

جامعة قاصدي مرباح ورقلة  
كلية الرياضيات وعلوم المادة

رقم  
الترتيب:.....

قسم الفيزياء



مذكرة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

فرع: فيزياء

تخصص: فيزياء الإشعاعات

من إعداد الطالبتين: حجاج مروة - بن الشرع كلثوم

بعنوان:

دراسة ضياع المادة عن طريق التبخر حالة لحام  
أو قطع المعادن بواسطة الليزر

نوقشت بتاريخ:

2020 / 09/29

أمام أعضاء لجنة المناقشة المكونة من:

رئيسا	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عال	بابا حني أم الخير
ممتحنا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر (ب)	بله زكية
مساعد مشرف	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عال	خلفاوي فتحي
مشرفا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر (ب)	لمقدم سومية

الموسم الجامعي: 2020 / 2019

## الإهداء

إلى من بذلن كل غالٍ ونفيسٍ في سبيلِ نجاحنا، إلى كل من عبّدن أماننا الطريق وزرعن فينا الأمل، إلى من يسّرن لنا كل السبل.

إلى اللتين أعطتنا ولم تدخرنا، إلى اللتين جادتا ولم تبخلا، إلى اللتين عانتا ولم تياسا.  
إلى سر الوجدان، منبع العطف والحنان، إلى أغلى ما في الوجود،  
أمهاتنا الغاليات.

إلى اللذين أفنيا عمرهما، وأجهدا نفسيهما من أجل تربيتهما وتعليمنا، إلى من علمانا أن الحياة تؤخذ ولا تعطى.

إلى أبائنا بارك الله في عمرهما.

إلى زهرة حياتنا في الدنيا، إخواننا الأعزاء.

إلى كافة أفراد أسرئنا قريباً كان أو بعيداً، صغيراً أو كبيراً دون استثناء.

إلى كافة أصدقائنا وأحبابنا، إلى رفقاء دربنا في مراحل دراستنا وإلى كل من يعرفنا.

## تشكرات

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف المرسلين محمد وعلى آله وصحبه ومن اهتدى بهداه إلى يوم الدين أما بعد، نحمدك ربي على ما يسرت لنا من سبل العلم و مناهل المعرفة لانجازنا هذا العمل الذي نسأله أن ينفع به أمتنا لما فيه الخير.

وانطلاقاً من قوله صلى الله عليه وسلم من لا يشكر الناس لا يشكر الله، وبهذا فإننا نتوجه بخالص شكرنا وتقديرنا وعظيم امتناننا إلى الأستاذة الفاضلة المشرفة على المذكرة **لمقدم سومية** أستاذ محاضر (ب) بجامعة قاصدي مرياح ورقلة. لما أبدته من رحابة صدر وروح علمية وعملية مخصصة، و ما قدمته لنا من توجيهات و نصائح سديدة وملاحظات قيمة ومستمرة... حتى خرج هذا البحث إلى النور فدعأونا لها بالخير و العافية.

كما لا ننسى أن نتقدم بجزيل الشكر للأستاذ **خلفاوي فتحي** أستاذ تعليم عال بجامعة قاصدي مرياح ورقلة لما قدمه لنا من نصح و إرشاد.

وأتقدم بالشكر للجنة المناقشة المشكلة من الأساتذة الأفاضل: الأستاذة **بابا حني أم الخير** أستاذة تعليم عال بجامعة قاصدي مرياح ورقلة لقبولها ترأس لجنة المناقشة، وكما أشكر الأستاذة **بلة زكية** أستاذة محاضر (ب) بجامعة قاصدي مرياح ورقلة لقبولها مناقشة المذكرة.

كما نشكر كل أستاذ أو أستاذة قدم أو قدمت لنا النصح و المشورة.

وأخيراً نتقدم بكلمة شكر وامتنان إلى كل أعضاء فريق البحث بمخبر الإشعاع والبلازما و فيزياء السطوح بقسم الفيزياء كلية الرياضيات و علوم المادة جامعة قاصدي مرياح ورقلة، وإلى كل من ساهم ومد لنا العون حتى لو بكلمة تشجيع واحدة في إنجاز هذا العمل المتواضع، جزاهم الله خير الجزاء فإننا نشكر لهم ذلك.

كما نشكر كل من ساعدنا من قريب أو بعيد على إنجاز هذا العمل المتواضع.

## الفهرس

### Contents

i.....	الإهداء
ii.....	تشكرات
iii.....	الفهرس
v.....	قائمة الأشكال والجداول
viii.....	جدول الرموز :
1.....	المقدمة العامة

### الفصل الأول: دراسة ببلوغرافية حول التلحيم و القطع بواسطة الليزر

3.....	I. نظرة عامة حول الليزر
3.....	1. I. تعريف الليزر
4.....	2. I. خصائص الليزر
4.....	3. I. مختلف أنواع الليزر
4.....	1.3.I. ليزر النيوديميوم (Nd-YAG) Néodyme Yttrium Granet
4.....	2.3.I. ليزر ثنائي أكسيد الكربون CO <sub>2</sub>
5.....	4.I. تفاعل ليزر - مادة
5.....	II. التلحيم بالليزر
5.....	1. II. مفهوم التلحيم
6.....	2. II. مبدأ التلحيم بالليزر
7.....	3. II. مقادير التلحيم بحزمة الليزر
7.....	III. القطع بحزمة الليزر
7.....	1. III. مفهوم القطع بحزمة الليزر
8.....	2. III. مبدأ القطع بحزمة الليزر
9.....	IV. الإنتقال الحراري أثناء القطع و التلحيم
9.....	1. IV. الإنتقال الحراري بالتوصيل
9.....	2. IV. الإنتقال الحراري بالحمل
9.....	3. IV. الإنتقال الحراري بالإشعاع
10.....	4. IV. ضياع الطاقة بالتبخر

### الفصل الثاني: ضياع الطاقة خلال التلحيم و القطع بواسطة الليزر

11.....	I. تعريف الظاهرة الفيزيائية
13.....	II. ضياع الطاقة عن طريق الحمل والإشعاع والتبخر
13.....	1. II. دراسة ببلوغرافية لضياع الطاقة عن طريق الحمل والإشعاع
13.....	1.1. II. في عملية التلحيم
14.....	2.1. II. في عملية القطع
14.....	2. II. دراسة ببلوغرافية لضياع الطاقة عن طريق التبخر

15	.....II.2.1. في عملية التلحيم.
19	.....II.2.2. في عملية القطع.
20	..... III . ظاهرة طرد الكتلة المزالة بالقذف و التبخر
22	..... IV . الدراسة الرياضية.
23	..... IV 1. معادلة كثافة طاقة التبخر
24	..... IV 2. معادلة انتقال الكتلة

### الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها

25	..... I . الخصائص الفيزيائية لبعض المواد المستخدمة
25	..... I 1. معدن الألمنيوم
26	..... I 2. معدن الحديد
26	..... I 3. معدن الزنك
27	..... I 4. سبائك التيتانيوم
28	..... II . تأثير الخصائص الفيزيائية على مقدار كثافة طاقة التبخر
28	..... II 1. تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة درجة الحرارة
31	..... II 2. تغيرات كثافة طاقة التبخر لمختلف الخصائص الفيزيائية للمادة
36	..... III . دراسة تغير كثافة طاقة التبخر لسبيكة التيتانيوم أثناء التلحيم أو القطع بالليزر
38	..... III 1. تغير مقدار كثافة طاقة التبخر بدلالة الزمن
38	..... III 2. تغير كثافة طاقة التبخر بدلالة البعد عن نقطة التأثير
39	..... III 3. تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة نصف قطر حزمة شعاع الليزر
41	..... VI . حساب الكتلة الضائعة عن طريق التبخر
43	..... الخلاصة العامة و الآفاق
45	..... المراجع

## قائمة الأشكال والجداول

### قائمة الأشكال:

الفصل الأول	
3	الشكل I 1: رسم تخطيطي يوضح مبدأ عمل الليزر.
6	الشكل I 2: رسم تخطيطي يوضح مبدأ التلحيم بالليزر.
7	الشكل I 3: مقادير التلحيم بحزمة الليزر.
8	الشكل I 4: مخطط يوضح القطع بالليزر.
الفصل الثاني	
11	الشكل II 1: مختلف ضياعات الطاقة الناتجة عن عملية التلحيم.
12	الشكل II 2: نموذج مادي لظاهرة طرد المواد المنصهرة و المتبخرة من منطقة التفاعل.
12	الشكل II 3: المراحل الرئيسية لمختلف الظواهر الناتجة عن اللحام أو القطع بالليزر.
15	الشكل II 4: مخطط بياني لنسب مختلف ضياعات الطاقة بالتوصيل والحمل والتبخر لمعدن الحديد بشعاع ليزر نصف قطره $1.9 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ .
15	الشكل II 5: مخطط بياني لنسب مختلف ضياعات الطاقة بالتوصيل والحمل والتبخر لمعدن الألمنيوم بشعاع ليزر ذو نصف قطر $1.9 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ .
16	الشكل II 6: تغيرات الطاقة الضائعة بالتبخر لعناصر سبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ بدلالة درجة الحرارة.
17	الشكل II 7: مخطط بياني يوضح التدفق الحراري السطحي ومعدل التبخر عند التبريد.
18	الشكل II 8: درجة الحرارة القصوى والسرعة المتوسطة للتبخير في استطاعة ليزر 3 kW ونصف قطر $R=0.225 \text{ mm}$ .
19	الشكل II 9: الطاقة المستهلكة للإنصهار والتبخر ومعدل الكتلة المزالة.
20	الشكل II 10: تغيرات معدل التبخر بدلالة الزمن.
21	الشكل II 11: مخطط بياني لمقدار الضياع في الكتلة المتبخرة بدلالة الزمن.

الفصل الثالث	
28	الشكل III 1: منحى بياني لتغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة تغير درجة الحرارة.
29	الشكل III 2: تغيرات كثافة طاقة التبخر لمادة الحديد بدلالة درجة الحرارة.
29	الشكل III 3: تغيرات كثافة طاقة التبخر لسبيكة التيتانيوم بدلالة درجة الحرارة.
30	الشكل III 4: تغيرات كثافة طاقة التبخر لمادة الزنك بدلالة درجة الحرارة.
30	الشكل III 5: تغيرات كثافة طاقة التبخر لمادة الألمنيوم بدلالة درجة الحرارة.
31	الشكل III 6: تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة درجة حرارة التبخر لكل مادة.
32	الشكل III 7: تغيرات كثافة طاقة الإنصهار بدلالة درجة حرارة إنصهار كل مادة.
33	الشكل III 8: تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة الناقلية الحرارية.
33	الشكل III 9: تغيرات كثافة طاقة الإنصهار بدلالة الناقلية الحرارية.
34	الشكل III 10: تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة الحرارة الكامنة للتبخر.
34	الشكل III 11: تغيرات كثافة طاقة الإنصهار بدلالة الحرارة الكامنة للتبخر.
35	الشكل III 12: تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة الكتلة الحجمية.
35	الشكل III 13: تغيرات كثافة طاقة الإنصهار بدلالة الكتلة الحجمية.
36	الشكل III 14: مسار التلحيم على صفيحة ثنائية الأبعاد.
37	الشكل III 15: تغيرات درجة حرارة التلحيم بدلالة الزمن لسبيكة التيتانيوم.
38	الشكل III 16: منحى تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة الزمن.
39	الشكل III 17: تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة البعد عن مسار التلحيم.
39	الشكل III 18: تطورات درجة الحرارة من أجل قيمتين لنصف قطر الليزر.
40	الشكل III 19: تغير كثافة طاقة التبخر بدلالة الزمن من أجل $R_L=0.25$ mm.
40	الشكل III 20: تغير كثافة طاقة التبخر بدلالة الزمن من أجل $R_L=0.25$ mm.
42	الشكل III 21: تغير الكتلة الضائعة بدلالة الزمن للنقطة $(y=3\text{mm}, x=0)$ .

## قائمة الجداول:

<b>الفصل الثاني</b>	
16	الجدول II 1: النسب المئوية لضياعات الطاقة لمعدني الحديد و الألمنيوم حسب نتائج [18].
<b>الفصل الثالث</b>	
25	الجدول III 1: بعض الخصائص الفيزيائية الرئيسية لمعدن الألمنيوم.
26	الجدول III 2: بعض المقادير الفيزيائية المميزة لمعدن الحديد.
27	الجدول III 3: مختلف المقادير و الخصائص الفيزيائية المميزة للزنك.
28	الجدول III 4: الخصائص الفيزيائية المميزة لسبائك TA6V.
31	الجدول III 5: نتائج مقدار كثافة طاقة التبخر المحررة لبعض المواد في حالتها في درجة حرارة التبخر و الإنصهار.
32	الجدول III 6: علاقة خصائص المادة كثافة بطاقة التبخر و الإنصهار عند درجتي حرارة الإنصهار و التبخر.
37	الجدول III 7: يوضح المقادير الأساسية أثناء التلحيم.
41	الجدول III 8: المقارنة بين قيمة كثافة طاقة التبخر من أجل $R_L=0.25$ mm و $R_L=0.50$ mm.
42	الجدول III 9: الكتلة الضائعة عن طريق التبخر لبعض المواد في حالتها في درجة حرارة التبخر و الإنصهار.

## جدول الرموز :

الخاصية	الرمز
درجة الحرارة K	T
درجة حرارة السطح K	$T_s$
درجة حرارة الانصهار K	$T_f$
درجة حرارة التبخر K	$T_v$
درجة حرارة الغرفة (المحيط) K	$T_{\infty}$
سرعة التبخر m/s	$V_v$
ثابت السرعة من رتبة سرعة الصوت في مرحلة التبخر m/s	$V_0$
عدد الأفوكادرو $Na = 6.023.10^{23} \text{ mol}^{-1}$	Na
الكتلة المولية g/mol	M
ثابت بولتزمان $K_B = 1.38.10^{-23} \text{ J/K}$	$K_B$
مؤثر لابلاس	$\Delta$
كثافة الطاقة الضائعة بالتوصيل $W/m^2$	$Q_{cond}$
كثافة الطاقة الضائعة بالحمل $W/m^2$	$Q_{conv}$
كثافة الطاقة الضائعة بالإشعاع $W/m^2$	$Q_{rad}$
كثافة الطاقة الضائعة بالتبخر $W/m^2$	$Q_{vap}$
الطاقة الضائعة بالإنصهار $W/m^2$	$Q_{Fus}$
طاقة الإشعاع المنبعث وهي الاستطاعة الكلية لوحدة السطح $W/m^2$	E
الحرارة الكامنة للتبخر J/Kg	$L_v$
الحرارة الكامنة للإنصهار J/Kg	$L_f$
نصف قطر شعاع حزمة الليزر m	$R_L$
ثابت الغازات المثالية $R = 8.31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	R
الكتلة المتبخرة Kg	$m_v$
معدل انتقال الكتلة في وحدة السطح $kg/m^2s$	$m'$
الكتلة الحجمية للذوبان $Kg/m^3$	$\rho_m$

كثافة المادة في الطور السائل $\text{Kg/m}^3$	$\rho_L$
الزمن s	T
الاحداثيات الكارتيزية m	y,x
إستطاعة الليزر W	P
معامل الإنتقال للحمل الحراري $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	H
الناقلية الحرارية $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\Lambda$
السرعة m/s	V
الانبعاثية الإشعاعية الخاصة بكل مادة	$\varepsilon$
ثابت ستيفان بولتزمان $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$	$\sigma$
عنصر الزمن s	dt

# المقدمة العامة

## المقدمة العامة

ينتج على إثر تفاعل الليزر عالي الإشعاع على الأسطح المعدنية عملية ديناميكية معقدة يمكن من خلالها أن يتغير المعدن بسرعة من الانعكاسات الشديدة إلى الإمتصاص القوي مولدة العديد من الظواهر الفيزيائية، استغلّت هذه التقنية في العمليات الصناعية مثل اللحام والقطع بالليزر وقد عالجت الدراسات الحالية هذه الظاهرة كمسألة حرارية بدراسة الإنتقالات الحرارية ومختلف ضياعات الطاقة. هذه الأخيرة يجب أن تحظى باهتمام كبير من أجل تحسين كفاءة اللحام والقطع من خلال تقدير كمية الضياع في الطاقة. وقد شهد مجال دراسة ضياع الطاقة بالتبخّر اهتمام ضئيل من طرف الباحثين، وكانت مساهمتهم تحوم حول دراسة تجريبية وعددية لمعالجة الضياع في الطاقة بالحمل والإشعاع الحراري.

في عملنا هذا سنقوم أولاً بتحديد مقدار الطاقة الضائعة عن طريق التبخّر لمجموعة من المعادن من أجل مجموعة من درجات الحرارة المختلفة. ثم بتحديد مقدار كل من الطاقة والمادة الضائعتين عن طريق التبخّر أثناء اللحام أو القطع لسبيكة من التيتانيوم TA6V بواسطة ليزر CO<sub>2</sub> المستمر. بتسليط حزمة من أشعة ليزر ثنائي أكسيد الكربون المستمر في حالة حركة و ذو طاقة 2500 W، بسرعة 0.060 m/s. تتم المعالجة وفق خط مسار التلحيم باستعمال برنامج الفرترن 95.

تحتوي هذه المذكرة على ثلاث فصول :

**الفصل الأول** بعنوان "دراسة بيلوغرافية حول التلحيم والقطع بالليزر" و الذي سنستعرض فيه لمحة موجزة عن بعض المفاهيم والمقادير الفيزيائية حول الليزر، إضافة إلى ذلك سنستعرض مفهوم ومبدأ التلحيم/القطع بالليزر وذكر أهم مظاهر الإنتقال الحراري الناتج على إثر هذه العملية.

أما **الفصل الثاني** بعنوان "ضياع الطاقة خلال التلحيم والقطع بالليزر" سنتطرق خلاله إلى وصف وشرح الظاهرة الفيزيائية المراد دراستها وذكر مختلف ضياعات الطاقة بالحمل والإشعاع الحراري وكذلك التبخّر بالإضافة إلى دراسة بيلوغرافية حول الظاهرة وذكر الجانب الرياضي وأهم العلاقات الرياضية المستخدمة من أجل تحديد ضياع الطاقة عن طريق التبخّر.

سنعرض في **الفصل الثالث** كل ما يخص النتائج المتحصل عليها من خلال عرض المنحنيات و الجداول و مناقشة وتحليل النتائج ومقارنة بعض النتائج.

في ختام المذكرة خلاصة أوجزنا فيها أهم النتائج التي تحصلنا عليها مع تقديم بعض الآفاق المستقبلية لمواصلة البحث في هذا الموضوع.

