents instants (a)  $t=1. 10^{-5}$ s, (b)  $t=2. 10^{-4}$ s, (c)  $t=1.2. 10^{-3}$ s et (d)  $t=3. 10^{-3}$ s.

Initialement, nous supposons que le film métallique est parallèle au front de découpe comme le montre la figure 59 (a) ci-dessus. Nous remarquons, que pour un instant avancé et bien déterminé ( $2. 10^{-4}$ s) et pour une vitesse d'entrée de gaz d'azote fixée à 10 m/s dans le régime laminaire un point de décollement apparaît. La position de ce dernier varie légèrement en fonction du temps par contre sa solidification est nettement apparente.

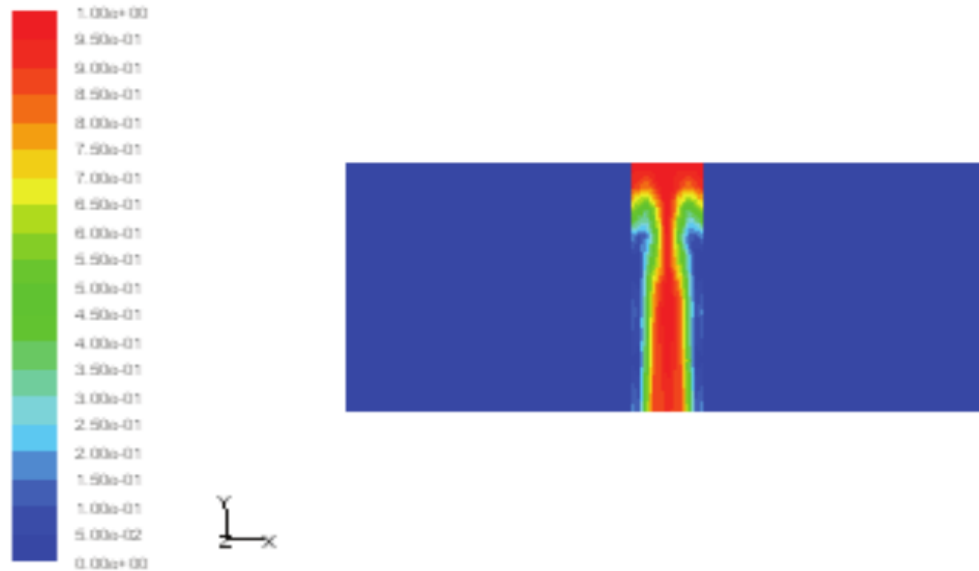
- Dans ce qui suit nous allons voir l'influence de la nature du jet de gaz sur ce point de décollement. Nous remarquons, que pour un instant avancé et bien déterminé ( $3 \cdot 10^{-3}$ s) et pour une vitesse d'entrée du jet toujours fixée à 10 m/s dans le régime laminaire et pour différents gaz, le point de décollement apparait. La position de ce dernier varie légèrement en fonction de la nature du jet de gas utilisé (voir figure 60), par contre la solidification du métal fondu est nettement différente.



(a) Argon



(b) Azote



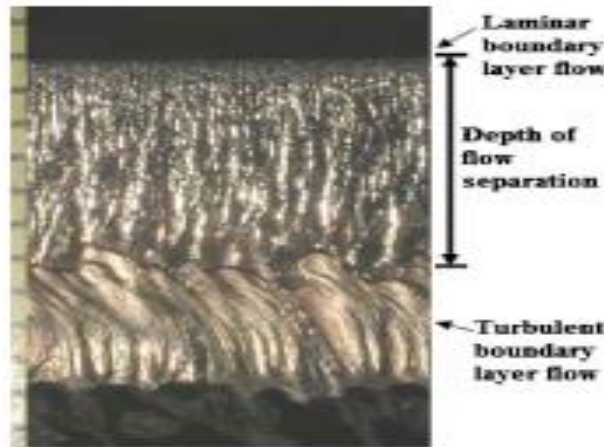
(c)Hélium

**Figure 60.** Apparition d'un point de décollement lors de l'évacuation de l'acier inoxydable fondu avec différents gaz : argon, azote et hélium à  $t=3\text{ms}$ .

Nous savons que lorsque l'écoulement du gaz est laminaire et que les forces d'inertie ( $P$ ) sont très supérieures aux forces visqueuses, il y a risque de décollement de la couche limite du film métallique que nous avons supposé déjà formée.

Après le point de décollement, cette couche devient turbulente et les forces de viscosité ne sont plus assez importantes. Concrètement, la transition du régime laminaire au turbulent se manifeste par un épaissement brutal de la couche limite métallique qui conduit à une mauvaise qualité de découpe. Au point de séparation (décollement de la couche limite), les forces de cisaillement qui s'exercent sur le film liquide sont sérieusement réduites. En effet, aux faibles vitesses du gaz (écoulement laminaire), l'écoulement du métal fondu se ralentit de telle sorte que les forces visqueuses dans la couche limite deviennent de plus en plus significatives, la couche limite gagne ainsi en épaisseur. Cette situation entraîne une diminution des contraintes de cisaillement pour traîner le liquide situé à proximité de la paroi solide.

En réalité, l'effet général d'un gradient de pression positif est de provoquer la transition. Si le gradient de pression est suffisamment intense, la couche métallique laminaire décolle.



**Figure 61.** Apparition d'un point de décollement qui a conduit à une mauvaise qualité de découpe [76]

La figure expérimentale ci-dessus montre bien que la transition du laminaire au turbulent (après l'apparition du point de décollement) est accompagnée par une augmentation de l'épaisseur de la couche limite, ce qui conduit à une mauvaise qualité de découpe.

Après le point de décollement et l'apparition de la turbulence, le transfert de chaleur du liquide vers le gaz devient efficace, nous avons donc un refroidissement du film métallique qui entraîne à nouveau sa solidification, et en conséquence la surface devient épaisse et rugueuse. Pour mieux comprendre ce qui se produit, calculons le taux de refroidissement total  $Q$  qui obéit à la loi suivante [77,81]:

$$Q = k_g D \Delta T (\rho_g U_g d / \mu_g)^{0.5} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

Ainsi que la contrainte de cisaillement à l'interface gaz/liquide qui est donnée par l'expression:

$$\tau = 0.332 \rho_g U_g^2 d (\rho_g U_g d / \mu_g)^{0.5} \quad (22)$$

Où  $d$  est l'épaisseur de la pièce,  $D$  l'espace qui sépare les deux bords de découpe (largeur de saignée),  $\Delta T$  la différence de température entre le front de découpe et l'ambiance, c.à.d. la température du métal fondu et celle du jet de gaz et  $Pr$  le nombre de Prandtl.

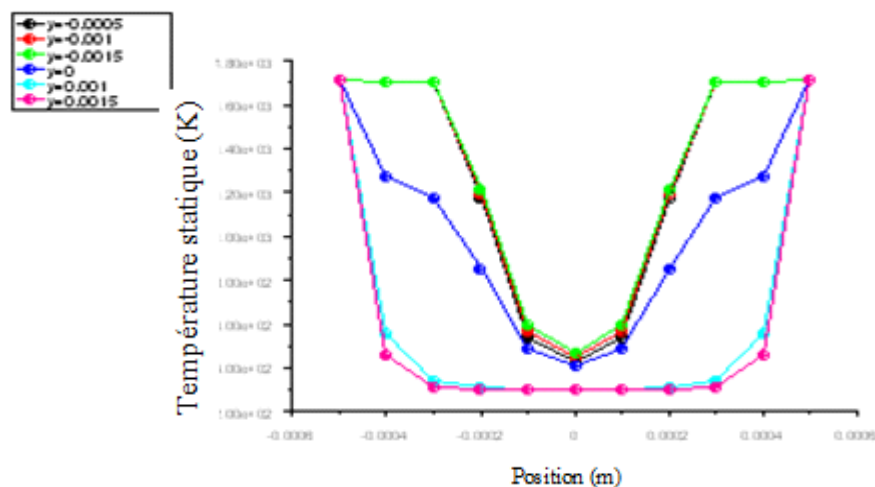
Dans notre cas, nous supposons que la température moyenne du front et des bords de découpe (de l'acier inoxydable fondu) est de 1712K et celle du jet de gaz à l'intérieur de la saignée reste à 300K. Prenons les trois exemples de gaz neutre et inertes : azote, argon et hélium entrant avec une vitesse de 10 m/s (laminaire), pour une épaisseur  $d$  de la pièce de 4mm et une largeur de la saignée de 0.5mm, nous obtenons les taux de refroidissement et les contraintes de cisaillement donnés par le tableau 9 suivant.

**Tableau 9:** Propriétés des différents gaz inertes et calcul des taux de refroidissement et des contraintes de cisaillement.

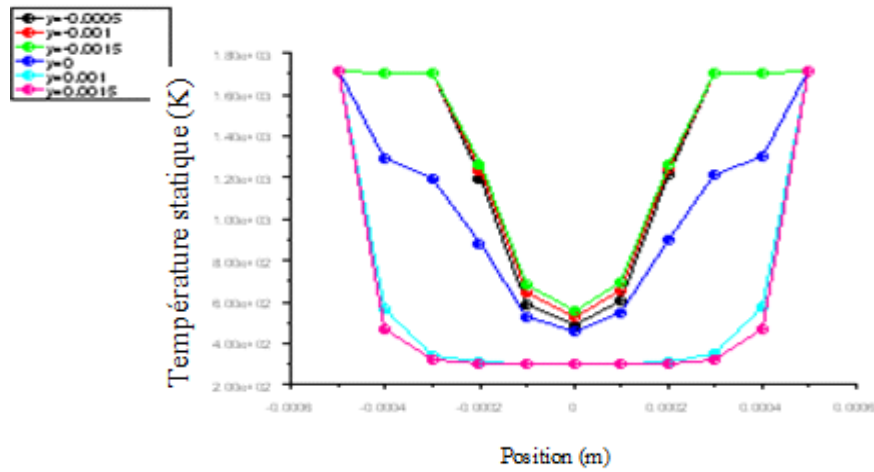
	<b>Azote</b>	<b>Argon</b>	<b>Hélium</b>
$\mu_g$ (kg/m-s)	$1.66 \cdot 10^{-5}$	$2.12 \cdot 10^{-5}$	$1.99 \cdot 10^{-5}$
$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.138	1.623	0.163
<b>Re</b>	685.5	765.6	819.1
$K_g$ (W/m-K)	0.0242	0.0158	0.152
$C_p$ (J/kg-K)	1040.7	520.64	5193.0
<b>Q (W)</b>	0.785	0.545	1.725
$\tau$ (N/m <sup>2</sup> )	250.2	377.2	12.39

Ces calculs montrent une seconde fois que les taux de refroidissement  $Q$  des trois gaz inertes restent négligeables devant la puissance laser incidente généralement utilisée lors d'une découpe laser, et qui est de l'ordre de quelques kW. Notons aussi que comparé aux autres gaz (azote et argon), l'hélium refroidi mieux, et nous avons donc une solidification plus rapide en peu de temps. L'argon et l'azote quant à eux, présentent presque le même taux de refroidissement. Par contre la valeur du cisaillement de l'hélium est trop faible ( $12.39\text{N/m}^2$ ), On peut sur cela conclure qu'il n'est donc pas intéressant d'utiliser l'hélium pour l'évacuation de l'acier inoxydable fondu lors d'une découpe laser.

