

No d'ordre : .....

No de série : .....

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**  
**FACULTE DES MATHÉMATIQUES**  
**ET DES SCIENCES DE LA MATIÈRE**  
**Département de physique**



**Mémoire**  
**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Spécialité : Rayonnement et Spectroscopie et Optoélectronique

Présenté par : **HATHAT Faten**

**Thème :**

**Etude des vitesses de gaz de protection dans les dispositifs  
de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques**

Soutenu publiquement

Le : 04 / 06 / 2017

Devant le jury composé de :

Dr BABA HANI Oumelkheir	MCA	Président	UKM Ouargla
Melle BALLAH Zakia	MAA	Examineur	UKM Ouargla
Pr KHELFAOUI Fethi	Prof	Rapporteur	UKM Ouargla
Mme LEMKEDDEM Soumaya	MAA	Co-encadreur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2016/2017



*Je dédie ce travail à : ma mère et mon père  
A mes chers frères et mes chères sœurs.*

*A tous les membres de la famille HATHAT.*

*A tous mes amies surtout Belles train (i,a,f,i,k,b,w),  
hadjer, meriem, imana, fatiha, aicha, maria, rima, fatima*

*Et à toute personne qui m'est chère et qui m'a soutenue  
durant le mémoire.*

## *Remerciements*

*Au terme de ce travail, avons toute chose, je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donnée la force et la patience.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur Pr Fethi KHELFAOUI pour m'avoir constamment guidé tout long de ce projet et pour ces conseils précieux.*

*Je remercie mon Co-encadreur Mme Soumaya LEMKEDDEM pour son aide et son encouragement.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement le Président de jury Dr BABAHANI Oumelkheir et l'examineur Melle BALLAH Zakia d'avoir accepté de faire partie du jury afin de juger ce travail.*

*Je remercie également tout les membres du laboratoire de Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces (LRPPS), où j'ai accompli ce travail, pour leurs aides et leurs conseils.*

*J'adresse aussi mes sincères reconnaissances à tous les enseignants de l'Université Kasdi Merbah Ouargla pour leurs aides, soutiens et leurs conseils, sans oublier tout le staff administratif du département et surtout le Chef de Département de Physique.*

*Merci à tous les collègues et à tout le personnel du laboratoire pour leur encouragement : Nour, Yasmina, Sara, Samiha, Nadjia, Marwa, .....*

*Enfin, grand merci à tous ceux et toutes celles qui ont contribués de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.*

---

---

**SOMMAIRE**

Dédicace	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
<b>Introduction générale</b>	<b>01</b>

**Chapitre I: Généralités sur le soudage aux lasers et les gaz de protection**

I.1. Soudage	03
I.2.1. Définition de soudage	03
I.2.2. Classification des procédés de soudage	03
I.2.3. Les principaux procédés de soudage	04
I.3. Le soudage par faisceau laser	04
I.3.1. Le rayonnement laser	04
I.3.2. Les différents types de laser	05
I.3.2.1. Les lasers CO <sub>2</sub>	05
I.3.2.3. Les lasers Nd-YAG (Néodyme Yttrium Garnet)	06
I.4. Principe du soudage par faisceau laser	06
I.5. Avantages du soudage par faisceau laser	07
I.6. Soudage laser dans l'industrie	07
I.7. Paramètres du soudage laser	08
I.8. Utilisation d'un fil d'apport	08
I.9. Plasmas	08
I.9.1. Définitions	08
I.10. Gaz de protection	09
I.10.1. Les différents gaz de protection	09
I.11. Les propriétés des gaz	10
I.11.1. Propriétés du mélange gazeux	11
I.12. Les alliages du titane	12
I.12.1. Classification des alliages de titane	12
I.12.2. Présentation de l'alliage de titane étudié : le TA6V	12

---

I.12.2.1. Généralités	12
I. 13. Les équations de mécanique des fluides	12
I.13.1. Equation de continuité	12
I.13.2. Equation de la quantité de mouvement ou équation de Navier-Stokes	13
I.13.3. Equation d'énergie	13
I.14. Quelques travaux scientifiques sur les soudures aux lasers	13
I.15. Normes industrielles et commerciales des soudures aux lasers	15

## **Chapitre II : Modélisation Numérique des vitesses des gaz de protection**

II. Introduction	
II.1. Les caractéristiques du gaz de protection	16
II.2. Définition du phénomène physique	17
II.3. Modélisation mathématique	18
II.3.1. Les équations utilisées dans la phase gazeuse	18
II.3.1.1. Equation de continuité	18
II.3.1.2. Equation du mouvement ou équation de Navier-Stokes	19
II.3.2. Equation de la chaleur à appliquer pour la phase Solide	20
II.3.2.1. Equation d'énergie	20
II.4. Modélisation numérique	20
II.4.1. Modélisation numérique pour le calcul des vitesses dans la phase gazeuse	20
II.4.2. Maillage et description du domaine de résolution	21
II.5. Méthode des Différence Finies	21
II.5.1. Pour l'étape1 : Calcul des composantes U, V et W de la vitesse du gaz de protection	22
II.5.1.1. Equations de base	22
II.6. Les conditions initiales et les conditions aux limites pour les calculs des vitesses	23
II.7. Organigramme pour le calcul des vitesses	24

**Chapitre III : Résultats et discussion**

III.1. Les conditions utilisées pour calculer les vitesses	26
III.2. Les conditions initiales pour les Zone 1 et 4	27
III.3. Les conditions initiales pour les Zone 2 et 3	28
III.4. Calcul des vitesses dans la zone 4	32
III.5. Calcul des vitesses dans la zone 2 et 3	36
III.6 Conclusions	36
<b>Conclusion générale et perspectives</b>	37
<b>Références</b>	39
<b>Résumé</b>	

Liste des figures

Fig. I.1	Le soudage	03
Fig. I.2	Procédés de soudage	04
Fig. I.3	Schéma de principe de fonctionnement d'un laser	05
Fig. I.4	Principe du soudage par faisceau laser	07
Fig. I.5	Paramètres du soudage par faisceau laser	08
Fig. II.1	Alimentation de gaz de protection en soudage laser : coaxial ou latéral	16
Fig. II.2	Schéma des écoulements pour les gaz de protection	17
Fig. II.3	Répartition des zones pour les gaz de protection	21
Fig. II.4	Identification des paramètres des zones pour les gaz de protection	24
Fig. II.5	Plaque de soudure vue de dessus	24
Fig. II.6	Organigramme pour le calcul numérique des vitesses	25
Fig. III.1	Profil des vitesses au plan de symétrie	26
Fig. III.2	Profil de la vitesse U en fonction des positions k pour $i=iM2+1$ et $j=1$	28
Fig. III.3	Profile de la vitesse U en fonction de la distance au mur du tube dxz	28
Fig. III.4	Profile de la vitesse W en fonction la distance au mur du tube dxz	29
Fig. III.5	Profile des trajectoires en fonction des positions x(i)	29
Fig. III.6	Profile des trajectoires	30
Fig. III.7	Profil de la vitesse U dans les zones 2 et 3	30
Fig. III.8	Profil de la vitesse W dans les zones 2 et 3	31
Fig. III.9	Profil de la vitesse U dans les zones 2 et 3 pour $k_c= 3, 6, 9$ .	31
Fig. III.10	Profil de la vitesse W dans les zones 2 et 3 pour $i=iM1-8, iM1, iM1+4$	32
Fig. III.11	Profil de la vitesse (U+W) dans les zones 2 et 3.	32
Fig. III.12	Profil de la vitesse U en fonction des positions k	33
Fig. III.13	Profil de la vitesse W en fonction des positions k	33
Fig. III.14	Profil de la vitesse U en fonction des positions z	34
Fig. III.15	Profil de la vitesse W en fonction des positions z	34
Fig. III.16	Profil de la vitesse U en fonction des positions z	35
Fig. III.17	Profil de la vitesse U en fonction des positions z	35
Fig. III.18	Profil de la vitesse U dans les zones 2 et 3	36

**Liste des tableaux**

Tableau III-1 : Les propriétés physiques utilisées dans les calculs	26
Tableau III-2 : Les propriétés physiques de gaz	27
Tableau III-3 : Les propriétés physiques de la plaque de titane	27
Tableau III-4 : Les valeurs numériques des calculs	27





*Introduction générale*

## **Introduction générale**

La technologie des lasers de puissance s'est imposée dans le milieu industriel, il y a presque plusieurs dizaines d'années. Les premières applications par laser ont commencé dans les domaines de la transformation métallurgique comme l'automobile, l'aéronautique, la sidérurgie. Aujourd'hui, les lasers de puissance sont omniprésents dans toutes les industries de mise en forme comme le brasage, le durcissement, le frittage laser mais aussi dans le secteur des produits de consommation courante, le biomédical [1].

Le soudage laser est un procédé de soudage à haute densité d'énergie. Cette caractéristique permet d'obtenir la formation d'un capillaire rempli de vapeur métallique.

Un bain de métal fondu se développe tout autour de ce capillaire. Le déplacement relatif de celui-ci engendre la formation d'un joint soudé. C'est grâce à ce capillaire que l'énergie thermique est distribuée non plus en surface mais sur toute la profondeur de ce "trou" rempli de vapeurs métalliques autour duquel la matière est fusionnée. Cette caractéristique permet d'obtenir des cordons très étroits et fortement pénétrants.

Les gaz de protection interviennent dans les procédés de soudage de bien des manières et permettent de les optimiser de façon ciblée. C'est la raison pour laquelle le gaz ou mélange de gaz utilisé doit être choisi avec soin en fonction de ses caractéristiques spécifiques et des effets souhaités. Les optimisations possibles concernent quasiment tous les facteurs qui jouent un rôle important dans le procédés de soudage.

Le choix du gaz de protection est très important pour la qualité des soudures, car son interaction avec le faisceau laser est déterminante pour l'apport d'énergie dans la pièce.

L'hélium, l'argon, le dioxyde de carbone et l'azote, comme des gaz de protection, sont les plus courants dans la soudure aux lasers [2]

Le but de ce projet de mémoire de master est l'étude des vitesses de gaz de protection dans les dispositifs de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques.

Le premier chapitre de ce mémoire est une présentation des notions de base nécessaires sur les procédés de soudage par laser et leur classification, les paramètres de soudage laser et les gaz de protection.

Le deuxième chapitre est une présentation de la modélisation numérique pour le calcul de la vitesse du gaz. Après la définition du phénomène physique, nous opterons pour la Méthode des Différence Finies (MDF) et la méthode itérative de Gauss-Seidel pour la résolution du problème.

Le troisième chapitre est destiné à la présentation et l'analyse des résultats de la modélisation. Nous calculons les vitesses des gaz. Les données utilisées sont celles de A. Shirvan et al. [2]

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.



*Chapitre I*

*Généralités sur le soudage aux  
lasers et le gaz de protection*

## Chapitre I :

### Généralités sur le soudage aux lasers et les gaz de protection

#### I.1. Soudage

##### I.2.1. Définition du soudage

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage [3] qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler; soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre; pour activer les surfaces ou avec ou sans métal d'apport.

Le soudage et les techniques connexes font partie du domaine de l'assemblage et fixation ; la différence essentielle entre les joints soudés et les autres assemblages est la continuité entre les pièces [3].

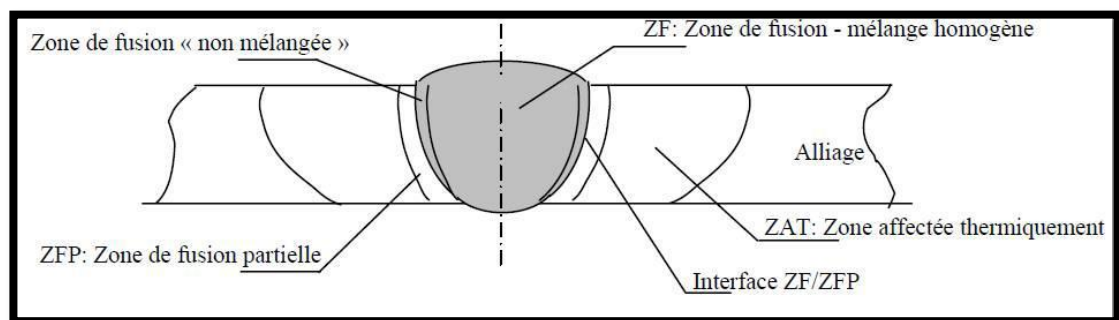


Figure I.1: Le soudage [4]

##### I.2.2. Classification des procédés de soudage

Il existe à l'heure actuelle, des dizaines de procédés de soudage. Le plus souvent, ils sont classés suivant :

- Le type d'énergie utilisée,
- La forme de l'énergie directement utilisable pour le soudage,
- Les modalités de réalisation.

**I.2.3. Les principaux procédés de soudage**

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes de la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres les continuités métalliques sont obtenues sans fusion par effets purement mécaniques [5]. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme le présente la figure I.2.