## الفصل الأول:

دراسة ببلوغرافية حول التلحيم  
والقطع بواسطة الليزر

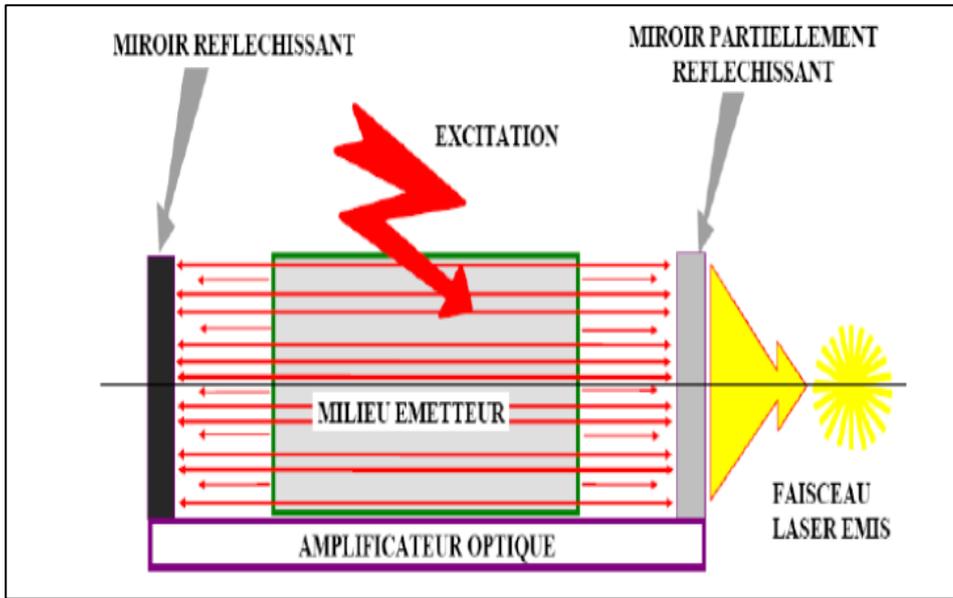
## الفصل الأول: دراسة ببلوغرافية حول التلحيم والقطع بواسطة الليزر

### I. نظرة عامة حول الليزر:

#### 1. I. تعريف الليزر:

يعود ظهور الليزر إلى عام 1916، حيث حدد العالم ألبرت أنشتاين قوانين الإنبعاث الفوتوني عن طريق المحاكاة وأطلق مبدأ الإنبعاث المحفز الذي أدى إلى تقنية جديدة "LASER" [1]. وهو اختصار للجملّة التالية:

"Light Amplification by stimulated Emission of Radiation" تعني تضخيم الضوء بانبعاث الإشعاع المحفز و هو عبارة عن حزمة ضوئية ذات فوتونات تشترك في ترددها و تتطابق موجاتها بتداخل بناء بينها لتتحول إلى نبضة ضوئية ذات طاقة عالية [2]. في بداية السبعينيات، طورت تقنية الليزر في البيئة الصناعية و ذلك في مجال معالجة المواد. تم استخدام أدوات القطع بالشعاع لأول مرة في عام 1975، و لم يتم تطوير لحام المعادن بتقنية الليزر في صناعات الإنتاج الضخم حتى عام 1984 [1].



الشكل I-1: رسم تخطيطي يوضح مبدأ عمل الليزر [3].

**2. I. خصائص الليزر:**

تمتلك أشعة الليزر خصائص تميزها عن باقي الأشعة الضوئية و من أبرزها: أحادية اللون، توازي الحزمة، التداخل البناء و الشدة الضوئية.

و لتوليد هذه الأشعة يجب توفير المكونات الأساسية المهمة لعمل الليزر، و بشكل عام يحتوي الليزر مهما اختلف نوعه على المكونات الأساسية التالية:

- الوسط الفعال Milieu émetteur.
- مصدر الضخ excitation.
- المرنان و يحوي مرآتان إحداها عاكسة كلياً miroir réfléchissant و الأخرى عاكسة جزئياً miroir réfléchissant partiellement.

**3. I. مختلف أنواع الليزر:**

عموما يتم تحديد نوع الليزر انطلاقاً من مادة الوسط الفعال و الذي يصنف إلى عدة أشكال منها ليزر (الحالة الصلبة، السائلة، الغازية و نصف الناقلة)، و كمثل على ذلك سوف نأخذ كمثل ليزر النيوديميوم و ليزر ثنائي أكسيد الكربون.

**1.3.I. ليزر النيوديميوم (Nd-YAG) Néodyme Yttrium Granet:**

يعتبر واحد من أهم الليزرات عموما و قد أكتشف عام 1964، الوسط الفعال هو بلورة الياك (YAG) و هي عبارة عن أكسيد اليتريوم ألنيوم ( $Y_2 Al_5 O_{12}$ ) المطعم بأيونات النيديميوم ( $Nd^{+3}$ ) بنسبة تطعيم لا تتجاوز (1.5%) و يكون لون البلورة أرجواني [4] و بضخ إلى  $10^{20}$  أيون ثلاثي التكافؤ ( $Nd^{+3}$ ) و شعاع باعث ذو طول موجي  $10.6 \mu m$  بإستطاعة أعظمية حوالي 3-4 kW. و بالرغم من ضعف الإستطاعة إلا أنه قيد الإستعمال في تلحيم الطبقات الرقيقة بدقة عالية، و من الممكن نقل حزمة (Nd-YAG) عبر ليف بصري لعدة عشرات الأمتار [5].

**2.3.I. ليزر ثنائي أكسيد الكربون CO<sub>2</sub>:**

الوسط الفعال هو خليط غازي يتكون من (10%) غاز ثنائي أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) و (40%) نيتروجين ( $N_2$ ) و (50%) الهليوم (He) تحت ضغط منخفض. يثير الضخ الكهربائي جزيئات النيتروجين الذي ينقل إثارة هذه الجزيئات إلى جزيئات  $CO_2$  و ينبعث إشعاع بطول موجي  $10.6 \mu m$  قابل للنقل. تصل كفاءة قوة ليزر صناعي إلى 1.5-40 kW، يتم استخدامه في الوضع

المستمر و النبضي، و يمكن تركيز الشعاع بواسطة المرايا و العدسات المركزة بالنسبة للكثافات منخفضة الطاقة (30 J/mm)، و يتم استخدام هذا الليزر في اللحام العميق [5]. و كذلك في عمليتي الحفر و القطع للمعادن.

#### 4.I. تفاعل ليزر- مادة:

الليزر شعاع متماسك أحادي الطور، طول موجي واحد ومحتوى حراري عالي من الطاقة، مما يولد حرارة عندما يضرب سطحاً ما [6]. عندما يشع شعاع الليزر سطحاً يمكن أن ينعكس و ينتقل و يمتص و تعتمد فعالية معالجة المواد بالليزر على الإمتصاص التي هي خاصية جوهريّة للمادة. و يعتمد معامل الإمتصاص على عدد كبير من العوامل (طبيعة المادة، الطول الموجي، درجة الحرارة، زاوية الورود، الخصائص الهندسية للسطح...) [1].

تُظهر العديد من الظواهر التي قد تحدث في آن واحد و تشمل تغير الطورو النقل الحراري، حيث أن شعاع الليزر قادر على إذابة و تبخير المعادن، من ثقبها إلى حفرها و من قطعها إلى لحامها بدقة عالية [7].

يُستخدم جهاز الليزر في العديد من المجالات المختلفة كالتطبيقات الصناعية و غيرها. و من خلال هذه المذكرة سنكتفي بدراسة عمليتين أساسيتين و الأكثر استخداماً في البحوث التجريبية و هي عملية القطع و التلحيم بواسطة الليزر.

## II. التلحيم بالليزر:

### 1.II. مفهوم التلحيم:

عبارة عن عملية للحصول على وصلة غير قابلة للفك من خلال التسخين الموضعي لأطراف الأجزاء الموصلة، و هو عبارة عن وصل دائم للأجزاء المعدنية باستخدام مصدر حراري [7]. قد يكون ذلك بلحام أجزاء متجانسة (من نفس المادة و الأبعاد) أو غير متجانسة.

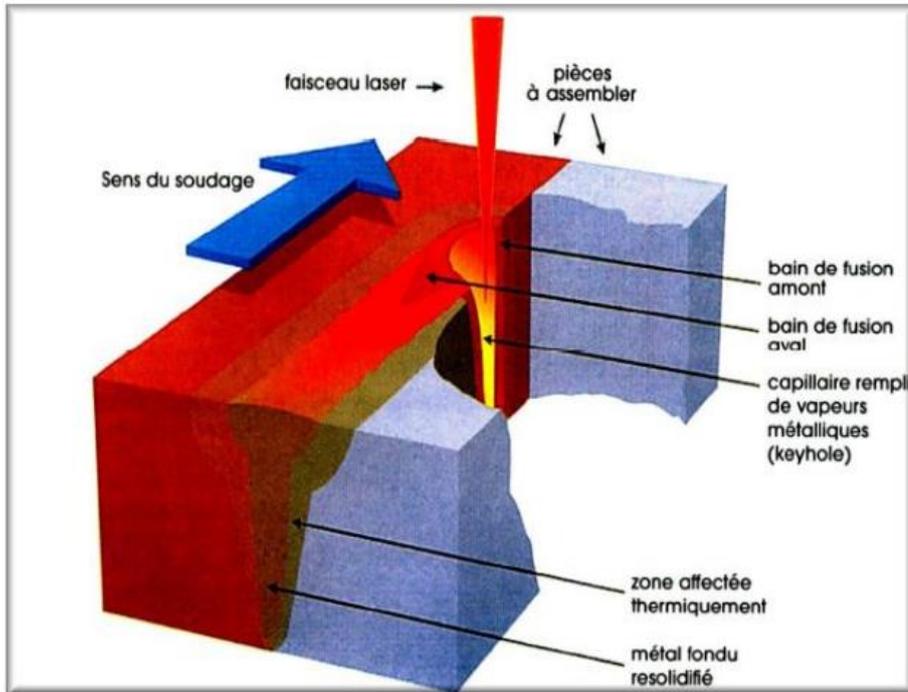
و لتلحيم جزئين معدنيين يتطلب القيام بالعمليات التالية [8]:

- عملية التجميع.
- صيانة القطع أثناء التلحيم.
- الوضعية الحركية.

**2.II. مبدأ التلحيم بالليزر:**

يعتبر اللحام بالليزر طريقة ربط عالية الكفاءة تستخدم على نطاق واسع في التصنيع، بالمقارنة مع عمليات اللحام الأخرى فإن لديها العديد من المزايا كالسرعة والشدة [9] تتم عملية لحام قطعتين معدنيتين في حالة التلامس عند تسليط شعاع الليزر على الخط الفاصل بينهما فتنصهران و تندمجان سوياً [7]. عندما يتفاعل شعاع ليزر عالي الكثافة مع المادة فإنه يتسبب سريعاً بصهر وتبخير المادة محلياً ونتيجة لذلك هناك ضغط زائد قوي فوق المنطقة المنصهرة يسمى ضغط الإرتداد يشكل تجويف شعيري (effet keyhole) [1]. كذلك يُحدث تصادم شعاع الليزر مع المادة ظواهر الإنتقال الحراري و تتمثل في الحمل الحراري، الإشعاع الحراري، التوصيل الحراري وكذا عملية التبخر.

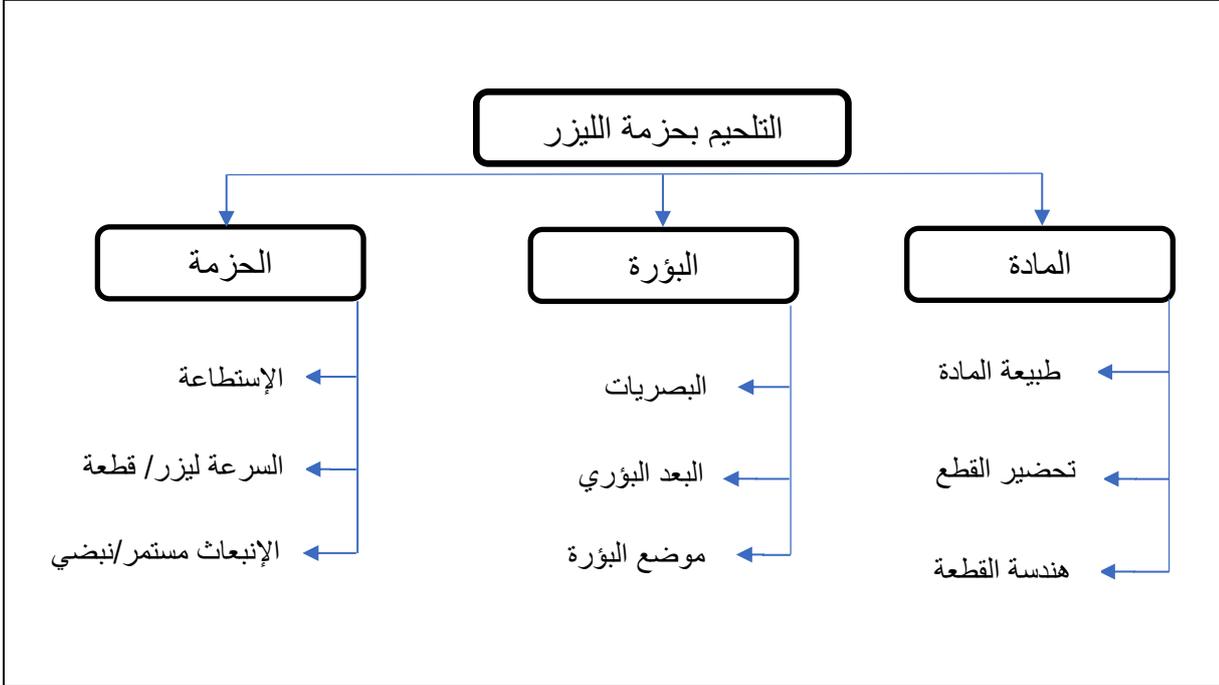
يندرج التلحيم بالليزر ضمن عمليات اللحام ذات الطاقات العالية (الإستطاعة في وحدة السطح بين  $10^{10}$ - $10^{13}$  W/m<sup>2</sup>. على عكس طرق التلحيم بالقوس الكهربائي تكون الإستطاعة في وحدة السطح  $5 \cdot 10^8$  W/m<sup>2</sup> [8]. إن أهم أنواع التلحيم بالليزر هو التلحيم بليزر ثنائي أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) و التلحيم بليزر النيديميوم (Nd-YAG).



الشكل I-2: رسم تخطيطي يوضح مبدأ التلحيم بالليزر [1]

**3.II. مقادير التلحيم بحزمة الليزر:**

عند التلحيم بحزمة الليزر يجدر بنا التعرف على المقادير و الخصائص التي تحكم هذه العملية و المتمثلة في: طاقة الليزر، السرعة، نوع إنبعاث الحزمة، البعد البؤري و طبيعة المادة. و يتضح ذلك في الشكل الموالي:



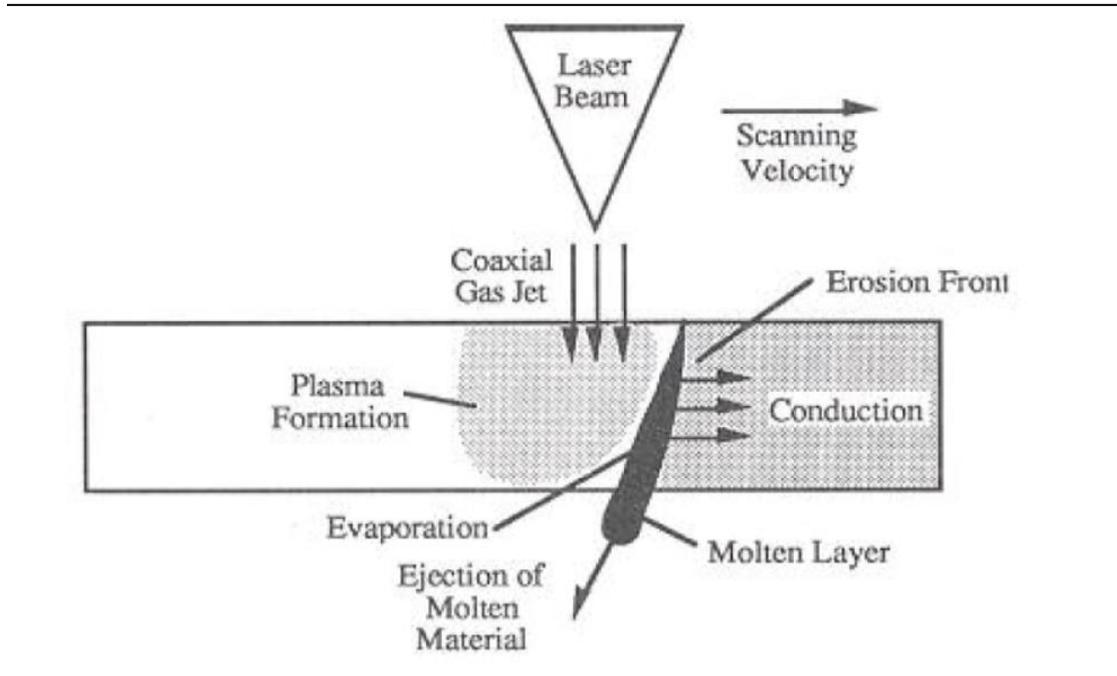
الشكل I-3: مقادير التلحيم بحزمة الليزر [10]

**III. القطع بحزمة الليزر:****1.III. مفهوم القطع بحزمة الليزر:**

القطع بالليزر هو تكنولوجيا يستخدم فيها شعاع الليزر لقطع المواد، تستخدم عادة في التطبيقات الصناعية و كذا في البحوث العلمية. القطع بالليزر هو الإزالة التامة و فصل المادة إلى أجزاء، كفصل سطحها العلوي عن سطحها السفلي أو فصل جانبي المادة، وذلك على طول مسار معين. يتم إجراء القطع بالليزر على مادة ذات طبقة واحدة أو متعددة الطبقات، و هناك عوامل هامة يجب أخذها بعين الإعتبار مثل سمك المادة و كثافتها. بشكل عام يستخدم ليزر CO<sub>2</sub> أساسا لقطع المواد المعدنية و غير المعدنية [11].

**2.III. مبدأ القطع بحزمة الليزر:**

الميزة الأساسية للقطع بحزمة الليزر هي دقتها من 0.1 mm لليزر CO<sub>2</sub> إلى 1 μm لليزر Nd-YAG. تتم عملية قطع الأشكال المعقدة بالليزر بدقة كبيرة لما تتميز به من سرعة و كثافة طاقة عالية [12]. بتوجيه أشعة الليزر العالية الطاقة على سطح المادة التي يراد قطعها تحدث ظواهر فيزيائية أولا على مستوى السطح بانعكاس جزء من الحزمة الساقطة وامتصاص الجزء الآخر. هذا الأخير يسبب في حدوث إنتقال الطاقة داخل المادة مع تشكيل تجويف يزيد عمقه بزيادة طاقة الليزر، مع حدوث ذوبان و تبخر لتصبح الحواف المقطوعة على درجة عالية من الدقة و في مدة وجيزة.



الشكل I-4: مخطط يوضح القطع بالليزر [13]

يمكن زيادة كفاءة القطع بالليزر باستعمال منفث غاز (Coaxial Gaz Jet) ينطبق محوره مع محور حزمة الليزر (Laser Beam) و غالبا ما يستخدم في هذه العملية غاز شديد التفاعل كالأوكسجين، إذ أن من شأنه أن يتفاعل مع المادة بعد أن تسخن بتأثير حزمة الليزر الساقطة عليها مما يؤدي إلى احتراقها، و يساعد منفث الغاز أيضا على طرد المواد المنصهرة، تستعمل هذه الطريقة في قطع مواد كالفولاذ المضاد للصدأ و في صناعة السيارات و في مصانع القماش والملبوسات وغيرها [14].

**IV . الإنتقال الحراري أثناء القطع و التلحيم:**

يعتبر الإنتقال الحراري أصل الظواهر الناتجة عن عمليتي القطع و التلحيم بالليزر، وتمثل مختلف أنماط الإنتقال الحراري عموماً في التوصيل، الحمل والإشعاع.

