

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° d'ordre:.....
Série:.....

MEMOIRE

PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE Doctorat en Sciences

Thème

**Etude de l'interaction laser-métal . Application sur les alliages
d'aluminium**

Par

Baziz Liela

Soutenu le : / / 2007

Rapporteur :

Rouag N.

Univ. Mentouri Constantine

REMERCIEMENTS

Ce travail est réalisé en collaboration avec deux centres de recherches :

- 1- Centre de physique théorique et appliquée (CTAPS), Université d'Alyarmouk, Irbid, Jordanie.
- 2- Centre de développement des technologies avancées (CDTA), Draria, Alger.

Ce travail est aussi réalisé dans le cadre d'un projet de recherche intitulé « Production du laser à gaz de différentes puissances et application pour l'étude de quelques métaux et quelques semiconducteur », chef de projet : Prof. A. Nouiri, code : 2501/17/05.

Cette thèse est aussi l'aboutissement de quatre ans de travail. Elle n'aurait pas été possible sans le soutien de nombreuses personnes que je souhaiterais remercier ici.

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma gratitude à M. A. NOUIRI, Professeur à l'Université de Mentouri de Constantine, directeur de ma thèse, pour sans regard attentif sur ce travail, pour sa disponibilité, ses encouragements et son aide, et qui m'a suivi tout au long de ces quatre ans.

Je tien aussi à exprimer toute ma gratitude à M. S. CHEKROUD, Professeur à l'Université de Mentouri de Constantine, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence de ce jury, malgré ses énormes charges administratives.

De plus, j'adresse tous mes remerciements à Messieurs :

- D. LOUHIBI, Maître de recherche au CDTA d'Alger.
- M. DIAF et M. GHERS, Professeurs à l'université Badji Mokhtar d'Annaba qui ont bien accepter de faire partie du jury et d'examiner mon travail on vue d'une orientation précieuse.

Je tient à remercier tout particulièrement toutes les personnes avec qui j'ai travaillé lors de mes séjours au Centre de physique théorique et appliquée (CTAPS), Université de Yarmouk , Irbid, Jordanie, sous la direction de M. Nabil El- Laham et M. Yasser Ahmed Youcef (Yaser El-hadj) responsable du laser Nd :Yag au département de chimie.

Un grand merci à M. Y. WADJIH responsable du MEB au département de géologie à l'Université de Yarmouk qui a consacré beaucoup de son temps.

Je tiens de plus à remercier l'ensemble du centre de développement des technologies avancées (CDTA) à Alger, pour leur accueil et leur soutien, notamment M. T. Kherdja, K.

Henda, El-Hachemei Amara qui ont pris un grand soin du laser Nd :Yag et Mme Belaroussi pour les imageries MEB.

Je souhaiterais aussi remercier Prof. Meftah et Dr. Mesbah de l'Université de Skikda, avec qui j'ai travaillé sur la profilométrie.

Je n'oublie pas remercier M. Soraya, T. Issma et B. Rokaya pour leur soutien inconditionnel.

Enfin, merci à mes parents et ma famille pour leur encouragement durant toutes ces années.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
--------------------------	----------

PARTIE 1 : SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE 1 :PHYSIQUE DU LASER.....	3
---	----------

1. Création de la lumière laser.....	4
2. Les éléments d'un laser.....	6
3. Types du laser.....	7
4. Caractéristiques de la lumière laser.....	9
5. Comparaison de la lumière ordinaire et de la lumière laser.....	12
6. Structures des modes et diagramme de rayonnement.....	12
7. Application du laser.....	14
8. Lasers disponibles et leurs applications industriels.....	16
9. Principales utilisations en fonction de leurs puissance.....	17
10. Sécurité laser.....	20

CHAPITRE 2 : L'INTERACTION LASER – MATIÈRE.....	19
--	-----------

I. L'interaction laser- matière.....	19
---	-----------

1. Rayonnement électromagnétique.....	20
2. Propagation d'une onde dans milieu.....	22
3. L'interaction laser matière au niveau de l'atome.....	22
4. Absorption et réflexion.....	23
5. Les processus d'interaction	24
6. Le chauffage par laser.....	24
7. Applications de l'interaction laser- matière.....	25

II. Traitement des matériaux par laser.....	26
--	-----------

1. Définition de la longueur caractéristique.....	27
2. Modification de microstructure sans apport de matière.....	28
3. Modification de composition par apport de matière.....	30
4. La classification des processus laser- métal.....	36
5. Usinage par laser.....	40

III. L'aluminium et ses alliages	41
---	-----------

1. Caractéristiques notables.....	41
-----------------------------------	----

2. Utilisation de l'aluminium et ses alliages.....	43
3. Obtention de l'aluminium.....	44
4. Recyclage de l'aluminium.....	44
5. Soudage des alliages d'aluminium.....	45
IV. L'ablation laser en régime nanoseconde.....	47
1. Evolution de la fluence seuil d'ablation.....	47

PARTIE 2 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

CHAPITRE 3 : TRAITEMENTS DES ALLIAGES D'ALUMINIUM PAR LASER.....	49
I. Travail expérimental.....	49
1. Préparation des échantillons.....	49
2. Techniques expérimentales.....	50
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET INTERPRETATION.....	55
I. Résultats microstructuraux.....	55
1. 1. Observation avant l'irradiation laser.....	55
1. 2. Observation après l'irradiation laser.....	57
1. 3. Influence des paramètres laser.....	58
1. 4. Variation du diamètre de la tache en fonction de l'énergie du laser.....	63
1. 5. Evolution microstructurale de la zone irradiée.....	63
2. Influence de la distance de défocalisation.....	71
2. 1. Influence sur les dimensions de la tache.....	71
3. Efficacité de l'ablation.....	75
3. 1. Influence de l'énergie et de la taille du faisceau.....	75
3. 2. Influence du nombre de tirs.....	78
3. 3. Etude des cratères.....	82
4. Distribution chimique des éléments après l'irradiation laser.....	88
4. 1. Distribution d'oxygène.....	88
4. 2. Distribution du cuivre.....	90
4. 3. Distribution du magnésium.....	92
4. 4. Distribution du silicium.....	94

4. 5. Influence de la distance de défocalisation.....	95
4. 6. Analyse quantitative de chaque partie de la zone irradiée.....	98
5. La microdureté.....	102
5. 1. Laser Nd: Yag.....	102
5. 2. Laser excimère.....	104
CONCLUSION.....	109
REFERENCES.....	111

INTRODUCTION

La technologie laser couvre un large domaine des applications industrielles, elle est la plus utilisable pour les matériaux. En effet l'interaction laser -métal est relativement large, elle permet le développement de nouvelles applications telles que le microperçage, le marquage, le nettoyage, le traitement de surface et la microdécoupe dans différents secteurs industriels, notamment automobile, aéronautique, agroalimentaire, spatial... Grâce à leurs intérêts majeurs tels que la précision et la forte cadence des procédés tout en évitant les contacts mécaniques entre l'outil et l'échantillon.

L'une des toutes premières applications industrielles du laser, réalisée en 1965 par un laser à rubis, consistait à usiner un perçage de 4.7 mm de diamètre et de 2 mm de profondeur dans du diamant. Cette opération était réalisée en 15 min, alors qu'une application classique prenait 24 heures [1].

En 1967, Peter Houlcroft découpe 2.5 mm d'acier inoxydable à une vitesse de 1m/min, sous di-oxygène avec un laser CO₂ de 300 W [2] et conçoit la première tête de découpe. Dans la même période en 1963 des chercheurs américains tel que White et Anderholm montre qu'il est possible de générer une onde choc à l'intérieur d'un métal suite à une irradiation laser impulsionnelle. Les pressions exercées sont de l'ordre de 1 Gpa. Bien que les procédés soient démontrés, il faut attendre leurs associations à des machines adaptées pour qu'ils soient implantés en milieu industriel. Ces conditions sont remplies à la fin des années 70. Et les premières plates formes industrielles sont implantées en France dès les années 80 [3].

Les lasers nanosecondes ont la même puissance que les lasers traditionnels, mais ils ont l'avantage de réaliser du micro-usinage de très grande précision, sans échauffement du matériau.

L'objet de cette étude est donc d'aborder et d'approfondir notre compréhension théorique de l'interaction laser –métal et plus précisément de l'interaction laser aluminium par un travail expérimental qui étudie l'influence du laser sur deux types d'alliages d'aluminium commercial, aluminium industriel et aluminium récupéré, à cause de leurs larges utilisations industriels (automobiles, emballage, construction, les fils électriques.....).

Nous avons donc tenté, au travers de ce travail de thèse, de fournir une approche physique cohérente et consistante de l'ensemble de la physique mise en jeu lorsqu'un échantillon de l'aluminium soumis à une irradiation laser intense.

Cette étude est découpée en deux parties : *la première partie* porte deux chapitres. Le premier chapitre présente une étude élargie de la physique du laser; le deuxième chapitre est dédié à l'étude théorique de l'interaction laser –matière de façon générale et spécialement l'interaction laser –métal et leurs applications.

La seconde partie est plus hétérogène, nous présentons dans le troisième chapitre les matériaux étudiés et les différentes techniques utilisées pour analyser les résultats. Nous commençons par la composition chimique et les propriétés de chaque alliage. Ensuite les lasers utilisés et leurs caractéristiques (la durée de l'impulsion, l'énergie de l'impulsion laser). D'autre part les diagnostics mis en place et utilisés pour l'étude des mécanismes, tels que l'observation en microscope électronique à balayage (MEB), la profilométrie de la surface de l'échantillon, la composition chimique après l'irradiation par spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDX) et la microdureté des échantillons traités, sont présentés.

Par la suite, le chapitre 4 présente la discussion et l'interprétations des résultats obtenus. Premièrement les modifications structurales des deux alliages apportées par chaque laser, ainsi que sur la rugosité de la surface des échantillons irradiés. Ensuite une étude paramétrique sur la profondeur ablatée en fonction de la fluence et le nombre de tirs a été présentée. L'analyse de l'interaction à partir de la distribution chimiques des éléments présentée au chapitre précédent et la microdureté après l'irradiation.

Enfin, la conclusion permettra de résumer les différents points présentés, et de discuter l'utilisation du laser pour les alliages de composition complexe.

CHAPITRE 01 : PHYSIQUE DU LASER.

INTRODUCTION

Les lasers ont tout de suite attiré l'attention; ils ont excité l'imagination aussi bien des scientifiques que du public. Le laser signifie light amplification by stimulated emission of radiation (amplification de la lumière par émission stimulée)

Le principe de l'émission stimulée (ou émission induite) est décrit dès 1917 par Albert Einstein. En 1950, Alfred Kastler (Prix Nobel de Physique en 1966) propose un procédé de pompage optique, qui a été validé expérimentalement par Brossel, Kastler et Winter deux ans plus tard. Mais ce n'est qu'en 1953 que le premier maser (Microwave Amplification by stimulated Emission of Radiation) (maser au gaz ammoniac) est conçu par J. P. Gordon, H. J. Zeiger et Ch. H. Townes. Au cours des six années suivantes, de nombreux scientifiques tels N. G. Basov, A. M. Prokhorov, A. L. Schawlow et Ch. H. Townes contribuent à adapter ces théories aux longueurs d'ondes du visible. Townes, Basov, et Prokhorov partagèrent le Prix Nobel de Physique en 1964 pour leurs travaux fondamentaux dans le domaine de l'électronique quantique, qui ont menés à la construction d'oscillateurs et d'amplificateurs basés sur le principe du Maser-Laser. En 1960, le physicien américain Théodore Maiman obtient pour la première fois une émission laser au moyen d'un cristal de rubis. Un an plus tard, Ali Javan met au point un laser au gaz (hélium et néon) puis en 1966, Peter Sorokin construit le premier laser à liquide [1].

Les sources de lumière laser sont bien supérieures à tout les autres à cause de leur directivité et de leur intensité. Cette lumière nouvelle ne ressemble pas celle que nous avons l'habitude de voir, ses propriétés remarquable ouvrent de nouvelles voies aux chercheurs, aux techniques, aux application militaires. La création, l'étude et l'application de cette lumière demandent des connaissance dans plusieurs domaines : physique classique et quantique, chimie, électronique, technologie. Le domaine des lasers est à la fois scientifique et technologique. Leurs applications suivent les nouvelles découvertes scientifiques. Ils ont été très vite divulgués au public. L'histoire commence en 1964 avec le prix Nobel de physique : Townes, Basov et Prokhorov ouvrent le champ de l'électronique quantique, dix ans après la découverte du maser, ancêtre du laser. Leurs travaux ont fait progresser la science des lasers dont ils prévoyaient les possibilités [4, 5].

1. CRÉATION DE LA LUMIÈRE LASER

1.1. L'émission stimulée

Un atome, un ion ou une molécule excités peuvent libérer leur énergie par émission spontanée d'un photon. Cependant, il existe un autre mode d'émission, l'émission stimulée d'un photon prévue par Albert Einstein en 1917. L'émission stimulée agit donc comme une duplication de la lumière. En répétant de nombreuses fois ce phénomène, il est possible de créer une lumière qui est composée de photons tous identiques, de même couleur, émis en même temps et dans la même direction comme s'ils étaient la copie conforme les uns des autres : c'est la lumière laser [6].

1.2. L'excitation d'un système et l'augmentation de son énergie

Une particule (atome, ion ou molécule) excitée émet un photon grâce à la stimulation que provoque l'arrivée d'un photon de même énergie que celui qu'il pourrait potentiellement émettre (figure 01). La particularité de ce type d'émission est que le photon stimulé prend strictement les mêmes caractéristiques (couleur, direction de la trajectoire et phase) que le photon de départ, comme si le second était la photocopie conforme du premier.

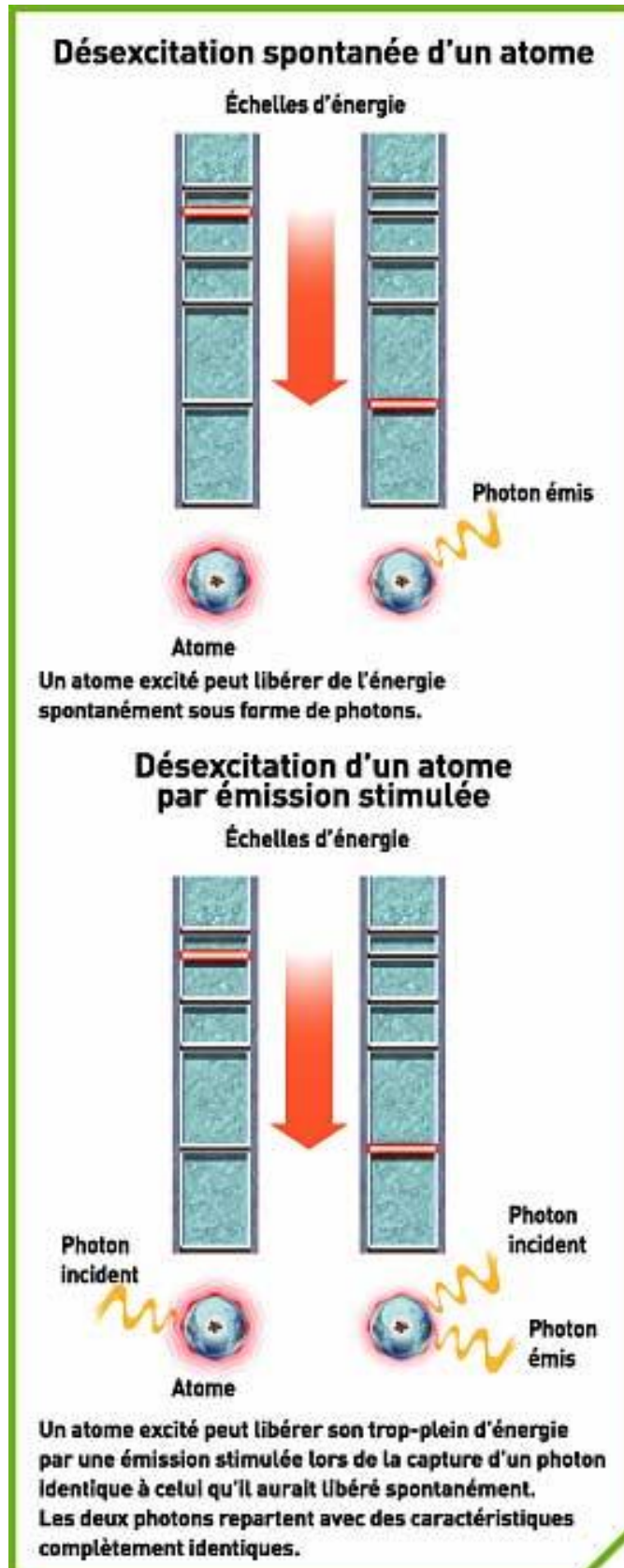


Fig. 01. Désexcitation d'un atome par émission stimulée [6]

2. LES ÉLÉMENTS D'UN LASER

On appelle laser un appareil qui amplifie la lumière au moyen de l'émission stimulée. C'est d'ailleurs, le plus souvent, une source de rayonnement. Un tel générateur s'obtient en associant à un amplificateur de lumière un système de contre-réaction à miroirs. Le problème fondamental est de trouver un matériau qui ait un coefficient d'amplification suffisamment grand pour le gain puisse compenser les pertes inévitables du montage, et fournir de la puissance [6].

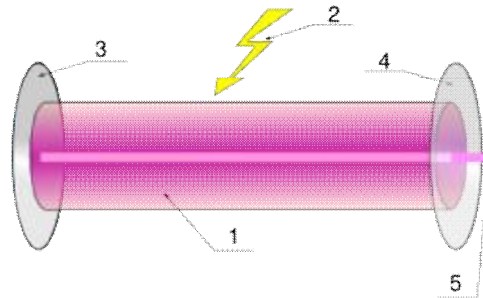


Fig. 02. Principe de fonctionnement du laser.

- 1) milieu excitable.
- 2) énergie de pompage.
- 3) miroir totalement réfléchissant.
- 4) miroir semi-réfléchissant.
- 5) faisceau laser.

2. 1. L'oscillateur laser

L'oscillateur est une sorte de boîte en forme de cylindre allongé avec, à chacune de ses extrémités, un miroir. Il contient le milieu laser qui est une collection de particules excitables (atomes, ions ou molécules) se trouvant sous forme de solide, de liquide ou de gaz. Le rubis est un milieu laser solide. Les particules excitables sont les ions chrome (Cr^{+3} , Cr^{+4}) [6].

2.2. La source d'énergie

La source d'énergie fournit assez d'énergie aux particules pour obtenir une inversion de population (plus de particules excitées que de particules non excitées). L'énergie absorbée par les particules du milieu laser pourra être potentiellement libérée sous forme de lumière [6].

3. TYPES DE LASER

On classe les lasers selon quatre familles, en fonction de la nature du milieu excité.

3.1. Les lasers à solides

Le premier laser a été le laser à rubis (émission sur 6943 \AA). L'élément fondamental du laser à rubis est un cylindre de rubis rose (0.05% de chrome). Ce barreau a généralement un diamètre compris entre 0.5 cm et 1 cm, et une longueur de 2 à 10 cm ; les faces terminales doivent être planes et parallèles avec une très grande précision. L'une des faces est complètement réfléchissante, l'autre ne l'est que partiellement. Le rubis est éclairé sur ces faces latérales par un flash : la durée de l'éclair est de quelques millisecondes, l'énergie électrique 1000 à 2000 joules [5]. La figure (03) donne un schéma de ce dispositif, elle est une photographie des parties essentielles. La plus grande partie de l'énergie électrique est consommée en chaleur; seule une petite fraction est transformée en énergie lumineuse bleue et verte [5].

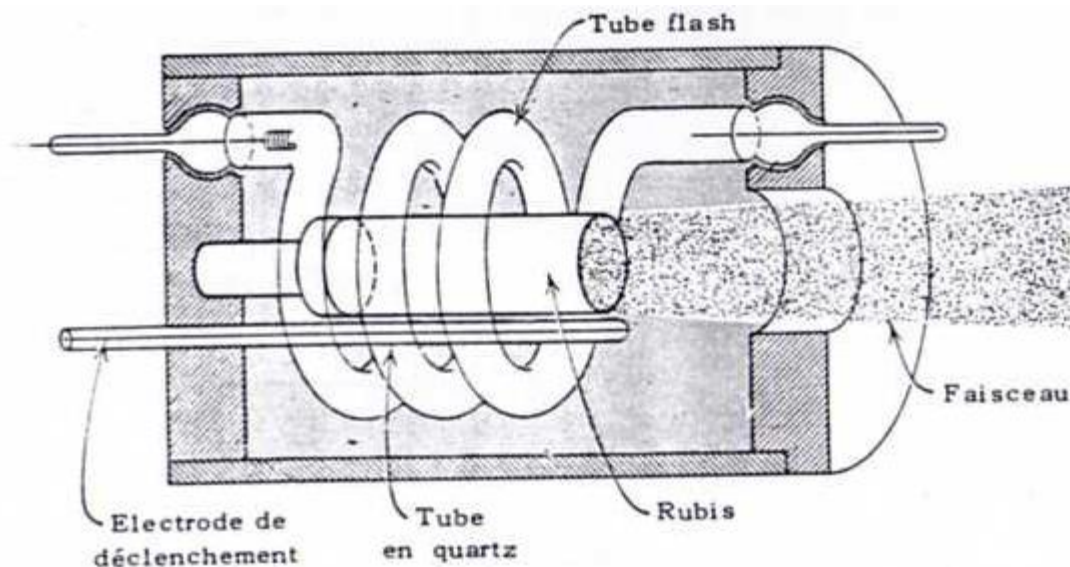


Fig. 03. Le laser à rubis [6].

3.2. Les lasers à liquides

Les solides et les gaz sont les premiers matériaux lasers qui aient donné de bons résultats, mais les liquides semblent être prometteurs. Nous n'avons pas suffisamment insisté sur le fait que pour les solides, les ions actifs doivent se trouver dans un monocristal parfait. Les défauts, les tensions, les non homogénéités sont nuisibles à l'amplification cohérente. Il faut tailler, polir le cristal et bien souvent orienter ses axes. Avec les liquides et les gaz, le problème de la formation de monocristaux ne se pose pas. Possibilité de faire une concentration raisonnable de particules actives dans un volume donné et réaliser facilement des volumes importants de forme quelconque [5].

3.3. Les lasers à gaz

Comme dans les solides, le phénomène d'émission stimulée ne peut l'emporter sur les pertes que sur certaine condition, qui peut s'exprimer par l'inversion de population. C'est une condition de déséquilibre qui fait intervenir des niveaux d'énergie dont le plus élevé est le plus peuplé. Le laser Hélium- Néon semble très simple mais ce n'est qu'une apparence. Les phénomènes physiques mis en jeu dans les lasers à gaz sont compliqués et de nombreux paramètres entrent dans la condition d'oscillation [5].

3.4. Les lasers à semi-conducteurs (diodes laser)

Ces lasers sont principalement constitués d'une diode à semi-conducteur afin de produire un faisceau lumineux. Le pompage se fait à l'aide d'un courant électrique qui enrichit le milieu générateur en trous d'un côté et en électrons de l'autre. La lumière est produite au niveau de la jonction par la recombinaison des trous et des électrons [5].

3.5. Les lasers à électron libre

Laser dans lequel l'émission laser provient du rayonnement synchrotron d'un faisceau d'électrons accélérés. Son principe est donc très différent de celui des autres types de laser. Le faisceau est généré par un accélérateur de particules (comme ceux utilisés par les physiciens pour étudier les particules). Les électrons sont injectés au milieu d'une succession d'aimants permanents - l'onduleur - créant un champ magnétique périodique. Dans l'onduleur, deux miroirs

parallèles réfléchissent le rayonnement synchrotron émis par le faisceau d'électrons, qui devient cohérent (il a donc les propriétés d'un rayonnement laser) [7].

Et on classe les lasers selon deux familles, en fonction du mode de fonctionnement.

3.5. Laser impulsionnel

Si la source d'énergie envoie par intermittence une décharge d'énergie dans l'oscillateur, la lumière laser est produite de manière discontinue, par impulsions très brèves et très intenses. On dit que le laser est impulsionnel. C'est, par exemple, le cas avec le pompage optique où l'énergie est apportée par un flash lumineux comme celui d'un appareil photographique. Selon la durée de l'impulsion, il existe le laser nanoseconde (10^{-9} s), laser picoseconde (10^{-12} s) et laser femtoseconde (10^{-15} s).

3.6. Laser continue

Dans le cas inverse lorsque la source d'énergie envoie une décharge d'énergie dans l'oscillateur de façon continue, la lumière laser est produite de manière continue, c'est le laser continue.

4. CARACTERISTIQUES DE LA LUMIÈRE LASER

Les lasers produisent une lumière domptée bien différente de la lumière ordinaire produite par le soleil ou les ampoules de nos maisons. Les propriétés de la lumière laser vont être à la base des applications utilisant ce type de lumière.

4.1. Polarisation

La polarisation du rayonnement dépend de l'orientation de l'axe optique du rubis par rapport à l'axe du barreau. D'après Nelson et Collins [8], la lumière est totalement dépolarisée si ces deux axes sont parallèles. Les rubis dont l'axe optique est orienté de 60 à 90 degrés par rapport à l'axe de la cavité donnent un faisceau totalement polarisé rectilignement [8].

4.2. Puissance émise et rendement

La puissance crête émise par un laser fonctionnant en relaxé n'est pas une grandeur bien définie car les impulsions d'intensité sont irrégulières. Dans des circonstances favorables, des puissances crêtes de 20 à 30 kW avec des lasers de 1 cm de diamètre et de 4 cm de longueur [5]. La puissance moyenne pendant la durée totale de l'émission (une ou deux ms) est beaucoup plus petite. L'énergie totale rayonnée pendant un tir est beaucoup plus de signification, elle est aussi plus facile à mesurer [5]. Elle dépend de l'excitation et de la structure de la cavité; pour des lasers de 1 cm de diamètre et de 4 cm de long, les énergies sont comprises entre 0.1 à 1.5 joules. Elle dépend, bien sur, de l'excitation, de la qualité du rubis, de la qualité des miroirs et de leur alignement [5].

Le rendement global du laser s'exprime par le rapport de l'énergie laser à l'énergie électrique emmagasinée dans les capacités; il dépend de nombreux paramètres [5]. Le rendement global est donc compris entre 0.1 et 1%. On peut réaliser des puissances extrêmement grandes en évitant le fonctionnement en relaxé et en bloquant toute l'énergie emmagasinée dans une impulsion laser [5]. Cette technique conduite à un phénomène d'impulsion- géante.

Par exemple, un laser de un Watt donnant sa lumière de façon continue aura une puissance de 1 joule/s, mais s'il concentre une énergie de un joule en une décharge lumineuse d'une milliseconde, sa puissance de crête va être multipliée par mille et sera de un kilowatt [6]. Le fait de délivrer leur énergie sur des temps très courts (nanoseconde « 10^{-9} s » ou picoseconde « 10^{-12} s ») permet pour certains lasers d'étude d'atteindre des puissances de crête extrêmement élevées (jusqu'à plusieurs térawatts « 10^{12} Watt ») [6].

4.3. La couleur du laser

La couleur du laser est définie par le choix du milieu laser. Il existe des lasers de toutes les couleurs rouge, bleu, vert... Certains lasers sont mêmes faits de lumière invisible comme les ondes infrarouges ou ultraviolettes. Les multiples couleurs des lasers font la beauté des spectacles laser. Quelques exemples de lasers sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : types de laser et leur caractéristique [6].

TYPE DE LASER	MILIEU LASER	PARTICULES EXCITABLES	COULEUR
Diodes laser	Semi-conducteur	Électrons-trous	Rouge-infrarouge
Laser hélium-néon	Gaz hélium-néon	Atomes de néon	Rouge
Laser à rubis	Rubis (solide)	Ions chrome	Rouge
Laser argon	Gaz d'argon	Ions argon	Bleu, vert et invisible (ultraviolet)
Laser krypton	Gaz de krypton	Ions krypton	Rouge
Laser à excimères	Mélange de gaz rare et d'halogène. Les plus courants sont les mélanges de xénon et de chlore ou de krypton et de fluor.	Groupement de deux atomes	Invisible (ultraviolet)
Laser à vapeur de cuivre	Vapeur de cuivre	Atomes de cuivre (deux niveaux d'excitation)	Vert et jaune
Laser CO ₂	Mélange gazeux constitué d'azote, d'hélium et de dioxyde de carbone* (CO ₂)	Molécules de CO ₂	Invisible (infrarouge)
Laser Nd-YAG**	Grenat d'aluminium et yttrium (YAG) dopé au néodyme (Nd)	Ions néodyme	Invisible (infrarouge)
Laser verre-néodyme	Verre dopé au néodyme (solide)	Ions néodyme	Invisible (infrarouge)
Laser à colorant	Colorant dans un solvant	Molécules de colorant	Différentes plages de couleurs en fonction du colorant

* Le dioxyde de carbone est plus connu sous le nom de gaz carbonique.
** YAG : Yttrium Aluminium Garnet.

La plupart des lasers ne peuvent émettre que sur une seule longueur d'onde. Il existe cependant des lasers dont on peut régler la longueur d'onde. On dit qu'ils sont accordables.

4.4. La cohérence dans le temps et dans l'espace

La cohérence du laser dans le temps et dans l'espace regroupe les propriétés d'unidirectionnalité et de monphasé. Elle est souvent à la base des applications potentielles des lasers. C'est la cohérence du laser, par exemple, qui va permettre la lecture des disques laser [6].

4.5. Le faisceau laser est parfaitement rectiligne

La propagation d'une onde lumineuse est parfaitement rectiligne. Or, comme toutes les ondes du laser se propagent dans la même direction, un faisceau laser n'est pas divergent comme la lumière d'une lampe de poche, par exemple. Il est parfaitement rectiligne et visible sur de grandes distances [6].

5. COMPARAISON DE LA LUMIÈRE ORDINAIRE ET DE LA LUMIÈRE LASER

COMPARAISON DE LA LUMIÈRE ORDINAIRE ET DE LA LUMIÈRE LASER

La lumière ordinaire est...

- **De plusieurs couleurs:** avec un prisme, la lumière que l'on voit blanche peut être décomposée en un arc-en-ciel.
- **Multidirectionnelle:** les différentes ondes lumineuses se déplacent dans toutes les directions de l'espace à partir de la source.
- **Désordonnée:** les différentes ondes lumineuses ne sont pas émises en même temps. Elles oscillent de manière désordonnée, indépendamment les unes des autres.

La lumière laser est...

- **D'une seule couleur:** on dit qu'elle est monochromatique. Il existe de nombreux types de lasers de couleurs différentes.
- **Unidirectionnelle:** toutes les ondes lumineuses se déplacent dans la même direction et forment un faisceau de lumière étroit, non divergent.
- **Ordonnée (ou cohérente):** toutes les ondes sont en phase, c'est-à-dire avec leurs "bosses" et leurs "creux" aux mêmes endroits. C'est le caractère ondulatoire de la lumière laser. Il est possible de comparer la lumière laser à une armée de petits soldats "marchant au pas cadencé" et la lumière ordinaire à une foule de personnes se déplaçant au hasard.

6. STRUCTURE DES MODES ET DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

La lumière émise par un laser contient une ou plusieurs fréquences que l'on associe aux modes propres de la cavité. On distingue généralement deux types de modes : les modes longitudinaux et les modes transverses. Les modes longitudinaux diffèrent par leur fréquence d'oscillation tandis que les modes transverses diffèrent, non seulement par leur fréquence d'oscillation mais aussi par la répartition de leurs champs, électrique et magnétique, dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation.

Le mode gaussien d'ordre zéro est le cas le plus simple, où l'intensité fait un pic au centre. Les autres faisceaux sont appelés « modes gaussiens d'ordre supérieur ». On note souvent ces faisceaux TEM_{lm} (hermito-gaussiens) ou TEM_{pl} (laguerre-gaussiens). TEM désigne un mode transverse électromagnétique. Le mode gaussien fondamental est noté TEM_{00} [9].

La figure (04) montre des photographies de diagrammes de rayonnement obtenus avec un laser He –Ne fonctionnant sur 1.15μ ; Rigrod [10] a étudié une quinzaine de modes avec une cavité plan-concave. Les diagrammes de rayonnement de la figure (04) ont été obtenus en prenant bien soin de conserver la symétrie axiale. En générale, le diagramme de rayonnement d'un laser n'est pas aussi régulier car de nombreux modes oscillent simultanément.

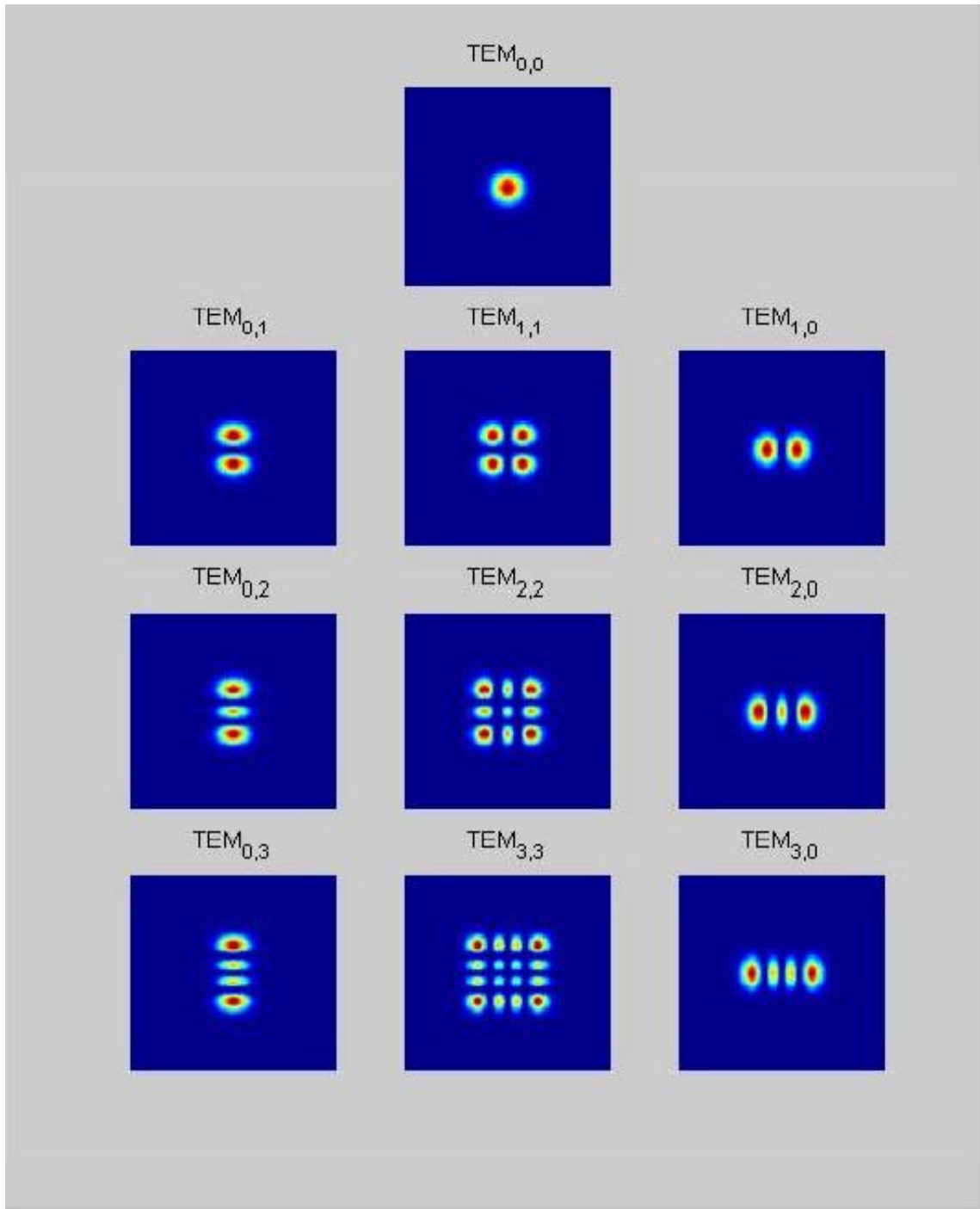


Fig. 04. Représentation des modes HG en fonction de leur nombre d'annulation

En pratique, dans la cavité laser, il existe une compétition entre les différents modes transverses et longitudinaux. En général, le nombre de modes transverses oscillants dans la cavité est supérieur à un. La superposition de ces modes simultanés est appelée faisceau multimode [10]. Les constructeurs de cavité laser se sont rendus compte qu'il était quasiment impossible d'obtenir un mode fondamental stable quand les puissances nécessaires dépassent le kilowatt [10].