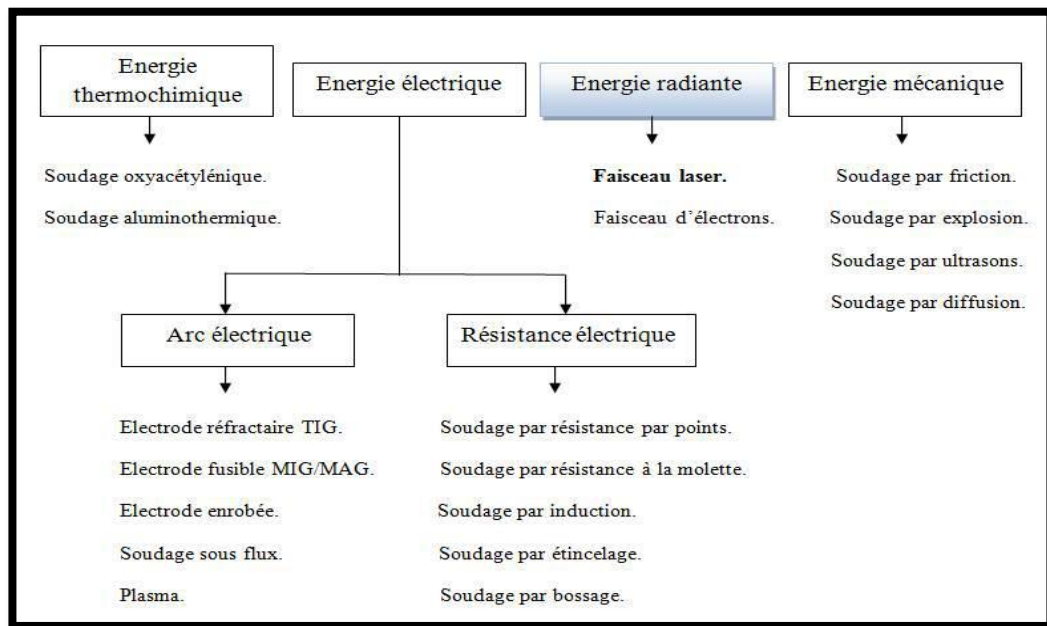


Figure I.2 : Procédés de soudage

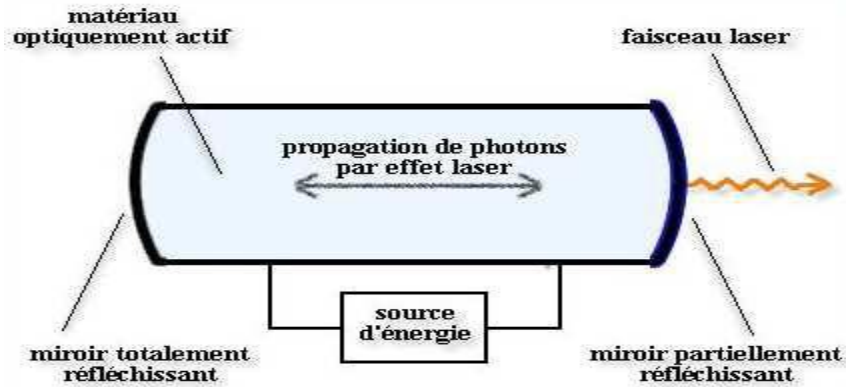
**I.3. Le soudage par faisceau laser**

**I.3.1. Le rayonnement laser**

En 1916, Albert Einstein définit les lois d'émission de photons (lumière) par stimulation (pompage optique) et émet le principe de l'émission stimulée qui ouvre la porte à une nouvelle technologie : le LASER « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » soit en français l'amplification de lumière par émission stimulée de radiations.

Le faisceau laser est une onde électromagnétique caractérisée par sa longueur d'onde, sa puissance ainsi que par sa direction. Il est généré dans un résonateur constitué de deux miroirs dont l'un est partiellement transparent et contenant un milieu actif, dit lasant, généralement solide ou gazeux. Le milieu actif est excité par une source d'énergie qui induit dans la cavité une émission stimulée (figure I.3). Les lois de l'émission stimulée font que les

photons réémis ont tous la même fréquence, la même direction et la même phase. À partir d'un certain seuil, il y a amplification et émission d'un très grand nombre de photons qui se constituent en onde électromagnétique cohérente. La fréquence de celle-ci est celle des photons qui la génèrent et elle est fixée par la nature du milieu excité.



**Figure I.3:** Schéma de principe de fonctionnement d'un laser [6].

Au début des années 70, la technologie laser prend place dans le milieu industriel dans le domaine des traitements des matériaux. Des outils de découpage des tôles par faisceau laser ont été utilisés pour la première fois en 1975 et c'est seulement en 1984 que la technologie laser a été développée pour le soudage des métaux dans les industries de production en série [7]. Dans ce qui suit nous allons présenter le principe de ce procédé de soudage.

### **I.3.2. Les différents types de laser utilisés dans le soudage**

Les lasers sont généralement classés en cinq familles selon la matière excitée : les lasers à solide, à gaz, à semi-conducteurs, à liquide et à électrons libres [5]. Il existe deux types de lasers industriels pour le soudage des métaux et des alliages. Ce sont les lasers CO<sub>2</sub> et les lasers YAG.

#### **I.3.2.1. Les lasers CO<sub>2</sub>**

Dans les lasers CO<sub>2</sub>, le milieu actif est un mélange gazeux constitué de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> (10%), d'azote N<sub>2</sub> (40%) et d'hélium He (50%) sous pression réduite. Les molécules d'azote sont excitées par une décharge électrique et par collisions inélastiques, elles transfèrent l'énergie acquise aux molécules de CO<sub>2</sub>. Les lasers CO<sub>2</sub> produisent un rayonnement de 10,6 μm de longueur d'onde, très finement focalisable. La puissance des lasers CO<sub>2</sub> industriels atteint 1,5 à 40 kW. En général ce procédé est utilisé en régime de fonctionnement continu malgré la possibilité de pulser le faisceau. La focalisation du faisceau

peut être réalisée par des miroirs sous des lentilles de focalisation. Pour des densités d'énergie faibles ( $30\text{J}/\text{mm}^2$ ) ; ces Lasers sont utilisés pour des soudures profondes.

### **I.3.2.2. Les lasers Nd-YAG (Néodyme Yttrium Garnet)**

Les lasers Nd-YAG sont des lasers solides dont le milieu actif de nature cristalline est un grenat d'aluminium Yttrium ( $\text{Y}^3\text{Al}^5\text{O}^{12}$ ) dopé avec des ions de néodyme ( $\text{Nd}^{3+}$ ). Le rayonnement a une longueur d'onde de  $1,06\ \mu\text{m}$  [6]. Les puissances maximales disponibles sont de 3 à 4 kW. Malgré leur faible puissance, ils sont par excellence l'outil de micro soudure de précision [8]. Il est possible de transporter le faisceau Nd-YAG par fibre optique sur plusieurs dizaines de mètres, donc de souder suivant des trajectoires complexes à l'aide de robots de soudage.

Plusieurs études expérimentales ont montré que le soudage des alliages de magnésium par le laser Nd-YAG est plus efficace que celui par le laser  $\text{CO}_2$  [9].

## **I.4. Principe du soudage par faisceau laser**

Le soudage par faisceau laser fait partie des procédés de soudage dits à haute énergie (densité de puissance entre  $10^{10}$  et  $10^{13}\ \text{W}/\text{m}^2$  contre  $5 \times 10^6$  à  $5 \times 10^8\ \text{W}/\text{m}^2$  pour les procédés de soudage à l'arc). La source de chaleur est une énergie électromagnétique sous forme de photons qui forment un faisceau de très haute intensité. Lorsque les photons entrent en collisions avec la pièce à souder, leurs énergies cinétiques se transforment en chaleur, ce qui engendre les phénomènes de fusion et de vaporisation (effet Keyhole) [4].

Cette vaporisation crée localement une dépression dans le métal en fusion et les gradients de température introduisent des mouvements de convection qui entraînent le fluide vers l'arrière du bain. Ce sont ces deux phénomènes qui permettent de former une cavité appelée capillaire autour du faisceau, avec des parois composées de métal liquide en fusion. Ce bain de fusion ainsi créé est entretenu puis déplacé entre les pièces à assembler. La figure I.4 est une illustration du principe du soudage par faisceau laser.



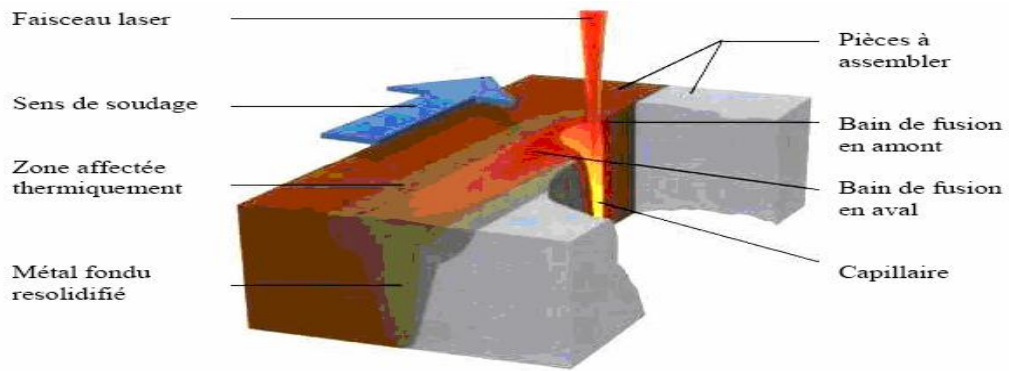


Figure I.4 : Principe du soudage par faisceau laser [4].

### **I.5. Avantages du soudage par faisceau laser**

Le soudage laser est parmi les procédés qui sont en cours de développement surtout dans l'étude des alliages légers. On résume les avantages du soudage par laser dans les points suivants :

- Densité de puissance entre  $10^{10}$  et  $10^{13}$  W/m<sup>2</sup> contre  $5 \times 10^6$  à  $5 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup> pour les procédés de soudage à l'arc [4].
- Vitesse de soudage élevée : 1,3m/min contre environ 25 cm/min pour les procédés de soudage à l'arc [10].
- Soudures étroites.
- Faible déformation des pièces après soudage.
- Zone affectée thermiquement faible.
- Assemblage possible sans métal d'apport.

### **I.6. Soudage laser dans l'industrie**

Le soudage laser permet la réparation ou le rechargement des pièces usées, cassées ou erronées de toutes sortes de pièces mécaniques (Acier, Aluminium et fonte d'aluminium, Fonte, Inox, Titane, Nickel, Bronze). La finesse de la soudure laser permet de réaliser des apports de métal dans les endroits les plus fins avec une grande précision. La qualité de soudage laser est excellente; elle est supérieure à celle du soudage par d'autres procédés. La rapidité du soudage dépend de la puissance mise en jeu, mais aussi de la qualité et de l'épaisseur des pièces à souder. Le soudage laser est spécifiquement bien adapté à l'industrie automobile et aéronautique. En effet le temps de soudage est très court, la zone affectée thermiquement est très faible et donc ce mode d'assemblage permet de ne pas détériorer les composants [10].

### I.7. Paramètres du soudage laser

Le soudage par faisceau laser dépend de nombreux paramètres, tant au niveau du procédé que des matériaux à assembler. Les paramètres essentiels sont les caractéristiques du faisceau (puissance, vitesse, type d'émission, ...), la nature de la focalisation (mode et distance focale, nature de l'optique, position), le gaz de protection (débit, type, géométrie d'utilisation), et le matériau à assembler (nature, préparation, géométrie...) [4]. La figure I.7 montre les paramètres du soudage aux lasers.

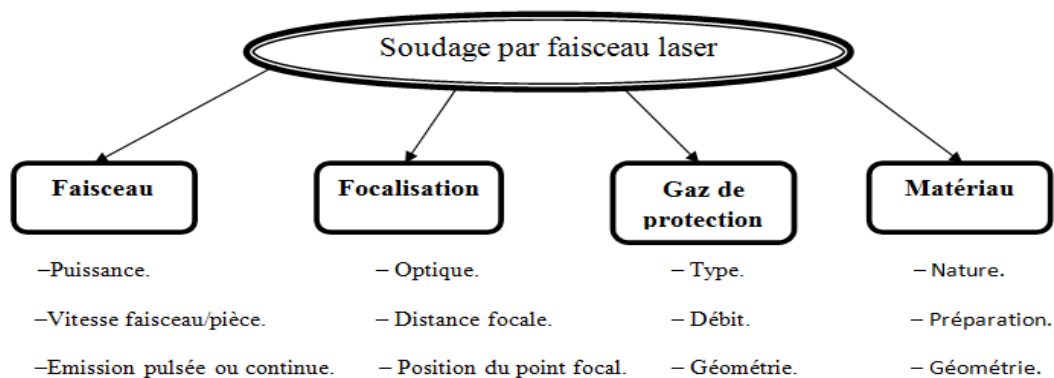


Figure I.5 : Paramètres du soudage par faisceau laser

### I.8. Utilisation d'un fil d'apport

L'absence de chanfrein à remplir autorise le soudage sans métal d'apport. L'utilisation d'un fil d'apport n'est indispensable que lorsqu'il est nécessaire d'intervenir sur la composition chimique de la zone fondue par suite de vaporisation de certains éléments ou pour des problèmes métallurgiques. Le cas typique correspond au soudage de certains alliages d'aluminium.

### I.9. Plasmas

#### I.9.1. Définitions

Les gaz sont des isolants électriques, ils contiennent des particules neutres (atomes ou molécules). Si un gaz est soumis à une forte énergie d'excitation, il sera conducteur à cause de l'ionisation des particules. Ce milieu ionisé est appelé "plasma" ; il est formé de neutres (atomes, molécules), d'ions, d'électrons et de photons [3]. Ces derniers sont présents à cause du grand nombre d'espèces excitées qui retombent sur l'état initial en émettant un

rayonnement électromagnétique. La lueur caractéristique du plasma est due à ce phénomène. Tout gaz peut atteindre l'état de plasma pourvu qu'une énergie d'excitation suffisante lui soit transmise [5, 7].

Deux catégories de plasmas sont définies: les plasmas naturels qui composent 99% de l'univers et les plasmas créés par l'homme. Ces plasmas recouvrent un très large domaine de densités électroniques et de températures.

### **I.10. Gaz de protection**

La protection gazeuse a deux fonctions principales. Comme pour tout autre procédé de soudage par fusion, au soudage laser le métal doit être protégé de l'atmosphère ambiante par des gaz de protection afin d'éviter toute oxydation. De plus, au soudage laser CO<sub>2</sub>, la formation d'un plasma de gaz de protection est souvent constatée et conduit à une absorption supplémentaire de l'énergie du faisceau, en s'ajoutant à l'effet inévitable du plasma de vapeurs métalliques.

Le choix du gaz de protection est très important pour la qualité des soudures, car son interaction avec le faisceau laser est déterminante pour l'apport d'énergie dans la pièce [12].

#### **I.10.1. Les différents gaz de protection**

L'hélium, l'argon, le dioxyde de carbone et l'azote, comme des gaz de protection, sont les plus courants dans la soudure aux lasers.

Le choix du gaz de protection ou du mélange gazeux dépend de la nature du matériau, du processus de soudage et des particularités de soudage.

L'hélium et l'argon est couramment utilisé dans les procédés de soudage laser. La différence de l'influence de ces deux gaz apparaît essentiellement pour le soudage de fortes épaisseurs, où les vitesses de soudage plus faibles, accentuent le rôle du plasma sous protection d'argon, entraînant de ce fait une augmentation de la largeur du cordon en surface [13].