**IV .1. الإنتقال الحراري بالتوصيل:**

في حالة تلحيم أو قطع المعادن بالليزر، يعتبر التوصيل الحراري أحد أهم أشكال الإنتقال الحراري. و يعبر عنه رياضياً بالعلاقة التالية [15]:

$$Q_{cond} = \lambda \Delta T \quad (I-1)$$

حيث:

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

**IV .2. الإنتقال الحراري بالحمل:**

مع زيادة كثافة حزمة الليزر الساقطة على سطح المادة، تتشكل دوامات الحمل بحدوث إنصهار حول منطقة التفاعل. و يكون ضياع الطاقة بالحمل بالعلاقة التالية [16]:

$$Q_{conv} = h(T - T_{\infty}) \quad (I.2)$$

**IV .3. الإنتقال الحراري بالإشعاع :**

تنتقل الحرارة بالإشعاع من غير الإعتماد على الوسط المادي، وذلك من خلال الأمواج الكهرومغناطيسية المنبعثة من الجسم. الإشعاع المنبعث من الجسم عبّر عنه الفيزيائي ستيفان بولتزمان بالقانون التالي:

$$E = \sigma T^4 \quad (I.3)$$

معدل الإشعاع المنبعث من سطح درجة حرارته  $T$  يعطى بواسطة قانون ستيفان بولتزمان

بالعبارة التالية [16]:

$$Q_{rad} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (I.4)$$

#### IV. 4. ضياع الطاقة بالتبخر:

يتم تعريف الغليان كتبخر عند سطح السائل و هذا يكون فقط عندما تزيد درجة السطح عن

درجة حرارة التشبع لضغط السائل [17].

من بين الظواهر الناتجة عن عملية القطع أو التلحيم هو انتقال أو ضياع الطاقة بالتبخر وهي

ظاهرة مهمة وقد عُبر عنها كما يلي [18]:

$$Q_{vap} = \rho_m L_v V_v \quad (I.5)$$

إتخذ V. Semak et al. عبارة  $V_v$  كما يلي [18]:

$$V_v = V_0 \exp(-\mu/T_s) \quad (I.6)$$

$$\mu = ML_v/K_B N_a \quad (I.7)$$

حيث عبر عن  $V_0$  بالعبارة التالية [1]:

$$V_0 = \sqrt{5RT_s/3M} \quad (I.8)$$

## الفصل الثاني :-

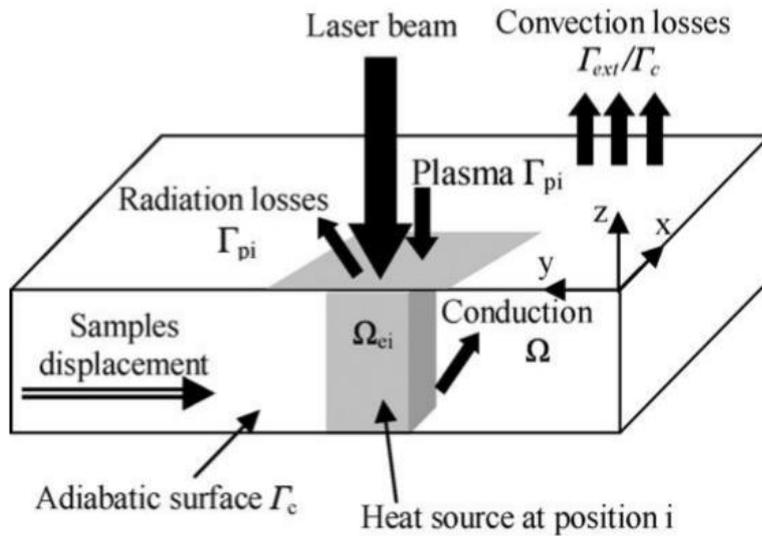
ضياع الطاقة خلال التلحيم و القطع  
بواسطة الليزر

## الفصل الثاني : ضياع الطاقة خلال التلحيم و القطع بواسطة الليزر

يعتبر توازن الطاقة في الصفائح المعدنية الصادرة من الليزر نقطة أساسية في عملية التلحيم و القطع. و من مشاكل توازن الطاقة هو الإنتقال الحراري وما يترتب عنه من ضياعات كتوصيل و حمل و إشعاع بالإضافة إلى الضياع عن طريق التبخر و الذي سيؤثر بالضرورة على جودة عملية التلحيم و القطع. و هذا يقودنا إلى الفهم الصحيح لعمليات التلحيم و القطع للمعادن.

### I. تعريف الظاهرة الفيزيائية:

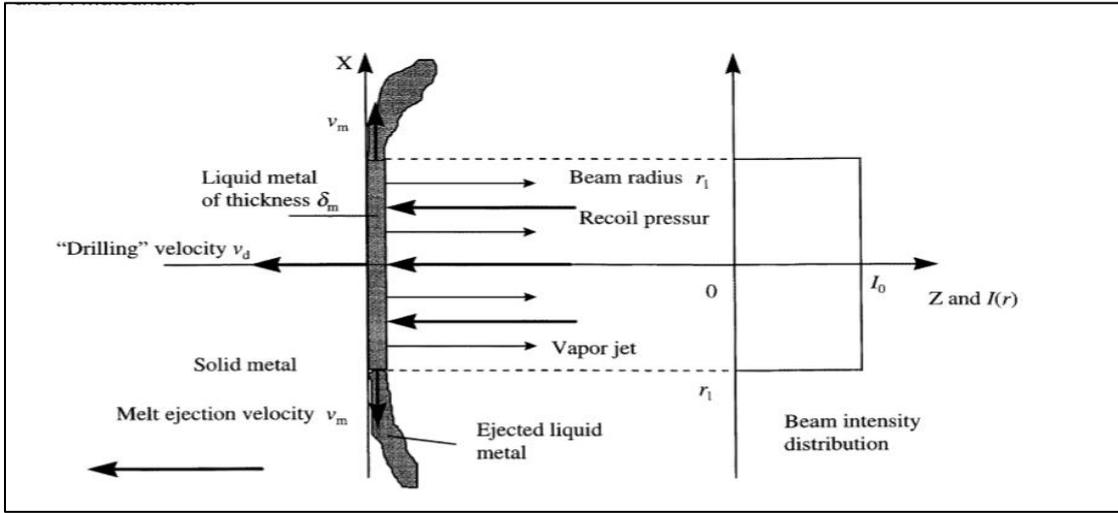
دراستنا قائمة على إيجاد ضياع الطاقة و المادة عن طريق التبخر أثناء عملية التلحيم و القطع لسبيكة التيتانيوم TA6V المستطيلة الشكل. بتسليط حزمة من أشعة ليزر ثنائي أكسيد الكربون المستمر في حالة حركة و ذو طاقة 2500 W، بسرعة 0.06 m/s و في درجة حرارة الغرفة  $T=300\text{ K}$ . يحدث جراء تفاعل أشعة الليزر مع المادة ظواهر فيزيائية كظاهرة الانتقال الحراري و ضياع الطاقة كالضياع بالإشعاع الحراري (Radiation Losses) و الحمل الحراري (Convection Losses) كما هو موضح في الشكل II-1.



الشكل II-1: مختلف ضياعات الطاقة الناتجة عن عملية التلحيم [19]

سنهتم في عملنا هذا بدراسة و تحديد الطاقة الضائعة عن طريق التبخر كما هو موضح في الشكل II-2 و هو نموذج مادي يصف ظاهرة ضياع الطاقة المنصهرة و المتبخرة. هذا النموذج يوضح مبدأ إيزان الطاقة وفقاً للكتلة و الضغط و الطاقة الممتصة بشدة  $I(r)$ .

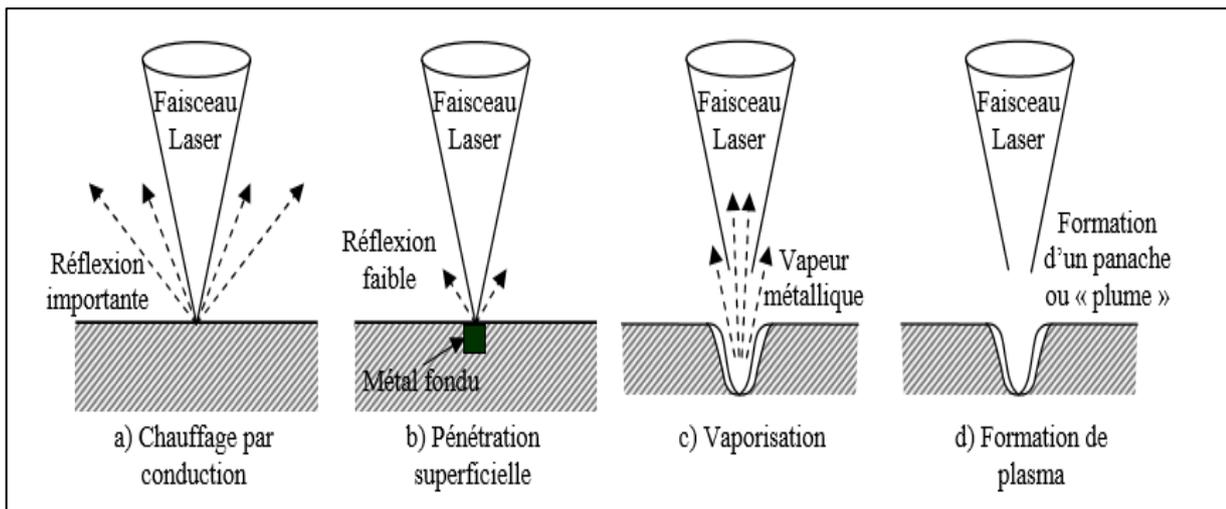
فبعد تسليط شعاع ليزر بطاقة  $I_0$  و نصف قطر  $r_1$  يسقط وفق المحور العمودي  $z$  على سطح الصفيحة ذات الطول  $l$  وفق المحور  $x$  بسمك  $d$ . تنتقل الحزمة بسرعة ثابتة إلى السطح فتؤدي إلى تسخينها وصولاً إلى الحالة السائلة  $L$  و يتشكل ثقب بسرعة إختراق (حفر)  $v_d$  فيطرده الذوبان المنصهر في حالة  $L/S$  بسرعة  $v_m$  و بفعل ضغط الإرتداد الناتج عن طرد البخار المعدني  $v_{peur}$  jet في حالة  $L/V$ . فيؤدي ذلك إلى إنخفاض في سمك الذوبان و ذوبان جزء جديد من المعدن الصلب . solid metal



الشكل II-2: نموذج مادي لظاهرة طرد المواد المنصهرة و المتبخرة من منطقة التفاعل [18]

نلخص الظواهر التي تحدث للمادة في عملية اللحام أو القطع بالليزر مع مراعاة التغير في الطور و

الموضحة في المراحل التالية الشكل II-3.



الشكل II-3: المراحل الرئيسية لمختلف الظواهر الناتجة عن اللحام أو القطع بالليزر [20]

**a. تسخين السطح الصلب بالتوصيل : Chauffage par conduction**

يتم تسخين المادة في الحالة الصلبة بالتوصيل الحراري.

**b. الإختراق و الإنصهار السطحي : Pénétration superficielle**

تتسبب الطاقة الممتصة في إنصهار و اختراق سطح المعدن في منطقة التأثير.

**c. التبخر : Vaporisation**

حين تكون الحزمة أكثر كثافة يظهر بخار معدني في منطقة التأثير.

**d. تشكل البلازما : Formation de plasma**

بظهور ضغط بخار المعدن يتشكل عمود البخار المتأين في شكل بلازما، و الذي يدفع المعدن المنصهر حول محيط الحزمة.

**II. ضياع الطاقة عن طريق الحمل والإشعاع والتبخر:**

إن من أهم الظواهر المصاحبة أثناء عملية اللحام أو القطع بالليزر هي فقدان الطاقة و بأشكال مختلفة كضياع الطاقة عن طريق الحمل و الإشعاع و التبخر.

**II.1. دراسة ببلوغرافية لضياع الطاقة عن طريق الحمل والإشعاع:****II.1.1. في عملية التلحيم:**

نجد في بعض الدراسات قام بها بعض الباحثين في مجال التلحيم بالليزر بدراسة الظواهر الناتجة عن عملية التلحيم و ذلك بالاهتمام بضياع الطاقة عن طريق الحمل و الإشعاع الحراري [19-20-21].

كما جرت العديد من الدراسات في المخبر (LRPPS) "مخبر الإشعاع والبلازما و فيزياء السطوح " فيما يخص عملية التلحيم بالليزر لصفائح معدنية حيث إهتمت S. Guerrida [23] بدراسة توزيع درجة الحرارة على السطح كدالة للزمن باستعمال ليزر ثابت. كما اهتمت K.Telib [24] بمعالجة التغير الطوري (الإنصهار) في ليزر متحرك، أما S. Benchaal [25] فدرست توزيع طاقة المصدر على صفيحة ثلاثية البعد مع فرضية إهمال الضياع الناتج عن الحمل والإشعاع و من النتائج المتحصل عليها هو أن الإنتشار الحراري لم يتجاوز 1 mm على المحور X بإستطاعة قدرها P=600W. أما S. Khemgani [26] فدرست الضياع الحراري الناتج على الحمل و الإشعاع و ذلك بنمذجة الإشعاع الحراري على السطح أثناء اللحام بالليزر لصفيحتين معدنيتين و من بين نتائجها هو أن الطاقة الضائعة عن طريق الإشعاع كبيرة مقارنة بضياع الحمل و هذا عند

الفاصلة  $x=0$  أما عند  $x$  كبيرة فكانت الطاقة الضائعة عن طريق الإشعاع أقل بكثير مقارنة حالة  $x=0$  أما بالنسبة للضياع بالحمل زادت قيمة طاقته بمقدار صغير جدا في حدود 0.005

## II.1.2. في عملية القطع:

بينما نجد في مقالات أخرى فيما يخص عملية القطع بالليزر درست الضياع بالتوصيل الحراري بالإضافة إلى مقادير فيزيائية أخرى أثناء قطع سبائك معدنية بالليزر دون مراعاة التبخر نذكر منها:

في سنة 1993 مقال [27] W. Schulz et al. قام بدراسة الطاقة بالتوصيل الحراري أثناء قطع المواد بالليزر، وقد تم حساب طاقة التوصيل و الحمل فقط مع بعض المقادير الأخرى و قد أهمل جانب طاقة التبخر و ضياع الكتلة المتبخرة.

في 2009 تم نشر مقال من طرف [28] A.Mahrle et al حول دراسة الجانب النظري للقطع بألياف ليزر ثاني أكسيد الكربون على الفولاذ، و قد إهتم بتحديد سرعة القطع و عمق الشق و شدة الامتصاص و لم يهتم بجانب ضياع الطاقة و المادة عن طريق التبخر.

في سنة 2010 تم إنجاز مقال من طرف [29] C.Wandera et al حول متطلبات طاقة الليزر لقطع الفولاذ السميكة و تأثيراته على جودة قطع الفولاذ الطري، تم دراسة درجات الحرارة و عرض شق القطع و لم يتم مراعاة لجانب التبخر و دراسة ضياع الطاقة و المادة.

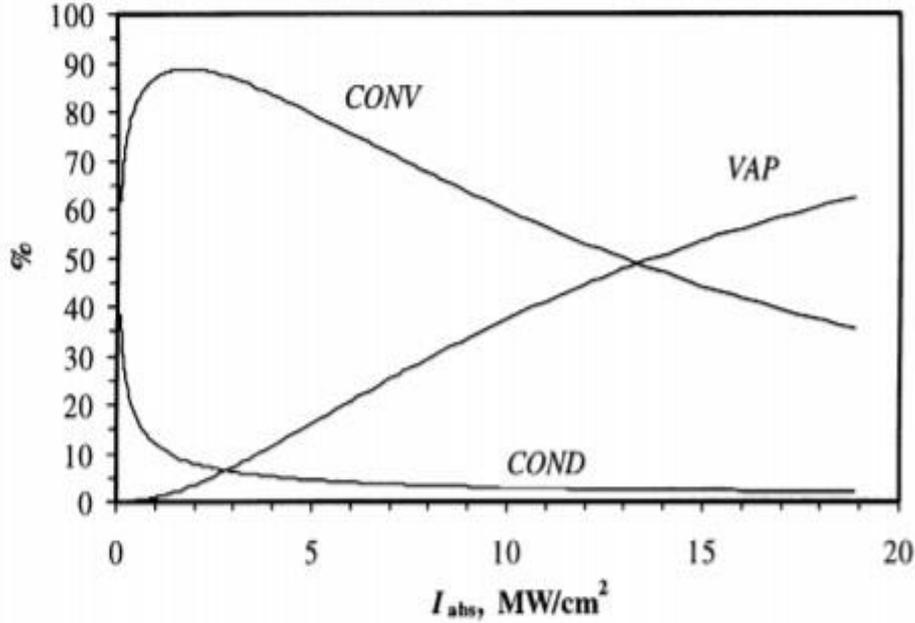
في سنة 2014 مقال للباحث [30] P.Mucha et al بعنوان نموذج التدفق الحراري المعايير لتحديد خسائر التوصيل الحراري بواسطة القطع بألياف ليزر ثاني أكسيد الكربون، تم حساب درجات حرارة الانتقال الحراري بالتوصيل و تحديد سرعة القطع، في حين لم يراعي مجال تبخر المادة الضائعة و خسائر طاقة التبخر.

## II.2. دراسة ببلوغرافية لضياع الطاقة عن طريق التبخر:

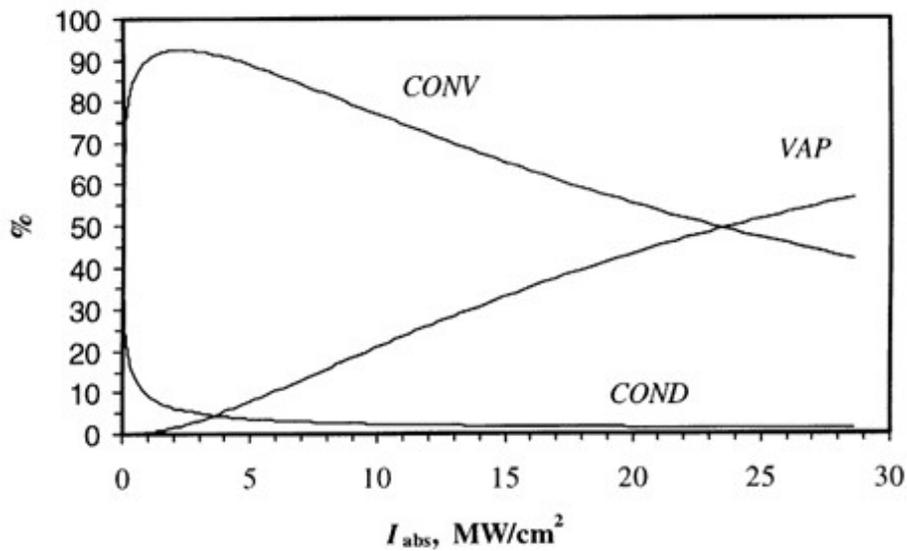
تحدث ظاهرة التبخر نتيجة لارتفاع درجة حرارة السطح وبلوغه درجة الغليان في ظل هذه الظاهرة يتم فقدان جزء من الطاقة الممتصة بواسطة التبخر و وفقا لهذه الحالة نقوم بأخذ عينة من بعض الدراسات السابقة و البحوث العلمية التي تناولت ضياع المادة عن طريق التبخر في عمليتي لحام و قطع المعادن.

