

N<sup>o</sup> d'ordre :  
N<sup>o</sup> 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 : **BEKHOUCHE Randa**

**Thème :**

**Elargissement électronique des raies spectrales**

**Lors de soudure aux lasers**

Soutenu publiquement

Le : 26 /05/2016

Devant le jury composé de :

Dr CHOHRA Thouria	MCA	Président	UKM OUARGLA
Dr BENMABROUK Lazhar	MCB	Examineur	UKM OUARGLA
Pr KHELFAOUI Fethi	Prof.	Rapporteur	UKM OUARGLA
Mme LEMKEDDEM Soumaya	MAA	Co-encadreur	UKM OUARGLA

Année Universitaire : 2015/2016

# Dédicace

Je dédie ce travail à : Les plus chères personnes dans la vie : ma mère et mon père.

A mon cher frère et mes chères sœurs.

A tous les membres de la famille

BEK HOUCHE et AZIZ.

A tous mes amies surtout (Khouloud, Aicha, Hinda, Amel, Nour, Yassmina et Maroua).

# Remerciements

*Avant tout je remercie Allah, le tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens afin de pouvoir accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens tout particulièrement à exprimer ma plus profonde reconnaissance, et mes plus vifs remerciements à mon encadreur et directeur de recherche, le Professeur KHELFAOUI Fethi, 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 CHOHRA Thouria, et l'examineur Dr BENMABROUK Lazhar 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, et en particulier le Prof MEFTAH Mohammed Tayeb et Dr Chenini Keltoum.*

*Merci à tous les collègues et à tout le personnel du laboratoire pour leur Encouragement.*

*Enfin, grand merci à tous ceux et toutes celles qui ont contribué 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.....	viii
<b><u>INTRODUCTION GENERALE</u></b> .....	01
<b><u>CHAPITRE I: NOTIONS GENERALITES SUR LE SOUDAGE AUX LASERS</u></b>	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Procédés de soudage aux lasers.....	03
I.2.1. Définition de soudage.....	03
I.2.2. Classification des procédés de soudage.....	04
I.2.3. Le soudage par faisceau laser.....	04
I.2.3.1. Le rayonnement laser.....	04
I.2.3.2. Les différents types de laser .....	05
I.2.3.3. Les lasers CO <sub>2</sub> .....	05
I.2.3.4. Les lasers Nd-YAG (Néodyme Yttrium Garnet) .....	06
I.2.4. Principe du soudage par faisceau laser.....	07
I.2.5. Avantages du soudage par faisceau laser.....	08
I.2.6. Soudage laser dans l'industrie .....	09
I.2.7. Paramètres du soudage laser.....	09
I.3. Présentation des alliages du magnésium.....	10
I.3.1. Propriétés du magnésium pur .....	10
I.3.2. Avantages et inconvénients des alliages de magnésium.....	10
I.3.3. Soudage laser des alliages de magnésium.....	11
I.4. Spectroscopie des plasmas : cadre théorique.....	11
I.4.1. Lois de l'équilibre thermodynamique.....	11
I.4.1.1. Loi de Planck (Corps noir).....	12
I.4.1.2. Loi de distribution des vitesses de Maxwell-Boltzman.....	12
I.4.1.3. Loi de distribution de Boltzmann.....	12
I.4.1.4. Loi de Saha.....	13

I.4.2. Modèles d'équilibre thermodynamique.....	13
I.4.2.1. Equilibre thermodynamique totale.....	13
I.4.2.2. Equilibre thermodynamique local.....	13
I.4.2.3. Equilibre Thermodynamique local Partiel.....	13
I.4.2.4. Hors Equilibre.....	14
I.5. Élargissement et profil des raies d'émission d'un plasma.....	14
I.5.1. L'intensité d'une raie spectrale atomique.....	14
I.5.2. Phénomènes d'élargissement.....	14
I.5.2.1. Elargissement Doppler (profil gaussien).....	14
I.5.2.2. Elargissement naturel (profil Lorentzien).....	15
I.5.2.3. Elargissement collisionnel par les particules neutres.....	15
I.5.2.4. Elargissement instrumental.....	16
I.5.2.5. Élargissement par effet Stark.....	16
I.6. Elargissement Profil composé de phénomènes indépendants.....	16
I.6.1. Profil composé.....	16
I.6.2. Profil de Voigt.....	17
 <b><u>CHAPITRE II: METHODES DE CALCUL D'ELARGISSEMENT</u></b>	
<b><u>ELECTRONIQUES ET PROFIL DE RAIE</u></b>	
II.1. Introduction.....	18
II.2. Méthode de diagnostic.....	18
II.3. Détermination de la température électronique.....	18
II.3.1. Méthode de l'intensité relative de deux raies.....	19
II.4. Modèles théorique pour le calcul des élargissements électroniques.....	19
II.4.1. Modèle utilisé par O. A. Bukin et al.....	19
II.4.2. Modèle utilisé par H. W Darwin et F. Emard.....	20
II.4.3. Modèle utilisé par M. Cvejić et al.....	20
II.4.4. Modèle de G. Bekefi et al.....	21
II.5. Calcul des profils spectraux.....	22
II.5.1 Programmation en langage fortran.....	22
II.5.2. Utilisation du code P.P.P.....	25
II.5.2.1. Description du Code de calcul (PPP).....	25
II.5.2.2 Calcul du profil de raies spectrales.....	25
II.5.2.3 Les fichiers relatifs aux calculs par le code PPP.....	25

II.6. Structures électroniques des atomes et des ions de magnésium.....	26
II.6.1 Transitions électroniques d'atome de magnésium (Mg I).....	26
II.6.2 Transitions électroniques d'ion de magnésium (Mg II).....	27
<b><u>CHAPITRE III :RESULTATS ET DISCUSSION</u></b>	
III.1. Introduction .....	28
III.2. Etude comparative entre les calculs d'élargissement électronique.....	28
III.3. Elargissement naturel et élargissement Doppler.....	30
III.4. Profils spectraux des raies de Mg I.....	30
III.4.1. Profils spectraux des deux raies 5167.3213 Å et 2852.1261 Å.....	30
III.4.2. Elargissements électronique de la raie $\lambda=5172,68 \text{ \AA}$ de Mg I .....	32
III.4.3. Calcul des rapports d'intensités pour les raies de Mg I.....	35
III.5. Profils spectraux des raies de Mg II .....	39
III.6. Profil de raie du magnésium dans les conditions de la soudure .....	45
III.6.1. Variation des températures et des densités électroniques dans les conditions de la soudure.....	45
III.6.2. Calcul de profils de raies intégré dans les conditions de la soudure.....	47
III.6.3. Spectre expérimental de Mg I lors de la soudure à l'arc.....	50
<b><u>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</u></b> .....	
<b><u>RÉFÉRENCES</u></b> .....	
<b><u>ANNEXES</u></b>	
1. Base de données atomiques du magnésium neutre (Mg I).....	57
2. Base de données atomiques du magnésium neutre (Mg II).....	58
3. Durées de vie des niveaux de Mg II.....	62
<b>Résumé</b>	

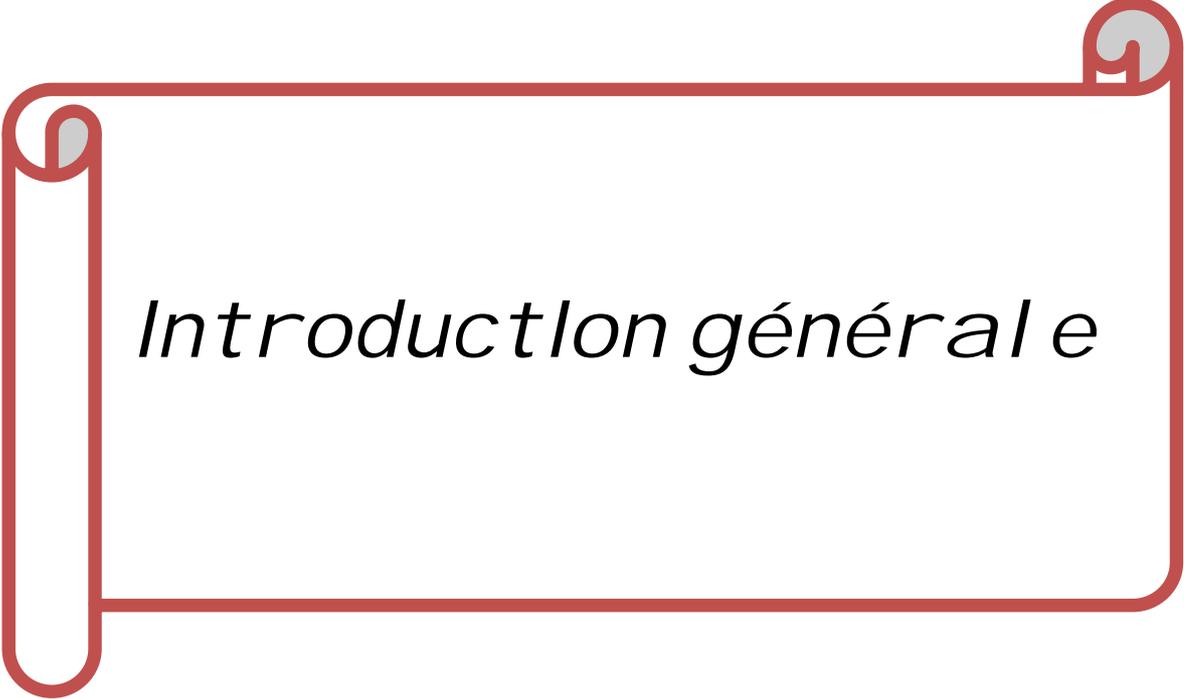
## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : le soudage.....	03
<b>Figure I.2</b> : procédés de soudage.....	04
<b>Figure I.3</b> : Schéma de principe de fonctionnement d'un laser.....	05
<b>Figure I.4</b> : type de procédé de soudage Laser CO <sub>2</sub> .....	06
<b>Figure I.5</b> : type de procédé de soudage (Laser Nd-YAG).....	07
<b>Figure I.6</b> : Principe du soudage par faisceau laser.....	08
<b>Figure I.7</b> : Paramètres du soudage par faisceau laser.....	09
<b>Figure II.1</b> : Plan du calcul numérique.....	24
<b>Figure III.1</b> : Profil de raie de Mg I ( $\lambda=5167,3213 \text{ \AA}$ ) pour T=1525 K et Ne = $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .....	31
<b>Figure III.2</b> : Profil de raie de Mg I ( $\lambda=5167,3213 \text{ \AA}$ ) pour T=900 K et Ne = $5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ....	31
<b>Figure III.3</b> : Profil de raie de Mg I à T=1550 K et Ne = $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .....	32
<b>Figure III.4</b> : Variation de l'élargissement électronique en fonction de la densité électronique de raie 5172.68 Å .....	33
<b>Figure III.5</b> : Variation de l'élargissement électronique de raie 5172.68 Å en fonction de la densité électronique pour différents valeurs de température.....	34
<b>Figure III.6</b> : Variation de l'élargissement électronique en fonction de $\frac{1}{\sqrt{T}}$ pour différent valeurs de densité électronique.....	35
<b>Figure III.7</b> : Profil des raies 3 et 4 de Mg I pour une température T=1520 K et une densité électronique Ne = $5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .....	36
<b>Figure III.8</b> : Profil des raies 3 et 4 de Mg I pour une température T=1520 K et une densité électronique Ne = $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .....	36
<b>Figure III.9</b> : Profil des raies 3 et 4 de Mg I pour une température T=900 K et une densité électronique Ne = $5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .....	37
<b>Figure III.10</b> : Variation du rapport d'intensité entre les raies 3 et 4 de Mg I en fonction de la densité électronique pour une température T=1520 K.....	38
<b>Figure III.11</b> : Variation du rapport d'intensité entre les raies 3 et 4 de Mg I en fonction de la température pour une densité électronique Ne = $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .....	39
<b>Figure III.12</b> : Le profil de raie 2795.528 Å de Mg II à T=1550 K et Ne= $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .....	40
<b>Figure III.13</b> : Profil de raie 2795.528 Å de Mg II à T=1300 K et Ne= $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .....	40

<b>Figure III.14</b> : Le profil de raie 2802.705 Å de Mg II à T=900 K et Ne=5.10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup> .....	41
<b>Figure III.15</b> : Le profil de raie 4481.126 Å de Mg II à T=1525 K et Ne=5.10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup> .....	42
<b>Figure III.16</b> : Le profil de 3 raies de Mg II à T=1525 K et Ne=5.10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup> .....	43
<b>Figure III.17</b> : Variation de l'élargissement électronique en fonction de la densité électronique des raies 2795.528 Å de Mg II pour T=900K.....	44
<b>Figure III.18</b> : Variation de l'élargissement électronique en fonction de l'inverse de la température pour différents densité électronique.....	45
<b>Figure III.19</b> : Variation de la température en fonction du temps [34].....	46
<b>Figure III.20</b> : Profil de la raie intégrée sur le temps de Mg I sur l'intervalle de 10 s.....	48
<b>Figure III.21</b> : Profil de la raie intégrée sur le temps de Mg I sur l'intervalle de 5 s.....	49
<b>Figure III.22</b> : Profil de raie de Mg I pour T=924 K, Ne=10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> .....	50
<b>Figure III.22</b> : Spectre expérimental de Mg I lors de soudure à l'arc [14].....	51

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Comparaison de la densité et de la conductivité thermique des alliages de magnésium par rapport à d'autres types d'alliages.....	10
<b>Tableau II.1</b> : Transitions radiatives du magnésium neutre retenues pour le calcul.....	26
<b>Tableau II.2</b> : Transitions radiatives du magnésium ionisé Mg II retenues pour le calcul.....	27
<b>Tableau III.1</b> : Mesure expérimental d'élargissement électronique ( $w_{exp}$ ), et calculs théoriques de Griem (G) et de (DSB), et notre calcul, pour différentes transitions de Mg I et Mg II et pour différentes valeurs de températures et de densités électroniques.....	29
<b>Tableau III.2</b> : l'élargissement naturel et Doppler des raies de Mg I.....	30
<b>Tableau III.3</b> : l'élargissement électronique du raie de magnésium neutre $\lambda=5172.68 \text{ \AA}$ pour $T=1525 \text{ K}$ .....	32
<b>Tableau III.4</b> : L'élargissement électronique de la raie $\lambda=5172.68 \text{ \AA}$ pour différentes valeurs de densités électroniques $N_e$ et de températures $T$ .....	33
<b>Tableau III.5</b> : Rapport d'intensité entre deux raies 3 et 4 de Mg I à 1520 K et pour différents valeurs de densités électroniques.....	37
<b>Tableau III.6</b> : le rapport d'intensité $I_4/I_3$ de Mg I pour $N_e=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et différentes valeurs de températures.....	38
<b>Tableau III.7</b> : Largeur électronique à mi-hauteur de raie $\lambda=2795.528 \text{ \AA}$ de Mg II à $T=900 \text{ K}$ , et différentes valeurs de densité électronique.....	43
<b>Tableau III.8</b> : Les durées et les températures et les densités électronique de soudage pour 10s.....	47



*Introduction générale*

## Introduction générale

Le laser est une source de lumière amplifiée qui fait appel au principe de l'émission stimulée. Il est très utilisé dans le domaine de l'industrie en particulier dans le soudage. C'est en 1984 que la technologie laser a été développée pour le soudage des métaux dans les industries de production en série. L'assemblage entre deux pièces de métal identiques ou différentes peut être fait par une énergie très haute estimée à ( $10^{10}$  W/m<sup>2</sup> à  $10^{13}$  W/m<sup>2</sup>) [1]. Cette opération se passe manuellement ou automatiquement par un robot et elle est caractérisée par son exactitude et sa grande vitesse.

On appelle soudage l'opération qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. On peut distinguer les types de lasers industriels pour le soudage des métaux : le soudage des métaux par les lasers CO<sub>2</sub> et par les lasers YAG.

Plusieurs études expérimentales ont étudié le soudage des alliages de magnésium par le laser Nd-YAG et par le laser CO<sub>2</sub> [2].

Le but de notre travail est l'étude des 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. En effet les largeurs de raies peuvent être un moyen de diagnostic des densités électroniques et des températures dans ces milieux.

Le premier chapitre de ce mémoire est une présentation des notions de base nécessaires sur les procédés de soudage par laser (procédés de soudage et leur classification, paramètres du soudage laser, le soudage laser des alliages de magnésium, les différents types des lasers industriels). Ensuite nous présentons les notions de l'étude spectroscopique et les élargissements des raies spectrales dans les plasmas et les différents modèles d'équilibre thermodynamique.

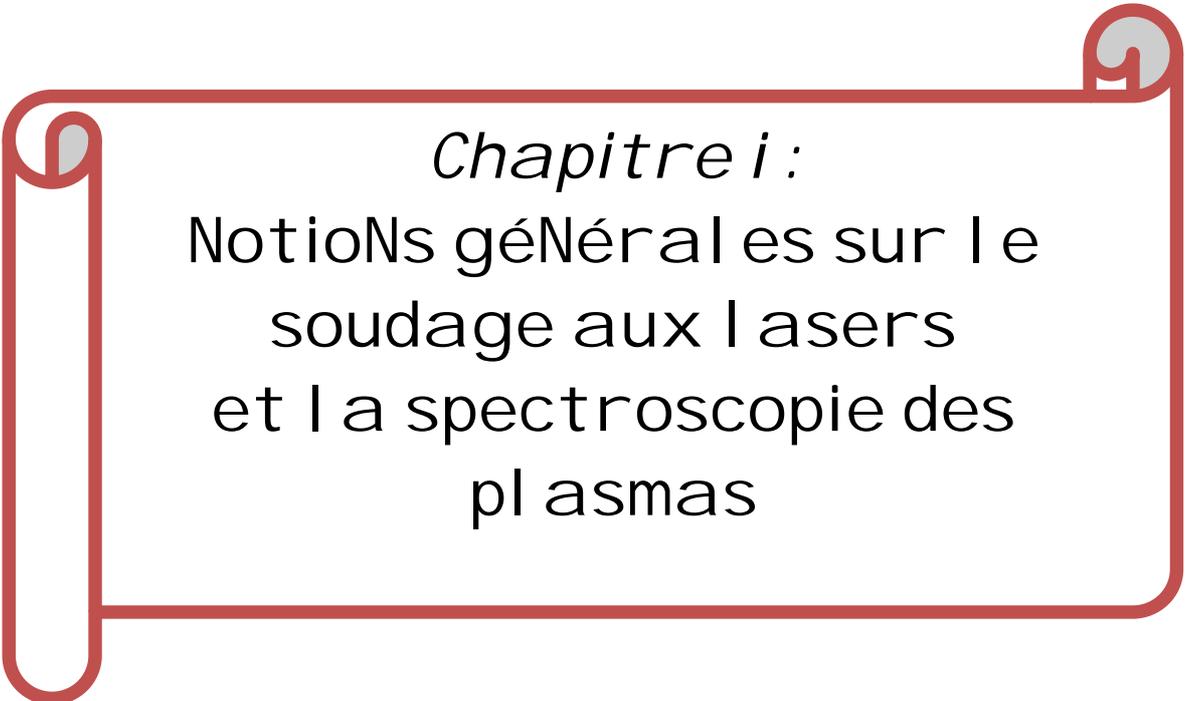
Le deuxième chapitre est une présentation des différents modèles utilisés par les chercheurs pour calculer l'élargissement Stark électronique et pour le diagnostic des plasmas. Nous présentons notre modification à la formule analytique utilisée par H. W Darwin et F. Emard [3] pour l'élargissement électronique. Nous présentons aussi les transitions électroniques de l'atome et de l'ion de magnésium ; ainsi que le plan utilisé pour les calculs des élargissements et des profils de raies.

Le troisième chapitre est destiné aux calculs de profil de raies spectrales de Mg I et Mg II pour les différentes températures et densités électroniques et la comparaison de nos résultats avec les résultats expérimentales de **M. Cvejić et al.** [4]. et lors de la soudure et à

l'analyse des résultats des calculs relatifs aux contributions des élargissements électroniques. Les calculs sont pour des profils instantanés et des profils intégrés sur le temps. Les raies sont celles du magnésium neutre et du magnésium ionisé.

La conclusion générale du mémoire expose les principaux résultats obtenus et mentionne quelques perspectives futures.

Des annexes présentant les données atomiques de Mg I et Mg II sont données à la fin du mémoire.



*Chapitre i :*  
Notions générales sur le  
soudage aux lasers  
et la spectroscopie des  
plasmas

**Chapitre I :**  
**Notions générales sur le soudage aux lasers**  
**et la spectroscopie des plasmas**

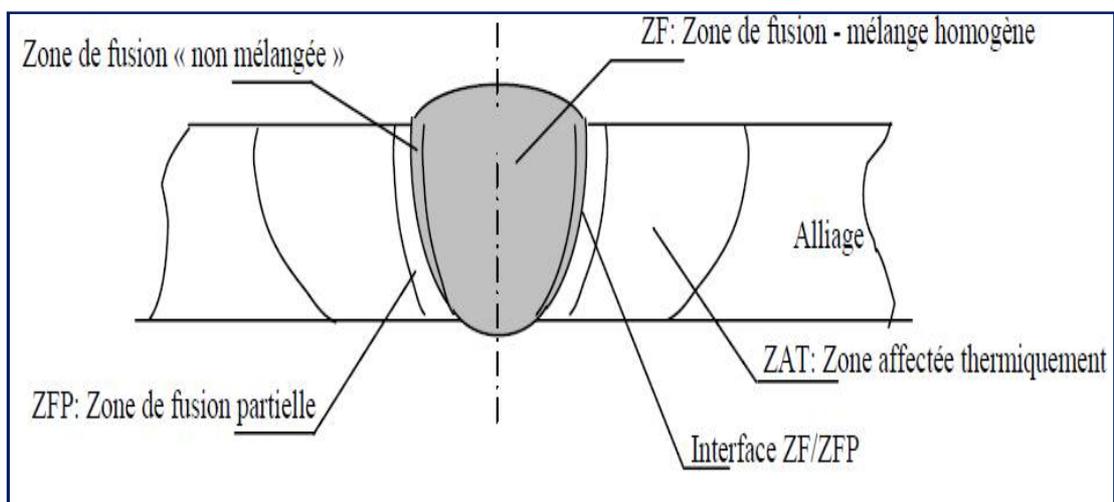
**I.1. Introduction**

L'assemblage par soudage est la technique utilisée dans les domaines de la fabrication de produits en métal et de produits électriques et des assemblages métalliques. Le soudage va de la micro électronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydrauliques. On peut souder aujourd'hui des éléments d'épaisseur de (0,01-100 mm) et plus.

**I.2. Procédés de soudage aux lasers**

**I.2.1. Définition de soudage**

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents [5]. Dans l'opération de soudage, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée l'élévation de la température dans les pièces soudées.



**Figure I.1 :** le soudage [5].

## I.2.2. Classification des 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 [6]. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme le présente la figure I.2.

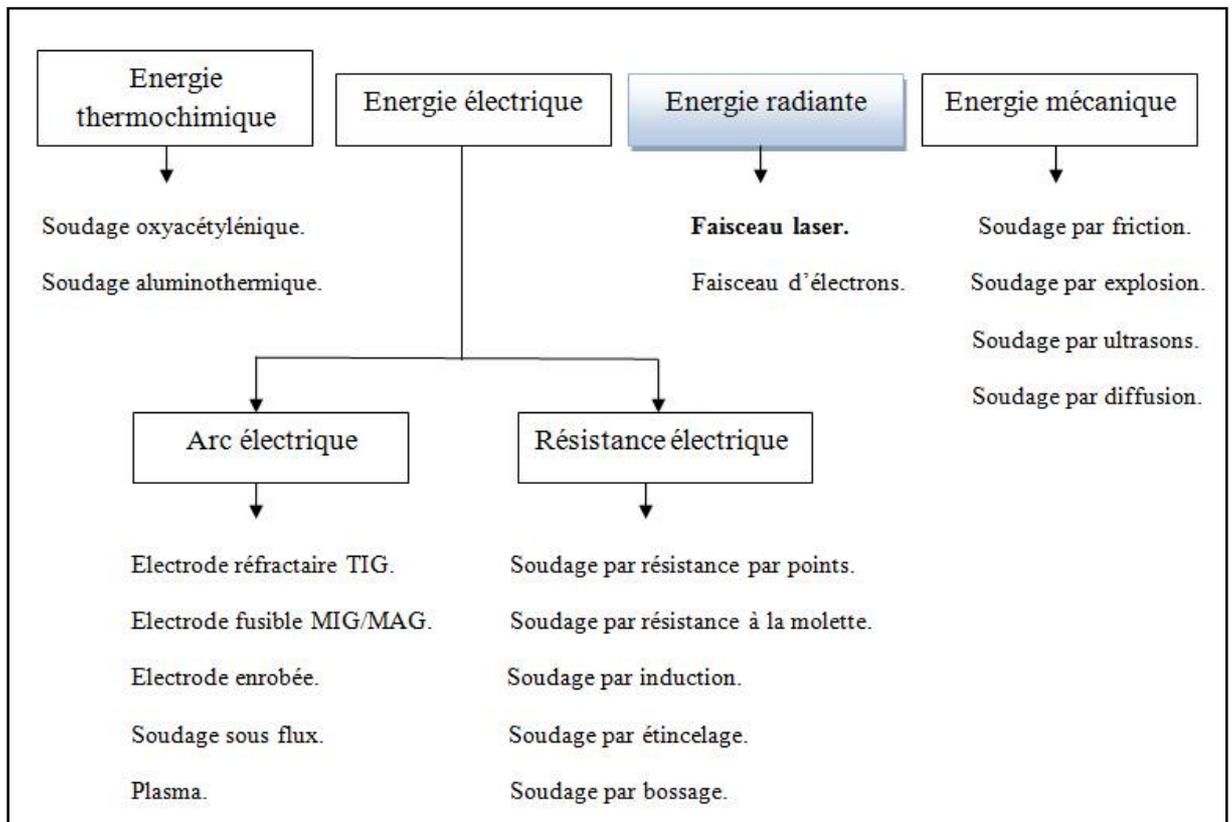


Figure 1.2 : Procédés de soudage.