L'argon est une option appropriée pour les matériaux sensibles tels que l'aluminium, l'acier inoxydable et le titane, étant donné qu'il ne réagit pas chimiquement avec les matériaux soudés [12].

L'hélium qui présente le potentiel d'ionisation le plus élevé est le gaz préférable au soudage laser CO<sub>2</sub>. Néanmoins pour le soudage de faibles épaisseurs, les faibles puissances utilisées créent un plasma du gaz de protection peu important qui n'affectera pas les profondeurs de pénétration.

L'utilisation de l'azote est à éviter pour le soudage des alliages de titane car il peut causer la fragilisation des cordons de soudure par contamination.

Des mélanges des gaz argon/hélium sont aussi utilisés pour la couverture gazeuse au cours du soudage laser. Très utilisés industriellement, ils permettent des performances voisines de celles de l'hélium. En effet, lorsque la teneur en hélium est optimisée, les vitesses de soudage sont proches de celles obtenues avec une protection hélium.

Les mélanges argon-hydrogène garantissent un bon aspect de surface grâce à un effet de couverture et de prévention [14].

L'hélium et les mélanges argon hélium se différencient de l'argon par leur fort potentiel d'ionisation qui donne une plus forte conductibilité thermique.

### **I.11. Les propriétés des gaz**

Un gaz est un ensemble de molécules éloignées les unes des autres, quasiment indépendantes et animées de mouvements incessants à l'origine de chocs (agitation thermique) [15].

- **La pression** : créée par les chocs continus des molécules sur la surface des parois du récipient  $P = F/S$  ( $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ )
- **La densité** : La masse volumique d'un gaz parfait est :  $\rho = \frac{m}{v} = \frac{mp}{nRT} = \frac{PM}{RT}$  la masse volumique dépend de la pression et de la température.
- **La viscosité** : La viscosité est définie comme la résistance à l'écoulement; l'épaisseur ou la clarté d'un fluide, le coefficient de proportionnalité qui lie la surface, la vitesse et la distance à la force de frottement est le coefficient de viscosité dynamique  $\mu$ . L'unité de viscosité dynamique légale est le pascal/seconde (Pa/s) ou poiseuille (PI). Ce coefficient varie suivant la température et le fluide.

**I.11.1. Propriétés du mélange gazeux**

Chaque gaz pris séparément a le comportement du gaz parfait. De plus, les mélanges n'interagissent pas chimiquement entre eux. Le mélange doit avoir le même comportement que le gaz parfait [15].

- **La pression :**

La pression totale est égale à la somme des pressions partielles [15].

$$p = \sum_{i=1}^q p_i$$

- **Viscosité :**

On calcule la viscosité dynamique du mélange gazeux en utilisant la relation ou la méthode de Wilke [16] :

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}}$$

$$\text{Avec : } \phi_{ij} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\frac{\mu_i}{\mu_j}} \right]^2}{\sqrt{8 \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right)}}$$

$y_{i,j}$  : fractions molaires

$M_{i,j}$  : masses molaires

- **La densité :**

On calcule la densité du mélange gazeux par la relation suivante :

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{air}}} = \frac{M}{29}$$

$M$  : La masse molaire moyenne

$$M = \sum_i y_i \cdot M_i$$

Où  $y_i$  est la fraction molaire.

## **I.12. Les alliages du titane**

### **I.12.1. Classification des alliages de titane**

Les alliages de titane sont classés suivants le type de structure qu'ils favorisent à la température ambiante. On distingue les alliages de types  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\alpha$ - $\beta$ . Ils ont chacun leurs propres spécificités face aux opérations de soudage [17].

**Les alliages  $\alpha$**  contiennent une forte majorité d'éléments alphas, et présentent à température ambiante quasiment 100% de phase  $\alpha$ .

**Les alliages  $\beta$  et quasi  $\beta$**  sont constitués principalement de la phase  $\beta$  stable ou métastable.

**Les alliages  $\alpha$  et  $\beta$**  contiennent à la fois les phases  $\alpha$  et  $\beta$  à température ambiante.

### **I.12.2. Présentation de l'alliage de titane étudié : le TA6V**

#### **I.12.2.1. Généralités**

L'alliage considéré dans l'étude est le TA6V4 (ou TA6V) ; cet alliage est largement étudié. Le bon compromis entre résistance mécanique et ténacité, en plus de sa faible densité et son excellente résistance à la corrosion (jusqu'à 1160 MPa pour une densité de 4,42 g/cm<sup>3</sup>), en font l'un des plus utilisés dans divers domaines d'application (industrie chimique, aérospatiale, biomédical ...).

La composition de l'alliage est de 6% en poids d'aluminium et 4% en poids de vanadium, et des éléments résiduels [17].

## **I.13. Les équations de mécanique des fluide**

Il y a trois équations de base pour le traitement des milieux continus suivant le modèle fluide [18].

### **I.13.1. Equation de continuité**

Pour une masse volumique  $\rho$  et une vitesse du fluide  $\vec{v}$ , l'équation de continuité est obtenue en appliquant le principe de la conservation de la masse dans les directions x, y et z.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \text{div}(\rho\vec{v}) = 0 \quad (\text{I.1})$$

**I.13.2. Equation de la quantité de mouvement ou équation de Navier-Stokes**

Soient U, V et W les trois composantes de la vitesse fluide  $\vec{v}$  ; et soient  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$  les composantes de la densité volumique de force extérieure. Les équations de Navier-stokes sont obtenues en appliquant le principe de la conservation de la quantité de mouvement au fluide en mouvement pour les directions x, y et z. Pour  $\rho$  constante, nous avons :

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \rho F_x - \frac{\partial P}{\partial X} + \mu \nabla^2 u + \frac{\mu}{3} \frac{\partial(\nabla \cdot \vec{v})}{\partial X} \quad (I.2)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \rho F_y - \frac{\partial P}{\partial Y} + \mu \nabla^2 V + \frac{\mu}{3} \frac{\partial(\nabla \cdot \vec{v})}{\partial Y} \quad (I.3)$$

$$\rho \frac{\partial W}{\partial t} = \rho F_z - \frac{\partial P}{\partial Z} + \mu \nabla^2 W + \frac{\mu}{3} \frac{\partial(\nabla \cdot \vec{v})}{\partial Z} \quad (I.4)$$

$\mu$  et P sont respectivement les viscosité dynamique et la pression du milieu.

**I.13.3. Equation d'énergie**

L'équation d'énergie est obtenue en appliquant le principe de la conservation de l'énergie au fluide en mouvement dans les directions x, y et z.

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \right] = K \nabla^2 T(x, y, z, t) + Q \quad (I.5)$$

Où  $C_p$  : est la chaleur spécifique et K : est la conductivité thermique.

Q : est le Terme source

**I.14. Quelques travaux scientifiques sur les soudures aux lasers**

Il existe des nombreux travaux sur les procédés de soudage aux lasers. Nous pouvons citer quelques travaux.

- ❖ Z. Rao et al. (2010) [19] ont étudié les phénomènes de transport dans l'arc plasma pour trois mélanges argon-hélium (75% Ar + 25% He, 50% Ar + 50% He et 25% Ar + 75% He) pendant le soudage à l'arc de gaz-métal.
- ❖ N. Shanmugam et al. (2013) [20] ont étudié la distribution de la température et la modélisation de la soudure laser de feuilles en acier inoxydable. Ils ont utilisé l'équation suivante pour l'énergie :

$$\rho(T)c(T)\frac{\delta T}{\delta t} + v\rho(T)c(T)\frac{\delta T}{\delta x} = \frac{\delta}{\delta x}\left(k_x\frac{\delta T}{\delta x}\right) + \frac{\delta}{\delta y}\left(k_y\frac{\delta T}{\delta y}\right) + \frac{\delta}{\delta z}\left(k_z\frac{\delta T}{\delta z}\right) + \text{Source de chaleur} \quad (I.6)$$

- ❖ A. Belhadj (2009) [21] a étudié expérimentalement l'assemblage par un faisceau laser CO<sub>2</sub> d'un alliage ternaire de fonderie Magnésium – Aluminium.

D'autres travaux et articles parlent des gaz de protection ; nous pouvons citer les articles suivants :

- ❖ A. Shirvan et al. (2012) [2] ont étudié le gaz de protection et le transfert de chaleur dans un soudage au laser. L'application est un gaz de protection d'argon et d'un alliage de titane métallique de base Ti6Al4V.
- ❖ A. Ancona et al. (2006) [22] ont fait une étude expérimentale et théorique sur le rôle du flux de gaz d'azote. Des expériences de soudage au laser ont été effectuées avec un Laser CO<sub>2</sub>. Le modèle mathématique utilisé se basait sur les équations de Navier-Stokes.
- ❖ T. Kuo and Y. Lin. (2007) [23] ont fait une étude des effets de différents gaz de protection et des formes des ondes de puissance sur la pénétration des soudures.

Dans notre laboratoire (Laboratoire LRPPS, Université de Ouargla), le groupe de travail, a étudié plusieurs parties des procédés de soudage aux torches et aux lasers :

- ❖ S. Lemkeddem (2008) [24] a étudié et modéliser le rayonnement émis par le plasma dans les torches à plasma de sidérurgie. Elle a utilisé un modèle numérique pour le calcul du rayonnement émis par les torches à plasma. S. Lemkeddem (2009) [25] a étudié et modéliser le rayonnement émis par le plasma dans les torches à plasma de sidérurgie en utilisant la méthode de l'inversion d'Abel.
- ❖ Pour S. Guerrida (2012) [26], le but de son travail était l'étude et la modélisation de la distribution de la température sur une plaque soudé par faisceau laser.
- ❖ K. Telib (2013) [27] a calculé la distribution de la température sur une plaque soudé par faisceau laser aux limites de la température de fusion.
- ❖ Y. Bennana (2015) [28] a fait une introduction à l'étude de l'élargissement Doppler des spectres du rayonnement émis par le plasma lors du soudage au laser.



- ❖ R. Bekhouche (2016) [29] a fait une introduction à l'étude les élargissements Stark électroniques des raies spectrales de Mg I et Mg II dans les plasmas lors de la soudure au laser de plaques d'alliages métalliques de magnésium.

Dans notre travail, nous nous intéressons à l'étude des gaz de protection sur la base des articles précédents et les données de l'article de A. Shirvan et al. [2].

### **I.15. Normes industrielles et commerciales des soudures aux lasers**

La normalisation constitue un outil de dialogue entre fabricants, utilisateurs, pouvoirs publics et autres partenaires [14]. Elle permet de :

- Clarifier les transactions,
- Rationaliser les productions,
- Faciliter les échanges commerciaux.

L'exécution du soudage des constructions métalliques est actuellement régie par un ensemble de trois normes :

- P 22-471 : Assemblages soudés – Fabrication.
- P 22-472 : Qualification des modes opératoires de soudage.
- P 22-473 : Étendue des contrôles non destructifs.



*Chapitre II*

*Modélisation Numérique des  
Vitesses des gaz de protection*

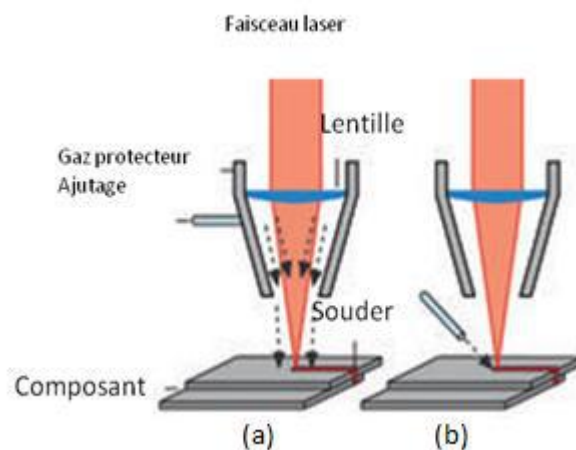
Chapitre II :Modélisation Numérique des vitesses des gaz de protection**Introduction**

Dans ce chapitre nous proposons une modélisation numérique, pour l'étude de la distribution des vitesses des gaz de protection lors de soudure au Laser des alliages de titane. Nous utilisons les équations de conservation (d'énergie, de quantité du mouvement et de continuité) à trois dimensions  $x$ ,  $y$  et  $z$  en coordonnées cartésiennes. Nous appliquons la Méthode des Différences Finies (MDF) et la méthode itérative de Gauss-Seidel.

**II.1. Les caractéristiques des gaz de protection**

Les gaz de protection diffèrent en propriétés physiques : la densité, la conductivité thermique, la conductivité électrique, le potentiel d'ionisation, etc.... Ces différences peuvent influencer les caractéristiques du plasma et du métal fondu.

On peut injecter le gaz de protection au cours de soudage par deux façons différentes, soit horizontalement avec la lentille (figure II.1 (a)) ou bien directement vers la pièce de travail (figure II.1 (b)). Dans ce dernier cas le tube fait un angle avec la pièce à souder.



**Figure II.1 :** Alimentation de gaz de protection en soudage laser: coaxial ou latéral

## II.2. Définition du phénomène physique

Pour l'étude des effets des gaz de protections sur la soudure de plaques métalliques trois étapes peuvent être distinguées :

- La première étape consiste à l'étude des vitesses et des écoulements des gaz de protection sur la plaque en considérant le pipe ou le tube d'injection du gaz immobile et sans rayonnement laser.
- La deuxième étape consiste à l'étude de l'effet de la vitesse de translation du pipe sur les écoulements du gaz.
- La troisième étape consiste à la prise en compte du rayonnement Laser sur la soudure. Dans cette phase de traitement, il serait possible de calculer la distribution de la température sur la plaque métallique.

La figure II.2 montre les différentes considérations pratiques permettant d'étudier le processus.

- L'axe X le long d'un alliage métallique (indice i).
- L'axe Z le long du tube (la verticale à l'alliage) (indice j).
- Et l'axe des Y se prolonge à la largeur de l'alliage métallique (indice k).