7. APPLICATION DU LASER

Il existe de nombreuses applications intéressantes dans le domaine des mesures et des instruments de mesure. Les communications utilisent la grande directivité de la lumière laser. Les applications technologiques, militaires et biologiques utilisent surtout la possibilité de concentrer une grande puissance dans un petit volume, en des temps très courts [5].

7.1. Mesure des distances et des vitesses

La cohérence de la lumière émise par un laser à gaz permet d'étendre le domaine des mesures d'interférométrie et d'augmenter la précision; la grande monochromaticité permet d'améliorer la précision des mesures qui utilisent l'effet Doppler : les précisions sont facilement améliorées par un facteur 1000 et les résultats sont spectaculaires [11].

7.2. Mesure des grandeurs optiques

Les lasers permettent de mesurer les densités électroniques et la température du plasmas : on mesure leur indice de réfraction, ou plutôt les variations de leur longueur optique, on peut aussi mesurer leur largeur spectrale [5].

7.3. Analyse spectroscopique

La lumière laser sert à vaporiser des substances, on fait une analyse spectrochimique de leur vapeur. On peut vaporiser des échantillons très petits en focalisant le faisceau en une petite tache. Après vaporisation, le matériau peut être porté à la température requise pour faire la spectroscopie d'émission en déchargeant un condensateur dans la vapeur. Il est très utile pour l'analyse des tissus biologique. On peut analyser des échantillons de 10^{-7} g, la mesure ne prend que 0.01 sec [12].

7.4. Eclairage :

Les lasers ont été utilisés comme sources de lumière pour la téléphotographie, pour éclairer les microscopes, pour photographier des objets animés de grandes vitesses. Ces applications demandent la forte intensité et la grande directivité des faisceaux lasers. On utilise les lasers relaxés ou déclenchés pour la photographie des objets en mouvements. Ellis et Fourney [13] ont pu photographier des formations de bulles avec une vitesse de répétition de 200000 images par seconde.

7.5. Communication et détection

Le deuxième avantage est la directivité du faisceau : on peut donc transmettre dans une direction déterminée. Pour communiquer entre deux points seulement, il faut concentrer le porteur d'information dans un faisceau étroit. La finesse d'un faisceau hyper- fréquence est limitée par la diffraction : dans le domaine centi – métrique, il faut des antennes de taille considérable pour produire un faisceau de quelques degrés de large. Avec la lumière laser, et pour un même gain, il suffit d'une surface rayonnante 10000 fois plus petite [5]. Avec un rayonnement de 1μ ou moins, la largeur du faisceau est limitée par d'autres facteurs que l'aire de la surface rayonnante [5]. Le laser peut être aussi utilisé pour déterminer la position d'un objet éloigné, on dit que l'on fait de la détection [5].

7.6. Usinage et soudure

Le faisceau laser peut transporter une forte énergie que l'on peut concentrer sur une surface petite : il permet donc de percer des trous petits et de souder des pièces de faibles dimensions. Pour cette application, toutes les propriétés intéressantes du laser ne sont pas nécessaires, il faut seulement que l'énergie totale délivrée sur un tir soit grande et que le faisceau puisse être focalisé [5].

7.7. Application en biologie et en médecine

La médecine utilise la directivité du faisceau laser et sa monochromaticité, car tous les matériaux organiques n'ont pas la même réponse. Des études ont été faites sur l'effet du rayonnement laser sur les composants du sang et sur les enzymes. Si des anticorps sont irradiés par le faisceau laser, des changements dans leur action inhibitrice peuvent s'effectuer [5].

7. 8. Refroidissement d'atomes par laser

Le refroidissement d'atomes par laser est une technique qui permet de refroidir un gaz atomique, jusqu'à des températures de l'ordre du mK (refroidissement Doppler). Ceci permet d'arrêter des atomes ayant une vitesse initiale de quelques centaines de mètres par seconde en quelques millisecondes, sur quelques mètres, et rend les manipulations d'atomes lents en laboratoire possibles ! Par exemple, un atome de Rubidium passe d'une vitesse initiale de 300 m.s^{-1} à environ 10 m.s^{-1} en absorbant 50 000 photons.

8. LASERS DISPONIBLES ET LEURS APPLICATIONS INDUSTRIELLES [14]

Tableau 2 : résumé des lasers disponibles et leurs applications industrielles.

Laser	Année de découverte	Commercialisé depuis	Applications
Rubis	1960	1963	Applications médicales inorganiques traitement matériel,
Nd-Glass	1961	1968	Mesure de longueur et de vitesse.
Diode	1962	1965	Traitement de semi-conducteur, Application biomédicale, soudage.
He-Ne	1962		Lumière-indicateurs, mesure de longueur et de vitesse, Dispositifs d'alignement.
Dioxyde de carbone	1964	1966	Traitement des matériaux -découpe soudure, fusion atomique
Nd-Yag	1964	1966	Traitement des matériaux, soudure,
Ion d'argon	1964	1966	Lumière puissante, applications médicales
liquide	1966	1969	Détection de pollution, séparation d'isotope.
Cuivre	1966	1989	Séparation d'isotope
Excimer	1975	1976	Application médicale, traitement des matériaux, Coloration

9. RINCIPALES UTILISATIONS (EN FONCTION DE LEUR PUISSANCE)

Alors on peut résumer les principales utilisations du laser dans le tableau suivant

Tableau 3 : Principales utilisation du laser en fonction de leur puissance [6]

<i>Utilisation</i>	<i>Puissance</i>	<i>Mode de fonctionnement</i>	<i>Remarques générales</i>
Lecture des disques compact. Lecture des codes barres dans les supermarchés	Quelques mW	Continu	Petites diodes lasers qui s'intègrent dans les appareils comme des composants électroniques ordinaires
Lasers d'alignement pour les travaux publics ou les	Environ 10 mW	Continu	Petits lasers (par exemple, lasers hélium-néon)
Lasers de transport des télécommunications	Quelques dizaines de mW	Continu ou impulsionnel	Petites diodes lasers. Ces faisceaux laser sont transportés à travers toute la planète et sur de très longues distances le long de fibres optiques tendues sous terre ou dans la mer.
Discothèques, Spectacles lasers	Quelques watts	Continu	Lasers à argon ou à hélium-néon, par exemple.
Applications médicales <i>Chirurgie interne</i> : Opérations sans ouvrir le corps <i>Chirurgie externe</i> : Soins de l'œil (décollements de rétine), Soins des dents (caries), bistouri...	Puissance, fonction des applications	Continu ou impulsionnel	Lasers YAG ou lasers à CO ₂ . Les lasers utilisés pour des applications médicales sont assez puissants. Ils peuvent brûler une partie endommagée dans le corps, souder la rétine sur l'oeil ... Mais attention, le médecin ou le dentiste doivent avoir la main sûre. Cependant, aucun autre instrument ne permet une intervention aussi précise.
Nettoyage et préparation de surface (par exemple, décapage aux lasers des monuments historiques) matériaux sans les altérer en dessous, en concentrant le faisceau laser. sur les zones à décapier.	Puissances crêtes de l'ordre de 10 ⁷ à 10 ⁸ W (pour des puissances de 10 à 20 W pour les lasers YAG, par exemple)	Impulsionnel (très courtes impulsions : quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes	Lasers excimères ou laser YAG Ce procédé permet d'éliminer totalement ou de façon sélective des couches surfaciques recouvrant différents

Procédé d'enrichissement de l'uranium par lasers	Quelques centaines de watts	Impulsionnel	Lasers à vapeur de cuivre pompant des lasers à colorant. (lasers discontinus : 5000 impulsions/seconde)
Soudage des métaux	Quelques dizaines de watts à 50 kW Puissance selon l'épaisseur	Continu ou impulsionnel	Lasers YAG (100 W à 2 kW) Lasers CO2 (100 W à 50 kW)
Découpage de matériaux tels que le bois, le plexiglass ou les métaux.	1 à 3 kW	Continu ou impulsionnel	

10. SÉCURITÉ LASER

Les lasers sont des outils souvent indispensables pour de nombreuses applications, mais il ne faut pas en oublier les dangers. Leur utilisation peut présenter des risques pour l'homme en fonction de la puissance du laser. L'œil est l'organe le plus fragile vis-à-vis de la lumière laser. En effet, si le faisceau laser est dirigé dans l'œil, celui-ci focalise le faisceau laser, ce qui augmente l'éclairement sur la rétine. Cette dernière peut alors être endommagée même avec des lasers de faible puissance (dès 1 mW) [5, 6].

CHAPITRE 02 : INTERACTION LASER - MATIÈRE

INTRODUCTION

Quelles que soient les applications des lasers de puissance au traitement des matériaux, la base des phénomènes physiques mis en jeu est l'interaction du rayonnement électromagnétique du laser avec la matière. Selon que l'irradiation sera effectuée sur un matériau métallique, semi-conducteur ou isolant, la réponse en terme d'énergie absorbée sera différente. Nous allons expliciter les mécanismes qui régissent l'interaction laser-matière et la façon dont l'énergie apportée est absorbée. L'énergie électromagnétique transmise à la matière est convertie en chaleur, laquelle engendre des changements d'état et des transformations métallurgiques dans le matériau irradié [15].

I. L'INTERACTION LASER- MATIÈRE

Lorsqu'elle interagit avec la matière, la lumière se comporte comme si elle était constituée de "grains" infimes, les photons. Ces particules de masse nulle ne portent pas de charge électrique. Elles interagissent avec toutes les particules de matière par le biais de l'interaction électromagnétique. Ainsi, lorsque de la lumière est envoyée sur un milieu matériel, les photons excitent les cortèges électroniques des atomes ou des molécules qui constituent ce milieu. La désexcitation qui s'ensuit libère de nouveaux photons [16].

L'étude de l'interaction laser-matière connaît depuis quelques années un développement important, lié à l'avènement de nouveaux lasers, très puissants et à impulsions ultra brèves : capables d'engendrer des puissances extrêmes sur une durée très courte (inférieure au millionième de milliardième de seconde, 10^{-15} s), ils permettent d'étudier en temps réel la dynamique des vibrations des molécules et celle des réactions chimiques. Ils permettent également de « manipuler » les atomes, et ainsi d'explorer des domaines de la physique complètement nouveaux. Le développement de ces lasers très intenses permet par exemple de "secouer" si fortement les atomes que ces derniers réagissent en donnant lieu à des phénomènes physiques très particuliers comme la génération d'harmoniques, c'est-à-dire l'émission d'une lumière composée de fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence reçue. En étudiant

les caractéristiques de la lumière émise ou absorbée par les atomes ou leurs assemblages (molécules, agrégats, polymères), les physiciens peuvent mieux comprendre leur stabilité, leurs mécanismes de construction ou de destruction [16].

Les lasers très intenses permettent également d'atteindre un très vaste domaine de densités et de températures et offrent par exemple l'occasion unique de reproduire, en laboratoire, des températures de plusieurs millions de degrés, voisines de celles qui règnent au cœur des étoiles. En outre, l'interaction laser-matière permet de concevoir de nouvelles sources laser à impulsions très brèves et de très courtes longueurs d'ondes, en particulier dans l'extrême ultraviolet (UV) et les rayons X. Ces nouveaux instruments d'étude permettent d'observer des structures de la matière encore plus fines (avec une meilleure résolution) et d'étudier « en temps réel » des mécanismes chimiques ou biologiques.

Enfin, ces nouvelles sources trouvent déjà des applications industrielles, notamment dans le domaine de la microélectronique : elles permettraient de réduire la taille des gravures de composants électroniques et par suite de miniaturiser davantage les circuits intégrés[16].

1. RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Les mécanismes d'interaction diffèrent selon la gamme de fréquence du rayonnement électromagnétique considéré. En effet, le spectre des fréquences s'étend des rayonnements de très faible énergie ou très basse fréquence (ondes radio), à ceux de très forte énergie (haute fréquence) (rayons gamma), en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, le visible, l'ultraviolet et les rayons X (Figure 05).

Les rayonnements émis par les lasers de puissance se situent entre l'infrarouge et l'ultraviolet. L'énergie du photon dépend de la fréquence, ν (Hz), donc de la longueur d'onde, λ (m), de propagation. Le quantum d'énergie, E_p , s'exprimant à l'aide de la constante de

Planck, h , et de la célérité de la lumière, c , est donné par [15]:

$$E_p = h\nu \text{ ou } E_p = \frac{hc}{\lambda} \text{ ou } E_p \text{ (eV)} = \frac{1.2389 \cdot 10^3}{\lambda \text{ (nm)}} \dots\dots\dots(1)$$

Dans l'infrarouge, l'énergie d'un photon varie entre $3 \cdot 10^{-3}$ et 1 eV environ. Pour les lasers CO₂ ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) et les lasers Nd-YAG ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$), les énergies photoniques sont respectivement de 0,117 et 1,17 eV. Pour donner des ordres de grandeur, les rayons X ont des énergies supérieures à 10^3 eV et les rayons γ atteignent 10^6 eV.

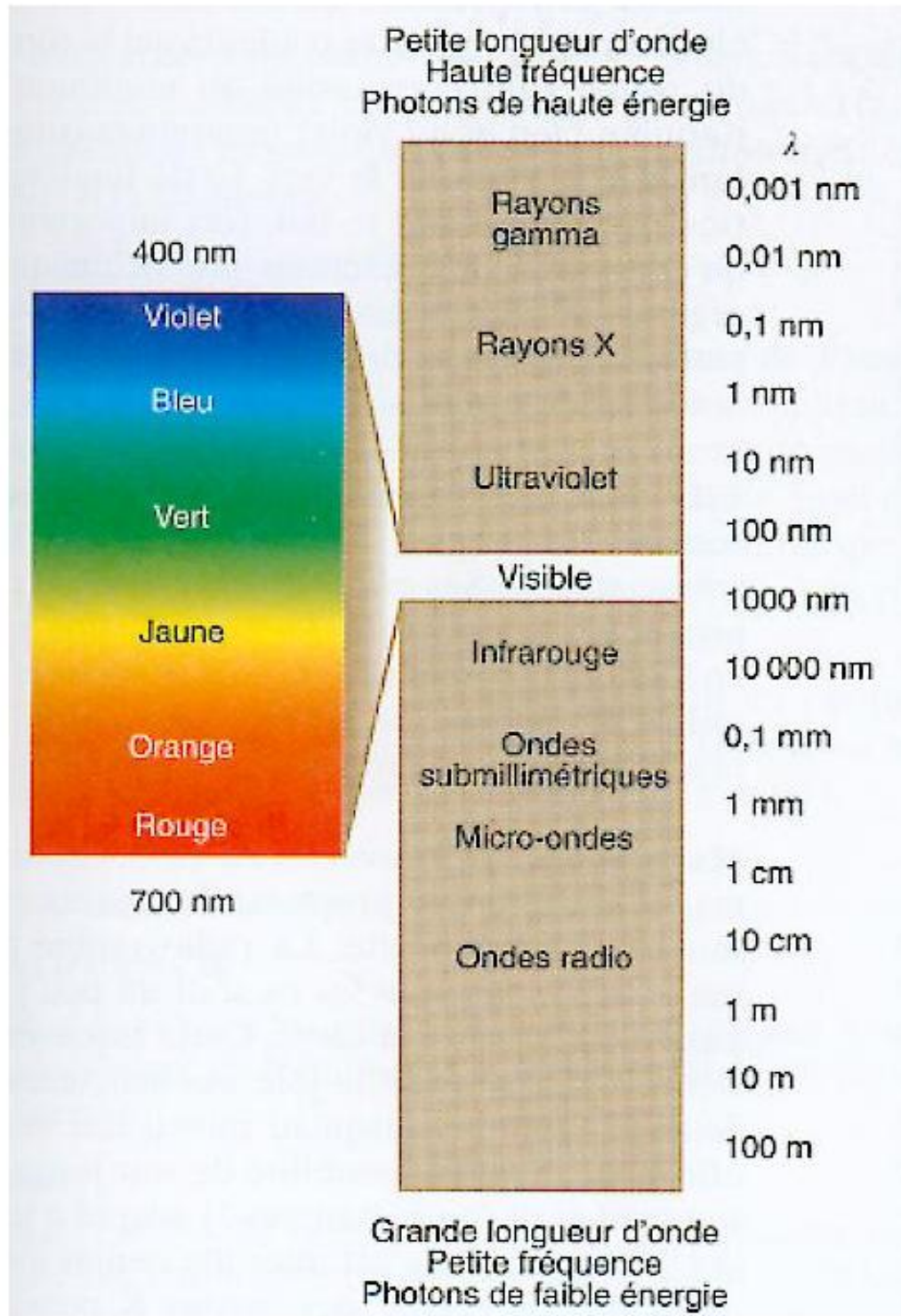


Fig. 05. Régions du spectre électromagnétique [15].

2. PROPAGATION D'UNE ONDE DANS UN MILIEU

Selon la théorie établie de Maxwell [17, 18], une onde électromagnétique est caractérisée par son champ électrique E et son champ magnétique. Lorsque l'onde se propage selon l'axe z , dans un milieu d'indice complexe n^* , la résolution des équations de Maxwell donne l'expression suivante du champ électrique :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{n^*}{c} z \right) \right] \dots\dots\dots(2)$$

où ω : la pulsation

$$\omega = \left(\frac{2\pi c}{\lambda} \right)$$

c : la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique,

λ : la longueur d'onde,

t : le temps.

L'indice complexe $n^* = n - ik$ (n est l'indice de réfraction et k le coefficient d'extinction) est relié à la permittivité électrique, ϵ , la perméabilité magnétique, μ , et la conductivité électrique, σ , du milieu, de la façon suivante :

$$(n^*)^2 = \mu\epsilon c_0^2 - i\sigma \frac{c_0^2}{\omega} = n^2 - k^2 - ink = \epsilon' - i\epsilon'' \dots\dots\dots(3)$$

Lorsqu'un faisceau d'énergie électromagnétique, d'intensité (flux d'énergie), I_0 , pénètre dans un milieu solide liquide ou gazeux, la variation de l'intensité transmise, $I(z)$, en fonction de la distance, z , dépend du coefficient d'absorption α , du milieu. L'intensité décroît selon la loi de Beer - Lambert

$$I(Z) = I_0 \exp (-\alpha Z) \dots\dots\dots(4)$$

avec $\alpha = 2\omega \frac{k}{c}$

3. L'INTERACTION LASER - MATIÈRE AU NIVEAU DE L'ATOME

La matière sous ses diverses formes, gazeuse, liquide ou solide, se trouve en général dans la nature dans son état d'énergie minimale. Mais si l'on bombarde cette matière avec des photons, des ions ou des électrons, on peut y déposer une grande quantité d'énergie en des temps très courts, allant de la picoseconde (10^{-12} s) à la femtoseconde (10^{-15} s). Ce faisant, on « excite » le cortège électronique des atomes de la cible (qui n'est donc plus dans son état d'énergie

minimale), ce qui peut donner lieu à de nouveaux phénomènes, comme la génération d'harmoniques. Quand des photons se transforment en de nouveaux photons

Les sources laser intenses permettent par exemple d'étudier le comportement de la matière dans des conditions extrêmes, notamment celles où les forces électriques induites par un faisceau laser dépassent les forces de cohésion des atomes. Les atomes absorbent une énergie lumineuse qu'ils réémettent rapidement sous la forme d'une lumière comportant de nouvelles fréquences. Ce phénomène se produit lorsqu'un faisceau laser très intense est focalisé dans un jet atomique de gaz rare, par exemple de néon. Dans un premier temps, ce déferlement de lumière « secoue » les électrons qui absorbent l'énergie des photons reçus et s'éloignent du noyau auquel ils sont liés. Dans un deuxième temps, ces électrons retournent à leur niveau d'énergie de départ en réémettant l'énergie supplémentaire qu'ils avaient absorbée. Mais les photons ainsi restitués ne sont pas semblables aux photons d'origine : leur énergie est un multiple entier de celle des photons incidents. Il en va de même pour leur fréquence puisque la fréquence associée à un photon est toujours proportionnelle à son énergie. On sait aujourd'hui observer en temps réel le mouvement des atomes au sein d'une molécule. Cette observation peut être réalisée grâce à un faisceau laser dont les impulsions sont plus courtes que la période de vibration de la molécule à étudier. Les expériences de ce type sont appelées des expériences "pompe-sonde". Elles se déroulent en deux temps. Une première impulsion laser, l'impulsion pompe, amène la molécule à un état excité. Cette opération définit le temps zéro de l'expérience (en somme, elle déclenche le chronomètre). Une seconde impulsion laser, l'impulsion sonde, vient ensuite photographier la molécule à différents instants et sonde ses différents états transitoires [16].

Se séparent ou se rapprochent et de détecter les transferts d'électrons entre atomes. Elles aident ainsi à comprendre les mécanismes des réactions chimiques élémentaires et pourraient avoir des applications immenses en chimie et dans les sciences du vivant. Si des impulsions ultrabrèves étaient également disponibles dans le domaine des rayons X, elles permettraient par exemple d'atteindre la structure d'objets biologiques et de suivre leur évolution en temps réel [16].

4. ABSORPTION ET RÉFLEXION :

Lorsqu'un faisceau d'énergie électromagnétique pénètre dans un milieu donné, une fraction, A, de son intensité est absorbée en chaleur, une fraction, T, est transmise à travers le matériau et une fraction, R, est réfléchi [15] :

$$I = A_{\text{abs}} + R_{\text{re}} + T_{\text{tr}} \dots \dots \dots (5)$$

R_{re} , A_{abs} et T_{tr} sont respectivement les coefficients de réflexion, d'absorption et de transmission du matériau. Dans les conditions habituelles de traitement par irradiation laser, l'épaisseur du matériau irradié est tellement importante que le terme de transmission devient négligeable.

L'expression de R_{re} est fonction de l'indice de réfraction, n , et du coefficient d'extinction du milieu, k , dans le cas d'un faisceau incident monochromatique se propageant dans le vide [15] :

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \dots\dots\dots(6)$$

5. LES PROCESSUS D'INTERACTION

Deux familles de processus d'interaction sont généralement citées dans la littérature :

- o Les processus photochimiques.
- o Les processus thermiques.

Les processus photochimiques (ou « photolytiques », ou « photodissociatifs ») ont été particulièrement étudiés pour l'ablation des polymères par un rayonnement ultraviolet. Dans ce régime, l'excitation du milieu par les photons permet d'induire des ruptures de liaisons chimiques, entraînant la dissociation des molécules [19]. Cette réaction est plus efficace dans le domaine de l'U. V car les photons sont plus énergétiques.

On associe, en général, l'ablation de matériaux par des photons dans le domaine du visible ou de l'infrarouge à un processus thermique, l'absorption du photon conduisant à une élévation en température. Avec des impulsions nanosecondes, le milieu est considéré comme étant à l'équilibre thermodynamique local, car le temps de relaxation est plus court que celui de l'impulsion [19]. On peut alors définir une température unique du milieu $T(x, y, z, t)$. Cet échauffement peut entraîner un changement de phase ou une dégradation chimique du système activée thermiquement. Le terme « processus photophysiques » est parfois employé pour décrire une interaction qui combine à la fois les processus photochimiques et les processus thermiques [19].

6. LE CHAUFFAGE PAR LASER

Pour des longueurs d'onde dans la gamme du visible et de l'infrarouge, le faisceau laser peut ainsi être considéré comme une source de chaleur. L'évolution spatiale et temporelle de la température est décrite par l'équation de la chaleur. Cette évolution dépend des paramètres optiques et thermiques du milieu. Les paramètres optiques déterminent la distribution spatiale et

temporelle du dépôt d'énergie. Celles-ci sont représentées par le terme source, noté $Q(x, y, z, t)$, qui décrit le dépôt d'énergie par unité de volume et de temps dans le milieu. Les paramètres thermiques sont la diffusivité, la conductivité et la chaleur spécifique du matériau, et déterminent l'élévation de température [20].

L'équation de la chaleur, dans un milieu isotrope et immobile, avec une source de chaleur interne $Q(x, y, z, t)$, est donnée ci-dessous [20].

$$\rho(T)G_p(T)\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} - \nabla(k(T)\nabla T(x, y, z, t)) = Q(x, y, z, t) \dots\dots\dots(7)$$

7. APPLICATIONS DE L'INTERACTION LASER- MATIÈRE

7.1. Etude des agrégats

Les agrégats sont également étudiés dans ces conditions d'éclairement extrême. Intermédiaires entre le solide et un ensemble d'atomes isolés en phase gazeuse, de tels objets passionnent les chercheurs car ils combinent les avantages d'une densité locale proche de celle du solide (supérieur à 10^{22} atomes par cm^3) et d'une taille de l'ordre du nanomètre [16]. Soumis à un éclairage laser très intense, un agrégat absorbe une grande quantité d'énergie et se transforme en un nanoplasma chaud qui émet des rayons X et explose violemment [16].

(Nanoplasma : milieu constitué d'atomes plus ou moins ionisés et d'électrons libres, de la taille de quelques nanomètres).

7.2. Utilisation des lasers de forte énergie

La plupart des phénomènes et objets étudiés en astrophysique ne sont accessibles que par le rayonnement qui nous en parvient. Nombreuses sont les situations où les interactions entre le rayonnement et la matière sont déterminantes, qu'elles se déroulent ou non en régime relativiste, dans des milieux optiquement minces ou, au contraire, de grande profondeur optique. L'utilisation de lasers de très forte énergie permet de recréer, en laboratoire, des conditions proches de celles que l'on peut trouver lors de formations stellaires, et ainsi d'accéder à de nombreux phénomènes astrophysiques [16]. **Ils offrent l'occasion unique d'atteindre des températures de plusieurs millions de degrés, en maintenant la matière dans des conditions proches de l'équilibre thermodynamique, voisines de celles des intérieurs stellaires [16].**

CONCLUSION

Malgré la connaissance des mécanismes gouvernant l'absorption d'un rayonnement électromagnétique par un solide parfait, il est difficile de prévoir le coefficient d'absorption d'un faisceau laser par un matériau. Ceci en raison de l'influence des défauts présents à la surface du matériau, mais aussi en raison de l'interaction entre le faisceau laser et le plasma. En effet, il est difficile de quantifier l'influence de la formation du plasma, sur le transfert d'énergie entre le faisceau laser et le matériau.

L'absorptivité du matériau dépend de nombreux paramètres, notamment la fréquence du laser, l'intensité du faisceau laser et son angle d'incidence.

Pour augmenter l'énergie absorbée, il est préférable, a priori, d'accroître l'absorptivité A du matériau plutôt que l'éclairement (flux d'énergie), car la mise en œuvre d'une source laser de haute puissance contribue à augmenter le coût de l'investissement et de la maintenance.

II. TRAITEMENTS DES MATÉRIAUX PAR LASER

INTRODUCTION :

Les lasers ont de nombreuses applications dans des domaines aussi variés que la métrologie, la médecine ou la métallurgie. Après 30 ans de développement, le laser a trouvé beaucoup d'applications industrielles, comme le perçage, le découpage, le soudage et les traitements superficiels. Parmi les nouveaux matériaux, les multimatériaux tiennent une place privilégiée car ils permettent de concilier des propriétés incompatibles dans un matériau unique. Or, c'est fréquemment par les traitements localisés ou superficiels que l'on peut réaliser des multimatériaux performants. La modification des surfaces, la densité de puissance et le temps d'interaction entre le laser et le substrat ont une importance fondamentale pour déterminer le type de procédé à choisir (Figure 06).

Nous présentons les divers procédés types de traitement de surface en utilisant les lasers de puissance en tant que faisceau d'énergie.

Deux catégories de traitements de surfaces par irradiation laser sont distinguées : les traitements sans apport de matière et les traitements avec apport de matière. Les profondeurs traitées varient en général entre 1 μm et 1000 μm .

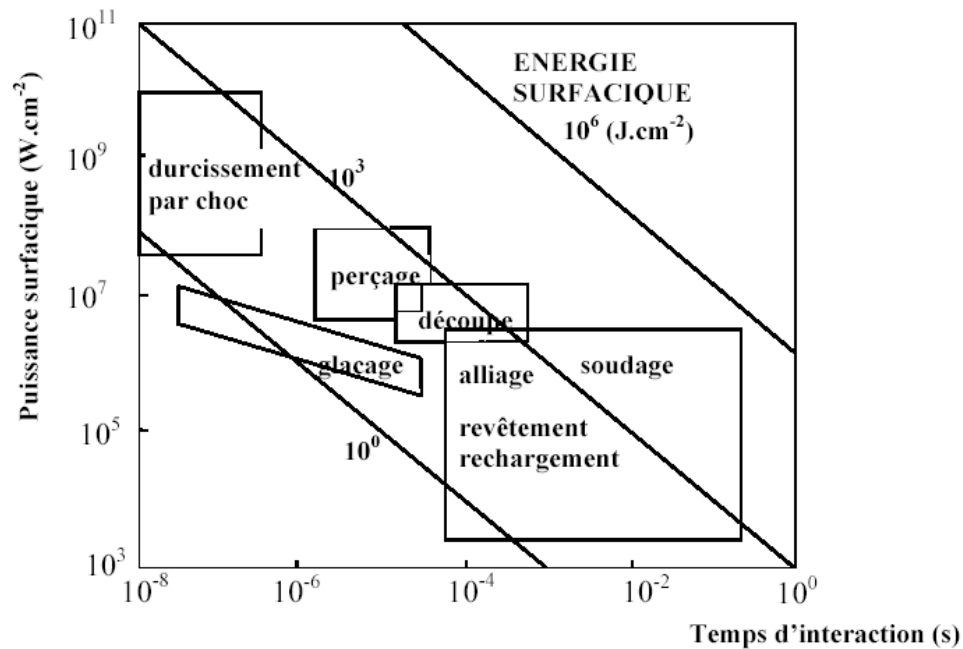


Fig. 06. Applications des faisceaux lasers [21].

1. DÉFINITION DE LA LONGUEUR CARACTÉRISTIQUES

On définit deux longueurs caractéristiques : la longueur de diffusion thermique et la profondeur d'absorption.

La longueur de diffusion thermique $L_T = \sqrt{D_T}$, est de l'ordre de quelques micromètres pour les métaux pendant un chauffage nanoseconde (exemple 3,5 μm pour le cuivre pendant 100 ns), et plus faible pour des milieux comme les polymères. D est la diffusivité thermique telle que $D = k/\rho C_p$.

La profondeur d'absorption $L_\alpha = 1/\alpha$ est de quelques dizaines de nanomètres pour les métaux dans le domaine du visible. Elle peut être considérablement plus importante pour les polymères dans cette gamme spectrale.

Ces deux longueurs caractéristiques permettent de définir deux régimes de chauffage :

1. **Le chauffage surfacique** si $L_\alpha \ll L_T$ (τ_L). Dans ce régime de chauffage, l'absorption se fait sur des profondeurs faibles (absorption en surface), et le profil de température dans le milieu pendant l'absorption est essentiellement décrit par les propriétés thermiques du milieu. [22-25]

2. **Le chauffage volumique** si $L_\alpha \gg L_T$ (τ_L). Dans ce régime de chauffage, le profil de température dans le matériau pendant le tir laser est essentiellement décrit par les propriétés

optiques du milieu, dans la mesure où la diffusion thermique est négligeable dans cette échelle temporelle. Ce régime est aussi appelé « régime de confinement thermique » [26- 28].

2. MODIFICATION DE MICROSTRUCTURE SANS APPORT DE MATIÈRE

Cette modification peut résulter, soit d'une transformation structurale à l'état solide, par suite d'un effet de trempe superficielle, soit d'une fusion superficielle, suivie d'une resolidification rapide du matériau irradié [15].

2.1. Trempe superficielle

L'irradiation d'un laser de puissance en vue d'un durcissement par transformation structurale, sans atteindre la fusion, a pour objet d'obtenir une couche superficielle de dureté élevée tout en conservant au cœur de la pièce une bonne ténacité. La trempe superficielle d'aciers martensitiques faiblement ou non alliés vise à améliorer leurs propriétés mécaniques de surface, ainsi que leur comportement tribologique (dureté, résistance à l'usure).

Le premier champ d'application concerne la construction automobile. En 1975, General Motors utilisa la trempe par irradiation laser pour durcir certains éléments fonte de boîte de direction, Fiat pour les traitements des blocs à cylindres et Nissan pour les traitements des éléments de transmission [29], afin d'améliorer la résistance à l'usure, obtenir un meilleur refroidissement des cylindres et, en conséquence, développer les moteurs plus compacts.

2.2. Fusion superficielle

Un traitement thermique avec fusion superficielle est un procédé visant à améliorer les propriétés de surface (propriétés mécaniques, tenue à la corrosion,...) par une modification de la structure cristalline du matériau sans changement chimique [15].

Un gaz inerte, l'argon le plus souvent, est insufflé sur le bain de fusion, de manière à assurer une couverture empêchant l'oxydation au contact de l'air (Figure 07).

On peut modifier la nature des phases initiales (apparition de phases métastables), la taille des grains, leur morphologie (structure cellulaire ou dendritique) et leur distribution.

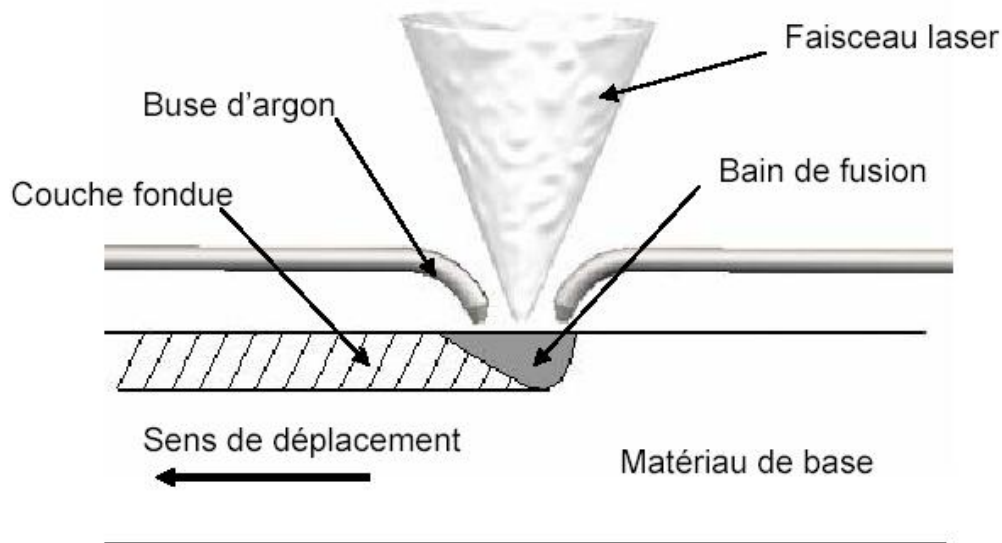


Fig. 07. Fusion superficielle par irradiation laser [15].