**1.2.II. في عملية التلحيم:**

في سنة 1997 قام V.Semak et al. [18] بمعالجة عددية لدور ضغط الإرتداد في طرد المواد المنصهرة لمادتي Fe و Al أثناء التلحيم/القطع بالليزر و قد وجد تباين في نسب ضياعات الطاقة في معدني الحديد و الألمنيوم و قد توصل إلى أن زيادة الطاقة الممتصة تزيد في نسبة التبخر في حين تنخفض نسبة ضياع الطاقة بالتوصيل و الحمل وكذلك تتغير بتغير نوع المعدن، كما هو موضح في الشكلين التاليين:



الشكل 4-II: مخطط بياني لنسب مختلف ضياعات الطاقة بالتوصيل و الحمل و التبخر لمعدن الحديد بشعاع ليزر نصف قطره  $1.9 \times 10^{-2}$  cm [18]



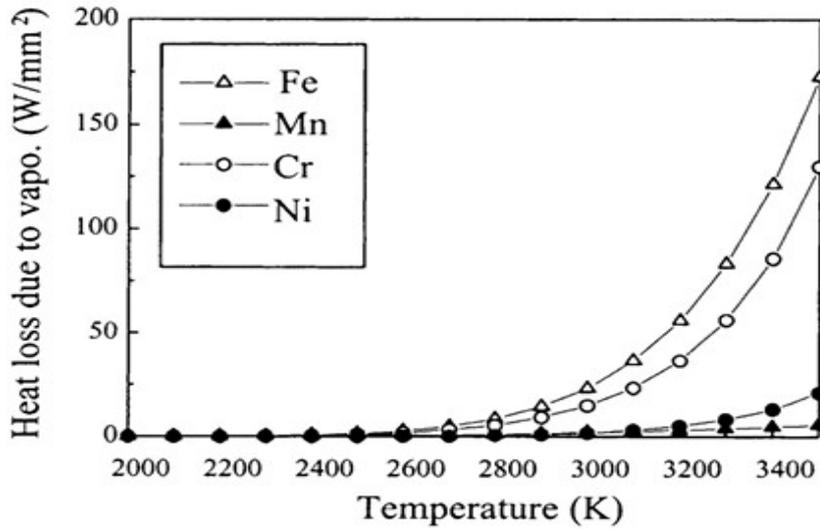
الشكل 5-II: مخطط بياني لنسب مختلف ضياعات الطاقة بالتوصيل و الحمل و التبخر لمعدن الألمنيوم بشعاع ليزر ذو نصف قطر  $1.9 \times 10^{-2}$  cm [18]

وجد أن نسب ضياعات الطاقة لمعدن الحديد أكبر بالمقارنة في حالة الألمنيوم بالنسبة لطاقة الليزر الممتصة 70% عند درجة حرارة 2500 K و كمية طاقة  $1.5 \text{ MW/cm}^2$ . لقد حددنا هذه النسب و مثلناها في الجدول II-1.

**الجدول II-1:** النسب المئوية لضياعات الطاقة لمعدني الحديد و الألمنيوم حسب نتائج [18]

	نسبة ضياع الطاقة بالحمل	نسبة ضياع الطاقة بالتوصيل	نسبة ضياع الطاقة بالتبخر
معدن الحديد	87%	10%	3%
معدن الألمنيوم	91%	8%	1%

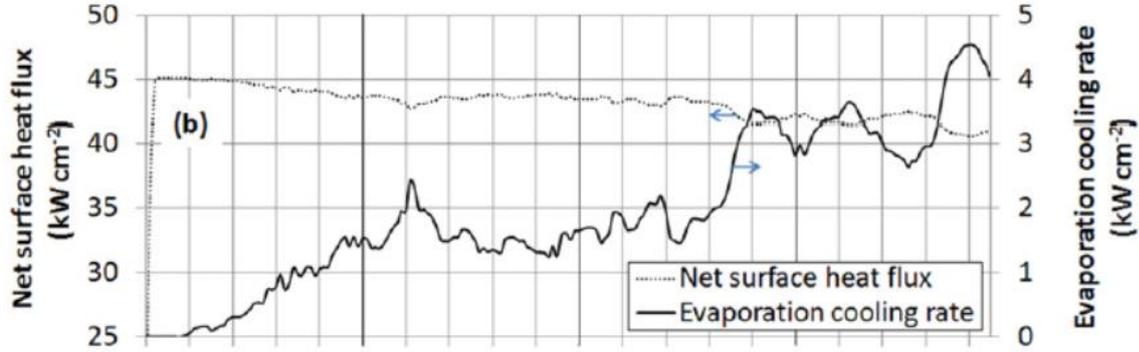
في سنة 2001 جاء في مقال M. Hidekazu et al. [31] أن مراعاة تأثير الاختلاف في الخصائص الفيزيائية للمادة يعزز من دقة معالجة ظاهرة التبخر. في هذا الجانب تمت دراسة و معالجة الطاقة الضائعة بالتبخر لمواد مختلفة وذلك لكل من Fe، Cr، Ni و Mn وهي العناصر المكونة لسبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ و قد أظهرت تطور ضياع الطاقة عن طريق التبخر بدلالة درجة الحرارة. فطاقة التبخر الضائعة من الحديد Fe في درجة حرارة تبخره كبيرة جدا مقارنة مع باقي المعادن و نتائج التحليل موضحة في الشكل II-6.



**الشكل II-6:** تغيرات الطاقة الضائعة بالتبخر لعناصر سبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ بدلالة درجة الحرارة [31]

في سنة 2009 نشر مقال J.Cho et al. [32] حول تلحيم معدن التيتانيوم بالليزر، تم استخدام محاكاة عددية لدراسة تطور المراحل الأولية لتشكيل الثقب الشعيري (keyhole) باستطاعة ليزر من 500 ، 700 و 900 W تم تطبيقها على السطح العلوي للتيتانيوم في شكل تدفق حراري

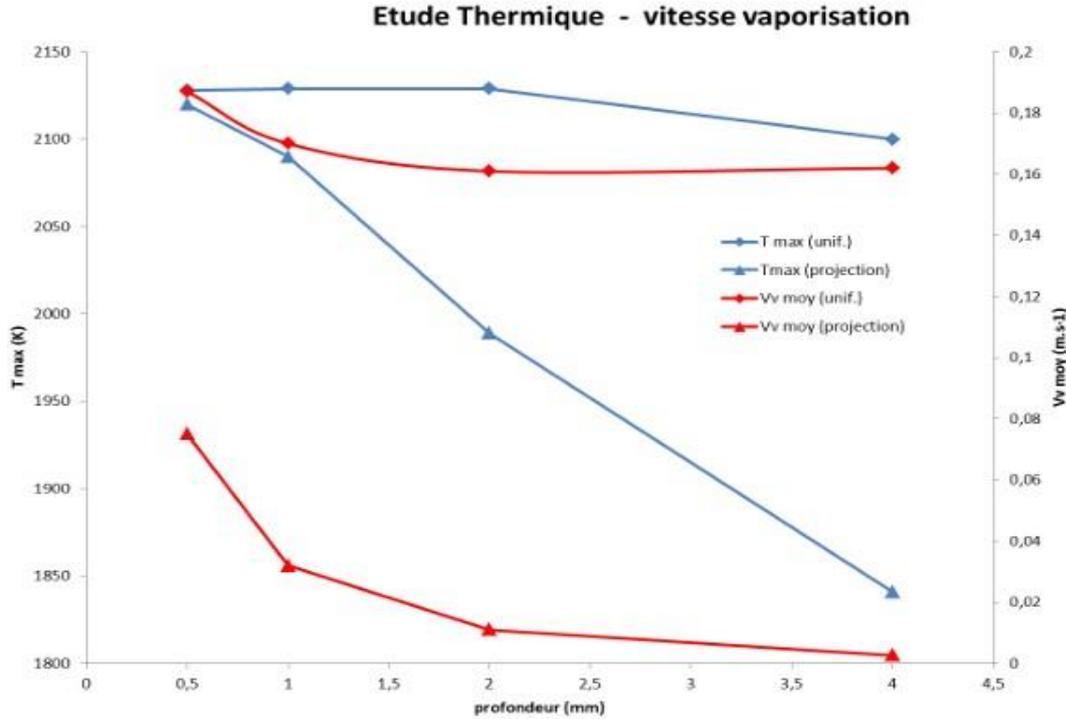
غوصي كما تم حساب معدل التبخر عند التبريد و تدفق الحرارة السطحية. لوحظ أنه كلما زادت طاقة الليزر زاد عمق الثقب بمرور الزمن. أنتج هذا النطاق من القوة معدل تبخر من المعتدل إلى الكبير من سطح حوض هذا اللحام كما في الشكل II-7.



الشكل II-7: مخطط بياني يوضح التدفق الحراري السطحي و معدل التبخر عند التبريد [32]

سنة 2012 جاء في رسالة دكتوراه M.Massaoud [1] دراسة تطور و تشكل الثقب الشعيري في حالة الحفر العميق و اللحام بالليزر لوصلة (زنك/زنك) و (زنك/كوارتز) عن طريق النموذج العددي و المحاكاة. تم فيها مقارنة طاقة التبخر بالطاقة الممتصة على سطح الثقب لزنك/كوارتز. توصل إلى أن فقدان المادة عن طريق التبخر يكون منخفضا مما أدى إلى عدم مراعاة حالة فقد المادة المتبخرة أما في حالة (زنك/زنك) تظهر النتائج أهمية آلية فقدان المواد بالتبخير لوجود فقدان معتبر.

من أجل توضيح أهمية تأثير شكل السطح تم الحصول على نتائج مختلفة لكثافة الليزر و ذلك وفق السطح المستوي uniforme و على ميل جدار الثقب بالإسقاط projection تخضع الحزمة التي تصل إلى جدار الثقب لكثافة أقل مما هو عليه في السطح العلوي. و في تقدير أهمية سرعة الحفر بسبب التبخر يتم حساب كفاءة الطاقة المفقودة بالتبخير و قد توصل إلى تحديد قيمة السرعة المتوسطة للتبخير في حدود 0.003- 0.075 m/s حالة اللحام زنك/كوارتز و لوحظ أن السرعة تميل إلى الإنخفاض مع زيادة العمق ما يؤدي إلى تركيز للتدفق في العمق مما يؤدي إلى زيادة ظاهرة التبخر و لكن هناك إنخفاض في متوسط درجة الحرارة على سطح الثقب ينتج عنه إنخفاض في متوسط ضغط الإرتداد و سرعة الحفر، كما هو موضح في الشكل II-7.



**الشكل II-8:** درجة الحرارة القصوى والسرعة المتوسطة للتبخير في استطاعة ليزر 3 kW و نصف قطر R=0.225 mm [1]

في سنة 2013 صدر مقال من S.Aleksander [16] حول نمذجة شد السطح في منطقة الثقب أثناء التلحيم بالليزر و معالجة ضياعات الطاقة بالحمل و الإشعاع و التبخر. أجريت الحسابات على صفيحة فولاذ بسمك  $2 \times 10^{-3}$  m تم لحامها باستعمال شعاع ليزر قطره  $5 \times 10^{-4}$  m و طاقة 1-3 kW عموديا على السطح العلوي للعينة تتحرك بسرعة ثابتة 0.02 m/s. عندما كانت قوة الشعاع 1 kW يشكل سطح المعدن تجويفا صغيرا ضغط الإرتداد غير قادر على تجاوز قوة شد السطح (التوتر السطحي) أما في القوة 3 kW و 6 kW يزيد ثقب المفتاح مع زيادة درجة الحرارة فضغط الإرتداد يتجاوز قوة شد السطح ليصبح الثقب أعمق و أضيق.

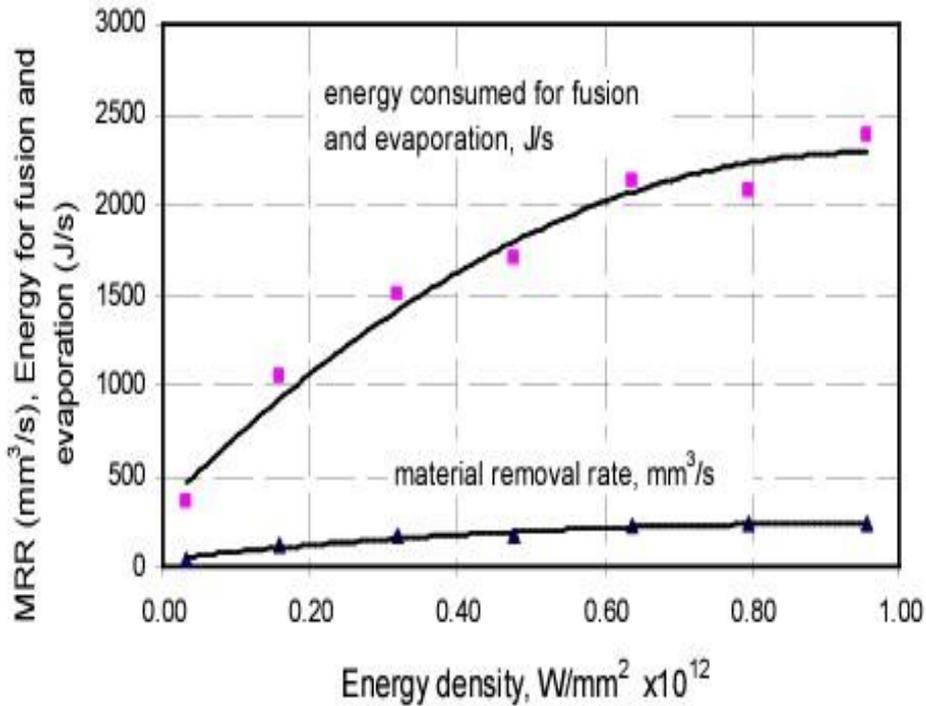
أما في سنة 2018 صدر مقال T.Zhang et al [33] تمت فيه دراسة الخصائص الديناميكية للمنطقة المنصهرة التي تعتبر ذات أهمية كبيرة في رؤية التعقيد في عملية التصنيع للمواد المعدنية المضافة و بالتالي لها تأثير كبير على الجودة. جرت هذه الدراسة على تلحيم سبيكة التيتانيوم TA6V بالليزر باستعمال محاكاة عددية مع مراعاة التغير في الطور و ضغط الإرتداد و التوتر السطحي. و قد وُجد أن تبخر المعدن لا يحدث على السطح فقط و لكن أيضا داخل المنطقة المنصهرة بسبب إنخفاض الضغط. و قد كان معدل الذوبان عال إذ حدث تغير في درجة حرارة من 1500 K إلى

3500 K خلال زمن صغير قدره  $50\mu\text{m}$  مع ذلك كانت مرحلة التبريد أطول بعشر مرات. عند زيادة إشعاع الليزر و بشكل مستمر تصل درجة الحرارة داخل المنطقة إلى نقطة الغليان.

## 2.2.II. في عملية القطع:

نذكر في ما يلي بعض المقالات التي اهتمت بدراسة عملية قطع المعادن بالليزر وإجراء برامج عددية وحسابات من أجل تحديد ضياح الطاقة عن طريق التبخر.

قام سنة 2005 RAVINDRA H. PATIL [13] بدراسة تحت موضوع النمذجة الحرارية لعملية الثقب و القطع بالليزر للمواد الهندسية. تم تحديد درجات الحرارة لكل زمن و موضع لسبيكة من الفولاذ، كما تم استغلال حرارة الإنصهار و التبخر لحساب كمية المادة التي تمت إزالتها و تحديد مقادير أخرى متعلقة بالظاهرة كما في الشكل II-8.



الشكل II-9: الطاقة المستهلكة للإنصهار و التبخر و معدل الكتلة المزالة [13]

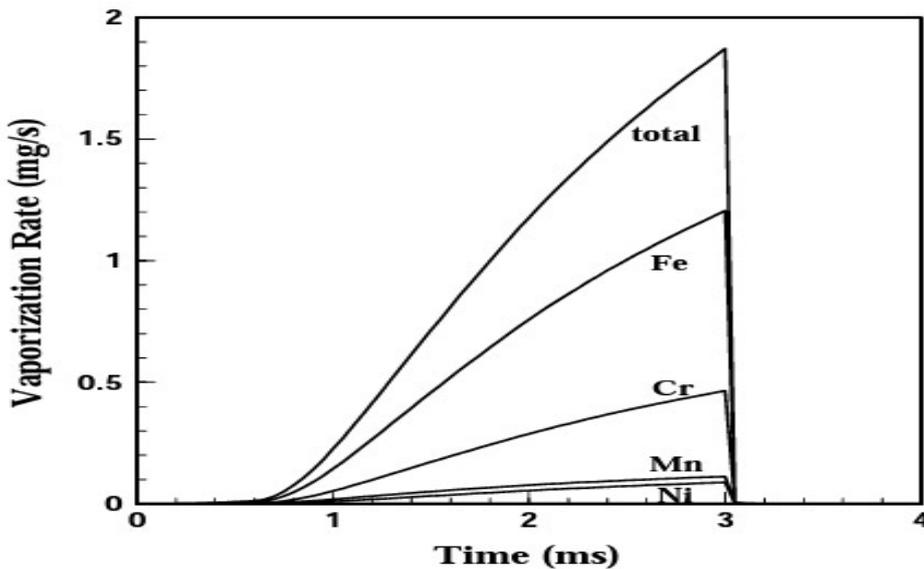
في سنة 2010 جاء في مقال I.Sorin LEOVEANU et al. [34] تشكل الشق أثناء الثقب و القطع بليزر Nd-YAG لسبائك Al-3wt% في وجود غاز  $\text{N}_2$  مع الأخذ بعين الاعتبار الظواهر الحرارية التي تتحكم في ديناميكا التدفق و الإنصهار و التبخر و العوامل المتحكممة في غازات القطع، تم إجراء محاكاة عددية لثقب شق قطره  $0.3505\text{ mm}$  في سبيكة Al-3wt%Cu. كما تم إجراء محاكاة لصفائح النحاس الرقيقة لحفر ثقب نصف قطره يتراوح من  $0.35\text{ mm}$  إلى  $1.2\text{ mm}$

وقد وجد في هذا العمل أن سرعة الغاز و تغير الضغط على الثقب هي عوامل مهمة تؤثر على هندسة السطح.

من الأعمال الأخرى في سنة 2012 من طرف D.Lee et al. [35]، تم فيها إجراء دراسة حسابية و تجريبية لقطع رقائق النحاس بسلك  $10\mu\text{m}$  و الألمنيوم بسلك  $15\mu\text{m}$  باستعمال ليزر أحادي النمط طاقته  $500\text{W}$  ونصف قطره  $11\mu\text{m}$  بحيث تنتزع الحزمة بشكل غاوسي. تعتمد هذه الدراسة على النموذج الرياضي للتدفق، الانتقال الحراري، التبخر و تطور السطح الحر و القوى السطحية مع التغيرات الطورية للرقائق. تمت الحسابات وفق قيمتي الضياح بالحمل و التبخر التي تؤثر على تشوه الواجهة. توصلت هذه الدراسة أن عملية قطع النحاس بالليزر تعتمد على كثافة الليزر و زمن التفاعل بينما قطع الألمنيوم يعتمد على كثافة الليزر أكثر من زمن التفاعل.