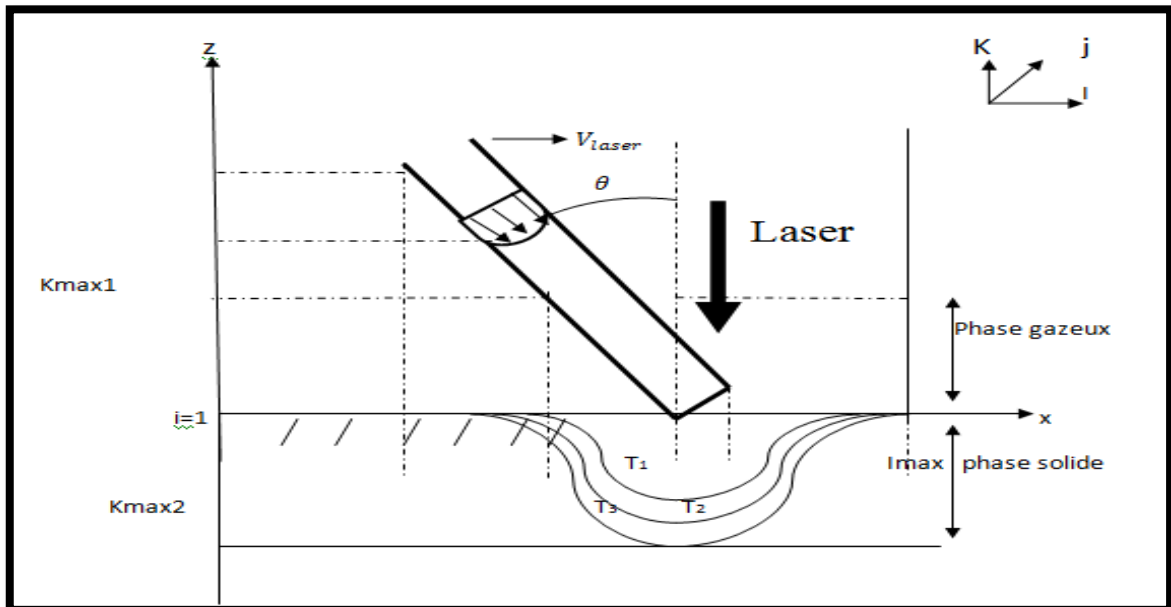


Figure. II.2 : Schéma des écoulements pour les gaz de protection

Dans ce projet de master, on se limitera à l'étude de la première phase des simulations : calcul des vitesses du gaz de protection pour un tube considéré immobile et en absence de la source laser.

Nous proposons les hypothèses suivantes :

- Le tube fait un angle constant avec la verticale,
- Écoulement laminaire du gaz de protection dans le tube et à la surface métallique,
- La température du gaz est constante  $T_0=300$  K,
- Le gaz obéit aux lois des gaz parfaits,
- Profil parabolique des vitesses du gaz dans le tube avec un flux constant,
- Régime stationnaire et écoulement à trois dimensions  $(x,y,z)$  dans la phase gazeuse au dessus de la plaque métallique,
- On néglige les effets du bord de la plaque métallique et les effets de la température de la plaque sur le gaz de protection.

## II.3. Modélisation mathématique

### II.3.1. Les équations utilisées dans la phase gazeuse

Pour la résolution de la distribution des vitesses, nous proposons la résolution de l'équation de continuité et l'équation de la quantité de mouvement à trois dimensions. Nous utilisons les coordonnées cartésiennes.

#### II.3.1.1. Equation de continuité [18]

L'équation de continuité est obtenue en appliquant le principe de la conservation de la masse dans les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \text{div}(\rho\vec{v}) = 0 \quad (\text{II. 1})$$

- Pour  $(\rho = cte)$

$$\text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (\text{II. 2})$$

- Pour  $(\rho \neq cte)$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \rho\text{div}\vec{V} + \vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\rho = 0 \quad (\text{II. 3})$$

### II.3.1.2. Equation du mouvement ou équation de Navier-Stokes [18] :

Les équations de Navier-Stokes sont obtenues en appliquant le principe de la conservation de la quantité de mouvement du fluide en mouvement dans les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ .

- La composante U de la vitesse dans la direction X :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \rho F_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \frac{\mu}{3} \frac{\partial(\nabla \cdot \vec{v})}{\partial x} \quad (\text{II.4})$$

- La composante V de la vitesse dans la direction Y :

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \rho F_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \frac{\mu}{3} \frac{\partial(\nabla \cdot \vec{v})}{\partial y} \quad (\text{II.5})$$

- La composante W de la vitesse dans la direction Z :

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = \rho F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \frac{\mu}{3} \frac{\partial(\nabla \cdot \vec{v})}{\partial z} \quad (\text{II.6})$$

U, V et W sont les trois composantes de la vitesse du gaz,

F : force,

P : pression,

$\mu$  : viscosité dynamique,

$\rho$  = la masse volumique mesurée,

$\vec{v}$  : vitesse fluide,

t : temps,

$\nabla$  : Opérateur gradient,

$\nabla^2$  : Opérateur Laplacien, il s'écrit en coordonnées cartésiennes comme suit :

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

### II.3.2. Equation de la chaleur à appliquer pour la phase Solide

#### II.3.2.1. Equation d'énergie [18] :

Pour la résolution de la distribution de la température, nous proposons la résolution de l'équation de la chaleur (équation d'énergie) à trois dimensions. Nous utilisons les coordonnées cartésiennes.

L'équation en générale pour de la convection et la conduction est :

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} \right] = k \nabla^2 T(x, y, z, t) + Q(i, j, k) \quad (\text{II.7})$$

$\rho$  : densité ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_p$  = chaleur spécifique ( $\text{kJ/Kg.K}$ )

$K$  : conductivité thermique ( $\text{W/m.K}$ )

$Q = Q_0 F(xyz)$  : terme source ( $\text{W/m}^3$ )

### II.4. Modélisation numérique :

Nous proposons la simulation du phénomène simulé en 3 étapes :

- ✓ Dans la phase ou la partie gazeuse, nous calculons les vitesses des gaz en l'absence d'une source de laser, et dans le cas d'une source laser à une certaine vitesse nous utilisons l'équation de continuité (II.2) et les équations de Navier-Stokes (II.4) et (II.6).
- ✓ Pour la partie solide, on calcule la température en présence de la source laser en utilisant l'équation de l'énergie (équation II.7).

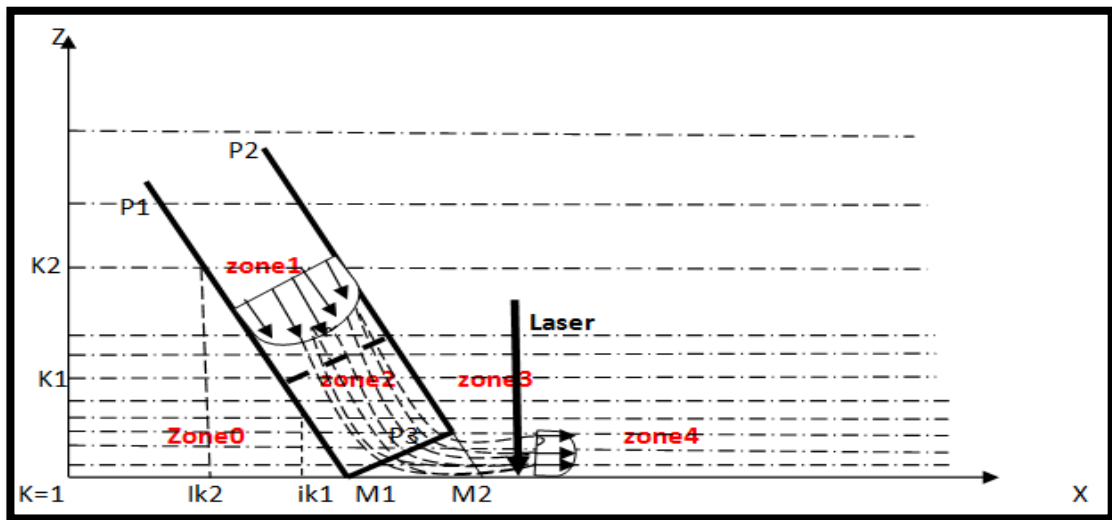
#### II.4.1. Modélisation numérique pour le calcul des vitesses dans la phase gazeuse :

Pour faciliter l'étude, nous faisons une répartition de l'espace en quatre régions comme dans la figure II.3. Pour chaque région, nous avons mis certaines hypothèses pour trouver des solutions appropriées.

- **Zone 0** (avant du pipe)
- **Zone 1** (à l'intérieur du pipe)
  - Dans le champ [ $k=k_1, k_2$ ], les vitesses sont des vitesses paraboliques,
- **Zone 2** (à l'intérieur du pipe),

- **Zone 3** (Au dessous du pipe)
  - Dans les Zone 2 et 3, les vitesses sont des continuités des vitesses paraboliques dans les Zones 1 et 4.
- **Zone 4** (Après le pipe), les vitesses loins du tube peuvent avoir des vitesses à l'initialisation pratiquement parabolique.

**II.4.2. Maillage et description du domaine de résolution**



**Figure II.3 :** Répartition des zones pour les gaz de protection

**II.5. Méthode des Différence Finies (MDF) :**

Nous utilisons la Méthode des Différences Finies (MDF) [30] pour la transformation des équations 5 et 6 relatives aux vitesses. Cette méthode consiste à approximer les dérivées partielles d'une équation au moyen des développements du Taylor.

Dérivation par rapport à l'espace :

$$f(x \pm hx, y, z) = f(x, y, z) \pm hx f'(x, y, z) + \frac{(hx)^2}{2!} f''(x, y, z) \pm \dots$$

$$f(x, y \pm hy, z) = f(x, y, z) \pm hy f'(x, y, z) + \frac{(hy)^2}{2!} f''(x, y, z) \pm \dots$$

$$f(x, y, z \pm hz) = f(x, y, z) \pm hz f'(x, y, z) + \frac{(hz)^2}{2!} f''(x, y, z) \pm \dots$$



$$f^{n+1}(i \pm 1, j, k) = f_{(i,j,k)}^{n+1} \pm hx \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^{n+1} + \frac{(hx)^2}{2!} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^{n+1} \pm \dots$$

$$f^{n+1}(i, j \pm 1, k) = f_{(i,j,k)}^{n+1} \pm hy \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^{n+1} + \frac{(hy)^2}{2!} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^{n+1} \pm \dots$$

$$f^{n+1}(i, j, k \pm 1) = f_{(i,j,k)}^{n+1} \pm hz \left( \frac{\partial f}{\partial z} \right)^{n+1} + \frac{(hz)^2}{2!} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right)^{n+1} \pm \dots$$

La dérivation par rapport au temps :

$$f^{n+1}(i, j, k) = f^n(i, j, k) + ht \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)^n + \frac{(ht)^2}{2!} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right)^n \pm \dots$$

Les expressions des dérivées partielles d'ordre un et deux dans la Méthode des Différences Finies sont :

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{(i,j,k)}^{n+1} - f_{(i-1,j,k)}^{n+1}}{hx} \text{ ou } \frac{f_{(i+1,j,k)}^{n+1} - f_{(i,j,k)}^{n+1}}{hx} \text{ ou } \frac{f_{(i+1,j,k)}^{n+1} - f_{(i-1,j,k)}^{n+1}}{2hx}$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{f_{(i,j,k)}^{n+1} - f_{(i,j-1,k)}^{n+1}}{hy} \text{ ou } \frac{f_{(i,j+1,k)}^{n+1} - f_{(i,j,k)}^{n+1}}{hy} \text{ ou } \frac{f_{(i,j+1,k)}^{n+1} - f_{(i,j-1,k)}^{n+1}}{2hy}$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{f_{(i,j,k)}^{n+1} - f_{(i,j,k-1)}^{n+1}}{hz} \text{ ou } \frac{f_{(i,j,k+1)}^{n+1} - f_{(i,j,k)}^{n+1}}{hz} \text{ ou } \frac{f_{(i,j,k+1)}^{n+1} - f_{(i,j,k-1)}^{n+1}}{2hz}$$

- $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{f_{(i-1,j,k)}^{n+1} - 2f_{(i,j,k)}^{n+1} + f_{(i+1,j,k)}^{n+1}}{(hx)^2}$
- $\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{f_{(i,j-1,k)}^{n+1} - 2f_{(i,j,k)}^{n+1} + f_{(i,j+1,k)}^{n+1}}{(hy)^2}$
- $\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{f_{(i,j,k-1)}^{n+1} - 2f_{(i,j,k)}^{n+1} + f_{(i,j,k+1)}^{n+1}}{(hz)^2}$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_{(i,j,k)}^{n+1} - f_{(i,j,k)}^n}{ht}$$

## II.5.1. Pour l'étape1 : Calcul des composantes U, V et W de la vitesse du gaz de protection

### II.5.1.1. Equations de base

Soient imax, jmax et kmax les nombres de nœuds maximums suivant les dimensions x, y et z respectivement de l'espace du gaz.

Les équations (1), (2), (4),(5) et (6) sont applicables pour les nœuds  $i = 2, \text{imax}-1$ ,  $j=2, \text{jmax}-1$  et  $k=2, \text{kmax}-1$ .

Par application de la Méthode des Différences Finies, nous obtenons les formes suivantes pour les composantes U et W de la vitesse (f=U ou W):

- Pour  $i=2,imax-1$ ,  $j=2,jmax-1$ ,  $1 < k < k_m$ ,  $k_m+1 < k < kmax-1$

$$\alpha_{1k}f(i, j, k - 1) + \alpha_{2k}f(i, j, k) + \alpha_{3k}f(i, j, k + 1) = \beta_k$$

Où les constantes  $\alpha_{1jk}$ ,  $\alpha_{2jk}$  et  $\beta_{jk}$  (ou  $\alpha_{1k}$ ,  $\alpha_{2k}$  et  $\beta_k$ ) sont des fonctions des composantes U, V et W aux points  $i$  et  $i\pm 1$ ,  $j$  et  $j\pm 1$ ,  $k$  et  $k\pm 1$  et les paramètres relatifs aux données physiques et aux données de discrétisation.

Avec ce type d'équations, on est amené à résoudre des systèmes d'équations matricielles  $A.X=B$  ; la matrice A est tridiagonale. Pour la résolution des équations, nous avons utilisé la méthode itérative de Gauss-Seidel. Le langage de programmation est le Fortran 77 [Magister Babahani].