2.3. Traitement avec vaporisation

Dans ce cas, il faut l'utilisation des lasers pulsés (CO_2 , Nd-YAG, excimère), qui délivrent une densité de puissance instantanée très élevée (de 10^6 à $10^{11} \text{ W.cm}^{-2}$) pendant des impulsions de courte durée (10^{-8} à 10^{-6} seconde). Ces impulsions répétées entraînent une vaporisation rapide de la surface [30]. Les vapeurs métalliques s'ionisent entraînant la formation d'un plasma dont la durée de vie est de quelques millisecondes. Aux effets thermiques, sont associés des effets mécaniques par les ondes de choc générées par l'expansion du plasma, lesquelles interagissent avec la surface, ou des effets explosifs dus à une absorption d'énergie très importante sur un temps très bref. Les applications concernent le nettoyage (élimination de graisses ou de salissures diverses) ou le décapage des surfaces (peinture revêtement, oxyde,...) ainsi que la modification d'états de surfaces (texture des surfaces, marquage dans les industries de la microélectronique, de l'automobile) sans modification des propriétés du matériau en profondeur [30].

2.4. Le durcissement

Le durcissement consiste à échauffer rapidement et localement la surface du matériau à une température supérieure à la température de transformation sans atteindre la température de fusion. Le refroidissement se fait par conduction thermique de la surface vers le coeur du matériau provoquant un phénomène d'auto- trempe [31].

Les laser à gaz carbonique ($\lambda = 10,6\mu\text{m}$) utilisés dans le cas de matériaux réfléchissants, obligent à une opération préalable de dépôt d'un matériau absorbant qui doit faciliter le couplage Laser/matière. L'utilisation d'un Laser à solide de type Nd-YAG ($\lambda = 1,06\mu\text{m}$) permet de réaliser des traitements avec de meilleurs rendements d'interaction.

Parmi les applications industrielles au stade de la production, on peut citer différents types de pièces traitées :

- gorges de segments de piston (ROLLS ROYCE) [31],
- portées d'arbres de turbocompresseur (TOYOTA) [31],
- cylindres de moteur diesel marin en fonte (MAN-B&W) [31].

3. MODIFICATION DE COMPOSITION AVEC APPORT DE MATIERE

La fusion superficielle par irradiation laser avec apport de matière est un traitement visant à améliorer les propriétés de surface du matériau par une modification chimique. Pour cela, avant ou en cours de traitement, d'autres matériaux ou éléments d'apport sont ajoutés soit à l'état gazeux en atmosphère contrôlée, soit sous forme solide, afin d'élaborer des revêtements ou bien des composites ou alliages superficiels [15].

3.1. Formation d'un revêtement

L'irradiation avec fusion du matériau d'apport est un procédé au cours duquel est incorporé au substrat superficiellement fondu, un matériau extérieur, afin d'améliorer les propriétés de surface du substrat initial (résistance à l'usure, à l'oxydation ou à la corrosion) [15].

Dans le cas de l'élaboration d'un revêtement par fusion laser, le matériau ou les matériaux d'apport doivent passer par l'état liquide tout en évitant la fusion du substrat sur une épaisseur trop importante afin de réduire le plus possible la dissolution du matériau du substrat dans le bain de fusion et d'altérer le moins possible le revêtement. Le matériau d'apport est déposé au préalable sur le matériau à revêtir (Figure 08) ou bien il est injecté à l'état de poudre (Figure 09) dans le bain de fusion. Utilisé en production depuis 1981 dans l'aéronautique en

Grande Bretagne, ce procédé a été introduit plus récemment par les Japonais dans l'industrie de grande série pour le stellitage de soupapes ou le revêtement des sièges de soupapes directement sur bloc moteur [15].

3.2. Formation d'un composite superficiel

Des particules de renfort sont injectées dans le métal fondu superficiellement. Ces particules s'incrustent, sans fondre, dans le bain de fusion. Après solidification du métal, de telles particules de type carbure ou nitrure induisent une augmentation sensible de la dureté dans la zone traitée par fusion (Figure 10) [15].

3.3. Formation d'un alliage superficiel

Le procédé est sensiblement le même que dans le cas de la formation d'un revêtement, si ce n'est que la fusion d'une couche relativement épaisse du substrat est recherchée. Cette partie du substrat doit incorporer le gaz réactif (Figure 11) ou bien l'élément d'addition pulvérulente injecté sous le faisceau (Figure 12) ou déposé préalablement (Figure 13), afin de former un alliage de surface après solidification [15].

Les traitements de surface par fusion laser avec apport de matière intéressent de nombreux industriels essentiellement dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique.

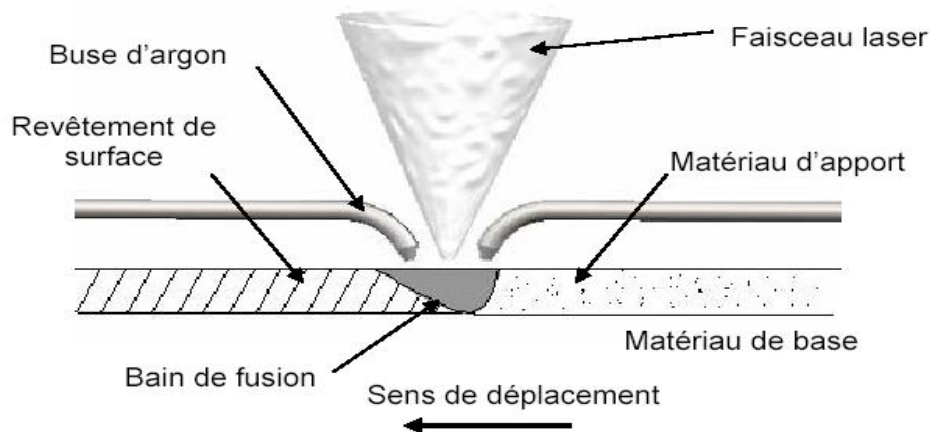


Fig. 08. Formation d'un revêtement de surface avec prédépôt d'un matériau d'apport [15].

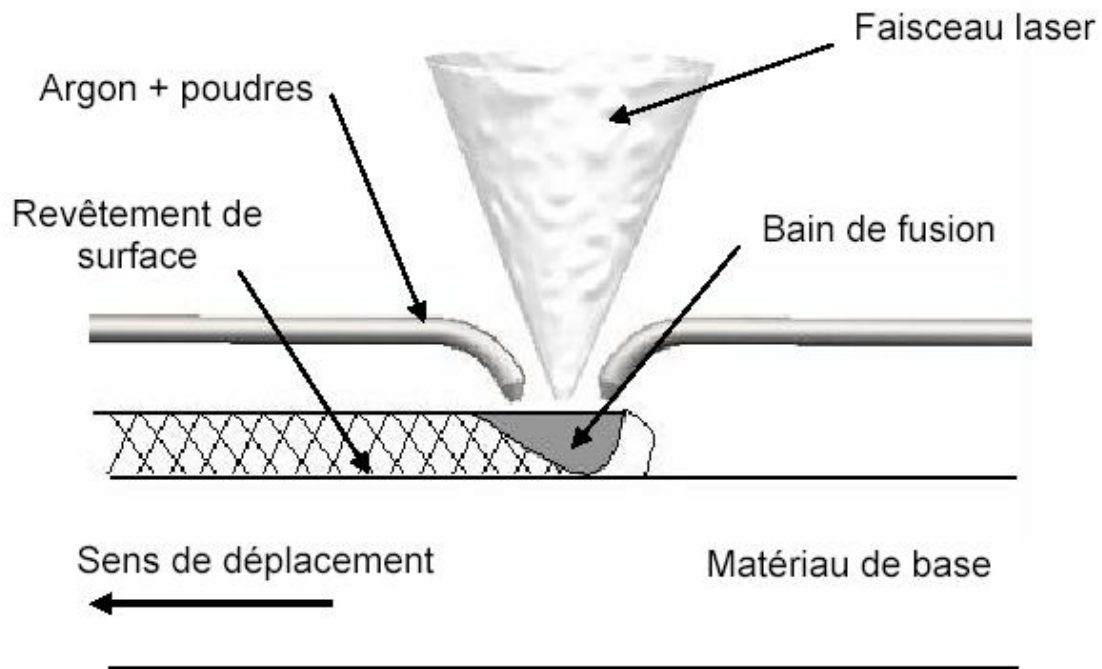


Fig.09. Formation de revêtement de surface
avec injection de poudre pulvérulente sous le faisceau laser [15].

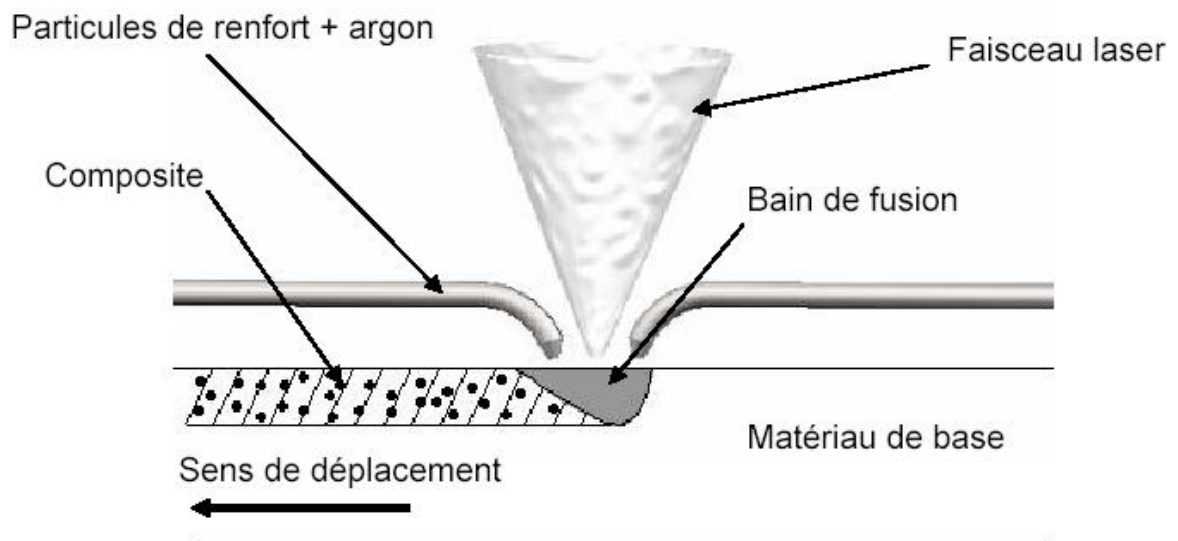


Fig. 10. Formation d'un composite superficiel [15].

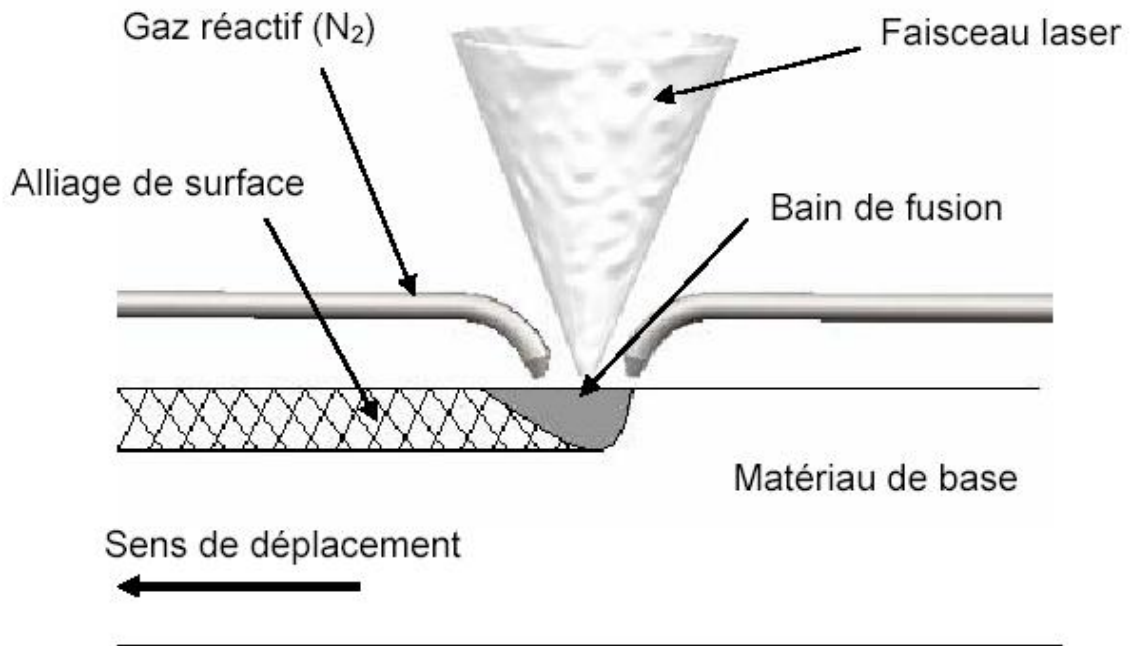


Fig.11. Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif [15].

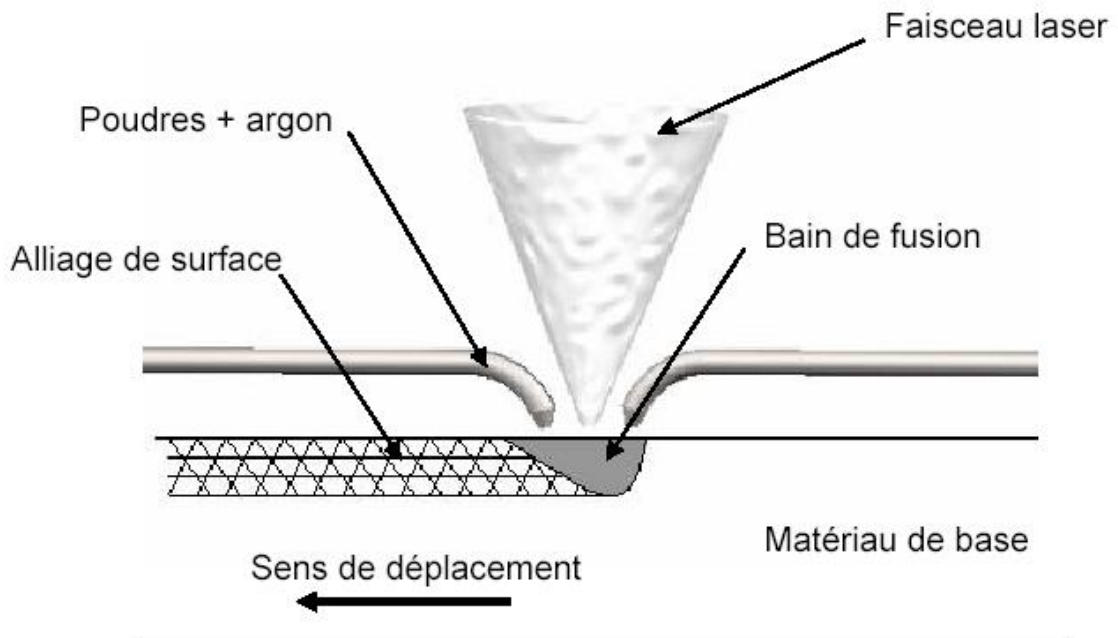


Fig. 12. Formation d'un alliage de surface avec injection de poudres additives.

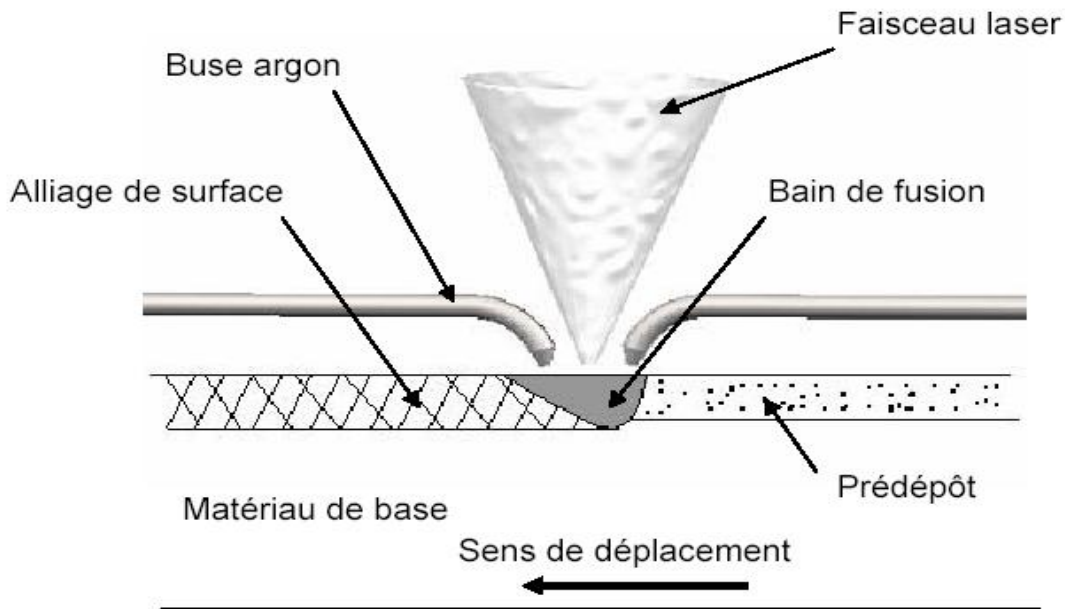


Fig. 13. Formation d'un alliage de surface à partir d'un prédépôt d'éléments d'addition.

Leur fonction est d'allonger la durée de vie de pièces mécaniques en renforçant leur résistance à l'usure et à la corrosion. Le procédé de projection thermique à la torche est fréquemment utilisé. La pièce est revêtue en projetant à grande vitesse un matériau sous forme de poudre partiellement fondue par le plasma. Le principal défaut de ce procédé est lié à l'absence de chauffage du substrat qui provoque un manque d'adhérence du revêtement ainsi que l'apparition de porosité et de fissuration. En revanche, le procédé de fusion laser évite ces inconvénients et permet en outre un traitement localisé aux seules zones soumises aux sollicitations. Les applications concernent, par exemple, l'élaboration de revêtements résistants à l'usure et à l'oxydation, sur les ailettes de compresseurs, sur les bords d'attaque d'aubes de turbines en acier ou sur les encoches de chapeaux d'aubes de turbine [15].

3.4. Le nettoyage et la préparation de surface

Ce procédé propre et sélectif permet d'éliminer des couches superficielles recouvrant différents matériaux sans altérer le substrat. Il met en jeu deux phénomènes : l'ablation superficielle et l'enlèvement par ondes de choc. Lorsque le faisceau Laser interagit avec la couche à éliminer, il y a vaporisation superficielle et création d'un plasma qui va générer une onde de choc (par différence de pression). Cette onde se propage vers le substrat et décolle la couche de polluant à l'interphase [31].

Les domaines d'application vont du secteur aéronautique, à l'industrie nucléaire en passant par les monuments historiques. Ce traitement est expérimenté pour [31] :

- § Le décapage de peintures d'avions ;
- § Le nettoyage de monuments historiques ;
- § Le nettoyage de moules d'injection ;
- § La décontamination en ambiance nucléaire ;
- § Le nettoyage de composants sous tension ;
- § La préparation de surface avant collage ou soudage.

CONCLUSION

Dans le domaine spécifique des traitements de surface, la technologie des lasers de puissance offre une grande souplesse d'applications. En effet, contrairement aux faisceaux d'électrons, le transport des faisceaux lasers de puissance ne nécessite pas de produire le vide et peut se faire, en outre, par fibre optique dans le cas des sources Nd-YAG. La possibilité de concentrer l'énergie sur une très petite surface rend cette technologie inégalée dans le cas des traitements localisés. Par ailleurs, la forte concentration de l'énergie autorise des temps d'interaction très brefs, qui limitent l'étendue des zones affectées thermiquement et engendrent des microstructures très fines, induites par des solidifications rapides. Soulignons également l'excellente liaison entre le substrat et la zone traitée par irradiation, dans la majorité des cas.

Grâce à la diversité des effets induits dans l'ensemble des traitements de surface par laser, il apparaît que cette gamme de procédés est capable d'offrir des solutions variées en vue d'améliorer les propriétés de surface des matériaux (traitements thermiques ou thermo-chimiques de la surface, traitements mécaniques). Les applications concernent des matériaux très divers soumis à différents types de sollicitations (usure, érosion, oxydation, fatigue,...). La localisation du traitement uniquement sur la zone de la pièce soumise aux sollicitations permet de réduire la durée de l'opération ainsi que la quantité d'énergie et de matière consommées. En outre, ces divers traitements superficiels préservent les propriétés du matériau massif, en profondeur. Malgré des potentialités importantes, les procédés laser dans le domaine des traitements de surface ne connaissent pas encore le développement industriel qu'ils méritent. Il s'agit d'une technologie encore jeune, à laquelle le monde industriel préfère souvent des procédés peut-être moins performants, mais totalement maîtrisés, moins coûteux et « qui ont fait leurs preuves ».

4. LA CLASSIFICATION DES PROCESSUS LASER- METAL

Le domaine de la classification des processus laser -métal est basé sur la présence des changements de phase ou non .Du véritable point de vue d'application, le traitement des métaux par laser peut être divisé généralement en quatre catégories principales, nommées : formation (fabrication de l'étape proche ou produits finis), liaison (soudure, brasage etc.), usinage (découpage, forage, etc.) et technologie de la surface (traitement confiné seulement à la région proche de la surface) [32-51]. La figure 14 présente cette classification avec quelques exemples d'application pour chaque catégorie.

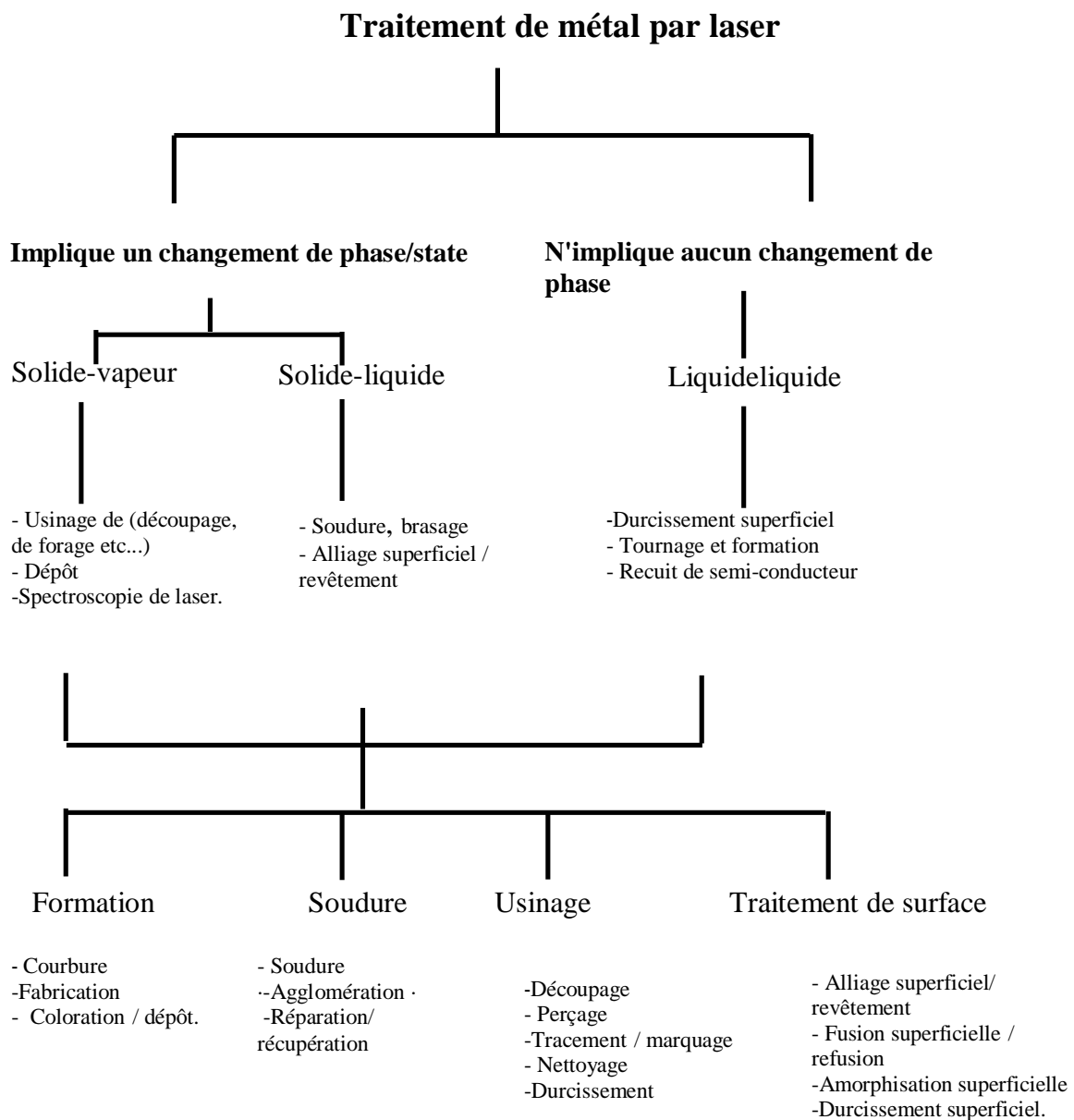


Fig. 14. Classification des processus laser- métal [14].

4.1. Formation par laser

Un des buts principaux du traitement des matériaux est de produire des produits finis par une conception correcte : forme, géométrie et dimension. La fabrication d'un produit fini est rarement un processus d'une seule étape. Au contraire, le développement d'un produit fini implique plusieurs étapes : première (obtention, choix, gain, mélanger de la matière première), deuxième (fusion, enrobage) et troisième (usinage, polissage, formation). Le traitement de des matériaux par laser offre une possibilité unique de fabriquer des produits finis directement des matières premières sans passer par plusieurs opérations intermédiaires [32-35, 46].

Le tableau 3 récapitule les études principales effectuées dans le large secteur de formation par laser dans le passé récent (1995 et après) [52-69].

4.2. Recourbement par laser

Le recourbement par laser est une technique nouvellement développée capable de modifier la courbure des plaques métalliques par des efforts thermiques sans toutes forces mécaniques extérieurement appliquées [52-56]. Le recourbement par laser peut également atteindre l'objectif de redresser les feuilles minces par un semblable laser basé sur le processus de non contact sans forces mécaniques. Le recourbement par laser comporte un effet complexe entre le profil thermique produit par l'irradiation laser et les propriétés thermiques /physiques et les dimensions de la pièce traitée. En général, le processus est influencé par beaucoup de paramètres tels que des paramètres du laser (densité de puissance et interaction/pulse), propriétés matérielles (conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique, etc...) et dimensions de la cible (épaisseur, courbure, etc.). Les matériaux les plus favorables au recourbement sont les alliages AL/Ti et les aciers inoxydables faiblement alliés [14].

4.3. La fabrication par laser :

La fabrication par laser est une nouvelle technique de traitement qui utilise la puissance élevée du laser pour induire les changements thermiques commandés de forme/dimension/géométrie, phase (solide/liquide/gaz) ou fonction (utilisation finale) d'un matériel ou d'un composant avec une grande précision [57-59].

Tableau 4 : Sommaire des études choisies sur la formation, le recourbement et la fabrication des matériaux par laser dans le passé récent (1995 et après) [14].

Processus	Année	Matériel	Laser	Domaine	Résultats
Recourbement	2001	Al-2024 avec 15-20% Si Cp	Laser pulsé	Étudier l'effet de Renforcement sur L'angle de recourbement et comparer les résultats prévus	Plus petit renforcement, plus haut angle de recourbement. Un simple modèle ne peut pas expliquer tous les régimes [54].
Recourbement	2000	Acier inoxydable	Nd :Yag pulsé	Étudier l'effet des paramètres du Processus sur l'angle de recourbement	Le recourbement varie inersement aec l'épaisseur de la pièce et directement avec l'intensité du laser [55].
Recourbement	1998	Les alliages AlCuMgTi	CO ₂ et Nd :Yag	Étudier l'effet des paramètres de laser et déterminer analytiquement le contrainte	Vitess/angle de la courbure dépend principalement de la température et diminue avec les impulsions en raison de l'accumulation matérielle à la courbure [56].
Enrobage du céramic sur metal	1995	Enrobage de Cr ₂ O ₃ sur l'acier SAF2205	CO ₂	Étudier la solidité de la courbure interfacielle et la compatibilité entre CrO ₃ et l'acier.	Jusqu'à 200 mm d'épaisseur de CrO ₃ , revêtement sur l'acier est possible par le laser. stresse à l'interface est très haut [57].
Fabrication par laser Formation par Laser du métal pour réparation	2001	Alliage super	CO ₂	Formation par laser de métal de cristal simple en haute pression et à hautes températures	Prévision des cartes Microstructural (solidification microstructure, croissance morphologie, composition) [58]

4.4. Coloration par laser

Une couche mince d'oxyde sur la surface développée par irradiation laser peut produire une couleur ou lustre. Lu & Qiu [66] ont étudié coloration / décoloration par laser et blanchissage de la couche mince amorphous WO_3 . Les films originaux peuvent être coloré du marron clair au rose clair par une impulsion simple d'irradiation de laser excimère. On suggère que la coloration soit due à l'activation photochimique, tandis que l'oxydation photothermique est responsable du processus de blanchissage. Dans les aciers inoxydables, une réaction thermochimique entre l'oxygène et l'acier inoxydable est responsable de la coloration pendant l'irradiation laser en air [68].

Tableau 6 : Sommaire des études choisies sur la coloration des matériaux par laser dans le passé récent (1995 et après) [14].

Processus	Année	Matériel	Laser	Domaine	Résultats
Coloration par laser Blanchissage par laser	2000	Couches amorphes de WO_3	CO_2	Coloration par laser Des films de WO_3	Obtention des couleurs par coloration par laser, marron (activation photochimique) vers le rose (oxydation photothermique) [66].
Coloration	1996	Alliage super à base de Ni	Laser excimère	Restauration de couleur (et éviter décoloration) des aciers inoxydables	Réaction thermochimique entre le Fe et O_2 produite différent oxydes/couleurs [68]
Coloration	1995	Cuivre	Laser rouge (femteseconde)	Etude du photoemission dans les impulsions courtes	Le processus d'émission avoir lieu lorsque la cathode à cuivre est irradiée par des impulsions du laser rouge [69].

4.5. Soudure par laser

Une des applications les plus largement pratiquées du traitement des matériaux par laser était la liaison des feuilles métalliques par laser continu [32, 47, 48]. Aujourd'hui, l'automobile et l'industrie aérospatiale se fondent sur des lasers de chauffage et de fusion pour relier des feuilles

métalliques. La liaison par laser est applicable sur les matériaux organiques /inorganiques et similaires/ différents avec une précision extrêmement élevée.

D'ailleurs, la soudure par laser peut être faite en air, elle marque plusieurs avantages comme les soudures étroites avec une taille contrôlée, une soudure plus rapide avec une productivité plus élevée, sans déformation, zone affectée de la chaleur étroite, comme dans le cas de la soudure des alliages Al-Mg [70, 71].

5. Usinage par laser

L'usinage par laser consiste à contrôler le déplacement du matériau commandé par chauffage de la surface de la pièce traitée pour produire du forage, découpe, nettoyage, marquage, tracement et plusieurs autres formes du matériau [32, 33, 37].

Tableau 6 : sommaire des études plus récentes (1995 et après) sur l'usinage des matériaux par laser [14].

Processus	Année	Matériel	Laser	Domaine	Résultats
Découpe par laser Soudage	1996	Al-Li C +SiC	Nd :Yag pulsé	Prévoir la relation entre les paramètres du laser et la forme/profondeur de la découpe	Choix approprié des paramètres de laser minimise ZAT (zone affectée thermiquement), améliorer la qualité et l'efficacité de la coupe [72].

III. L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES [73]

L'**aluminium** est un élément chimique, de symbole *Al* et de numéro atomique 13.

C'est un métal argenté et malléable ; il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. Il est principalement extrait d'un minerai appelé bauxite où il est présent sous forme d'oxyde (Alumine Al_2O_3). Il pourrait également être extrait d'autres minerais : néphéline, leucite, silimanite, andalousite, muscovite. L'aluminium est employé dans beaucoup d'industries pour faire de nombreux produits différents et est très important pour l'économie mondiale. Le premier pays producteur est la Chine. Les composants structuraux faits à partir de l'aluminium sont essentiels à l'industrie aérospatiale et très importants dans d'autres secteurs du transport et de la construction où sa faible densité, sa longévité et sa résistance sont nécessaires.

1. Caractéristiques notables de l'aluminium

L'aluminium est un métal mou, léger, mais résistant avec un aspect argent-gris mat, dû à une couche mince d'oxydation qui se forme rapidement quand on l'expose à l'air et qui empêche la corrosion de progresser. À la différence de la plupart des métaux, il est utilisable même s'il est oxydé en surface. L'aluminium a une densité environ trois fois plus faible que celle de l'acier ou du cuivre ; il est malléable, ductile et facilement usiné et moulé. Il possède une excellente résistance à la corrosion et une grande longévité. Il est également non magnétique et ne provoque pas d'étincelles. C'est le deuxième métal le plus malléable et le sixième le plus ductile. En solution, l'aluminium se trouve le plus généralement sous la forme d'ions Al^{3+} .

Tableau 7 : caractéristiques notables de l'aluminium [73].