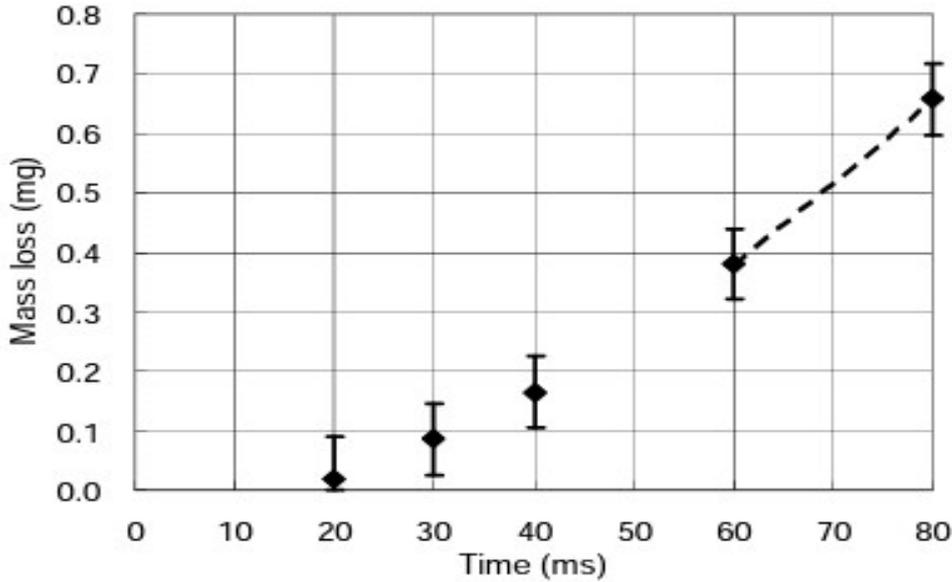
### III . ظاهرة طرد الكتلة المزالة بالقذف و التبخر:

عاجت أطروحة في علوم و هندسة المواد من طرف الباحث H.Xiuli [36] سنة 2006 جانب نقل الحرارة و الكتلة في حالة اللحام بالليزر للفولاذ المقاوم للصدأ تمت بدراسة معدل التبخر بدلالة الزمن لكل Fe، Cr، Mn و Ni و هي العناصر المكونة لسبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ و تحصل على الشكل الذي أدناه. قام بمقارنة خسائر الكتلة بسبب التبخر المحسوبة مع فقدان الكتلة المحررة تجريبيا بطاقات لحام مختلفة. أدت المقارنة إلى وجود اختلاف الذي أسنده إلى أن فقد جزء من الكتلة يحدث بسبب التبخر و الجزء الآخر يطرد بشكل قطرات معدنية من حوض اللحام بسبب ضغط الارتداد الذي تمارسه الأبخرة المعدنية.



الشكل II-10: تغيرات معدل التبخر بدلالة الزمن [36]

قام الباحث R.Fabro [37] سنة 2014 بدراسة حول التحديد التجريبي لعتبة تشوه درجة الحرارة السطح المنصهر أثناء تفاعل الليزر مع الحديد في الضغط الجوي، وذلك في حالتى التلحيم و القطع بواسطة الليزر حيث تم تحديد معدل التبخر و قياس مقدار ضياح الكتلة المتبخرة تجلى ذلك في الشكل الموالي الشكل II-11.



الشكل II-11: مخطط بياني لمقدار الضياح في الكتلة المتبخرة بدلالة الزمن [37]

في دراسة أخرى قام بها الباحث Simonds J. Brian et al [38] سنة 2018 بعنوان الزمن المحدد للإمتصاص و ديناميكية حوض الإنصهار أثناء التشيع المكثف بالليزر على المعادن. هذا المقال قائم على دراسة تفاعل الليزر عالي الإشعاع مع سبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ 316، أجريت حسابات للضياحات الإشعاعية على السطح، و تم قياس الكتلة المفقودة أثناء اللحام (النبضي) و من نتائج هذه الدراسة أن مقدار الكتلة المفقودة يزداد بزيادة الطاقة الممتصة والتي قدرت في المجال من 5.8 إلى 115 ميكروغرام. و قد وجد أن فقدان الكتلة عند الطاقات الدنيا تطرد المادة المنصهرة بشكل قطرات و في حالة الطاقات العالية تفقد في شكل بخار معدني.

## IV . الدراسة الرياضية:

هذه الدراسة هي إمتداد لدراسة سابقة [21] S. Lemkeddem أين أهمل جانب ضياح الطاقة بالتبخر و حددت كمية الطاقة المفقودة بواسطة الحمل والإشعاع الحراري أثناء اللحام بالليزر لصفائح رقيقة من سبائك التيتانيوم TA6V و ذلك بالإعتماد على النموذج الرياضي و الطريقة العددية (الفروق المنتهية) و باستخدام خوارزمية غوص صايدل للحل الرياضي. للصفحة الرقيقة خصائص موحدة في العمق لذلك إفتترضت أن درجات حرارة اللحام متطابقة عند جميع أعماق الإختراق تحت ظروف اللحام المستخدمة.

إفتترضت هذه الدراسة أيضا على أنه يمكن معالجة هذه المسألة بنموذج ثنائي الأبعاد يعتمد على الخطوة الزمنية و على أبعاد شعاع الليزر و سرعة اللحام مع الإعتبار للتغير الطوري أثناء العملية باستغلال المعادلات التالية:

تمت معالجة إنتشار الحرارة في طور الحالة الصلبة بالمعادلة التالية:

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_{(x,y,t)}}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T_{(x,y,t)} + Q_{(x,y,t)} - \sigma \varepsilon_s (T_{(x,y,t)}^4 - T_0^4) - h(T_{(x,y,t)} - T_0) \quad (\text{II.1})$$

تمت معالجة إنتشار الحرارة في طور الحالة السائلة بالمعادلة التالية:

$$\rho_l C_{pl} \frac{\partial T_{(x,y,t)}}{\partial t} = \lambda_l \nabla^2 T_{(x,y,t)} + Q_{(x,y,t)} - \sigma \varepsilon_l (T_{(x,y,t)}^4 - T_0^4) - h(T_{(x,y,t)} - T_0) \quad (\text{II.2})$$

تمت معالجة إنتشار الحرارة في طور الحالة الصلبة - سائلة بالمعادلة التالية:

$$d\varphi = \left( \lambda_{sl} \text{grad} T_{(x,y,t)} \cdot \vec{n} \cdot ds + Q_{(x,y,t)} - \sigma \varepsilon_{sl} ds (T_{(x,y,t)}^4 - T_0^4) - h ds (T_{(x,y,t)} - T_0) \right) dt + Q(x, y, t) \quad (\text{II.3})$$

حيث تمثل كل من  $Q(x, y, t)$  و  $d\varphi$  كثافة طاقة الليزر و تدفق الطاقة على الترتيب.

على ضوء نتائج هذه الدراسة سنقوم بمعالجة تطور الضياع في طاقة التبخر لمواد مختلفة و المقارنة بين نسبة كل ضياع في الطاقة. و ذلك باستعمال برنامج الفتران 95 حيث قمنا بحساب كمية الطاقة الضائعة بالتبخر لمواد مختلفة الحديد، الألمنيوم، الزنك و صفائح التيتانيوم في مجال محدد لدرجات الحرارة ، كما قمنا باستغلال نتائج درجات حرارة التلحيم المستخدمة في [21] و ذلك لحساب كل من طاقة و كمية المادة المتبخرة لصفحة التيتانيوم TA6V.

من أجل إيجاد كمية الضياع في الطاقة يستلزم استخدام معادلات الإنتقال الحراري وفق الشروط المعمول بها و في ما يلي المعادلات المستخدمة لحساب الطاقة الضائعة عن طريق التبخر و معدل ضياع الكتلة.

#### IV. 1. معادلة كثافة طاقة التبخر:

في أغلب الدراسات التي عالجت ضياع الطاقة بالتبخر لوحدة السطح لوحدة الزمن استعملت المعادلة التالية [18-1]:

$$Q_{vap} = \rho_m L_v V_v \quad (II.4)$$

إتخذ V. Semak et al. [18] عبارة سرعة التبخر  $V_v$  كما يلي:

$$V_v = V_0 \exp(-\mu/T_s) \quad (II.5)$$

حيث  $V_0$  هو مقدار يدعى بثابت التبخر من رتبة سرعة الصوت يُعرف بالعبارة التالية [1]:

$$V_0 = \sqrt{5RT_s/3M} \quad (II.6)$$

أما  $\mu$  عبارتها كالتالي [18]:

$$\mu = ML_v/K_B N_a \quad (II.7)$$

#### IV. 2. معادلة انتقال الكتلة:

يتعلق صافي معدل ضياع الكتلة بسبب التبخر إلى سرعة التبخر والمتعلقة هي أيضا بطاقة الليزر المودعة على سطح الصفيحة حالة لحامها أو قطعها.  
عبر عن الكتلة الضائعة بواسطة التبخر بالعلاقة التالية [9]:

$$m' = \rho_l V_v \quad (\text{II.8})$$

وهي معدل انتقال الكتلة المتبخرة في الثانية في المتر المربع الواحد.  
كما عبر عنها بالشكل التالي [1]:

$$\frac{dm_v}{dt} = \rho_l V_v \pi R^2 \quad (\text{II.9})$$

وهي معدل انتقال الكتلة في الثانية حيث  $R$  نصف قطر حزمة الليزر.  
يمكن حساب الكتلة الضائعة من العلاقة (II.9) كما يلي:

$$m_v = \int_0^t \rho_l V_v \pi R^2 dt \quad (\text{II.10})$$

ويمكن أيضا حساب الكتلة الضائعة من مساحة  $(\Delta x. \Delta y)$ :

$$m_v = \int_0^t \rho_l V_v \Delta x. \Delta y dt \quad (\text{II.11})$$

ومن العبارة (II.4) و بعد التعويض نحصل على المعادلة التالية:

$$m_v = \int_0^t \frac{Q_{vap}}{L_v} \Delta x. \Delta y dt \quad (\text{II.12})$$

**الفصل الثالث :**

**النتائج و مناقشتها**

## الفصل الثالث: النتائج و مناقشتها

### مقدمة:

نقدم في هذا الفصل النتائج الحسابية باستخدام برنامج الفورتران 95 و ذلك باستغلال المعادلات المتحصل عليها في الفصل الثاني. إنقسمت هذه الدراسة إلى جزئين، في الجزء الأول نقوم بدراسة تطور فقدان طاقة التبخر بدلالة درجة الحرارة لمواد مختلفة وتحديد تأثير الخصائص الفيزيائية في تغيير مقدار هذه الطاقة، و في الجزء الثاني نقوم بدراسة تغيرات مقدار فقد طاقة التبخر أثناء اللحام أو القطع بواسطة ليزر CO<sub>2</sub> على مستوى نقطة في منتصف صفيحة التيتانيوم و فق مسار التلحيم. تتم هذه الدراسة بمناقشة تغيرات فقد مقدار طاقة التبخر بدلالة الزمن، و دراسة تأثير كل من قطر حزمة شعاع الليزر و البعد عن مركز نقطة التأثير، و تعيين نسبة و مقدار ضياع كمية المادة المتبخرة (تبخر المادة).

### I . الخصائص الفيزيائية لبعض المواد المستخدمة:

#### 1.1. I معدن الألمنيوم:

يعتبر الألمنيوم معدن صلب خفيف الوزن ذو بنية بلورية مكعبة، يتميز بكثافته المنخفضة مقارنة بالفولاذ، كتلته المولية 27 mol/g، له موصلية جيدة للكهرباء و الحرارة تقدر ناقلية الحرارية بـ 273W/mK و يتميز بقدرته على مقاومة الصدأ و التآكل الذي يمنع إستمرار الأكسدة، له درجة إنصهار و غليان ثابتتان، نقطة غليانه 2792 K. و الجدول III-1 التالي يبرز أهم الخصائص الفيزيائية المميزة لمادة الألمنيوم.

#### الجدول III-: بعض الخصائص الفيزيائية الرئيسية لمعدن الألمنيوم [18].

القيمة العددية	الوحدة	الخاصية الفيزيائية ورمزها
1.05	Jg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	السعة الحرارية في الحالة الصلبة C <sub>pS</sub>
1.178	Jg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	السعة الحرارية في الحالة السائلة C <sub>pL</sub>
387	Jg <sup>-1</sup>	الحرارة الكامنة للإنصهار L <sub>f</sub>
10785	Jg <sup>-1</sup>	الحرارة الكامنة للتبخر L <sub>v</sub>
933	K	درجة الإنصهار T <sub>fusion</sub>
300	K	درجة حرارة الغرفة T <sub>0</sub>
2.7	gcm <sup>-3</sup>	الكثافة الحجمية في الحالة الصلبة ρ <sub>s</sub>
2.34	gcm <sup>-3</sup>	الكثافة الحجمية للإنصهار ρ <sub>f</sub>

**2. I. معدن الحديد:**

يمتلك الحديد العديد من الخواص تميزه عن غيره من العناصر، و هو يعتبر معدن صلب فلزي إنتقالي ذو كتلة مولية 55.85 g/mol له صلادة بقدرته على مقاومة التأثيرات الخارجية، يمتلك ناقلية حرارية بمقدار 80.4 W/mK ذو بنية بلورية بشكل مكعب ممرکز الجسم يتميز بكثافة حجمية و درجة إنصهار 1808 K و درجة تبخر تقدر ب 3133K . الجدول 2-III التالي يوضح مختلف الخصائص الفيزيائية لمعدن الحديد.

الجدول 2-III: بعض المقادير الفيزيائية المميزة لمعدن الحديد [18].

القيمة العددية	الوحدة	الخاصية الفيزيائية ورمزها
0.628	$Jg^{-1}K^{-1}$	السعة الحرارية في الحالة الصلبة $Cp_s$
0.748	$Jg^{-1}K^{-1}$	السعة الحرارية في الحالة السائلة $Cp_L$
276	$Jg^{-1}$	الحرارة الكامنة للانصهار $L_f$
6088	$Jg^{-1}$	الحرارة الكامنة للتبخر $L_v$
1808	K	درجة الإنصهار $T_f$
300	K	درجة حرارة الغرفة $T_0$
7.8	$gcm^{-3}$	الكثافة الحجمية في الحالة الصلبة $\rho_s$
6.98	$gcm^{-3}$	الكثافة الحجمية للإنصهار $\rho_f$

**3. I. معدن الزنك:**

يعتبر معدن فلزي إنتقالي ذو بنية سداسية مترابطة و هو يعد من الفلزات المهمة خاصة في الجانب الصناعي لامتلاكه خصائص فيزيائية مميزة كمنع التآكل و الصدأ لبعض المعادن كالفولاذ و الحديد، كثافته تقدر ب  $6.57 g/cm^3$  ينصهر في درجة حرارة انصهار، 692.7 K و ذو درجة تبخر 1180 K كما هو موضح في الجدول 3-III التالي:

الجدول III-3: مختلف المقادير و الخصائص الفيزيائية المميزة للزنك [1]

القيمة العددية	الوحدة	الخاصية الفيزيائية ورمزها
112.2	$Wm^{-1}K^{-1}$	الناقلية الحرارية في الحالة الصلبة $\lambda_s$
164	$Wm^{-1}K^{-1}$	الناقلية الحرارية في الحالة السائلة $\lambda_L$
$0.113 \cdot 10^6$	$kJ kg^{-1}$	الحرارة الكامنة للانصهار $L_f$
$1.762 \cdot 10^6$	$kJ kg^{-1}$	الحرارة الكامنة للتبخر $L_v$
692.7	K	درجة الإنصهار $T_f$
1180	K	درجة حرارة التبخر
7.14	$gcm^{-3}$	الكثافة الحجمية في الحالة الصلبة $\rho_s$
6.57	$gcm^{-3}$	الكثافة الحجمية للإنصهار $\rho_f$
65.38	$g mol^{-1}$	الكتلة المولية M

## 4. I. سبائك التيتانيوم:

سبيكة التيتانيوم أو ما يعرف ب TA6V أو Ti-6Al-4V هي سبائك الأكثر دراسة و استخداما في مجالات عديدة كالتطبيقات الصناعية و الميكانيكية و علم الأحياء و ذلك لما تظهره من خصائص تمتازة بكثافتها المنخفضة و مقاومتها الجيدة للتآكل، ما يجعلها مادة مفضلة و شائعة الاستخدام في الصناعة، و هي عبارة عن سبيكة من الألمنيوم، الفاناديوم و التيتانيوم (T-Al-V)، في درجة حرارة الغرفة تكون عبارة عن ( ألفا + بيتا ) تحتوي أطوار ألفا و بيتا على هيكلين بلوريين مختلفين، مكعب متمركز للطور بيتا، وبنية بلورية سداسية للطور ألفا [12].

سبائك TA6V يمكن لحامها و ذلك بأشعة الليزر النبضي (PW) و المستمر (CW)، أثناء اللحام بالليزر تحدث تحولات في الطور مثل تحول ( ألفا وبيتا) تيتانيوم من الطور الصلب إلى طور الإنصهار فالتبخر فالتأين، ثم تعود أثناء مرحلة التبريد بالتدرج العكسي للأطوار السابقة [22]، نظرا لإمتلاك أشعة الليزر القدرة و السرعة الكافيتين ليتم قطع و لحام سبائك TA6V بدقة عالية، كما يوضح الجدول III-4 الآتي بعض الخصائص الفيزيائية لسبيكة التيتانيوم.

**الجدول III-4: الخصائص الفيزيائية المميزة لسبائك TA6V [32, 33\*]**

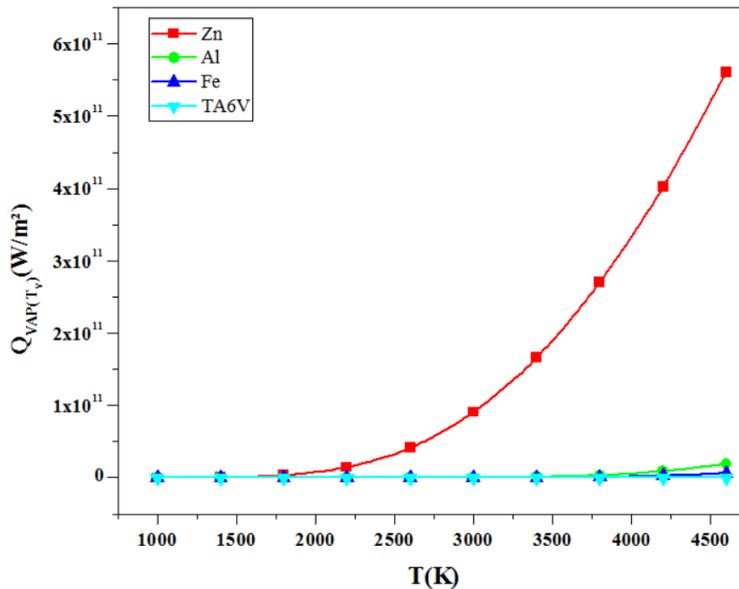
القيمة العددية	الوحدة	الخاصية الفيزيائية ورمزها
40	$Wm^{-1}K^{-1}$	الناقلية الحرارية
594	$Jkg^{-1}K^{-1}$	السعة الحرارية
403	$kJ kg^{-1}$	الحرارة الكامنة للانصهار $L_f$
$9.8310^9$	$kJ kg^{-1}$	الحرارة الكامنة للتبخير $L_v$
1953	K	درجة الإنصهار $T_f$
3562	K	درجة حرارة التبخر $T_v$
4110	$Kg m^{-3}$	الكثافة الحجمية $\rho_s$
47,9	$g mol^{-1}$	الكتلة المولية $M$

## II . تأثير الخصائص الفيزيائية على مقدار كثافة طاقة التبخر:

### II . 1. تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة درجة الحرارة:

باستخدام معادلة طاقة التبخر الموضحة في العبارة (II.1) و باستعمال نموذج لحساب تطور مقدار هذه الطاقة، قمنا برسم المنحنى البياني لتغير طاقة التبخر بدلالة تغير درجة الحرارة لكل من