## I.2.3. Le soudage par faisceau laser

### I.2.3.1. Le rayonnement laser

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. Il est généré dans un résonateur constitué de deux miroirs dont l'un est partiellement

transparent et contenant un milieu actif généralement solide ou gazeux. Le milieu actif est excité par une source d'énergie qui induit dans la cavité une émission stimulée.

Les lois de l'émission stimulée font que les photons réémis ont tous la même fréquence et la même phase. À partir d'un certain seuil, il y a amplification et émission d'un très grand nombre de photons qui constituent une 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.

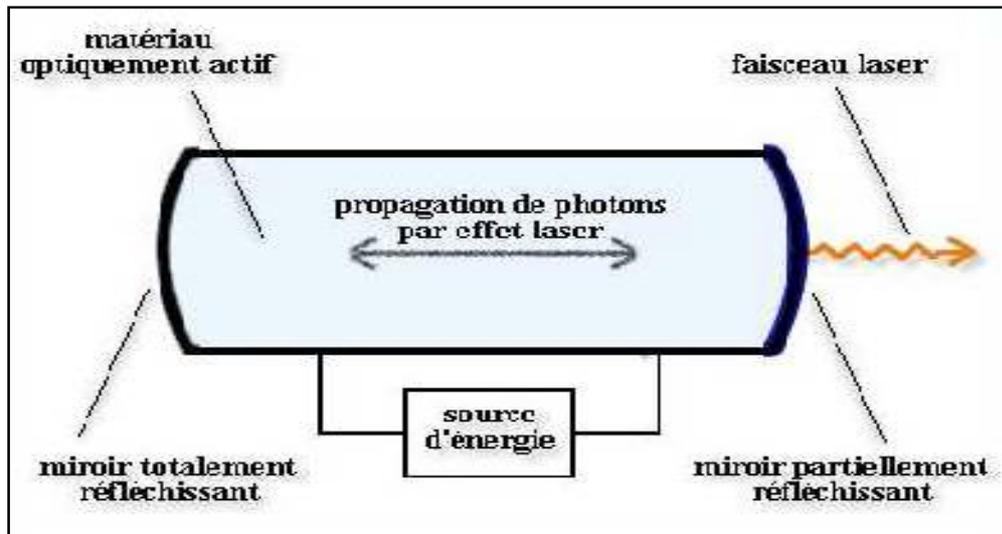


Figure I.3 : Schéma de principe de fonctionnement d'un laser [7].

### I.2.3.2. 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 [8]. 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.2.3.3. 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

ou des lentilles de focalisation (Voir figure (I.4)). Pour des densités d'énergie faibles ( $30 \text{ J/mm}^2$ ), ces lasers sont utilisés pour des soudures profondes.

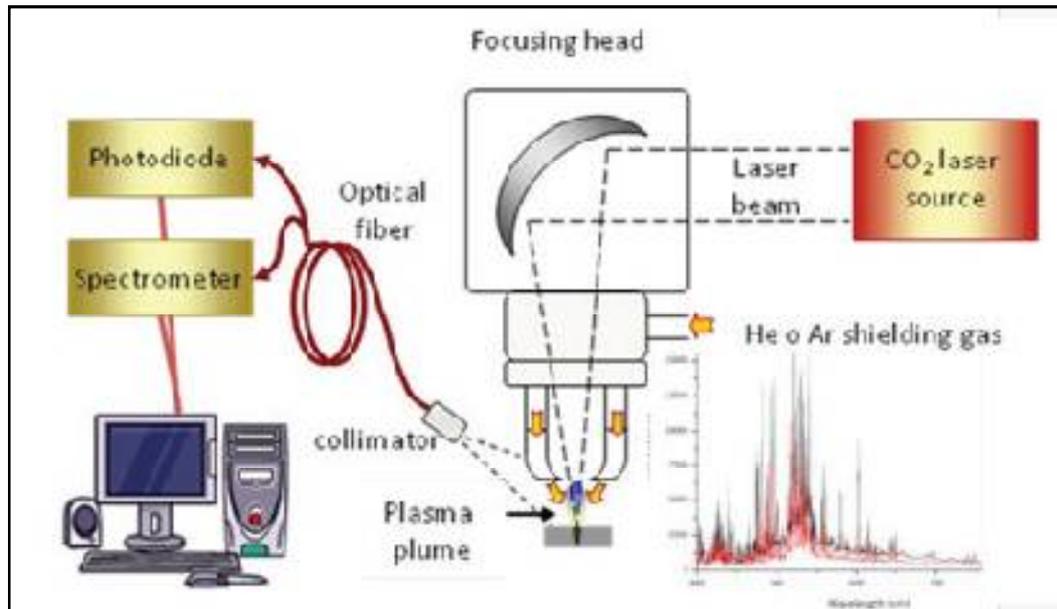


Figure I.4 : Type de procédé de soudage Laser CO<sub>2</sub> [9].

#### I.2.3.4. 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  $1,06 \mu\text{m}$  [10]. Les puissances maximales disponibles sont de 3 à 4 kW. Malgré leur faible puissance, ils sont par excellence l'outil de microsoudure de précision [11]. 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. La figure I.5 montre un type de procédé de soudage au laser Nd-YAG.

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 CO<sub>2</sub> [2].

La maîtrise de ces procédés de soudage demande une maîtrise des conditions de travail et une bonne interprétation des phénomènes physique. Le diagnostic du milieu plasma environnant le bain de fusion par spectroscopie des raies d'émission serait un bon outil.

En 2010, T. Sibillan et al.[12] ont étudié la corrélation entre la température électronique du plasma et la profondeur de pénétration dans les procédés de soudage laser (CO<sub>2</sub> et Nd : YAG) de Fe (I). Le matériau de soudure était l'alliage d'acier inoxydable.

Pour déterminer les températures dans les torches à plasmas et dans les arcs électriques, M. Sassi et al. [13] ont utilisé les spectres d'émission des transitions de cuivre pour déterminer les températures du milieu plasmas. La technique utilisée est le diagramme de Boltzmann.

Les travaux de Zhaodong Zhang et Fan Zhang [14] montrent que les raies d'émission du magnésium neutre Mg I et du magnésium ionisé Mg II sont de bonnes éléments pour la détermination des températures et des densités électroniques lors de soudure à l'arc. Les méthodes utilisées sont les largeurs de raies et le diagramme de Boltzmann entre transitions radiatives.

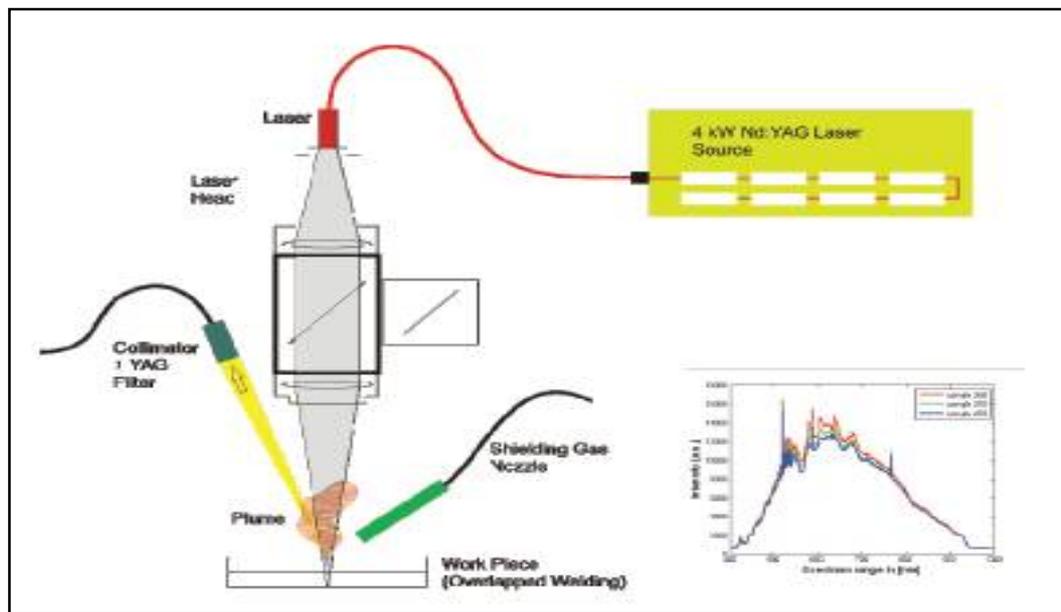


Figure I.5 : Type de procédé de soudage (Laser Nd-YAG) [9].

#### I.2.4. 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  $10^{13}$  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). La source de chaleur est une énergie électromagnétique sous la forme de photons qui forment un faisceau de très haute intensité. Lorsque les photons entrent en collision avec la pièce à souder, leurs énergies cinétiques se transforment en chaleur, ce qui engendre les phénomènes de fusion et de vaporisation (effet Keyhole) [5].

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. Le métal se solidifie après passage du faisceau, assurant l'assemblage des pièces suivant le schéma de principe décrit sur la figure I.6.

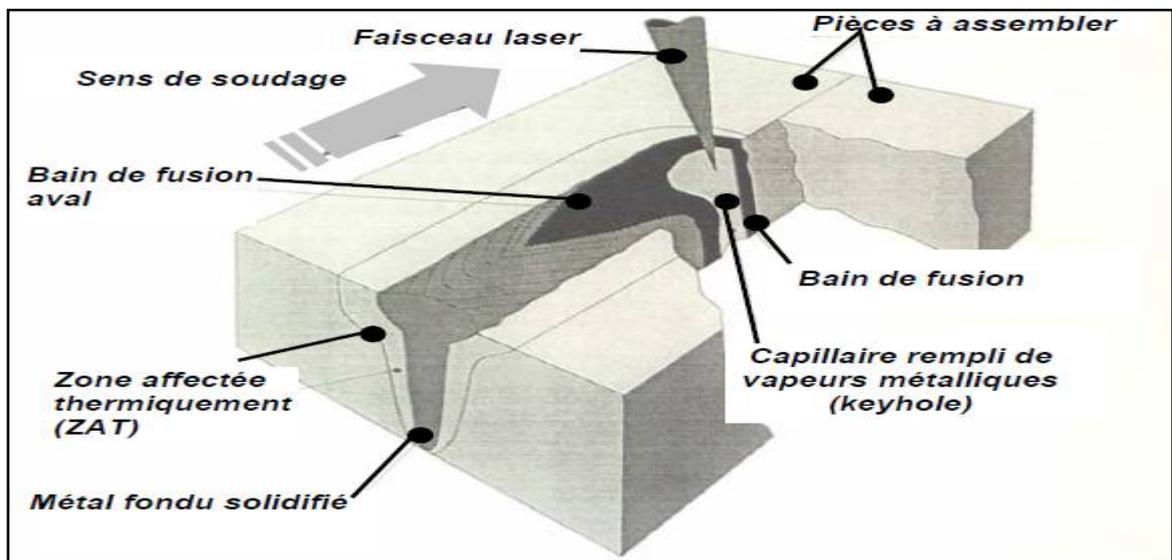


Figure I.6 : Principe du soudage par faisceau laser [5].

### I.2.5. 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 [5].
- Vitesse de soudage élevée ; 1,3m/min contre environ 25 cm/min pour les procédés de soudage à l'arc [11].
- Soudures étroites.
- Faible déformation des pièces après soudage.
- Zone affectée thermiquement faible.
- Assemblage possible sans métal d'apport.

### I.2.6. Soudage laser dans l'industrie

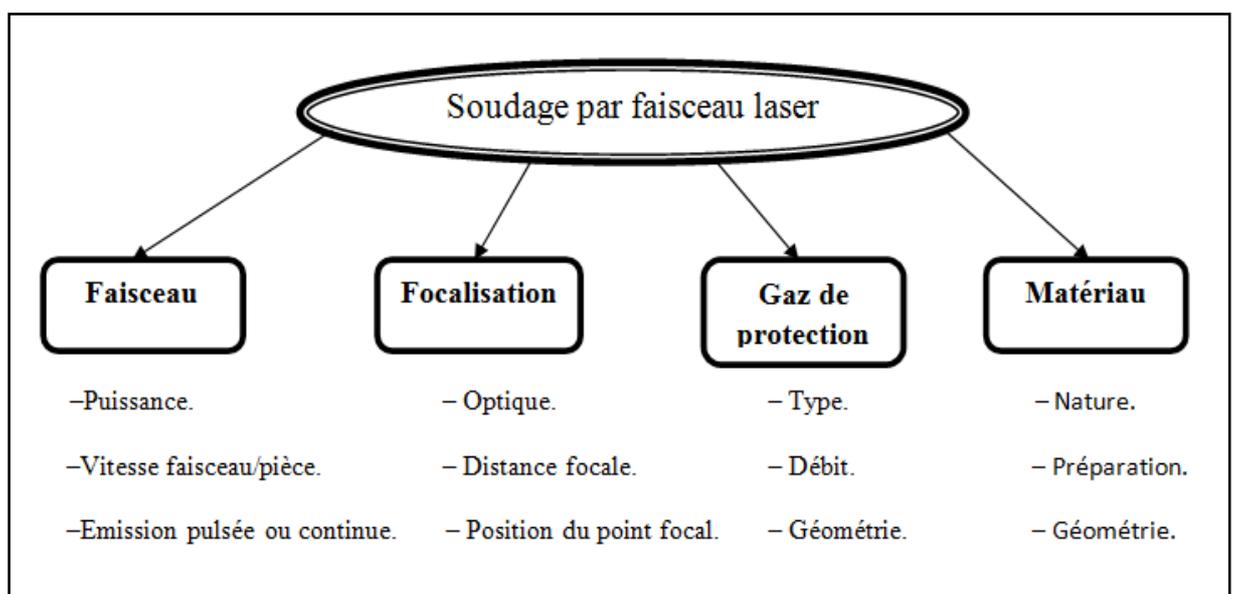
Le soudage laser permet la réparation ou le rechargement des pièces usées, cassées ou erronées de toutes sortes de pièces mécaniques (Acier, Aluminium et fonte d'aluminium, Fonte, Inox, Titane, Nickel, Bronze). La finesse de la soudure laser permet de réaliser des apports de métal dans les endroits les 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 [15].

### I.2.7. 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...) [5]. La figure I.7 montre les paramètres du soudage aux lasers.



**Figure I.7 :** Paramètres du soudage par faisceau laser

### I.3. Présentation des alliages du magnésium

#### I.3.1. Propriétés du magnésium pur

Le magnésium est un métal blanc argent, léger et malléable ; il a été découvert par Humphry Davy (Angleterre) en 1808. Assez abondant dans la croûte terrestre (2,5 %), le magnésium se trouve aussi bien dans l'eau de mer que dans l'eau douce. La masse volumique du magnésium est très faible et égale à  $1,74 \text{ kg/dm}^3$  à  $20^\circ\text{C}$  [16]. Le magnésium possède une structure cristalline hexagonale compacte de paramètres de maille :  $a = 0,3202 \text{ nm}$ ,  $c = 0,5199 \text{ nm}$  et de rapport  $c/a=1,62$ , de numéro atomique  $Z = 12$  et de masse molaire  $M= 24,32 \text{ g/mole}$  [16] [7]. C'est le moins dense de tous les métaux industriels [16].

#### I.3.2. Avantages et inconvénients des alliages de magnésium

Les alliages de magnésium présentent plusieurs avantages mais aussi quelques inconvénients. Les caractéristiques spécifiques intéressantes de ces alliages sont les suivantes:

- Faible masse volumique comparée à celles des aciers et aux alliages d'aluminium (tableau (I.1)). Leur utilisation permet la réduction du poids des pièces mécaniques.
- Conductivité thermique élevée par unité de volume qui permet des échanges thermiques faciles d'où leur utilisation pour la fabrication des carters de moteurs thermiques et des moules d'injection de matières plastiques [7] [17].
- Bonne soudabilité pour la plupart des alliages [18].
- Capacité d'amortissement des vibrations élevées pour la plupart des alliages, ce qui leur confère une bonne résistance aux chocs.
- Matériaux recyclables [17].
- Absence de corrosion [17].

**Tableau I.1** : Comparaison de la densité et de la conductivité thermique des alliages de magnésium par rapport à d'autres types d'alliages [7].

Matériaux	Masse volumique (g/cm)	Conductivité thermique à $20^\circ\text{C}$ (W/m K)
Acier allié (45 Ni Cr Mo 16)	7.81	33
Alliage d'aluminium (5085)	2.66	126
Alliage de magnésium (AZ91)	1.74	75

Par contre les alliages de magnésium présentent quelques inconvénients qui limitent leurs utilisations et qui consistent en :

- leur faible module d'élasticité [17].
- leurs résistances au fluage et à la fatigue limitées à haute température [7].
- leurs faibles propriétés en surface (faible dureté) d'où la nécessité d'un traitement de surface [7].
- sa difficulté de mise en œuvre par déformation à froid [16].
- haute réactivité chimique [17].

Face à ces quelques inconvénients, de nombreuses recherches ont été poursuivies dans le but d'améliorer les caractéristiques des alliages de magnésium, notamment leur résistance mécanique et leur résistance à la corrosion et de favoriser leur utilisation dans plusieurs secteurs industriels.

### **I.3.3. Soudage laser des alliages de magnésium**

Les procédés de soudage pour l'assemblage de pièces en alliages de magnésium a une relation avec les propriétés physiques et chimiques de ces derniers. La conductivité thermique élevée de ces alliages impose l'utilisation de sources de chaleur à grande densité d'énergie afin de réduire la durée des cycles thermiques de soudage. Mais par contre, elle favorise une diminution des gradients thermiques et conduit à des déformations moins localisées.

## **I.4. Spectroscopie des plasmas : cadre théorique**

Le terme de plasma désigne le quatrième état de la matière, ou le milieu est partiellement ou totalement ionisé. Il est constitué de molécules, d'atomes, d'ions (le plus souvent dans des états excités) et d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre [19] [20].

### **I.4.1. Lois de l'équilibre thermodynamique**

Ces lois permettent de donner tout le détail sur les populations et les énergies internes. Elles dépendent de l'énergie de chaque élément considéré et l'interaction avec les éléments environnants.

### I.4.1.1. Loi de Planck (corps noir)

A l'équilibre thermodynamique, la loi de Planck caractérise la distribution de la lumière spectrale dans le milieu en fonction de la longueur d'onde (ou fréquence).

La loi de Planck exprime la quantité d'énergie rayonnée par unité de temps et par unité de surface d'un corps noir à la température T dans une direction donnée, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde au voisinage d'une longueur d'onde. Cette grandeur correspond à la luminance spectrale et elle ne dépend que de la température T et de la longueur d'onde  $\lambda$  (ou fréquence). La loi décrivant la luminance spectrale d'un corps noir à la température T est donnée par la loi de Planck (sert à identifier la grandeur relative au corps noir).

$$I_v = \frac{2hv^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{hv}{K_B T} - 1\right)} \quad (1.1)$$

### I.4.1.2. Loi de distribution des vitesses de Maxwell-Boltzmann

La loi de Maxwell décrit la distribution en énergie cinétique des particules en collisions élastiques, dans un milieu homogène et régime stationnaire. Cette loi présente la distribution en vitesse  $f(v)$  des particules dans un milieu plasma.

$$f(V)dV = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi K_B T}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{-mV^2}{2K_B T}\right) V^2 dV \quad (1.2)$$

Où  $K_B$  est la constante de Boltzmann,  $m$  la masse et  $v$  la vitesse des particules. Elle décrit la probabilité de trouver une particule dans l'intervalle de vitesse  $V+dV$ . La Température T qui caractérise cette distribution est appelée la température cinétique  $T_{ciné}$ . elle représente la vitesse la plus probable des particules [21].

### I.4.1.3. Loi de distribution de Boltzmann

La distribution de Boltzmann donne les rapports des populations entre les différents niveaux d'énergie  $i$  et  $j$  d'une même espèce :

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} \exp\left(\frac{-\Delta E_{ij}}{K_B T}\right) \quad (1.3)$$

Où  $\Delta E_{ij}$  est la différence d'énergie entre les deux niveaux  $i$  et  $j$  ;  $g_i$  et  $g_j$  sont leurs poids statistiques respectivement.

#### **I.4.1.4. Loi de Saha**

La loi de Saha donne le rapport des populations entre des états fondamentales entre deux degrés d'ionisation successives d'une même espèce atomique dans un milieu en équilibre thermodynamique. La formule suivante donne une expression approximative de cette loi [25]

$$\frac{N_1}{N_0} n_e = \frac{g_1}{g_0} g_e \frac{(2\pi K_B T)^{3/2}}{h^3} \exp\left(\frac{-\chi_i}{K_B T}\right) \quad (1.4)$$

Où  $N_0$  et  $N_1$  les populations des niveaux fondamentaux de l'atome et son ion lorsqu'il perd un électron,  $n_e$  représente la densité électronique,  $g_1$ ,  $g_e$ ,  $g_0$  sont respectivement les poids statistiques et  $\chi_i$  est le potentiel d'ionisation.

### **I.4.2. Modèles d'équilibre thermodynamiques**

#### **I.4.2.1. Equilibre thermodynamique total**

Dans un plasma, à la température  $T$ , il existe différents mécanismes collisionnels et radiatifs entre les particules. A chaque instant, ces éléments : atomes, électrons et ions sont excités et désexcités. Il existe un état d'équilibre où chaque processus mettant en jeu des particules est compensé par son inverse. Cet équilibre est appelé 'l'équilibre thermodynamique total' (les quatre lois sont vérifiées).

#### **I.4.2.2. Equilibre thermodynamique local**

Dans tout le plasma, on peut dans certaines conditions définir un état d'Equilibre Thermodynamique Local. La température locale d'équilibre  $T$  est supposée connue en ce point du plasma. Tout les lois, à l'exception de celle de Planck, sont valables localement.

#### **I.4.2.3. Equilibre Thermodynamique local Partiel**

Lorsque la densité est trop faible (en particulier la densité électronique), les nombres de collisions par unité de temps n'est plus suffisant pour assurer la micro réversibilité de ces niveaux, donc seule une partie des niveaux excités sont soumis à l'ETL [22].

#### I.4.2.4. Hors Equilibre

Souvent, l'ionisation est due à un champ électrique extérieur. Le gaz n'est pas en équilibre thermodynamique. Il atteindra un état stationnaire qu'on pourra caractériser par les paramètres  $\alpha$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ ,  $T_0$ . Le degré d'ionisation est décrit par la variable  $\alpha$ . Les trois températures (des électrons  $T_e$ , des ions  $T_i$  et des neutres  $T_0$ ) sont définies par la condition que  $(\frac{3}{2} K_B T)$  qui représente l'énergie cinétique moyenne des particules d'espèce "a", dans un repère où elles ont une vitesse moyenne nulle. L'écart entre  $T_e$ ,  $T_i$ ,  $T_0$  peut être important. Dans un tube à décharge typique. On peut avoir  $T_i \approx 300$  K et  $T_e \approx 3 \cdot 10^4$  K. La valeur de  $T_e$  est due à l'action de champ électrique sur l'électron chauds [23].

### I.5. Élargissement et profil des raies d'émission d'un plasma

#### I.5.1. L'intensité d'une raie spectrale atomique

Les raies spectrales sont caractérisées non seulement par les fréquences émises mais aussi par leurs intensités. L'intensité d'une raie spectrale correspondant à une transition depuis un niveau initial  $i$  jusqu'à un niveau final  $f$ , est donnée par la loi classique :

$$I_{if} = N_i A_{if} h \nu_{if}$$

Avec  $A_{if}$ : probabilité de la transition (coefficient d'Einstein d'émission spontanée).  
 $\nu_{if}$ : Pulsation correspondant à cette transition.  
 $N_i$ : Nombre d'atomes dans le niveau initial  $i$  dans une unité de volume.  
 $h$ : Constante de Planck.

On exprime  $I_{if}$  en  $W/m^3$ .

#### I.5.2. Phénomènes d'élargissement

Le profil d'une raie est le résultat de la superposition de plusieurs phénomènes d'élargissement. Nous citons les élargissements suivants :

##### I.5.2.1. Elargissement Doppler (profil gaussien)

La fréquence du rayonnement émis, reçue par un récepteur, est différente de la fréquence émise par la particule au repos ; cette différence cause un élargissement appelé l'élargissement Doppler. L'élargissement dû à l'effet Doppler statistique est lié à la distribution des vitesses de l'émetteur ; il est lié à la température  $T$  du milieu et à la masse  $m$  de l'émetteur.

$$\Delta\omega = 7.16 \cdot 10^{-7} \omega_0 \sqrt{T/m} \quad (I.5)$$

$\Delta\omega$  et  $\omega_0$  sont en eV, T en Kelvin et m en u.m.a.

La forme du profil dans ce cas est une forme Gaussienne :

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi B_2}} \exp(-x^2/B_2^2) \quad (1.6)$$

Où :  $B_2 = \Delta\omega_\Delta$  et  $x = \omega - \omega_0$

### I.5.2.2. Elargissement naturel (profil Lorentzien)

Pour un atome excité la largeur naturelle est liée au principe d'incertitude d'Heisenberg. Les niveaux d'énergie d'un système quantique présentent une certaine incertitude naturelle ; elle peut s'écrire :

$$\Delta E \cdot \tau \geq \frac{h}{2\pi} \quad (1.7)$$

- $\tau = \frac{1}{A_{21}}$  est la "durée de vie" de l'atome à l'état excité.
- $A_{21}$  le coefficient d'Einstein d'émission spontanée entre deux niveaux 2 à 1.
- $\Delta E$  est la "largeur" ou l'incertitude liée à l'énergie de l'état excité.
- $h$  est la constante universelle de Planck,  $h=6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s.

La forme de la raie due à l'élargissement naturel est une Lorentzienne.

### I.5.2.3. Elargissement collisionnel par les particules neutres

Les collisions avec les particules neutres causent aussi un élargissement des raies spectrales. Soit  $\tau_{col}$  une durée de vie moyenne entre deux collisions successives. On suppose que chaque collision interrompt complètement l'émission du rayonnement.

$$\Delta\omega_{col} \approx 1/\tau_{col}$$

Pour les applications numériques, on propose pour un milieu de pression P en atm et une température T en Kelvin est pour des émetteurs de masse A en u.m.a.

$$\Delta\omega_{col}(s^{-1}) = 1/\tau_{col} = 2 \times 10^9 \left( \frac{p}{1 \text{ atm}} \right) \sqrt{\frac{273}{A \cdot T}} \quad (1.8)$$

Le profil de la raie pour les élargissements collisionnels par les particules neutres est un profil de Lorentz.