Général	
<u>Nom, Symbole, Numéro</u>	Aluminium, Al, 13
<u>Série chimique</u>	métaux pauvres
<u>Groupe, Période, Bloc</u>	13 (IIIA), 3, p
<u>Masse volumique, Dureté</u>	2700 kg/m ³ , 2,75
<u>Couleur</u>	Argenté
Propriétés atomiques	
<u>Masse atomique</u>	26.981538 u
<u>Rayon atomique (calc)</u>	125 (118) pm
<u>Rayon de covalence</u>	118 pm
<u>Rayon de van der Waals</u>	ND pm
<u>Configuration électronique</u>	[Ne]3s ² 3p ¹
<u>Électrons par niveau d'énergie</u>	2, 8, 3
<u>États d'oxydation (Oxyde)</u>	3, Amphotère
<u>Structure cristalline</u>	Cubique face centrée
Propriétés physiques	
<u>État de la matière</u>	solide
<u>Température de fusion</u>	933.47 K
<u>Température de vaporisation</u>	2792 K
<u>Volume molaire</u>	10.00 ×10 ⁻⁶ m ³ /mol
<u>Énergie de vaporisation</u>	293.4 kJ/mol
<u>Énergie de fusion</u>	10.79 kJ/mol
<u>Pression de la vapeur</u>	2.42×10 ⁻⁶ Pa à 577 K
<u>Vélocité du son</u>	5100 m/s à 933 K

Magnésium - Aluminium - Silicium

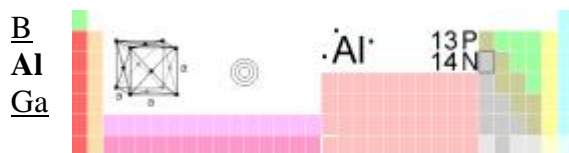


Table Complète

Divers	
<u>Électronégativité</u>	1.61 (Échelle de Pauling)
<u>Capacité calorifique spécifique</u>	900 J/(kg*K)
<u>Conductivité électrique</u>	37.7 10 ⁶ /m ohm
<u>Conductivité thermique</u>	237 W/(m*K)
1 ^{er} <u>Potentiel d'ionisation</u>	577.5 kJ/mol
2 ^e Potentiel d'ionisation	1816.7 kJ/mol
3 ^e Potentiel d'ionisation	2744.8 kJ/mol
4 ^e Potentiel d'ionisation	11577 kJ/mol
5 ^e Potentiel d'ionisation	14842 kJ/mol
6 ^e Potentiel d'ionisation	18379 kJ/mol
7 ^e Potentiel d'ionisation	23326 kJ/mol
8 ^e Potentiel d'ionisation	27465 kJ/mol
9 ^e Potentiel d'ionisation	31853 kJ/mol
10 ^e Potentiel d'ionisation	38473 kJ/mol

2. Utilisation de l'aluminium [73]

En termes de quantité ou de valeur, l'aluminium est le métal le plus utilisé après le fer. L'aluminium pur est mou et fragile, mais avec des petites quantités de cuivre, magnésium, manganèse, silicone et d'autres éléments, il peut former des alliages aux propriétés variées.

Parmi les secteurs utilisant l'aluminium, on peut citer :

- Les transports (automobiles, avions, camions, trains, bateaux etc.)
- L'emballage (boîtes de conserve, papier aluminium, canettes, barquettes, aérosols etc.) et notamment les emballages alimentaires.
- La construction (fenêtres, portes etc.)
- Les biens de consommation (appareils, ustensiles de cuisine etc.)
- Les fils électriques (La conductivité de l'aluminium ne représente que 60% de celle du cuivre, mais l'aluminium est plus léger et moins cher)

- De l'aluminium très pur (99,980 à 99,999%) est employé en électronique et pour les CD

3. Obtention de l'aluminium

L'aluminium est un élément abondant dans la croûte terrestre mais il se trouve rarement sous sa forme pure. Le principal minerai d'aluminium est la bauxite. L'aluminium est très difficile à extraire des roches qui le contiennent et a donc été longtemps très rare.

L'aluminium est extrait par électrolyse de la bauxite, dont le principal constituant est l'alumine (Al_2O_3). La bauxite est traitée par une solution de soude. On obtient un précipité de $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui donne de l'alumine par chauffage. L'alumine est introduite dans des cuves d'électrolyse avec des additifs comme la cryolithe (Na_2AlF_6) et le fluorure d'aluminium (AlF_3) afin d'abaisser le point de fusion de $2\,040^\circ\text{C}$ à 960°C .

La production d'une tonne d'aluminium nécessite de 4 à 5 tonnes de bauxite. Elle nécessite entre 13 000 et 17 000 kilowattheure. Lors de l'électrolyse sont émis des gaz polluants tels que du dioxyde de carbone (CO_2), du monoxyde de carbone (CO), des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), du dioxyde de soufre (SO_2) et des fluorures gazeux.

4. Recyclage de l'aluminium

Pour recycler de l'aluminium, on le fait simplement fondre, ce qui coûte beaucoup moins cher que de l'extraire d'un minerai. Le recyclage de l'aluminium est pratiqué depuis les années 1900. L'aluminium est quasiment recyclable à l'infini sans perdre ses qualités.

Il existe des filières de récupération de l'aluminium industriel. En France, l'aluminium ménager est récupéré avec les emballages dans le cadre du tri sélectif. Dans les centres de tri, l'aluminium est trié manuellement. Il est ensuite cassé et broyé avant d'être fondu pour redonner du métal utilisable appelé aluminium de seconde fusion.

En plus des bénéfices environnementaux, le recyclage de l'aluminium est beaucoup moins coûteux que l'extraction à partir du minerai de bauxite. Il nécessite 95% d'énergie en moins. Et une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite. En sautant l'étape de l'électrolyse, on évite les rejets polluants qui lui sont associés.

5. Soudage des alliages d'aluminium

La soudabilité des alliages d'aluminium est liée à leurs caractéristiques physico-chimiques, qui doivent être prise en compte lors de l'établissement d'un mode opératoire de soudage [74].

Les difficultés rencontrées lors du soudage de l'aluminium et de ses alliages sont liées à leurs caractéristiques, notamment leur diffusivité thermique et coefficient de dilatation élevés, la présence d'une couche d'alumine en surface de la pièce, et une très faible solubilité des gaz dans l'état solide. Le risque de fissuration à chaud est élevé pour certains alliages trempants; des problèmes de manque de liaison, de difficulté de pénétration et la tendance à former des soufflures sont autant de problèmes que l'on peut rencontrer lors de l'assemblage de ces matériaux. Outre les techniques de soudage 'conventionnelles', des procédés nouveaux tels que le laser et le soudage hybride peuvent être utilisés moyennant certaines précautions [74].

L'efficacité de la soudure peut être définie comme le coefficient de transfert d'énergie (de puissance). Où il est le rapport de la puissance du laser absorbée par la pièce traitée de à la puissance du laser d'incident.

L'efficacité ou de fusion est donné près par : $\epsilon = [ndw \Delta H_m / P]$

Cette équation relie la vitesse de fusion et l'énergie du laser incident P, Où v est la vitesse de la soudure, d est l'épaisseur de la pièce, W est la largeur du faisceau laser ΔH_m est la quantité de chaleur du métal à la température de fusion. La valeur maximale de ϵ est 0.48 pour la soudure de pénétration et 0.37 pour la soudure de conduction [48].

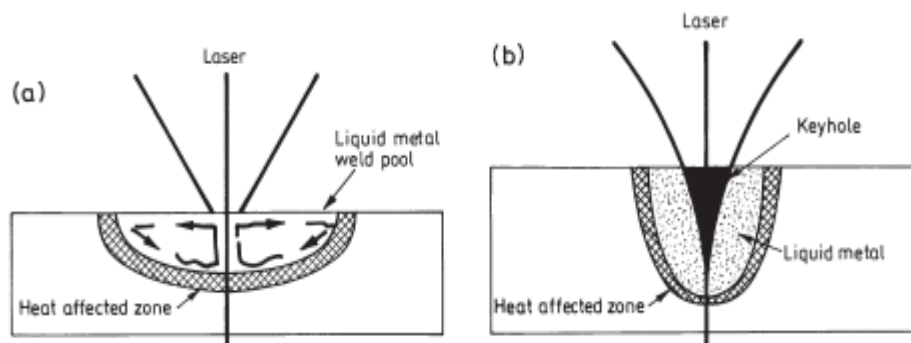


Fig.15. soudure par conduction de fusion (a) et soudure par pénétration profonde (trou) (b).

Le mode conduction et la soudure par pénétration (fig. 15) sont possibles en aluminium [75]. La forme de piscine de soudure dans l'aluminium dépend de la densité de puissance du laser et du temps d'impulsion. La transition de la soudure par conduction à la soudure par trou s'est produite en aluminium à une densité de puissance environ de 10 GW/m².

Tableau 8 : Sommaire des études choisies sur la soudure par laser des métaux dans le passé récent (1995 et après) [14].

Processus	Année	Matériel	Laser	Domaine	Résultats
Soudage des alliages	2000	SiC+Al-5061+ Ti	CO ₂	Etude de la Praticabilité des alliages + soudure et microstructure	Fusion de la zone centrale constituée de TiC, Ti ₅ Si ₃ et Al ₃ Ti [56]
Soudage	2000	Al-Ni-bronze	Nd :Yag	Etude l'influence du laser et les paramètres du processus.	Effet de la vitesse de la soudure sur la qualité du soudage et la microstructure déterminée [57].
Soudage	1999	Les alliages Al-Mg-Si	Laser CO ₂ 2.5 KW	Etude de la microstructure et les propriétés de la zone affectée thermiquement.	Une équation de la dissolution de Mg ₂ Si propose que la soudure est préférée à haute vitesse et grande énergie [58].

IV. L'ABLATION LASER EN RÉGIME NANOSECONDE

Le terme « ablation laser » utilisé dans cette étude peut-être défini comme « l'éjection d'une fraction substantielle de couche atomique induite par laser » [79]. Il regroupe donc tous les processus dans lesquels une quantité de matière notable est éjectée à la suite de l'absorption d'un faisceau laser.

Les procédés utilisant l'ablation de matériau par laser regroupent maintenant un très large champ d'applications, tels que la découpe, le soudage, la chirurgie, le dépôt de couche mince, l'analyse de matériau, la restauration d'œuvres d'art... Cette large gamme d'applications se retrouve dans la grande diversité thématique des journaux scientifiques dans lesquels les publications sont éditées.

Dans une approche simplificatrice, l'ablation d'un matériau par une impulsion laser de forte intensité (MW/cm^2 - GW/cm^2) de quelques nanosecondes peut être décomposée en différentes phases :

1. Une absorption d'une partie ou de la totalité du faisceau laser dans le matériau, qui conduit à une élévation de température et à une diffusion de la chaleur. L'absorption peut se réaliser dans l'ensemble du milieu ou sur des centres absorbants. On considère en régime nanoseconde que le système est à l'équilibre thermodynamique local.
2. Si la température est suffisante, une partie de la matière est éjectée sous forme de vapeur ou de fragments de matière. L'expansion rapide de la matière induit une onde de choc qui se propage dans l'atmosphère ambiante.
3. La matière éjectée peut diffuser et/ou absorber une partie du faisceau laser. Un plasma peut se créer et se développer au dessus de la surface.
4. Après l'impulsion laser, le matériau commence à refroidir et les espèces ionisées se recombinent. La matière éjectée peut se re-condenser sous forme d'agrégats, et se redéposer en partie sur la surface.

Cette étude bibliographique reste appliquée aux régimes d'ablation qui seront rencontrés (fluences modérées proches de la fluence seuil d'ablation).

1. Evolution de la fluence seuil d'ablation

La fluence seuil d'ablation F_S correspond à la fluence déposée dans le matériau à partir de laquelle une ablation *significative* est mesurée [80]. Cette fluence seuil dépend du matériau et des paramètres du laser. La fluence seuil d'ablation peut être ramenée à une température critique qu'il

faut atteindre pour obtenir un régime d'ablation [28]. La durée d'impulsion, qui joue un rôle dans l'élévation de température pour un chauffage surfacique, mais pas pour un chauffage volumique, va donc intervenir dans la détermination du seuil d'ablation pour un régime de chauffage surfacique, mais ne devrait pas être influant pour un chauffage volumique. Pour le régime de chauffage surfacique, la fluence seuil d'ablation est donc proportionnelle à τ_L . Cette relation a été confirmée par Stuart *et al* [81, 82] sur de la silice, du CaF_2 et des films d'or pour des impulsions de 100 ps à quelques nanosecondes. Dans le cas d'un chauffage en régime de confinement thermique (chauffage volumique), la fluence seuil devrait être *indépendante de la durée d'impulsion*. Cette prévision a aussi été obtenue avec les modélisations par dynamique moléculaire de Zhigilei *et al* [83].

CHAPITRE 3 : LES ALLIAGES TRAITES ET LES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

I. TRAVAIL EXPERIMENTAL

1. Préparation des échantillons

Les échantillons utilisés dans cette étude sont des alliages à base d'aluminium, on a utilisé deux types d'aluminium commercial : l'aluminium récupéré et l'aluminium industriel.

Des travaux précédents [84] ont montré que la topologie de surface avant l'irradiation a une grande influence sur la morphologie après l'irradiation.

La préparation des échantillons a été faite suivant plusieurs étapes. Après découpe des échantillons d'un lingot à l'aide d'une micro tronçonneuse; ils sont bien polis mécaniquement jusqu'à l'obtention d'une surface de miroir, cette opération permet la caractérisation de l'évolution topologique de la surface. Le procédé consiste à utiliser le papier abrasif successivement et terminer par la patte diamant (0.5 μm et 0.25 μm). Après le polissage mécanique les échantillons sont attaqués chimiquement par le réactif de killer dont la composition est la suivante :

Eau distillée :	87 ml.
Acide fluorhydrique :	05 ml.
Acide chlorhydrique :	09 ml.
Acide nitrique :	23 ml.

La composition chimique des échantillons est obtenue par l'analyse EDX de la surface de l'échantillon avant l'irradiation laser, le résultats de cette analyse pour chaque alliage est donnée dans les tableaux suivants :

Tableau 9 : Composition chimique (en % massique) de l'aluminium récupéré.

Eléments	Al	Si	Zn	O	Mg	Cu	Ni
Pourcentage massique (%)	72.02	13.05	6.34	4.28	2.08	1.75	0.48
Pourcentage atomique (%)	73.75	12.84	2.68	7.38	2.37	0.76	0.22

Tableau 10: Composition chimique (en % massique) de l'aluminium industriel.

Eléments	Al	Si	Fe	O	Mg	Cu	Mn	Pb
Pourcentage massique (%)	83.10	1.66	4.12	2.71	1.20	5.47	1.74	1.79
Pourcentage atomique (%)	86.30	1.70	2.11	4.85	1.41	2.47	0.9	0.26

Tandis que ses principales propriétés sont précisées dans le tableau 10.

Tableau 11 : propriétés principales des deux alliages étudiés (comparer avec Al pur)

Les méthodes de mesure la conductivité thermique sont nombreux mais on a la déduire à partir des mesures du gradient de température en régime permanent résultant d'un flux longitudinal dans un barreau cylindrique.

Propriétés	Aluminium récupéré	Aluminium industriel	Aluminium pur
Densité	2816	2614	2700
Microdureté (kg F/mm ²)	118	125	2.75
Conductivité thermique (W/m.K)	128	160	237

2. Techniques expérimentales

L'interaction entre un faisceau laser et un matériau dépend de nombreux paramètres propres au faisceau, tels que l'énergie de l'impulsion, le nombre de tirs, et la durée de l'impulsion. Trois lasers ont été utilisés dans nos études : le laser Nd : YAG, le laser excimère et le laser CO₂, les deux premiers lasers utilisés sont impulsionsnels, le laser CO₂ est continue.

La compréhension du traitement passe par l'analyse des échantillons après traitement, les analyses utilisées sont:

Grâce à des grossissements assez élevés, on a eu recours à un microscope électronique à balayage (M.E.B) à émission thermo-électronique qui nous a donné grâce à sa grande profondeur de champ, liée à une faible ouverture du faisceau primaire, de bons résultats.

Il permet d'observer les modifications structurales afin de comprendre les mécanismes d'interaction et de mettre en évidence l'influence de chacun de ces paramètres, des études paramétriques sont nécessaires. Les résultats de ces études paramétriques seront à la base des

réflexions sur les régimes d'ablation. Les échantillons traités sont analysés par différentes techniques :

- La profilométrie de la surface du matériau permet de remonter à l'efficacité de l'ablation en mesurant la profondeur ou le volume ablaté.
- La microdureté de la zone traitée par laser pour comprendre comment influe le laser sur le durcissement d'un matériau.
- L'analyse EDX pour voir la distribution chimique des éléments après l'irradiation laser.

Ce chapitre est donc consacré à la présentation et l'analyse des systèmes expérimentaux qui ont été utilisés et mis en place au cours de cette étude.

2.1. Les lasers

L'irradiation a été réalisée avec trois lasers différents :

-Un laser Nd : YAG ($\lambda = 532$ nm) avec une durée d'impulsion de 15 ns, et une énergie de 50 mJ.

Le laser utilisé a été développé par le centre de développement de technologies avancées (CDTA), Draria, Alger (le même a été utilisé au centre de physique théorique et appliquée, Université Alyarmouk, Irbid, Jordanie) (fig. 16 a et b)

-Un laser CO₂ avec une puissance maximale de 25 Watt.

-Un laser excimère avec une énergie entre 80 mJ et 250 mJ et une durée d'impulsion égale 25 ns.

Le premier laser utilisé est un laser Q-Switch Nd : YAG Brilliant (Quantel). Le barreau est pompé par des lampes flash, et délivre 300 mJ par impulsion à $\lambda = 1,064$ μ m. Le doublage de fréquence est réalisé avec un cristal de KDP en sortie du laser, et permet d'obtenir 160 mJ par impulsion à $\lambda = 532$ nm. Un miroir dichroïque, positionné derrière le cristal doubleur, permet de ne récupérer que le faisceau à $\lambda = 532$ nm. La durée de l'impulsion et son intensité dépendent de l'inversion de population dans le milieu amplificateur. Notamment, la durée de l'impulsion diminue si l'énergie de l'impulsion augmente.

L'échantillon est positionné sur un support et le faisceau laser est focalisé sur la cible (figure 16)

2.2. Le microscope électronique à balayage

Pour analyser les microstructures des zones traitées par laser on a utilisé un microscope électronique à balayage (M.E.B) à émission électronique (Jeol de type JSM 6360), qui nous a donné grâce à sa grande profondeur de champ, liée à une faible ouverture du faisceau primaire, de bons résultats. Ainsi que la spectroscopie de l'énergie dispersive pour donner la composition chimique des zones irradiées par laser (analyse EDX).

2.3. Profilométrie

Le volume de matière ablatée (mm^3), permet de quantifier l'efficacité de l'interaction laser - matière. Ce paramètre est relié à *l'efficacité d'ablation* η ($\text{mm}^3 \text{J}^{-1}$), dont on donnera la définition par la suite. Nous avons utilisé un profilomètre - perthomètre MAHR pour mesurer la topographie de surface des échantillons.

Le système de mesure est constitué d'une pointe diamantée possédant un rayon de courbure de $2 \mu\text{m}$ (palpeur MFW 250 $\times 2$) avec l'unité d'avancement PGK 20. Le palpeur est un balancier relié à la pointe diamantée à une extrémité, et à une bobine à l'autre extrémité. Le balayage de la pointe diamantée sur la surface déplace la position de la bobine. Par induction, le déplacement de la bobine permet de quantifier le déplacement de la pointe. On obtient ainsi une topographie de la surface du matériau. Compte tenu de la dimension du support de la pointe, il n'est pas possible de mesurer des profondeurs importantes sur de diamètres faibles. La pente limite a été mesurée à 36° . La limite en profondeur δ des cratères correspond donc à des diamètres minima $\varnothing \approx 1,5 \times \delta$. De plus, la dynamique verticale maximale du système est de $\pm 500 \mu\text{m}$. Le système est étalonné avec des cales étalons. La sensibilité verticale maximale selon le constructeur est de $0,4 \text{ nm}$.

La profondeur des cratères est mesurée en faisant une moyenne sur toute la surface du fond des cratères. La faible rugosité du fond des cratères montre que l'on peut limiter l'incertitude des mesures à quelques micromètres.

2.4. Les testes de microdureté

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la déformation. La mesure de microdureté est basée sur la détermination des dimensions d'empreintes produites dans le

matériau par renforcement d'un pénétrateur, sous l'action d'une charge appliquée. Le rapport de la force appliquée F à la surface en cours S de l'empreinte donne la dureté H ($H = F/S$).

Les mesures de microdureté ont été effectuées sur un microduromètre semi automatique du type ZWICK à pénétration Vickers, avec une charge de mesure de 100 g, relié à un micro-ordinateur qui permet la mesure automatique de l'empreinte grâce à un logiciel adapté.

Bancs expérimentaux

Le premier banc expérimental est le plus utilisé dans notre étude regroupe le laser Nd : YAG comme représente la figure 16.

(a)



(b)

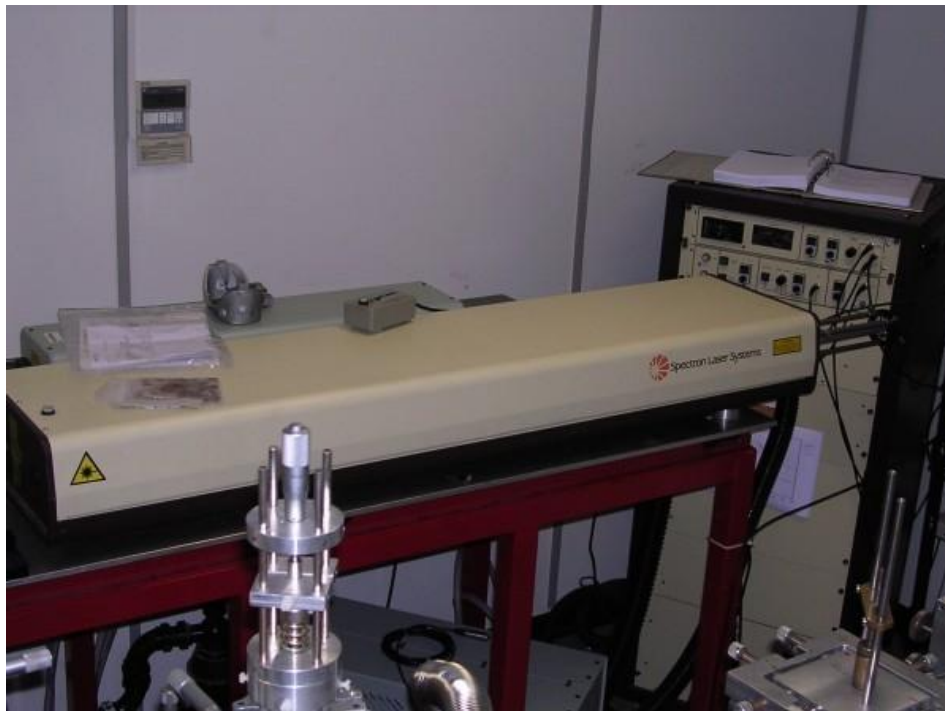


Fig. 16. Echantillon sous impacte laser Nd:Yag (a) CDTA Alger et (b) Yarmouk Jordanie.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

1- RÉSULTATS MICROSTRUCTURAUX

1.1. Observations en MEB avant l'irradiation laser

Les observations en MEB de l'aluminium industriel et récupéré avant l'irradiation laser (fig.17), montrent quelques particules blanches détectées sur la surfaces des échantillons des deux alliages (aluminium industriel et récupéré); ces particules sont probablement de la phase Al_2Cu .

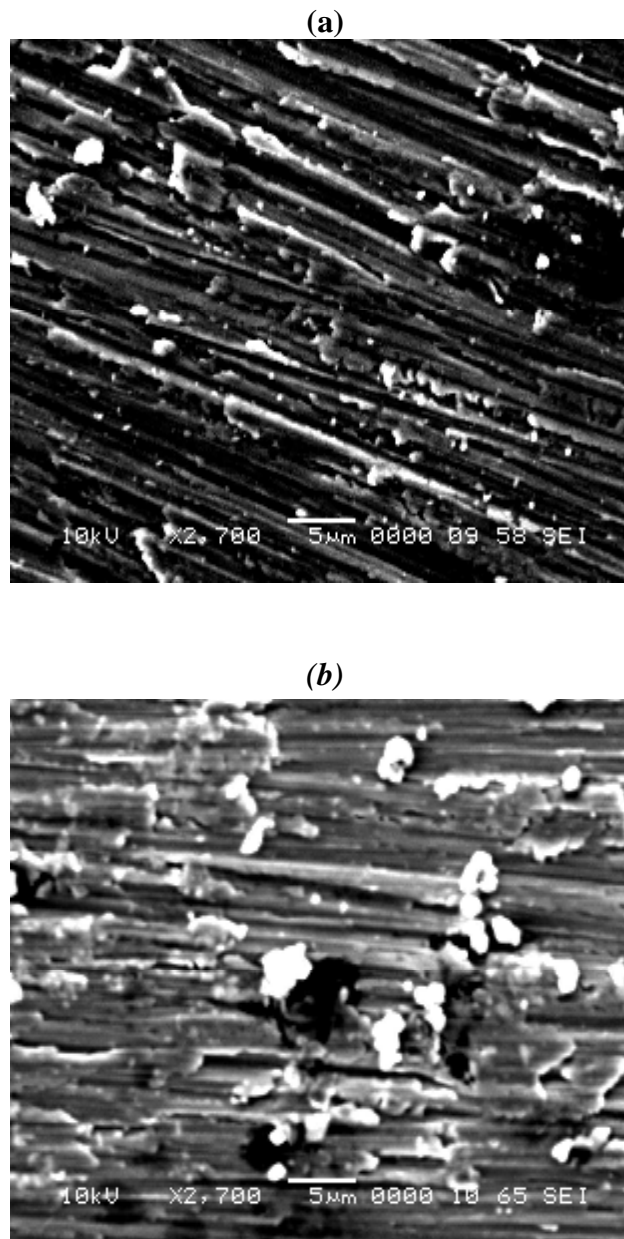


Fig. 17. Image MEB de l'aluminium industriel (a) et récupéré (b) avant l'irradiation laser.

En plus plusieurs petits trous sont observés sur la surface initiale après polissage ces derniers sont apparus à cause de la pâte diamant pendant le polissage. Les points noirs et les pores observés sur la surface sont des défauts de surface, comme les micro- inclusion.

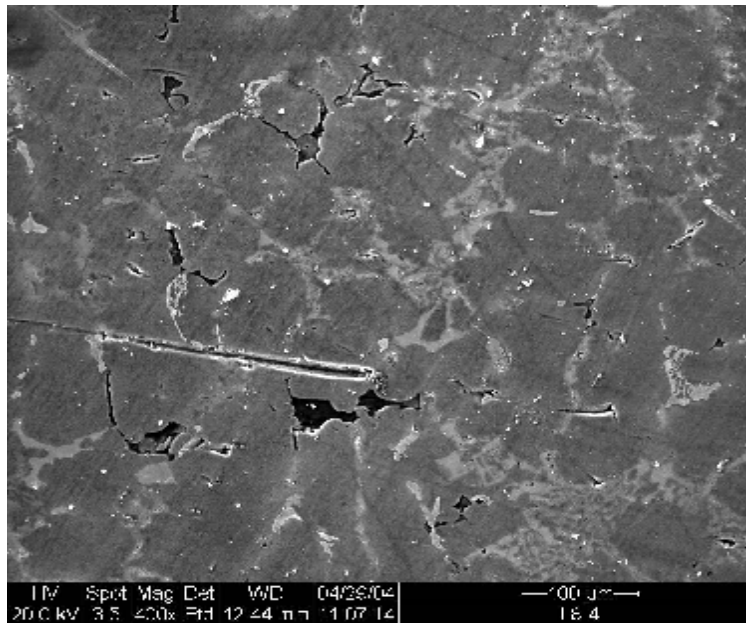


Fig. 18. Précipités dans la zone non irradiée dans l'aluminium récupéré.

L'analyse par EDX montre que les particules sombres sont des particules de SiO_2 et la majorité est de Al_2O_3 et quelques composés comme ZnO distribués dans la matrice ou sur les joints de grains (Fig. 18).

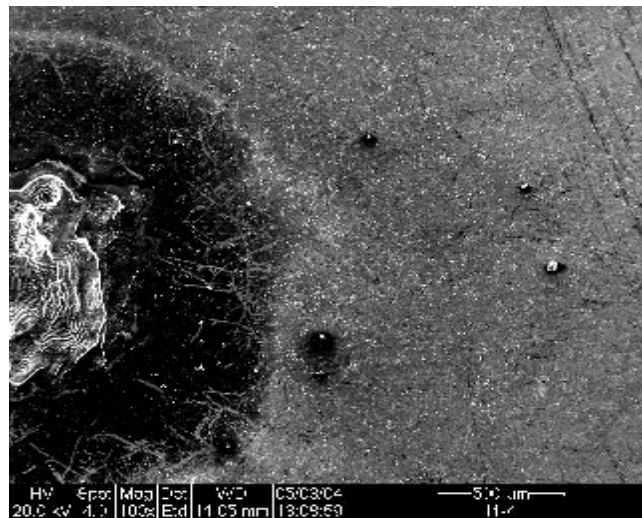
1.2. Observations en MEB après l'irradiation laser

Laser Nd:Yag

En ce qui concerne la zone irradiée, les observations en MEB montrent qu'elle est composée de trois zones (fig.19) :

- La première zone est un petit trou, sa profondeur dépend de l'énergie du laser et du nombre des impulsions. Ce trou est dû à l'évaporation et/ou au phénomène d'ablation.
- La deuxième zone est la zone fondue.
- La troisième zone est la zone chauffée (zone affectée thermiquement)

(a)



(b)

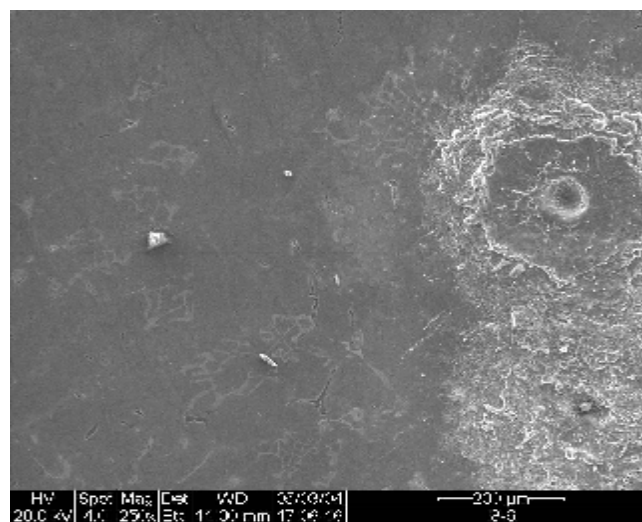


Fig. 19. Image MEB de l'aluminium industriel (a) et récupéré (b) après l'irradiation laser, n = 90 tirs.

1.3. Influence des paramètres laser

Parmi les paramètres du laser entrant en jeu dans l'interaction laser- métal et dans les changements associés : l'énergie, la taille du faisceau, la durée de l'impulsion et le nombre de tirs appliqués, sont des paramètres critiques.

1.3.1. laser Nd:Yag:

Les observations en MEB de l'aluminium récupéré montrent que l'augmentation du nombre de tirs ou bien d'énergie permet d'élargir la taille de la zone irradiée (fig. 20) par laser ZAL (zone affectée par laser) c'est-à-dire élargir les tailles de trois zones nommées précédemment (§ 1.2.). Même observation pour l'aluminium industriel; l'augmentation du nombre de tirs de 10 à 40 tirs (fig. 21) permet de doubler la surface de la première zone (la zone centrale sous forme d'un trou). Le diamètre de la zone irradiée peut atteindre quelques micromètres.

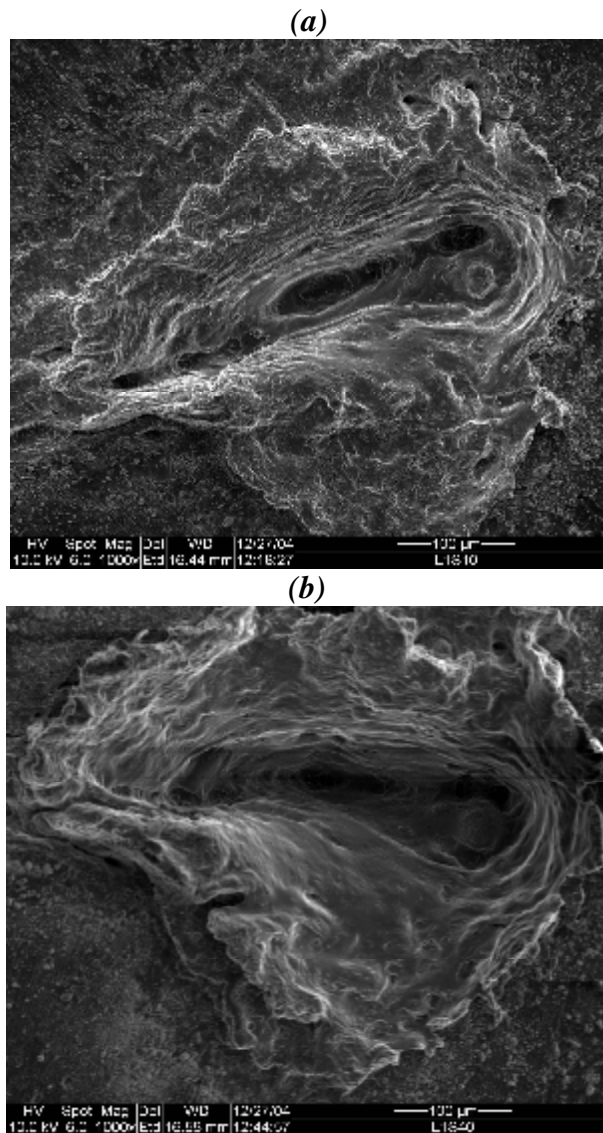
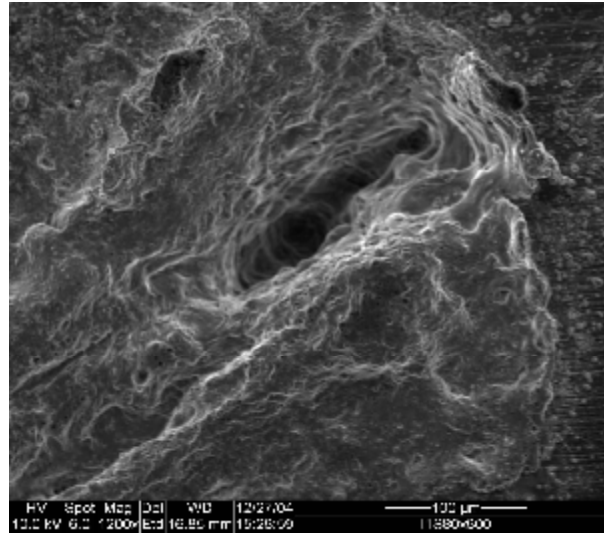


Fig. 20. Observation MEB de l'aluminium récupéré irradié, n = 10 tirs (a) et n = 40 tirs (b).

En pratique, dans la cavité laser, il existe une compétition entre les différents modes transverses et longitudinaux. En général, le nombre de modes transverses oscillants dans la cavité est supérieur à un, c'est pour ça que la forme de la tache n'est pas uniforme [10].

(a)



(b)

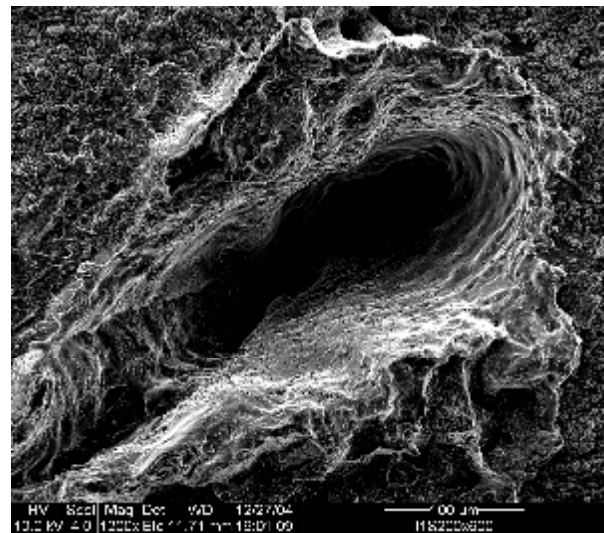


Fig. 21. Image MEB de l'aluminium industriel irradié, n = 80 tirs (a) et n = 200 tirs (b).