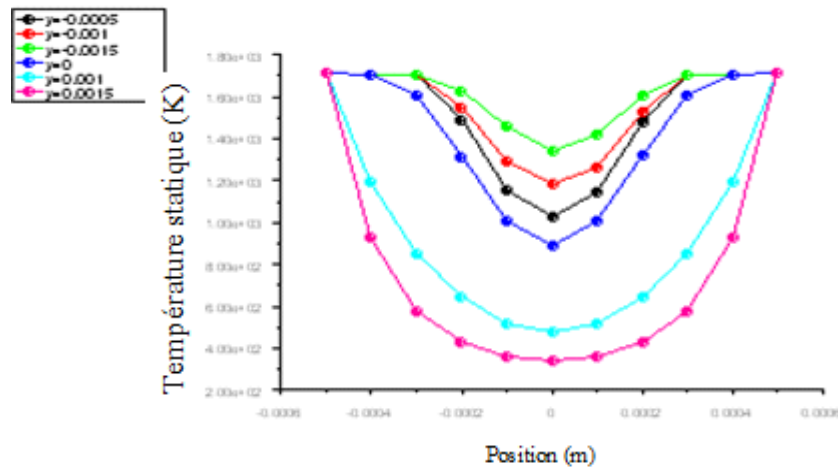
Le champ thermique de cette étude peut aussi apporter quelques précisions concernant les résultats trouvés. En effet, la Figure 62 montre la distribution de températures pour les trois gaz inertes dans la saignée et à différentes positions le long de l'axe y : -0.0015, -0.001, -0.0005, 0, 0.001, 0.0015m (l'origine est située au milieu de la pièce métallique)



(a) Argon



(b) Azote



(c) Hélium

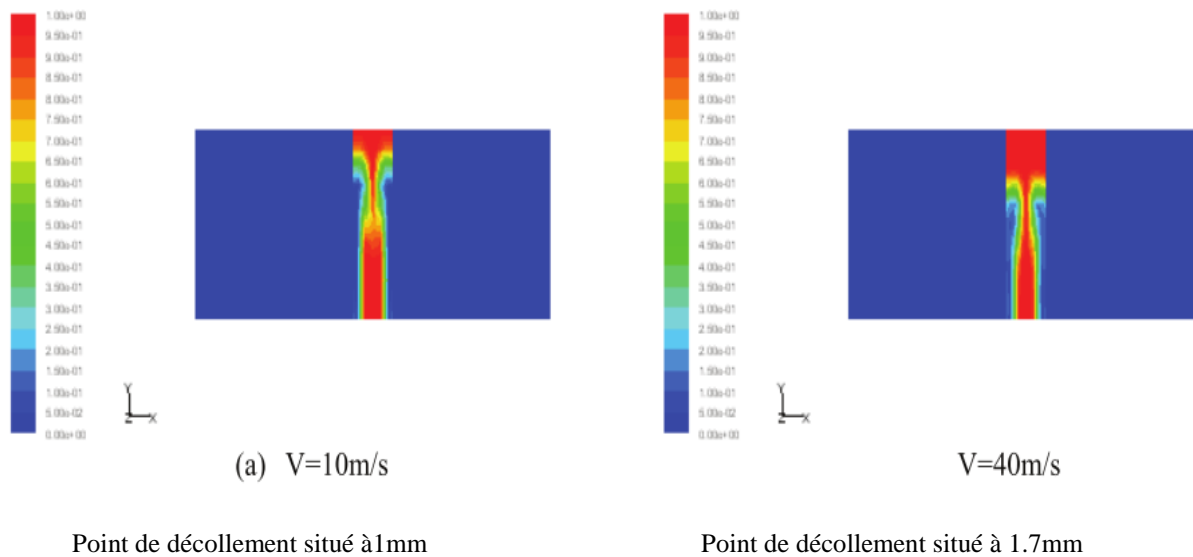
**Figure 62.** Distribution de température à des positions différentes de la saignée et pour différents gaz inertes.

Rappelons que la température du film métallique est portée à 1712K, alors que celle du jet est à 300K. La température du gaz est élevée dans la région située à proximité du film métallique chauffé et donc où se présentent les couches limites thermiques et cela est observé pour les trois gaz d'assistance utilisés. Remarquons aussi que le transfert de chaleur est significatif dans la partie centrale de la saignée en particulier pour l'Hélium (voir fig. 62 c); puisque sa conductivité thermique et sa chaleur spécifique sont plus grandes comparées aux deux autres gaz. L'Hélium réduit donc fortement la température du film. Nous observons aussi que les distributions de température dans la saignée pour l'azote et l'argon sont approximativement identiques.

Concernant la contrainte de cisaillement, les calculs montrent bien que l'argon évacue le métal fondu d'une manière plus efficace comparé aux deux autres gaz (voir tableau 9), puis vient l'azote et en dernier l'hélium.

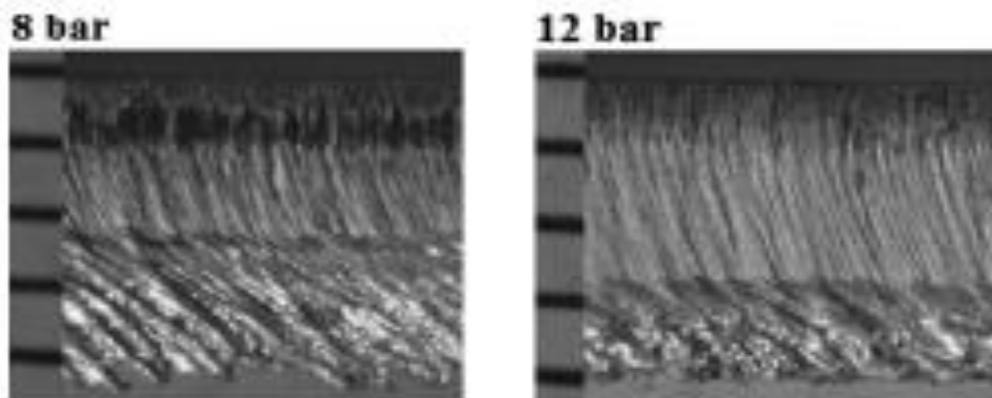
Ainsi pour une meilleure qualité de découpe laser de ce matériau il est conseillé d'utiliser l'argon ou l'azote.

- Influence de la vitesse du gaz sur le point de décollement:



**Figure 63.** Influence de la vitesse du gaz sur la position du point de décollement.

Nous remarquons aussi, que pour un instant déterminé ( $1 \cdot 10^{-3}\text{s}$ ), plus la vitesse du jet de gaz augmente, plus le point de décollement de la couche limite métallique se déplace vers le bas. Les figures expérimentales ci-dessous montrent bien l'effet de la pression du gaz sur le point de décollement.



**Figure 64.** Influence de la pression (vitesse) du gaz sur le point de décollement expérimentalement [82].

**3.3 Influence de la variation de la vitesse de découpe sur le film métallique :** La méthode numérique utilisée repose sur le concept de la couche limite laminaire et la méthode des différences finies [81,83]. Cette dernière nous permet de mesurer l'épaisseur du film, sa vitesse à l'interface liquide/gaz, le coefficient de frottement, et la contrainte de cisaillement. Nous étudions aussi l'effet de la vitesse du jet de gaz d'azote sur la couche limite métallique avec une autre méthode de résolution numérique ce qui nous permet de valider nos résultats obtenus analytiquement. L'étude inclut une nouveauté, l'influence de la variation de la vitesse de découpe et donc de la puissance laser incidente sur l'épaisseur du film qui n'a pas été traitée.

- **Formulation de la vitesse de découpe, de l'épaisseur de la couche limite, de la vitesse et de la contrainte de cisaillement à l'interface film/gaz:**

Nous supposons que la source laser incidente  $P_l$  ( $P_l = P_d + P_m + P_{cond}$ ) qui est utilisée uniquement pour chauffer le matériau en volume et le fondre se déplace dans la direction  $z$  (figure 65) avec une vitesse de découpe donnée par :

$$V_c = \frac{P_m}{dD\rho_m L_f} \quad (23)$$

Avec  $P_m$  : est l'énergie exigée pour fusionner le volume du matériau dans la zone de découpe. Selon les hypothèses citées précédemment et en considérant un état stationnaire du processus de découpe, le bilan de masse entre le taux de fusion et celui de la matière éjectée de la saignée (voir la figure 65) est donné comme :

$$\begin{aligned} \rho_m U_m S_\delta &= \rho_m V_c S_1 \\ \text{Avec} \quad S_\delta &= \delta_m \pi D \\ S_1 &= d\pi D \end{aligned}$$

$S_\delta$  et  $S_1$  sont les sections droites et  $U_m$  est la vitesse moyenne du film métallique à travers la saignée. A partir des relations ci-dessus nous pouvons déduire l'épaisseur de la couche métallique en fonction de la vitesse de découpe :

$$\delta_m = \frac{V_c d}{U_m} \quad (24)$$

Sachant que le gradient de pression à l'intérieur de la saignée peut être donné en fonction de la densité du gaz ainsi que de sa vitesse, tel que :

$$\frac{\partial P}{\partial y} = -\frac{1}{2d} \rho_g U_g^2 \quad (25)$$

Ainsi, l'expression de la vitesse maximum ( $u_y = U_{\max}$ ) déduite de l'équation (6) du chapitre 4 et observée à l'interface gaz/liquide (à  $x = \delta_m$ ) a pour expression :

$$U_{\max} = -\frac{1}{(\mu_m + \mu_g)} \left( \frac{\rho_g U_g^2}{4d} \right) \left[ \frac{\delta_m^2}{2} \right] + \frac{\tau}{\mu_g} \delta_m \quad (26)$$

En considérant la contrainte de cisaillement agissant entre la paroi solide et la première couche du métal fondu située juste à sa proximité, qui est due au frottement visqueux, et qui constitue la force qui accélère le métal fondu vers l'extérieur. Nous pouvons l'écrire en fonction du coefficient  $C_f$  de la manière suivante :

$$\tau = \frac{C_f}{2} \rho_g U_g^2 \quad (27)$$

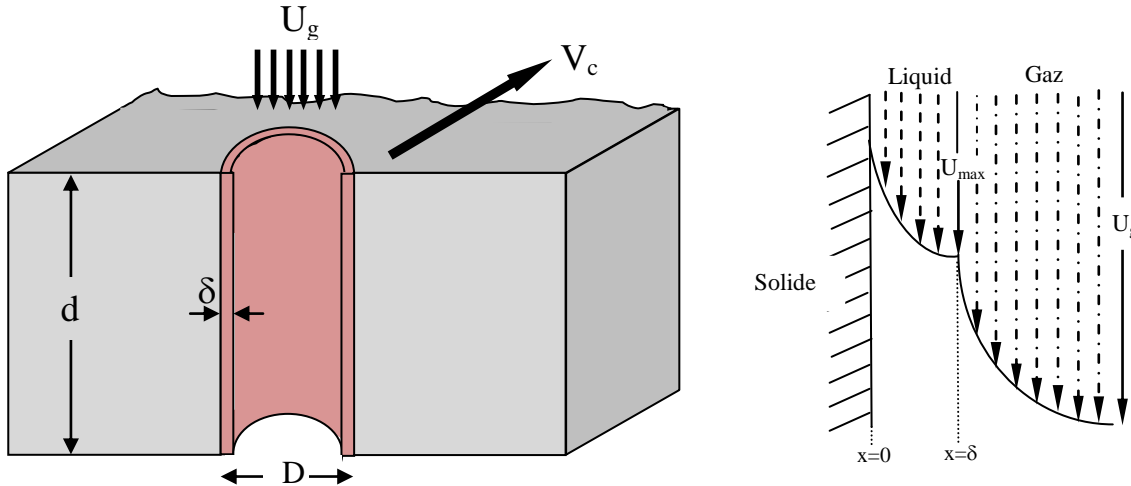
En faisant quelques approximations, notre problème devient comparable à celui du groupe d'écoulements de Falkner-Skan des couches limites [84], qui produisent des profils de vitesses semblables. Les composantes de ces vitesses sont une fonction d'une seule variable. Pour des perspectives de calcul, il est pratique de classifier l'écoulement de couche limite comme un écoulement pour lequel la diffusion visqueuse est significative uniquement dans la direction perpendiculaire à la paroi où se situe la couche limite. Cette couche présente donc de forts gradients de vitesses dans la direction perpendiculaire au front de découpe. Un schéma implicite est utilisé pour l'obtention d'une solution aux équations de Navier-Stokes en suivant cette méthode des différences finies.