L'élargissement par les neutres est négligeable dans les plasmas [25].

#### **I.5.2.4. Élargissement instrumental**

Les appareils de mesure et de spectroscopie causent un élargissement supplémentaire aux raies spectrales observées. Cet élargissement est dû entre autres, aux phénomènes de diffraction des raies de la lumière et aux dimensions finies des appareils. Les constructeurs donnent les élargissements et les profils correspondants. Le profil peut être :

-Un profil de Lorentz.

-Un profil de Gauss.

-Un profil de Voigt.

#### **I.5.2.5. Élargissement par effet Stark**

Les collisions avec les particules chargées (électrons et ions) conduisent à un élargissement et déplacement des raies spectrales. Cet élargissement est appelé élargissement Stark.

Les collisions électroniques représentent une manière de raccourcir la durée de vie des niveaux d'énergie. Ces collisions sont traitées dans le cadre d'approximation d'impact.

Les ions, à cause de leurs masses, sont souvent traités dans le cadre de l'approximation quasi-statique [24]. Dans ce dernier cas la durée de collision est très courte par rapport à la durée de l'oscillation, alors les ions qui sont considérés comme immobiles, créent un champ qui cause une décomposition des niveaux. C'est l'effet Stark.

D'un autre côté les électrons très rapides font élargir chacun de ces composantes. Dans le chapitre II, nous présenterons avec plus de détails l'élargissement causé par les électrons.

### **I.6. Profil composé de phénomènes indépendants [25]**

#### **I.6.1. Profils composé**

Si plusieurs causes agissent simultanément pour élargir une raie, il faut trouver le profil composé. Par exemple, les deux effets Doppler et Lorentz peuvent se combiner pour donner un profil complexe.

Soient  $f(x)$  et  $g(x)$  deux fonctions qui caractérisent la distribution de l'intensité dans le cas de deux effets d'élargissement indépendants, le profil composé  $F(x)$  est un produit de convolution des deux fonctions  $f(x)$  et  $g(x)$  tel que :

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x-y)g(y)dy = \int_{-\infty}^{+\infty} f(y)g(x-y)dy \quad (I.9)$$

- si  $f(x)$  et  $g(x)$  sont deux fonctions Lorentziennes de paramètres  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$ ,  $F(x)$  est aussi une fonction Lorentzienne de paramètre  $\gamma$  tel que :

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$$

- si  $f(x)$  et  $g(x)$  sont deux fonctions Gaussiennes de paramètres  $\beta_1$  et  $\beta_2$ ,  $F(x)$  est aussi une fonction Gaussienne de paramètre  $\beta$  tel que :

$$\beta^2 = \beta_1^2 + \beta_2^2$$

- si  $f(x)$  est Gaussienne et  $g(x)$  est Lorentzienne de paramètres  $\beta$  et  $\gamma$  successivement, le profil final est un profil de Voigt.

### I.6.2. Profil de Voigt

Le profil de Voigt est la combinaison des profils de Lorentz et de Gauss. Ce profil a prépondérance du profil Doppler au centre de la raie, et une prépondérance du profil Lorentz sur les bords. Il peut être exprimé par l'expression suivante :

$$F(\Delta\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\Delta\nu_D\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta\nu - \Delta\nu')^2}{\Delta\nu_D^2}\right] \frac{\delta}{\pi} \frac{1}{\Delta\nu'^2 + \delta^2} d(\Delta\nu') \quad (I.10)$$

Où :

$\Delta\nu =$  (Lié à l'élargissement gaussien).

$\Delta\lambda_D = \beta$  (Lié à l'élargissement Lorentzien).

$\delta = \gamma$  (Lié à l'élargissement Lorentzien).

$\Delta\nu = \nu - \nu_0$

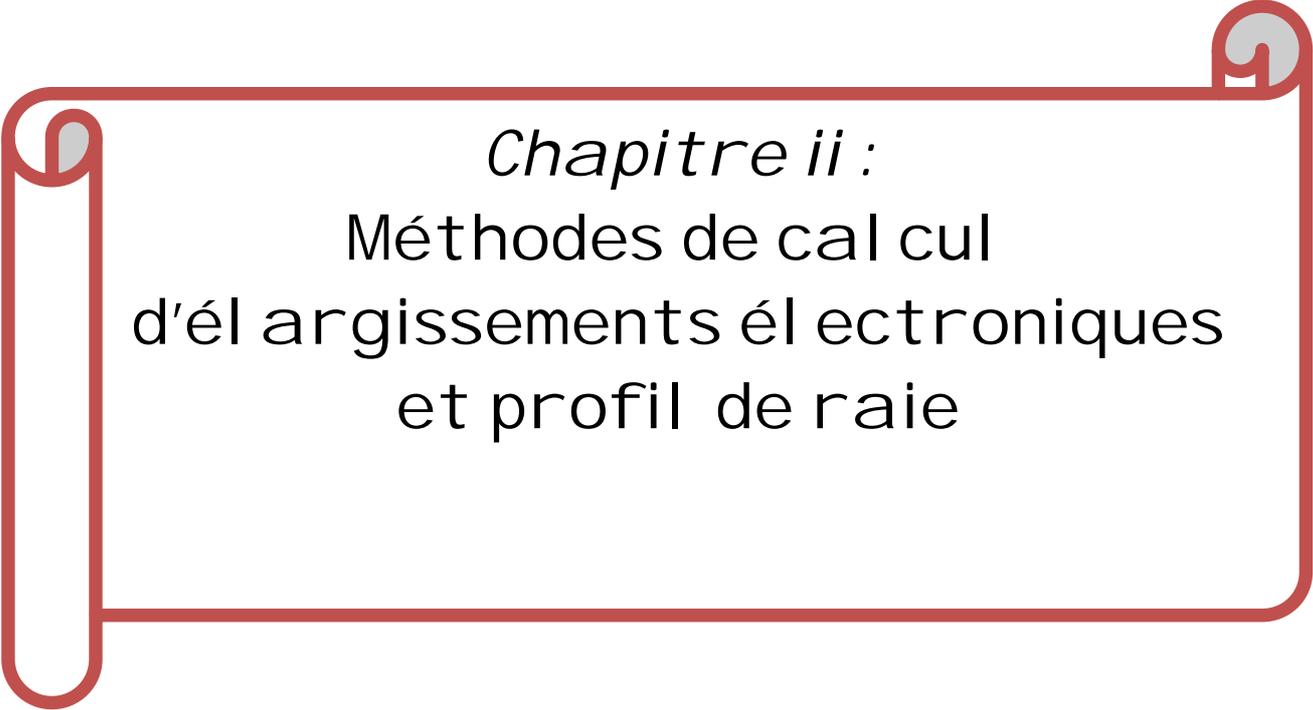
$\Delta\nu' = \nu' - \nu'_0$

La fonction de Voigt est généralement approximée par une fonction plus simple en particulier gaussienne :

$$\varphi(\nu) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\Delta\nu_0} \exp\left\{-\left[\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_0}\right]^2\right\} \quad (I.11)$$

Grâce à une largeur équivalente  $\Delta\nu_0$ :  $\Delta\nu_0^2 = \Delta\nu_L^2 + \Delta\nu_D^2$

$\Delta\nu_L$  : L'élargissement du profil Lorentzien, et  $\Delta\nu_D$  : L'élargissement du profil Gaussien.



*Chapitre ii :*  
Méthodes de calcul  
d'élargissements électroniques  
et profil de raie

**Chapitre II :**  
**Méthodes de calcul d'élargissements électroniques**  
**et profil de raie**

### **II.1. Introduction**

Les raies spectrales lors de l'émission ou de l'absorption du rayonnement ne sont pas infiniment minces, mais elles présentent certaines largeurs et certains profils. Elles présentent des distributions du rayonnement  $I(\omega)$  autour d'une fréquence centrale  $\omega_0$ . Les positions des raies, les élargissements et les profils des raies permettent de définir les différentes espèces et leurs degrés d'ionisation, ainsi que les conditions physiques telles que la température, les densités et les vitesses. La spectroscopie d'émission atomique est une méthode bien adaptée au diagnostic des gaz et des plasmas.

### **II.2. Méthode de diagnostic**

Le diagnostic peut être fait par la spectroscopie d'émission optique (OES) : la lumière émise par le plasma est très riche d'informations. Cette technique permet de déterminer des grandeurs caractéristiques des plasmas comme la nature des espèces qui les composent, leurs densités, leurs températures [26]. Ces méthodes spectroscopiques d'émissions optiques sont basées sur la mesure de l'intensité des raies spectrales du spectre, du continuum, des largeurs à mi-hauteur et des déplacements de raies spectrales.

### **II.3. Détermination de la température électronique**

Plusieurs méthodes permettent de déterminer les températures de plasma. Nous pouvons citer : les largeurs de raies, les rapports d'intensités relatives entre raies et le diagramme de Boltzmann.

A titre d'exemple l'élargissement Doppler peut être utilisé pour déterminer la température du milieu.

### II.3.1. Méthode de l'intensité relative de deux raies

La température du plasma est déduite des intensités des raies spectrales obtenues par la spectroscopie d'émission. Soient les intensités relatives de deux raies d'une même espèce, atomique ou ionique. Comme le plasma est considéré à l'équilibre thermodynamique local, le rapport des intensités des deux raies de longueur d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  est donné par l'expression suivante :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\lambda_2 A_1 g_1}{\lambda_1 A_2 g_2} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{K_B T}\right) \quad (\text{II. 1})$$

Avec  $A_1$  et  $A_2$ , les probabilités de transitions et  $E_1$  et  $E_2$  les énergies des niveaux émetteurs. On en déduit ainsi la température

$$T = \frac{E_1 - E_2}{K_B} \frac{1}{\ln\left(\frac{I_2 \lambda_2 A_1 g_1}{I_1 \lambda_1 A_2 g_2}\right)} \quad (\text{II. 2})$$

Pour obtenir une bonne précision, il faut que  $(E_2 - E_1)$  soit aussi grand que possible. Il faut donc utiliser des raies dont les niveaux émetteurs sont très différents.

## II.4. Modèles théorique pour le calcul des élargissements électroniques

### II.4.1. Modèle utilisé par O. A. Bukin et al. [27]

O. A. Bukin et al. ont calculé l'élargissement Stark de trois raies de Mg I (5167.3 Å ; 5172.7 Å ; 5183.6 Å).

Les conditions du plasma sont :

- L'énergie de pulsation : 0.2 J.
- La concentration de Mg dans le matériau de la cible (alliage d'aluminium) est 5%.
- Le type de laser : Nd-YAG d'impulsion 20 ns.

Ils ont utilisé les formules approximatives suivantes pour l'exploitation des résultats de leur expérience d'élargissement Stark.

La largeur de la raie à mi-hauteur en Å est donnée par :

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\left[1 + 1.75 \cdot 10^{-4} N_e^{1/4} \alpha (1 - 0.068 N_e^{1/6} T_e^{-1/2})\right] 10^{-16} w N_e \quad (\text{II. 3})$$

Le déplacement de la raie (ou schift) en Å :

$$\Delta\lambda_s = \left[ \left( \frac{d}{w} \right) + 2 \cdot 10^{-4} N_e^{1/4} \alpha \left( 1 - 0.068 N_e^{1/6} T_e^{-1/2} \right) \right] 10^{-16} w N_e \quad (\text{II.4})$$

Et ils ont trouvé que la variation de  $(d/w)$  est linéaire avec  $\log(T_e)$ .

#### II.4.2. Modèle utilisé par H. W Darwin et F. Emard [3]

H. W Darwin et F. Emard ont utilisé une formule analytique approximative au calcul théorique de Griem. La formule approximative proposée est la suivante :

$$\Delta\lambda_{ij} = \alpha \frac{i^6}{g_i} j^3 \frac{j-1}{2}, \quad i < j \quad (\text{II.5})$$

Avec :  $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-28} \cdot N_e$

$\Delta\lambda_{ij}$  : la largeur à mi-hauteur en (cm).

$N_e$  : la densité électronique en  $(\text{cm}^{-3})$ .

$i$  : est le nombre quantique principal du niveau haut de la transition.

$j$  : est le nombre quantique principal du niveau bas de la transition.

$g_i$  : est la dégénérescence du niveau bas.

Cette formule permet de calculer l'élargissement Stark de l'Hélium neutre.

Afin de développer cette formule (II.5), Nous avons proposé d'utiliser une constante  $\beta$  dépendante à la fois de la densité électronique  $N_e$  et de la température électronique  $T_e$ . Pour répondre aux résultats et aux mêmes données, la nouvelle constante  $\beta$  est :

$$\beta = 1.7 \cdot 10^{-27} \cdot \frac{N_e}{\sqrt{T_e}}$$

La nouvelle expression nous permet de calculer l'élargissement Stark électronique de Mg I et Mg II.

$$\Delta\lambda_{ij} = \beta \frac{i^6}{g_i} j^3 \frac{j-1}{2}, \quad i < j \quad (\text{II.6})$$

C'est cette expression que nous allons utiliser dans le chapitre III.

#### II.4.3. Modèle utilisé par M. Cvejić et al. [4]

M. Cvejić et al. ont exploité les résultats d'expérience de leur recherche pour le diagnostic de plasma (la température et la densité électronique).

Les conditions expérimentales sont :

- Laser Nd-YAG d'impulsion de 15 ns.
- Energie d'impulsion de 50 mJ.

Les expressions utilisées sont les équations (II.3) et (II.4).

La densité électronique est mesurée à partir de la largeur de la raie Stark  $H_\alpha$  ; la température électronique  $T_e$  est déterminée à partir des intensités relatives des raies de Mg I à l'aide de diagramme de Boltzmann.

#### II.4.4. Modèle de G. Bekefi et al. [28]

Bekefi et al. [28] ont proposé l'utilisation d'une expression pour le calcul de l'élargissement Stark électronique et ionique des raies. Pour les atomes neutres non hydrogénoïdes et simplement ionisés, l'expression est telle que :

$$\Delta\lambda_s[A^\circ] = 2w\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right) + \underbrace{3.5A\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right)^{1/4} [1 - BN_D^{-1/3}]w\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right)}_{\text{La correction ionique}} \quad (\text{II. 7})$$

Où  $B = 1, 2$  (pour les ions) ou  $3/4$  (pour les neutres) [constantes sans unité],  $N_D$  étant le nombre de particules dans la sphère de Debye, soit :

$$N_D = 1.72 \times 10^9 \frac{T(eV)^{3/2}}{n_e(cm^{-3})^{1/2}}$$

Les paramètres  $w$  [en Å] et  $A$  [sans unité] sont indépendants de la densité électronique et varient lentement avec la température électronique. Lorsque la contribution des ions est négligeable, le paramètre  $w$  est la demi-largeur à mi-hauteur de la largeur Stark électronique de la raie à une densité électronique de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Pour les plasmas peu dense et peu chargé, et pour les ions non hydrogénoïdes l'élargissement Stark est principalement due aux électrons [29]. Puisque dans ces plasmas, les perturbations provoquées par des ions sont négligeables comparées aux électrons, le facteur de correction ionique peut sans risque être négligé. Par conséquent l'équation (II.7) devient :

$$\Delta\lambda_s[A^\circ] = 2W\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right) \quad (\text{II. 8})$$

## II.5. Calcul des profils spectraux

Dans ce travail, nous allons calculer les profils de raies des atomes de magnésium neutre (Mg I) et du magnésium ionisé (Mg II). Nous sommes limités au calcul des élargissements naturels, Doppler et électroniques.

Pour l'élargissement naturel nous avons trouvé que ( $\Delta w_{\text{nat}} \approx 10^{-7}$  à  $10^{-10}$  eV), donc il est négligeable par rapport à l'élargissement électronique.

Nous avons utilisé deux voies différentes pour le calcul du profil de raie. La première voie est nos propres programmes de calcul ; la deuxième est l'utilisation d'un code numérique PPP.

### II.5.1 Programmation en langage fortran

Nous avons élaborés quelques programmes numériques en langage fortran pour le calcul des profils de raies dans les plasmas. Ces programmes tiennent compte des élargissements Stark électronique, naturelles et Doppler.

Nous avons proposé les étapes suivantes :

- 1) Utilisation du site web NIST [30] pour l'obtention des bases de données atomiques de l'élément à étudier. Les données atomiques nécessaires sont les nombres quantiques, les niveaux d'énergie 'Ej', les transitions radiatives et les probabilités de transitions (coefficient d'Einstein) 'Aji', les forces d'oscillateur 'fij'.
- 2) Elaboration d'un programme écrit en langage Fortran, Le programme comprend trois parties.

#### 1) Base de données atomiques

Il est nécessaire de préparer la base de données atomique suivant un format lisible par le programme de calcul.

#### 2) Acquisitions des données d'entrée

Il est nécessaire de définir les données d'entrée :

- Identification de l'émetteur (la masse).
- Identification des transitions radiatives à étudier
- La plage de fréquence en (eV).
- Conditions de plasma (la température et la densité électronique).
- Choix des transitions à étudier.

### 3) Calcul des élargissements et profils

#### a) Calcul des élargissements naturel, Doppler et électronique

On commence par calculer d'abord les élargissements naturels et Doppler. Pour le calcul d'élargissement électronique du aux collisions par les électrons, nous avons utilisé l'expression de l'équation (3).

#### b) Calcul du profil de raie

##### Profil lorentzien

Le profil de la raie  $I_{\omega}$  est distribué suivant une lorentzienne.

$$I_{\omega} = I_{\omega_0} * \frac{1}{\pi} \frac{\delta}{x^2 + \delta^2} \quad (II.9)$$

Où :  $\delta = \frac{\Delta\lambda_{\text{strk}}}{2}$  et  $x = \omega - \omega_0$

$I_{\omega_0}$  : est l'intensité lumineuse de la raie.

Nous avons adopté l'expression suivante pour l'intensité totale de la raie  $I_{\omega_0}$ .

$$I_{\omega_0} = A_{ki} N_0 g_j \frac{hc}{\lambda} \exp\left(\frac{-E_j}{K_B T}\right) \quad (II.10)$$

Où  $A_{ji}$ : est le coefficient d'Einstein d'émission spontanée.

$E_j$ : est l'énergie du niveau haut de la transition de l'état  $j$  à l'état  $i$ .

$K_B$  : est la constante de Boltzmann.

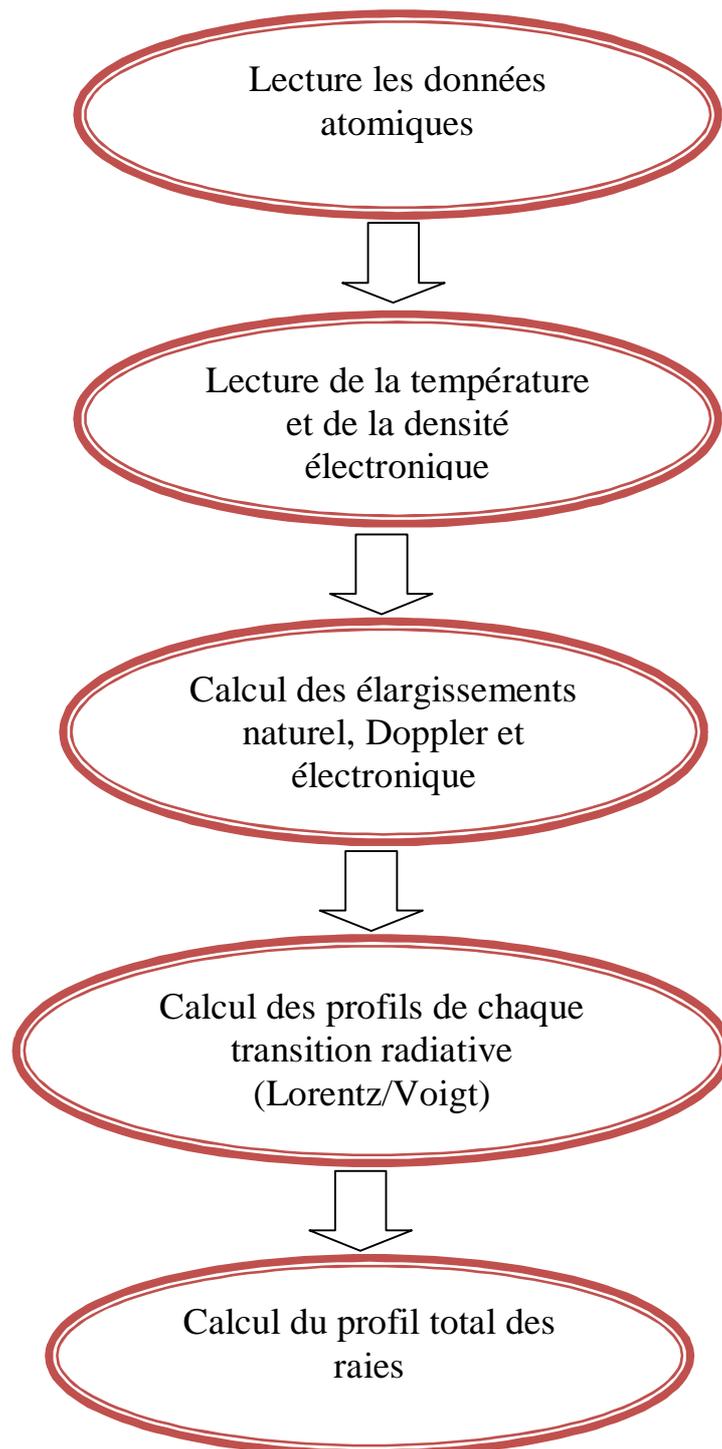
$g_j$ : est la dégénérescence du niveau haut.

Le spectre final est obtenu en faisant la somme des intensités de raies de toutes les transitions radiatives dans l'intervalle étudié.

$$I_{\text{total}}(\lambda) = \sum I_{\text{itr}}(\lambda) \quad (II.11)$$

Le calcul des différents types d'élargissement permet de calculer le profil pour une transition donnée. Ce profil  $g(x)$  peut être une gaussienne, une lorentzienne ou de Voigt. L'expression pour le profil de Voigt a été présentée au chapitre I paragraphe I.6.2.

La figure II.1 : présente le plan suivi pour le calcul des profils :



**Figure II.1** : Plan du calcul numérique.

## II.5.2. Utilisation du code P.P.P

### II.5.2.1. Description du Code de calcul (PPP)

Le code (PPP) a été développé en 1990 par Calisti et al. [31] Ce code peut calculer le profil de raie de particules chargées dans les plasmas présentant des élargissements Stark électronique et ionique. Il est destiné aux calculs de profils d'ions multichargés dans les plasmas chauds et denses.

Ce code demande les données de la physique atomique et les propriétés statistiques du plasma.

### II.5.2.2 Calcul du profil de raies spectrales

Le calcul de profil de raies se fait à l'aide d'un code numérique (programme en fortran) en trois étapes appelé aussi le code P-P-P (Pim-Pam-Poum).

#### Première étape : le programme PIM

Il nécessite un fichier qui contient la base de données atomique de l'élément considéré et un fichier in.txt qui contient la nature et les conditions du plasma choisies.

#### Deuxième étape : le programme PAM

C'est le cœur du code, il fait le calcul des transitions radiatives, transitions Stark et des élargissements. Il utilise l'approximation d'impact pour le traitement des élargissements électroniques et l'approximation quasi-statique pour le traitement de l'élargissement ionique. Un calcul de l'effet de dynamique des ions peut être fait en utilisant la Méthode de Fluctuation de Fréquences (MFF) [25].

#### Troisième étape : le programme POUM

Il permet le calcul de la somme des lorentziennes résultant des différentes transitions possibles.

### II.5.2.3 Les fichiers relatifs aux calculs par le code PPP

Les fichiers relatifs aux calculs par le code PPP sont :

**in.txt** : fichier d'entrée contenant les conditions du plasma choisies.

**base.dat** : c'est la base atomique de l'élément considéré.

**samfld.dat** : fichier de sortie contenant la distribution du micro-champ électrique (champ électrique local).

**miscel.dat** : fichier contenant les conditions du plasma et la physique atomique nécessaire.

**outs.dat** : fichier de sortie donnant les transitions relatives aux différents calculs.

Nous avons utilisé le code pour calculer les profils des raies spectrales de l'ion de magnésium (Mg II). On remarque que pour ce code :

Il a permis le calcul du profil de raies de magnésium ionisé une fois, mais les résultats obtenus ne sont pas compatibles avec les résultats de nos calculs préliminaires et les valeurs expérimentales de **M. Cvejić et al.** [4]. Cette différence peut être due aux modèles et approximations utilisés par le code PPP. A noter que ce code est développé pour être utilisé essentiellement pour les profils de raies d'ions multichargés dans les plasmas chauds et denses [31].

## II.6. Structures électroniques des atomes et des ions de magnésium

### II.6.1 Transitions électroniques d'atome de magnésium (Mg I)

L'état fondamental de magnésium a une configuration électronique  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$  (en abrégé  $3s^2$ ). Après un calcul préliminaire, Nous avons choisi les transitions représentés dans le Tableau II.1. Les autres transitions ont des intensités plus faibles.