La forme de la tache n'est pas circulaire c'est probablement à cause du faisceau laser non homogène [85], car en littérature l'homogénéisation du faisceau laser ne peut être obtenue que au plan focal [86]. La forme de la tache est aussi n'est pas uniforme à cause de la position de l'échantillon car lorsque ce dernier est oblique ou n'est pas plan, l'angle d'incidence du faisceau laser sera différente de 0° , alors la forme de la zone irradiée (la tache) tend vers une ellipse [85]

Les mécanismes produits lors de l'interaction laser –aluminium sont très difficiles à comprendre [87], parce que l'interaction entre des impulsions très courtes (de l'ordre de nanoseconde) et une matière complexe (composé de plus de six éléments) est très complexe et les effets d'irradiation peuvent être influencés par les propriétés de la matière et les conditions de l'entourage [88, 89]

1.3.2. Laser CO₂

A partir des photos MEB (fig. 22) on observe bien que le laser CO₂ et à cause de son faible énergie (puissance maximale égale 25 Watt) n'a aucun effet sur les deux alliages d'aluminium, on observe uniquement un brûlure de la surface à cause de la chaleur produite par le faisceau laser.

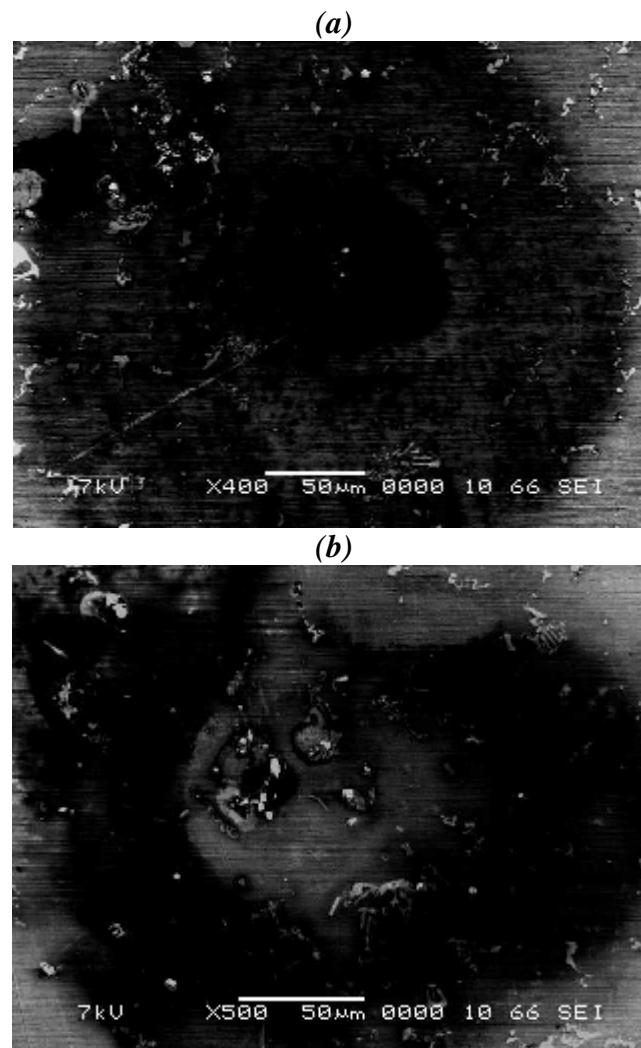


Fig. 22. Observation MEB de l'aluminium récupéré irradié par laser CO₂, pour 20 Watt (a) et 25 Watt (b).

1. 3. 3. Laser excimère

Pour le laser excimère; la tache est sous forme d'un ensemble de bâtonnets qui se rassemblent pour former une ellipse comme le montrent les figures 23 et 24. On va voir l'influence de l'énergie du faisceau laser sur la surface de la zone irradiée. La forme de la zone irradiée par laser excimère dépend de la distance entre l'échantillon et le plan focale, elle dépend aussi de l'angle d'incidence du faisceau laser [85]. Dans notre étude la forme de la tache est approximativement sous forme d'un ensemble de petits carrés. Ce qui montre une distribution non uniformément de la lumière sur la surface de l'échantillon [85].

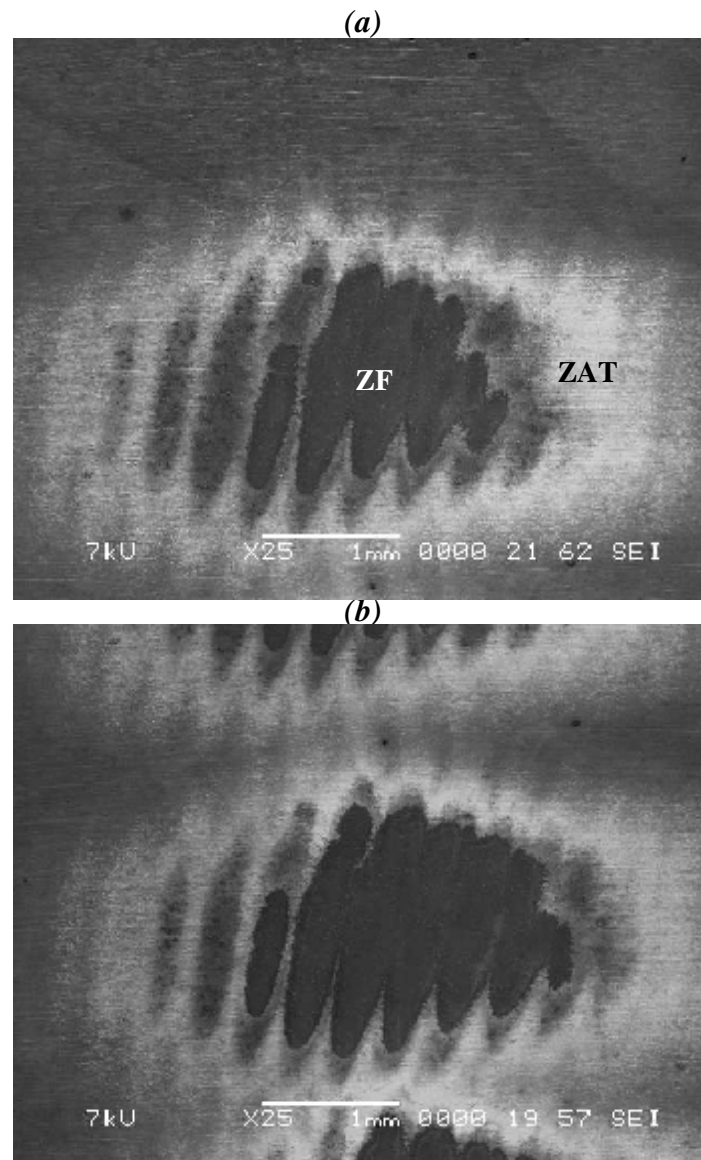


Fig. 23. Image MEB de l'aluminium industriel irradié par laser excimère, E= 90 mJ (a) et E=120 mJ (b).

A partir de la figure 23 (a et b) on observe que la surface de la zone irradiée par un faisceau laser excimère de 90 mJ est plus petite que celle pour l'énergie 120 mJ , soit par comparaison de la zone fusionnée (ZF) ou bien par comparaison de la zone affectée thermiquement (ZAT).

Même observation pour la figure 24 (a et b) pour les deux valeurs d'énergie du faisceau laser 150 mJ et 200 mJ, alors on peut conclure que l'augmentation de l'énergie du faisceau laser permet d'élargir la taille de la tache. On note aussi que le diamètre des taches observées est de quelques millimètres.

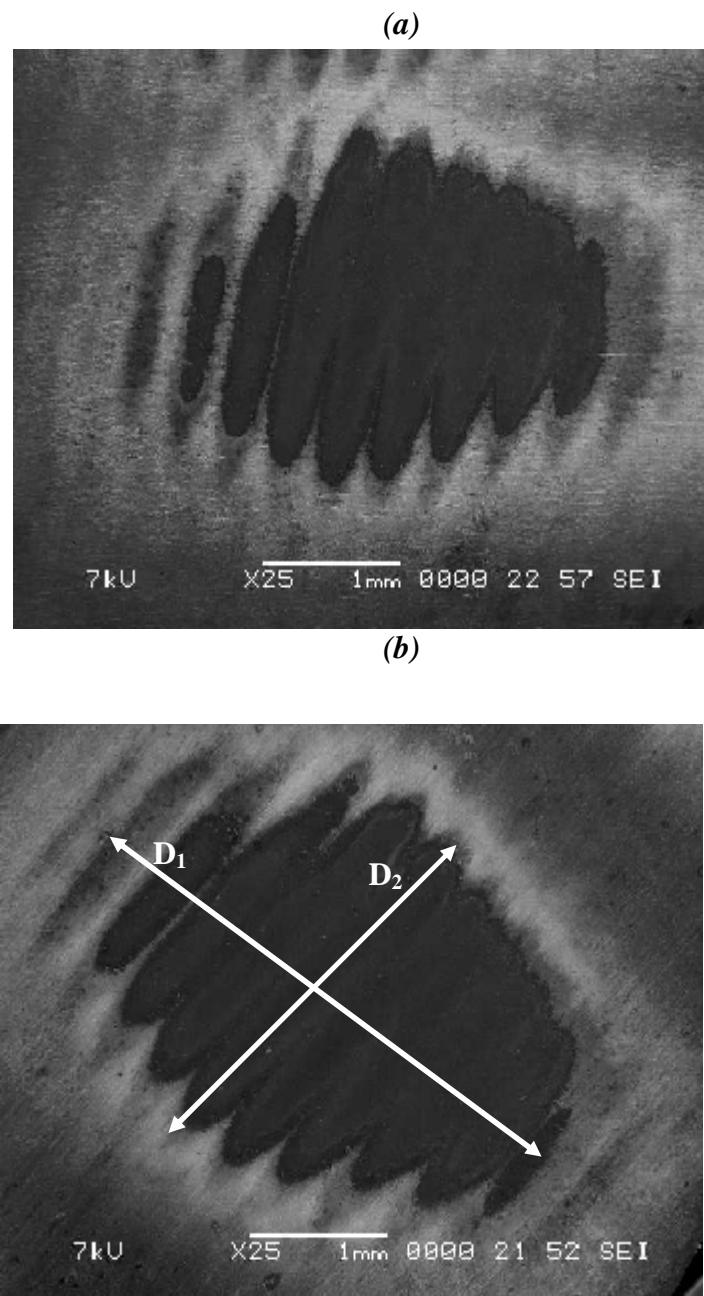


Fig. 24. Image MEB de l'aluminium industriel irradié, E= 150 mJ (a) et E= 200 mJ (b).

1.4. Variation du diamètre de la tache en fonction de l'énergie du laser

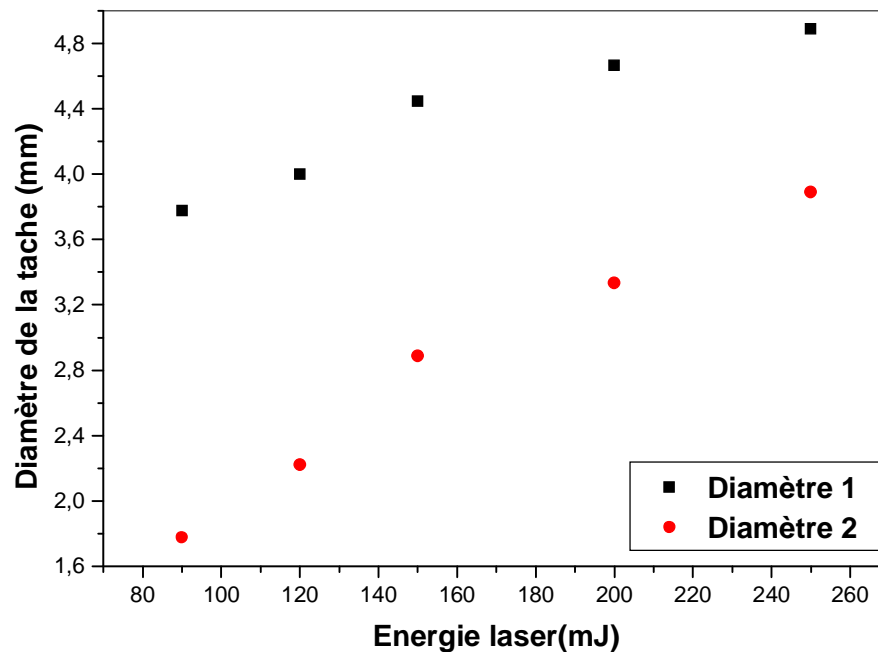


Fig. 25. Evolution des diamètres de la tache en fonction de l'énergie du faisceau laser excimère.

A partir des graphes montrés sur la figure 25, on observe que la relation entre le diamètre de la tache et l'énergie de l'impulsion laser est presque linéaire, ce qui est observé aussi à partir des micrographies qui montrent que la surface traitée par laser devient plus élargie avec l'augmentation de l'énergie.

1. 5. Evolution microstructurale de la zone irradiée

1. 5. 1. Laser Nd:Yag

Par l'utilisation des grossissements élevés on va voir dans la partie suivante l'évolution microstructurales de la zone irradiée par laser.

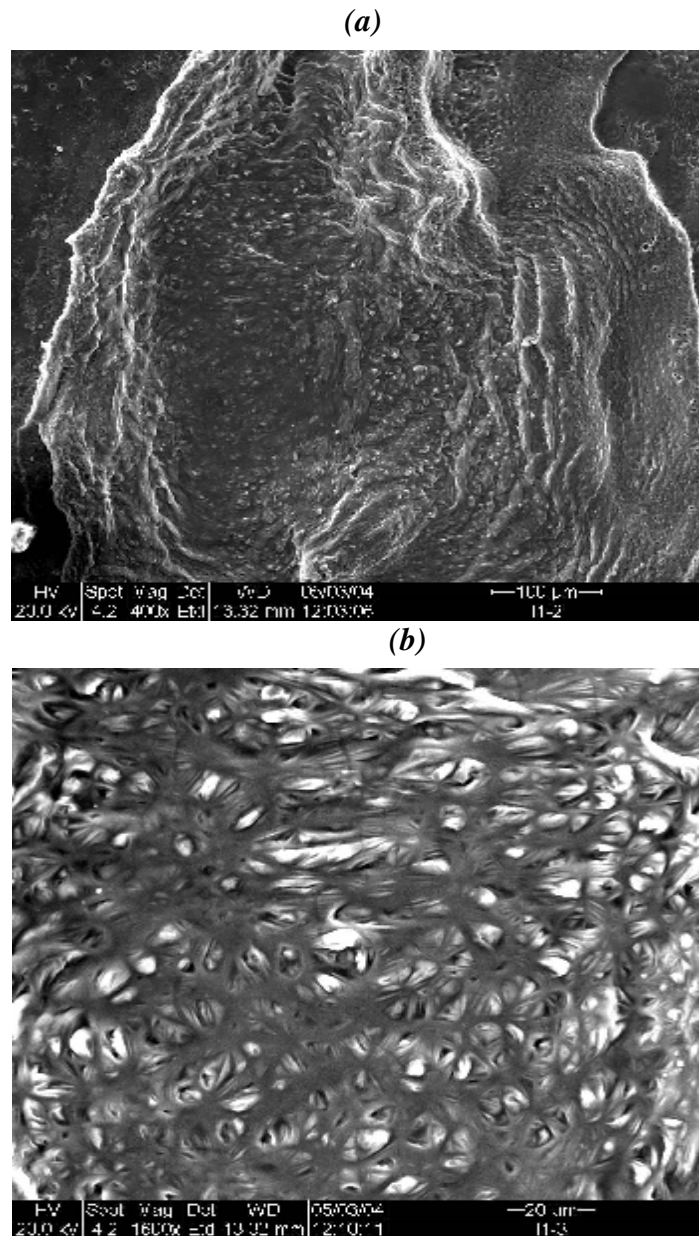


Fig. 26. Microstructure de la zone irradiée dans l'aluminium industriel, n =90 tirs.

Pour bien montrer les modifications microstructurales de la zone irradiée, une analyse d'une surface par des grossissements élevés a été faite. A partir des figures 26 et 27 on observe que la zone irradiée présente une structure fine pleine de deux types de précipités suivant les éléments alliés (Mg, Si, Cu.), pour former les précipités Mg_2Si [90]. Ce type de précipités est observé dans la zone fusionnée.

La forte concentration de l'énergie autorise des temps d'interaction très brefs, qui limitent l'étendue des zones affectées thermiquement et engendrent des microstructures très fines, induites par des solidifications rapides.

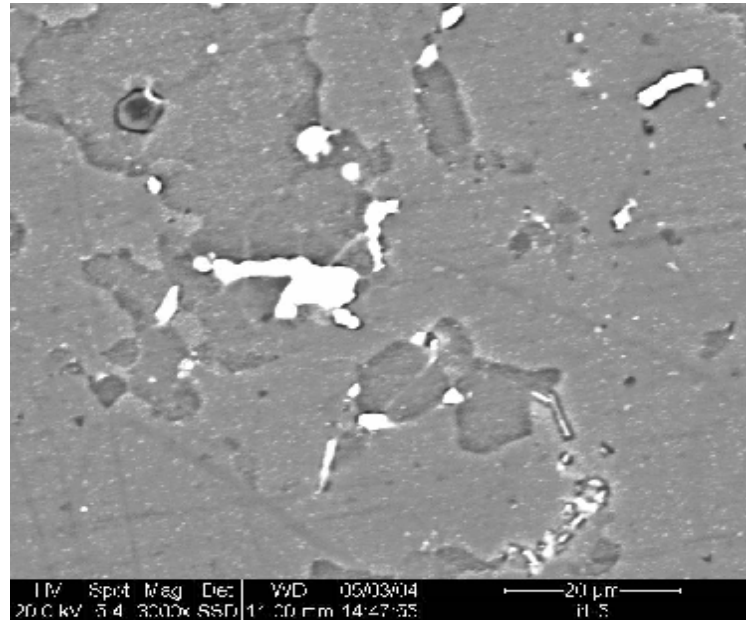


Fig. 27. Précipités formés dans la zone irradiée dans l'aluminium industriel, n=90tirs.

On peut noter aussi que la microstructure de la zone irradiée (Fig. 26) montre une structure homogène. Cela est évidemment le résultat de la distribution des particules formées lors de l'élévation de température produite par l'énergie laser.

La figure 27 montre des zones blanches qui sont probablement des zones riches en cuivre, elles prennent place comme des films continus sur les joints de grains et se précipitent à l'intérieur des grains. Ces précipités sont probablement de la phase Al_2Cu [91, 92]. Mais la majorité de la zone irradiée est de Al_2O_3 avec quelques ségrégations des composites comme SiO_2 .

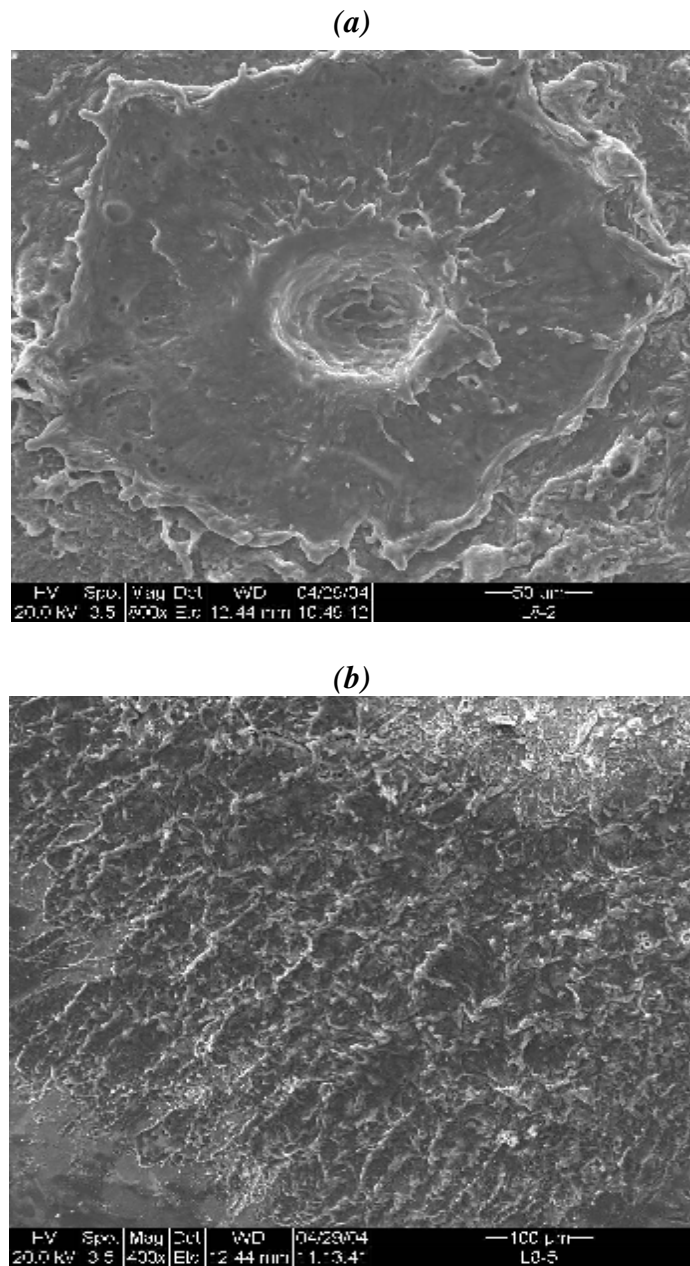


Fig.28. Microstructure de la zone irradiée dans l'aluminium récupéré, n =90 tirs.

Alors, on peut conclure que les phénomènes des fusions et vaporisation peuvent être observés par la présence du métal fusionné autour des cavités [84], bien qu'il ne soit pas facile de distinguer une transition claire entre ces phénomènes.

Cependant, les conditions de la surface réelle et à cause d'une variation des défauts de la surface comme les inclusions, les petits pores, les contaminants, les oxydes et autres hétérogénéités structurales existent toujours. Généralement ces défauts présentent une sensibilité à l'irradiation laser dans la majorité de la matrice à cause de leurs propriétés différentes. Pendant l'irradiation laser, l'ablation locale est prévue de prendre place préférentiellement sur les défauts de surface.

Les caractéristiques de l'endommagement résultant des impulsions ultracourtes ont donné lieu à de nombreuses interprétations sur la nature de l'éjection de matière. Les interprétations basées sur la dynamique moléculaire autorisent et définissent le processus d'ablation de deux côtés [93-99]. L'ablation semble principalement être due à la vaporisation d'une part, et à la nucléation homogène ou à la fragmentation dans le liquide d'autre part. Ces mécanismes ont lieu lors de la transition de phase solide au liquide ou au plasma.

1. 5. 2. Laser Excimère

Pour bien montrer la microstructure de la zone irradiée on utilise un grossissement élevé, on observe des rassemblements de forme circulaire (fig. 29b) entourés par un grand nombre de trous. Quelque soit l'origine de ces derniers, tous les trous ont la forme de boucle dépréciée de quelques micromètres d'épaisseur (fig. 30b). La matière fondue semble être éjectée sous une pression hydrodynamique et apparaissent sous forme de petites particules qui seront débarquées sur la surface plus tard.

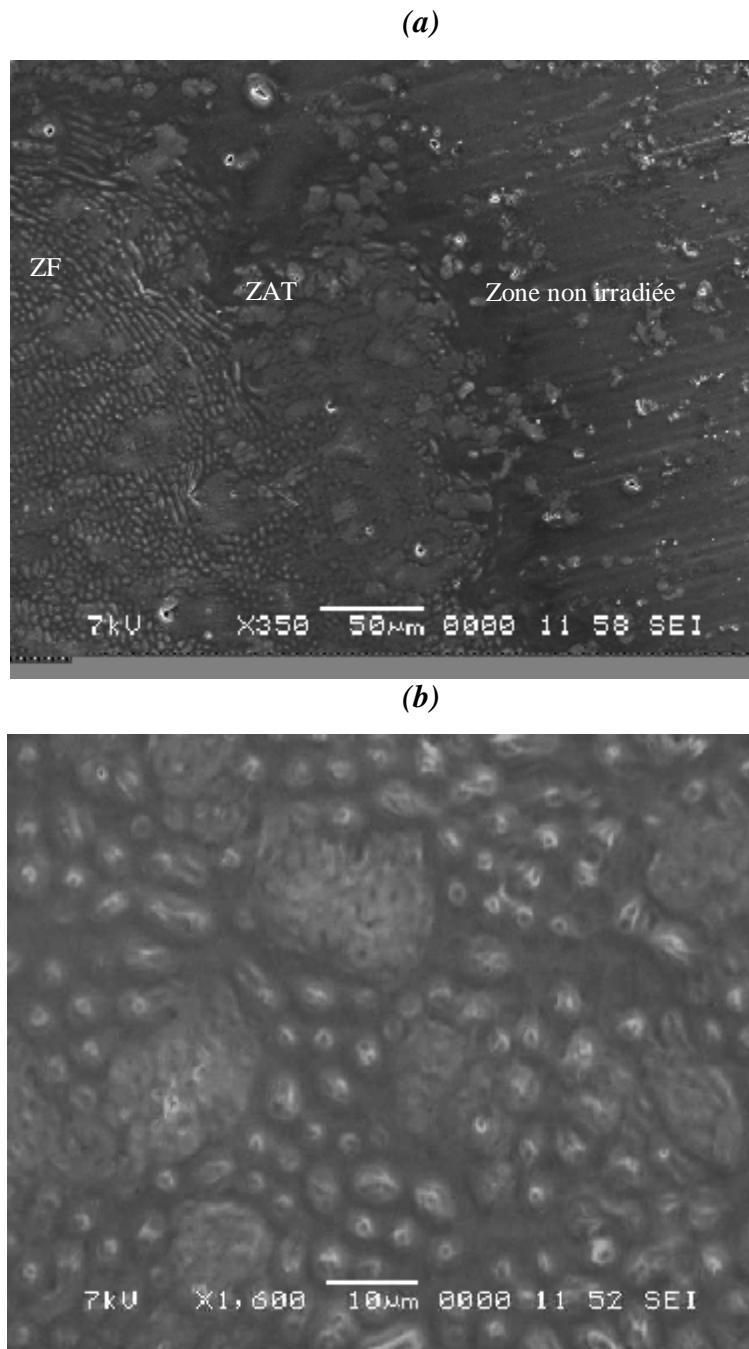
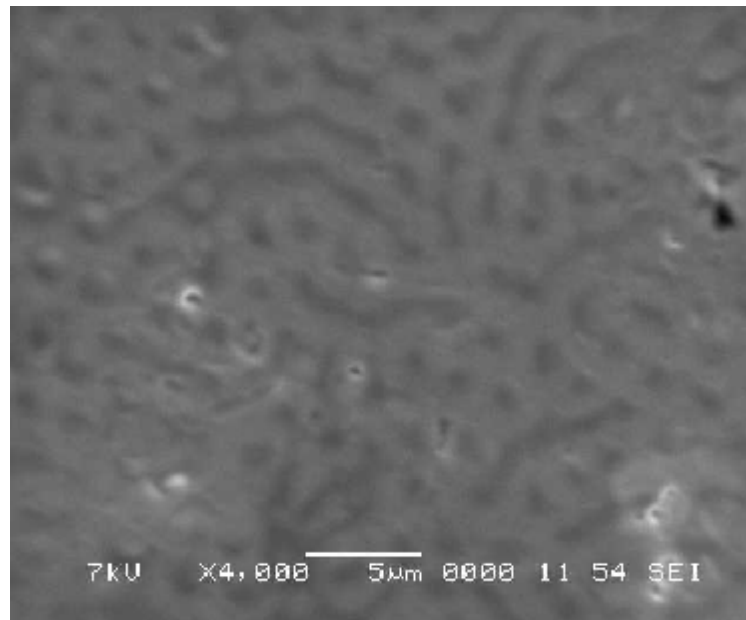


Fig. 29. Les limites de la zone irradiée par laser excimère (a) et sa microstructure (b).

(a)



(b)

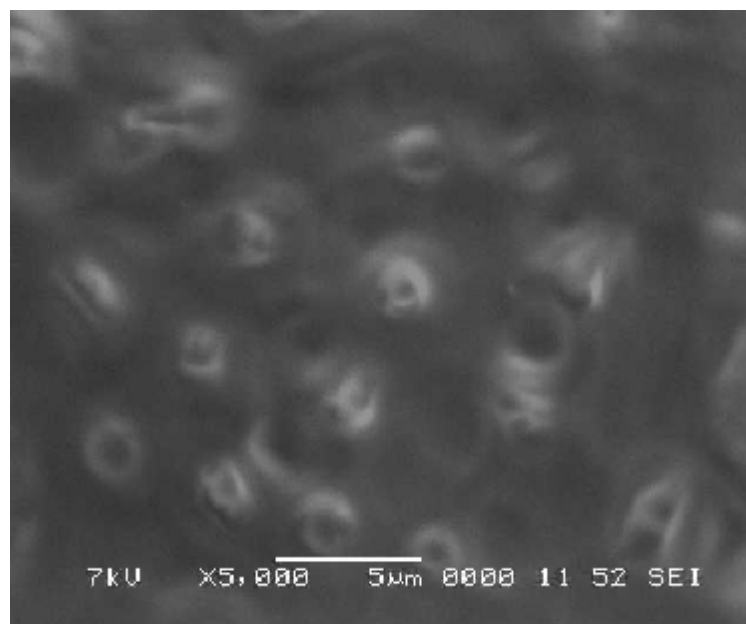
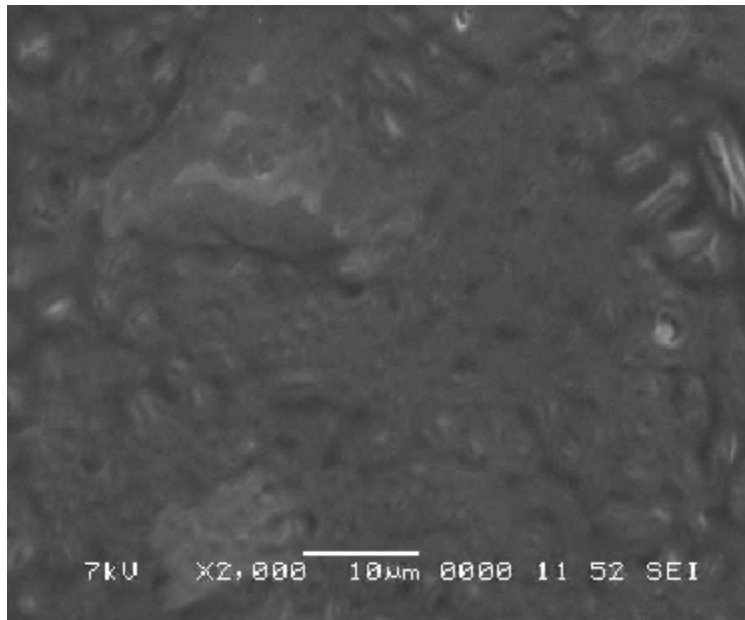


Fig. 30. Microstructure de la zone irradiée par laser excimère dans l'aluminium industriel,
E =90 mJ.

Par comparaison entre les deux figures 30 (b) et 31 (b), on note que l'augmentation de l'énergie du faisceau laser (qui est équivalent à l'augmentation du nombre de tirs dans le laser Nd:Yag)

permet d'homogénéiser la structure de la zone affectée par laser. Cependant, cette amélioration ne réagit pas à l'interface où l'hétérogénéité est toujours existante.

(a)



(b)

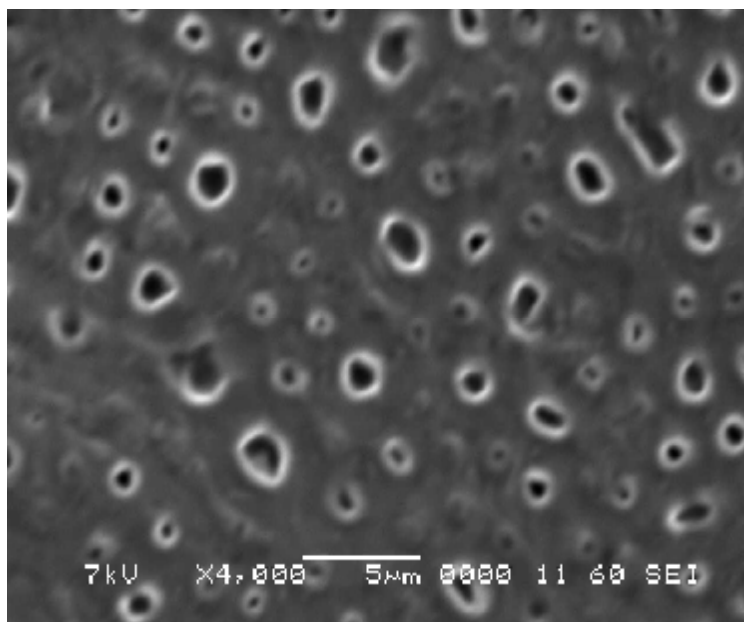


Fig. 31. Microstructure de la zone irradiée dans l'aluminium industriel par un faisceau laser excimère d'énergie $E = 120$ mJ

- La présence des porcs dans la zone irradiée par laser excimère est probablement à cause de la présence de l'hydrogène, Car à la température de fusion, la solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium liquide est très élevée (0.036 ml/100 g du métal) [90].

2. INFLUENCE DE LA DISTANCE DE DEFOCALISATION

La distance de l'échantillon du plan de focalisation du faisceau laser est un paramètre permettant de jouer sur la dimension de la surface irradiée. Dans notre étude six distances de défocalisation ont été utilisées [100].

2. 1. Influence sur les dimensions de la tache

Les figures suivantes (Fig.32-37) montrent les taches obtenues pour différentes distances de défocalisation, on observe que pour le même nombre de tirs ; la surface de la tache pour une faible distance de défocalisation on obtient une large distance de la tache et une faible profondeur de la matière éjectée. Par exemple la figure (32 et 33) montre la tache obtenue pour 80 tirs pour les distances de défocalisation d_2 et d_4 respectivement ($d_{\text{déf}}$ est la distance de défocalisation tel que $d_1 < d_2 < d_3 < d_4 < d_5$ et $d_{\text{déf}}$ varie entre 3 et 15 cm)

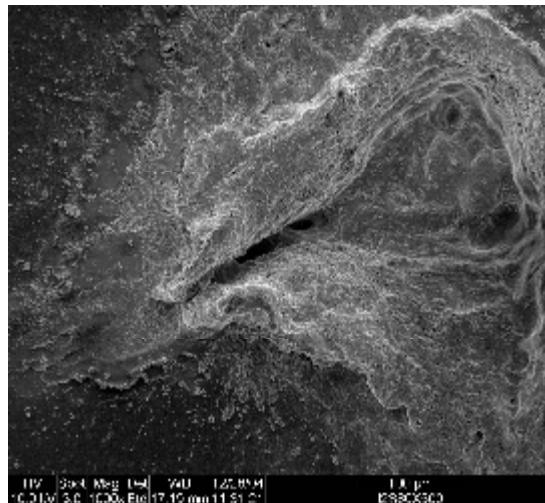


Fig. 32. Image MEB de l'aluminium industriel après l'irradiation laser, n = 80 tirs,

$$d_{\text{déf}} = d_2.$$

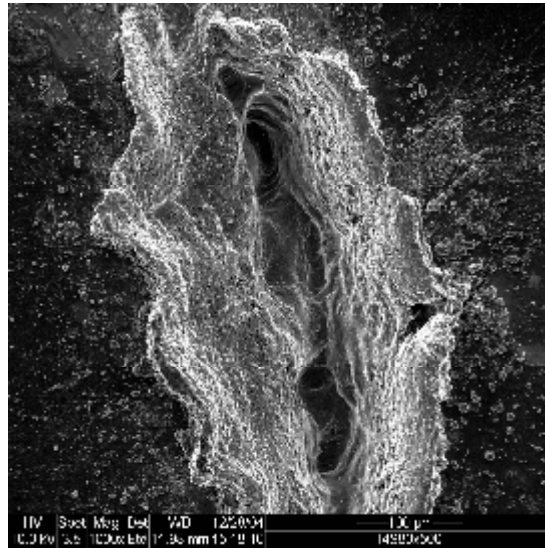


Fig. 33. Image MEB de l'aluminium industriel après l'irradiation laser, $n = 80$ tirs,
 $d_{\text{déf}} = d_4$.