- **Résultats obtenus avec la méthode des différences finies :**

Les paramètres utilisés dans cette section sont donnés dans le tableau 10. On suppose dans ce dernier cas que les propriétés du gaz et celles du métal fondu sont constantes, bien qu'en réalité elles dépendent de la température.

Pour déterminer la capacité du jet de gaz dans l'évacuation du métal, il est plus pratique de calculer son cisaillement, son coefficient de frottement et sa vitesse à l'interface. La figure 66 montre la variation de l'épaisseur de la couche limite avec la vitesse du jet de gaz pour différentes vitesses de découpe. Il est évident que des vitesses intenses du jet conduisent à des épaisseurs de film métallique plus fines, dues aux forts cisaillements gazeux à l'interface. Nous pouvons également observer sur la même figure que l'épaisseur du film augmente pour des vitesses de découpe plus élevées, cela est dû au taux de fusion qui devient plus intense. D'ailleurs, nous avons supposé pour simplification, que l'épaisseur de la couche métallique a une valeur fixe pour une vitesse de gaz et une vitesse de découpe données, bien qu'elles puissent changer le long de la direction de l'écoulement, comme nous l'avons constaté lors de notre résolution analytique. Pour un processus de découpe en fusion où le volume de la saignée doit seulement être fondu, nous

avons supposé initialement qu'un processus idéal dans lequel la puissance laser disponible  $P_1$  comprise entre 1 et 4 kW, a été partiellement transformée en énergie interne du matériau formée dans la saignée. Ainsi les vitesses de découpe théoriques  $V_c$  peuvent être estimées à partir de la relation (23) donnée ci-dessus, et elles varient entre 0.02 et 0.1m/s.



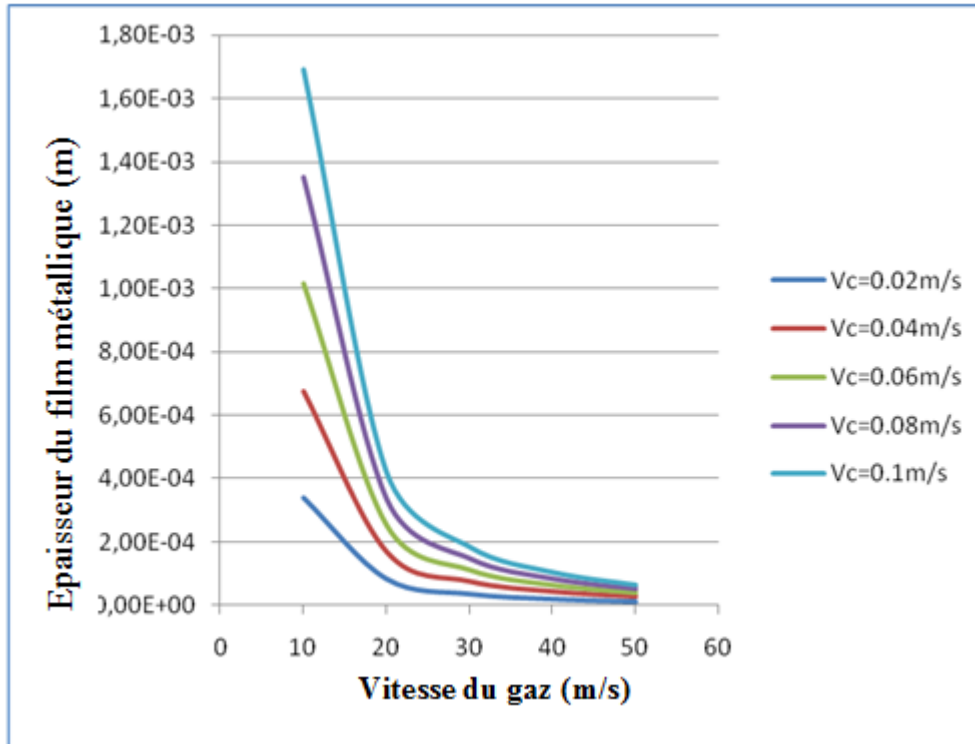
**Figure 65.** Domaine étudié avec déplacement de la pièce et profils des vitesses des deux couches limites.

Cette relation prévoit et confirme que pour des vitesses de découpe intenses correspond une couche de métal épaisse. La figure 67 illustre l'effet de la vitesse du jet de gaz sur la variation de la vitesse à l'interface pour une valeur fixée de la vitesse de découpe (0.02m/s). Cette dernière augmente uniformément avec la variation des vitesses du jet de gaz. On observe la même allure de figure pour la contrainte de cisaillement (voir figure 68).

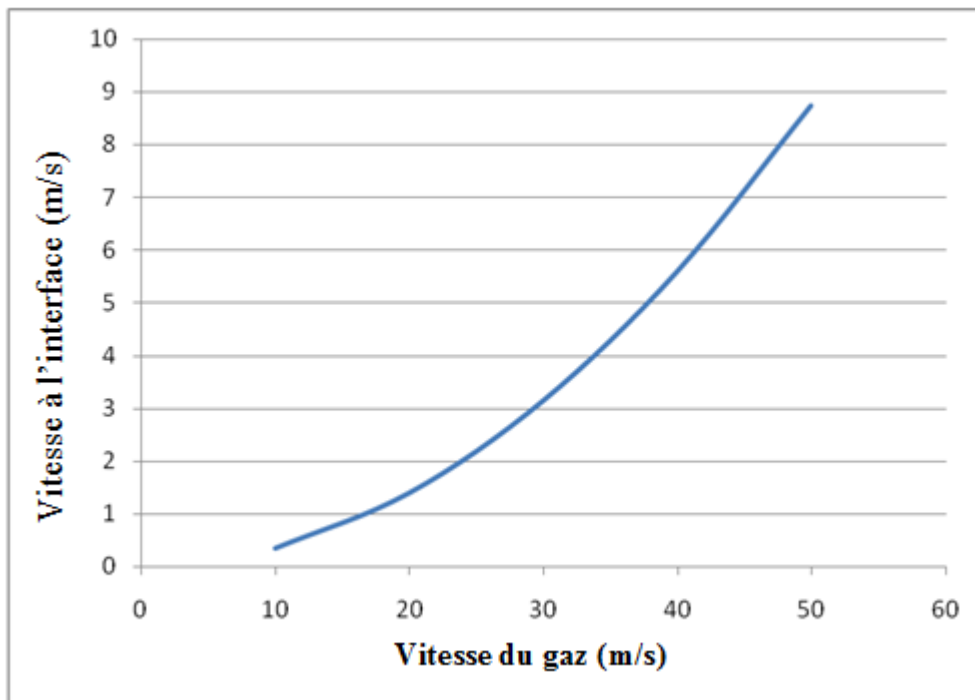
La figure 69, donne les valeurs du coefficient de frottement le long de la saignée de découpe pour différentes vitesses du jet. Ce coefficient augmente à l'entrée, puis diminue pour atteindre asymptotiquement une valeur constante le long des bords de découpe. Il est clair qu'on observe plus de frottement quand la vitesse du gaz est faible.

**Tableau 10.** Paramètres de la découpe laser

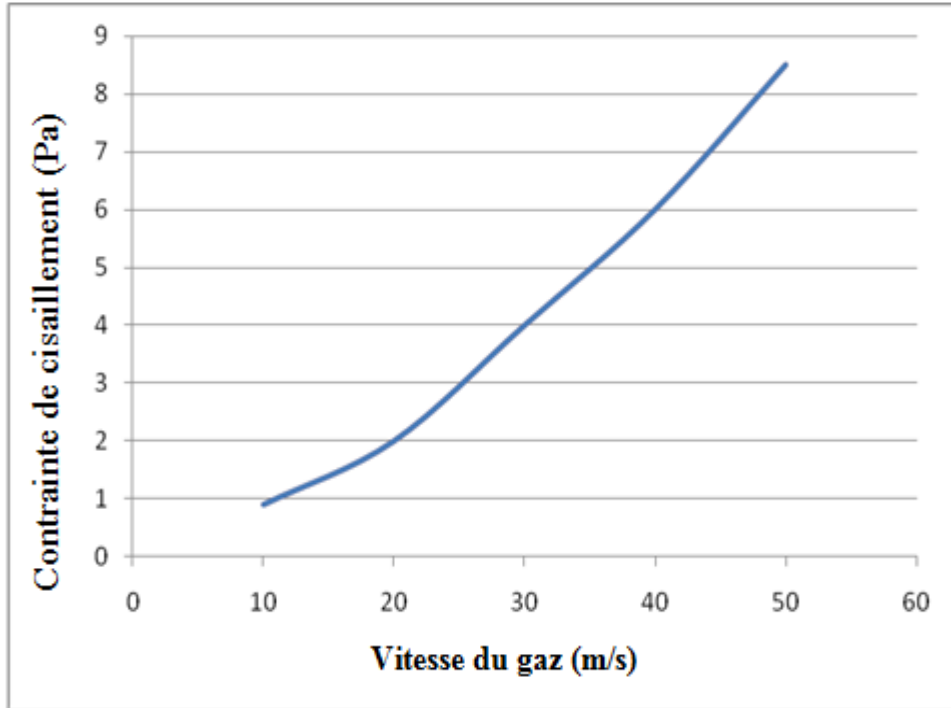
Puissance laser	Vitesse de découpe	Diamètre de la tuyère	Vitesse du gaz	Distance d'impact
1-4 (kW)	0.02-0.1 (m/s)	1 (mm)	10-50 (m/s)	1 (mm)