**Tableau II.1** : Transitions radiatives du magnésium neutre retenues pour le calcul.

Raies	Longueur d'onde (Å°)	$A_{ji}$ ( $s^{-1}$ )	$E_j$ (eV)	$g_i$	$g_k$	i	j
1 : (3s5d - 3s3p) ( $^1D - ^1P$ )	4702.9908	2.19e+07	4.3458027	3	5	3	5
2 : (3s4s - 3s3p) ( $^3S - ^3P$ )	5167.3213	1.13e+07	2.7091048	1	3	3	4
3 : (3s4s - 3s3p) ( $^3S - ^3P$ )	5172.6844	3.37e+07	2.7115918	3	3	3	4
4 : (3s4s - 3s3p) ( $^3S - ^3P$ )	5183.6043	5.61e+07	2.7166397	5	3	3	4
5 : (3s4d - 3s3p) ( $^1D - ^1P$ )	5528.4047	1.39e+07	4.3458027	3	5	3	4
6 : (3s5s - 3s3p) ( $^1S - ^1P$ )	5711.0880	3.86e+07	4.3458027	3	1	3	5

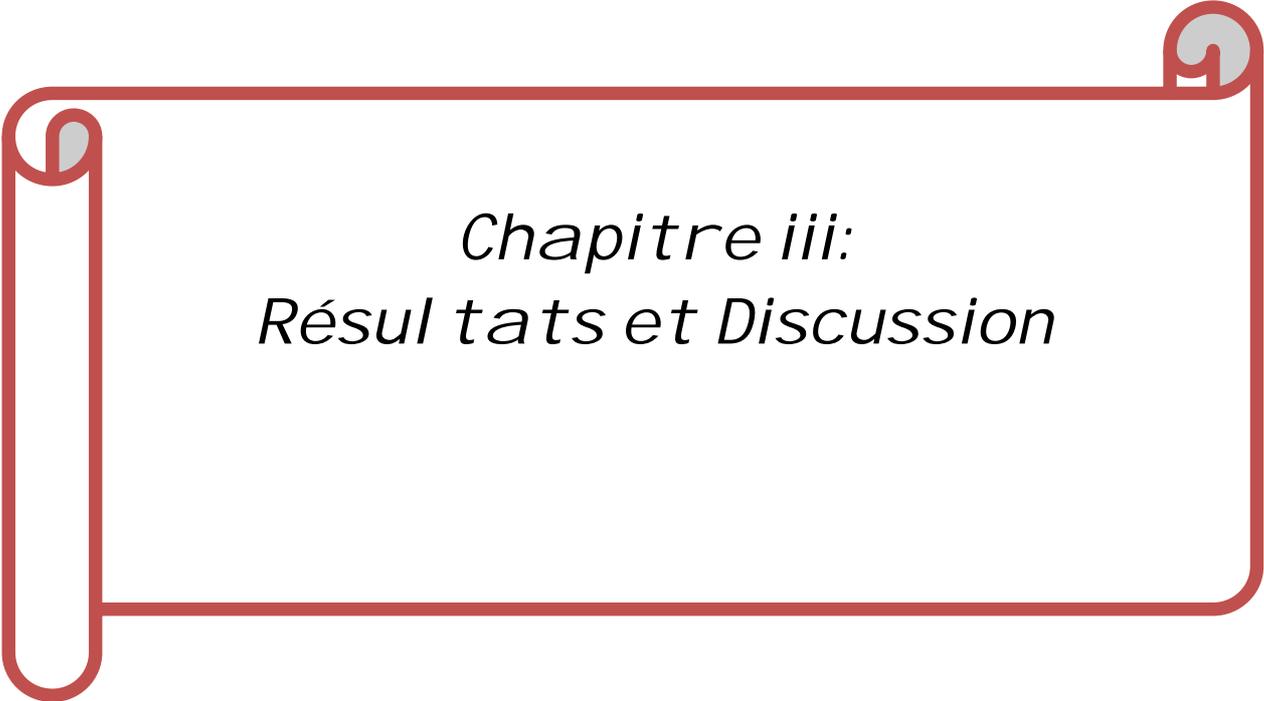
## II.6.2 Transitions électroniques d'ion de magnésium (Mg II)

La configuration électronique de magnésium une fois ionisé dans son état fondamental est  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$  (en abrégé  $3s^1$ ). Le tableau II.2 Présente les transitions radiatives retenues et les données atomiques correspondantes pour cette étude. Un calcul préliminaire montre que ces transitions sont les plus fortes, les autres transitions sont très faibles.

L'ensemble des données atomiques des transitions du (Mg I et Mg II) sont présentées dans l'annexe.

**Tableau II.2 :** Transitions radiatives du magnésium ionisé Mg II retenues pour le calcul.

Raies	Longueur d'onde (Å°)	$A_{ji}$ ( $s^{-1}$ )	$E_j$ (eV)	$g_i$	$g_k$	i	j
1 : ( $2p^6 3p - 2p^6 3s$ ) (2P – 2S)	2795.528	2.60e+08	4.433784	2	4	3	3
2 : ( $2p^6 3p - 2p^6 3s$ ) (2P – 2S)	2802.705	2.57e+08	4.422431	2	2	3	3
3 : ( $2p^6 4f - 2p^6 3d$ ) (2F – 2D)	4481.126	2.33e+08	11.629687	6	8	3	4
4 : ( $2p^6 4f - 2p^6 3d$ ) (2F – 2D)	4481.150	1.55e+07	11.629672	6	6	3	4
5 : ( $2p^6 4f - 2p^6 3d$ ) (2F – 2D)	4481.325	2.17e+08	11.629672	4	6	3	4



*Chapitre iii:  
Résultats et Discussion*

## Chapitre III : Résultats et Discussion

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de l'étude des élargissements électroniques de certaines raies d'élément de magnésium neutre (Mg I) et de magnésium ionisé (Mg II) dans les plasmas et dans les plasmas de soudage laser en particulier.

### III.2. Etude comparative entre les calculs d'élargissement électronique

Nous avons calculé l'élargissement électronique des deux raies de Mg I ( $\lambda=3835.3 \text{ \AA}$ ,  $\lambda=5528.4 \text{ \AA}$ ) et de la raie de Mg II ( $\lambda=4481.2 \text{ \AA}$ ) pour différentes valeurs de températures et de densités électroniques utilisées dans l'article de **M. Cvejić et al.** [4]. Nous avons considéré l'équilibre thermodynamique local établi.

Pour le calcul d'élargissement électronique nous avons utilisé deux formules :

- La formule (II.7) donnée par Bekefi et al. 1976 [28] comme nous l'avons mentionné au chapitre II.4.4.
- La formule (II.6) proposée pour nous calcul (voir chapitre II.4.2)

$$\Delta\lambda_{ij} = \beta \frac{i^6}{g_i} j^3 \frac{j-1}{2}$$

Avec :  $\beta = 1.7 \cdot 10^{-27} \cdot \frac{N_e}{\sqrt{T}}$

D'après les calculs nous avons trouvé que la correction ionique est négligeable par rapport à la contribution électronique pour les raies étudiées.

Et nous avons comparé ces résultats avec les calculs théoriques de **Griem** [32] et de **M.S. Dimitrijević, S. Sahal- Bréchet (DSB)** [33] et les résultats expérimentaux de **M. Cvejić et al.** [4] ( $w_{\text{exp}}$ ). Le tableau III.1 résume les résultats.

**Tableau III.1:** Mesure expérimental d'élargissement électronique ( $w_{exp}$ ), et calculs théoriques de Griem (G) et de (DSB), et notre calcul, pour différentes transitions de Mg I et Mg II et pour différentes valeurs de températures et de densités électroniques.

Transitions	$\lambda$ (Å)	T(K)	$N_e \cdot 10^{17}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$w_{exp}$ (Å)	$\frac{w_{th}}{w_{exp}}$ (G)	$\frac{w_{th}}{w_{exp}}$ (DSB)	$\frac{w_{th}}{w_{exp}}$ (notre calcul)	Notre calcul formule (II.4)
<b>Mg I</b> 3s3p–3s3d ( $^3P^o$ – $^3D$ )	3835.3	6434	1.09	1.7	1.42	1.20	0.88	1.07
		6278	0.82	1.3	1.47	1.23	0.91	-
		6355	0.99	1.5	1.49	1.21	0.86	-
<b>Mg I</b> 3s3p–3s4d ( $^1P^o$ – $^1D$ )	5528.4	6434	1.09	5.3	0.97	0.81	0.99	-
		6287	0.82	4.2	0.90	0.76	0.98	-
		6355	0.99	4.9	0.95	0.79	0.99	-
<b>Mg II</b> 2p3d–2p4f ( $^2D$ – $^2F^o$ )	4481.2	6434	1.09	2.5	1.36	1.06	1.04	1.05
		6287	0.82	2.1	1.23	0.97	1.05	-
		6355	0.99	2.3	1.35	1.05	1.05	1.05

Nous pouvons retenir les remarques suivantes :

- L'élargissement électronique calculé est en bon accord avec l'expérience.
- L'élargissement ionique est négligeable.
- Le pourcentage de calcul théorique de (G) par rapport au calcul expérimental est de (03% à 49%), et de (DSB) est de (03% à 24%) et notre calcul est de (01% à 15%).

La cause de ces écarts peut être attribuée, entre autres:

- Aux modèles de l'élargissement électronique choisis :
- A la correction due à l'élargissement ionique.
- A la contribution des collisions électroniques fortes dans le calcul de l'opérateur de collisions électroniques.

### III.3. Elargissement naturel et élargissement Doppler

Les largeurs naturelles et Doppler à mi-hauteur des raies de Mg II sont présentées sur le tableau (III.2) pour la température  $T=900$  K.

**Tableau III.2 :** Les élargissements naturel et Doppler des raies de Mg II.

$\omega$ en (eV)	$\Delta\omega_{\text{nat}}$ en (eV)	$\Delta\omega_{\text{Dop}}$ en (eV) pour $T=900$ K
4.4356	$1.7128 \cdot 10^{-7}$	$1.944 \cdot 10^{-5}$
4.4242	$1.6931 \cdot 10^{-7}$	$1.939 \cdot 10^{-5}$
2.7671	$4.6873 \cdot 10^{-7}$	$1.211 \cdot 10^{-5}$

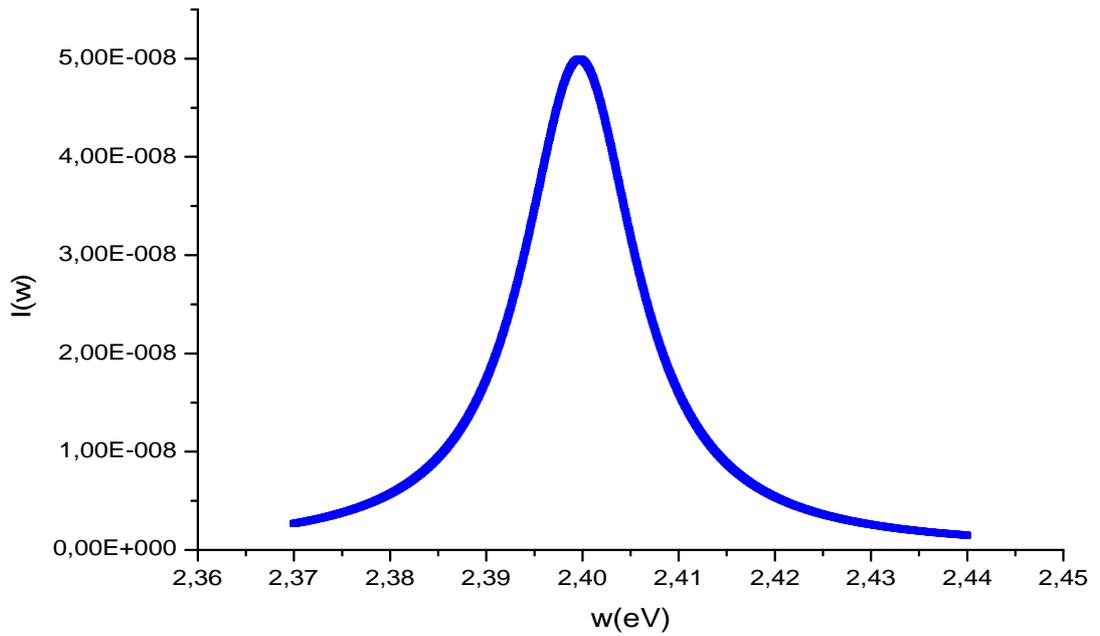
On note que :

- L'élargissement naturel est négligeable par rapport à l'élargissement électronique. Il est de l'ordre de 140 fois.
- L'élargissement Stark électronique calculé est plus grand que l'élargissement Doppler. Il est de l'ordre de 50 fois.

### III.4. Profils spectraux des raies de Mg I

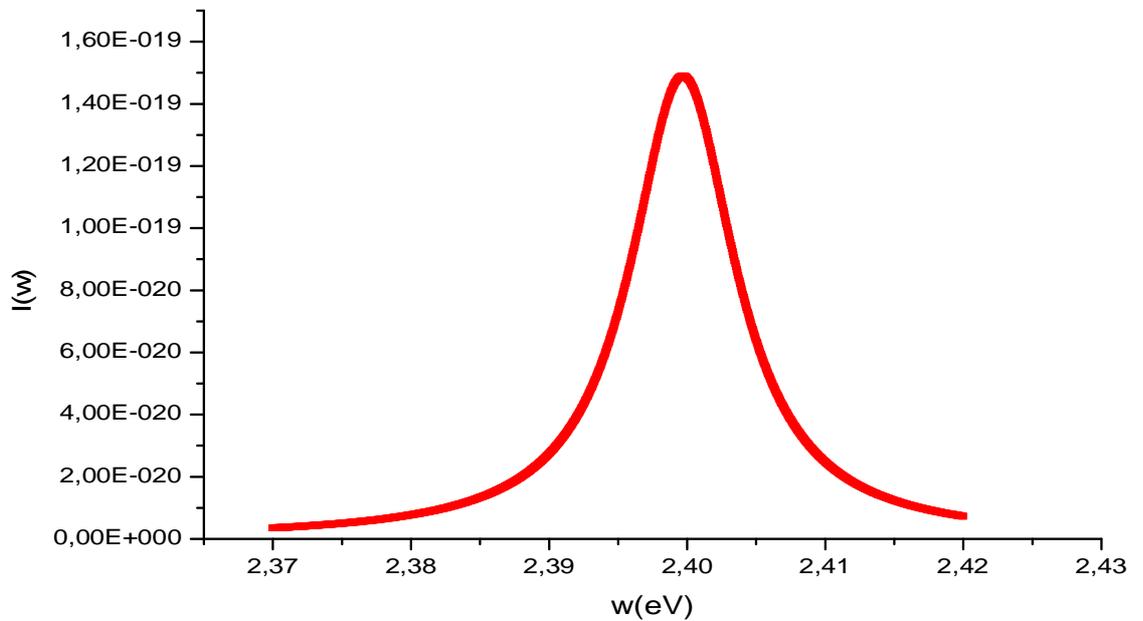
#### III.4.1. Profils spectraux des deux raies 5167.3213 Å et 2852.1261 Å

La figure III.1 présente le profil de raie de Mg I  $\lambda=5167,3213$  Å, pour une température  $T=1525$  K et une densité électronique  $N_e=10^{17}$  cm<sup>-3</sup>. L'élargissement électronique est  $\Delta\omega_{\text{éle}}=0,014148$  eV.



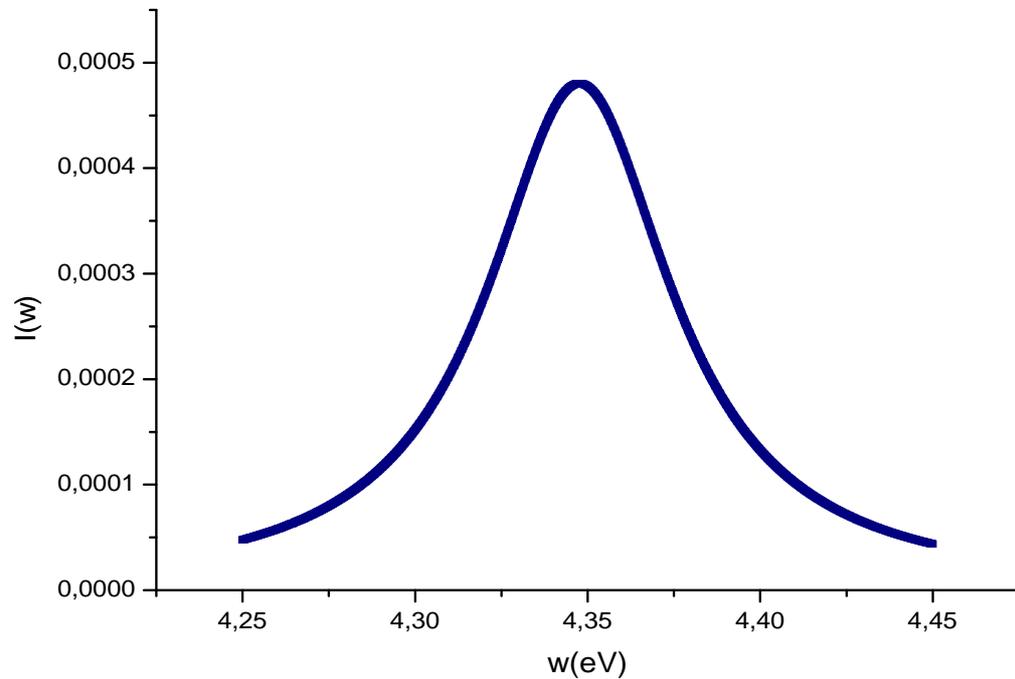
**Figure III.1** : Profil de raie de Mg I ( $\lambda=5167,3213 \text{ \AA}$ ) pour  $T=1525 \text{ K}$  et  $N_e=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

La figure III.2 présente le profil de raie de Mg I  $\lambda=5167,3213 \text{ \AA}$ , pour une température  $T=900 \text{ K}$  et une densité électronique  $N_e=5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . L'élargissement électronique est  $\Delta\omega_{\text{ele}}=0,0092085 \text{ eV}$ .



**Figure III.2** : Profil de raie de Mg I ( $\lambda=5167,3213 \text{ \AA}$ ) pour  $T=900 \text{ K}$  et  $N_e=5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

La figure III.3 présente le profil de raie de Mg I  $\lambda=2852.1261 \text{ \AA}$ , pour la température  $T=1550 \text{ K}$  et la densité électronique  $N_e=5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . L'élargissement électronique est  $\Delta\omega_{\text{ele}}=0,064778 \text{ eV}$ .



**Figure III.3 :** Profil de raie de Mg I à  $T=1550 \text{ K}$  et  $N_e = 5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

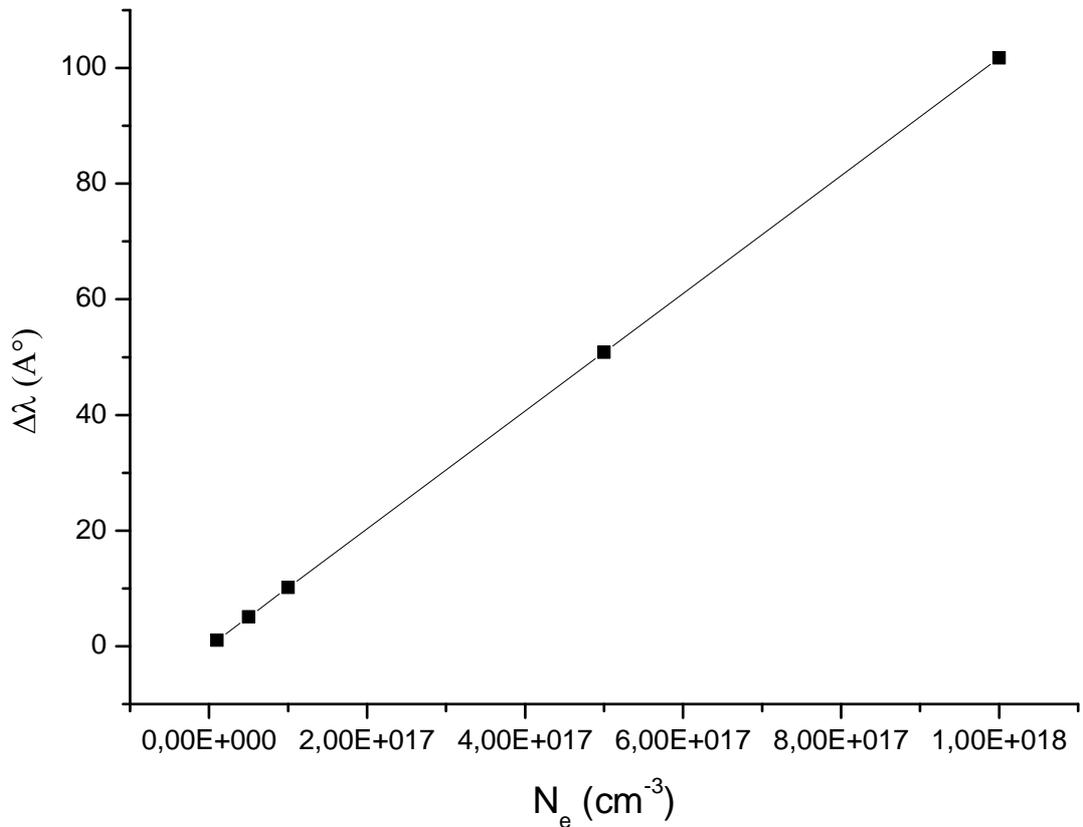
### III.4.2. Elargissements électronique de la raie $\lambda=5172,68 \text{ \AA}$ de Mg I

La largeur électronique à mi-hauteur de la raie  $\lambda=5172,68 \text{ \AA}$  de Mg I pour différentes valeurs de densité électronique est calculée et présentée sur le tableau III.3.

**Tableau III.3 :** L'élargissement électronique de la raie de magnésium neutre  $\lambda=5172.68 \text{ \AA}$  pour  $T=1525 \text{ K}$ .

$N_e \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$10^{16}$	$5.10^{16}$	$10^{17}$	$5.10^{17}$	$10^{18}$
$\Delta\lambda \text{ ( \AA )}$	1.01	5.085	10.171	50.859	101.71

La figure III.4 présente la variation de l'élargissement électronique en fonction de la densité électronique à T= 1520 K. Cette variation est linéaire.



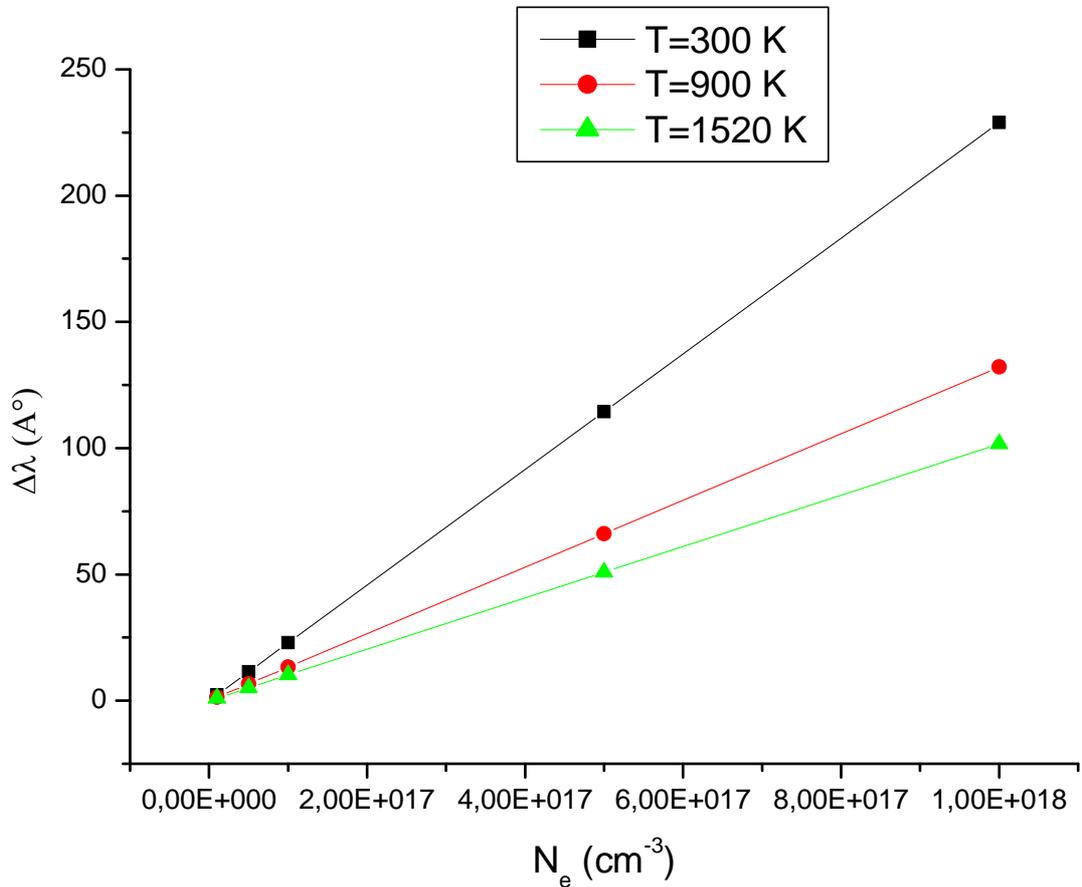
**Figure III.4 :** Variation de l'élargissement électronique en fonction de la densité électronique de raie 5172.68 Å

Le tableau III.4 présente l'élargissement électronique de raie de Mg I pour différentes valeurs de densité électronique et de température.

**Tableau III.4 :** L'élargissement électronique de la raie  $\lambda=5172.68$  Å pour différentes valeurs de densités électroniques  $N_e$  et de températures T.