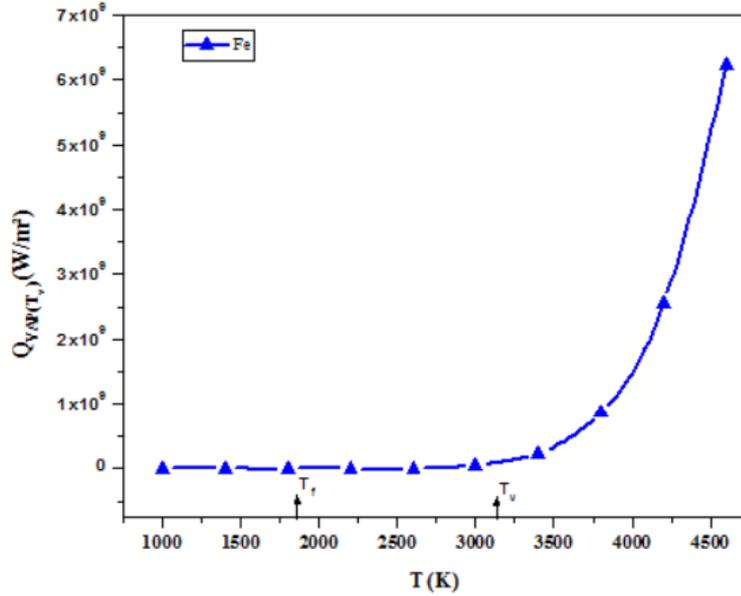
الزنك و الحديد و الألمنيوم و سبيكة التيتانيوم، كما هو موضح في الشكل. III.1



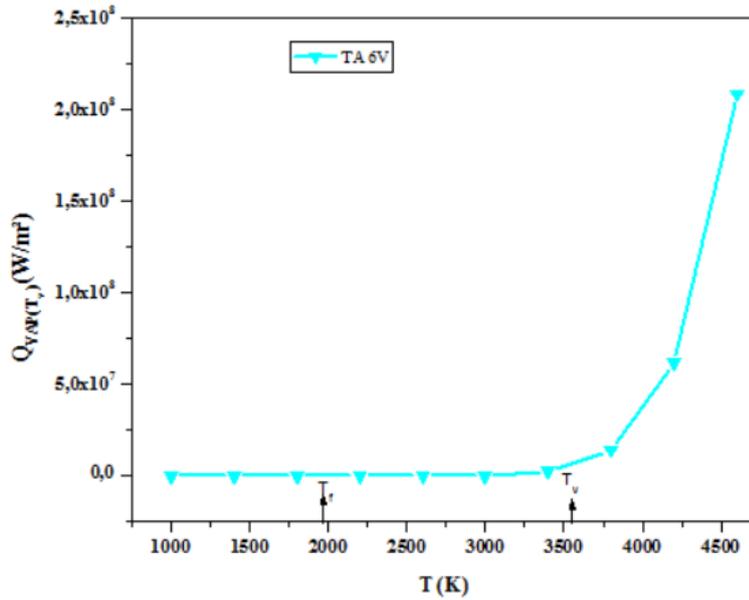
**الشكل III.1: منحنى بياني لتغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة تغير درجة الحرارة**

من خلال الشكل نلاحظ أن طاقة التبخر تزداد بزيادة درجة الحرارة و تختلف باختلاف نوع المادة، من أجل التفصيل أكثر قمنا بفصل المنحى السابق لمنحنيات خاصة بكل مادة لإبراز الاختلاف بينهم.

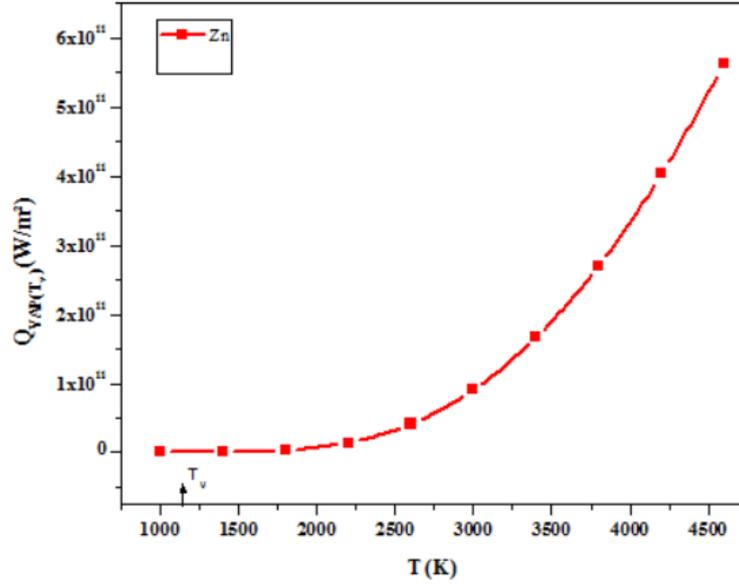
المنحنيات التالية تمثل تغيرات طاقة التبخر بدلالة تغير درجة الحرارة مع إبراز درجة الإنصهار و التبخر الخاصة بكل مادة.



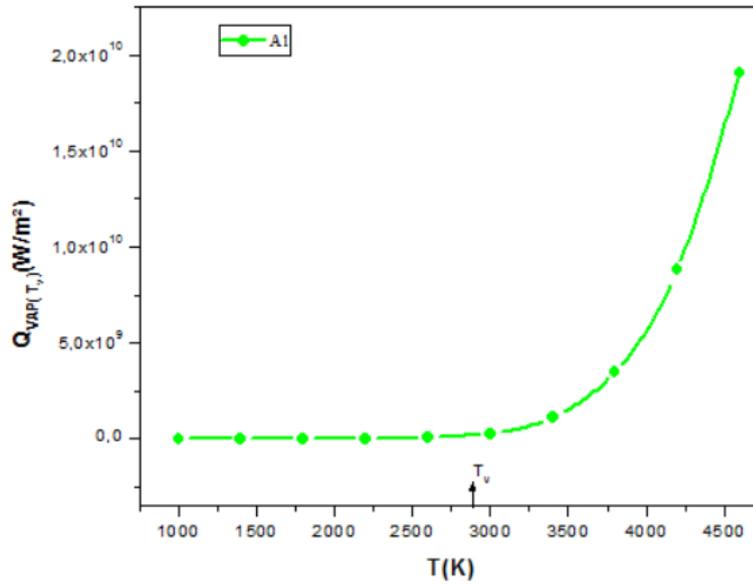
الشكل 2.III: الشكل تغيرات كثافة طاقة التبخر لمادة الحديد بدلالة درجة الحرارة



الشكل 3.III: تغيرات كثافة طاقة التبخر لسبيكة التيتانيوم بدلالة درجة الحرارة



الشكل 4.III: تغيرات كثافة طاقة التبخر لمادة الزنك بدلالة درجة الحرارة



الشكل 5.III: تغيرات كثافة طاقة التبخر لمادة الألمنيوم بدلالة درجة الحرارة

من خلال المنحنيات السابقة نلاحظ زيادة في طاقة التبخر كلما زادت درجة الحرارة، كما نلاحظ أيضا أن مقدار الطاقة يكون معتبرا إبتداءا من نقطة التبخر. و قد تصل بعض المواد إلى حالة التآين كالزنك الشكل 4.III و الألمنيوم الشكل 5.III.

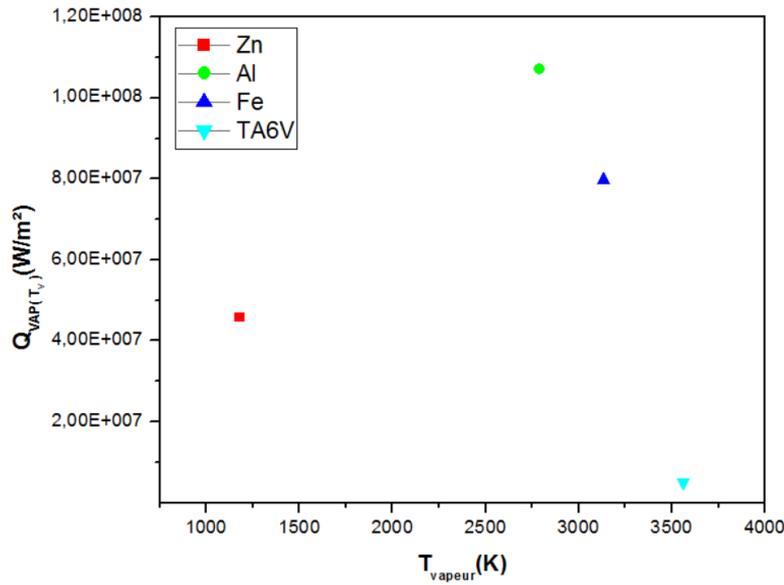
## 2.II. تغيرات كثافة طاقة التبخر لمختلف الخصائص الفيزيائية للمادة:

قمنا بحساب مقدار طاقة التبخر في حالتها في درجة الحرارة عند نقطة الإنصهار و التبخر لكل مادة من المواد السابقة . النتائج موضحة في الجدول III-5 التالي.

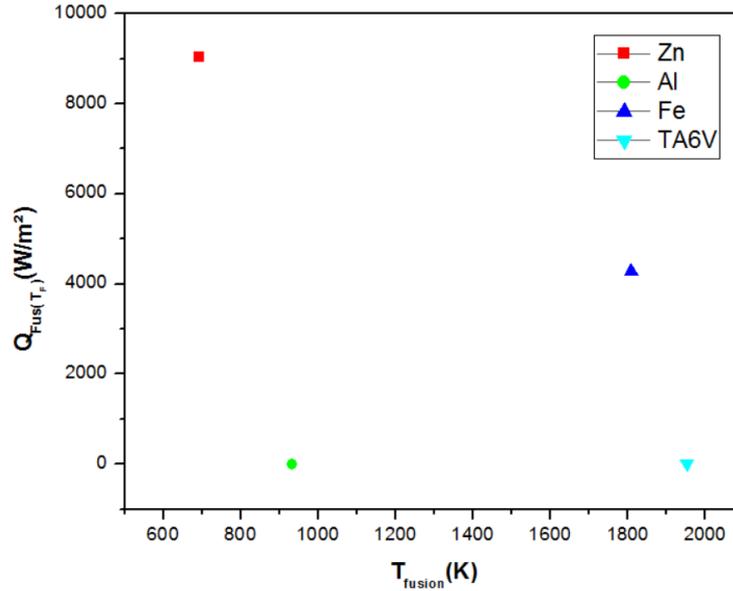
**الجدول 5.III :** نتائج مقدار كثافة طاقة التبخر المحررة لبعض المواد في حالتها في درجة حرارة التبخر و الإنصهار.

	Zn	Al	Fe	TA6V
$T_{\text{fusion}}(\text{K})$	692.7	933	1808	1953
$T_{\text{vapeur}}(\text{K})$	1180	2792	3133	3562
$Q_{\text{fus}}(\text{W}/\text{m}^2)$	9033.148	0.000854	4228.35576	7.63594
$Q_{\text{vap}}(\text{W}/\text{m}^2)$	45771896.56	107048114.01	79794287.28	5066318.679

من خلال نتائج الجدول نلاحظ أن طاقة التبخر تكون معتبرة في حالة الإنصهار وتأخذ قيم أعلى في حالة التبخر وتختلف باختلاف المادة كما هو موضح في الأشكال التالية.



**الشكل 6.III :** تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة درجة حرارة التبخر لكل مادة



الشكل 7.III: تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة درجة حرارة إنصهار كل مادة

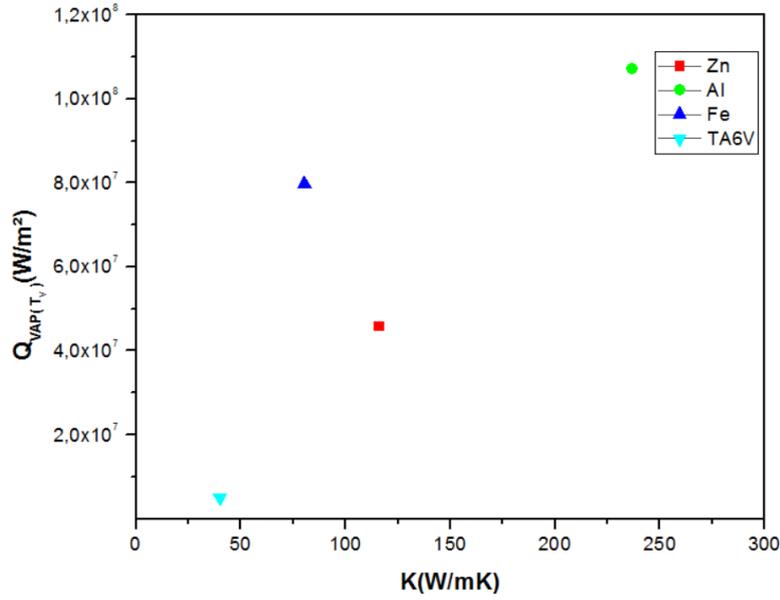
من خلال الشكل السابق يتبين أن لخصائص المادة تأثير ملحوظ على مقدار تغير طاقة التبخر و طاقة التبخر عند درجة الإنصهار لها، لأجل ذلك سنهتم باستغلال بعض الخصائص الفيزيائية و إجراء المقارنة بينها كما هو موضح في الجدول 6.III.

الجدول 6.III : علاقة خصائص المادة بكثافة بطاقة التبخر عند درجتي حرارة الإنصهار و التبخر.

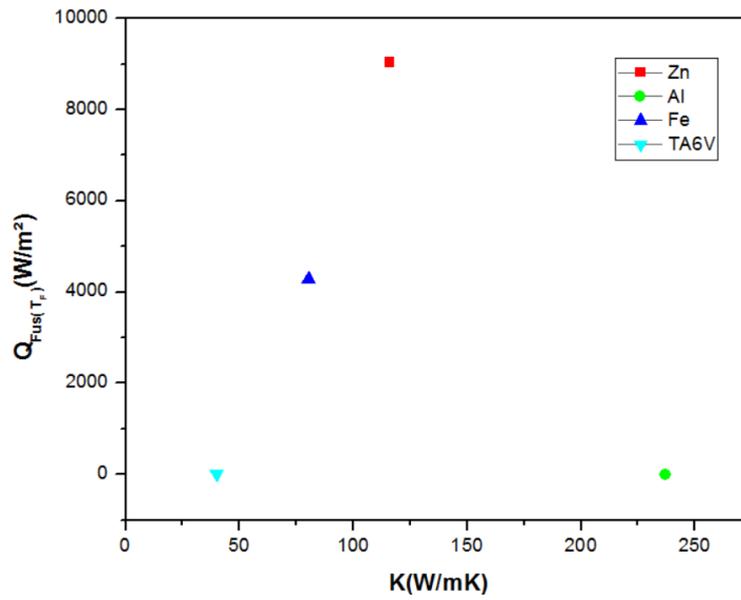
	$Q_{fus}(W/m^2)$	$Q_{vap}(W/m^2)$	$L_v (J/kg)$	$Reau (kg /m^3)$	$\lambda (W/m.K)$
<b>Zn</b>	9033.148	45771896.56	$1.762 \cdot 10^6$	6570	273
<b>Al</b>	0.000854	107048114.01	$10.785 \cdot 10^6$	2340	116
<b>Fe</b>	4228.3555	79794287.28	$6.088 \cdot 10^6$	6980	80.4
<b>TA6V</b>	7.63594	5066318.679	$9.83 \cdot 10^6$	4110	40

يتبين من خلال الجدول أن طاقة التبخر تكون محسوسة في حالة التبخر مقارنة بالإنصهار. لإظهار تأثير خصائص المادة على مقدار طاقة التبخر عند نقطتي الإنصهار و التبخر، نمثل طاقة التبخر بدلالة بعض الخصائص.

يمثل الشكل 8.III طاقة التبخر عند درجة التبخر و الشكل 9.III طاقة التبخر عند درجة الإنصهار بدلالة الناقلية الحرارية.

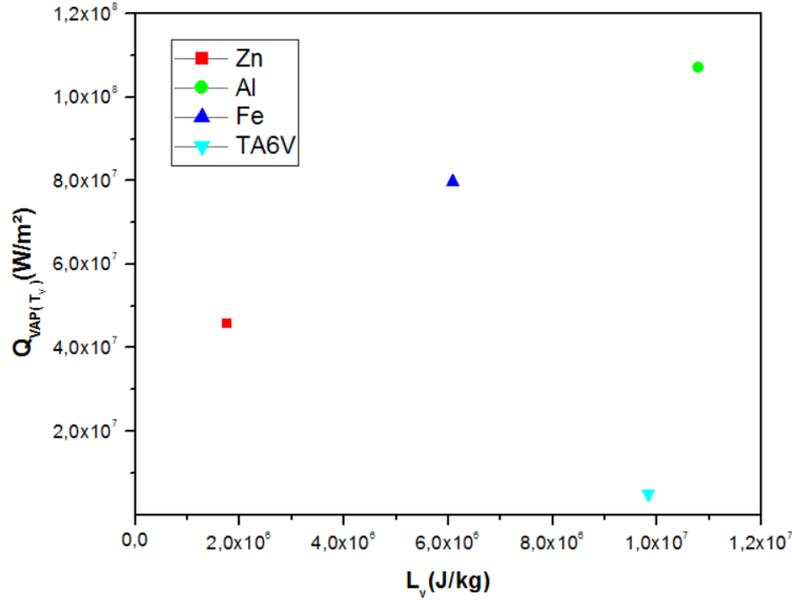


الشكل 8.III: تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة الناقلية الحرارية

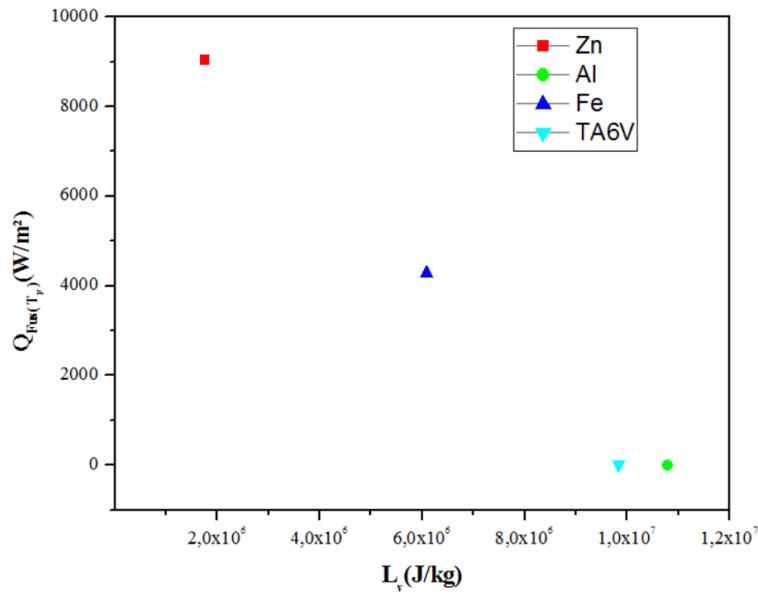


الشكل 9.III: تغيرات كثافة طاقة التبخر عند درجة الإنصهار بدلالة الناقلية الحرارية

يمثل الشكل 10.III طاقة التبخر عند درجة التبخر و الشكل 11.III طاقة التبخر عند درجة الإنصهار بدلالة الطاقة الكامنة للتبخر.