Par l'augmentation du nombre de tirs à 120 et pour les mêmes distances de défocalisation on obtient des taches avec des surfaces presque les mêmes avec des profondeurs de la matière éjectée plus élevées (tableaux 12 et 13).

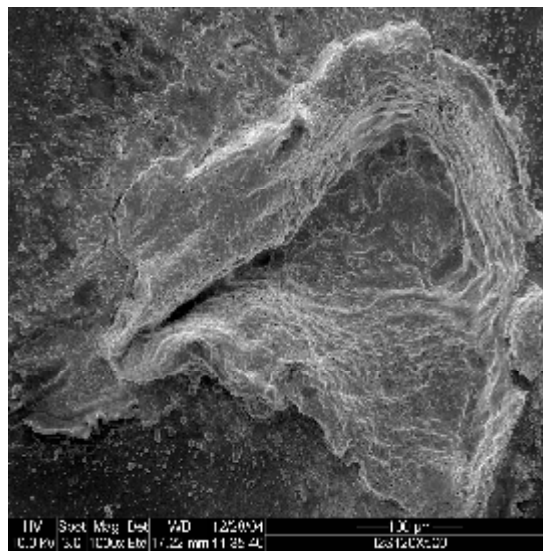


Fig. 34. Image MEB de l'aluminium industriel après l'irradiation laser, $n = 120$ tirs,
 $d_{\text{déf}} = d_2$.

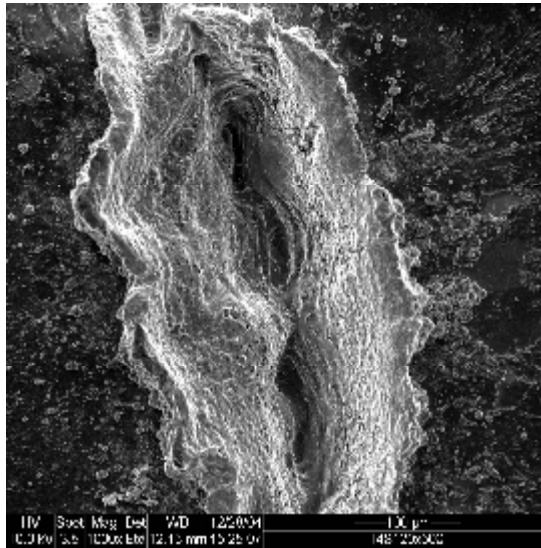


Fig. 35. Image MEB de l'aluminium industriel après l'irradiation laser, $n = 120$ tirs,
 $d_{\text{def}} = d_4$.

Vers les distances de défocalisation un peu élevée ($\geq d_2$), on observe la présence de petites particules de la matière fusionnée redéposées à l'extérieur de la zone irradiée (fig. 32-35).

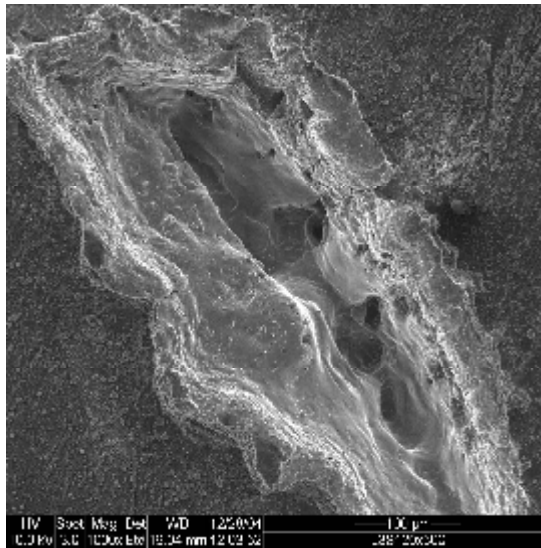


Fig. 36. Image MEB de l'aluminium industriel après l'irradiation laser, $n = 120$ tirs,
 $d_{\text{def}} = d_3$.

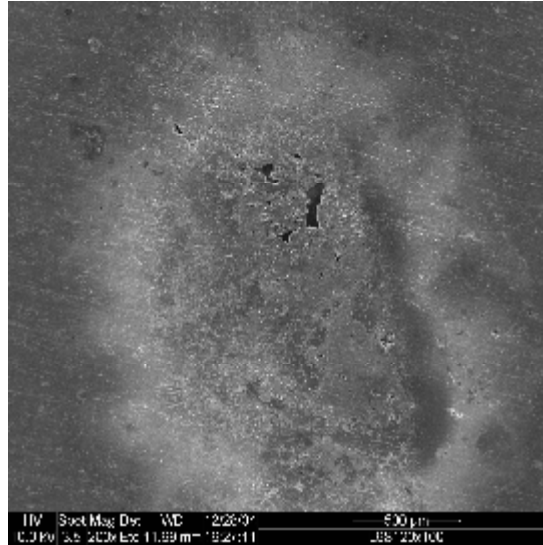


Fig. 37. Image MEB de l'aluminium récupéré après l'irradiation laser, $n = 80$ tirs,
 $d_{\text{déf}} = d_6$.

On note que pour une distance de défocalisation faible on obtient une surface irradiée large mais sans obtenir un trou (absence de la partie fusionnée car le faisceau laser est non focalisé; alors l'élévation de température conduite seulement à un chauffage qui produite des fissures sur la surface irradiée (fig. 37 et 38)

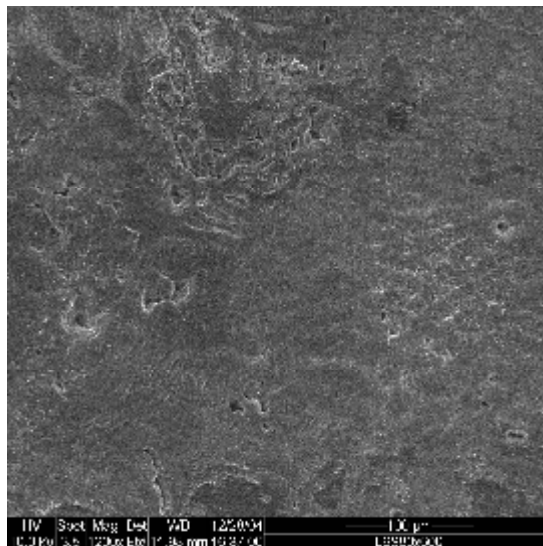


Fig. 38. Image MEB de l'aluminium récupéré après l'irradiation laser, $n = 80$ tirs,
 $D_{\text{déf}} = d_6$.

3. EFFICACITÉ DE L'ABLATION

Les dommages produits par un faisceau laser irradiant un échantillon métallique font l'objet de nombreuses publications dédiées et de conférences organisées régulièrement. Les diverses formes d'éjection de la surface du matériau se regroupent sous le terme d'ablation [20]. Il comprend plusieurs phénomènes tels que l'évaporation, la nucléation, la fracture solide voire même l'émission d'électrons [101]. Les mesures d'ablation présentent un net avantage par rapport aux autres mesures accessibles pour déterminer les causes de l'endommagement. Ainsi, l'observation des dommages produits sur l'échantillon constitue un bon moyen de recueillir des indices sur les mécanismes de formation d'un cratère [101]. En particulier, l'analyse de la profondeur d'ablation est une première source utile d'informations qui dévoile la nature de l'interaction laser-matière et ses conséquences sur l'évolution des propriétés de la cible [101].

Dans la partie suivante, nous allons présenter les résultats d'ablation obtenus par un laser Nd :Yag nanoseconde

3.1. Influence de l'énergie et de la taille du faisceau

L'énergie de l'impulsion et la taille du faisceau sont regroupées en un paramètre : la fluence ($J\ cm^{-2}$). Trois régimes d'interaction sont généralement décrits selon la fluence appliquée :

- Un régime de faible fluence, pour lequel il n'y a pas d'ablation significative. Dans ce régime, l'énergie apportée par l'impulsion n'est pas suffisante pour éjecter de la matière.
- Un régime de fluence intermédiaire, pour lequel l'ablation devient efficace. Dans cette gamme de fluences, il est possible de mesurer macroscopiquement un volume ablaté.
- Un régime de haute fluence, caractérisé par la présence d'un plasma dense. Celui-ci va absorber une partie du faisceau, et réduire ainsi l'efficacité de l'ablation.

Dans notre travail on a utilisé un régime de fluence intermédiaire (laser Nd:Yag nanoseconde) et on va voir donc l'influence du flux sur la profondeur de la zone irradiée ou bien la profondeur d'ablation.

3. 1. 1 La fluence seuil d'ablation

Par définition, la fluence seuil d'ablation (F_s) correspond à la fluence déposée dans le matériau à partir de laquelle une ablation significative est obtenue [79, 101]. Cette fluence seuil dépend du matériau et des paramètres du laser [101]. La fluence seuil d'ablation peut être ramené à une température critique qu'il faut atteindre pour obtenir un régime d'ablation [28]. On la mesure expérimentalement en extrapolant l'évolution quasi-linéaire de la profondeur ablatée (ou bien la quantité de matière éjectée) en fonction de la fluence, pour des fluences faibles, jusqu'à la profondeur nulle. La fluence seuil est différente pour chacun des deux alliages étudiés. On souligne notamment que celle de l'aluminium récupéré est plus faible que celle de l'aluminium industriel (fig.39). Elle est vers 5 J cm^{-2} pour l'aluminium récupéré et vers 7 J cm^{-2} pour l'aluminium industriel

La fluence seuil d'ablation dans l'aluminium industriel est plus grande que dans l'aluminium récupéré est à cause de la faible conductivité thermique de l'aluminium récupéré par rapport à celle de l'aluminium industriel. Parce que lorsque le métal a une conductivité thermique élevée, l'énergie thermique se transporte rapidement dans l'échantillon, donc elle ne permet pas l'accumulation dans la zone irradiée, ce qui conduit à une faible profondeur d'ablation.

On observe assez rapidement une saturation de la profondeur ablatée en augmentant la fluence. Cette évolution peut être de la même manière pour les deux alliages, pour l'aluminium récupéré on passe de la fluence seuil ($F_s \sim 5 \text{ J cm}^{-2}$) à une saturation de la profondeur, qui est mesurée pour une fluence d'environ $F_{sat} \sim 15 \text{ J cm}^{-2}$. Pour l'aluminium industriel, la transition entre le régime d'augmentation de la profondeur ablatée et le régime de saturation est un peu plus lente, elle est dans la gamme 7 J cm^{-2} jusqu'à 20 J cm^{-2} .

Un comportement similaire est obtenu pour les deux alliages pour 40 impulsions : on observe à partir d'une certaine fluence (*fluence seuil*) une augmentation, moins rapide, de la profondeur ablatée. Une *saturation* de la profondeur des cratères est ensuite visible à partir d'une fluence presque la même pour 80 impulsions.

- La quantité de la matière ablatée a tendance à saturer pour les fortes fluences. Au niveau du coude de la courbe précédente, à environ 20 J cm^{-2} dans l'aluminium récupéré, une saturation de l'ablation est observée.
 - Plus la détente du matériau à sa surface libre est importante, plus le gaz « appuie » sur la couche liquide qui ne peut alors plus se détendre et reste confinée sur le métal solide. Le comportement de la courbe d'ablation est donc intimement lié à l'hydrodynamique du matériau.
-

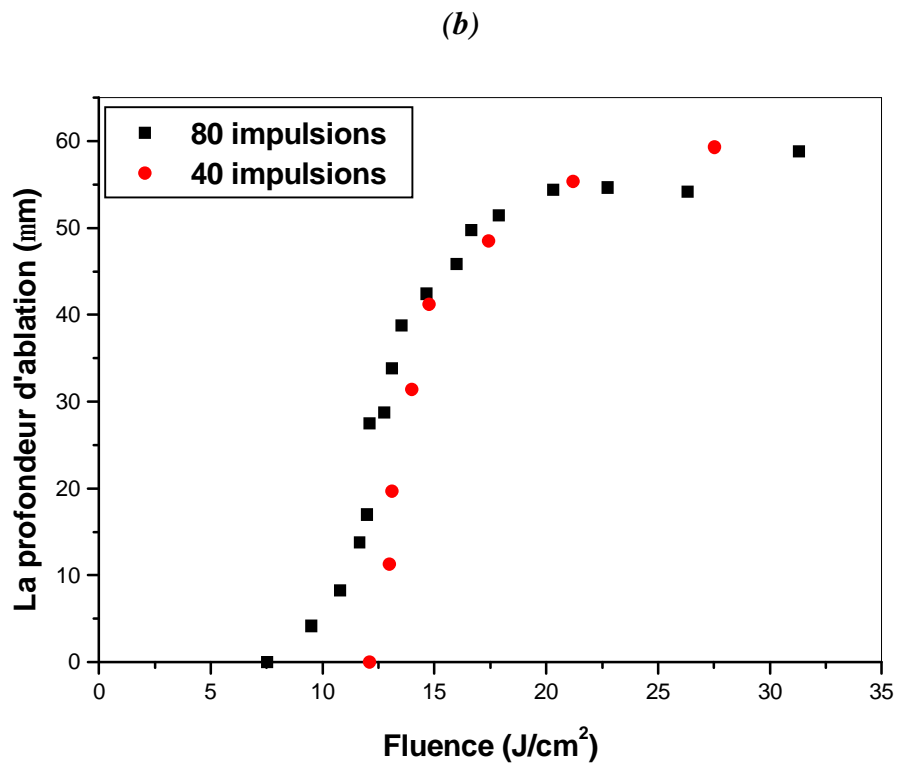
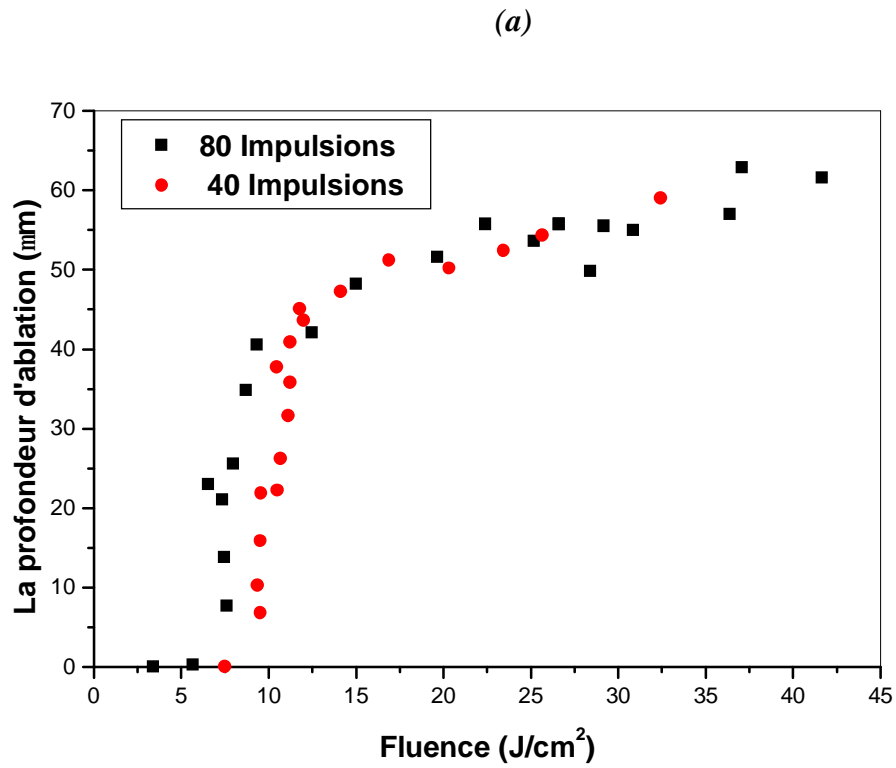


Fig. 39. Dépendance en fluence de la profondeur ablatée dans l'aluminium récupéré (a) et industriel (b) pour 80 impulsions et 40 impulsions.

Une conversion trop importante de l'énergie thermique en énergie cinétique n'est pas utile pour les processus d'ablation. Ainsi, pour les hautes fluences, une partie de l'énergie incidente est perdue dans l'expansion plasma ou bien absorbée par la matière éjectée. A l'inverse, pour les faibles fluences, il n'y a pas d'ablation en profondeur si le métal solide n'a pas reçu suffisamment d'énergie pour pouvoir se transformer en liquide. Nous remarquons que la fluence d'ablation optimale apparaît au niveau du coude de la courbe précédente, à environ 20 J cm^{-2} dans l'aluminium récupéré. Ce point correspond à un comportement critique de l'hydrodynamique du système pour lequel l'efficacité d'ablation est maximale. Nous préconisons donc que l'utilisation d'impulsions laser à cette fluence permet d'optimiser l'ablation du matériau [98].

Alors on peut conclure qu'à partir du choix de la fluence appliquée, on peut arriver aux résultats désirés c'est-à-dire la connaissance de la fluence seuil d'ablation permet de choisir d'une part des fluences inférieures à la fluence seuil d'ablation pour les traitements de surfaces (durcissement, revêtement, formation d'un alliage ou d'un composite superficiel.....) et d'autre part des fluences supérieures à la fluence seuil d'ablation pour la découpe, le perçage, la gravure....

3. 1. 2. Interprétation du phénomène d'ablation

L'ablation peut être d'origine "photothermique" ou "photochimique", le processus photochimique est considéré comme un processus non thermique car l'enlèvement de la matière est causé par la casse directe de la bande atomique qui a absorbé l'énergie du faisceau laser. En contraste, l'énergie laser absorbée convertie en une énergie de vibration du réseau pour fusionner ou bien vaporiser la matière par un processus photothermique. Pour casser directement les liaisons atomiques, où l'intensité du faisceau laser devrait être supérieure au seuil d'ablation; qui dépend des propriétés de la matière irradiée et des paramètres du laser [102].

Dans notre travail, cas des alliages d'aluminium (métal) où le seuil d'ablation est un peu élevé, le processus gouvernant l'ablation est le processus photothermique. Alors les propriétés thermiques jouent un rôle important dans l'interprétation des résultats.

3.2. Influence du nombre de tirs

L'irradiation par laser conduit à la destruction de la surface des échantillons et la production des cratères. La caractérisation des reliefs de la surface a été faite par des analyses

profilométriques. On va étudier l'influence du nombre de tirs sur la profondeur de la matière éjectée.

La profondeur ablatée est, en général, une fonction linéaire du nombre de tirs appliqués. On peut cependant observer pour certains matériaux, la création de défauts et de centres absorbants tir à tir. Dans ce cas, les premiers tirs servent à créer les défauts, mais ne sont pas efficaces pour l'ablation [101-105]. On parle généralement de phénomène d'incubation dans le matériau.

Si le nombre de tirs devient important, et si la profondeur du cratère devient du même ordre de grandeur que le diamètre du faisceau, le transport de la matière éjectée en dehors du cratère peut devenir moins efficace, et un écrantage de la surface par les particules peut intervenir.

La Figure 40 présente la profondeur ablatée en fonction du nombre de tirs dans l'aluminium récupéré pour les fluences $F = 5.32 \text{ J cm}^{-2}$, $F = 7.82 \text{ J cm}^{-2}$, $F = 10.47 \text{ J cm}^{-2}$ et $F = 12.6 \text{ J cm}^{-2}$ et les fluences $F = 3.65 \text{ J cm}^{-2}$, $F = 4.16 \text{ J cm}^{-2}$ et $F = 6.23 \text{ J cm}^{-2}$ pour l'aluminium industriel. On observe que la profondeur ablatée est directement proportionnelle au nombre de tirs appliqués dans la gamme utilisée (entre 10 et 200 tirs). Le comportement pour un nombre de tirs inférieur n'a pas été étudié, afin de conserver une profondeur suffisante pour les mesures. Ces résultats sont représentatifs du comportement général obtenu pour toute la gamme de fluence, et pour une profondeur ablatée allant jusqu'à $80 \mu\text{m}$.

On souligne que, dans toute la gamme de profondeur étudiée (jusqu'à $80 \mu\text{m}$), les cratères conservent un profil spatial sous forme de la lettre V, dont les profils présentées dans la partie suivante (profilométrie).

A partir des données présentés sur les graphes (fig. 40), les profondeurs d'ablation pour les quatre fluences augmentent linéairement avec le nombre de tir, cette relation linéaire confirme les résultats obtenus par Kautek et al [106] où il a utilisé un faisceau laser focalisé pour irradier le baryum- l'aluminium et le verre. Il a trouvé que la linéarité est le résultat de la matière vaporisée. Il a trouvé aussi que pour les hautes fluences, l'énergie absorbée peut fondre la matière et chauffer les régions adjacentes, alors la répétition de tirs peut conduire à une grande profondeur d'ablation. Par contre pour les faibles fluences, il faut un grand nombre de tirs pour produire l'ablation car l'accumulation thermique est très lente.

Une corrélation mathématique entre la profondeur d'ablation et le nombre de tirs est obtenue, la figure montre que les courbes obtenues pour les quatre fluences passent par l'origine, c'est -à- dire que chaque tir a une fluence spécifique contribue également à la profondeur d'ablation [102].

Les pentes correspondantes aux fluences 3.65 J/cm^2 , 4.16 J/cm^2 , 6.23 J/cm^2 (Aluminium récupéré) et 5.82 J/cm^2 , 7.55 J/cm^2 , 10.47 J/cm^2 , 12.6 J/cm^2 (aluminium industriel) sont respectivement 0.39 , 0.50 , 0.80 (aluminium récupéré) et 0.29 , 0.36 , 0.42 , 0.42 (aluminium industriel) physiquement la pente représente la vitesse d'ablation (par tir) [102]. On observe que la vitesse d'ablation par tir augmente avec la fluence dans les deux alliages étudiés.

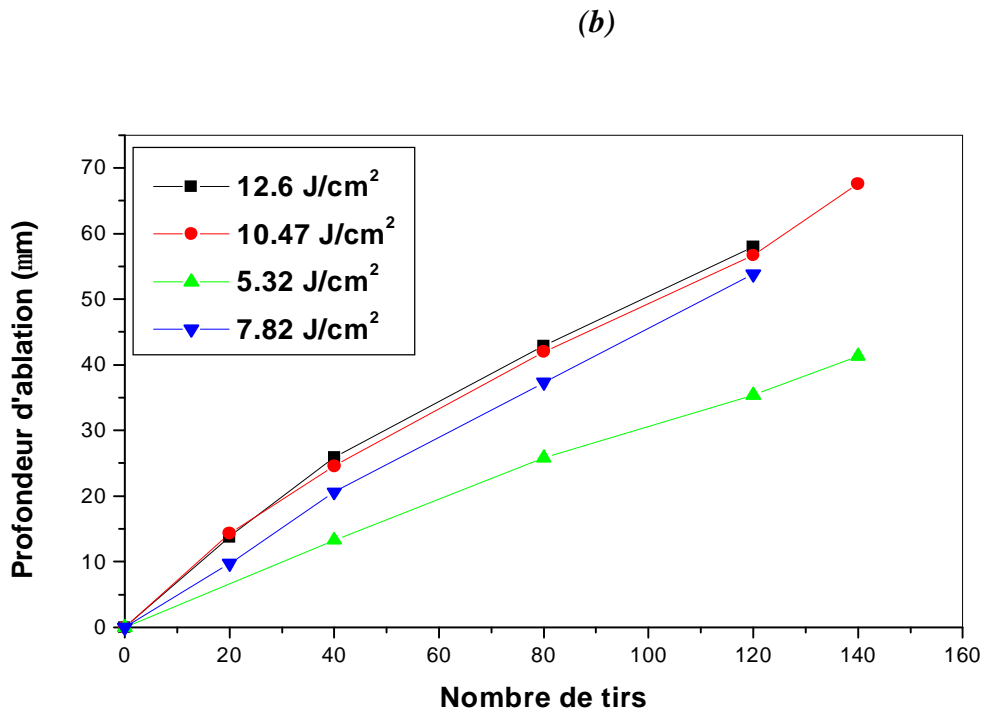
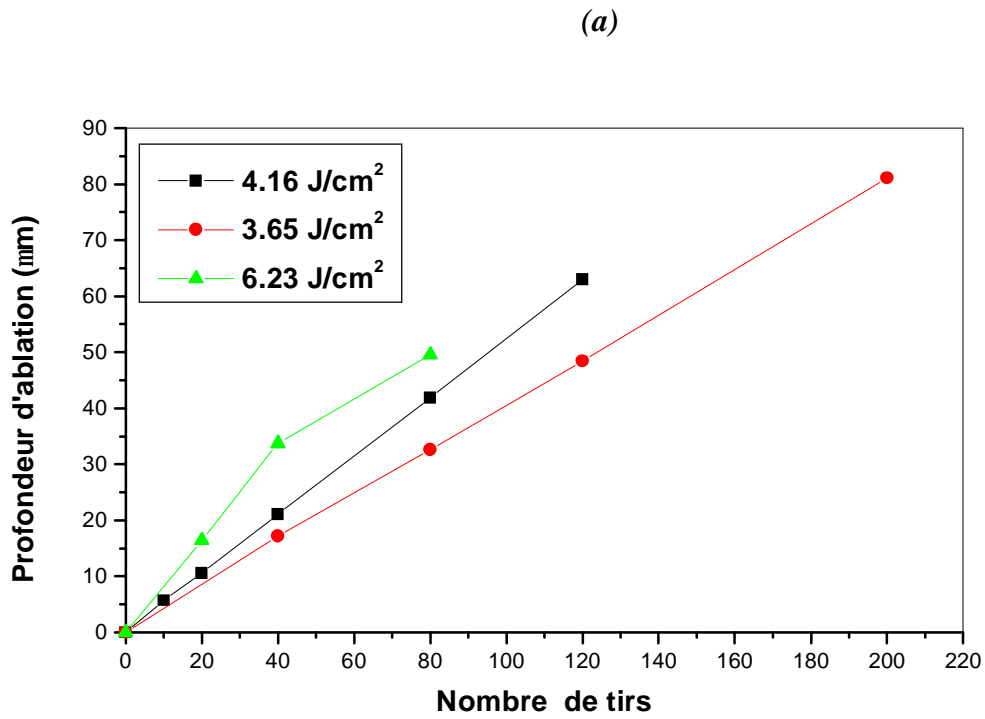


Fig.40. Profondeur ablatée en fonction du nombre de tirs dans l'aluminium industriel (a) et l'aluminium récupéré (b).

3. 3. Etude des cratères

La surface des échantillons est fortement altérée à la suite de l'interaction, et présente des caractéristiques différentes selon le nombre des impulsions. Bien que la mise en forme du faisceau permette d'obtenir des cratères macroscopiquement cylindriques ou en pavés, le fond du cratère n'est pas plan à l'échelle micrométrique. La rugosité du milieu augmente après l'interaction. Les Figures 41 et 42 présentent des profils caractéristiques des cratères pour les deux alliages étudiés, industriel et récupéré respectivement, et pour des nombres de tirs comprises entre 10 et 150. Le profil de la surface non ablatée possède une rugosité très faible ($\ll 1 \mu\text{m}$).

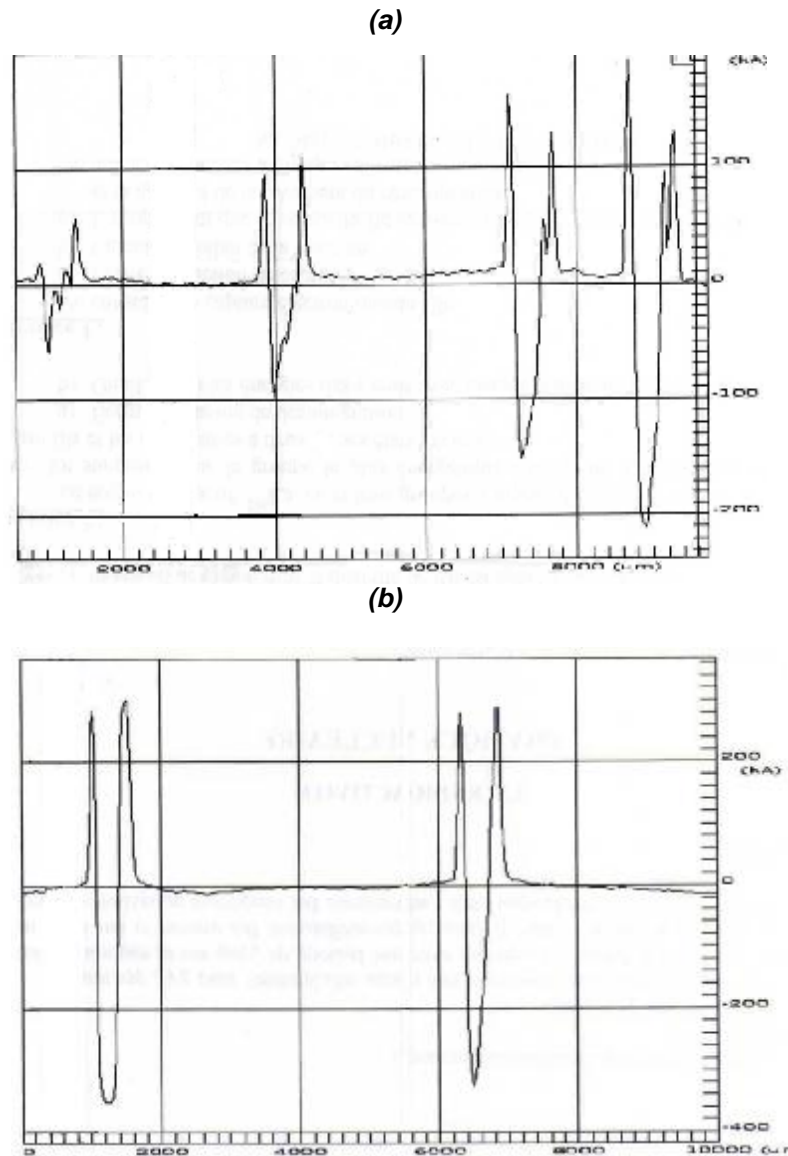
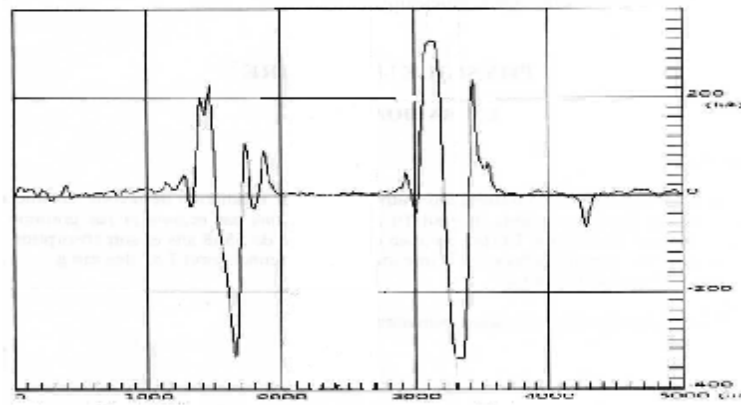


Fig. 41. Profile des cratères dans l'aluminium industriel pour 10, 30, 60, 90 tirs (a) et 150, 120 tirs (b) et le flux $F = 8.7 \text{ J/cm}^2$.

La figure 41 montre le profil des cratères obtenus par l'irradiation laser Nd:Yag de l'aluminium industriel pour les nombres de tirs 10, 30, 60, 90, 150 et 120 successivement .On observe que les dimensions des cratères (profondeur et diamètre) augmentent avec le nombre des impulsions, alors le volume des cratères augmente.

La profondeur du cratère augmente de 100 μm pour 30 tirs à 220 μm à 90 tirs et atteint sa valeur maximale 360 μm (mesure incomplète) pour 150 tirs. D'autre part on observe que les cratères ont une forme de lettre V et n'ont pas une forme cylindrique à cause de la forme du faisceau laser. Généralement la forme des cratères dépend du faisceau laser et des propriétés du matériau étudié.

(a)



(b)

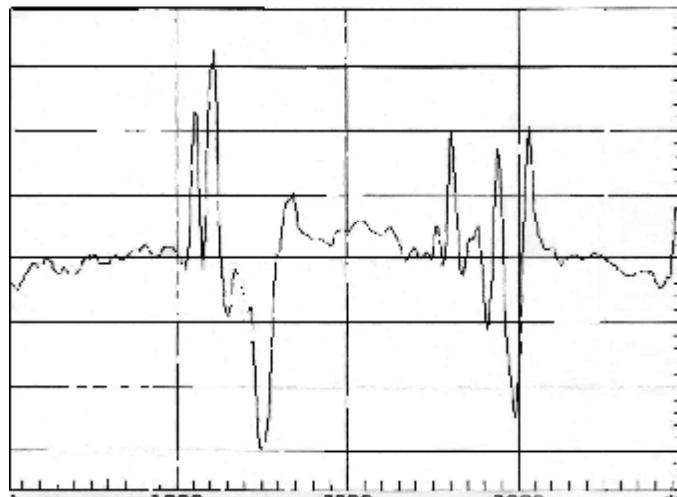


Fig.42. Profil des cratères dans l'aluminium récupéré pour 10, 30 tirs (a) 90, 60 tirs (b), le flux $F = 15.6 \text{ J/cm}^2$.

On observe aussi sur les profils la présence des pics à gauche et à droite du pic montrant la profondeur de l'ablation ces deux pics sont liés à la présence des rebords. La présence de rebords est, en général, associée à la présence d'une phase liquide, qui a été éjectée ou repoussée en dehors du cratère, et s'est redéposée et solidifiée sur les bords.