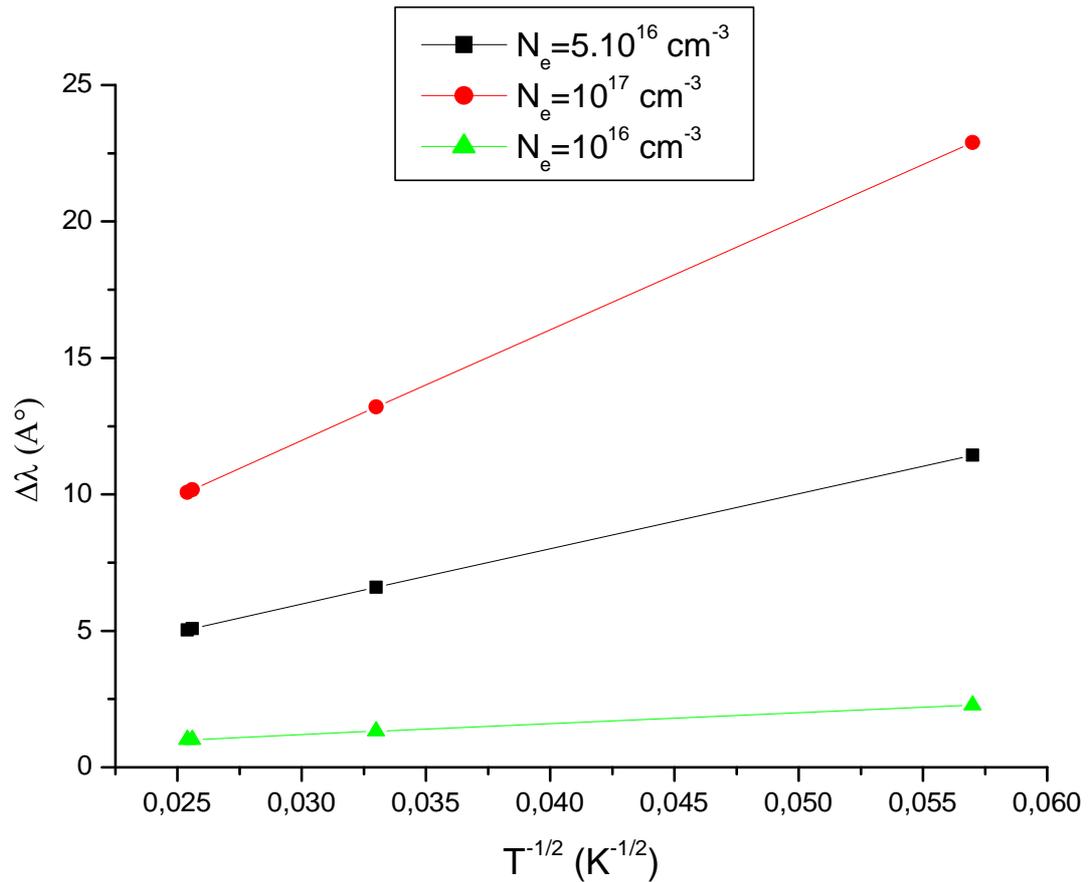
	$N_e$ (cm <sup>-3</sup> )	$5.10^{16}$	$10^{17}$	$5.10^{17}$	$10^{18}$
T= 300 K	$\Delta\omega$ (Å)	11.44	22.89	114.48	228.96
T= 900 K		6.60	13.21	66.09	132.19
T= 1520 K		5.085	10.171	50.859	101.71

La figure III.5 présente la variation de l'élargissement électronique de la raie de Mg I en fonction de la densité électronique pour différentes valeurs de températures (300 K, 900 K, 1520 K).



**Figure III.5 :** Variation de l'élargissement électronique de raie 5172.68 Å en fonction de la densité électronique pour différents valeurs de température.

La figure III.6 présente la variation de l'élargissement électronique en fonction de la température, pour différentes valeurs de densités électroniques ( $10^{16}$ ;  $5.10^{16}$ ;  $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$ ).

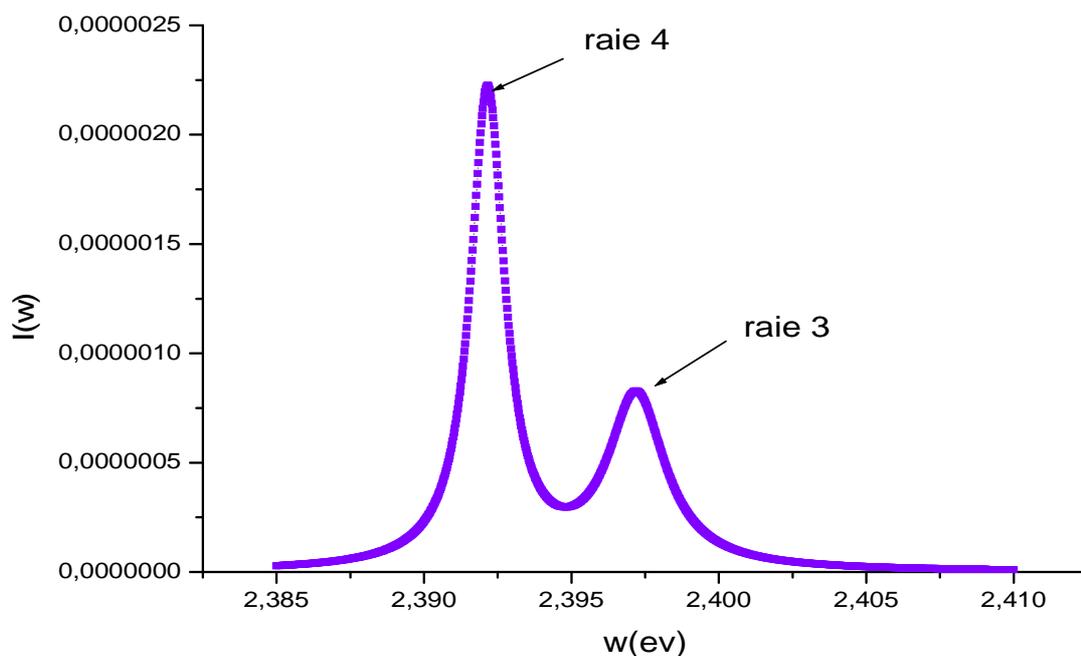


**Figure III.6:** Variation de l'élargissement électronique en fonction de  $\frac{1}{\sqrt{T}}$  pour différents valeurs de densité électronique.

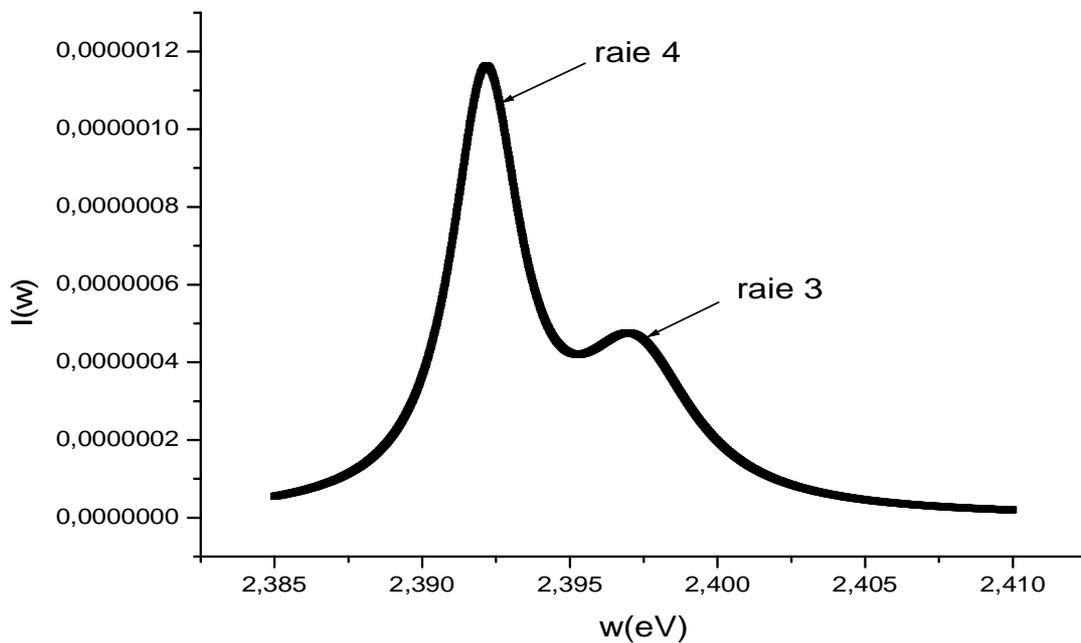
- La largeur électronique des raies de Mg II augmente avec l'augmentation de la densité électronique et diminue dans les cas des températures élevées.

### III.4.3. Calcul des rapports d'intensités pour les raies de Mg I

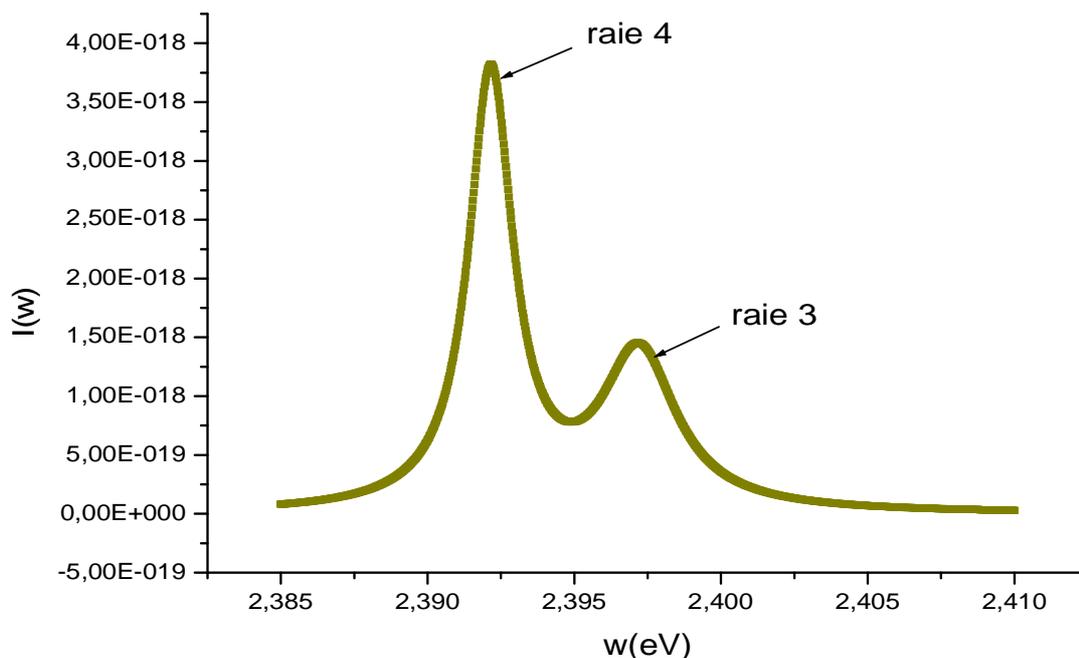
Nous avons choisi les deux raies, la raie 3 :  $\lambda = 5172.6844 \text{ \AA}$  ( $3^3P_1 - 4^3S_1$ ) et la raie 4 :  $\lambda = 5183.6043 \text{ \AA}$  ( $3^3P_2 - 4^3S_1$ ) de Mg I du tableau II.1. Ces raies ont des intensités élevées et appartiennent à la même plage de fréquences.



**Figure III.7 :** Profil des raies 3 et 4 de Mg I pour une température  $T=1520$  K et une densité électronique  $N_e = 5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .



**Figure III.8 :** Profil des raies 3 et 4 de Mg I pour une température  $T=1520$  K et une densité électronique  $N_e = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .



**Figure III.9 :** Profil des raies 3 et 4 de Mg I pour une température  $T=900$  K et une densité électronique  $N_e = 5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

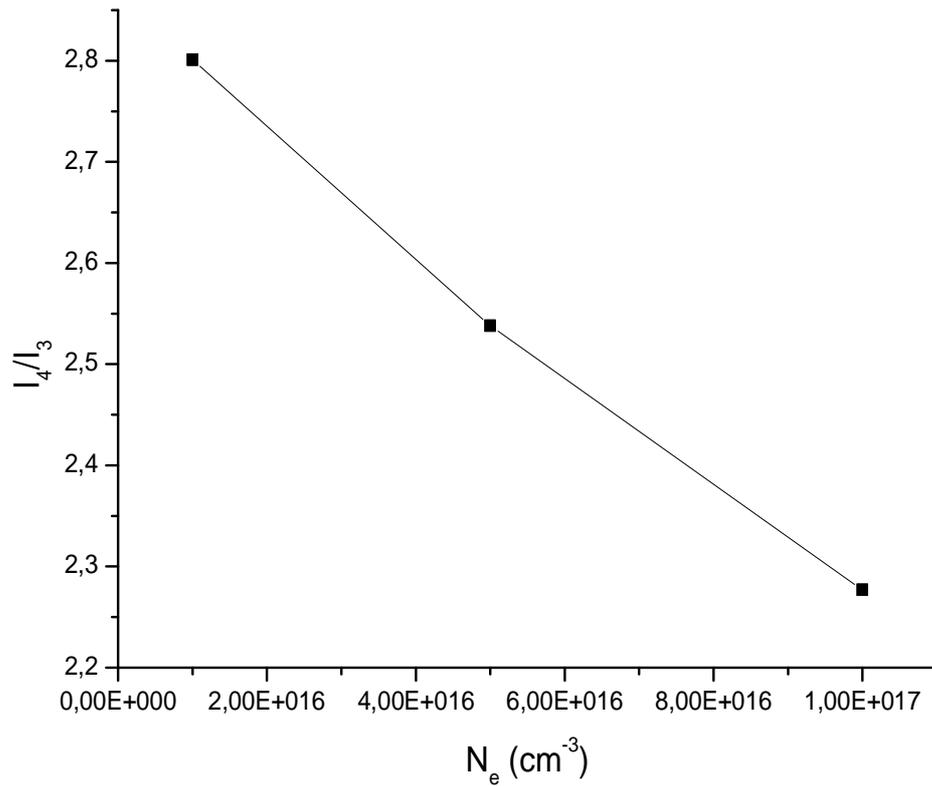
On remarque que :

- L'intensité de profil des raies augmente avec l'accroissement de la température.
- La largeur à mi-hauteur augmente avec l'accroissement de la densité électronique.

Le rapport d'intensité des raies ( $I_4/I_3$ ) de Mg I pour différentes valeurs de température et de densité électronique est présenté sur les tableaux (III.5 et III.6) et les figures (III.10 et III.11).

**Tableau III.5 :** Rapport d'intensité entre deux raies 3 et 4 de Mg I à 1520 K et pour différents valeurs de densités électroniques.

$N_e \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$10^{16}$	$5.10^{16}$	$10^{17}$
$I_4/I_3$	2.801	2.538	2.277

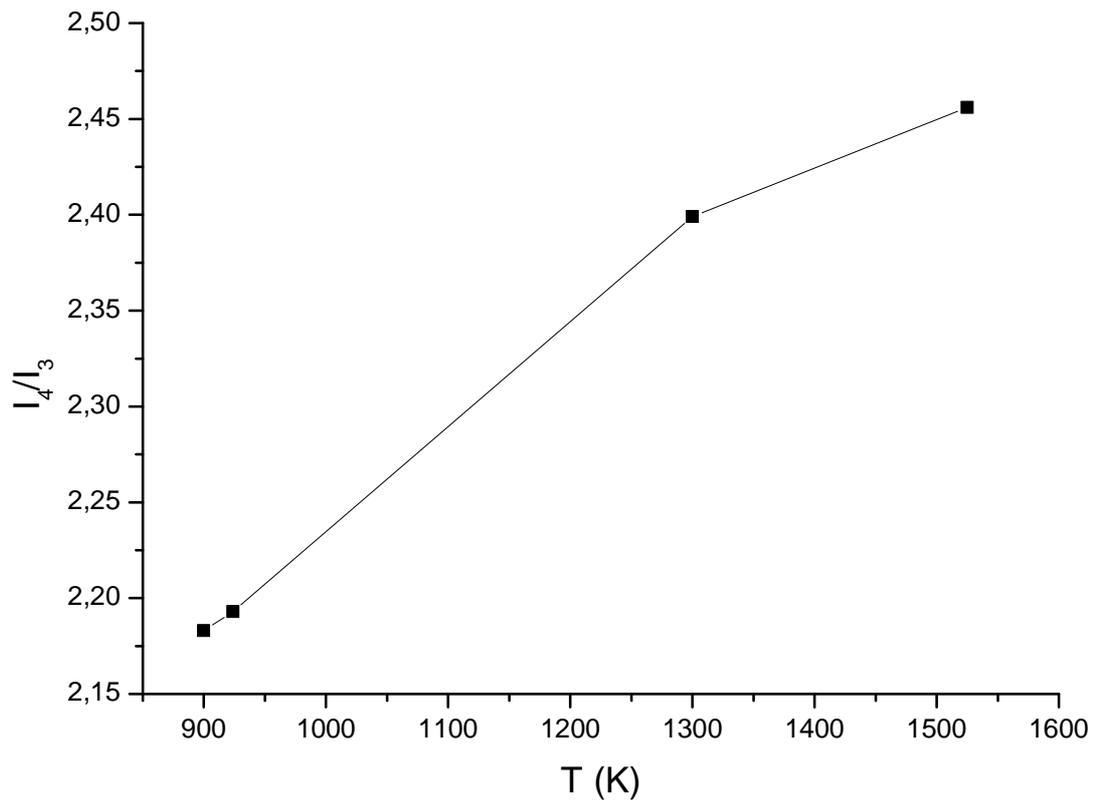


**Figure III.10 :** Variation du rapport d'intensité entre les raies 3 et 4 de Mg I en fonction de la densité électronique pour une température  $T=1520$  K.

Le tableau III.6 présente la variation de rapport d'intensité  $I_4/I_3$  de Mg I pour  $N_e=10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  et différentes valeurs de température.

**Tableau III.6 :** le rapport d'intensité  $I_4/I_3$  de Mg I pour  $N_e=10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  et différentes valeurs de températures.

T (K)	900	924	1300	1525
$I_4/I_3$	2.126	2.193	2.246	2.456

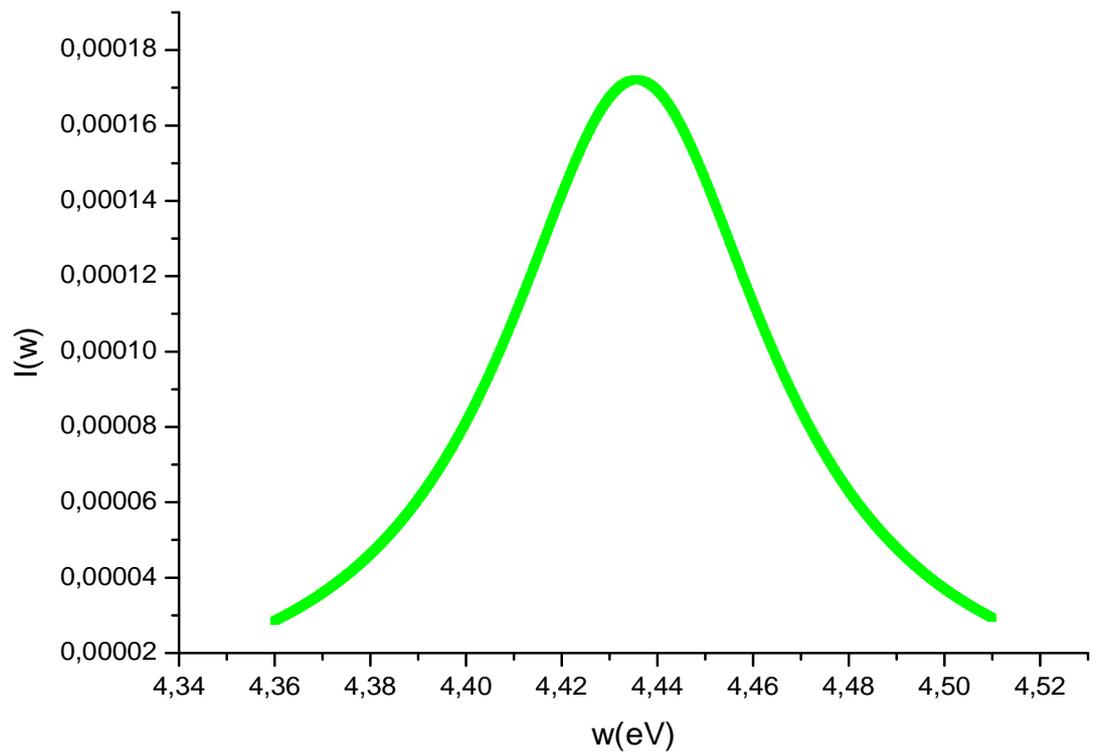


**Figure III.11 :** Variation du rapport d'intensité entre les raies 3 et 4 de Mg I en fonction de la température pour une densité électronique  $N_e = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

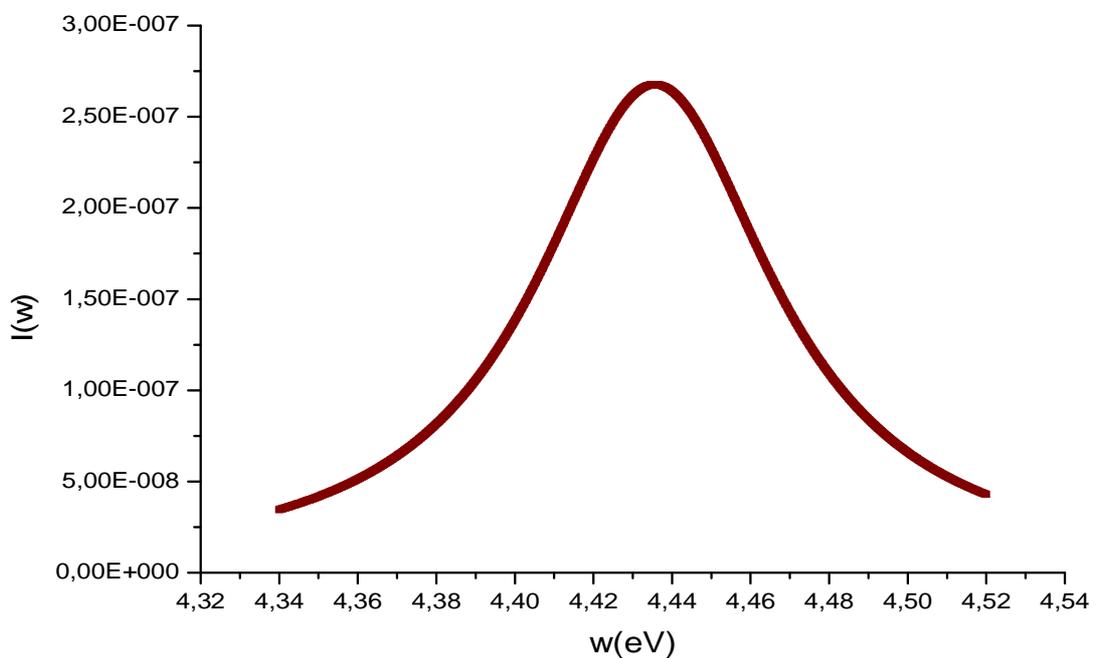
- La figure montre que lorsque la température augmente le rapport d'intensité augmente.

### III.5. Profils spectraux des raies de Mg II

Les figures III.12 et III. 13 présentent le profil de raie de Mg II  $\lambda=2795.528 \text{ \AA}$  pour les températures  $T=1550 \text{ K}$  et  $1330 \text{ K}$  et pour la densité électronique  $N_e=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

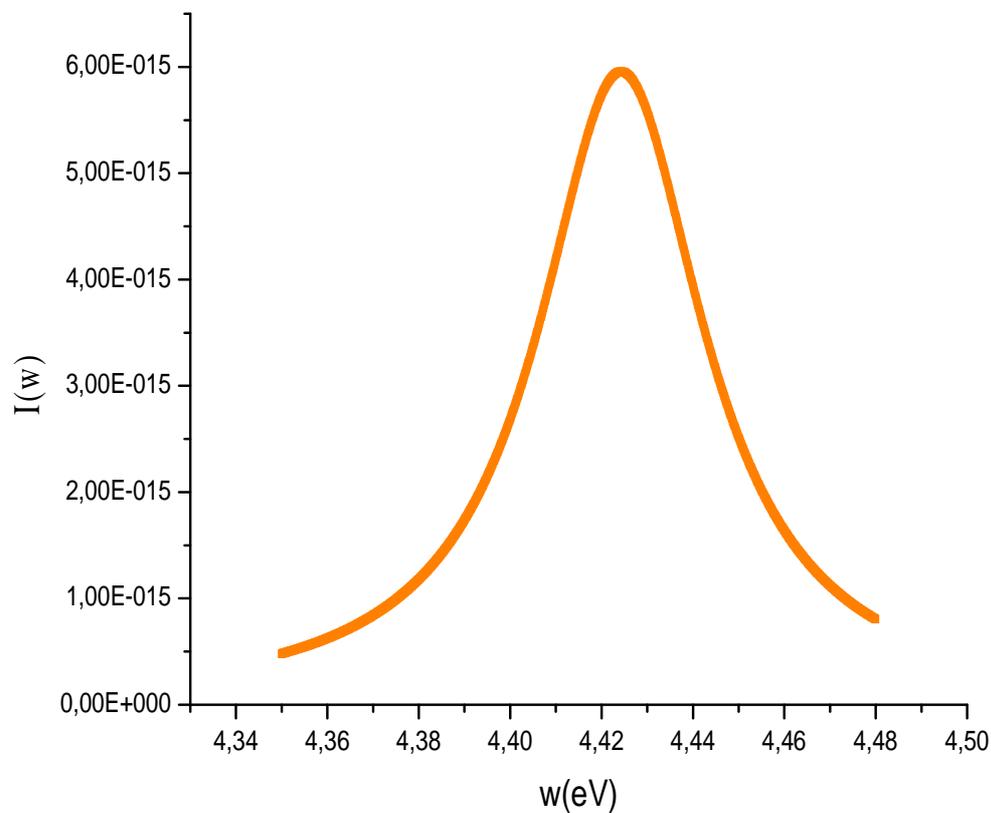


**Figure III.12 :** Profil de la raie 2795.528 Å de Mg II à T=1550 K et  $N_e=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .