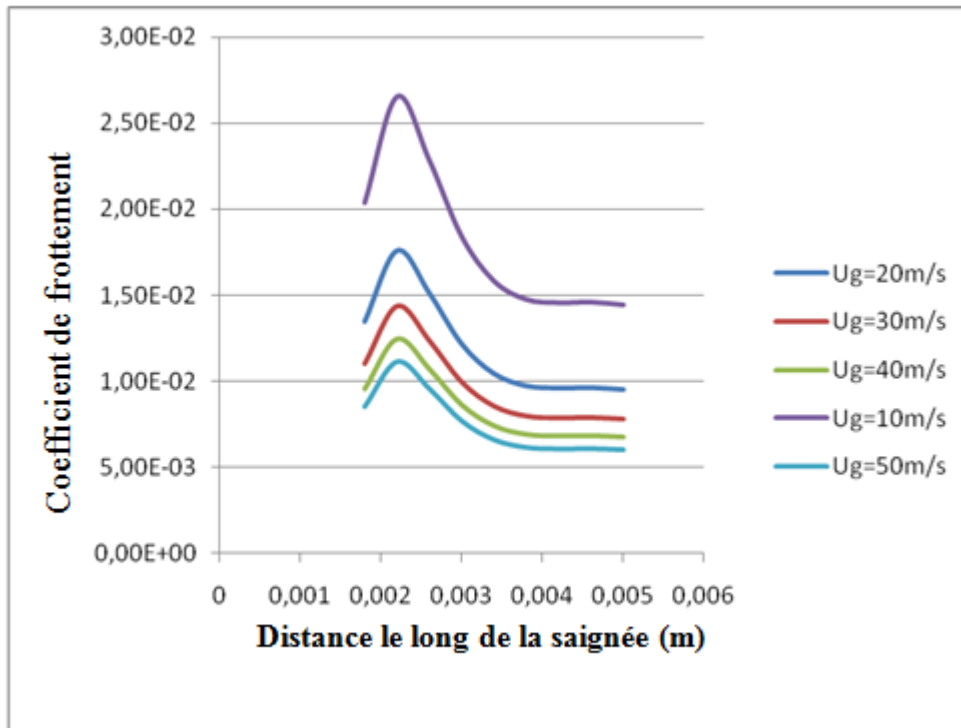
**Figure 66.** Variation de l'épaisseur du film métallique en fonction de la vitesse du jet de gaz pour différentes vitesses de découpe.



**Figure 67.** Variation de la vitesse du film métallique à l'interface en fonction de la vitesse du jet de gaz pour  $V_c=0.02\text{m/s}$ .



**Figure 68.** Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse du jet de gaz pour  $V_c=0.02\text{m/s}$ .



**Figure 69.** Distribution du coefficient de frottement le long de la saignée pour différentes vitesses du jet de gaz.

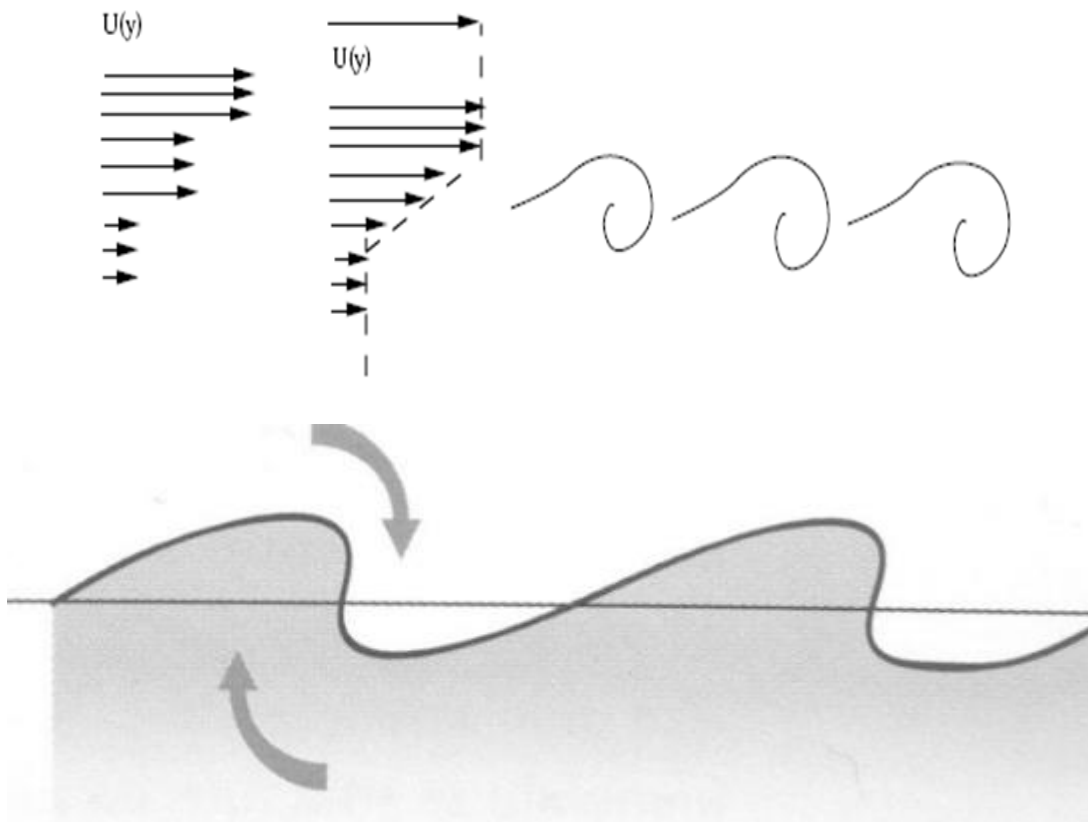
#### 4. Instabilités pouvant apparaître lors d'une découpe laser sous gaz inerte

On ne peut étudier la découpe laser sans parler brièvement des instabilités qui peuvent surgir lors du processus même si ceci n'est pas l'objectif de notre sujet de thèse.

Ce dernier paragraphe est donc consacré aux différentes hypothèses et modèles bibliographiques tentant d'expliquer les phénomènes d'instabilités mis en jeu lors d'une découpe laser.

- **Instabilité due au jet de gaz d'assistance (Instabilité de Kelvin-Helmholtz) :**

Cette instabilité est un mouvement ondulatoire qui se forme lorsque deux fluides superposés et thermiquement stables se déplacent à des vitesses différentes à leur surface de contact. La différence de vitesse qui existe entre ces deux écoulements va produire une vague turbulente transversale à la frontière. L'interface reste horizontale et est stabilisée par la gravité et la tension de surface lorsque la vitesse des deux fluides est faible. Mais pour une différence de vitesse critique à l'interface, on assiste à une instabilité d'origine inertielle appelée instabilité de Kelvin Helmholtz (figure 70).



**Figure 70.** La différence de vitesse entre les deux fluides tend à former un cisaillement graduel et une rotation.

La figure ci-dessous représente un exemple concret d'une instabilité de type Kelvin Helmholtz au sommet des nuages dans le ciel de San Francisco.

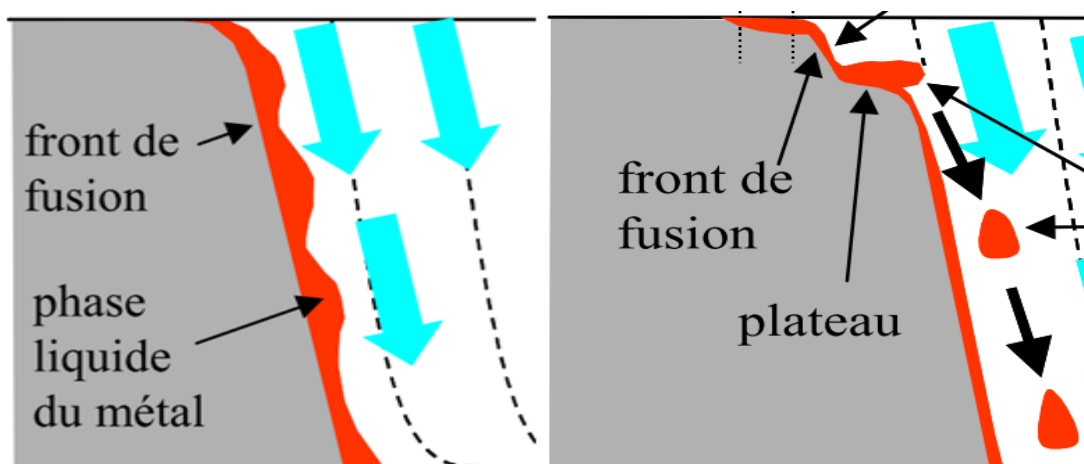


**Figure 71.** Onde de Kelvin Helmholtz au sommet des nuages dans le ciel de San Francisco.

Notons que cette instabilité est observée lors d'une découpe laser, elle se manifeste par la formation de vagues transversales à l'écoulement progressant axialement le long du film liquide. L'interface entre le liquide et le gaz environnant étant une frontière déformable, dans un premier temps le courant gazeux qui s'écoule à grande vitesse sur la couche liquide lente va générer un cisaillement qui se traduit par le développement de cette instabilité dite de type Kelvin-Helmholtz.

Son origine n'est pas liée à la viscosité des deux fluides, qui ne joue ici qu'un rôle mineur en atténuant par diffusion la croissance de l'instabilité, mais à leur inertie.

La tension de surface s'oppose à cette amplification et est donc stabilisante puisqu'elle cherche à conserver la planéité de la surface découpée [45]. En effet, une viscosité supérieure freine le développement des instabilités de type Kelvin-Helmholtz.



**Figure 72.** (a) Onde de Kelvin Helmholtz apparaissant lors d'une découpe laser.  
(b) Onde de Kelvin Helmholtz conduisant à l'arrachement des gouttelettes.

Cette instabilité est aussi à l'origine de l'arrachement des gouttelettes (voir figure ci-dessus), causée par les variations de pression dynamique de l'écoulement gazeux au-dessus d'une perturbation de hauteur de la couche liquide.

- **Instabilités qui se présentent au centre et sur les cotés de la découpe : Stries et humps**

Une compréhension de ce processus de génération des humps et stries nécessite une observation expérimentale directe du comportement de cet écoulement [18,85]

En fait, il s'avère que ces stries sont indépendantes les unes des autres, et comme elles s'écoulent vers le bas, elles doivent donc être générées à partir de la surface supérieure de l'échantillon. C'est donc cette zone qui a tout d'abord été analysée à l'aide d'une caméra rapide [22]. La génération intermittente de « humps », instabilité apparue sur la partie centrale de la saignée et le mouvement d'accumulations de matière fondue sur le côté de la saignée « stries », ont ainsi pu être observés. Ces instabilités sur la partie centrale et sur le côté ont un comportement très différent. En effet :

- il a été observé qu'à basse vitesse de découpe  $V_c$ , les parties centrales et les parois de la saignée sont instables. Lorsque  $V_c$  est augmentée, l'écoulement central fini par devenir stable.
- les humps se propagent avec une vitesse, une fréquence et une amplitude qui dépendent des paramètres opératoires (vitesse de coupe, puissance laser et jet de gaz).
- les humps sont des plateaux ou des marches, dont l'inclinaison locale est plus importante que l'inclinaison moyenne du front.
- la vitesse de descente des humps est différente de la vitesse moyenne du liquide métallique éjecté. Ce qui montre que ces humps ne transportent pas de matière, mais représentent une propagation d'onde. L'intervalle entre chaque hump est constant.
- lorsque l'inclinaison du front augmente, la longueur des stries verticales est réduite.
- le pas (longueur d'onde) des stries est nettement plus grand que celui des humps.
- il a été aussi observé que le pas de formation des humps diminue avec une augmentation de la pression de gaz et avec une réduction de diamètre de faisceau laser. D'autre part, il est indépendant de la distribution d'intensité du faisceau laser.
- les stries résultent du transfert de chaleur à partir des accumulations de liquide vers la partie solide sur les côtés de la saignée, au cours de leur descente. Il s'ensuit une rugosité des surfaces coupées.
- il existe une bonne corrélation entre les évolutions du pas des stries et celui des rugosités.
- Lorsque l'écoulement central est discontinu, les humps qui apparaissent sur cette partie peuvent perturber le déplacement des accumulations de liquide descendant le long des côtés de la saignée et accentuent la rugosité.