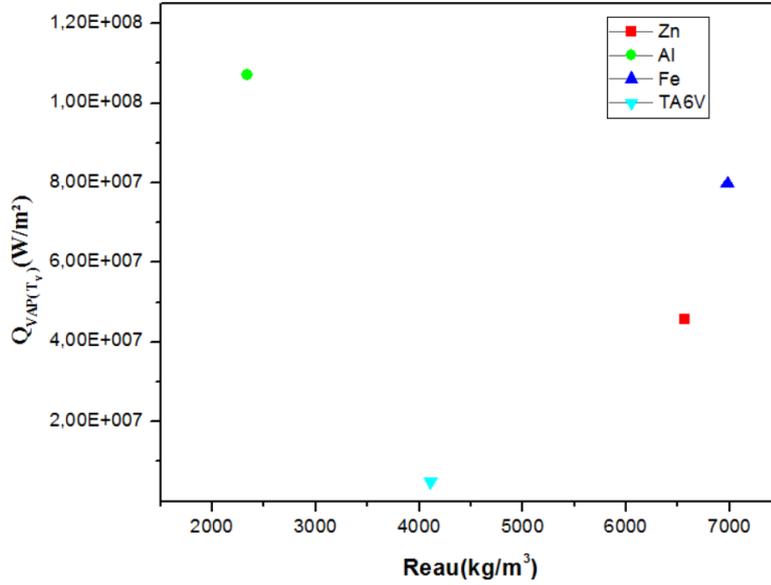


الشكل 10.III: تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة الحرارة الكامنة للتبخر

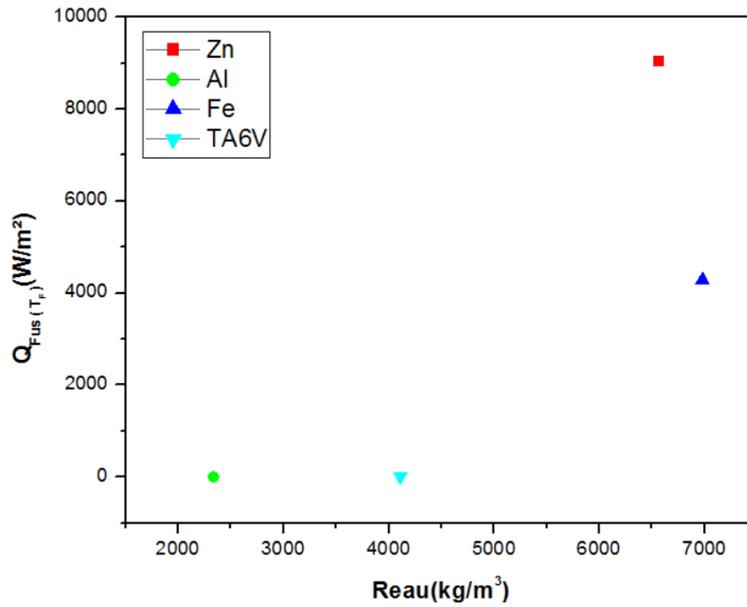


الشكل 11.III: تغيرات كثافة طاقة التبخر عند درجة الإنصهار بدلالة الحرارة الكامنة للتبخر

يمثل الشكل 12.III طاقة التبخر عند درجة التبخر و الشكل 13.III طاقة التبخر عند درجة الإنصهار بدلالة الكتلة الحجمية.



الشكل 12.III : تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة الكتلة الحجمية



الشكل 13.III : تغيرات كثافة طاقة التبخر عند درجة الإنصهار بدلالة الكتلة الحجمية

من خلال الأشكال السابقة نلاحظ أن طاقة التبخر تختلف باختلاف الخصائص الفيزيائية للمادة المميزة لها.

كنتيجة عامة تشير المقارنة لكل عنصر مع تطور درجة الحرارة  $T$  إلى أن الضياع في طاقة التبخر يظهر بشكل ملحوظ عند تجاوز درجة الحرارة  $T$  درجة التبخر  $T_V$  و يحدث هذا التطور في إتجاه المادة الأقل درجة غليان فالأكبر، كما يظهر أيضا أن لخصائص المادة دور فعال في ذلك.

### III. دراسة تغير كثافة طاقة التبخر لسبيكة التيتانيوم أثناء التلحيم أو القطع بالليزر:

نقوم بدراسة تغيرات مقدار طاقة التبخر الضائعة عند حالة اللحام لسبائك التيتانيوم في منتصف الصفيحة على طول مسار التلحيم للمحور التناظري لها ( $L_y$ )، كما هو موضح في الشكل [21].



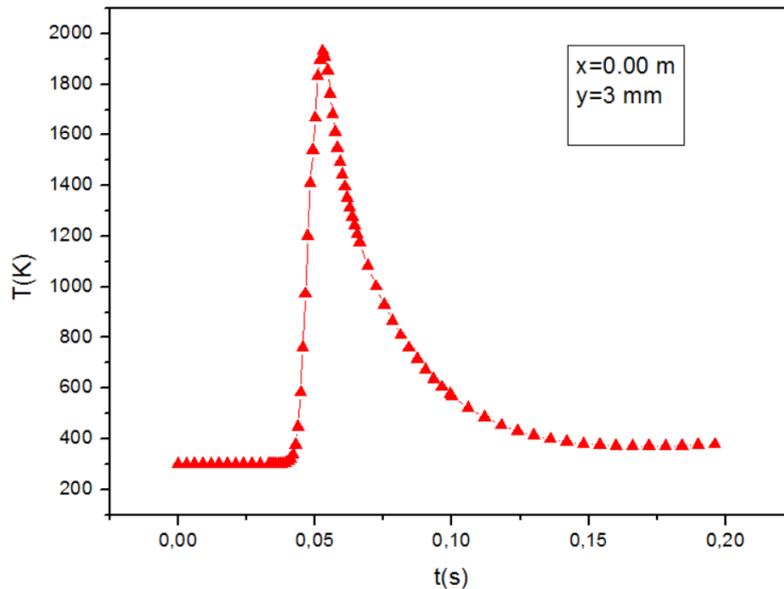
الشكل III.14 : مسار التلحيم على صفيحة ثنائية الأبعاد [21]

في هذه الدراسة خصائص ومقادير التلحيم المستعملة موضحة في الجدول III-7.

الجدول III-7: يوضح المقادير الأساسية أثناء التلحيم [21].

المقدار	القيمة
طول الصفيحة	$L_x = 0.050\text{m}$
عرض الصفيحة	$L_y = 0.006\text{m}$
قطر حزمة شعاع الليزر	$R_L = 0.25 - 0.50 \text{ mm}$
سرعة التلحيم	$V = 0.030 - 0.060 \text{ m/s}$
إستطاعة الليزر	$P = 2000 - 2500 \text{ W}$
الكتلة الحجمية في الطور	$[4300-4100-3850] = \rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$
السعة الحرارية	$[830-770-610] = \text{(J/kg K)}$
الناقلية الحرارية	$[15-27.5-35] = \lambda \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$
الإنبعائية	$[40-40-0.25]$

كما نعتد خلال هذه الدراسة على نتائج درجات الحرارة أثناء التلحيم مع تغير الزمن و المأخوذة من [21]، الشكل III-15 يمثل تغيرات درجة الحرارة أثناء التلحيم بدلالة الزمن عند النقطة  $(y=3.0\text{mm} , x=0.0\text{mm})$  عند إستطاعة ليزر قدرها  $2500 \text{ W}$  و سرعة التلحيم  $V=0.060 \text{ m/s}$ .

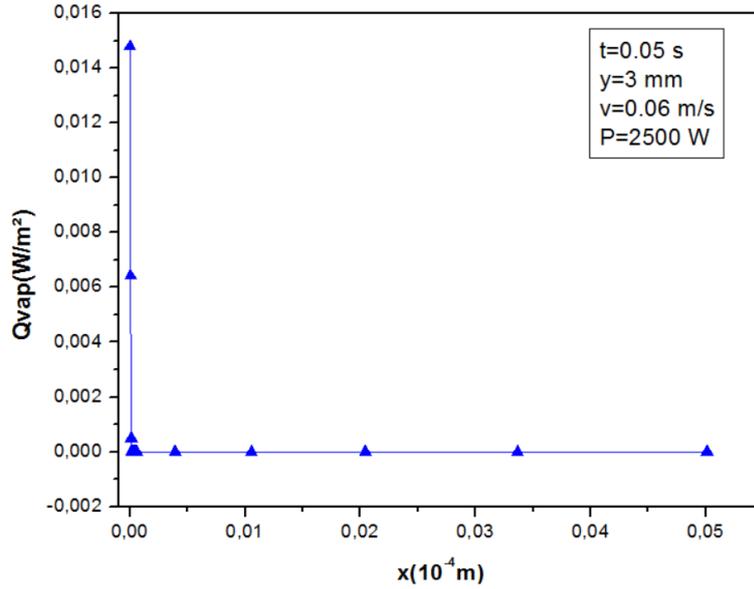


الشكل III.15 : تغيرات درجة حرارة التلحيم بدلالة الزمن لسبيكة التيتانيوم [21]

### 1.III . تغير مقدار كثافة طاقة التبخر بدلالة الزمن:

باستغلال النتائج المعتمدة لتغير درجة الحرارة بدلالة الزمن نقوم برسم منحنى تغير طاقة

التبخر بدلالة الزمن كما هو موضح في الشكل 16.III.



الشكل 16.III : منحنى تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة الزمن

من خلال الشكل نلاحظ أنه عند النقطة (x=0.0 mm , y=3.0 mm) في زمن قدره

0.053 s تأخذ كثافة طاقة التبخر الضائعة أعلى قيمة لها  $Q_{vap}=5.5532 \text{ W/m}^2$  والتي تقابل أعلى

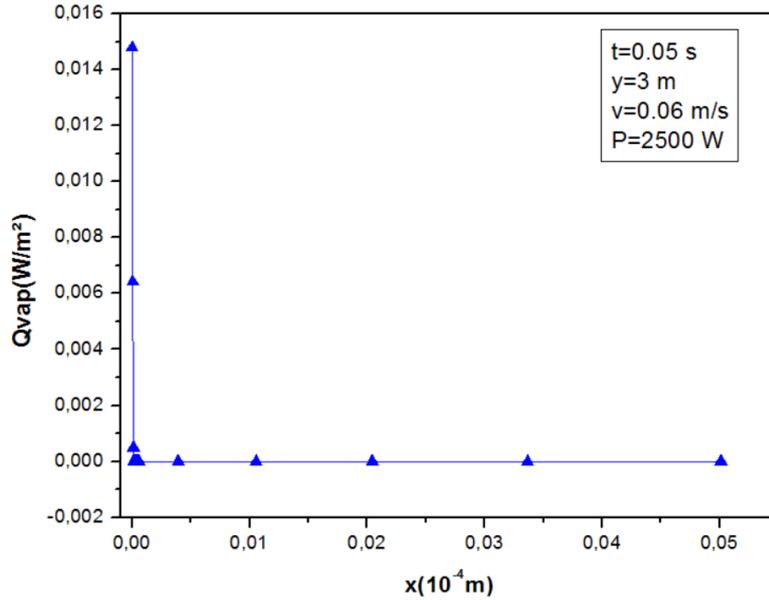
درجة حرارة و هذا في الشروط المستعملة من إستطاعة الليزر و سرعة تلحيم.

### 2.III . تغير كثافة طاقة التبخر بدلالة البعد عن نقطة التأثير:

من أجل متابعة تطور كثافة طاقة التبخر أثناء التلحيم حول نقطة التأثير عند منتصف

الصفحة y=3.0 mm وفي اللحظة t=0.05 s في شروط معينة من إستطاعة و سرعة ويتضح

ذلك في الشكل الموالي الشكل 17.III.

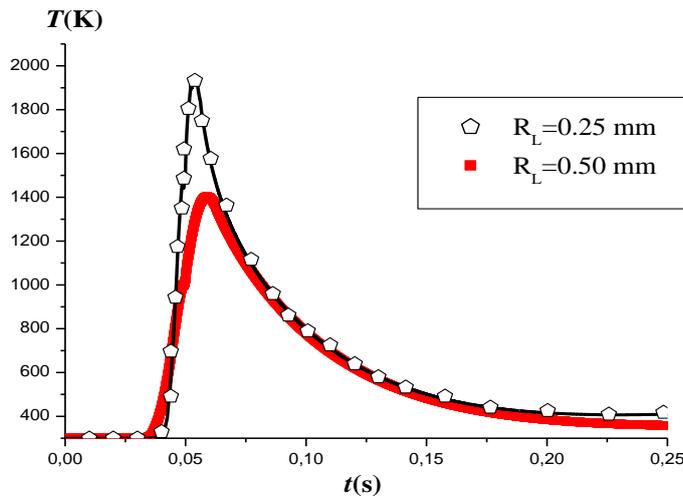


الشكل 17.III : تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة البعد عن مسار التلحيم

من خلال المنحنى نلاحظ أن عند النقطة  $x=0.0$  mm تكون كثافة طاقة التبخر أعلى قيمة و تتناقص مع زيادة  $x$  أي كلما ابتعدنا عن مسار التلحيم. نستطيع أن نقول أنه بجوار مسار التلحيم، تكون الطاقة الضائعة عن طريق التبخر أكبر.

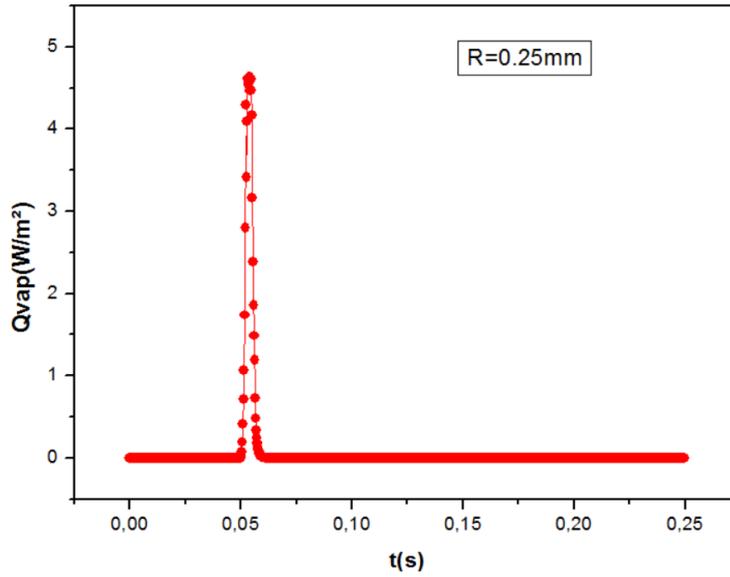
### 3.III . تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة نصف قطر حزمة شعاع الليزر:

من أجل دراسة تأثير قطر حزمة شعاع الليزر المستخدم أثناء اللحام على مقدار ضياع طاقة التبخر نعتمد على النتائج المتحصل عليها في الشكل 18.II الخاصة بتغير درجة الحرارة بدلالة الزمن عند  $R_L=0.50$  mm و  $R_L=0.25$  mm.

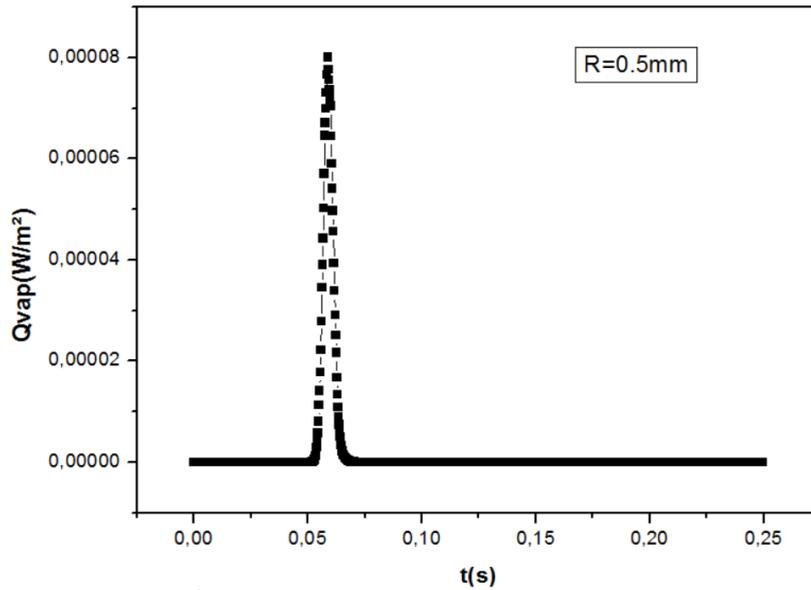


الشكل 18.III : تطورات درجة الحرارة من أجل قيمتين لنصف قطر الليزر

قمنا برسم منحنى تغيرات كثافة طاقة التبخر بدلالة الزمن عند النقطة  $y = 3\text{mm}$  في كل حالة من نصف قطر الليزر  $R_L = 0.25\text{ mm}$  و  $R_L = 0.50\text{ mm}$ .



الشكل 19.III : تغير كثافة طاقة التبخر بدلالة الزمن من أجل  $R_L = 0.25\text{ mm}$



الشكل 20.III : تغير كثافة طاقة التبخر بدلالة الزمن من أجل  $R_L = 0.25\text{ mm}$

من خلال المنحنيين السابقين نلاحظ أن كثافة طاقة التبخر ترتبط بقطر حزمة شعاع الليزر الساقط، و من أجل مقارنة النتائج المتحصل عليها نستدرج النتائج في الجدول 8.III.

**الجدول 8.III :** المقارنة بين قيمة كثافة طاقة التبخر من أجل  $R_L=0.25$  mm و  $R_L=0.50$  mm .mm

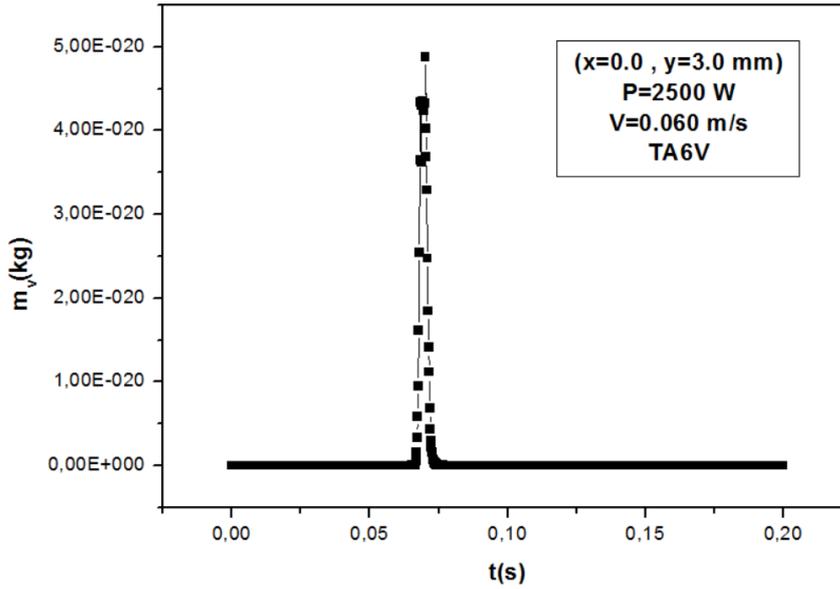
	t(s)	T(K)	Qvap(W/m <sup>2</sup> )
<b>R<sub>L</sub>=0.25mm</b>	0.05295	1927.33	5.14185
	0.05297	1928.29	5.21871
	0.05298	1917.47	4.40894
<b>R<sub>L</sub>=0.5mm</b>	0.05873	1403.92	8.00119E-5
	0.05874	1404.01	8.02126E-5
	0.05875	1403.95	8.00796E-5

بمقارنة نتائج الجدول نستنتج أنه عند نصف قطر حزمة الليزر  $R_L=0.25$ mm مقارنة بنصف القطر الأكبر  $R_L=0.50$ mm تتحرر كثافة طاقة تبخر أكبر في درجة حرارة أكبر مما هو عليه عند حزمة ليزر ذات نصف القطر الأكبر.