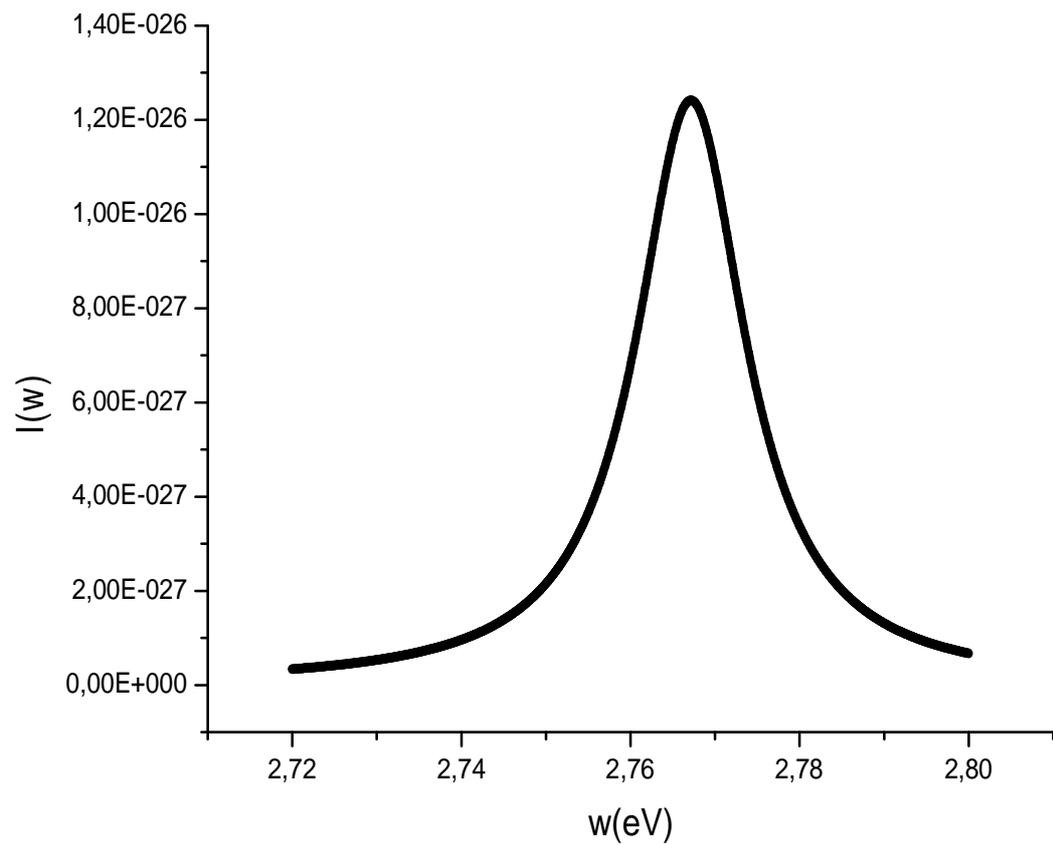
**Figure III.13 :** Profil de la raie 2795.528 Å de Mg II à T=1300 K et  $N_e=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

La figure III.14 présente le profil de raie de Mg II  $\lambda=2802.705 \text{ \AA}$  pour la température  $T=900 \text{ K}$  et la densité électronique  $N_e=5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .



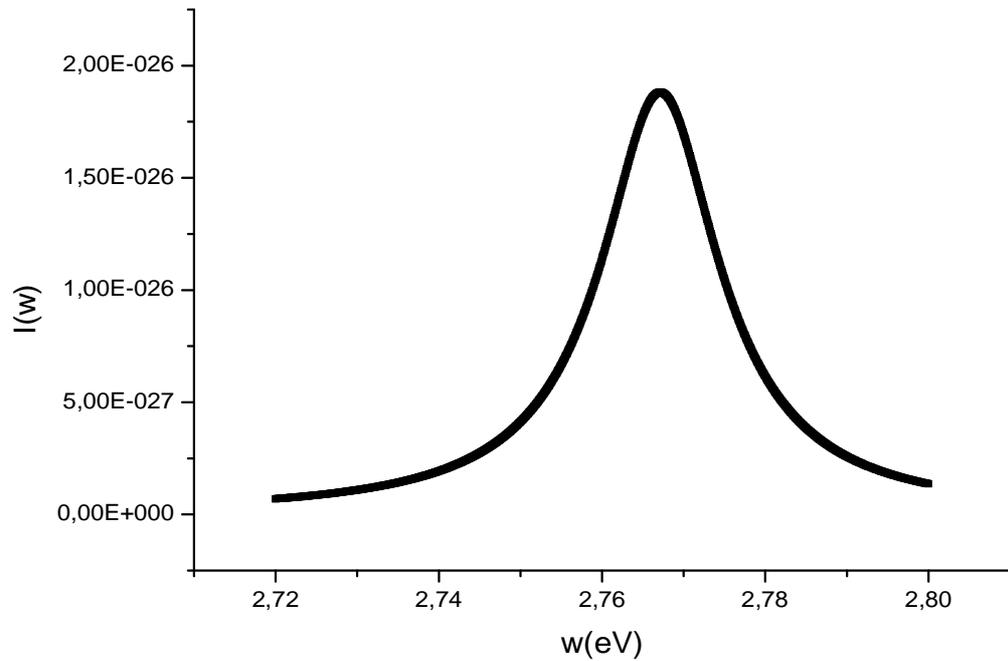
**Figure III.14 :** Profil de la raie 2802.705 Å de Mg II à  $T=900 \text{ K}$  et  $N_e=5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

La figure III.15 présente le profil de raie de Mg II  $\lambda=4481.126 \text{ \AA}$  pour la température  $T=1525 \text{ K}$  et la densité électronique  $N_e=5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . La largeur à mi-hauteur est  $\Delta\omega_{\text{él}}=0,015703 \text{ eV}$ .



**Figure III.15 :** Profil de la raie 4481.126 Å de Mg II à  $T=1525$  K et  $N_e=5.10^{17}$  cm<sup>-3</sup>.

La figure III.16 présente le profil de trois raies de Mg II  $\lambda=4481.126$  Å ,  $\lambda= 4481.150$  Å ,  $\lambda=4481.325$  Å pour la température  $T=1525$  K et la densité électronique  $N_e=5.10^{17}$  cm<sup>-3</sup>. La largeur à mi-hauteur est  $\Delta\omega_{ele}=0,017803$  eV.



**Figure III.16 :** Le profil de 3 raies de Mg II à  $T=1525$  K et  $N_e=5.10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$ .

On note que :

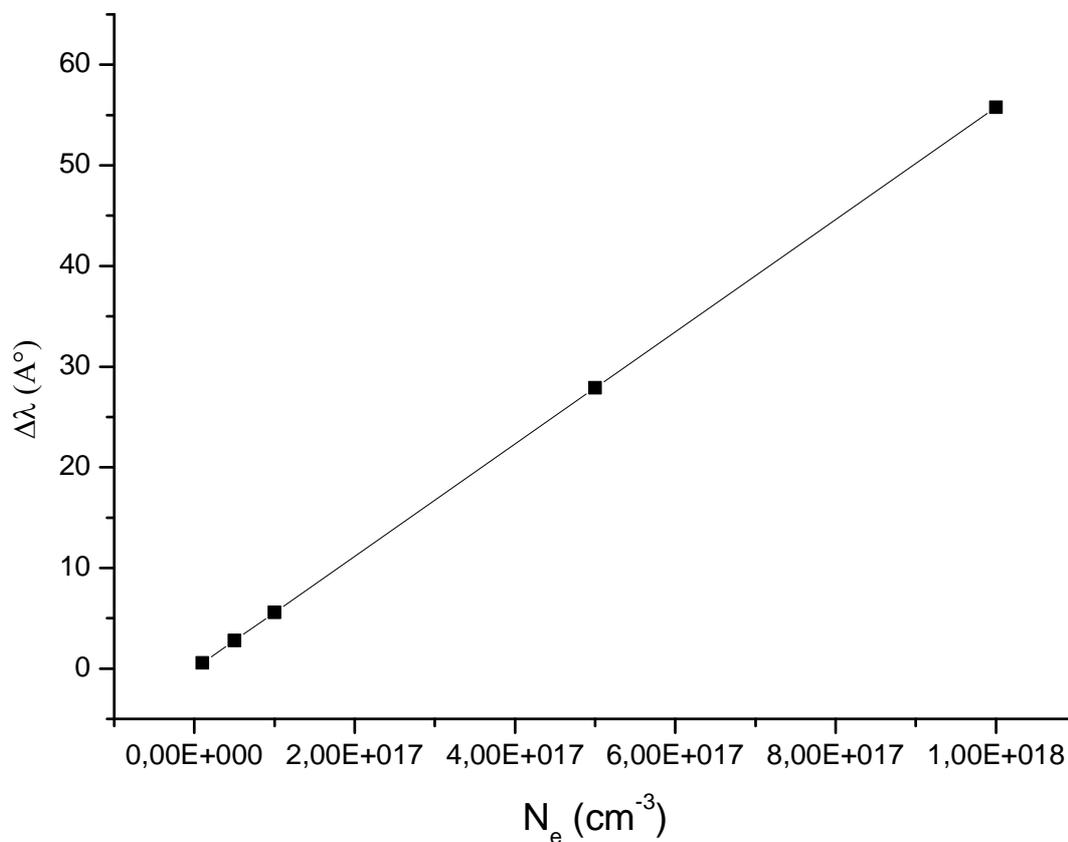
- Les élargissements électroniques des trois raies sont presque égaux à celle de la raie 4481.126 Å. Les écarts entre les raies sont très inférieurs aux élargissements électroniques, donc les trois raies se superposent et elles sont dans les mêmes positions.

Le tableau III.7 présente l'élargissement électronique de raie 2795.528 Å de Mg II pour différentes valeurs de densité électronique et à  $T=900$  K.

**Tableau III.7 :** Largeur électronique à mi-hauteur de la raie  $\lambda=2795.528$  Å de Mg II à  $T=900$  K pour différentes valeurs de densité électronique.

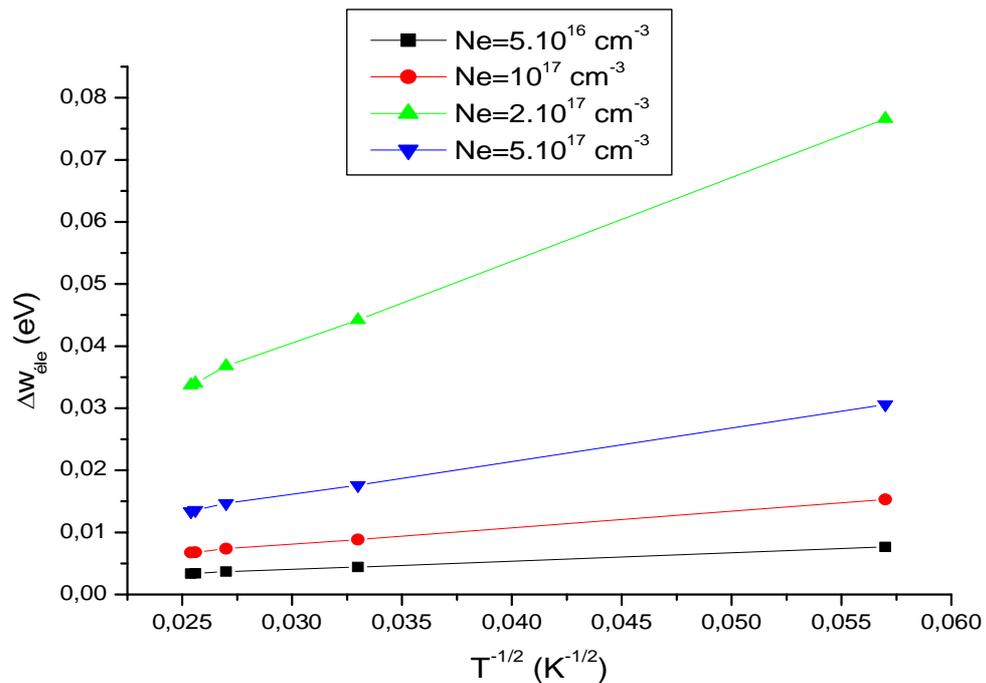
$N_e$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{16}$	$5.10^{16}$	$10^{17}$	$5.10^{17}$	$10^{18}$
$\Delta w_{\text{éle}}$ (eV)	$8.84.10^{-4}$	$4.42.10^{-3}$	$8.84.10^{-3}$	$4.42.10^{-2}$	$8.84.10^{-2}$
$\Delta w_{\text{éle}}$ (Å°)	0.55	2.78	5.57	28.88	55.76

La figure III.17 présente la variation d'élargissement électronique en fonction de densité électronique, pour la température  $T=900$  K.



**Figure III.17 :** Variation de l'élargissement électronique en fonction de la densité électronique des raies  $2795.528 \text{ Å}$  de Mg II pour  $T=900$  K.

La figure III.18 présente la variation d'élargissement électronique en fonction de  $\frac{1}{\sqrt{T}}$  pour différents densités électroniques  $N_e = (5.10^{16}; 10^{17}; 2.10^{17}; 5.10^{17} \text{ cm}^{-3})$ .



**Figure III.18 :** Variation de l'élargissement électronique en fonction de l'inverse de la température pour différents densité électronique.

- La variation d'élargissement électronique est faible pour les '*petites*' valeurs de densité électronique.

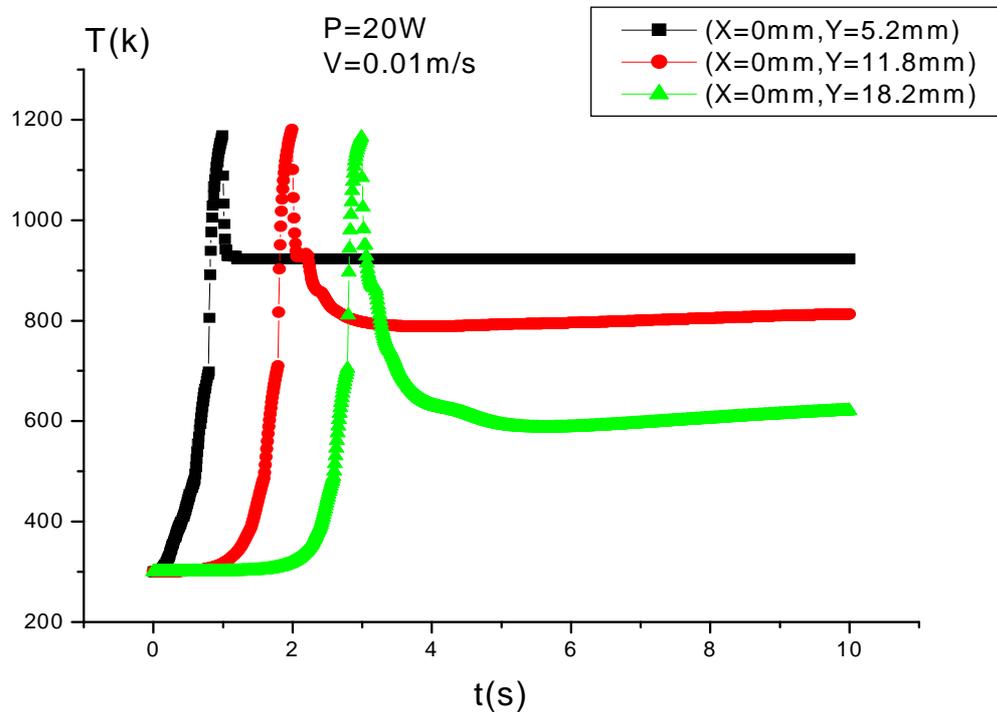
### III.6. Profil de raie du magnésium dans les conditions de la soudure

#### III.6.1. Variation des températures et des densités électroniques dans les conditions de la soudure

Dans la suite de ces paragraphes nous allons faire des calculs des élargissements électroniques et des profils de raies dans les conditions de soudure aux lasers. Les données et les paramètres de soudage utilisés sont celles du mémoire de master de S. Khemgani [34] :

- Les dimensions de la surface étudiée de deux plaques métalliques de : 600 mm x 40 mm.
- La longueur d'onde du faisceau laser 10.6  $\mu\text{m}$ .
- La puissance du laser : 20 W.
- La vitesse du laser =0.01 m/s.
- Le diamètre du spot laser : 0.4 mm.

La figure III.19 présente la variation des profils de la température suivant  $X=0$  qui présente le cordon de soudure dans des positions différentes de  $Y$  et pour un laser de puissance  $P=20W$  et de vitesse de soudure de  $0.01\text{ m/s}$ .



**Figure III.19** : Variation de la température en fonction du temps [34].

Les valeurs des températures et les durées correspondantes sont relevées des calculs de la variation de la température en fonction du temps la figure III.19. Le tableau III.8 présente les valeurs utilisées. Pour les densités électroniques nous avons proposé des valeurs permettant de faire un calcul estimatif.

**Tableau III.8 :** Les durées et les températures et les densités électronique de soudage pour 10s.

période	$\Delta t_i$ (s)	T (K)	Ne (cm <sup>-3</sup> )
1	0.91	302.46	1e16
2	0.29	323.47	1e16
3	0.04	345.17	1e16
4	0.03	355.01	1e16
5	0.12	378.43	1e16
6	0.16	449.34	5e16
7	0.05	551	5e16
8	0.13	672.7	5e16
9	0.02	946.67	2e17
10	0.01	1029.31	5e17
11	0.03	1085.05	5e17
12	0.02	1127.06	1e18
13	0.02	1151.45	1e18
14	0.03	1172.60	1e18
15	0.02	1049.45	1e18
16	0.01	963.28	5e17
17	0.09	928.74	5e17
18	0.04	930.15	5e17
19	0.04	922.36	5e17
20	0.19	865.87	1e17
21	0.17	832.77	1e17
22	0.1	815.65	1e17
23	0.2	804.58	2e17
24	1.43	790.38	1e17
25	2.68	794.43	1e17
26	0.2	800.50	2e17
27	0.93	811.54	2e17

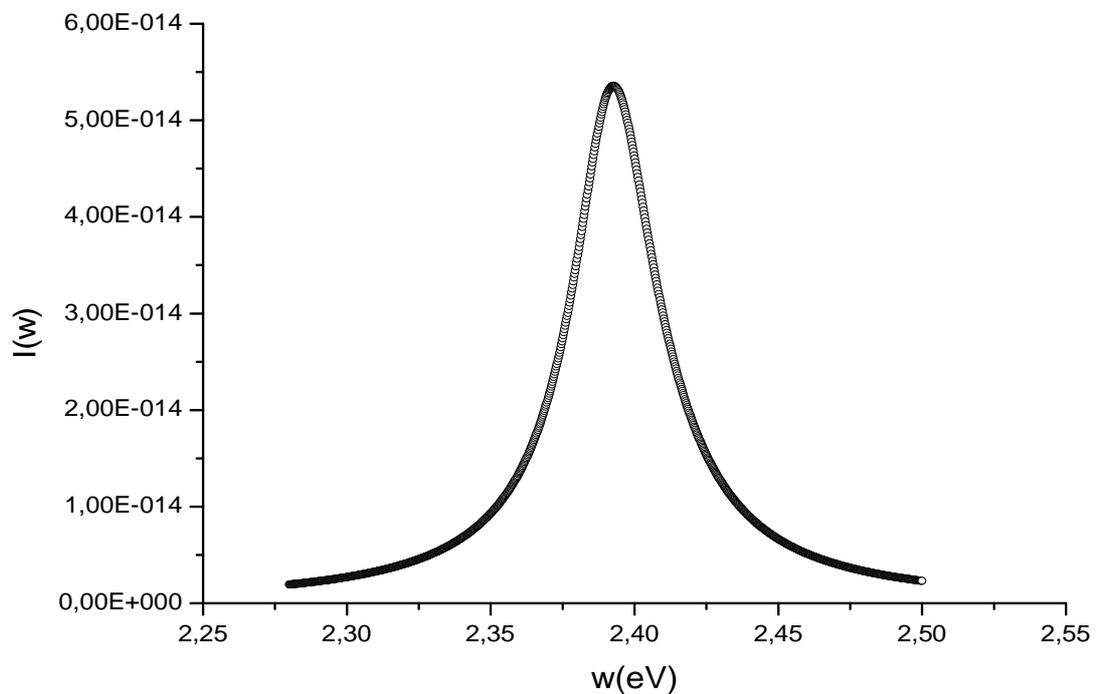
### III.6.2. Calcul de profils de raies intégré dans les conditions de la soudure

Les valeurs de densités électroniques et de températures utilisées dans les paragraphes III.4, pour le calcul des raies de Mg I, sont similaires à données instantanées des opérations

des soudures aux lasers. Ces spectres ont montré les variations des largeurs de raies et des intensités.

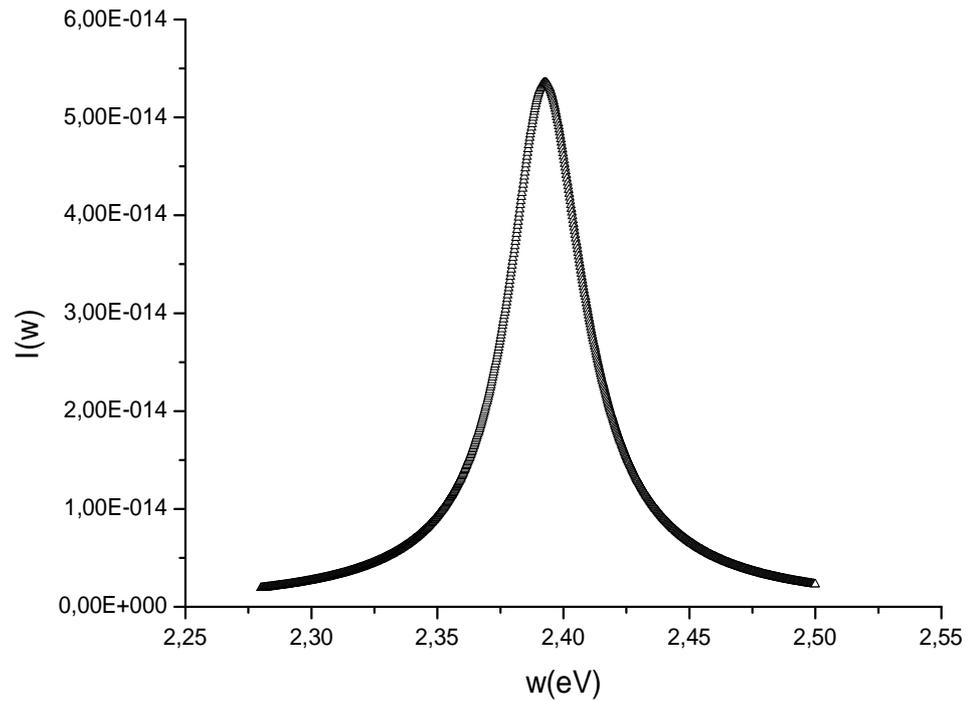
Réellement durant les opérations de soudure les températures et les densités varient avec le temps. Quelles seraient les largeurs et les formes des raies 'intégrées' durant les prises de vues de spectres expérimentaux ?

La figure III.20 présente la forme de profil des raies qui peuvent être observés dans l'opération de soudage de deux plaques de l'alliage de magnésium durant 10 s pour la position ( $x=0$ ,  $y=11.8$  mm). L'élargissement électronique 'intégré' (ou 'cumulée') est  $\Delta\omega_{\text{éle}} = 0,037934$  eV.



**Figure III.20** : Profil de la raie intégrée sur le temps de Mg I sur l'intervalle de 10 s.

La figure III.21 présente la forme de profil des raies qui peuvent être observés dans l'opération de soudage de deux plaques de l'alliage de magnésium durant 5 s pour la position ( $x=0$ ,  $y=11.8$  mm).

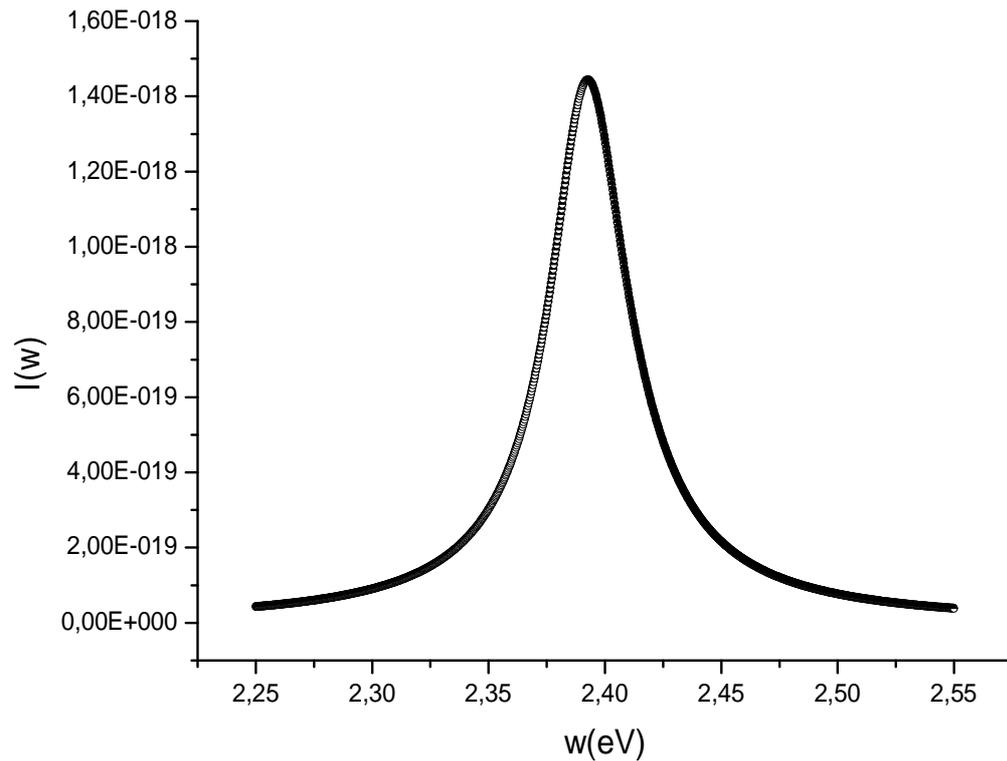


**Figure III.21 :** Profil de la raie intégrée sur le temps de Mg I sur l'intervalle de 5 s.

A partir des deux figures III.20 et III.21 on remarque que :

- On a la même largeur à mi-hauteur pour les profils intégrés sur 10 s et 5 s.
- Pour la durée de temps de 5 s jusqu' à 10 s où les températures et les densités électroniques sont faibles et presque constantes, leurs influences sur l'intensité est négligeable (intensité très faible).

La figure III.22 présente le profil de raies de Mg I dans la plage de fréquence [2.25-2.55 eV], pour une température  $T= 924$  K, et  $N_e=10^{18}$  cm<sup>-3</sup>. L'élargissement électronique 'intégré' est  $\Delta\omega_{\text{él}e}= 0,043307$  eV.