En réalité, le matériau fondu à la partie supérieure de la saignée ne peut pas se déplacer sur le long de la paroi de la saignée instantanément en raison de son maintien par la tension superficielle. La matière fondue ne commence à descendre en glissant sur les bords que lorsque sa taille atteint une certaine valeur critique. Cette taille dépend de la pression du gaz d'assistance et du coefficient de la tension superficielle.

- **Courbure des stries :**

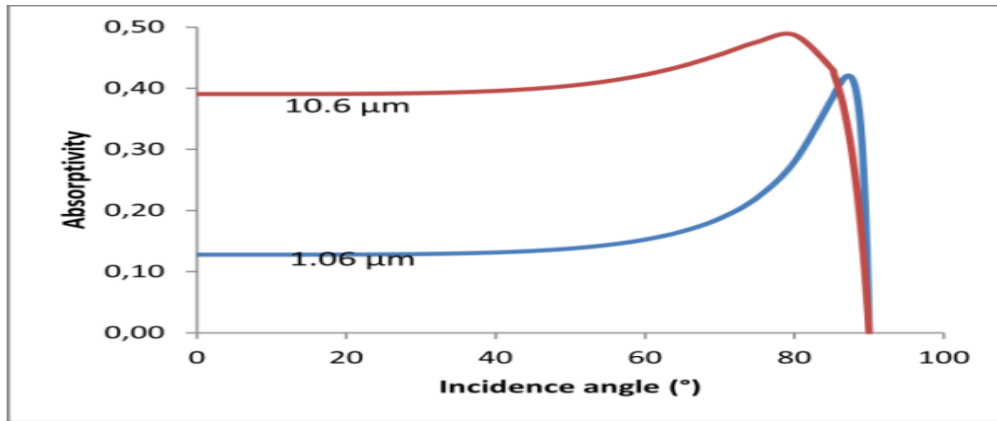
La courbure des stries est liée à la vitesse de progression du front de fusion  $V_f$ . Elle est fonction non seulement de l'énergie thermique apportée par convection dans le bas de la saignée mais aussi du gradient de température entre la phase liquide et la phase solide et de l'épaisseur du film liquide. Nous avons considéré plusieurs cas en comparant cette vitesse à celle de découpe  $V_c$ .

- ✓ Si  $V_f$  est supérieure à  $V_c$ , le front avant de découpe est préchauffé par la conduction dans le métal liquide, il y a un peu plus de métal fondu. Les stries sont alors inclinées vers l'avant.
- ✓ Si  $V_f$  est inférieure à  $V_c$ , le front avant de découpe n'est pas préchauffé car le front de fusion progresse moins rapidement. A ce moment, l'épaisseur du film liquide est alors plus faible. On observe alors des stries inclinées vers l'arrière.
- ✓ Si  $V_f$  est du même ordre de grandeur que  $V_c$ , les stries sont verticales, dans l'axe du jet.

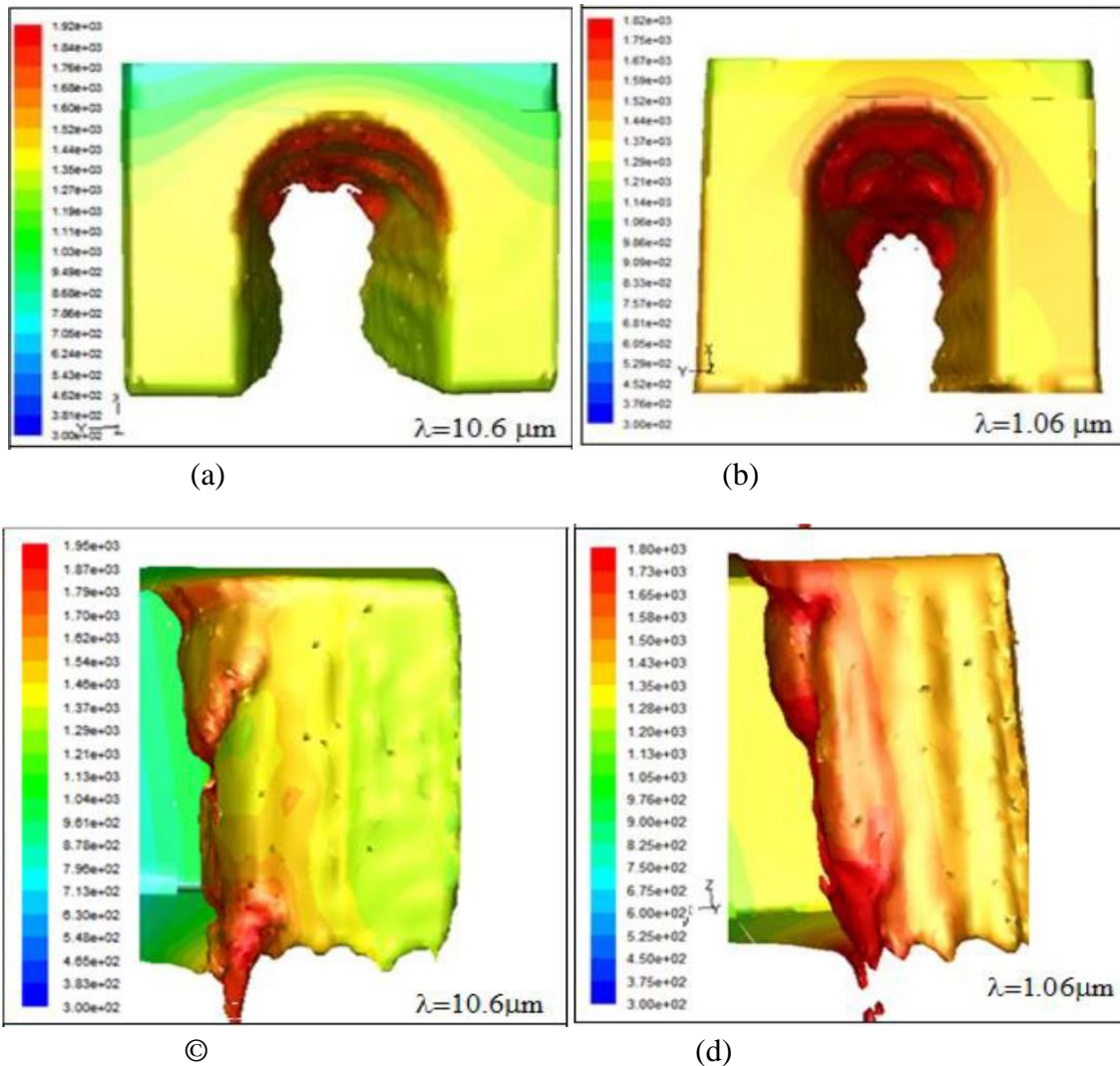
## 5. Choix du laser pour diminuer les instabilités

**Choix entre un laser CO<sub>2</sub> et un laser Nd :YAG :** Amara *et al.* [48] ont étudié numériquement le sujet très intéressant de la différence de qualité de découpe observée entre des longueurs d'onde laser à 1  $\mu\text{m}$  et à 10  $\mu\text{m}$ .

Les auteurs mettent en évidence deux facteurs qui peuvent affecter le processus de génération de stries. Ces deux facteurs concernent la dépendance de la loi d'absorption avec la longueur d'onde laser: Le premier facteur concerne l'absorption du faisceau laser sur les parois de la saignée. Pour les parois raides, un faisceau de longueur d'onde de l'ordre de 10 $\mu\text{m}$  est plus absorbé, de sorte que la vitesse de descente des accumulations de liquide devient plus rapide en raison d'une viscosité inférieure. Cet effet peut réduire la rugosité. L'autre facteur concerne la stabilité de l'écoulement central. Ils montrent que le profil du front avant de la saignée obtenu par un faisceau laser à 10  $\mu\text{m}$  est plus stable que celui obtenu par un faisceau à 1  $\mu\text{m}$ . Ceci peut également expliquer une qualité meilleure obtenue avec un faisceau laser à 10  $\mu\text{m}$  (laser CO<sub>2</sub>) où les stries sont moins apparentes (figure 74 (a, c)).



**Figure 73.** L'absorptivité en fonction de l'angle d'incidence pour deux longueurs d'ondes différentes.



**Figure 74.** Qualité de découpe d'un métal avec un laser CO2 (1.6μm) et un laser Nd : YAG (1.06 μm). [48]

### Choix entre un laser à fibres et un laser CO<sub>2</sub> :

Généralement on n'observe pas un réseau de stries mais deux. Ces deux réseaux de stries s'expliqueraient par la formation de deux couches liquides dont les températures ne seraient pas les mêmes : une température supérieure dans la partie haute de la découpe et une température inférieure dans la partie basse.

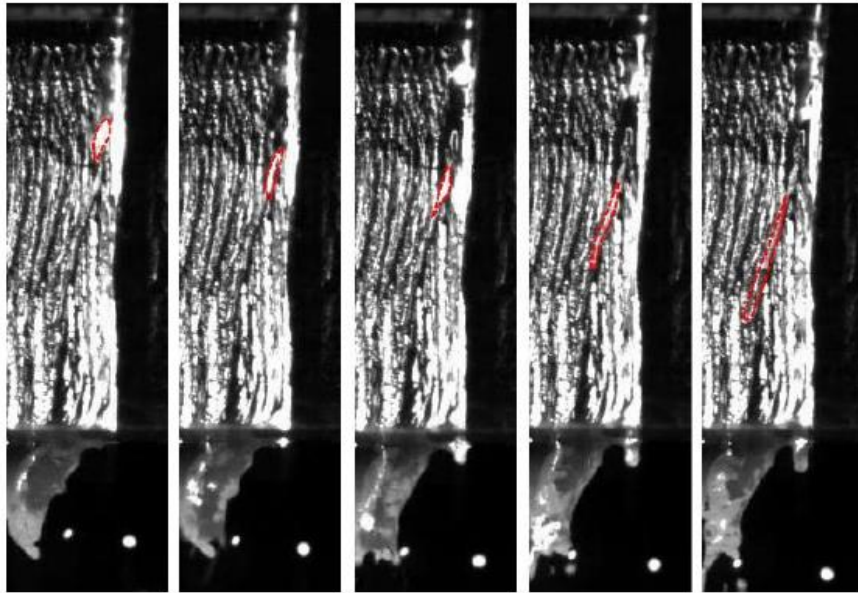


Fig. 7. Cutting of 6mm stainless steel, 2kW Fiber laser, nitrogen pressure 14 bar. Nozzle diameter 3 mm, standoff 1mm, focus is on -4mm under the upper surface. Interval between frames from 0.15 ms.