Le calcul de V se fait par l'équation de continuité pour  $j$ ,  $j+1/2$  et  $j+1$

## II.6. Conditions initiales et conditions aux limites pour les calculs des vitesses

- A la surface du matériau :  $U(i,j,k=1)=0$ ;  $V(i,j,k=1)=0$ ;  $W(i,j,k=1)=0$  ;
- Au niveau du plan de symétrie :  $V(i,j=1,k)=0$  ;
- Pour  $i=1$  et  $i=imax$ ,  $j=1$  et  $jmax$ ,  $k=1$  et  $kmax-1$  : dérivée nulle ;
- Quatre autres zones ont été identifiées pour le calcul (voir figures II.3 et II.4).
- La vitesse du gaz au niveau du pipe ou tube est prise de profil parabolique avec un flux constant  $\Phi_0$  ; cette zone a été identifiée comme Zone 1 ;
- Pour la Zone 0, on suppose que  $U(i,j,k)=0$ ;  $V(i,j,k)=0$ ;  $W(i,j, k)=0$
- Pour les Zones 2 et 3, les lignes de champs des **vitesses initiales** ont été prises de profil hyperbolique. Cette hypothèse permettrait d'avoir les directions de l'écoulement gazeux dans le tube et dans la zone 4 loin du tube. Un premier travail consiste au calcul des équations des droites limites des différentes zones. Pour les modules des vitesses nous devons des continuités des vitesses entre la zone 1 et la zone 2. Le calcul de ces trajectoires ou ces lignes de champs de vitesses ainsi que le calcul de leurs vitesses initiales constitue l'étape la plus complexe de la modélisation.

La figure II.4 illustre les différents paramètres géométriques pour la détermination des droites et des courbes asymptotiques pour le calcul.

**Pour les calculs pratiques des vitesses :**

- ✓ Calcul des composantes U et W des vitesses initiales paraboliques dans le tube dans la Zone1 :  $ik_2 < i < iM_1$  et  $k_1 < k < k_2$  pour  $j = 1, j_1$
- ✓ Calcul des lignes de champs des vitesses sur des trajectoires asymptotiques hyperboliques ( $C_k$ ) dans la Zone 2 et 3 :  $ik_1 < i < iM_2$  et  $1 < k_1 < k_1$

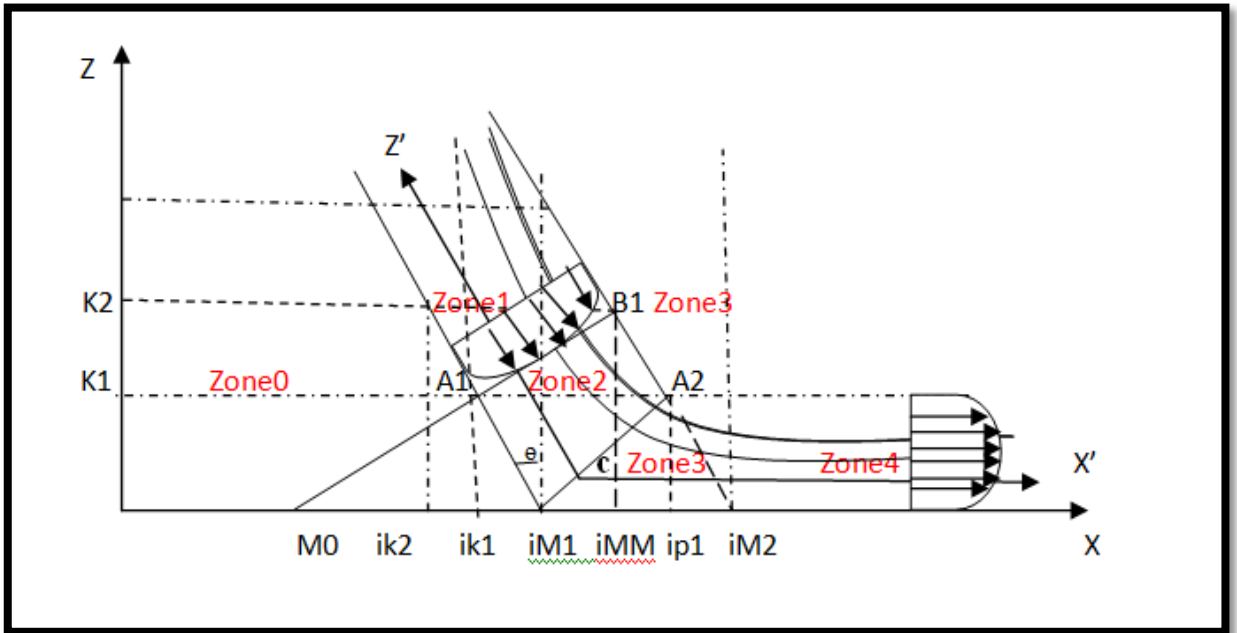
$$\left( Z - Z_c \right) - \frac{A}{\left( Z - Z_c \right)} = - \frac{1}{tg\theta} \left( X - X_c \right) \quad \text{Courbe } C_k$$

$Z=Z_c$  présente la direction asymptotique de l'écoulement ;

$X_c$  est l'abscisse du point C ( $X_c, Z_c$ ) de la droite (plan) limite entre les deux zones 2 et 3 ;

A est une constante permettant le confinement de la courbe  $C_k$  dans les zones 2 et 3.

- ✓ Calcul des composantes U et W des vitesses initiales sur les trajectoires ( $C_k$ ) dans le tube dans les Zones 2 et 3 :  $ik_1 < i < iM_2$  et  $1 < k_1 < k_1$  pour  $j = 1, j_1$ . Dans ce calcul les vitesses doivent être corrigées pour avoir les continuité entre les zones 1 et 4.



**Figure II.4 :** Identification des paramètres des zones pour les gaz de protection

La figure II.5 illustre une vue de dessus de la plaque de soudure avec la zone correspondant au chemin du pipe.

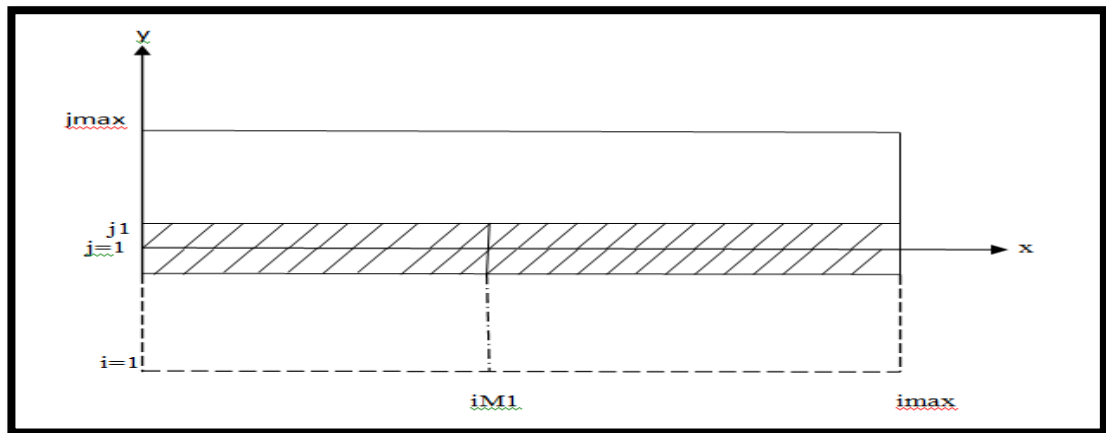


Figure II.5 : Plaque de soudure vue de dessus.

II.7. Organigramme pour le calcul des vitesses

La figure II.6 présente l'organigramme pour le calcul numérique des vitesses. Comme, il a été mentionné le langage utilisé est Fortran 77 et la méthode de base est principalement la Méthode de Gauss-Seidel itérative.

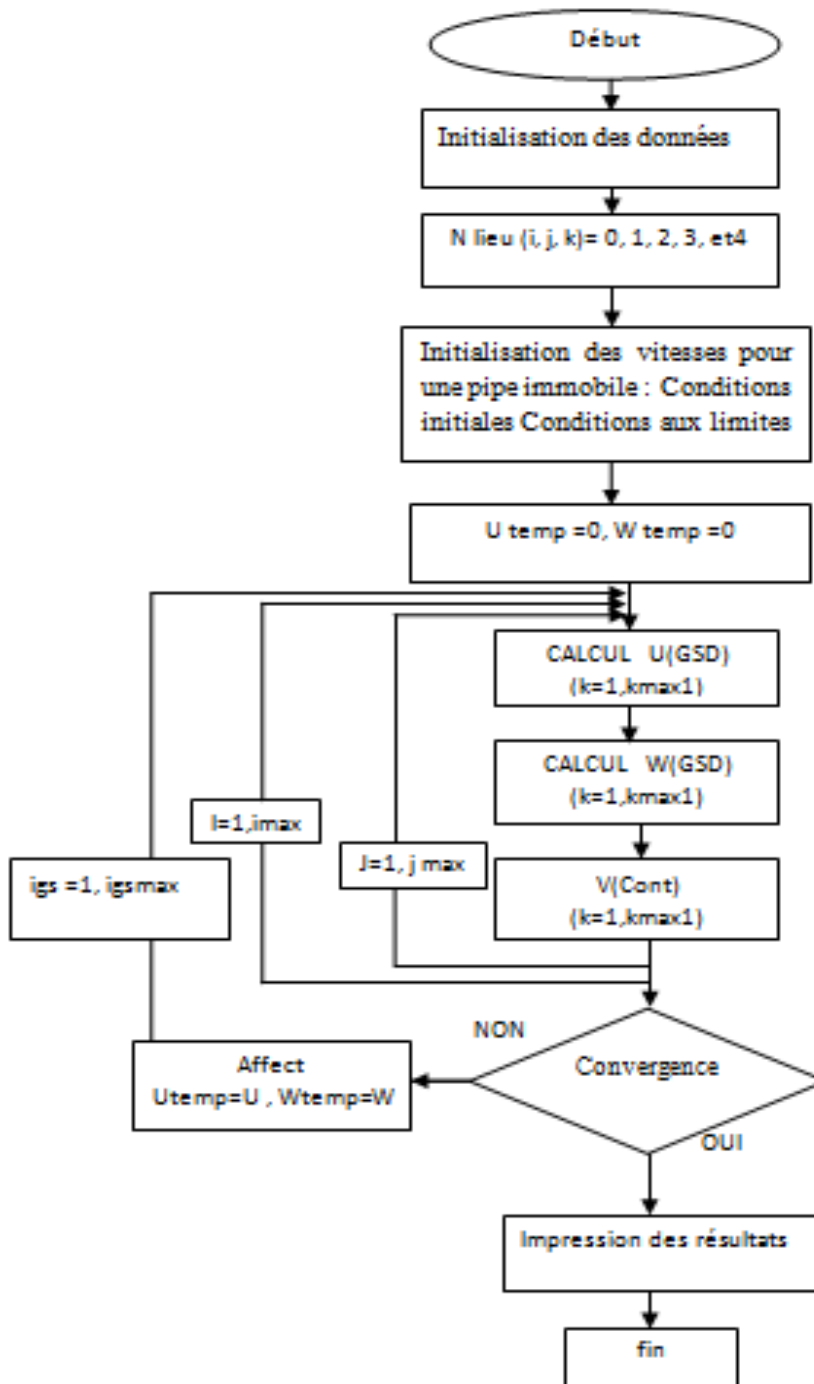


Figure II.6 : Organigramme pour le calcul numérique des vitesses



*Chapitre III*

*Résultats et discussion*

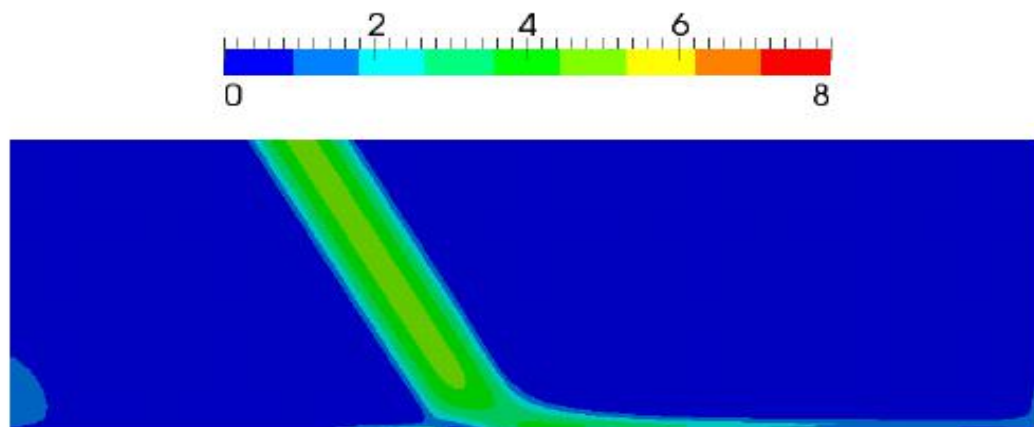
## Chapitre III : Résultats et Discussion

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats obtenus durant notre travail pour l'étude des vitesses des gaz de protection à la surface de pièces d'alliage de titane soudées par faisceau laser.

Le gaz de protection utilisé est le He ou l'Ar sur une surface de titane, la température est 300 °C et l'angle d'inclinaison du pipe est 30° comme dans l'article A. Shirvan [2]. La figure III.1 présente le profil des vitesses au plan de symétrie de la soudure calculé [2].

On remarque :

- A l'intérieur du pipe, le profil est parabolique,
- Loin du pipe le profil de vitesse s'abaisse,
- Les zones où les vitesses sont nulles.



**Figure III.1 : Profil des vitesses au plan de symétrie**

### **III.1. Les conditions utilisées pour calculer les vitesses**

Nous étudions la distribution des vitesses à trois dimensions pour différents gaz de protection : Argon, Hélium et un mélange argon, hélium. Le tableau III.1 présente les grandeurs physiques utilisées dans les calculs [2]. Il s'agit des données géométriques relatives à la plaque à souder et le tube d'injection de gaz et le flux de gaz. Le tableau III.2 présente les propriétés physiques et thermodynamiques des gaz d'Hélium et d'Argon. Le tableau III.3 présente les propriétés physiques de la plaque de titane à souder.