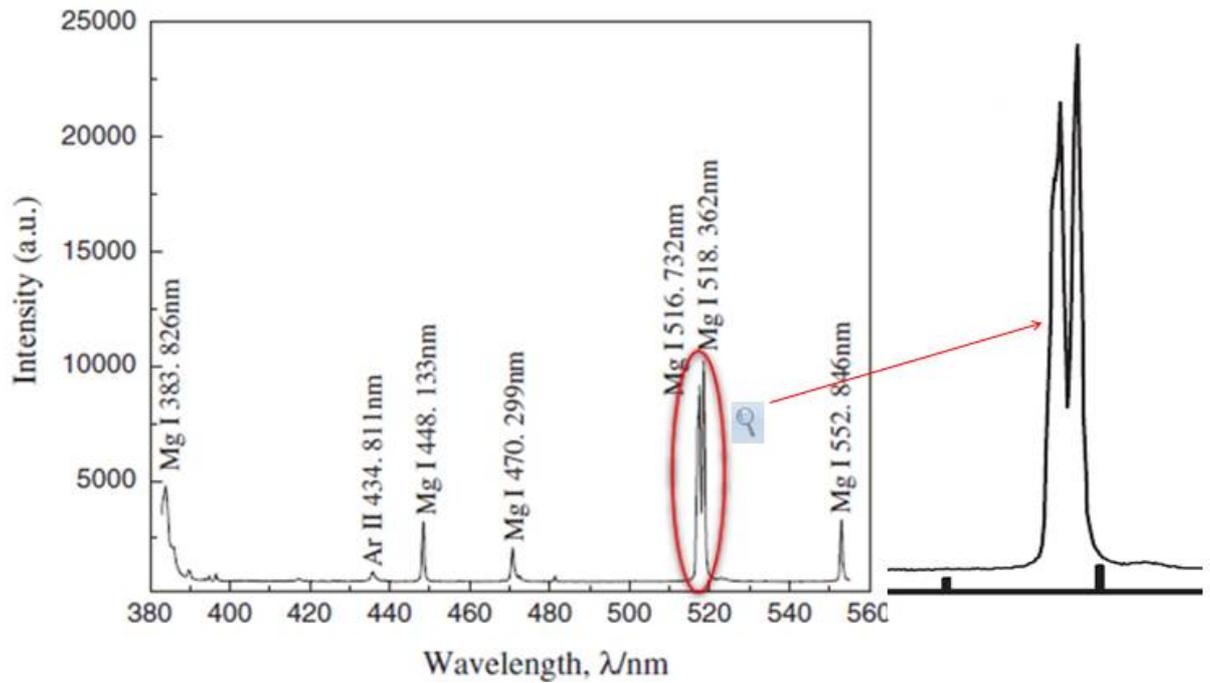
**Figure III.22 :** Profil de raie de Mg I pour  $T=924$  K,  $N_e=10^{18}$  cm<sup>-3</sup>.

La différence entre les élargissements de raie de Mg I intégré sur le temps et l'élargissement instantané peut atteindre les 14%.

### III.6.3. Spectre expérimental de Mg I lors de la soudure à l'arc

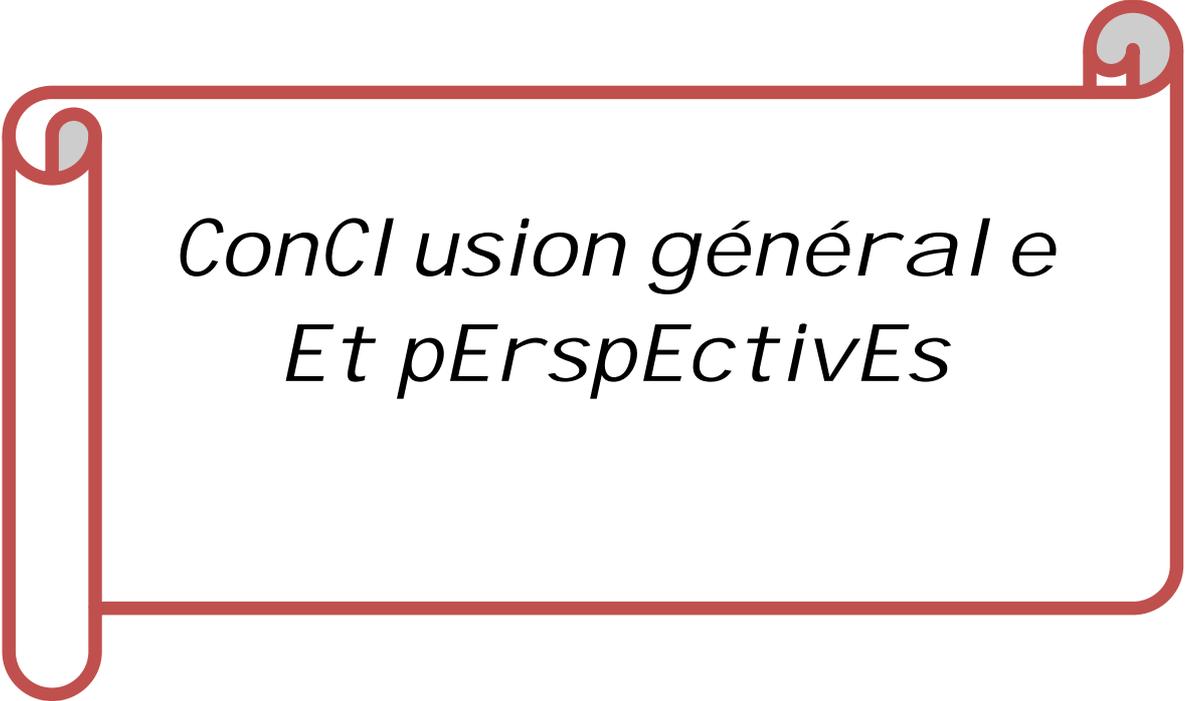
D'autres difficultés peuvent s'ajouter à l'analyse des spectres de soudure. Les plasmas correspondant peuvent présenter des conditions de plasmas Hors Equilibre Thermodynamique. Le spectre expérimental, figure III.23, de Zhaodong Zhang et Fan Zhang [14] du Mg I lors de la soudure à l'arc montre une '*inversion de population*' des niveaux des raies 5183.6043 Å et 5167.3213 Å de Mg I.

A l'ETL le rapport d'intensité des raies est de 20.20 alors que le rapport expérimental est de 1.27 pour une densité électronique de  $2.49 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-3</sup> et une température de 5000 K. A noter que ces valeurs ont été déterminées par les auteurs en utilisant le diagramme de Boltzmann sur les raies de Mg I ( $\lambda=383.829, 470.299, 516.732, 517.268, 552.840$  nm).



**Figure III.23 :** Spectre expérimental de Mg I lors de soudure à l'arc [14].

La largeur électronique de la raie 5167.3213 Å d'après l'expression proposée par l'auteur ( $\Delta\lambda = 2wN_e 10^{-16}$  avec  $w = 0.0256$  nm et  $N_e = 2.49 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>) est  $\Delta\omega_{\text{exp}} = 1.27$  Å ; la valeur totale relevée du spectre expérimental est  $\Delta\omega_{\text{exp}} = 8.3$  Å. Notre calcul donne pour les mêmes conditions ( $N_e = 2.49 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-3</sup> et  $T = 5000$  K) et en ajoutant les rapports de population,  $\Delta\omega_{\text{éle}} = 4.18$  Å pour l'élargissement électronique et  $\Delta\omega_{\text{totale}} = 7.06$  Å pour l'élargissement tenant compte de l'élargissement Doppler. Cette valeur est en bon accord avec le résultat expérimental. Dans ces conditions de températures la largeur Doppler ne peut être négligé.



*ConCl usion général e  
Et pErspEctivEs*

## Conclusion générale et perspectives

Les procédés de soudage sont nombreux; on note, entre autres le soudage par les faisceaux lasers qui permettent de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Les plasmas résultant de ces procédés émettent du rayonnement, ceci dépend de la densité, du degré d'ionisation et de la température du gaz.

Le diagnostic dans les plasmas peut être réalisé et développé par des méthodes spectroscopiques. L'analyse du spectre des raies émises par le plasma (les positions des raies, les élargissements, les intensités et les profils des raies) permet de définir les différentes espèces et leurs degrés d'ionisation, ainsi que les conditions physiques telles que les températures, les densités et les vitesses. Les émissions atomiques peuvent provenir du gaz plasma ou d'un élément traceur.

Dans ce mémoire Nous avons étudié l'élargissement électronique de certaines raies d'élément de magnésium neutre (Mg I) et de magnésium ionisé (Mg II) dans les plasmas et dans les plasmas de soudage laser en particulier.

Nous avons présenté les notions de base nécessaires et nous avons étudié les élargissements des raies de Mg I ( $^3P^0-^3D$ ), ( $^1P^0-^1D$ ) et de Mg II ( $^2D-^2F_0$ ), pour les températures de l'ordre de 6000 K et les densités électroniques de l'ordre de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Nous avons développé la formule utilisée par **H. W Darwin et F. Emard** [3], et nous avons proposé d'utiliser une constante  $\beta$  dépendante à la fois de la densité électronique  $N_e$  et de la température électronique  $T_e$ . Les résultats de calcul nous donnent un bon accord avec les résultats expérimentaux de **M. Cvejić et al.** [4], L'écart est de l'ordre de (1% à 15%).

Nous avons calculé l'élargissement électronique de certaines raies de Mg I et Mg II dans les conditions de soudure, pour des densités électroniques  $N_e$  (de  $5 \cdot 10^{16}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) et des températures  $T$  (de 300 à 1550 K).

Les résultats obtenus montrent que :

- L'élargissement électronique augmente lorsque la densité électronique augmente ; la variation est linéaire.
- La Variation de l'élargissement électronique est fonction de la température en  $\frac{1}{\sqrt{T}}$ . Cette variation est très faible pour les basses densités électroniques (de l'ordre de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) ; lorsque la densité électronique augmente cette variation augmente.
- Le rapport d'intensité entre raies varie aussi avec la densité et la température.

Pour le Mg I, nous avons calculé l'élargissement électronique des raies dans la plage de fréquences [2.25-2.55eV]. Les conditions expérimentales de soudure montrent que les

profils de raies intégrés peuvent être très différents suivant le temps et la durée de prise de spectres. La différence entre les élargissements de raie de Mg I intégré sur le temps et l'élargissement instantané peut atteindre les 14%.

Nos calculs des élargissements électroniques et Doppler, à l'ETL, des raies de Mg I donnent de bons accords avec les largeurs de raies de spectres expérimentaux obtenus par **Zhaodong Zhang et Fan Zhang** [14] lors de soudure à l'arc. Ces derniers sont des conditions hors ETL.

Pour les perspectives, il serait utile :

- D'étudier d'autres modèles de l'élargissement électronique ;
- De calculer avec précision la contribution de l'élargissement Stark ionique ;
- D'étudier la dynamique du plasma de soudure aux lasers pour une détermination plus réaliste des variations des températures et des densités avec le temps ;
- D'étudier les états d'équilibre thermodynamique de ces milieux. Des spectres expérimentaux montrent que ces milieux sont hors équilibre thermodynamique.
- D'étudier les conditions expérimentales, en particulier les durées de prises de vues des spectres et les caractéristiques des spectrophotomètres.



# *RéféRences*

---

---

## Références

- [1] Y. Robert ; « simulation numérique de soudage TA6V par laser YAG impulsif: caractérisation expérimentale modélisation aspects thermomécaniques associées à ce procédé » ; Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, (2007).
- [2] G. Murry, « Soudage et soudabilité métallurgique des métaux » ; Technique de l'ingénieur, M715, (1994).
- [3] H. W. Darwin et F. Emard ; « Optical escape factors for bound-bound and free-bound radiation from plasmas » ; Centre d'études Nucléaires, Fontenay-aux-Roses (France), (1973).
- [4] M. Cvejić , M.R. Gavrilović , S. Jovićević , N. Konjević ; « Stark broadening of Mg I and Mg II spectral lines and Debye shielding effect in laser induced plasma » ; Spectrochimica Acta Part B 85, pp 20–33, (2013).
- [5] C. Ferdinand ; « Mise en oeuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d'alliages de Titane réfractaires » ; Toulouse, (2005).
- [6] 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).
- [7] A. Belhadj ; « Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser Application aux alliages de magnésium » ; Thèse de Doctorat ; l'Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis, (2009).
- [8] M. Mostafa ; « Etude du perçage et du soudage laser: dynamique du capillaire » ; Thèse de Doctorat ; Université de Bourgogne, (2012).
- [9] A. R. Konuk, R.G.K.M. Aarts, A.J. Huis in 't Veld, T. Sibillano, D. Rizzi et A. Ancona « Process Control of Stainless Steel Laser Welding using an Optical Spectroscopic Sensor » Physics Procedia **12** pp 744–751, (2011).
- [10] D. Lacroix ; « Etude spectroscopique des plasmas de soudage laser: application au transfert d'énergie » ; Thèse de doctorat ; Université de Henri Poincaré, Nancy 1, (1997).
- [11] 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).
- [12] T. Sibillano, A. Ancona, D. Rizzia, S. Saludes Rodil, J. Rodriguez Nieto, A.R.

- Konuk, R. Aarts, A.J. Huis in 't Veld ; « Study on the correlation between plasma electron temperature and penetration depth in laser welding processes » ; Physics Procedia 5 pp 429–436, (2010).
- [13] M. Sassi, L. Pierre, J. Bdnard et C. Cahen ; « Calcul et mesure de la tempdrature d'un plasma h l'aide des raies d'mission du cuivre » ; J. Phys III Franc-e 4 pp 123-141, (1994).
- [14] Zhaodong Zhang et Fan Zhang ; « Spectral Analysis of Welding Plasma of Magnesium Alloy Using Flux Coated Wire » ; Materials Transactions, Vol. **50**, No. 8 pp. 1909-1914, (2009).
- [15] S. Gurrída ; « Etude de la soudure au laser en industrie » ; Mémoire de master ; Université de Ouargla, (2012).
- [16] M. Colombié et Laëtítia Kirschner « Matériaux Métalliques » ; 2e édition Dunod, Paris, (2001, 2008).
- [17] B. L. Mordike ; T. Ebert ; « Magnesium — Properties — applications — potential » Materials Science and Engineering A **302**, pp 37–45, (2001).
- [18] C. S. Ditz ; « Recycling of Magnesium Alloys, Magnesium-Alloys and Technology », (2004).
- [19] P. Fauchais et E. Bourdin ; « la chimie des plasmas et ses débouchés a court terme sur des synthèses inorganiques a caractère industriel » ; Journal de physique, colloque c3, Vol. **38**, p. C3-111, (1977).
- [20] P. Freton, J. J. Gonzalezm, A. Gleizes, F camy peyret, G. caillibotte et M. Delzenne ; « Numerical and experimental study of a plasma cutting torche » ; J. Phys. D: appl. Phys.**35**, pp 115-131, (2000).
- [21] F. Khelfaoui ; « Modèles de profils Stark d'ions multichargés dans les plasmas chauds » ; Thèse de doctorat ; Université de Provence, France (1991).
- [22] B. Held ; « Physique des plasmas froids », Masson, Paris (1994).
- [23] J. L. Delcroix et A. Bers ; « Physique des plasmas » ; Volume **1**. InterEditions, Paris (1994).
- [24] H. R. Griem, « Spectral line broadening by plasma », Mc Graw-Hill, New-York, (1964).
- [25] F. Khelfaoui ; « Cours de Physique Atomique » ; Master de Physique, (2013).
- [26] S. Yugeswaran et V. Selvarajan; « Electron number density measurement on a DC argon plasma jet by stark broadening of Ar I spectral line », Vacuum, Vol. **81**, no 3, pp. 347–352, (2006).
- [27] O. A. Bukin, I.V. Bazarov, A. Yu. Maior, N.S. Bodin, A.A. II'in, V.I. Tsarev, et V.D. Kiselev ; « Estimation of the fulfilment of the local thermodynamic equilibrium criterion for

- the plasma generated by laser pulses of various shapes at the surface of a solid target » ; Russian Physics Journal, Vol, **44**, No. 5, (2001).
- [28] G. Bekefi, C. Deutsch et B. Yaakobi; « Spectroscopic diagnostics of laser plasmas », John Wiley Sons, New York, (1976).
- [29] S. S. Harilal, C. V. Bindhu, Riju C. Issac, V. P. N. Nampoori, and C. P. G.Vallabhana; J. Appl. Phys. Vol. **82**, No. **5**, (1997).
- [30] « Nist atomic spectra database » ; site web: <http://physics.nist.gov/asd3> ; consulté le 21-02-2016.
- [31] A. Calisti, F. Khelfaoui, R. Stamm, B. Talin et R.W. Lee ; « Model for the Line Shapes of Complex Ions in Hot and Dense Plasmas » ; Phys. Rev. A **42**, p 5433, (1990).
- [32] H. R. Griem ; « Spectral Line Broadening by Plasmas » ; Academic Press, New York, (1974).
- [33] M. S. Dimitrijević, S. Sahal- Bréchet ; « Stark broadening parameter tables for Mg I lines of interest for solar and stellar spectra research » ; I, Bull. Astron. Belgrade 149 pp 31–84, (1994).
- [34] S. Khemgani ; « Etude du rayonnement thermique lors de la soudure au Laser de plaques métalliques » ; mémoire master ; Université de Ouargla, (2014).



# *Annexes*

## 1. Base de données atomiques du magnésium neutre (Mg I) :

longueur d'onde (Å)	$A_{ki}$ ( $S^{-1}$ )	$f_{ik}$	$S_{ik}$	$E_i$ (eV)	$E_k$ (eV)	niveau bas i	niveau haut k	gi	gk
4 057.5052	1.02e+07	4.20e-02	1.68e+00	4.3458028	7.4006156	3s3p	3s8d	3	5
4 071.729	4.71e-04	-	1.77e+02	2.7091049	5.7532468	3s3p	3s3d	1	5
4 075.058	1.05e-03	-	3.96e+02	2.7115919	5.7532468	3s3p	3s3d	3	5
4 081.832	8.09e-04	-	3.08e+02	2.7166398	5.7532468	3s3p	3s3d	5	5
4 099.787	1.71e+06	4.32e-03	2.92e-01	6.9813494	10.004658	3s5d	3p3d	5	5
4 167.2713	1.38e+07	6.00e-02	2.47e+00	4.3458028	7.3201534	3s3p	3s7d	3	5
4 351.9057	1.84e+07	8.70e-02	3.74e+00	4.3458028	7.1939656	3s3p	3s6d	3	5
4 409.923	7.68e+05	2.24e-03	1.63e-01	7.1939656	10.004658	3s6d	3p3d	5	5
4 562.602	3.98e-03	-	2.64e+03	0.000000	2.7166398	2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup>	3s3p	1	5
4 571.0956	2.54e+02	2.38e-06	3.59e-05	0.000000	2.7115919	2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup>	3s3p	1	3
4 575.292	5.8e-04	1.8e-12	2.7e-11	0.000000	2.7091049	2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup>	3s3p	1	1
4 630.015	2.04e-03	-	2.91e+02	2.7166398	5.3937258	3s3p	3s4s	5	1
4 702.9908	2.19e+07	1.21e-01	5.62e+00	4.3458028	6.9813494	3s3p	3s5d	3	5
4 730.0286	1.34e+06	1.50e-03	7.01e-02	4.3458028	6.9662844	3s3p	3s6s	3	1
5 167.3213	1.13e+07	1.35e-01	2.30e+00	2.7091049	5.1078269	3s3p	3s4s	1	3
5 172.6844	3.37e+07	1.35e-01	6.92e+00	2.7115919	5.1078269	3s3p	3s4s	3	3
5 183.6043	5.61e+07	1.36e-01	1.16e+01	2.7166398	5.1078269	3s3p	3s4s	5	3
5 528.4047	1.39e+07	1.06e-01	5.79e+00	4.3458028	6.5878559	3s3p	3s4d	3	5
5 711.0880	3.86e+06	6.30e-03	3.55e-01	4.3458028	6.5161390	3s3p	3s5s	3	1
6 318.717	2.63e+05	2.63e-03	1.64e-01	5.1078269	7.0694581	3s4s	3s6p	3	5
6 319.237	2.64e+05	1.58e-03	9.86e-02	5.1078269	7.0692967	3s4s	3s6p	3	3
6 319.495	2.63e+05	5.25e-04	3.28e-02	5.1078269	7.0692167	3s4s	3s6p	3	1
7 060.414	8.51e+05	8.91e-03	1.04e+00	5.7532468	7.5088099	3s3d	3s10f	5	7
7 193.184	1.18e+06	1.28e-02	1.52e+00	5.7532468	7.4764062	3s3d	3s9f	5	7
7 291.055	6.27e+04	1.50e-03	3.60e-02	5.3937258	7.0937549	3s4s	3s6p	1	3
7 387.689	1.74e+06	2.00e-02	2.43e+00	5.7532468	7.4310387	3s3d	3s8f	5	7
7 573.180	9.67e-05	-	4.68e-06	2.7091049	4.3458028	3s3p	3s3p	1	3
7 584.705	7.22e-05	-	3.51e-06	2.7115919	4.3458028	3s3p	3s3p	3	3
7 608.206	1.19e-04	-	5.86e-06	2.7166398	4.3458028	3s3p	3s3p	5	3
7 657.603	1.23e+06	1.80e-02	1.36e+00	5.1078269	6.7264807	3s4s	3s5p	3	5
7 659.152	1.23e+06	1.08e-02	8.17e-01	5.1078269	6.7261534	3s4s	3s5p	3	3
7 659.901	1.23e+06	3.61e-03	2.73e-01	5.1078269	6.7259950	3s4s	3s5p	3	1
7 691.553	2.66e+06	3.30e-02	4.18e+00	5.7532468	7.3647559	3s3d	3s7f	5	7
7 875.43	2.54e+05	7.09e-03	1.84e-01	5.9315427	7.505426	3s4p	3s10d	1	3
7 877.48	1.90e+05	1.77e-03	1.38e-01	5.9319513	7.505426	3s4p	3s10d	3	3
7 877.48	3.43e+05	5.32e-03	4.14e-01	5.9319513	7.505426	3s4p	3s10d	3	5
7 881.669	4.56e+05	5.95e-03	7.72e-01	5.9327879	7.505426	3s4p	3s10d	5	7
7 881.67	1.14e+05	1.06e-03	1.38e-01	5.9327879	7.505426	3s4p	3s10d	5	5
7 881.67	1.27e+04	7.08e-05	9.19e-03	5.9327879	7.505426	3s4p	3s10d	5	3
7 930.794	8.41e+04	7.93e-04	1.04e-01	5.9459135	7.5088099	3s3d	3s10f	5	5
7 930.794	4.78e+05	6.32e-03	8.25e-01	5.9459135	7.5088099	3s3d	3s10f	5	7

## 2. Base de données atomiques du magnésium ionisé (Mg II) :

longueur d'onde (Å)	$A_{ki}(S^{-1})$	$f_{ik}$	$S_{ik}$	$E_i$ (eV)	$E_k$ (eV)	niveau bas i	niveau haut k	gi	gk
2 217.006	9.63e+04	7.10e-05	1.04e-03	8.654711	14.245386	2p64s	2p69p	2	2
2 253.869	1.07e+07	1.09e-02	4.85e-01	8.863654	14.362900	2p63d	2p69f	6	8
2 253.869	7.15e+05	5.45e-04	2.43e-02	8.863654	14.362900	2p63d	2p69f	6	6
2 253.913	1.00e+07	1.15e-02	3.40e-01	8.863762	14.362900	2p63d	2p69f	4	6
2 302.986	3.69e+05	1.96e-04	8.91e-03	8.863654	14.245626	2p63d	2p69p	6	4
2 303.032	4.11e+04	3.27e-05	9.91e-04	8.863762	14.245626	2p63d	2p69p	4	4
2 303.134	4.05e+05	1.61e-04	4.88e-03	8.863762	14.245386	2p63d	2p69p	4	2
2 312.597	9.81e+04	1.57e-04	2.40e-03	8.654711	14.014317	2p64s	2p68p	2	4
2 312.749	1.07e+05	8.56e-05	1.30e-03	8.654711	14.013965	2p64s	2p68p	2	2
2 329.562	9.07e+05	7.39e-04	3.40e-02	8.863654	14.184232	2p63d	2p68f	6	6
2 329.562	1.36e+07	1.48e-02	6.79e-01	8.863654	14.184232	2p63d	2p68f	6	8
2 329.609	1.27e+07	1.55e-02	4.77e-01	8.863762	14.184232	2p63d	2p68f	4	6
2 406.418	5.26e+05	3.05e-04	1.45e-02	8.863654	14.014317	2p63d	2p68p	6	4
2 406.469	5.87e+04	5.10e-05	1.62e-03	8.863762	14.014317	2p63d	2p68p	4	4
2 406.633	5.79e+05	2.51e-04	7.97e-03	8.863762	14.013965	2p63d	2p68p	4	2
2 449.561	1.44e+06	1.30e-03	6.27e-02	8.863654	13.923608	2p63d	2p67f	6	6
2 449.561	2.16e+07	2.59e-02	1.25e+00	8.863654	13.923608	2p63d	2p67f	6	8
2 449.613	2.02e+07	2.72e-02	8.78e-01	8.863762	13.923608	2p63d	2p67f	4	6
2 474.314	9.15e+04	1.68e-04	2.74e-03	8.654711	13.664049	2p64s	2p67p	2	4
2 474.584	1.02e+05	9.36e-05	1.53e-03	8.654711	13.663502	2p64s	2p67p	2	2
2 582.019	8.28e+05	5.52e-04	2.82e-02	8.863654	13.664049	2p63d	2p67p	6	4
2 582.077	9.23e+04	9.23e-05	3.14e-03	8.863762	13.664049	2p63d	2p67p	4	4
2 582.371	9.09e+05	4.55e-04	1.55e-02	8.863762	13.663502	2p63d	2p67p	4	2
2 660.754	3.81e+07	5.39e-02	2.84e+00	8.863654	13.522008	2p63d	2p66f	6	8
2 660.756	2.54e+06	2.70e-03	1.42e-01	8.863654	13.522004	2p63d	2p66f	6	6
2 660.817	3.56e+07	5.67e-02	1.99e+00	8.863762	13.522004	2p63d	2p66f	4	6
2 790.542	3.20e+04	7.47e-05	1.37e-03	8.654711	13.096416	2p64s	2p66p	2	4
2 790.777	4.01e+08	9.37e-01	1.72e+01	4.422431	8.863762	2p63p	2p63d	2	4
2 791.117	4.02e+04	4.70e-05	8.63e-04	8.654711	13.095501	2p64s	2p66p	2	2
2 795.528	2.60e+08	6.08e-01	1.12e+01	0.0	4.433784	2p63s	2p63p	2	4
2 797.930	7.98e+07	9.38e-02	3.46e+00	4.433784	8.863762	2p63p	2p63d	4	4
2 797.998	4.79e+08	8.44e-01	3.11e+01	4.433784	8.863654	2p63p	2p63d	4	6
2 802.705	2.57e+08	3.03e-01	5.60e+00	0.0	4.422431	2p63s	2p63p	2	2
2 842.097	1.25e+06	3.03e-03	5.68e-02	9.995544	14.356681	2p64p	2p69d	2	4
2 844.479	1.89e+06	2.30e-03	4.30e-02	9.995544	14.353029	2p64p	2p610s	2	2
2 844.566	2.46e+05	2.99e-04	1.12e-02	9.999328	14.356681	2p64p	2p69d	4	4
2 844.570	1.48e+06	2.70e-03	1.01e-01	9.999328	14.356675	2p64p	2p69d	4	6
2 846.952	3.77e+06	2.29e-03	8.60e-02	9.999328	14.353029	2p64p	2p610s	4	2
2 928.299	1.43e+06	1.22e-03	7.08e-02	8.863654	13.096416	2p63d	2p66p	6	4
2 928.374	1.59e+05	2.04e-04	7.89e-03	8.863762	13.096416	2p63d	2p66p	4	4
2 928.633	1.15e+08	1.48e-01	2.86e+00	4.422431	8.654711	2p63p	2p64s	2	2
2 929.007	1.57e+06	1.01e-03	3.89e-02	8.863762	13.095501	2p63d	2p66p	4	2
2 936.510	2.30e+08	1.49e-01	5.75e+00	4.433784	8.654711	2p63p	2p64s	4	2