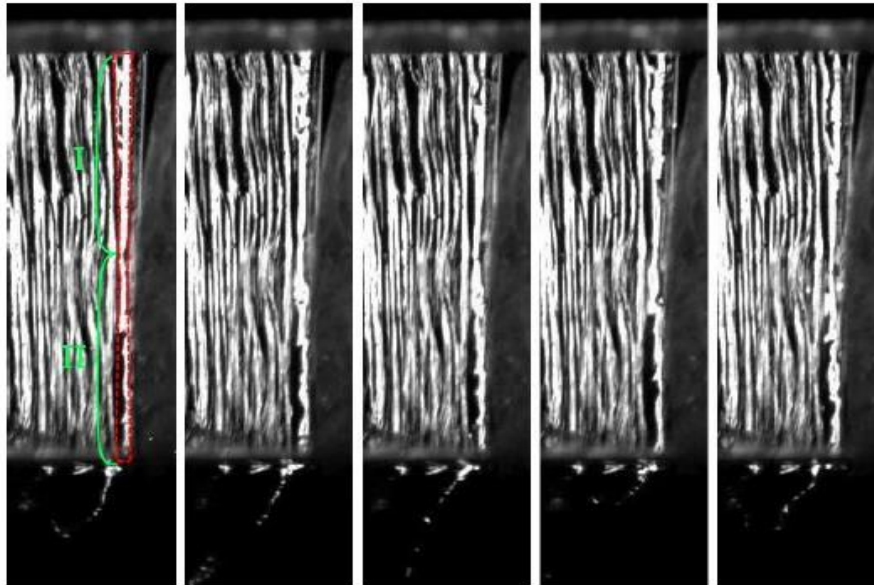


Fig. 6. Cutting of 6mm stainless steel, 2kW CO<sub>2</sub> laser, nitrogen pressure 14 bar. Nozzle diameter 3 mm, standoff 1mm, focus is on -4mm under the upper surface. Interval between frames: 0.5 ms.

**Figure 75.** Qualité de découpe de l'acier inoxydable avec un laser CO<sub>2</sub> et un laser à fibres [86].

Il est plus judicieux de travailler avec un laser CO<sub>2</sub> qu'avec un laser à fibre pour avoir une meilleure qualité de coupe de l'acier inoxydable comme le montre les figures 75. En effet, les stries sont presque verticales et les scories sont aussi presque inexistantes.

Nous concluons à travers ces analyses que le laser CO<sub>2</sub> est le mieux adapté pour la découpe de l'acier inoxydable.

## ***CONCLUSION GENERALE***

Dans ce mémoire de thèse, nous avons présenté les différentes techniques thermiques de découpe de métaux existantes. Ces techniques aux nombres de trois sont: l'oxycoupage, la découpe plasma et la découpe laser. Chacune d'elles présente ses avantages et inconvénients. La découpe laser reste à l'heure actuelle celle qui répond le mieux aux critères de rapidité et de précision pour de faibles épaisseurs de métaux. C'est la raison pour laquelle une étude approfondie consacrée aux caractéristiques de l'écoulement du métal fondu créé lors d'une découpe laser assistée avec un jet de gaz reste toujours d'actualité.

Nous nous sommes intéressés à la découpe par laser d'une pièce d'acier inoxydable assistée avec un jet de gaz neutre ou inerte, en suivant deux approches différentes, l'une analytique et l'autre complémentaire numérique.

Pour la démarche purement analytique, nous avons opté pour une nouvelle résolution basée sur la mécanique des fluides et plus précisément sur le concept de la théorie des couches limites.

Un choix bien précis de paramètres opératoires en concordance avec les conditions expérimentales, nous a permis de prouver qu'à l'intérieur de la saignée l'écoulement gazeux laminaire est en convection forcée dominante de type couche limite. Cette approche nous a aussi permis de conclure que l'écoulement du film métallique à l'intérieur de la saignée est stable puisqu'il est conduit par les contraintes de cisaillement et non pas par le gradient de pression. Il a été aussi démontré que l'argon et l'azote évacuent plus facilement le film métallique comparé à l'hélium.

Thermiquement, nous avons observé que l'hélium permet un refroidissement et une re-solidification rapide du film métallique. Cependant, comme il est un mauvais cisailant, il ne devrait pas être recommandé pour la découpe laser de l'acier inoxydable. Finalement nous pouvons conclure que l'azote et l'argon sont les plus efficaces pour la découpe de ce type de matériau.

Cette approche a aussi montré que les pertes de chaleur par conduction vers la partie solide du matériau sont largement supérieures aux pertes par convection vers le jet de gaz. Aussi les pertes globales (par conduction et par convection) demeurent négligeables comparées à la puissance laser incidente généralement exigée pour le processus de découpe des métaux qui est de l'ordre de quelques kW. Elle nous a aussi permis de calculer les épaisseurs dynamiques et thermiques du film métallique le long de la saignée, les contraintes de cisaillement, les vitesses à l'interface (film/gaz), les coefficients de transfert de chaleur moyen ainsi que les taux de refroidissement du film métallique en fonction du nombre de Reynolds et de Prandtl gazeux. Cependant, cette démarche reste incomplète du fait qu'elle n'arrive pas à nous renseigner sur l'état et la qualité de la pièce découpée. Pour cela une étude numérique complémentaire a été développée, elle a été menée avec le logiciel ANSYS/FLUENT, qui est régi par les lois de conservation des équations de Navier Stokes. Une attention particulière a été portée sur l'adoption d'un maillage raffiné au niveau des couches limites métalliques et gazeuses.

Nous avons constaté que l'apparition des recirculations pariétales (vortex) à l'entrée de la saignée, entraînent le décollement du film métallique. Les tourbillons qui apparaissent après l'apparition du point de décollement déclenchent la turbulence. Ces tourbillons refroidissent le métal fondu et lui arrachent de la chaleur. Nous observons donc à nouveau une resolidification et

un épaissement du métal après ce point qui entraîne une mauvaise qualité de la surface découpée. Une autre paire de vortex apparaît à la sortie de la saignée. Ces vortex ou tourbillons favorisent le transfert thermique dans la saignée et l'extension, et peuvent être responsables de l'apparition de scories. Nous avons aussi remarqué que ce point de décollement varie légèrement en fonction de la nature du jet de gaz et du temps, par contre il varie d'une manière significative en fonction de la pression du jet (vitesse).

Nous pouvons ainsi conclure qu'un écoulement de jet laminaire et subsonique est déconseillé pour la découpe de l'acier inoxydable. Un jet turbulent serait beaucoup plus efficace pour une meilleure qualité de découpe. Dans une seconde étude numérique mise dans les mêmes conditions que l'analytique, utilisant la variation de la vitesse de découpe et celle de la nature du jet de gaz (argon, azote et hélium). Il a été démontré une seconde fois mais différemment qu'il est déconseillé d'utiliser l'hélium pour l'évacuation de l'acier inoxydable fondu lors d'une découpe laser. En parallèle, cette étude montre bien que les taux de refroidissement des trois gaz inertes restent toujours négligeables devant la puissance laser incidente généralement utilisée pour ce processus, qui est de l'ordre de quelques kW.

D'autres conclusions déduites de cette étude peuvent être énumérées comme suit :

1. Quand la vitesse du jet de gaz augmente l'épaisseur de la couche métallique diminue.
2. Une grande vitesse du jet de gaz conduit à un cisaillement élevé.
3. La couche métallique est plus épaisse pour des vitesses de découpe plus élevées.
4. Le coefficient de frottement ainsi que la contrainte de cisaillement sont plus intenses à l'entrée de la saignée.
5. À mesure que la vitesse du jet de gaz augmente, le frottement diminue.

Notons que cette approche numérique nous a aussi permis de valider quelques résultats obtenus avec l'approche analytique.

Il a été aussi démontré théoriquement et pour la première fois dans cette thèse que la pression de recul joue un rôle négligeable dans le cas d'une découpe laser assistée avec un jet de gaz neutre ou inerte. Nous confirmons le résultat expérimental observé par Hirano et Fabbro en 2012. Il a été aussi démontré que dans notre cas d'étude, les deux forces qui agissent sur le métal fondu, à savoir, la contrainte de cisaillement et le gradient de pression ne sont pas du même ordre de grandeur.

Le groupe dirigé par R. Fabbro du PIMM Lab. de l'Ecole Arts & Métiers ParisTech, a étudié le processus de découpe laser de l'acier inoxydable en collaboration avec notre équipe depuis 2012, leur travail est plus expérimental que théorique. Nos simulations viennent donc compléter leurs résultats trouvés dans le cas d'un écoulement de gaz compressible, en régime turbulent, pour des conditions réalistes de découpe. L'article intitulé '*Turbulent ejection of stainless steel film during fusion laser cutting process*' présenté à la Conférence ICTEA 2016, a montré que notre approche analytique donne des résultats qui concordent avec ceux trouvés expérimentalement.

**Perspectives :** la simulation tridimensionnelle de la découpe laser assistée avec un jet laminaire est envisagée en utilisant les procédures élaborées dans l'étude bidimensionnelle. Et certaines questions soulevées dans cette thèse (dans le cas 2D) obtiendront probablement des réponses.

Pour la compréhension des mécanismes au cours de l'interaction laser matière, les grandeurs microscopiques (densité électronique et température) et macroscopique (densité, pression, absorption ...) qui dépendent fortement de la température ne sont pas connues avec une grande précision, celles-ci sont pourtant fondamentales pour la compréhension physique du procédé et doivent être déterminées avec une précision acceptable. Une recherche poussée dans ce domaine, nous permettra de nous rapprocher plus des résultats expérimentaux.

L'un des problèmes de la qualité dans la découpe laser est la génération des stries sur les surfaces coupées, ce problème, n'a pas été entamé dans notre étude, car il ne fait pas partie des objectifs de cette thèse. La raison fondamentale de cette situation est qu'en fait nous ne comprenons toujours pas bien le mécanisme de la génération des stries en découpe laser avec un gaz neutre ou inerte. Il y a eu de nombreux modèles théoriques pour expliquer ce phénomène, mais une conclusion claire et définitive n'a jamais été obtenue.

La thèse de K. Hirano (2012) qui a été dirigée par R. Fabbro, a un peu expliqué le phénomène d'apparition de ces stries ainsi que celui des humps (bosses). Pour eux, cette dynamique dépend aussi de la stabilité de l'écoulement central. Lorsque l'écoulement central est stable, les accumulations de liquide peuvent descendre sans perturbation et les stries résultantes sont presque verticales, assez régulières et relativement lisses. D'autre part, quand l'écoulement central devient instable, les humps produits dans la partie centrale peuvent fortement interférer avec les accumulations de liquide. Les trajectoires des accumulations sont alors perturbées, et la qualité finale de la surface devient irrégulière et dégradée. Ces instabilités sont expliquées avec cohérence par le seul effet de la tension de la surface. Des études ultérieures sur le mécanisme de la génération de stries avec un gaz inerte ou neutre sont donc indispensables pour mieux comprendre ce phénomène.