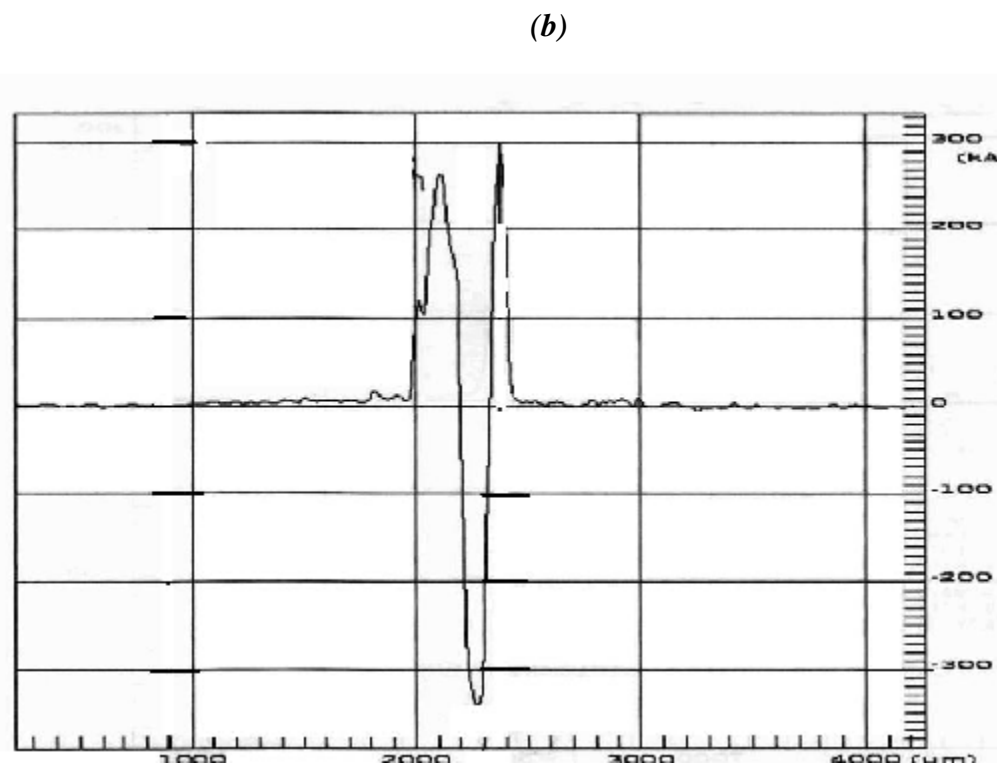
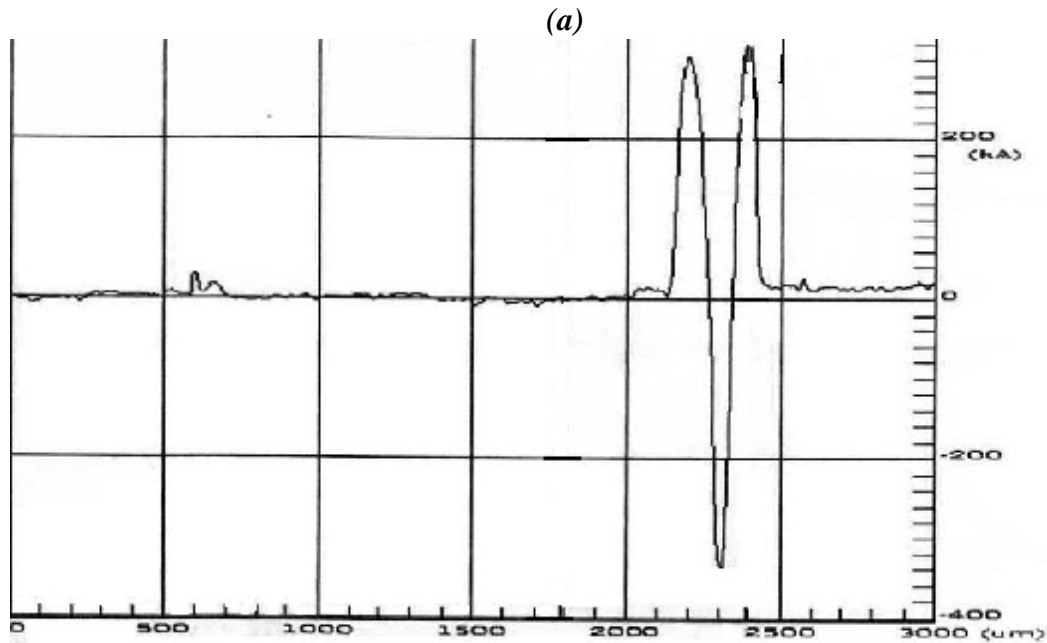


Fig.43. Profile des cratères dans l'aluminium récupéré irradié par laser Nd:Yag, $n = 80$ tirs et $d_{\text{def}} = d_5$ (a) et d_4 (b).

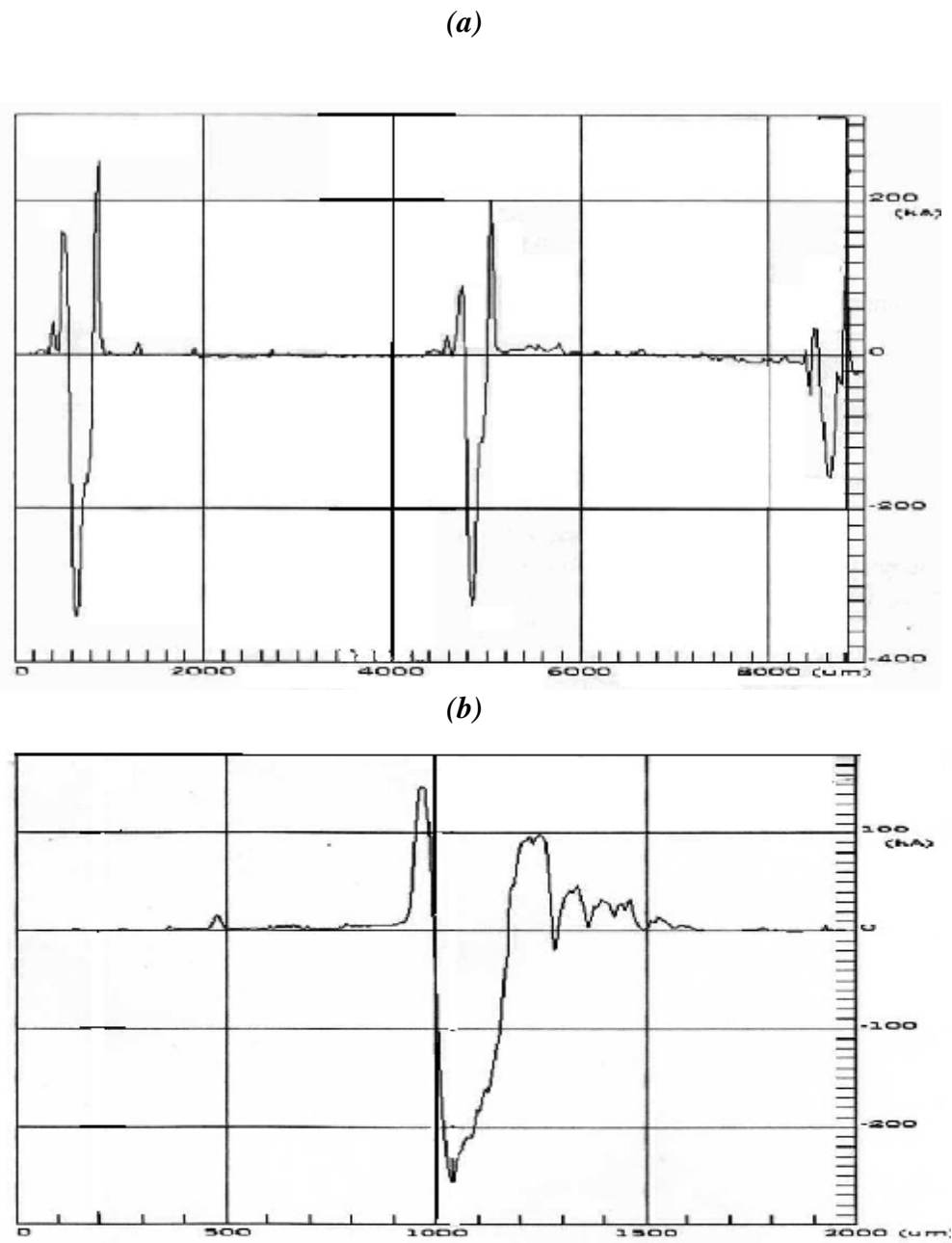


Fig.44. Profile des cratères dans l'aluminium récupéré irradié par laser Nd:Yag, $n = 10, 20, 40$ tirs et $d_{\text{déf}} = d_3$ (a) et $n = 20$ tirs et $d_{\text{déf}} = d_2$ (b).

Les cratères obtenus pour le même flux et pour différents nombres de tirs ont approximativement les mêmes surfaces mais des profondeurs différentes (Fig. 43 et 44).

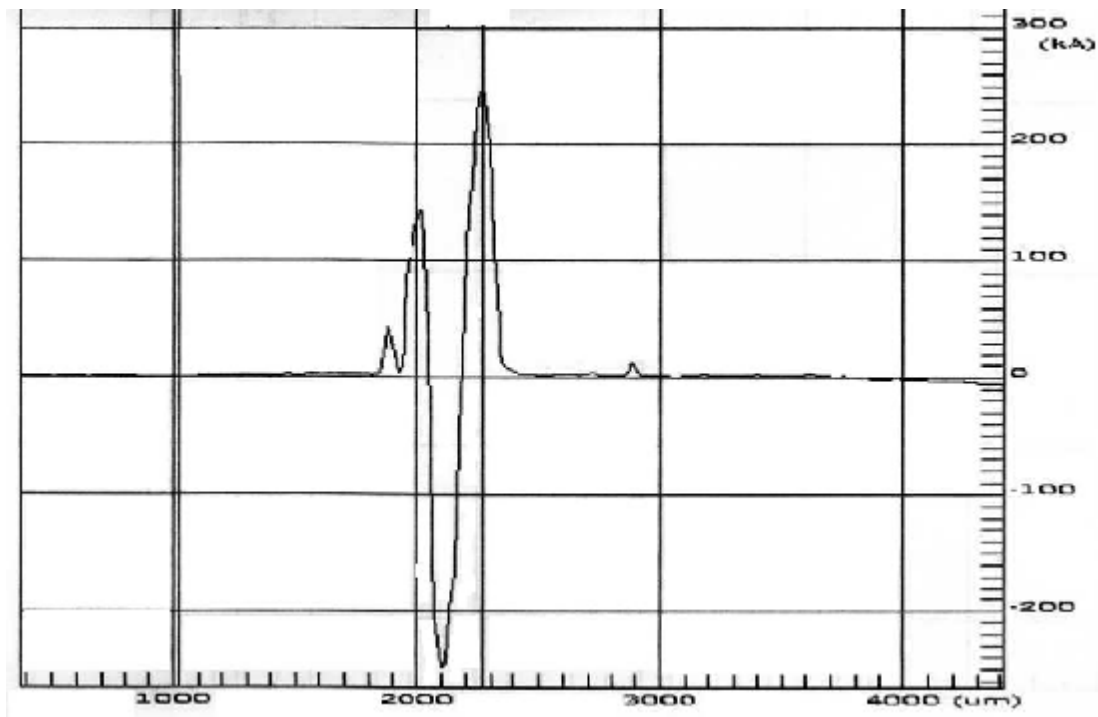


Fig.45. Profile des cratères dans l'aluminium récupéré irradié par laser Nd:Yag,
 $n = 40$ tirs et $d_{\text{déf}} = d_2$.

Les tableaux suivants résument la variation des dimensions des cratères en fonction de la distance de défocalisation pour les deux alliages irradiés (aluminium industriel et aluminium récupéré).

Tableau12 : variation des dimensions des cratères en fonction de la distance de défocalisation dans l'aluminium récupéré.

Distance de défocalisation (cm)	Surface (mm ²)	Nombre de tirs	Profondeur (A°)
d ₁	122187.5	40	4.58 10 ⁵
d ₁	120137	80	> 6.22 10 ⁵
d ₁	124675	120	> 6.30 10 ⁵
d ₃	131875	40	3.14 10 ⁵
d ₃	132500	80	5.76 10 ⁵

Tableau 13 : variations des dimensions des cratères en fonction de la distance de défocalisation dans l'aluminium industriel.

Distance de défocalisation (cm)	Surface (mm²)	Nombre de tirs	Profondeur (A°)
d ₁	104025	20	3.66 10 ⁵
d ₁	114100	120	> 5.62 10 ⁵
d ₂	115900	40	2.46 10 ⁵
d ₂	116020	80	4.46 10 ⁵
d ₃	124575	80	2.58 10 ⁵
d ₃	124775	120	3.54 10 ⁵
d ₃	125625	200	5.38 10 ⁵

A partir des deux tableaux (11 et 12) on observe que pour une même distance de défocalisation, l'augmentation du nombre de tirs conduite à élargir la surface de la tache irradiée et à augmenter la profondeur de la matière éjectée.

Pour les faibles fluences (grandes distances de défocalisation), les profondeurs d'ablation sont faibles [107] et le diamètre de la zone irradiée est significativement inférieur à celui du faisceau laser incident (~ 65 µm). Lorsque le flux augmente, la surface de la tache commence à augmenter et d'approcher vers la section du faisceau incident

4. DISTRIBUTION CHIMIQUES DES ÉLÉMENTS APRÈS L'IRRADIATION LASER

4. 1. Distribution d'oxygène

Comme on a vu précédemment dans les résultats microstructuraux que la surface irradiée est devisée en trois zones: la première zone (le trou central) est la zone ablatée ou évaporée, la deuxième zone est la zone fusionnée et la troisième zone est la zone chauffée. La cartographie de l'oxygène est présentée sur la figure 46, qui montre une distribution qualitative dans la zone irradiée. Il est clair que la concentration de l'oxygène est moins élevée dans la première zone (l'oxygène est évaporé), mais on observe l'augmentation de la concentration de l'oxygène dans la deuxième et la troisième zones.

La distribution quantitative d'oxygène dans la zone irradiée est obtenue par analyse d'une surface par EDX. Les figures 47 et 48 montrent la distribution spatiale d'oxygène dans les alliages d'aluminium industriel et récupéré, respectivement. On observe que la concentration d'oxygène est faible dans la première zone et très élevée dans la seconde zone. Ce phénomène peut être exploité pour déduire la distribution de la température en utilisant une bonne simulation

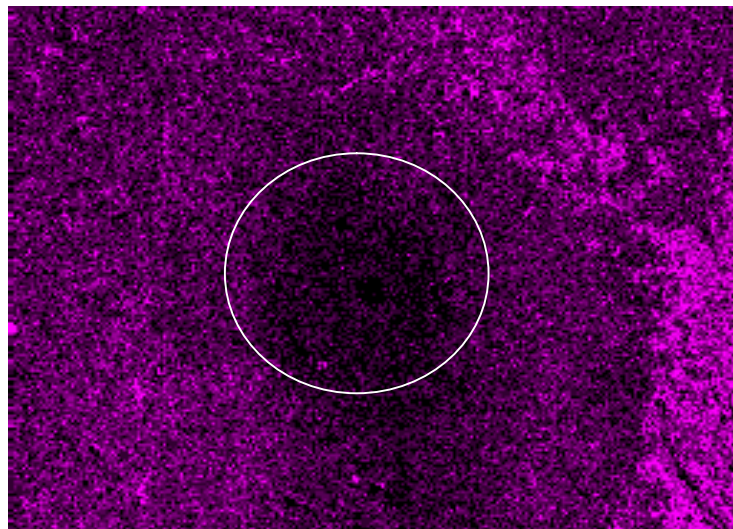


Fig. 46. Cartographie l'oxygène sur la surface de l'aluminium industriel irradié par 90 tirs

et $d_{\text{déf}} = d_1$.

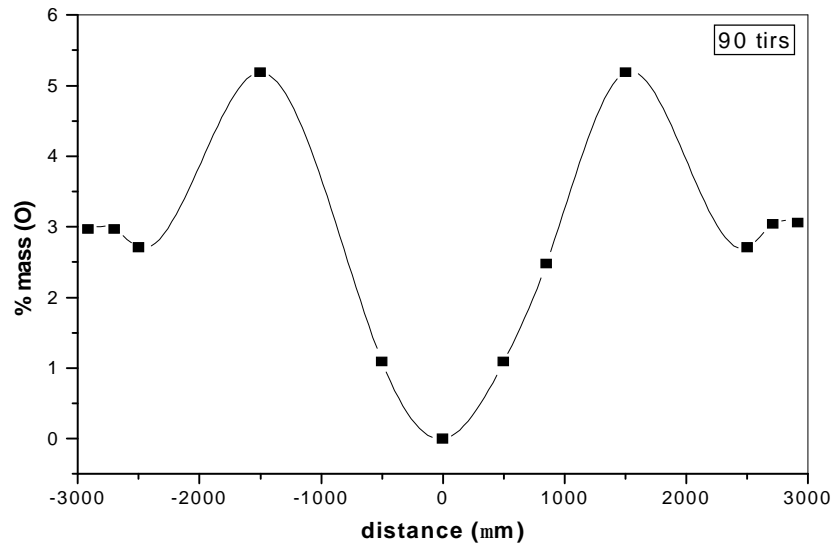


Fig. 47. Distribution d'oxygène dans l'aluminium industriel irradié ($d_{\text{def}} = d_1$).

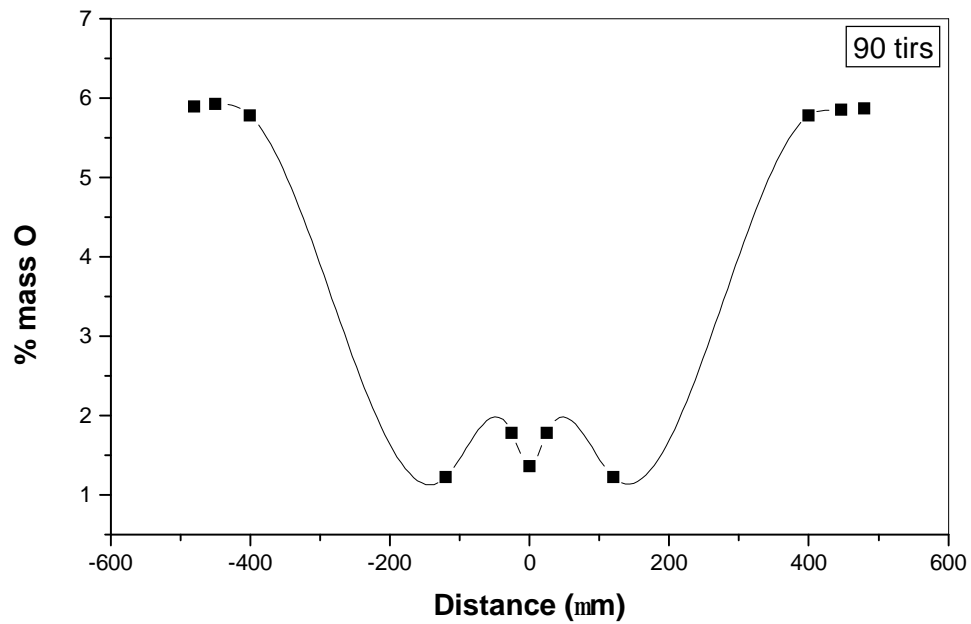


Fig. 48. Distribution d'oxygène dans l'aluminium récupéré irradié ($d_{\text{def}} = d_1$).

4.2. Distribution du cuivre

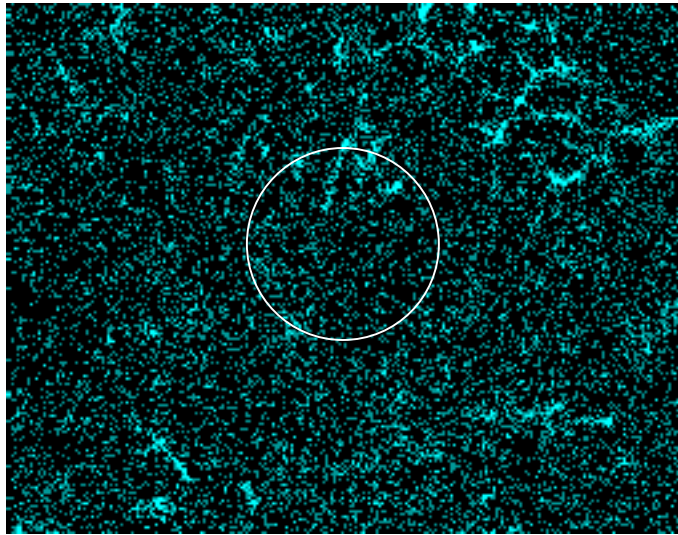


Fig. 49. Cartographie du cuivre sur la surface de l'aluminium industriel irradié par 90 tirs
et $d_{\text{déf}} = d_1$.

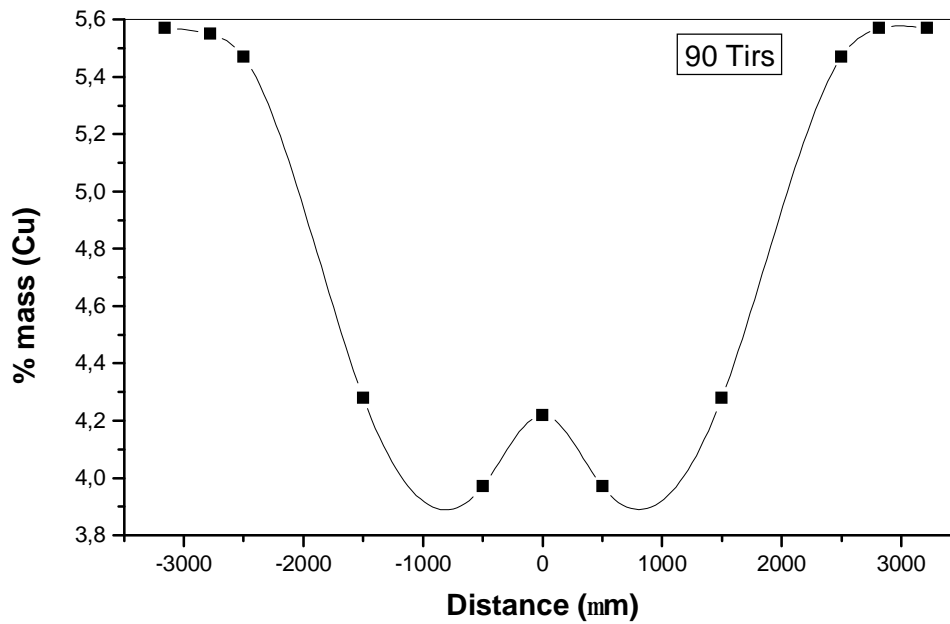


Fig. 50. Distribution du cuivre dans l'aluminium industriel irradié et $d_{\text{déf}} = d_1$.

Pour la distribution du cuivre dans l'aluminium industriel après l'irradiation laser la cartographie présentée sur la figure 49 montre que le cuivre a une distribution presque homogène dans toute la

matrice, à l'intérieur des grains et sur les joints de grains, on note aussi la présence de quelques particules un peu plus grandes qui sont probablement des rassemblements des précipités Al_2Cu .

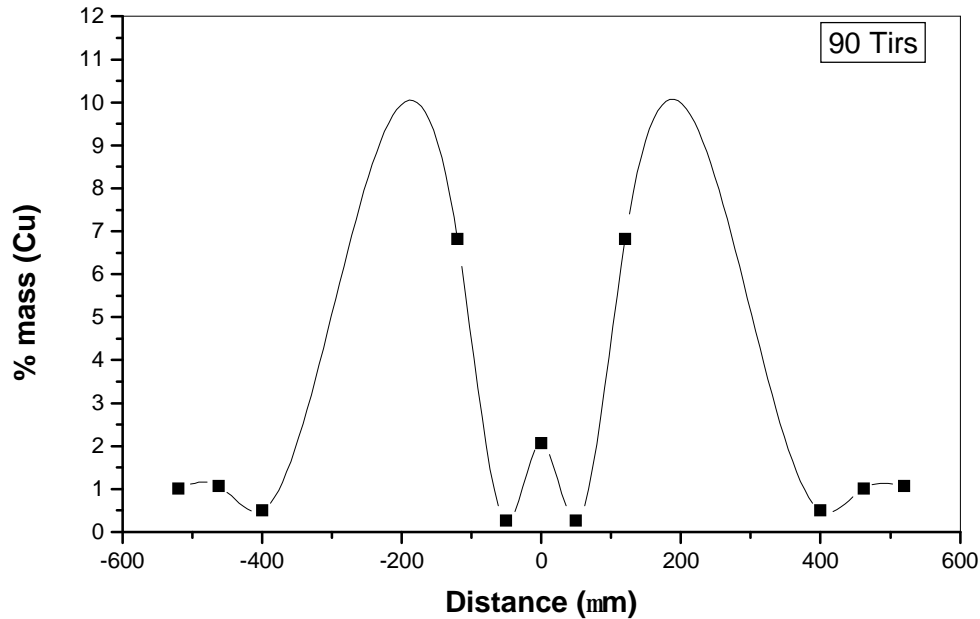


Fig. 51. Distribution du cuivre dans l'aluminium récupéré irradié et $d_{\text{def}} = d_1$.

La distribution quantitative du cuivre dans la zone irradiée est obtenue par analyse d'une surface par EDX. Les figures 50 et 51 montrent la distribution du cuivre dans toute la surface irradiée dans les deux alliages d'aluminium, industriel (Fig. 50) et récupéré (fig. 51), respectivement. On observe que la concentration du cuivre est faible dans la première zone et élevée dans la seconde zone et devient constante dans la troisième zone (zone chauffée).

4. 3. Distribution du magnésium

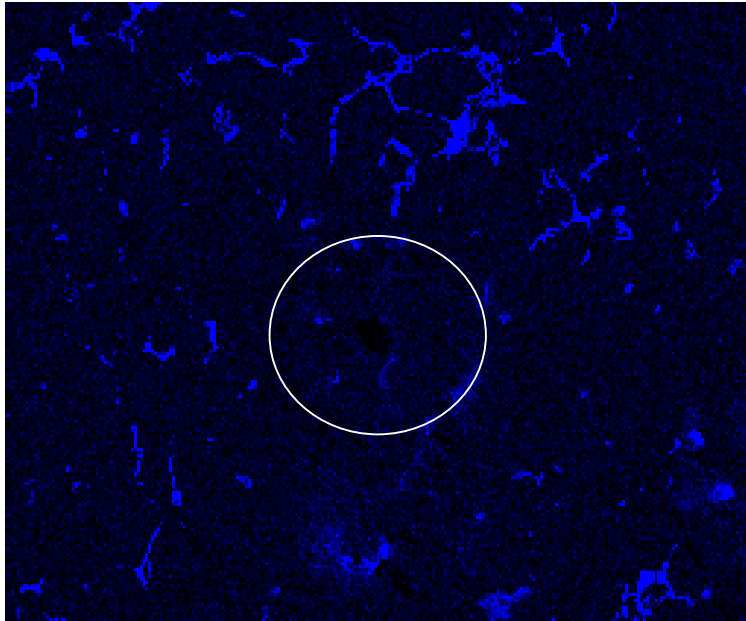


Fig. 52. Cartographie du magnésium sur la surface de l'aluminium industriel irradié par 90 tirs et $d_{\text{def}} = d_1$.

La figure 52 présente la cartographie du magnésium qui montre une distribution presque hétérogène des atomes de magnésium, ces dernières se situent sur les joints de grains sous forme de précipités, et on note que la distribution de ces précipités devient plus dense lorsqu'on s'éloigne du centre de la zone irradiée c'est à- dire que la quantité des précipités riches en magnésium dans la deuxième zone est plus grande que dans la première zone.

Les deux courbes présentées sur les figures 53 et 54 montrent la distribution quantitative du magnésium (la concentration massique du magnésium en fonction de la distance du centre de la zone irradiée).

On observe que la concentration du magnésium dans la première zone est légèrement faible que dans la deuxième zone.

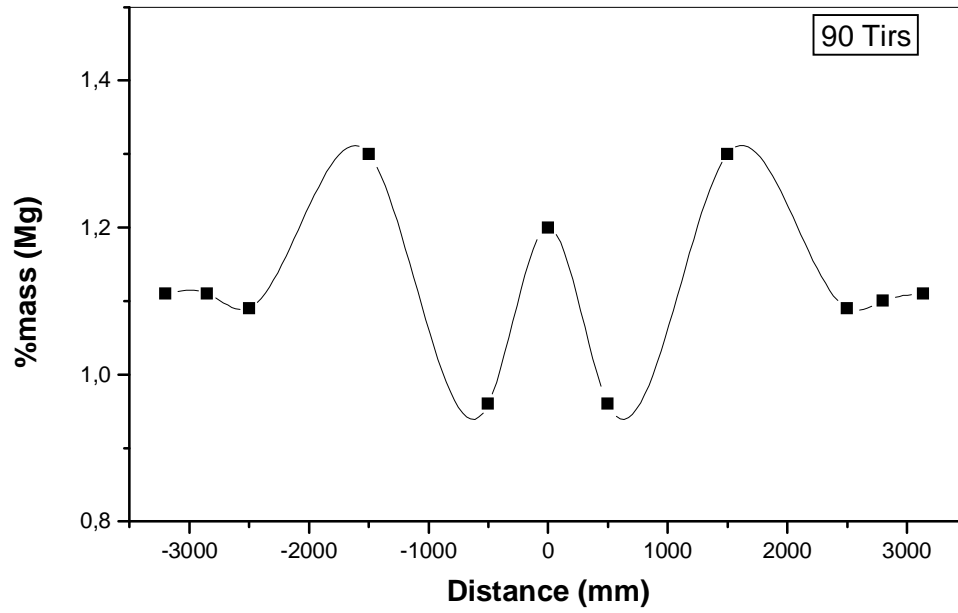


Fig. 53. Distribution du magnésium dans l'aluminium industriel irradié, $n = 90$ tirs et $d_{\text{éf}} = d_1$.

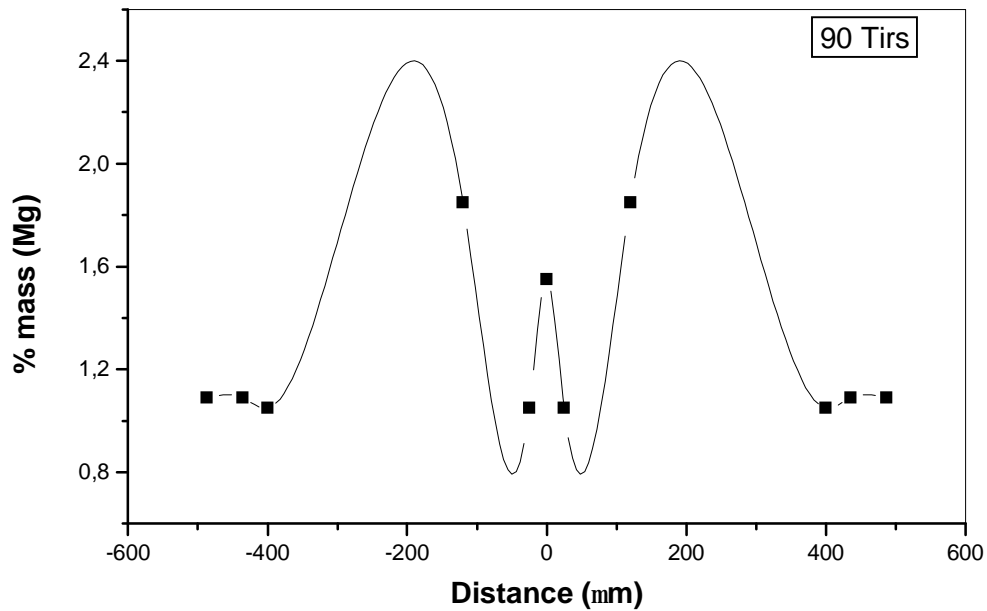


Fig. 54. Distribution du magnésium dans l'aluminium récupéré irradié, $n = 90$ tirs et $d_{\text{éf}} = d_1$.

4. 4. Distribution du silicium

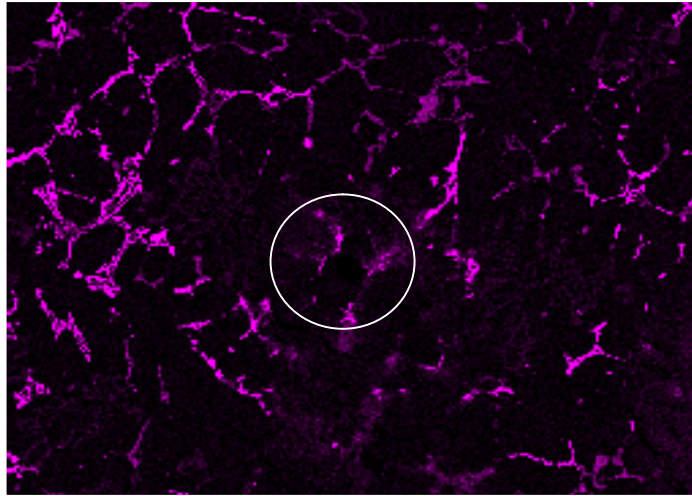


Fig. 55. Cartographie du silicium sur la surface de l'aluminium industriel irradié par 90 tirs et $d_{\text{déf}} = d_1$.

La figure 55 montre que la distribution du silicium est de la même manière que le magnésium c'est-à-dire que le silicium forme avec les autres éléments dans l'alliage des précipités sur les joints de grains.

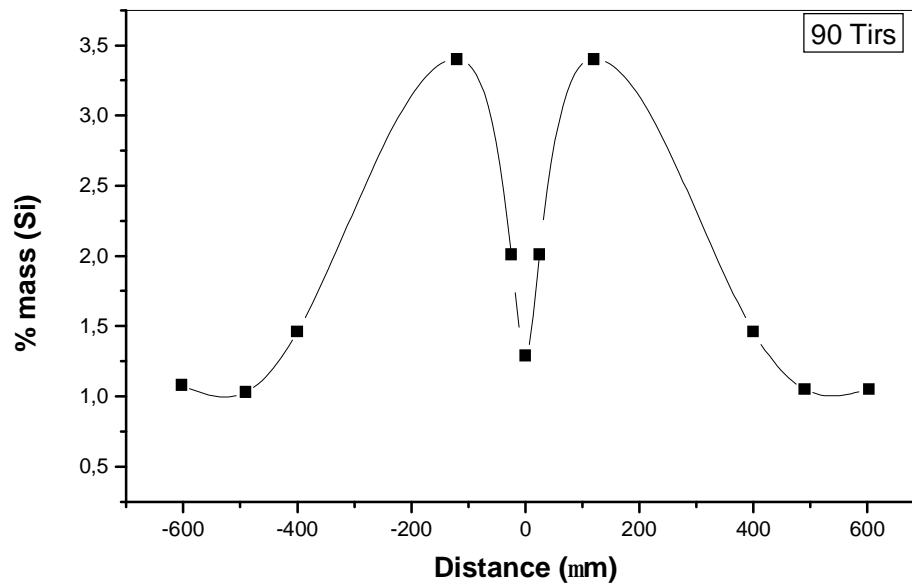


Fig. 56. Distribution du silicium dans l'aluminium récupéré après irradiation et $d_{\text{déf}} = d_1$.

La concentration des éléments chimiques dans la première zone (le trou) après l'irradiation laser est toujours faible pour chaque élément par contre dans la deuxième zone (zone fondue) elle est toujours élevée à cause de l'absence de la matière dans la zone centrale (trou). Cependant la matière éjectée par laser sera accumulée sur les bords. On explique aussi la diminution de la concentration des éléments chimiques dans la première zone après l'irradiation, par l'effet d'évaporation. A cause de la forte température à l'intérieur de la zone centrale (le trou), une grande vaporisation du métal a lieu dans cette zone. Certains éléments légers vaporisent préférentiellement que l'aluminium [108-110].

- Pour la distribution d'oxygène, elle est reliée à la distribution de la température. La température est très élevée dans la première zone et elle diminue avec l'augmentation de la distance de centre. On a trouvé un problème dans la distribution quantitative, car nous ne pouvons pas mesurer expérimentalement la température à l'échelle nanoseconde [92].