**Tableau III-1** : Les propriétés physiques utilisées dans les calculs [2].

Grandeurs physiques (unité)	Valeur
Température de phase gazeuse (°C)	300
La longueur du tube (m)	0.07
La longueur de la fente du tube (m)	0.02
largeur de la fente de tube (m)	0.01
Longueur de plaque (m)	0.2
Largeur de plaque (m)	0.1
l'épaisseur de plaque (m)	0.007
le débit de flux de gaz (m <sup>3</sup> /s)	0.75.10 <sup>-3</sup>
L'angle de courbure de la pipe	$\theta = 30^0$

**Tableau III-2** : Les propriétés physiques de gaz [31].

Gaz de protection	conductivité thermique (W/m.K)	masse moléculaire (g. mol <sup>-1</sup> )	Viscosité dynamique (Ns/m <sup>2</sup> )	Masse Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )
Ar	0.0178	39.94	22,8* 10 <sup>-6</sup>	1,784
He	0.1500	4.00	19,68* 10 <sup>-6</sup>	0,1785
N <sub>2</sub>	0.0256	28.02	17,9* 10 <sup>-6</sup>	1,250
CO <sub>2</sub>	0.0164	44,00	14,833* 10 <sup>-6</sup>	1,9767

**Tableau III-3**: Les propriétés physiques de la plaque de titane [2].

densité (kg. m <sup>-3</sup> )	4309
chaleur spécifique (J. kg <sup>-1</sup> . k <sup>-1</sup> )	714
conductivité (w m <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup> )	17.8

**Tableau III-4** : Les valeurs numériques des calculs

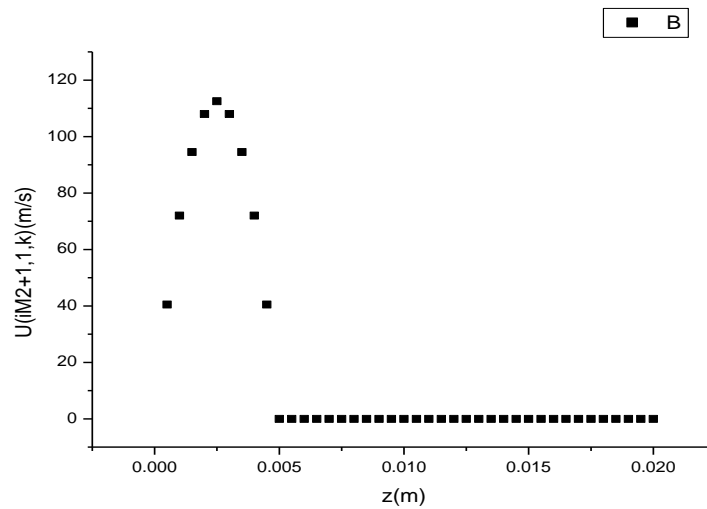
iM <sub>0</sub>	ik <sub>1</sub>	ik <sub>2</sub>	iM <sub>1</sub>	iMM	ip <sub>1</sub>	iM <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	J <sub>1</sub>
69	72	63	80	86	89	92	11	21	11



**III.2. Initialisation pour les Zone 1 et 4**

**A La zone 4 :**

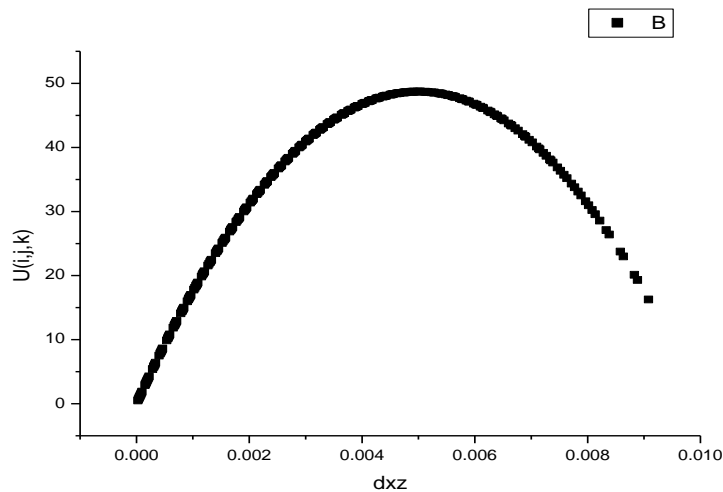
La figure III.2 présente le profil des vitesses dans la zone 4, loin du tube. Le profile est parabolique pour la vitesse U pour  $i=iM2+1$ , les composante W et V sont nulles ( $W=0, V=0$ ).



**Figure III.2 :** Profil de la vitesse U en fonction des positions z pour  $i=iM2+1$  et  $j=1$

**La zone 1**

Les figures III.3 et III.4 présentent le profil des vitesses dans la zone 1, à l'intérieur du tube. Le profile est parabolique pour le module de la vitesse (des composantes U et W).



**Figure III.3 :** Profil de la vitesse U en fonction de la distance au mur du tube dxz

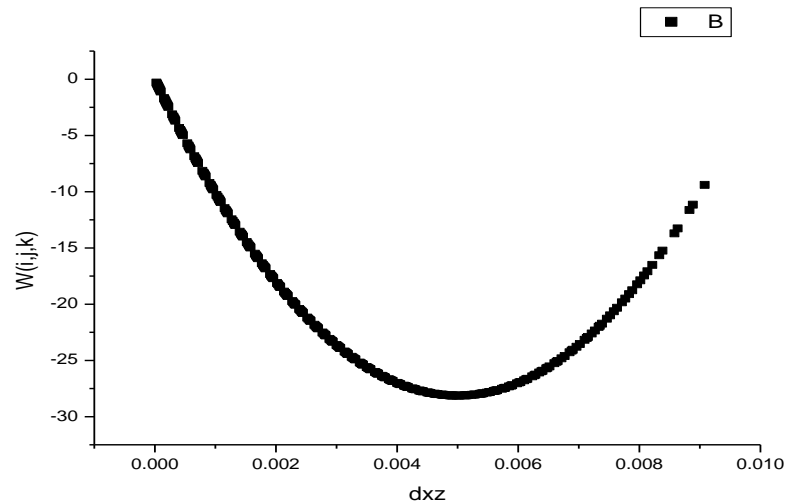


Figure III.4 : Profile de la vitesse  $W$  en fonction la distance au mur du tube  $dxz$

### III.3. Les conditions initiales pour les Zones 2 et 3

La première étape consiste à la détermination des lignes de champs des vitesses dans les zones 2 et 3. Les trajectoires sont des trajectoires pour  $k_c=1$ ,  $k_1$  limitées par les surfaces du tube (zone 1) et les faces réelle et fictive de la zone 4.

- Détermination des lignes de champs des vitesses dans les zones 2 et 3

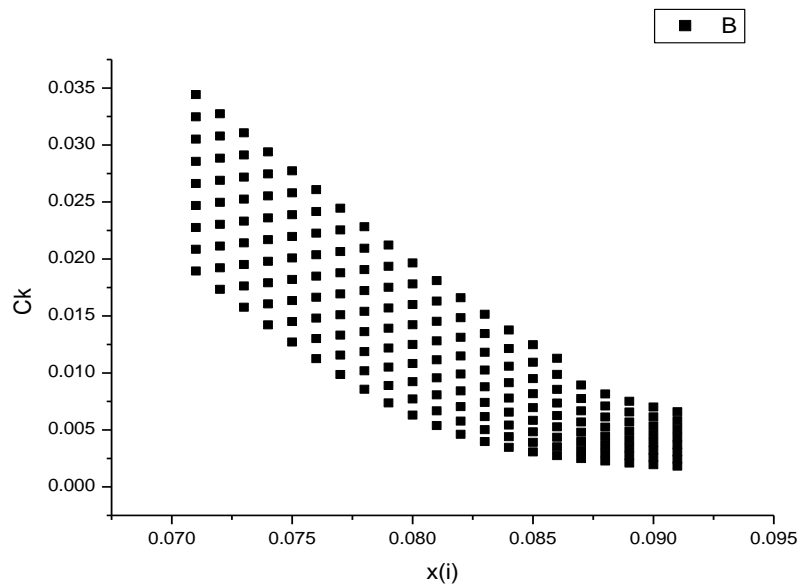
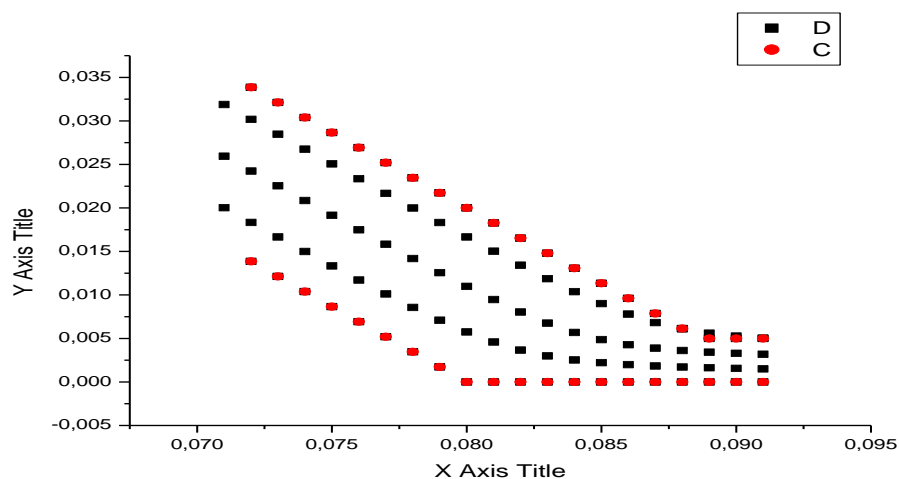


Figure III.5 : Profile des trajectoires en fonction des positions  $x$

La deuxième étape est la détermination des vitesses sur les lignes de champs

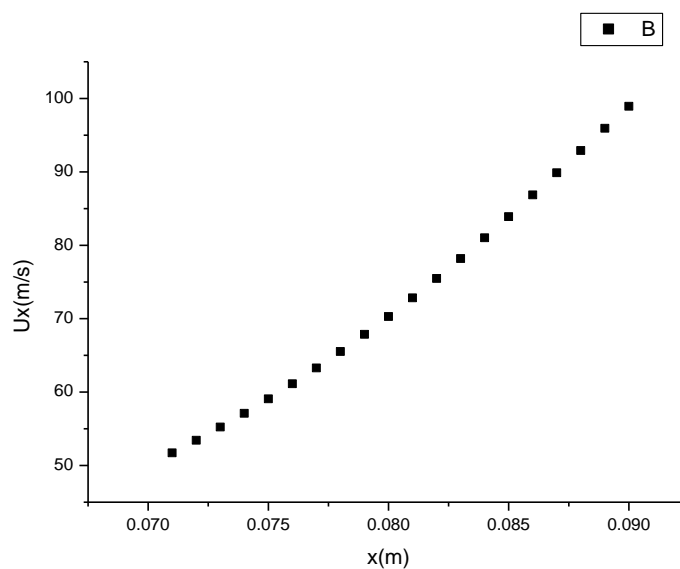
➤ **Détermination des lignes de champs des vitesses dans les zones 2 et 3**

- Détermination des droites limites des zones 2 et 3.
- Détermination des lignes hyperboliques asymptotes des vitesses,  $C_k : Z=Z(X)$ .
- Détermination des tangentes aux lignes pour les vitesses U et W (pente= $Z'(X)$ ).
- Correction des vitesses pour la continuité entre les zones 1 et 4 (où les vitesses sont paraboliques).

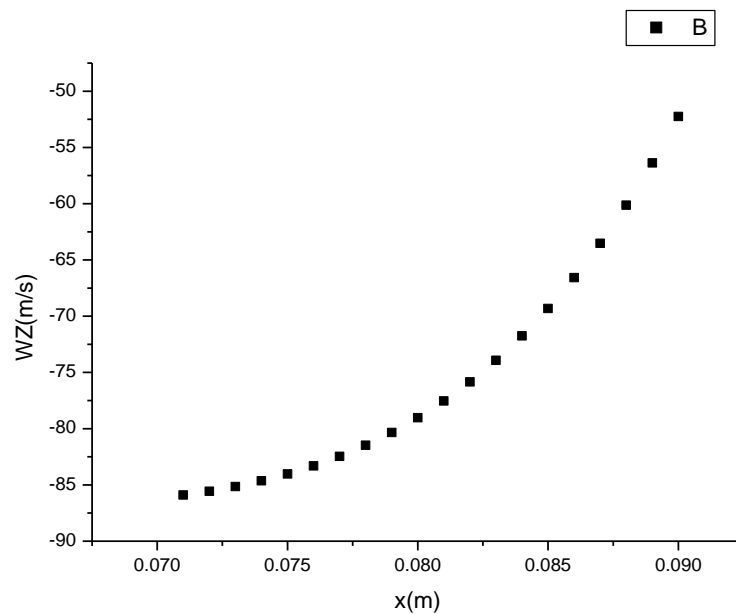


**Figure III.6 :** Profile des trajectoires

La figure III.6 présente la composante de la vitesse U pour  $k_c=6$  dans les zones 2 et 3. La figure III.7 présente la composante de la vitesse W pour  $k_c=6$ .

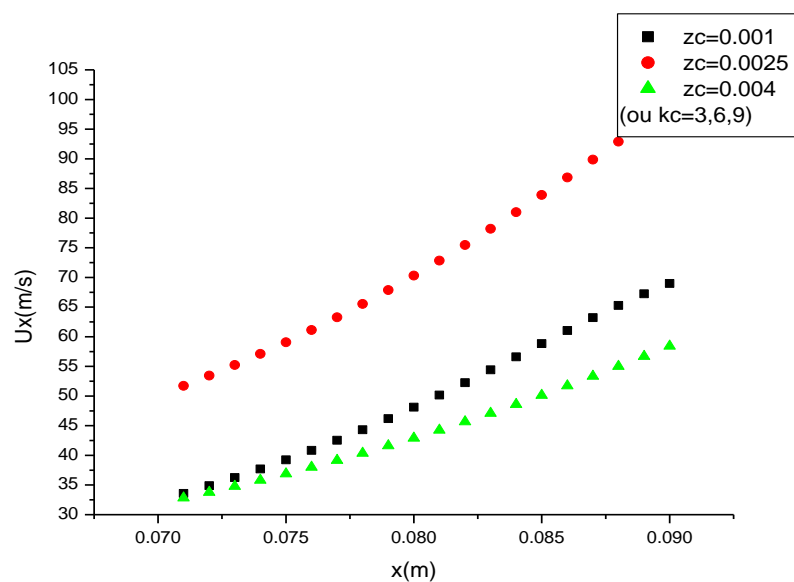


**Figure III.7 :** Profil de la composante U de la vitesse dans les zones 2 et 3



**Figure III.8 :** Profil de la composante W de la vitesse dans les zones 2 et 3

La figure III.8 présente la composante de la vitesse U en fonction de x ou i. dans les zones 2 et 3 pour  $kc= 3, 6, 9$ . La figure III.9 présente la composante de la vitesse W en fonction de z ou k. dans les zones 2 et 3 pour



**Figure III.9 :** Profil de la vitesse U dans les zones 2 et 3 pour  $kc= 3, 6, 9$  ou  $z_c= 0,001, 0,002$  ou  $z_c=0,004$ .