Notre discussion sur la stabilité des écoulements de liquide est uniquement basée sur les aspects d'hydrodynamique. Il est possible que le processus de transfert de chaleur influence également cette stabilité.

Enfin, il est aussi intéressant de compléter l'étude du jet turbulent (présentée à l'ICTEA 2016) avec la méthode analytique que nous avons suivie.

## REFERENCES

- [1] R. Fericola, 'New oxygen plasma process rivals laser cutting methods', *Welding Journal*, (73), 6, pp 65-69, 1994.
- [2] K. Decker, 'Cutting systems in an environmental context', *Svetsaren*, (1), pp34-37, 1999.
- [3] S. Ramakrishnan, V. shrinet, F. B. Polivka, T. N. Kearney and P. Koltum, 'Influence of gas composition on plasma arc cutting of mild steel', *J. Phys. D.*, (33), 18, pp288-2299. 2000.
- [4] J. Berkmanns, M. Faerber, 'Facts about laser technology - laser cutting'. <http://www.laserdeal.com/techinfofiles/>; 2005 [cited 05/09/2011].
- [5] Li. L. Low dky, P. J. Byrd, 'The influence of temporal pulse train modulation during laser percussion drilling'. *Optics and Lasers in Engineering*. 35, 149-64, 2001.
- [6] S. Leigh, K. Sezer, C. Grafton-reed, M. Cuttall, 'Statistical analysis of recast formation in laser drilled acute blind holes in cmsx-4 nickel superalloy'. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 43, pp 1094-1105, 2009.
- [7] E. Abdulhadi, J. M. Pelletier, M. Larnbertin, 'Metallurgical effects induced by laser cutting, experimental and theoretical investigation'. *B. Section, icalco, lia*, 83. 1997.
- [8] D. Rosenthal, 'The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments', *Transactions of ASME*, Vol. 68, pp. 849-866, 1946.
- [9] A. B. J. Sullivan and P. T. Houlcroft, 'Gas-jet laser cutting', *British welding journal*, 14, pp 443-445, 1967.
- [10] J. Powell, 'CO2 laser cutting', Springer Verlag, isbn 0-387-19786-9, 1993.
- [11] V S. Kovalenko, V.V. Romanenko, L.M. Oleschuk, 'The efficient processes of cutting with laser beam', (in russian), *kiev technika*, 1987.
- [12] V.G. Niziev, 'Theory of CW laser beam cutting', *Laser Physics*, Vol. 3, no. 3, 1993.
- [13] V.S. Golubev, 'Non-stationary plasma-thermo-fluid dynamics and transition in processes of deep penetration laser beam-matter interaction', *Spie*, Vol. 2207, pp. 248-255, 1994.
- [14] V.S. Golubev, 'possible hydrodynamic phenomena in deep penetration laser channels' *Ahpla*, pp 3888-26, 1999.
- [15] V.S. Golubev, 'Laser welding and cutting: recent insights into fluid-dynamics mechanisms', *Iquec-Lat'02*, Keynote lecture, 2002.
- [16] O. B. Kovalev, P. V. Yudin and A V Zaitsev, 'Formation of a vortex flow at the laser cutting of sheet metal with low pressure of assisting gas', *J. PHYS. D: Appl.* 41 155112, 2008.
- [17] M. Vicanek, G. Simon, 'Momentum and heat transfer of an inert gas jet to the melt in laser cutting', *J. PHYS. D : APPL. PHYS.* 20, pp 1191-1196, 1987.
- [18] M. Vicanek, G. Simon, H.M. Urbassek, I. Decker, 'Hydrodynamical instability of melt flow in laser cutting', *J. PHYS. D : APPL. PHYS.* 20, pp 140-145, 1987.
- [19] Publication collective sous la direction de A.B. Vannes, 'La découpe par procédés, haute énergie laser, Jet d'eau, Plasma, électroérosion', *Centre technique des industries mécaniques*, ISBN 2-85400-356-X, 1995.

- [20] C. Mas, 'Modélisation physique du procédé de découpe de métaux par laser', PHD. Thèse à l'université Paris 6 (Paris), 2003.
- [21] C. Mas, R. Fabbro and Y. Gouedard, 'Steady-state laser cutting modeling', *Journal of Laser Applications*, 15, pp 145-152, 2003.
- [22] Koji Hirano, 'Study on striation generation during laser cutting of steel', PhD. Thèse à l'université, Paris 6 (Paris), 2012.
- [23] Koji Hirano, Rémy Fabbro, 'possible explanations for different surface quality in laser cutting with 1 micron and 10 microns beams' - *Journal of Laser Applications* , Vol. 24, N°1, p.012006 (9 pages), 2012.
- [24] E. Abdulahdi, 'Etude de la découpe d'acier au carbone par laser CO2. Modélisation thermique et métallurgique du procédé', thèse d'état de l'école nationale supérieure des arts et métiers, 1997.
- [25] J. Mazumber, W. M. Steen, 'Heat transfer model for CW laser material processing', *Journal of Applied Physics*, Vol. 51, 2, 941, 1980.
- [26] K. Chen, Y.L Yao, V. Modi, 'Numerical simulation of oxidation effects in the laser cutting process', *J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 15, pp. 835-842, 1999.
- [27] K. Chen, Y.L Yao, V. Modi, 'Gas dynamic effects on laser cut quality', *Proceedings ICALEO*, Section C, pp. 115-124, 1999.
- [28] K. Chen, Y.L Yao, 'Striation formation and surface finish in laser cutting of mild steel', *Manufacturing Science and Technology*, Vol. 1, ASME, 1997.
- [29] W. Schulz, D. Becker, 'On laser fusion cutting: a closed formulation of the process', *European Scientific Laser Workshop*, pp. 178-200, 1989.
- [30] W. Schulz, D. Becker, J. Franke, R. Kemmerling, G. Herziger, 'Heat conduction losses in laser cutting of metals', *J. PHYS. D : APPL. PHYS.* 26, pp 1357-1363, 1993.
- [31] W. Schulz, V. Kostykin, H. Zefferer, D. Petring, R. Poprawe, 'A free boundary problem related to laser beam fusion cutting : Ode Approximation', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, N° 12, pp. 2913-2928, 1997.
- [32] W. Schulz, V. Kostykin, M. Niessen, J. Michel, D. Petring, E.W. Kreutz, R. Poprawe, 'Dynamics of the cutting kerf : Ripple formation', *icaleo* 1998.
- [33] J. Michel, W. Schulz, M. Niessen, P. Abels, S. Kaierle, 'Advances in dynamical modeling. On-line monitoring and control in high quality cutting', *International conference on lasers in manufacturing*, Munich, pp 112-122, 2001.
- [34] D. Petring, 'Anwendungsorientierte modellierung des laserstrahlschneidens zur rechnergestützten prozessoptimierung', *Verlag Shaker*, Aachen, isbn 3-8265-043-3x, 1995.
- [35] A. Kaplan, 'A model of deep penetration welding based on calculation of the keyhole profile', *J. PHYS. D: Appl. Phys.*, 27, pp. 1805-1814, 1994.
- [36] A.F.H. Kaplan, 'An analytical model of metal cutting with a laser beam', *J. APPL. PHYS.*, 79 (5), 1996.
- [37] A.F.H. Kaplan, G. Groboth, 'Process analysis of laser beam cladding', *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123, 2001.

- [38] J. Duan, H.C. Man, T.M. Yue, 'Simulation of high pressure gas flow field inside a laser cut kerf', Proceedings of the 19th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Dearborn, MI, USA, 2-5 October, V. 89, p. B87-B96, 2000.
- [39] H. Horisawa, T. Fushimi, T. Takasaki, S. Yamaguchi, 'Impinging jet characterization in a laser cut kerf', Proceedings of the SPIE, Volume 3888, pp 644-653, 2000.
- [40] K. Chen, Y.L Yao, V. Modi, 'Numerical simulation of gas jet effects in laser machining', Proceedings ICALEO, Section b, 1998.
- [44] K. Chen, Y.L Yao, V. Modi, 'Gas dynamic effects on laser cut quality', Proceedings ICALEO, Section c, pp. 115-124, 1999.
- [45] T. Tamsaout, E. H. Amara, 'Numerical investigation of hydrodynamics behavior of melt layer during laser cutting of steel', Appl. Phys. a doi 10.1007/s00339-014-8497-x, 2014.
- [46] C. Chen, M. Gao, L. Wang, X. Zeng, 'Temperature characteristics at cut front edge during fibre laser cutting of aa2219 aluminium alloy', ICALEO 2015.
- [47] C. Zhang, P. Wen, Z. Yao, Y. Yuan, X. Fan, 'Visualization of flow separation inside cut kerf during laser cutting of thick sections', ICALEO 2015.
- [48] E. H. Amara, K. Kheloufi, T. Tamsaout, 'Wavelength effect on striation formation during metal laser cutting', ICALEO 2015.
- [49] A. Einstein, '*Zur Quantentheorie der Strahlung*', *On the Quantum Theory of Radiation (in German)*. 1917.
- [50] Alfred Kastler, 'Invention de la méthode de pompage optique', Prix Nobel, 1966.
- [51] J. Brossel, A. Kastler et J. Winter, 'Création optique d'une inégalité de population entre les sous-niveaux Zeeman de l'état fondamental des atomes', Journal de Physique et de Radium, Tome 13, p.668, 1952.
- [52] J.P. Gordon, H. J. Zeiger and C.H. Townes, 'The Maser - New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer', Physical Review, Vol.99, n°4, p.12641274, 1955.
- [53] N.G. Bassov, A.M. Prokhorov, 'The theory of a molecular oscillator and a molecular power amplifier', Discussions of the Faraday Society, Vol.19, pp 96-99, 1955.
- [54] T.H. Maiman, 'Solid State laser and iraser studies', Solid State Electronics, Vol. 4, pp. 236-249, 1962.
- [55] A. Javan, W.R. Bennett Jr et D.R. Herriott, 'Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture', Physical Review Letters, Vol.6, N°3, pp 106-110, 1961.
- [56] P. P. Sorokin et J.R. Lankard, 'Stimulated emission observed from an organic dye, chloroaluminum phthalocyanine', IBM Journal of Research and Development, Vol. 10, Issue 2, pp 162-163, 1966.
- [57] N. Berger, P. H. Eeg, 'Vetrinary laser surgery: a particular guide, p 234, 2006.
- [58] A.E. Siegman, 'New developments in laser resonators', Spie, Vol. 1224, Optical Resonators, pp. 2-14, 1990.
- [59] H. Sun, 'Thin lens equation for a real laser beam with weak lens aperture truncation', Opt. Eng., 37(11), pp. 2906-2913, 1998.