إن النسبة بين مقدار كثافة طاقة التبخر عند  $R_L=0.25$ mm و  $R_L=0.50$ mm كبيرة جدا و هي في حدود  $10^5$  هذه النسبة تبين أنه من أجل  $R_L=0.25$ mm أي ذات نصف القطر الأقل تحررت كثافة طاقة أكبر بكثير من الحزمة ذات القطر الأكبر  $R_L=0.50$ mm. و كنتيجة لذلك فإنه كلما كبرت حزمة شعاع الليزر نقص مقدار ضياع طاقة.

#### VI. حساب الكتلة الضائعة عن طريق التبخر:

قمنا بحساب الكتلة الضائعة عن طريق التبخر باستعمال المعادلة (II.9) لكل لحظة باستعمال معطيات المنحنى في الشكل 15.III المبين لتغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن من أجل النقطة ( $x=0$  ,  $y=3$ mm) و الموجودة على مسار التلحيم من أجل إستطاعة قدرها 2500W و سرعة قدرها 0.060m/s. المنحنى المبين في الشكل 21.III يمثل تغيرات الكتلة الضائعة بدلالة الزمن.



الشكل 21.III: تغيرات الكتلة الضائعة بدلالة الزمن

قمنا بحساب الكتلة الضائعة خلال مدة زمنية قدرها 0.1s و هي تقدر ب 0.236mg أي بمعدل 2.36mg/s.

باستعمال العلاقة (II.5) حسبنا الكتلة الضائعة عن طريق التبخر لبعض المواد في حالتها درجة حرارة التبخر و الإنصهار كما هو موضح في الجدول 9.III أدناه.

الجدول 9.III : الكتلة الضائعة عن طريق التبخر لبعض المواد في حالتها درجة حرارة التبخر و الإنصهار.

	Zn	Al	Fe	TA6V
$m'(T_{fus})$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$5.1266 \times 10^{-3}$	$7.9184 \times 10^{-11}$	$6.945 \times 10^{-4}$	$7.7679 \times 10^{-7}$
$m'(T_{vap})$ (kg/m <sup>2</sup> s)	25.9772	9.9505	13.1068	0.5153

من خلال الجدول 9.III، تشير نتائج المقارنة أن مقدار ضياع الكتلة بواسطة التبخر يختلف باختلاف نوع المادة، و تأخذ قيم معتبرة في حالة التبخر مقارنة بحالة الإنصهار. إبتداءً من نقطة التبخر سجل فيها قيم أكبر و هي تمثل حالة القطع التي تستوجب طاقة عالية و تنتج ضياع أكبر للكتلة.

# الخلاصة العامة و الآفاق

## الخلاصة العامة والآفاق

ينتج على إثر تفاعل الليزر عالي الإشعاع على الأسطح المعدنية عملية ديناميكية معقدة يمكن من خلالها أن يتغير المعدن بسرعة من الانعكاسات الشديدة إلى الإمتصاص القوي مولدة العديد من الظواهر الفيزيائية، استغلت هذه التقنية في العمليات الصناعية مثل اللحام و القطع بالليزر و قد عالجت الدراسات الحالية هذه الظاهرة كمسألة حرارية بدراسة الإنتقالات الحرارية و مختلف ضياعات الطاقة. هذه الأخيرة يجب أن تحظى باهتمام كبير

من أجل تحسين كفاءة اللحام و القطع من خلال تقدير كمية الضياع في الطاقة. و قد شهد مجال دراسة ضياع الطاقة بالتبخير اهتمام ضئيل من طرف الباحثين، و كانت مساهمتهم تحوم حول دراسات تجريبية و عددية لمعالجة الضياع في الطاقة بالحمل و الإشعاع الحراري.

في هذا العمل تمت دراسة و تحديد كمية ضياع الطاقة و المادة عن طريق التبخر أثناء التلحيم و القطع لصفائح التيتانيوم TA6V ذات الأبعاد  $50\text{mm} \times 6\text{mm}$  باستخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون المستمر بحزمة ذات نصف قطر  $R=0.50\text{mm}$  يتحرك بسرعة ثابتة  $v=0.06\text{m/s}$  وباستطاعة قدرها  $P=2500\text{W}$ . تتم هذه الدراسة عند نقطة  $y=3\text{mm}$  في منتصف مسار التلحيم و ذلك انطلاقا من نتائج في دراسة سابقة كما تمت دراسة تطور فقد الطاقة و المادة بواسطة التبخر لمواد مختلفة باستخدام برنامج فورتران، بناء على ذلك قسمت المذكرة إلى ثلاثة فصول:

احتوى **الفصل الأول** على أهم المعلومات و المفاهيم التي تحيط بموضوع عملنا، تطرقنا فيه إلى التعريف بالليزر و أهم مكوناته و ذكر مفهوم وآلية التلحيم و القطع بالليزر و كذلك مظاهر الانتقال الحراري الناتجة.

أما **الفصل الثاني** تم بوصف الظاهرة المدروسة و تحديد مختلف أشكال ضياع الطاقة وآلية تبخر المادة مع ذكر الدراسات التي تناولت هذا الجانب و انتهى الفصل بالجانب الرياضي و المعادلات الرياضية المستخدمة لإجراء الحساب بها.

قدمنا في **الفصل الثالث** النتائج المتحصل عليها بعد معالجة تطور ضياع كثافة الطاقة و المادة بالتبخير لمواد مختلفة الحديد، الزنك، الألمنيوم و صفائح التيتانيوم، مع تحديد الكتلة المتبخرة الموافقة لها. كما قمنا أيضا بإجراء هذه المعالجة لسبيكة التيتانيوم انطلاقا من نتائج لمفات التلحيم لدراسة سابقة و من ثم تم تحديد ضياع الكتلة بالتبخير الموافقة لها على مستوى نقطة من مسار العملية. إضافة إلى هذا قمنا ببسط الدراسة لحالة القطع. من بين النتائج التي توصلنا لها:

- فقدان كثافة طاقة التبخر يظهر بشكل ملحوظ عند تتجاوز درجة الحرارة درجة التبخر  $T_v$ . يحدث هذا التطور في إتجاه المادة الأقل درجة غليان، كما أن كثافة طاقة التبخر و معدل الكتلة المتبخرة تكون محسوسة في حالة الإنصهار مقارنة بالتبخر.
  - أهمية مراعاة الخصائص الفيزيائية و الحرارية للمادة المدروسة في حالة المعالجة.
- في حالة التلحيم بواسطة ليزر  $CO_2$  لصفائح من سبائك التيتانيوم TA6V من أجل إستطاعة قدرها 2500W و سرعة 0.060m/s استخلصنا مايلي :
- تكون طاقة التبخر في زيادة بسبب التسخين و تبلغ أقصى قيمة لها تقريبا عند مرور شعاع الليزر بها و التي تقابل أعلى درجة حرارة ويحدث انخفاض بسبب التبريد يكون فقد الكتلة بواسطة التبخر متزامن مع فقد كثافة طاقة التبخر وفق علاقة طردية في الشروط السابقة. و ينخفض مقدار فقد كثافة الطاقة و الكتلة بواسطة التبخر مع زيادة البعد عن منطقة التأثير و المتمثل في مسار التلحيم.
  - في الشروط المستعملة من إستطاعة الليزر و سرعة تلحيم. وجد أن كثافة طاقة التبخر الضائعة تأخذ أعلى قيمة لها عند أعلى درجة حرارة و قد تصل إلى  $Q_{vap}=5.5532$   $W/m^2$
  - في نقطة من مسار التلحيم تقدر الكتلة الضائعة خلال مدة زمنية قدرها 0.1s و هي تقدر ب 0.236mg أي بمعدل 2.36mg/s وفق الشروط المستعملة سابقا.
- و بحوصلة هذه النتائج نكون قد توصلنا إلى الهدف المرجو من هذا البحث و هو التوصل إلى دراسة و تحديد كمية ضياع الطاقة و المادة عن طريق التبخر في حالي التلحيم أو القطع بالليزر. بعد إتمام هذه الدراسة فإننا نسجل التطلعات و الأفاق التالية لتكون مجال بحث و دراسة في المستقبل من أجل تحسين و تدعيم النتائج المتحصل عليها و من أجل الفهم أكثر لمختلف الظواهر من جهة و كذلك تحسين جودة التلحيم و القطع من جهة أخرى:
- تعميم الدراسة وفق كل السطح؛
  - تطبيق الدراسة مع مراعاة الاختلاف في الخصائص الحرارية؛
  - دراسة نماذج ثلاثية الأبعاد؛
  - مقارنة ضياع الطاقة عن طريق التبخر بالطاقة الضائعة عن طريق الحمل و الإشعاع؛
  - دراسة تأثير تبخر المعدن على هيكل المادة و على كفاءة العملية.

## قائمة المراجع

## المراجع :

- [1] M. Mostafa, "Etude du perçage et du soudage laser : dynamique du capillaire," thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 2011.
- [2] سعود بن حميد الليحان، "الليزر و تقنياته." كلية العلوم جامعة أم القرى، كتاب. سنة 2004.
- [3] S. Oullam; « Etude du soudage TIG et laser de l'alliage d'aluminium 2024 T3 »; Mémoire Magister ; Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger, (2009).
- [4] عدي عطا حمادي، "أساسيات الليزر و تطبيقاته"، ماجستير ليزر، سنة 2004.
- [5] S. Lemkeddem et F. Khelfaoui; « Modélisation Thermique de Soudures Asymétriques par Soudage Laser »; 5ème Séminaire National sur le laser et ses Application; Université de Ouargla, (2009).
- [6] B. Fotovvati, S. F. Wayne, G. Lewis et E. Asadi, "A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2018, doi: 10.1155/2018/4920718.
- [7] العوض عبد الله فالح، "استخدام الليزر في عملية التلحيم." بحث تكميلي لنيل درجة الماجستير في الفيزياء، جامعة السودان للعلوم و التكنولوجيا، كلية العلوم. سنة 2015.
- [8] H. Daoui, "Contribution à l'étude du comportement fluide de plasma lors de l'interaction des torches à plasma avec les métaux", Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2008.
- [9] H. Zhao et H. Qi, "Numerical Simulation of Transport Phenomena for Laser Full Penetration Welding," *J. Weld. Join.*, vol. 35, no. 2, pp. 13–22, 2017, doi: 10.5781/jwj.2017.35.2.3.
- [10] F. Hathat, "Etude des vitesses de gaz de protection dans les dispositifs de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques." Mémoire de Master ; Université de Ouargla," 2017.
- [11] "UNIVERSAL LASER SYSTEM." <http://www.ulsinc.com/ar>.
- [12] L. Weiss, "Contribution au développement d'un procédé de découpe laser haute-énergie / jet d'eau haute-pression couplés . Application à la découpe d'alliages métalliques", Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2018.
- [13] R. H. Patil, "Thermal modeling of laser drilling and cutting of engineering materials", Magister memory; University of Oklahoma, 2005.
- [14] الدكتور علي إبراهيم مهدي، "الليزر بين التكنولوجيا و التطبيق." بغداد، 1985.
- [15] L. J. Novembre, "Modélisation prédictive par réseaux de joints de soudure par laser basée sur l'expérimentation et sur la simulation 3D", Thèse de Doctorat, Université du Québec à Rimouski, 2017.

- [16] A. Siwek, "Model of surface tension in the keyhole formation area during laser welding", *Comput. Methods Mater. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 166–172, 2013.
- [17] أسامة محمد مرضي سليمان، "كتاب انتقال حرارة و كتلة"، جامعة وادي النيل السودان 2018.
- [18] V. Semak et A. Matsunawa, "The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 30, no. 18, p. 2541, 1997.
- [19] A. Belhadj, "Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser : application aux alliages de magnésium", Doctorat, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis / École Nationale Supérieure, 2009.
- [20] Y. Robert, "Simulation numérique du soudage du TA6V par laser YAG impulsif : caractérisation expérimentale et modélisation des aspects thermomécaniques associées à ce procédé", Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2007.
- [21] S. Lemkeddem, F. Khelfaoui et O. Babahani, "Calculation of energy lost by radiation and convection during laser welding of TA6V titanium alloy", *J. Theor. Appl. Phys.*, vol. 12, no. 2, pp. 113–120, 2018, doi: 10.1007/s40094-018-0288-x.
- [22] M. Akbari, S. Saedodin, D. Toghraie, R. Shoja-Razavi et F. Kowsari, "Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy", *Opt. Laser Technol.*, vol. 59, pp. 52–59, 2014, doi: 10.1016/j.optlastec.2013.12.009.
- [23] S. Guerrida, "Étude de la soudure au laser en industrie", Mémoire de Master ; Université de Ouargla, 2012.
- [24] K. Telib, "Étude de la soudure au Laser aux limites de fusion des métaux ", Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2013.
- [25] S. Benchaa, "Répartition spatiale et temporelle d'énergie de sources lasers utilisées dans les dispositifs de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques", Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2017.
- [26] S. Khemgani, "Étude du rayonnement thermique lors de la soudure au Laser ", Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2014.
- [27] W. Schulz, D. Becker, J. Franke, R. Kemmerling et G. Herziger, "Heat conduction losses in laser cutting of metals," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 26, no. 9, pp. 1357–1363, 1993, doi: 10.1088/0022-3727/26/9/003.
- [28] A. Mahrle et E. Beyer, "Theoretical aspects of fibre laser cutting", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 17, pp. 1–9, 2009, doi: 10.1088/0022-3727/42/17/175507.

- [29] C. Wandera, V. Kujanpää and A. Salminen, "Laser power requirement for cutting thick-section steel et effects of processing parameters on mild steel cut quality", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 225, no. 5, pp. 651–661, 2011, doi: 10.1177/09544054JEM1971.
- [30] P. Mucha, R. Weber, N. Speker, P. Berger, B. Sommer et T. Graf, "Calibrated heat flow model for determining the heat conduction losses in laser cutting of CFRP", *Phys. Procedia*, vol. 56, no. C, pp. 1208–1217, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.036.
- [31] Y. P. Lei, H. Murakawa, Y. W. Shi et X. Y. Li, "Numerical analysis of the competitive influence of Marangoni flow et evaporation on heat surface temperature and molten pool shape in laser surface remelting", *Comput. Mater. Sci.*, vol. 21, no. 3, pp. 276–290, 2001, doi: 10.1016/S0927-0256(01)00143-4.
- [32] J. H. Cho, D. F. Farson, J. O. Milewski et K. J. Hollis, "Weld pool flows during initial stages of keyhole formation in laser welding", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 17, 2009, doi: 10.1088/0022-3727/42/17/175502.
- [33] T. Zhang Li, S. Liu, S. Shen, H. Xie, W. Shi, G. Zhang, B. Shen, L. Chen, B. Xiao et M. Wei, "Evolution of molten pool during selective laser melting of Ti-6Al-4V", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 5, 2019, doi: 10.1088/1361-6463/aace04.
- [34] I. S. Leoveanu et K. W. TAE, "Drilling and cutting of aluminums alloys thin sheet optimization by nd : yag laser", *Buletinul AGIR nr.* 2010.
- [35] D. Lee, R. Patwa, H. Herfurth et J. Mazumder, "Computational and experimental studies of laser cutting of the current collectors for lithium-ion batteries", *J. Power Sources*, vol. 210, pp. 327–338, 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.03.030.
- [36] X. He, "Heat transfer, fluid flow and mass transfer in laser welding of stainless steelwith small length scale", Doctorat, Université de Pennsylvanie, 2006.
- [37] K. Hirano, R. Fabbro et M. Muller, "Experimental determination of temperature threshold for melt surface deformation during laser interaction on iron at atmospheric pressure", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 43, 2011, doi: 10.1088/0022-3727/44/43/435402.
- [38] J. B. Simonds, J. Sowards, J. Hadler, E. Pfeif, B. Wilthan, J. Tanner, C. Harris, P. Williams et J. Lehman, "Time-Resolved Absorptance and Melt Pool Dynamics during Intense Laser Irradiation of a Metal", *Phys. Rev. Appl.*, vol. 10, no. 4, 2018, doi: 10.1103/Phys.RevApplied.10.044061.

## المخلص:

يهتم هذا العمل بدراسة ضياع الطاقة و المادة عن طريق التبخر حالة تقنية اللحام و القطع بالليزر التي تعد من أكثر التقنيات استخداما في المجال الصناعي و في مجال البحث العلمي. تم حساب كمية الضياع في الطاقة و المادة بواسطة التبخر مع تغير درجة الحرارة لمواد مختلفة: حديد، ألمنيوم، زنك و سبائك التيتانيوم TA6V. من جهة أخرى تمت دراسة الضياع في الطاقة و المادة عن طريق التبخر حالة التلحيم و القطع بليزر CO<sub>2</sub> على سبيكة التيتانيوم TA6V على مستوى نقطة من مسار التلحيم و ذلك باستخدام نتائج عديدة لتطور درجة الحرارة لعمل سابق. و قد تطرقنا إلى تغيرات الطاقة الضائعة عن طريق التبخر بالنسبة للزمن و البعد عن مسار التلحيم و نصف قطر حزمة الليزر. أظهرت النتائج أن الكتلة الضائعة خلال 0.1s في نقطة من مسار التلحيم لسبيكة TA6V في حدود 0.236 mg و هذا في حال استعمال ليزر باستطاعة قدرها 2500 W و سرعة 0.060 m/s .

الكلمات المفتاحية: ليزر CO<sub>2</sub>، لحام، قطع، تبخر، ضياع الطاقة، ضياع المادة، سبيكة تيتانيوم.

## Etude de la perte de matière par évaporation lors du soudage ou de la découpe des métaux par laser

### Résumé :

Ce travail traite l'étude des pertes d'énergie et de matière par évaporation dans les procédés de soudage et de découpe par laser. Ces derniers sont les techniques les plus utilisées dans le domaine industriel et le domaine de la recherche scientifique. Les pertes d'énergie et de masse par évaporation ont été calculées pour différentes valeurs de température et pour différents matériaux : fer, aluminium, zinc et alliage de titane TA6V. D'un autre côté, on a calculé les pertes d'énergie et de matière par évaporation lors du soudage laser CO<sub>2</sub> de l'alliage de titane TA6V au niveau d'un point sur le cordon de de soudure à partir des résultats numériques des températures issues d'un travail antérieur. Nous avons traité les variations de l'énergie perdue par évaporation en fonction du temps, de la distance du cordon de soudure et du rayon du faisceau laser. Les résultats ont montré que la masse perdue pendant 0.1 s sur un point au niveau du cordon de soudure en alliage de titane TA6V est d'environ 0.236 mg pour un laser de puissance de 2500 W et une vitesse de 0,060 m/s.

**Mots clés :** Laser CO<sub>2</sub>, soudage, découpe, évaporation, perte d'énergie, perte de matière, alliage de titane.

### Study of the loss of material by evaporation during laser welding or cutting of metals

#### Abstract:

This work treats the study of energy and material losses by evaporation in laser welding and cutting processes. These letters are the most techniques used in industry and in scientific research. The energy and mass losses by evaporation were calculated for different temperature values and for different materials: iron, aluminum, zinc and titanium alloy TA6V. On the other hand, we have calculated the energy and material losses by evaporation during CO<sub>2</sub> laser welding of titanium alloy TA6V at a point on the weld cordon were calculated from the numeriques results of the temperatures. from previous work. We have treated the variations of the energy lost by evaporation as a function of time, the distance from the weld bead and the radius of the laser beam. The results showed that the mass lost during 0.1s on a point in the weld bead of titanium alloy TA6V is approximately of 0.236 mg for a laser with a power of 2500 W and a speed of 0.060 m/s for a laser power of 2500 W power and a speed of 0.060 m / s.

**Key words:** CO<sub>2</sub> laser, welding, cutting, evaporation, energy loss, material loss, titanium alloy.