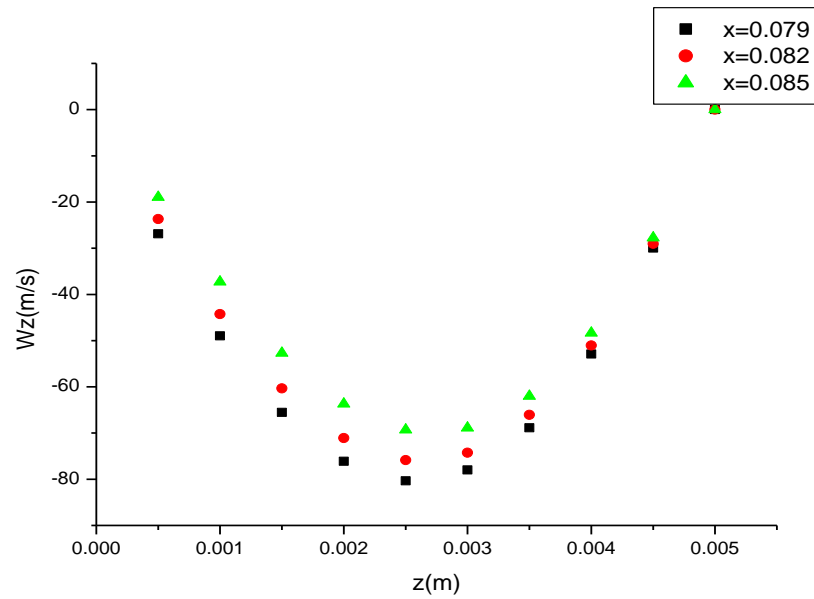


Figure III.10 : Profil de la vitesse W dans les zones 2 et 3 pour  $i=iM1+3$ ,  $iM1$ ,  $iM1+6$

La figure III.11 présente le module de la vitesse ( $U+W$ ) en fonction de  $x$  et  $z$  dans les zones 2 et 3.

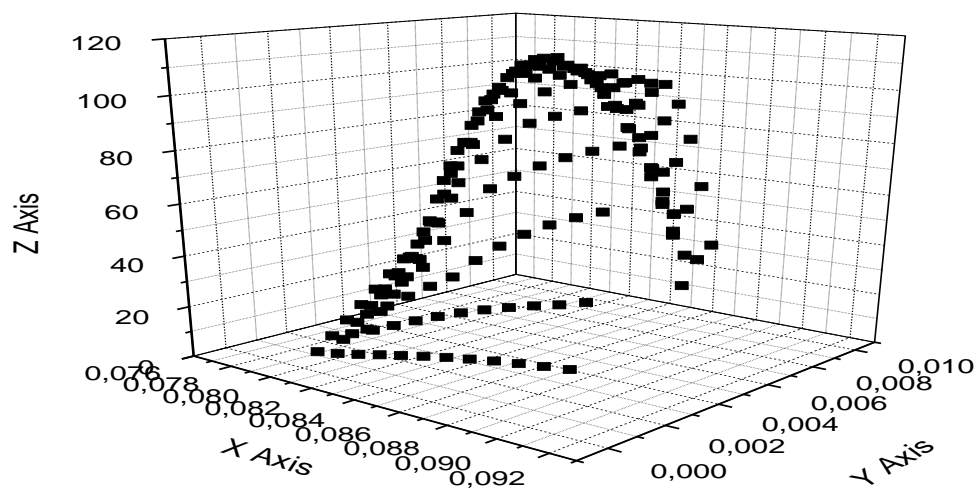
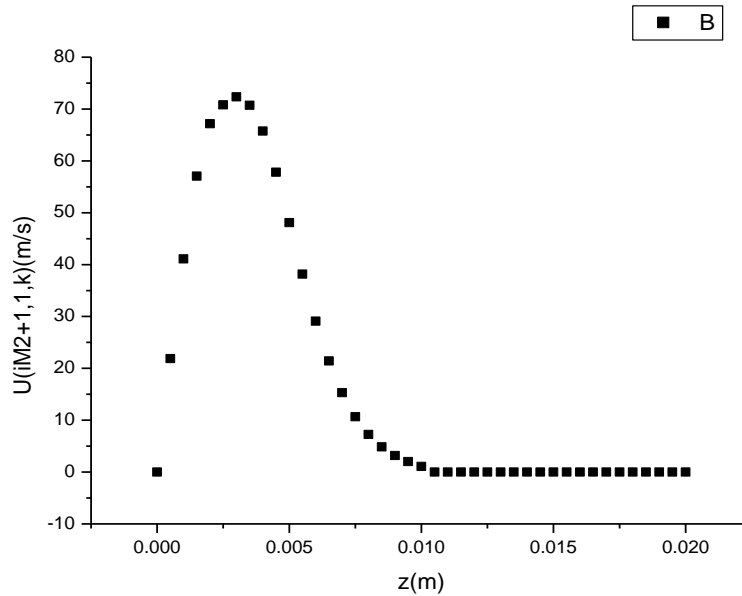


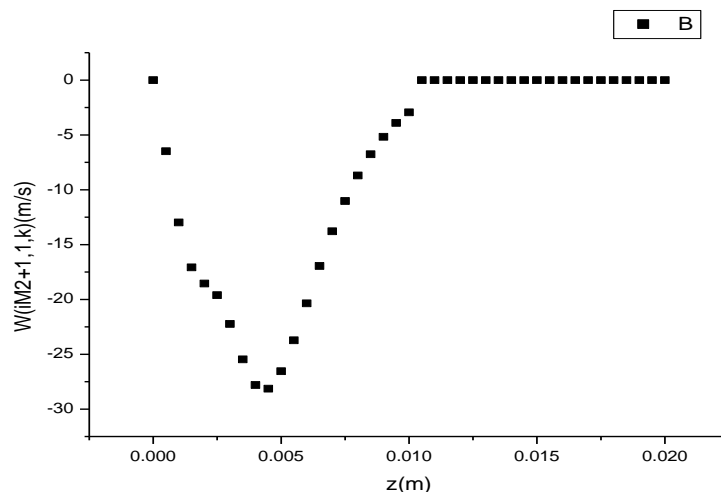
Figure III.11 : Profil du module de la vitesse ( $U+W$ ) dans les zones 2 et 3.

**III.4. Calcul des vitesses dans la zone 4**

Soit IGS le nombre d'itération pour le calcul répétitif de Gauss-Seidel. La figure III.11 présente la composante de la vitesse U en fonction de z dans la zone 4 au point x ou  $i=iM2+1$  et  $j=1$  et pour IGS=5. La forme de la vitesse, composante U, est pratiquement parabolique. La figure III.12 présente la composante W pour les mêmes conditions.

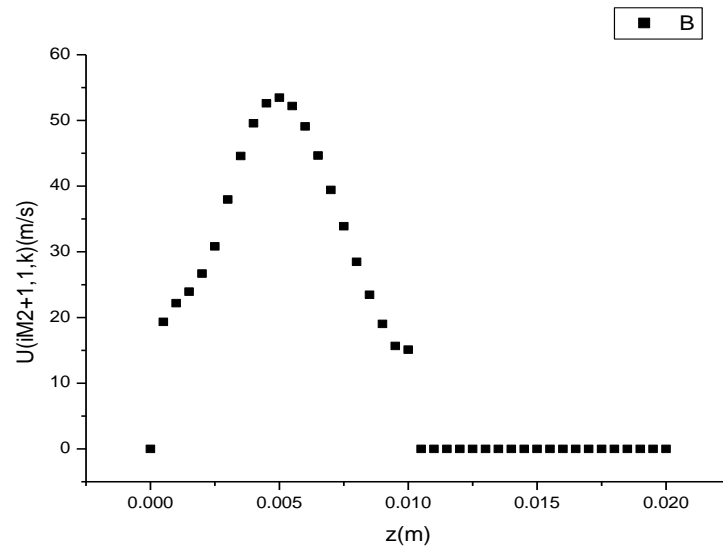


**Figure III.12 :** Profil de la vitesse U en fonction des positions k (ou z) pour  $i=iM2+1$  et  $j=1$ , IGS=5

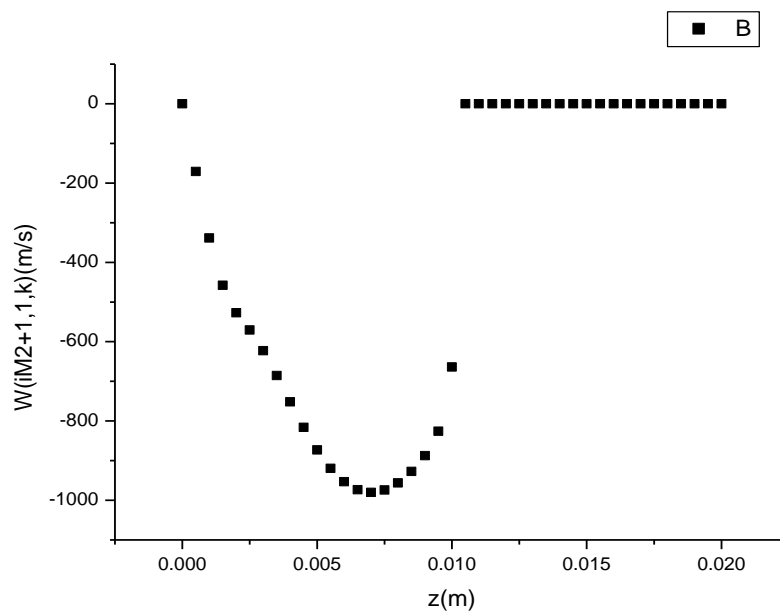


**Figure III.13 :** Profil de la vitesse W en fonction des positions z pour  $i=iM2+1$  et  $j=1$ , IGS=5

Les figures III.14 et III.15 présentent les profils des composantes U et W pour des cas similaires aux figures III.12 et III.13 pour IGS=8. La tendance parabolique de la vitesse reste toujours apparente.



**Figure III.14 :** Profil de la vitesse U en fonction des positions z pour  $i=i M2+1$  et  $j=1$ , IGS=8



**Figure III.15 :** Profil de la vitesse W en fonction des positions z pour  $i=i M2+1$  et  $j=1$ , IGS =8

La figure III.16 présente les profils des composantes de la vitesse U pour différentes valeurs de  $j, j=1,2,6$  pour  $GS=1$ . La figure III.17 présente les mêmes calculs pour la composante W.

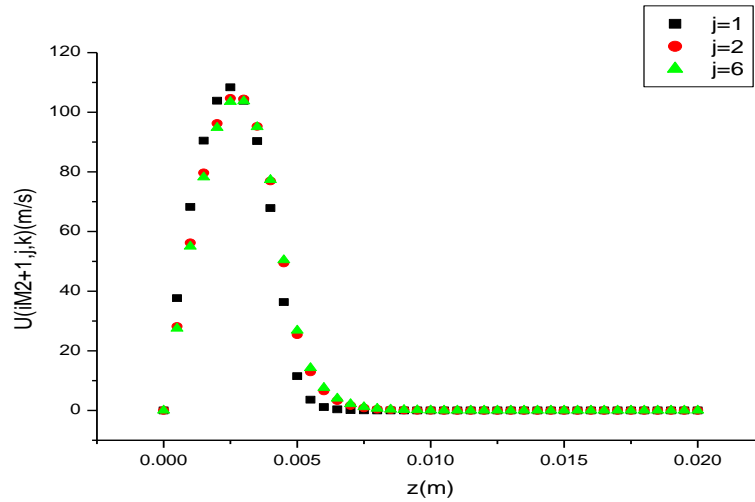


Figure III.16 : Profil de la vitesse U en fonction des positions z ou k pour  $i=iM2+1$  et  $j=1, 2, 6$

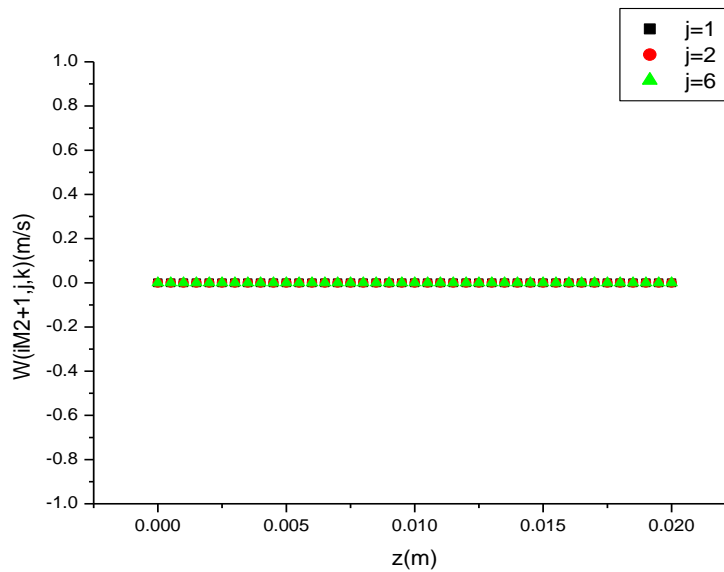


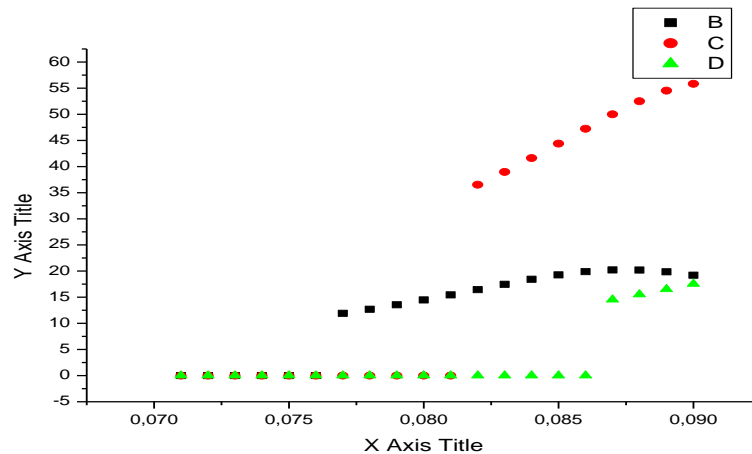
Figure III.17 : Profil de la vitesse W en fonction des positions z pour  $i=iM2+1$  et  $j=1, 2, 6$



### III.5. Calcul des vitesses dans les zones 2 et 3

Calcul de vitesse  $U_{x,ref}$  suivant  $x$  pour  $k_c=2, 6, 10$

Les figures III.18 présentent les profils des composantes  $U_{x,ref}$  de la vitesse dans les zones 2 et 3.