- [60] M. Bass, Handbook of optics Vol. I, 'Fundamentals, Techniques, & Design', 2<sup>nd</sup> Ed. Mc Graw-Hill, Inc, 1995.
- [61] Rudolf Weber, Andreas Michalowski, Marwan, Volkher Onuseit, Volker Rominger, Martin Kraus, and Thomas Graf, 'Effects of Radial and Tangential Polarization in Laser Material Processing', Physics Procedia 12:21, 2011.
- [62] H. K. Sezer, Li, Lin, 'The effect of gas jet and melt flow on laser drilling of thermal barrier coated nickel alloys', 23<sup>rd</sup>, ICALEO, San Francisco, CA, USA, 2004.
- [63] J. Fieret, B. A. Ward, 'Circular and non-circular nozzle exits for supersonic gas jet assist in CO<sub>2</sub> laser cutting', Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. n lasers in Manufacturing, Paris, pp. 45-54, 1986.
- [64] J. Fieret, M. J. Terry, B.A. Ward, 'Overview of flow dynamics in gas-assisted laser cutting', Spie, invited paper, Vol. 801, High Power Lasers, 1987.
- [65] V. Semak and A. Matsunawa, 'The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing', J. Phys. D: Appl. Phys., 30, pp 2541-2552, 1997.
- [66] D. Petring, 'Anwendungsorientierte modellierung des laserstrahl-schneidens zur rechnergestützten prozeßoptimierung' PHD. thesis rwth aachen (aachen: verlag shaker), 1994.
- [67] F. Quintero, F. Varas, J. Pou, F. Lusquiños, M. Boutinguiza, R. Soto, M. Pérez-Amor, 'Theoretical analysis of material removal mechanisms in pulsed laser fusion cutting of ceramics', Journal of Physics D-Applied Physics, 38, pp 655-666, 2005.
- [68] Volkher Onuseit, Marwan Abdou Ahmed, Rudolf Weber, and Thomas Graf, 'Space-Resolved Spectrometric Measurements of the Cutting Front', Physics Procedia, 12:584, 2011.
- [69] J. Duan, H. C. Man, T. M. Yue, 'Modelling the laser fusion cutting process: mathematical modelling of the cut kerf geometry for laser fusion cutting of thick metal', Int. J. Phys. D: Appl. Phys. 34, pp 2127-2134, 2001.
- [70] A. Mahrle, E. Beyer, 'Theoretical estimation of achievable travel rates in inert-gas fusion cutting with fibre and CO<sub>2</sub> lasers', Proc. of the fifth Int. Wlt-Conf. On Lasers in Manufacturing, Lim, pp 215-220. 2009
- [71] L.D. Scintilla, L. Tricarico, A. Wetzig, A. Mahrle, E. Beyer, 'Primary losses in disk and CO<sub>2</sub> laser beam inert-gas fusion cutting', J. Mater. Process. Tech.211, pp 2050-2061. 2011.
- [72] H. H. Ali, 'Simultaneously developing laminar flow and heat transfer in the entrance region of flat and circular conduits', PHD. Thesis, Colorado school of mines, Golden, CO, 1988.
- [73] H.H. Ali and M. S. Selim, 'Momentum and heat transfer in the entrance region of a parallel plate channel: developing laminar flow with constant wall temperature', Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 51, N°. 4, 1992.
- [74] P. Lee, S. V. Garimella, 'Thermally developing flow and heat transfer in rectangular microchannels of different aspect ratios', Int. J. Heat. Mass Transfer. 49, pp 3060–3067. 2006.

- [75] V. V. Dharaiya, R. R. Srivastava, S. G. Kandlikar, 'Numerical investigation of heat transfer in microchannel under h2 boundary condition', Proceedings of the international heat transfer conference IHTC14, Washington, dc, ASME, paper N°. ihtc14-23118. Aug. 8–13, 2010.
- [76] C. Wandera, V. Kujanpaa, 'Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel', Journal of Laser Applications, 22 (2), pp 62-70, 2010.
- [77] H. Schlichting, 'Boundary layer theory', Mcgraw-hill, New York, 1982.
- [78] F.P. Incropera and D.P. Dewitt, 'Fundamentals of heat and mass transfer', John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [79] S.V. Patankar, 'Numerical heat transfer and fluid flow', Hemisphere Pub New York, 1980.
- [80] [www.Fluent.com](http://www.Fluent.com).
- [81] J. Cousteix, 'Couche limite laminaire', Cepadues Editions, isbn 2-85428-208-6, 1988.
- [82] C. Wandera, A. Salminen, V. Kujanpaa, 'Inert Gas cutting of thick section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser.' Journal of Laser Applications, 21 (3), pp 154-161, 2009.
- [83] J. Cousteix, 'Turbulence et couche limite', Cepadues Editions, isbn 2-85428-210-8, 1989.
- [84] C.A.J. Fletcher, 'Computational techniques for fluid dynamics, Specific techniques for different flow categories', 1988.
- [85] D. Schuôcker, 'Dynamic phenomena in laser cutting and cut quality', Applied physics B, 40, N°1, pp 9-14, 1986.
- [86] P. V. Yudina, A.V. Zaitseva, O. B. Kovaleva, G. V. Ermolaeva, 'Fundamental study of CO2- and Fiber laser cutting of industrial materials with high speed visualization technique', 8th International Conference on Photonic Technologies, LANE 2014.

## VALORISATIONS

### *Communications nationales*

- 1) **S. Aggoune** and E. H. Amara, *Influence de la vitesse du jet de gaz sur un film liquide métallique produit lors d'une découpe laser*. 6eme SENALAP, El-Oued, 17-18 Janvier 2012.
- 2) **S. Aggoune** and E. H. Amara, *Evacuation d'un film d'un film d'acier inoxydable produit lors d'une découpe laser avec différents gaz inertes*. 8eme Journées de Mécanique, JM'08, Bordj El Bahri, 10-11 Avril 2012.
- 3) **S. Aggoune**, C. Abid et E. H. Amara, *Influence de l'apparition de vortex sur la qualité de découpe laser d'une pièce d'acier inoxydable*. 7eme SENALAP, Sétif 19-10 Mars 2014.

### *Communication internationals*

- 1) **S. Aggoune**, E. H. Amara, and M. Debiane, *Effects of velocity and nature of the inert assist gas on the stainless steel laser cut quality*. Sixth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications May 29-June 1 2012, Istanbul, Turkey.
- 2) **S. Aggoune** and E.H. Amara, *Dynamical study of a molten boundary layer ejected by laminar gas flow*, 9th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids, 24- 28th of June, 2013, Madrid – Spain.
- 3) **S. Aggoune**, C. Abid and E. H. Amara, *The effect of vortex formation on the surface quality for the nitrogen fusion laser cutting process of stainless steel*, 7<sup>th</sup> International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, May 6-8, 2014, Marrakesh-Morocco
- 4) **S. Aggoune**, C. Abid E. H. Amara, *Laminar ejection of stainless steel film during fusion laser cutting process*. ICTEA 2015, 18-21 May 2015, Amman, Jordan.
- 5) **S. Aggoune**, C. Abid E. H. Amara, *Turbulent ejection of stainless steel film during fusion laser cutting process*. 9<sup>th</sup> International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, March 24-26 2016, Abu Dhabi, UAE.
- 6) E.H. Amara, R. Fabbro, T. Tamsaout, K. Kheloufi, **S. Aggoune**, A. Ahmanache, “ 3D Modelling of humps formation during metal laser cutting process”, *Conference On Laser Ablation*, COLA 2011, 15 - 17 November 2011 Playa del Carmen, Mexico.
- 7) E.H. Amara, K. Kheloufi, T. Tamsaout, **S. Aggoune**, Numerical Investigations on High-Power Laser Cutting of Metals, *LAM 10 International Workshop, Optics Photonics and Lasers in Science and Technology for Sustainable Development*, 13-18 Janvier 2014, Dakar, Senegal.

### *Publications*

- 1) **S. Aggoune**, E. H. Amara, and M. Debiane. *Effects of velocity and nature of the inert assist gas on the stainless steel laser cut quality*. FDMP, Vol.9, no.1, pp. 61-75, 2013.
- 2) **S. Aggoune**, E.H. Amara, *Dynamical Study of a Molten Boundary Layer Ejected by Laminar Gas Flow*, Defect and Diffusion Forum Vol. 348 (2014) pp 88-93.

- 3) **S. Aggoune**, C. Abid, and E. H. Amara, *On the vortex formation effect during the application of a nitrogen gas assisted laser fusion cutting technique to stainless steel*. FDMP, Vol. 11, n°2, pp. 115-125, 2015.
- 4) E.H. Amara, K. Kheloufi, T. Tamsaout and **S. Aggoune**, *Modelling of laser beam distribution effects for metal laser cutting.*, Lasers in Eng., Vol. 0, pp. 1–10 ( étape: proof)

#### **Articles soumis**

- 1) **S. Aggoune**, C. Abid, and E. H. Amara, *Analytical study of stainless steel film ejection and cooling during laser cutting: hydrodynamic and thermal aspects*, Journal of Laser Applications, (étape revision)
- 2) E.H. Amara, T. Aoudjit, K. Kheloufi, T. Tamsaout, **S. Aggoune**, A. Ahmanache, F. Hamadi, K. Bougherara, *Simulation by temperature gradient adaption of wavelength effect in metal laser cutting*, Journal of Laser Applications

**Résumé :** La découpe par laser de l'acier sous gaz d'assistance est l'une des applications industrielles les plus importantes, où l'amélioration de la qualité de la surface découpée constitue un but primordial pour lequel un investissement important en recherche-développement est consenti. Les paramètres opératoires de base lors d'une découpe par laser sont la vitesse de déplacement de la pièce traitée sous le faisceau laser, ou inversement, la largeur de la découpe appelée communément 'kerf', la puissance du faisceau laser et sa longueur d'onde, la constitution chimique du gaz d'assistance, la pression d'éjection du gaz à la sortie de la buse, la conception (design) de la buse, l'épaisseur de la pièce traitée et la qualité de sa surface. Le gaz utilisé sous forme de jet lors d'une découpe par laser a pour rôle de fournir la force de cisaillement nécessaire à la frontière gaz/liquide pour éjecter le métal fondu formé lors du processus de découpe. Le défi majeur est d'obtenir une éjection simultanée du métal en fusion lors du déplacement, et ceci est obtenu par un choix approprié de la vitesse de découpe, de la pression du gaz, de la puissance laser et la distance buse-surface du matériau, etc.

Dans ce travail de thèse, on se propose d'étudier la découpe par laser d'une pièce d'acier inoxydable ayant une épaisseur donnée, sous l'effet d'un jet de gaz d'assistance neutre ou inerte. On s'intéresse à la relation de la qualité de la surface découpée avec l'épaisseur du film en fusion, et l'estimation de la pression optimale requise pour l'éjection du métal en fusion sous un régime d'écoulement laminaire. L'épaisseur du film en fusion dont la largeur de découpe pourrait être estimée à partir de l'équilibre des masses et les forces de cisaillement agissant sur le front de découpe, tout en supposant que l'écoulement du film métallique est comparable à celui d'une couche limite. Le taux de refroidissement, la dépendance de l'épaisseur du film en fusion par rapport à la pression du gaz, à sa nature et à la vitesse de découpe de la pièce traitée pourrait être estimée et comparée aux résultats expérimentaux.