2 936.510	2.85e-03	-	8.37e+01	4.433784	8.654711	2p63p	2p64s	4	2
2 965.328	1.67e+06	4.40e-03	8.59e-02	9.995544	14.175453	2p64p	2p68d	2	4
2 968.015	3.28e+05	4.34e-04	1.70e-02	9.999328	14.175453	2p64p	2p68d	4	4
2 968.020	1.98e+06	3.92e-03	1.53e-01	9.999328	14.175446	2p64p	2p68d	4	6
2 969.148	2.25e+06	2.98e-03	5.83e-02	9.995544	14.170075	2p64p	2p69s	2	2
2 971.842	4.49e+06	2.98e-03	1.17e-01	9.999328	14.170075	2p64p	2p69s	4	2
3 104.721	5.31e+06	7.68e-03	4.71e-01	8.863654	12.855904	2p63d	2p65f	6	6
3 104.715	7.97e+07	1.54e-01	9.42e+00	8.863654	12.855912	2p63d	2p65f	6	8
3 104.805	7.44e+07	1.61e-01	6.60e+00	8.863762	12.855904	2p63d	2p65f	4	6
3 165.879	2.89e+06	8.68e-03	1.81e-01	9.995544	13.910676	2p64p	2p67d	2	4
3 168.941	5.69e+05	8.57e-04	3.58e-02	9.999328	13.910676	2p64p	2p67d	4	4
3 168.954	3.43e+06	7.75e-03	3.23e-01	9.999328	13.910661	2p64p	2p67d	4	6
3 172.708	3.41e+06	5.15e-03	1.08e-01	9.995544	13.902249	2p64p	2p68s	2	2
3 175.784	6.81e+06	5.15e-03	2.15e-01	9.999328	13.902249	2p64p	2p68s	4	2
3 534.970	5.80e+06	2.17e-02	5.06e-01	9.995544	13.501904	2p64p	2p66d	2	4
3 538.789	1.15e+06	2.15e-03	1.00e-01	9.999328	13.501904	2p64p	2p66d	4	4
3 538.812	6.90e+06	1.94e-02	9.06e-01	9.999328	13.501882	2p64p	2p66d	4	6
3 549.513	5.64e+06	1.07e-02	2.49e-01	9.995544	13.487538	2p64p	2p67s	2	2
3 553.364	1.12e+07	1.07e-02	4.99e-01	9.999328	13.487538	2p64p	2p67s	4	2
3 613.780	1.79e+05	7.03e-04	1.67e-02	8.654711	12.084606	2p64s	2p65p	2	4
3 615.583	1.56e+05	3.06e-04	7.28e-03	8.654711	12.082895	2p64s	2p65p	2	2
3 848.211	2.96e+06	4.38e-03	3.33e-01	8.863654	12.084606	2p63d	2p65p	6	4
3 848.340	3.29e+05	7.31e-04	3.70e-02	8.863762	12.084606	2p63d	2p65p	4	4
3 850.386	3.24e+06	3.60e-03	1.83e-01	8.863762	12.082895	2p63d	2p65p	4	2
4 368.54	2.46e+05	4.70e-04	4.06e-02	11.569039	[14.40636]	2p64d	2p610p	6	4
4 368.64	2.74e+04	7.84e-05	4.51e-03	11.569103	[14.40636]	2p64d	2p610p	4	4
4 368.91	2.74e+05	3.92e-04	2.26e-02	11.569103	[14.40618]	2p64d	2p610p	4	2
4 384.637	1.45e+07	8.38e-02	2.42e+00	9.995544	12.822446	2p64p	2p65d	2	4
4 390.514	2.88e+06	8.32e-03	4.81e-01	9.999328	12.822446	2p64p	2p65d	4	4
4 390.572	1.73e+07	7.50e-02	4.34e+00	9.999328	12.822408	2p64p	2p65d	4	6
4 427.994	1.05e+07	3.10e-02	9.05e-01	9.995544	12.794766	2p64p	2p66s	2	2
4 433.988	2.10e+07	3.10e-02	1.81e+00	9.999328	12.794766	2p64p	2p66s	4	2
4 436.491	6.38e+06	2.51e-02	2.20e+00	11.569039	14.362900	2p64d	2p69f	6	8
4 436.491	4.25e+05	1.26e-03	1.10e-01	11.569039	14.362900	2p64d	2p69f	6	6
4 436.593	5.95e+06	2.64e-02	.54e+00	11.569103	14.362900	2p64d	2p69f	4	6
4 481.126	2.33e+08	9.35e-01	.27e+01	8.863654	11.629687	2p63d	2p64f	6	8
4 481.150	1.55e+07	4.67e-02	4.14e+00	8.863654	11.629672	2p63d	2p64f	6	6
4 481.325	2.17e+08	9.81e-01	5.79e+01	8.863762	11.629672	2p63d	2p64f	4	6
4 521.938	5.58e+03	3.42e-05	1.02e-03	11.504557	14.245626	2p65s	2p69p	2	4
4 522.333	6.83e+03	2.10e-05	6.24e-04	11.504557	14.245386	2p65s	2p69p	2	2
4 545.253	1.15e+05	2.38e-04	2.14e-02	11.629672	14.356681	2p64f	2p69d	6	4
4 545.263	5.47e+03	1.70e-05	1.52e-03	11.629672	14.356675	2p64f	2p69d	6	6
4 545.288	1.10e+05	2.55e-04	3.05e-02	11.629687	14.356675	2p64f	2p69d	8	6
4 581.474	1.95e-06	-	2.79e-08	8.863654	11.569103	2p63d	2p64d	6	4
4 581.474	2.36e+01	-	1.71e+02	8.863654	11.569103	2p63d	2p64d	6	4
4 581.584	2.03e-05	-	4.34e-07	8.863654	11.569039	2p63d	2p64d	6	6

4 581.584	6.30e+01	-	6.82e+02	8.863654	11.569039	2p63d	2p64d	6	6
4 581.657	5.42e-06	-	7.73e-08	8.863762	11.569103	2p63d	2p64d	4	4
4 581.657	5.51e+01	-	3.98e+02	8.863762	11.569103	2p63d	2p64d	4	4
4 581.766	3.74e-07	-	8.00e-09	8.863762	11.569039	2p63d	2p64d	4	6
4 581.766	1.57e+01	-	1.71e+02	8.863762	11.569039	2p63d	2p64d	4	6
4 630.878	2.75e+05	5.89e-04	5.39e-02	11.569039	14.245626	2p64d	2p69p	6	4
4 630.990	3.06e+04	9.85e-05	6.01e-03	11.569103	14.245626	2p64d	2p69p	4	4
4 631.404	3.01e+05	4.84e-04	2.95e-02	11.569103	14.245386	2p64d	2p69p	4	2
4 739.593	8.09e+06	3.63e-02	3.40e+00	11.569039	14.184232	2p64d	2p68f	6	8
4 739.593	5.39e+05	1.82e-03	1.70e-01	11.569039	14.184232	2p64d	2p68f	6	6
4 739.709	7.55e+06	3.82e-02	2.38e+00	11.569103	14.184232	2p64d	2p68f	4	6
4 868.837	7.10e+03	2.52e-05	2.43e-03	11.629672	14.175446	2p64f	2p68d	6	6
4 868.823	1.50e+05	3.55e-04	3.41e-02	11.629672	14.175453	2p64f	2p68d	6	4
4 868.866	1.41e+05	3.75e-04	4.81e-02	11.629687	14.175446	2p64f	2p68d	8	6
4 938.703	1.33e+03	9.72e-06	3.16e-04	11.504557	14.014317	2p65s	2p68p	2	4
4 939.396	2.11e+03	7.73e-06	2.52e-04	11.504557	14.013965	2p65s	2p68p	2	2
5 068.938	3.97e+05	1.02e-03	1.02e-01	11.569039	14.014317	2p64d	2p68p	6	4
5 069.072	4.43e+04	1.71e-04	1.14e-02	11.569103	14.014317	2p64d	2p68p	4	4
5 069.802	4.35e+05	8.39e-04	5.61e-02	11.569103	14.013965	2p64d	2p68p	4	2
5 157.628	4.37e+05	3.49e-03	1.19e-01	12.082895	14.486125	2p65p	2p610d	2	4
5 161.302	8.73e+04	3.49e-04	2.37e-02	12.084606	14.486125	2p65p	2p610d	4	4
5 161.310	5.24e+05	3.14e-03	2.13e-01	12.084606	14.486121	2p65p	2p610d	4	6
5 264.220	1.27e+07	7.05e-02	7.33e+00	11.569039	13.923608	2p64d	2p67f	6	8
5 264.220	8.47e+05	3.52e-03	3.66e-01	11.569039	13.923608	2p64d	2p67f	6	6
5 264.364	1.19e+07	7.40e-02	5.13e+00	11.569103	13.923608	2p64d	2p67f	4	6
5 434.034	1.16e+04	5.15e-05	5.53e-03	11.629672	13.910661	2p64f	2p67d	6	6
5 433.999	2.45e+05	7.24e-04	7.77e-02	11.629672	13.910676	2p64f	2p67d	6	4
5 434.070	2.33e+05	7.74e-04	1.11e-01	11.629687	13.910661	2p64f	2p67d	8	6
5 451.250	1.03e+06	9.14e-03	3.28e-01	12.082895	14.356681	2p65p	2p69d	2	4
5 455.355	2.03e+05	9.04e-04	6.50e-02	12.084606	14.356681	2p65p	2p69d	4	4
5 455.370	1.22e+06	8.17e-03	5.87e-01	12.084606	14.356675	2p65p	2p69d	4	6
5 460.018	1.11e+06	4.98e-03	1.79e-01	12.082895	14.353029	2p65p	2p610s	2	2
5 464.136	2.22e+06	4.97e-03	3.58e-01	12.084606	14.353029	2p65p	2p610s	4	2
5 739.77	5.25e+03	5.19e-05	1.96e-03	11.504557	13.664049	2p65s	2p67p	2	4
5 741.22	3.67e+03	1.81e-05	6.86e-04	11.504557	13.663502	2p65s	2p67p	2	2
5 916.431	6.42e+05	2.25e-03	2.63e-01	11.569039	13.664049	2p64d	2p67p	6	4
5 916.61	7.16e+04	3.76e-04	2.93e-02	11.569103	13.664049	2p64d	2p67p	4	4
5 918.158	7.04e+05	1.85e-03	1.44e-01	11.569103	13.663502	2p64d	2p67p	4	2
5 923.365	1.40e+06	1.47e-02	5.74e-01	12.082895	14.175453	2p65p	2p68d	2	4
5 928.21	2.76e+05	1.46e-03	1.14e-01	12.084606	14.175453	2p65p	2p68d	4	4
5 928.233	1.66e+06	1.32e-02	1.03e+00	12.084606	14.175446	2p65p	2p68d	4	6
5 938.629	1.36e+06	7.18e-03	2.81e-01	12.082895	14.170075	2p65p	2p69s	2	2
5 943.501	2.71e+06	7.17e-03	5.61e-01	12.084606	14.170075	2p65p	2p69s	4	2
6 346.742	2.20e+07	1.77e-01	2.22e+01	11.569039	13.522008	2p64d	2p66f	6	8
6 346.75	1.47e+06	8.86e-03	1.11e+00	11.569039	13.522004	2p64d	2p66f	6	6
6 346.964	2.05e+07	1.86e-01	1.56e+01	11.569103	13.522004	2p64d	2p66f	4	6

6 620.438	4.61e+05	2.02e-03	2.65e-01	11.629672	13.501904	2p64f	2p66d	6	4
6 620.52	2.19e+04	1.44e-04	1.88e-02	11.629672	13.501882	2p64f	2p66d	6	6
6 620.570	4.37e+05	2.15e-03	3.76e-01	11.629687	13.501882	2p64f	2p66d	8	6
6 781.445	2.49e+06	3.43e-02	1.53e+00	12.082895	13.910676	2p65p	2p67d	2	4
6 787.80	4.92e+05	3.40e-03	3.04e-01	12.084606	13.910676	2p65p	2p67d	4	4
6 787.855	2.96e+06	3.07e-02	2.75e+00	12.084606	13.910661	2p65p	2p67d	4	6
6 812.857	2.11e+06	1.47e-02	6.60e-01	12.082895	13.902249	2p65p	2p68s	2	2
6 819.270	4.21e+06	1.47e-02	1.32e+00	12.084606	13.902249	2p65p	2p68s	4	2
7 603.27	1.17e+05	6.74e-04	1.01e-01	12.855904	14.486125	2p65f	2p610d	6	4
7 603.29	5.55e+03	4.81e-05	7.23e-03	12.855904	14.486121	2p65f	2p610d	6	6
7 603.32	1.11e+05	7.22e-04	1.45e-01	12.855912	14.486121	2p65f	2p610d	8	6
7 786.499	1.97e+05	3.59e-03	1.84e-01	11.504557	13.096416	2p65s	2p66p	2	4
7 790.977	1.84e+05	1.68e-03	8.61e-02	11.504557	13.095501	2p65s	2p66p	2	2
7 825.4	1.70e+05	1.04e-03	1.61e-01	12.822408	[14.40636]	2p65d	2p610p	6	4
7 825.6	1.88e+04	1.73e-04	1.78e-02	12.822446	[14.40636]	2p65d	2p610p	4	4
7 826.4	1.88e+05	8.64e-04	8.91e-02	12.822446	[14.40618]	2p65d	2p610p	4	2
7 877.05	4.67e-06	-	3.80e+01	9.995544	11.569103	2p64p	2p64d	2	4
7 877.054	6.58e+07	1.23e+00	6.36e+01	9.995544	11.569103	2p64p	2p64d	2	4
7 877.38	3.32e-05	-	4.06e+02	9.995544	11.569039	2p64p	2p64d	2	6
7 896.04	1.31e+07	1.23e-01	1.27e+01	9.999328	11.569103	2p64p	2p64d	4	4
7 896.04	2.03e-13	-	1.67e-06	9.999328	11.569103	2p64p	2p64d	4	4
7 896.366	7.86e+07	1.10e+00	1.15e+02	9.999328	11.569039	2p64p	2p64d	4	6
7 896.37	1.80e-04	-	2.22e+03	9.999328	11.569039	2p64p	2p64d	4	6
8 046.14	2.45e+05	2.37e-03	3.78e-01	12.822408	14.362900	2p65d	2p69f	6	6
8 046.14	3.67e+06	4.75e-02	7.55e+00	12.822408	14.362900	2p65d	2p69f	6	8
8 046.34	3.42e+06	4.98e-02	5.28e+00	12.822446	14.362900	2p65d	2p69f	4	6
8 115.225	1.22e+06	8.05e-03	1.29e+00	11.569039	13.096416	2p64d	2p66p	6	4
8 115.57	1.36e+05	1.35e-03	1.44e-01	11.569103	13.096416	2p64d	2p66p	4	4
8 120.432	1.34e+06	6.62e-03	7.09e-01	11.569103	13.095501	2p64d	2p66p	4	2
8 213.987	2.65e+07	2.68e-01	1.45e+01	9.995544	11.504557	2p64p	2p65s	2	2
8 234.636	5.29e+07	2.69e-01	2.92e+01	9.999328	11.504557	2p64p	2p65s	4	2
8 259.07	1.71e+05	1.16e-03	1.90e-01	12.855904	14.356681	2p65f	2p69d	6	4
8 259.10	8.09e+03	8.28e-05	1.35e-02	12.855904	14.356675	2p65f	2p69d	6	6
8 259.14	1.62e+05	1.24e-03	2.70e-01	12.855912	14.356675	2p65f	2p69d	8	6
8 543.22	8.70e+02	1.91e-05	1.07e-03	12.794766	14.245626	2p66s	2p69p	2	4
8 544.63	5.52e+02	6.04e-06	3.40e-04	12.794766	14.245386	2p66s	2p69p	2	2
8 709.15	1.83e+05	1.39e-03	2.38e-01	12.822408	14.245626	2p65d	2p69p	6	4
8 709.38	2.04e+04	2.32e-04	2.66e-02	12.822446	14.245626	2p65d	2p69p	4	4
8 710.85	2.00e+05	1.14e-03	1.31e-01	12.822446	14.245386	2p65d	2p69p	4	2
8 734.980	5.34e+06	1.22e-01	7.03e+00	12.082895	13.501904	2p65p	2p66d	2	4
8 745.52	1.06e+06	1.22e-02	1.40e+00	12.084606	13.501904	2p65p	2p66d	4	4
8 745.663	6.37e+06	1.10e-01	1.26e+01	12.084606	13.501882	2p65p	2p66d	4	6
8 824.318	3.69e+06	4.31e-02	2.50e+00	12.082895	13.487538	2p65p	2p67s	2	2
8 835.080	7.36e+06	4.31e-02	5.01e+00	12.084606	13.487538	2p65p	2p67s	4	2
8 913.28	3.68e+05	8.78e-03	5.15e-01	13.095501	14.486125	2p66p	2p610d	2	4
8 919.14	7.35e+04	8.77e-04	1.03e-01	13.096416	14.486125	2p66p	2p610d	4	4

8 919.17	4.41e+05	7.89e-03	9.27e-01	13.096416	14.486121	2p66p	2p610d	4	6
9 101.78	4.66e+06	7.72e-02	1.39e+01	12.822408	14.184232	2p65d	2p68f	6	8
9 101.78	3.10e+05	3.86e-03	6.94e-01	12.822408	14.184232	2p65d	2p68f	6	6
9 102.03	4.34e+06	8.10e-02	9.71e+00	12.822446	14.184232	2p65d	2p68f	4	6
9 218.250	3.64e+07	9.27e-01	5.63e+01	8.654711	9.999328	2p64s	2p64p	2	4

### 3. Durées de vie des niveaux de Mg II :

configuration	Energie (eV)	g	durée de vie $\tau$ (s <sup>-1</sup> )
2p <sup>6</sup> 3p	4.422431	2	0.3891051E-08
2p <sup>6</sup> 3p	4.433784	4	0.3846154E-08
2p <sup>6</sup> 4s	8.654711	2	0.2898551E-08
2p <sup>6</sup> 3d	8.863654	6	0.2087683E-08
2p <sup>6</sup> 3d	8.863762	4	0.2079867E-08
2p <sup>6</sup> 4p	9.995544	2	0.1837560E-07
2p <sup>6</sup> 4p	9.999328	4	0.1830161E-07
2p <sup>6</sup> 5s	11.504557	2	0.5020080E-08
2p <sup>6</sup> 4d	11.569039	6	0.7722008E-08
2p <sup>6</sup> 4d	11.569103	4	0.7675776E-08
2p <sup>6</sup> 4f	11.629672	6	0.4301075E-08
2p <sup>6</sup> 4f	11.629687	8	0.4291846E-08
2p <sup>6</sup> 5p	12.082895	2	0.1423285E-06
2p <sup>6</sup> 5p	12.084606	4	0.1449696E-06
2p <sup>6</sup> 6s	12.794766	2	0.8700948E-08
2p <sup>6</sup> 5d	12.822408	6	0.1913876E-07
2p <sup>6</sup> 5d	12.822446	4	0.1901502E-07
2p <sup>6</sup> 5f	12.855904	6	0.6954587E-08
2p <sup>6</sup> 5f	12.855912	8	0.6954103E-08
2p <sup>6</sup> 6p	13.095501	2	0.1682312E-06
2p <sup>6</sup> 6p	13.096416	4	0.1705321E-06
2p <sup>6</sup> 7s	13.487538	2	0.1655903E-07
2p <sup>6</sup> 6d	13.501882	6	0.5231056E-07
2p <sup>6</sup> 6d	13.501904	4	0.4994756E-07
2p <sup>6</sup> 6f	13.522004	6	0.2007065E-07
2p <sup>6</sup> 6f	13.522008	8	0.2004008E-07
2p <sup>6</sup> 7p	13.663502	2	0.2272898E-06
2p <sup>6</sup> 7p	13.664049	4	0.2301046E-06
2p <sup>6</sup> 8s	13.902249	2	0.24207221E-07
2p <sup>6</sup> 7d	13.910661	6	0.8163665E-07

$2p^67d$	13.910676	4	0.8091924E-07
$2p^67f$	13.923608	8	0.2409639E-07
$2p^67f$	13.923608	6	0.2405176E-07
$2p^68p$	14.013965	2	0.3479096E-06
$2p^68p$	14.014317	4	0.3543674E-06
$2p^69s$	14.170075	2	0.3691127E-07
$2p^68d$	14.175446	6	0.1762363E-06
$2p^68d$	14.175453	4	0.1391014E-06
$2p^68f$	14.184232	8	0.3428885E-07
$2p^68f$	14.184232	6	0.3428180E-07
$2p^69p$	14.245386	2	0.4461772E-06
$2p^69p$	14.245626	4	0.4524784E-06
$2p^610s$	14.353029	2	0.4119125E-07
$2p^69d$	14.356675	6	0.1669508E-06
$2p69d$	14.356681	4	0.1654807E-06
$2p69f$	14.362900	6	0.4353505E-07
$2p69f$	14.362900	8	0.4352936E-07
$2p610p$	14.406180	2	0.1680672E-05
$2p610p$	14.406360	4	0.1682086E-05
$2p610d$	14.486121	6	0.6302309E-06
$2p610d$	14.486125	4	0.6296040E-06

## ملخص:

يمكن استعمال الليزر في عمليات التلحيم من اجل تجميع سبائك المغنزيوم، كما تسمح الخطوط الطيفية الناتجة عن عملية التلحيم من تحديد الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للبلازما (الكثافة الالكترونية، درجة الحرارة). قمنا في هذه المذكرة بدراسة التعريض الالكتروني للخطوط الطيفية في البلازما أثناء عملية التلحيم بالليزر للسبائك المعدنية. كما قمنا أيضا بدراسة مختلف النماذج النظرية لحساب التعريض الالكتروني. قمنا باستعمال عبارة تتعلق بالكثافة الالكترونية والحرارة لحساب التعريض الالكتروني والطيف لانتقالات ذرة المغنزيوم (  $\lambda = 5183.6043 \text{ \AA}$   $5172.68 \text{ \AA}$  ) ، وايون المغنزيوم (  $\lambda = 2795.528 \text{ \AA}$  ,  $2802.705 \text{ \AA}$  ). من اجل درجات الحرارة (300 إلى 6500 كلفن) والكثافة الالكترونية من ( $10^{16}$  إلى  $10^{17} \text{ سم}^{-3}$ ). النتائج المتحصل عليها تبين توافق جيد مع النتائج التجريبية والنظرية لباحثين آخرين.

*الكلمات المفتاحية :* التلحيم بالليزر، البلازما، المغنزيوم، المطيافية، التعريض الالكتروني، اشكال الطيف.

## Résumé :

Les procédés de soudage pour l'assemblage de pièces en alliages de magnésium, peuvent être faites par laser. Les profils de raies est un outil permettant de déterminer les propriétés physiques et chimiques de l'opération de soudage (densité électronique, température). Ce mémoire traite l'élargissement Stark électroniques des raies spectrales dans les plasmas lors de la soudure au laser de plaques d'alliages métalliques. Nous avons étudié différents modèles théoriques pour le calcul d'élargissement électronique. Nous avons utilisé une expression dépendant de la densité électronique et de la température pour le calcul de spectres et des élargissements électroniques des raies ( $\lambda = 5183.6043 \text{ \AA}$ ,  $5172.68 \text{ \AA}$ ) de Mg I et ( $\lambda = 2795.528 \text{ \AA}$ ,  $2802.705 \text{ \AA}$ ) de Mg II. Les températures varient de 300 à 6500K et les densités électroniques varient de  $10^{16}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Les résultats calculés sont en bon accord avec les résultats expérimentaux et théoriques d'autres auteurs.

## Mots-clés:

Soudage au laser, Plasma, Magnésium, Spectroscopie, Elargissement électronique, Profil de raies.

## Summary:

Welding processes for assembling parts of magnesium alloys can be made by laser. Line shapes is a tool to determine the physical and chemical properties (electron density, temperature) of the welding process. This work discusses Stark broadening spectral lines in plasmas laser welding of metal alloy. We studied different theoretical models of electronic broadening. We used an expression depending on the electron density and temperature to calculate spectra and electronic broadening of Mg I lines ( $\lambda = 5183.6043 \text{ \AA}$ ,  $5172.68 \text{ \AA}$ ) and Mg II lines ( $\lambda = 2795.528 \text{ \AA}$ ,  $2802.705 \text{ \AA}$ ). The temperature varies from 300 to 6500K and electron density varies from  $10^{16}$  to  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . The calculated results are in good agreement with the experimental and the theoretical results of other authors.

## Key words:

Laser welding, Plasma, Magnesium, Spectroscopy, Electronic broadening, Line shape.