**Figure III.18** : Profil de la composante U de la vitesse dans les zones 2 et 3

### III.6. Conclusions

Le calcul des vitesses a été fait pour toutes les zones de soudage. Les principales remarques sont :

- L'initialisation des vitesses a été faite de façon à assurer la continuité des vitesses entre les différentes zones.
- Bien que le nombre de valeurs de calcul itératif était petit et la convergence finale des résultats n'ait pas pu être finalisée, le profil parabolique de la vitesse est pratiquement conservé.
- Les tendances des profils des vitesses sont en accords avec les profils de vitesses de A. Shirvan [2] présentés dans la figure III.1.
- Un calcul supplémentaire est à faire pour assurer une conservation des flux en utilisant, entre autre un calcul explicite pour des valeurs de  $k=k_m$ . Ce dernier calcul a été initié, mais il n'ait pas pu finalisé.



*Conclusion générale et  
perspectives*

## **Conclusion générale et perspectives**

Les gaz de protection interviennent dans les processus de soudage de bien des manières et permettent de les optimiser de façon ciblée C'est la raison pour laquelle le gaz ou le mélange de gaz utilisé doit être choisi avec soin en fonction de ses caractéristiques spécifiques et des effets souhaités. Les optimisations possibles concernent quasiment tous les facteurs qui jouent un rôle important dans le processus de soudage.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude des vitesses de gaz de protection dans les dispositifs de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques. Les données de nos calculs sont celles utilisées par A. Shirvan [2] Nous avons considérés que la température de la phase gazeuse est constante et égale à 300°C, le type de gaz est l'argon, hélium ou un mélange argon hélium. Le débit de flux de gaz est  $0.75 \cdot 10^{-3}$  (m<sup>3</sup>/s). La plaque à souder est un alliage de titane ; l'angle de courbure du pipe ou du tube est  $\theta = 30^0$  .

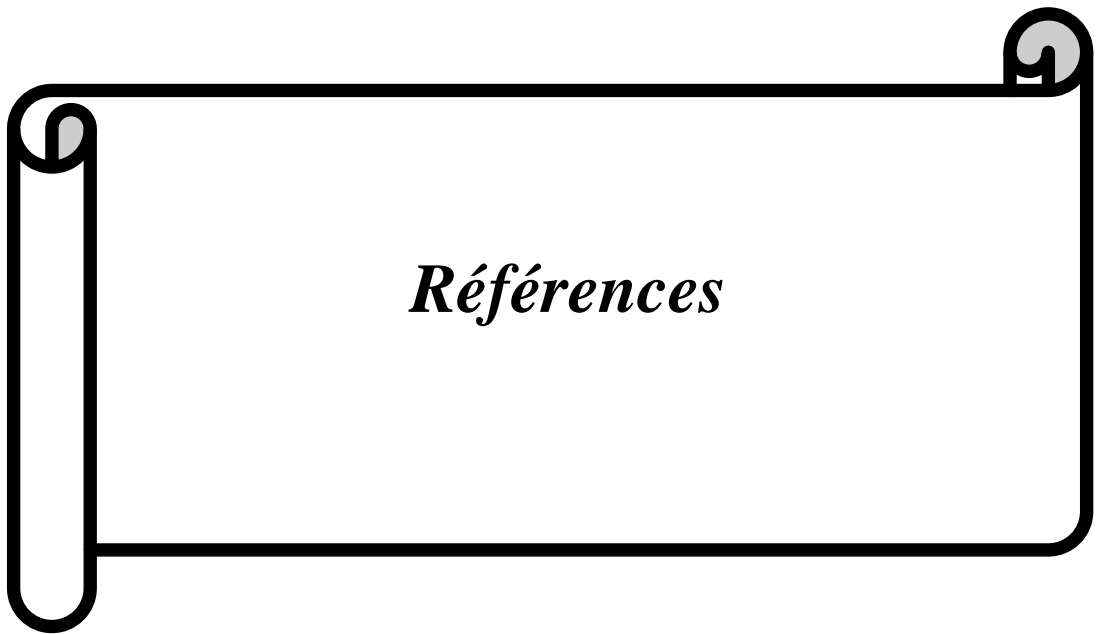
Nous avons proposé la résolution de l'équation de continuité et de la quantité du mouvement. L'écoulement du fluide est considéré laminaire et le régime est stationnaire. Pour la modélisation numérique, nous avons adopté la Méthode des Différences Finies (MDF) et la méthode itérative de Gauss-Seidel.

Nous avons calculé les vitesses de gaz de protection en fonction des positions x, y et z pour l'initialisation des solutions. Un travail raffiné a été fait au niveau de la zone intermédiaire entre le tube et la plaque, notée zone 2 et 3. Un calcul a été fait après pour toutes les zones de soudage. Bien que la convergence finale des résultats n'ait pas pu être finalisée, le profil parabolique de la vitesse est pratiquement conservé.

Comme perspectives nous proposons :

- Raffiner les résultats par un calcul garantissant la conservation de tout les flux.  
Calcul des vitesses de gaz pour différentes valeurs de débit de gaz et différentes valeurs d'angles d'inclinaison du tube ou du pipe.
- Estimation d'un premier bilan énergétique dû au transfert de chaleur entre le gaz et la plaque métallique chauffée par la source laser.
- Etude de l'effet de la géométrie du tube sur les profils des vitesses.

- Calcul des vitesses de la phase gazeuse pour une vitesse donnée du pipe. Les vitesses calculées dans cette étape seront corrigées par la vitesse d'entraînement du pipe ou du laser.
- Calcul de la température de la phase solide pour une source laser non nulle.
- Etude de l'effet des propriétés et des vitesses du gaz de protection sur la qualité de la profondeur et de la pénétration.



*Références*

### Références

- [1] K. Lann ; “ *Les applications des lasers dans l’industrie* ”; Centre d’études techniques en productique et mécatronique C/O Ecole Louis De Broglie, **Vol. N°7**, 1-6 (2007).
- [2] A. Shirvan, I. Choquet, H Nilsson ; «of the 5th International Swedish Production Symposium ; Linkoping, Sweden» ; 269-276 ; (2012).
- [3] S. Benissaad ; «Office Des Publications Universitaires» ; Alger, (1995).
- [4] G. Murry ; « Soudage et soudabilité métallurgique des métaux » ; Technique de l’ingénieur, M715, (1994).
- [5] P. Nicolas ; « Etude et développement des flux solides en vue d’application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu’aux aciers inoxydables » ; Thèse de doctorat ; Université de Nantes, Juin (2000).
- [6] D. Lacroix ; « Etude spectroscopique des plasmas de soudage laser: application au transfert d’énergie » ; Thèse de doctorat ; Université de Henri Poincaré, Nancy 1, (1997).
- [7] J. Dutta Majumdar and I. Manna ; «Laser processing of materials, Sadhana», **Vol 28**, pp. 495-562, (2003).
- [8] S. Lemkeddem et F. Khelfaoui ; « Modélisation Thermique de Soudures Asymétriques par Soudage Laser » ; 5ème Séminaire National sur le laser et ses Applications ; Université de Ouargla, (2009).
- [9] M. Mostafa ; « Etude du perçage et du soudage laser: dynamique du capillaire » ; Thèse de Doctorat ; Université de Bourgogne, (2012).
- [10] S.Guerrida ; « Etude de la soudure au laser en industrie » ; Mémoire de master ; Université de Ouargla, (2012).
- [11]C. Ferdinand ; « Mise en œuvre et caractérisation d’assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d’alliages de Titane réfractaires » ; Thèse de doctorat ; Université de de Toulouse , (2005).
- [12] site web :<http://www.pangas.ch/> consulté le 25/01/2017.
- [13]B. Juckenath, M. Cantello ; «Laser Welding of Titanium and Titanium Alloys» ; Proc. 6th World Conference on Titanium, Cannes Ed. de physique,p.1397-1402, (1988).
- [14][www.nal\\_ans.be/.../en\\_iso\\_14175\\_choisissez\\_le\\_gaz\\_de\\_protection\\_approprie/](http://www.nal_ans.be/.../en_iso_14175_choisissez_le_gaz_de_protection_approprie/) site web consulté le: 17/02/2017
- [15] Ph. Chen ;«Thermodynamique et gaz» ; Vuibert supérieur ,1993.
- [16]G. Heyen ;«Thermodynamique Chimique appliquée»; Laboratoire d’Analyse et Synthèse des Systèmes Chimiques ; Université de Liège, 2002.

- [17] Robert Y.; « Simulation numérique de soudage TA6V par laser YAG impulsif »; Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris (2007).
- [18] A. Berkoune ; « Aide mémoire de mécanique des fluides »; Office des publications Universitaires ; Alger, (2002).
- [19] Z.Rao, J. Hu, S. Liao, H. Tsai ; «International Journal of Heat and Mass Transfer»53, 5707-5721,(2010).
- [20] N.Shanmugam, G. Buvanashkaran and K. Sankaranarayanan ; «International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering» ; **Vol. 7(7)**,1532-1541 (2013).
- [21] A. Belhadj ; «contribution a l'étude expérimentale et numérique du soudage laser application aux alliages de magnésium» ; Thèse de Doctorat ; l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, (2009).
- [22] A.Ancona, T. Sibillano, P. M.Lugarà,G.Gonnella, G.Pascazio,and D.Maffione; «An analysis of the shielding gas flow from a coaxial conical nozzle during high powerCO2 laser welding» ;J. Phys. D: Appl. Phys. 39 563–574(2006)
- [23] T.Kuo and Y Lin ; «Materials Transactions» ; **Vol. 48**, No. 2 ,pp. 219 - 226,(2007).
- [24] S. Lemkeddem ; «Contribution à l'étude du rayonnement émis par le plasma lors de l'interaction des torches à plasma avec les métaux»; Université de Ouargla, (2008).
- [25] S.Lemkeddem et F.Khelfaoui ;Spectre de raies de d'émission d'une torche à plasma en utilisant la technique de l'inversion d' Abel ; Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Vol. 1 N° 3 58-65(2009).
- [26] S. Guerrida ; « Etude de la soudure au laser en industrie » ; mémoire de master ; Université de Ouargla (2012) .
- [27] K. Telib ; «Etude de la soudure au Laser aux limites des températures de fusion des métaux»; Université de Ouargla, (2013).
- [28] Y. Bennana ; «Etude spectroscopique des élargissements Doppler des plasmas lors de la soudure aux lasers»; Université de Ouargla, (2015).
- [29] R. Bekhouche ; «Elargissement électronique des raies spectrales Lors de soudure aux lasers»; Université de Ouargla, (2016).
- [30] M. Sibonyet et J. Claude Mardon ; 'Approximations et équations différentielles' ; Hermann (1982).
- [31] Site web : [www.messer.fr](http://www.messer.fr) ; consulté le 17/02/2017

## Etude des vitesses de gaz de protection dans les dispositifs de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques

### Résumé :

Le soudage par laser est une technique d'assemblage appliquée dans l'industrie. L'utilisation de gaz de protection est très importante pour la qualité des soudures. Ce travail est une étude des vitesses du gaz de protection dans les dispositifs de soudage au laser, Nous avons étudié les phénomènes physiques et nous avons proposé un programme de calcul numérique, en langage fortran. Il utilise la méthode des différences finies (MDF) et l'algorithme de Gauss-Seidel. Les vitesses ont été calculé ; un travail raffiné a été fait au niveau de la zone intermédiaire entre le tube et la plaque.

### **Mots-clés:**

Soudage au laser, gaz de protection, modèle fluide, viscosité dynamique de gaz, soudure de métaux, Méthode des différences finies.

## دراسة سرعات الغاز الوقائي في أجهزة التلحيم بالليزر في السبائك المعدنية

### ملخص

التلحيم بالليزر هو تقنية للتجميع مطبقة في الصناعة، استخدام الغاز الوقائي مهم جدا لتحسين نوعية اللحامات. الهدف من هذا العمل هو دراسة سرعات الغاز الوقائي في أجهزة التلحيم بالليزر. لقد درسنا الظواهر الفيزيائية واقترحنا برنامجا عدديا، بلغة فورتران. وباستخدام طريقة الفروق المنتهية وخوارزمية غاوس-سايدل. تم حساب السرعات ؛ وقد تم ذلك بعد عمل معقد في المنطقة البيئية بين الأنبوب واللوحه.

### **الكلمات المفتاحية :**

التلحيم بالليزر، الغاز الوقائي، نموذج السوائل، اللزوجة الديناميكية للغاز، تلحيم المعادن، طريقة الفروق المحدودة.

## Studying of velocities of protective gas in laser welding machines of metal alloys

### Summary :

Laser welding is a technique used in the industry. The use of protective gas is very important for the quality of the welds. This work is a study of the shielding gas velocities in laser welding devices. We studied the physical phenomena and proposed a numerical calculation program, in fortran language. It uses the finite difference method (MDF) and the Gauss-Seidel algorithm. The speeds were calculated; A refined work was done at the intermediate zone between the tube and the plate.

### **Keywords:**

Laser welding, protective gas, fluid model, dynamic gas viscosity, metal welding, Finite difference method