4. 5. Influence de la distance de défocalisation

O Na Mg Al Si

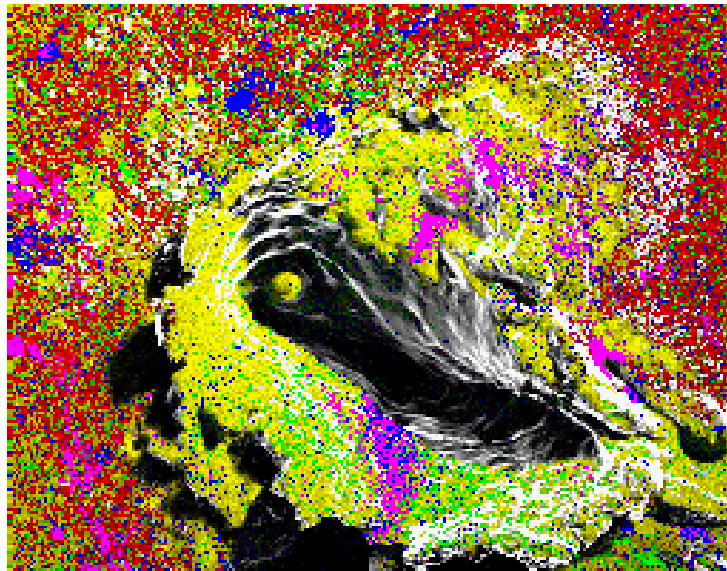


Fig. 57. Cartographie des éléments sur la surface de l'aluminium industriel irradié,

$n = 90$ tirs et $d_{\text{def}} = d_3$.

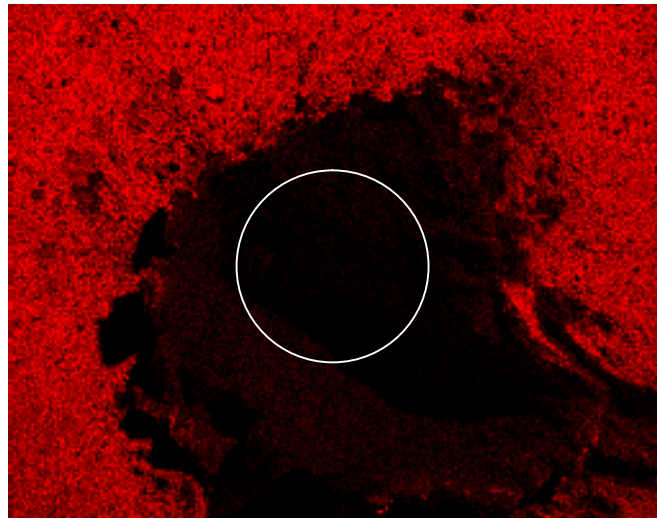


Fig. 58. Cartographie d'oxygène sur la surface de l'aluminium industriel irradié par 90 tirs.

$$d_{\text{d}\acute{\text{e}}\text{f}} = d_3$$

A partir de la figure 58 on observe que la concentration d'oxygène est moins faible dans la zone centrale par contre elle augmente dans la deuxième et la troisième zone, c'est-à-dire la concentration d'oxygène varie de la même manière (§ 3. 1) quelque soit la distance de défocalisation.

Les figures (59 et 60) montrent les mêmes distributions qu'on a vues précédemment pour le magnésium et le silicium.

Distribution du magnésium

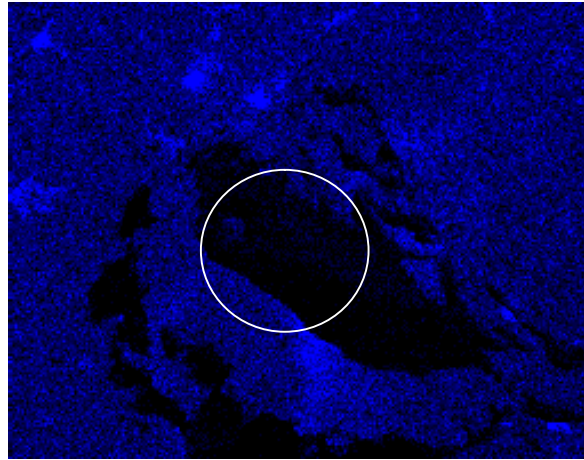


Fig. 59. Cartographie du magnésium sur la surface de l'aluminium industriel irradié par 90 tirs.

$$D_{\text{déf}} = d_3.$$

Distribution du silicium

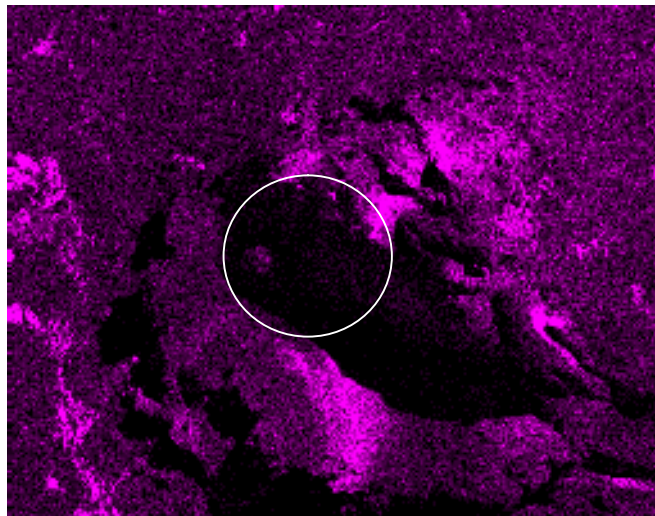


Fig. 60. Cartographie du silicium sur la surface de l'aluminium industriel irradié par 90 tirs.

$$d_{\text{déf}} = d_3.$$

On peut conclure que la distribution des éléments dépend de l'évaporation de chaque élément car l'évaporation des éléments légers n'est pas la même pour les éléments lourds.

4. 6. Analyse quantitative de chaque partie de la zone irradiée

Comme on a vu précédemment (observation microstructurales) que la zone irradiée est composée de trois parties on va montrer par l'analyse EDX la composition de chacune de ces parties, à partir de la zone extérieure (zone non irradiée) jusqu'à la zone centrale (le trou).

4. 6. 1. Composition de la zone non irradiée

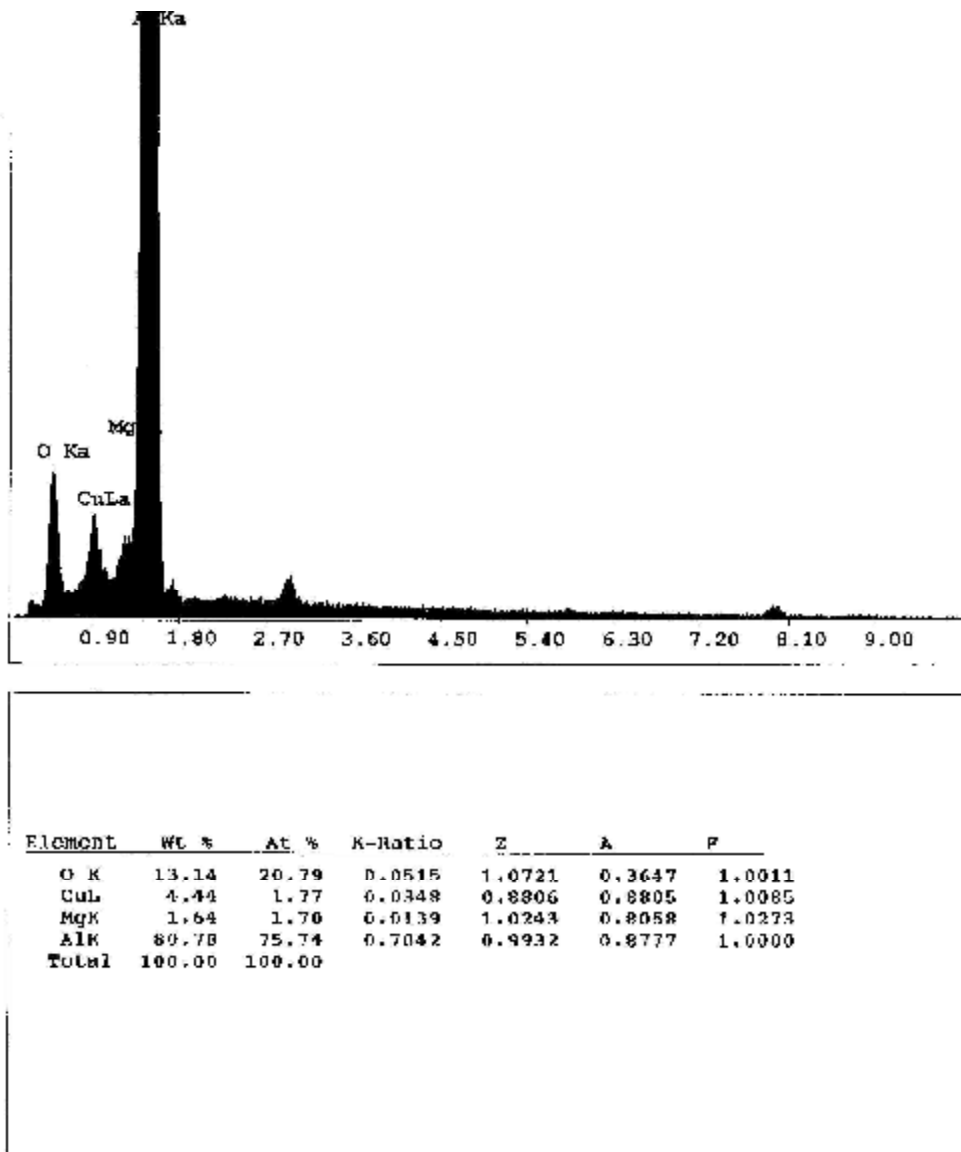
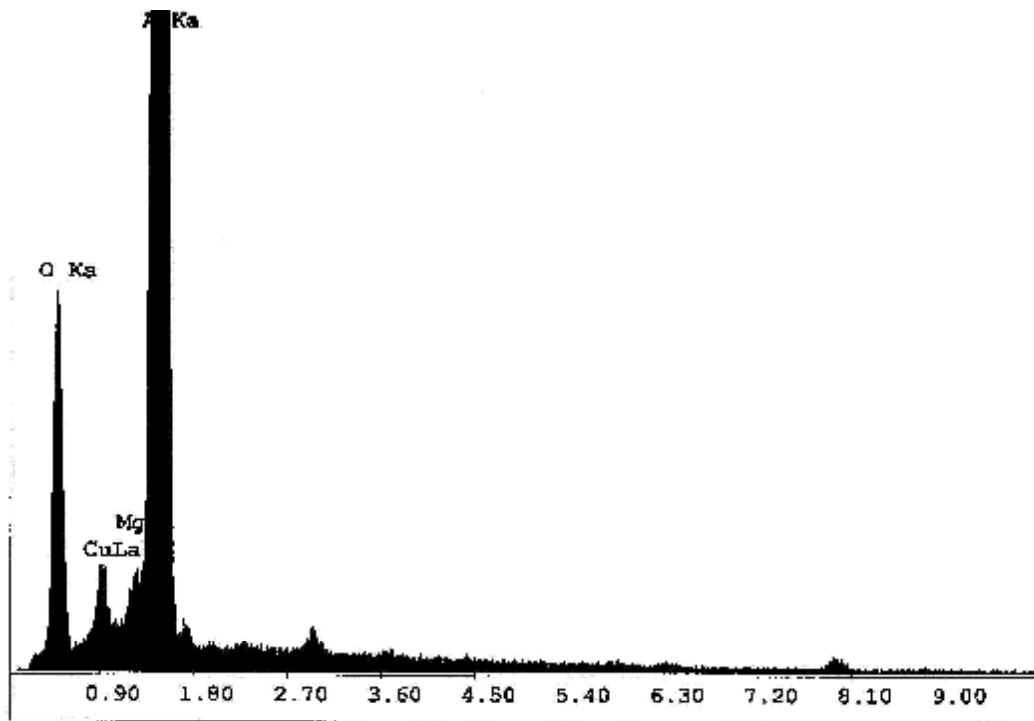


fig. 61. Composition de la zone non irradiée dans l'aluminium industriel irradié par laser Nd:Yag,
 n = 80 tirs.

4. 6. 2. Composition de la zone chauffée



Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	λ	F
O K	23.42	34.66	0.0996	1.0628	0.3998	1.0010
CuL	4.02	1.50	0.0279	0.8710	0.7903	1.0069
MgK	1.61	1.56	0.0128	1.0155	0.7680	1.0218
AlK	70.96	62.28	0.5944	0.9843	0.8511	1.0000
Total	100.00	100.00				

Fig. 62. Composition de la zone chauffée dans l'aluminium industriel irradié par laser Nd:Yag, n = 80 tirs.

4. 6. 3. Composition de la zone fusionnée

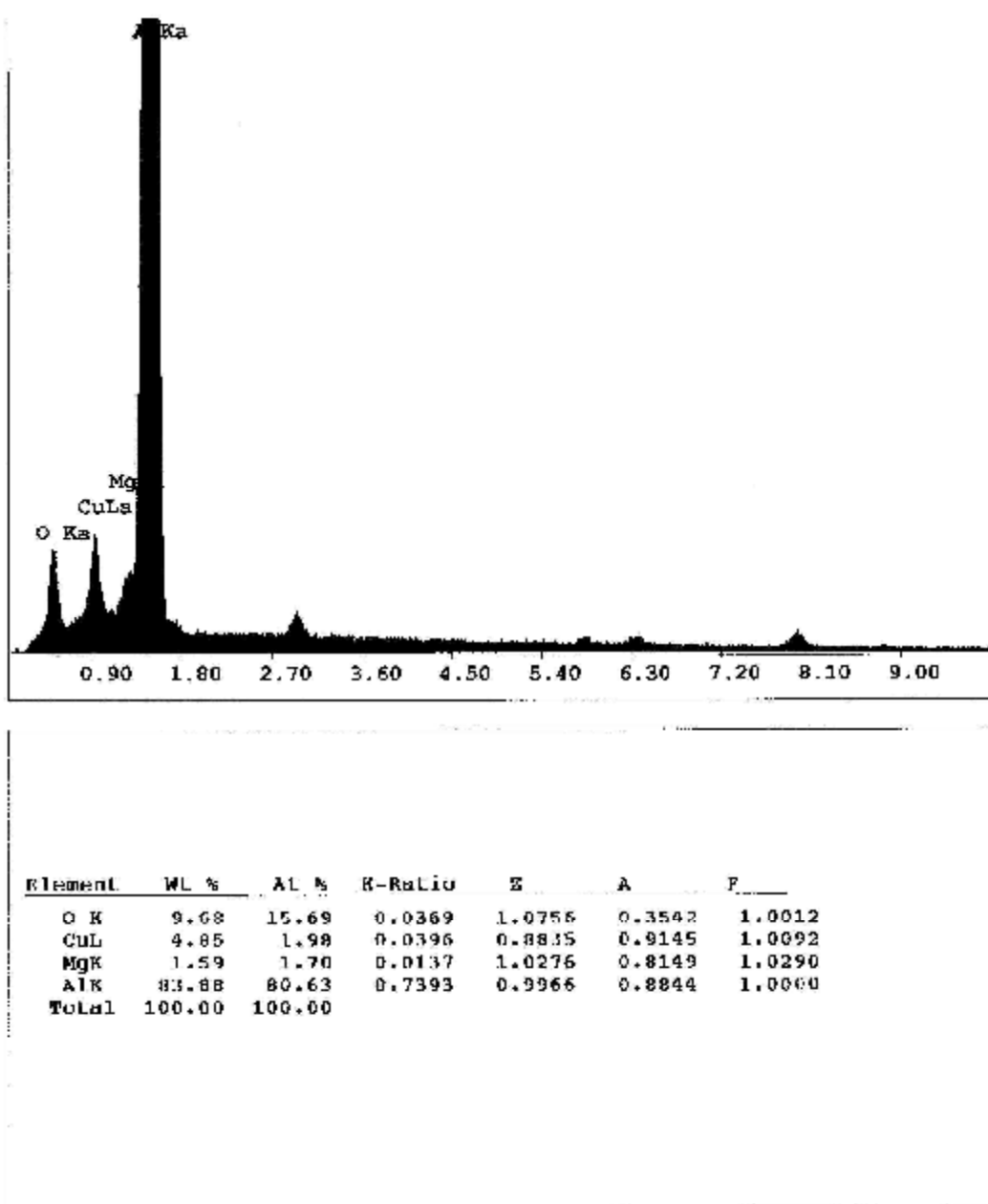


Fig. 63. Composition de la zone fusionnée dans l'aluminium industriel irradié par laser Nd:Yag, n = 80 tirs.

4. 6. 4. Composition de la zone ablatée et/ou vaporisée

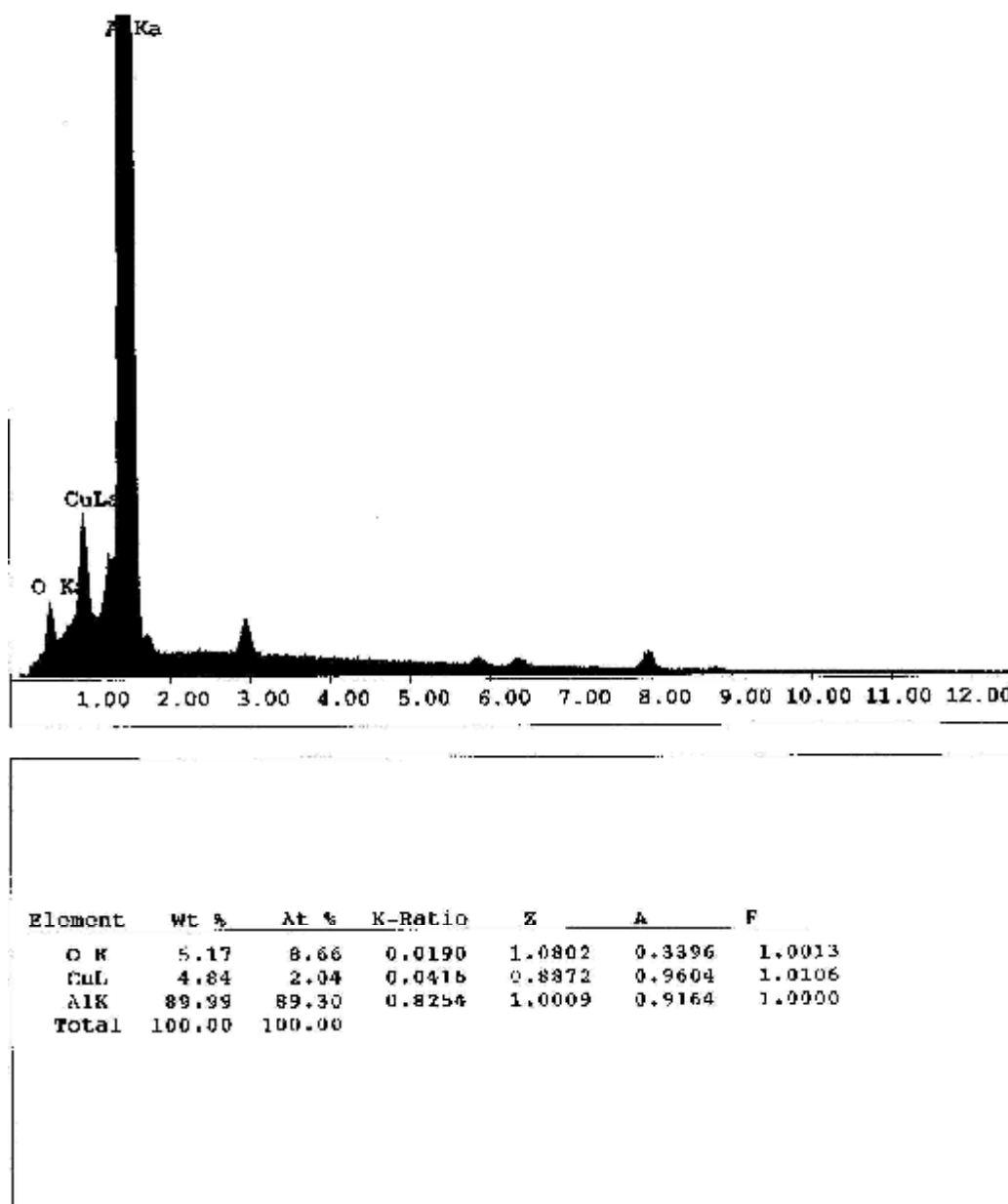


Fig. 64. Composition de la zone ablatée et/ou vaporisée dans l'aluminium industriel irradié par laser Nd:Yag, n = 80 tirs.

Le tableau suivant montre les éléments dans chaque partie de la zone irradiée et le pourcentage massique de chaque élément.

Tableau 14: composition de chaque partie de la zone irradiée.

La zone	% mass O	% mass Cu	% mass Mg	% mass Al
Non irradiée	13.14	4.44	1.64	80.78
Chauffée	23.42	4.02	1.61	70.96
Fusionnée	9.68	4.85	1.59	83.88
Ablatée et/ou vaporisée	5.17	4.84		89.99

5. LA MICRODURETÉ

Les surfaces traitées ont été analysées du point de vue chimique et structural. Maintenant, la question est de savoir dans quelle mesure les modifications de la composition chimique et de la microstructure dans la zone fondue influencent les propriétés mécaniques. La fusion avec apport de matière entraîne couramment des changements importants des propriétés mécaniques, telles que la dureté.

On a mesuré la microdureté le long de la tache irradiée obtenue par le laser Nd:Yag et le laser excimère. Les graphes présentés sur les figures 65-69 montrent la microdureté en fonction de la distance le long de la zone irradiée.

5. 1. Laser Nd:Yag

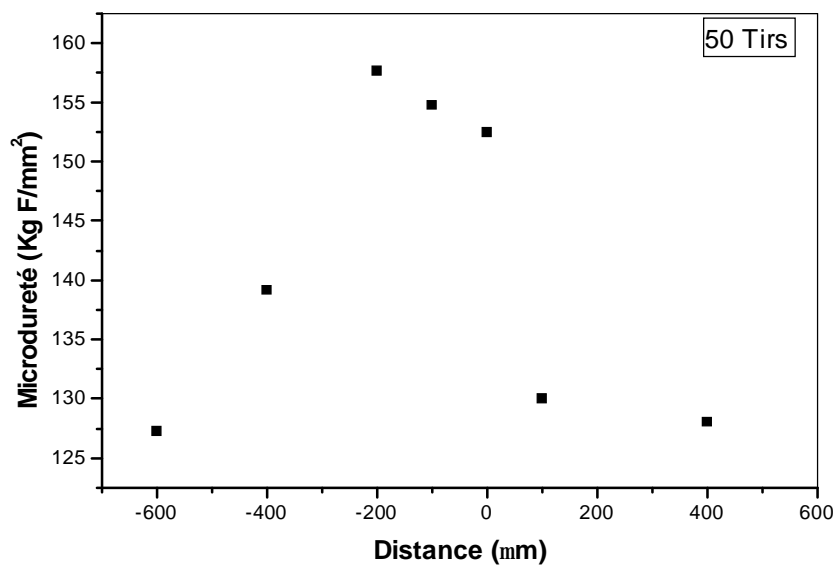


Fig.65. Evolution de la microdureté en fonction de la distance le long de ZAT dans l'aluminium industriel.

Les figures 65, 66, 67 représentent les profils de dureté en fonction de la distance le long de la zone affectée thermiquement. La dureté diminue peu dans la zone fondue.

Ces profils de dureté se décomposent en trois régions. La zone fondue est la région la plus dure et peut atteindre une dureté de 157 Kg F/mm^2 . Ensuite, la dureté diminue brutalement dans la région d'interface entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement. La dureté diminue graduellement de 152 à 130 Kg F/mm^2 . Par contre elle reste inchangée dans la zone non affectée, la valeur de 125 Kg F/mm^2 étant celle de l'aluminium non traité.

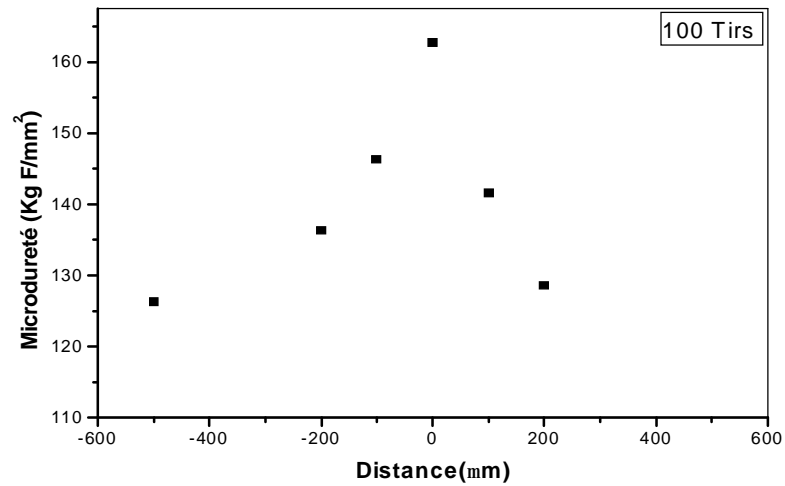


Fig. 66. Evolution de la microdureté en fonction de la distance le long de ZAT dans l'aluminium industriel pour 100 tirs.

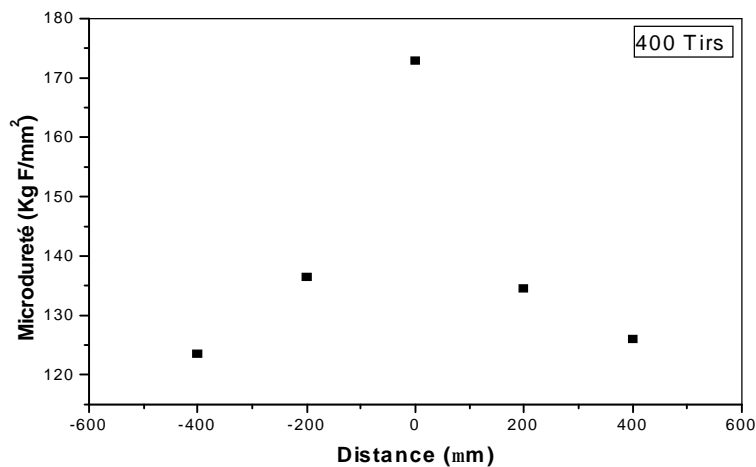


Fig. 67. Evolution de la microdureté en fonction de la distance le long de ZAT dans l'aluminium industriel pour 400 tirs.

La variation de la microdureté pour 100 tirs a la même allure que le cas précédent (50 tirs), on note que la valeur maximale de la microdureté dans la zone fusionnée est un peu plus élevée elle prend la valeur 165 Kg F/mm².

5. 2. Laser excimère

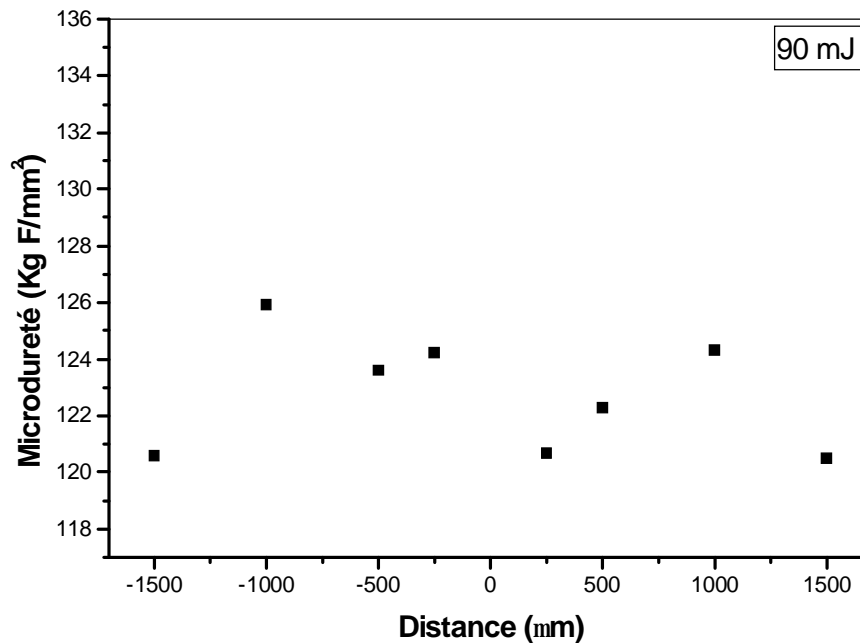


Fig. 68. Evolution de la microdureté en fonction de la distance le long de ZAT dans l'aluminium industriel, E=90mJ

La figure 70 présente la variation de la microdureté le long de la zone irradiée dans l'aluminium industriel traité par laser excimère, on observe que les valeurs de microdureté appartiennent à l'intervalle 121-126 Kg F/mm² à l'énergie du faisceau laser 90mJ. C'est-à-dire que la microdureté dans ce cas est la même dans la zone non irradiée à cause d'une faible énergie du faisceau laser.

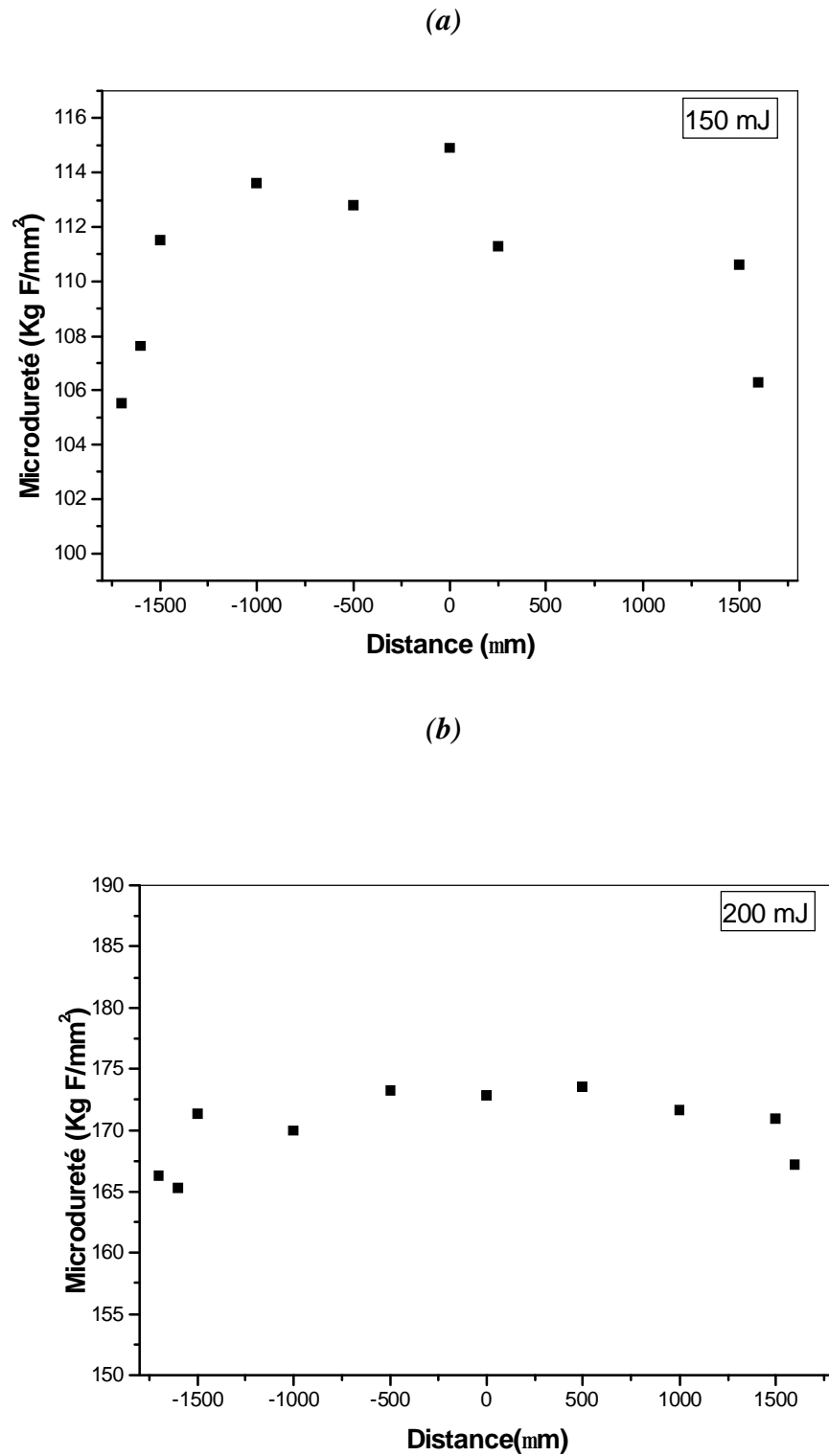


Fig. 69. Evolution de la microdureté en fonction de la distance le long de ZAT dans l'aluminium industriel, E = 150 mJ (a) et 200 mJ (b).

La variation de la microdureté vickers le long de la zone irradiée pour différentes valeurs d'énergie est présentée sur les figures 68 et 69, on observe que la microdureté prend sa valeur maximale dans la zone irradiée, ensuite elle diminue brutalement dans la région d'interface entre la zone traitée et la zone non irradiée.

On note aussi que la valeur moyenne de la dureté dans la zone irradiée augmente avec l'énergie du faisceau laser, ce qui est expliqué par la distribution homogène des précipités formées pour une énergie un peu élevée (comme on a vu précédemment dans les résultats microstructuraux).

La variation de microdureté dans la zone irradiée par laser est presque constante à cause de la distribution homogène des précipités formés.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de bien étudier l'influence du laser sur les alliages d'aluminium avec des lasers pulsés nanosecondes.

Ce travail est réalisé à l'aide de deux lasers impulsions : le laser Nd : YAG et le laser excimère; le laser Nd:Yag a une longueur d'onde et une durée d'impulsion ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $\tau_L = 5 \text{ ns}$), et le laser excimère a une énergie entre 80 mJ et 250 mJ et une durée d'impulsion de 25 ns mais on a fixé notre étude sur le laser Nd:Yag impulsions, à cause de sa large utilisation pour l'aluminium et ses alliages (soudure, découpe ou traitement de surface). On a utilisé aussi le laser CO₂.

Les échantillons étudiés ont été analysés avant et après l'irradiation par laser. Les techniques d'analyse utilisées sont: la microscopie électronique à balayage couplée à une spectroscopie R-X à dispersion d'énergie, la profilométrie et la microdureté.

Pour la variation structurale des échantillons irradiés, on peut conclure que l'augmentation de l'énergie du faisceau laser ou bien du nombre de tirs permet d'élargir la surface de la zone irradiée (pour les deux lasers Nd:Yag et excimère), ainsi d'homogénéiser la distribution des particules formées durant l'irradiation. L'augmentation de la distance de défocalisation (la distance entre le plan focal et l'échantillon) permet d'augmenter la surface de la zone irradiée et de minimiser la profondeur de cette dernière.

Par la suite, la seconde étape de l'étude est axée sur l'efficacité de l'ablation et sur une analyse de l'interaction. La profondeur ablatée et le seuil d'ablation ont ainsi été analysés en fonction de la fluence et du nombre de tirs appliqué.

Une relation linéaire entre la profondeur de la matière éjectée et le nombre de tirs pour les deux alliages étudiés (aluminium industriel et récupéré) et pour différentes valeurs du flux.

On a, de plus, montré que la faible conductivité thermique de l'aluminium récupéré permet une accumulation de chaleur tir à tir. La conséquence immédiate de cette propriété est la diminution du seuil d'ablation (une ablation efficace).

La présence d'une saturation de la profondeur ablatée pour les hautes fluences a été mise en évidence pour les deux alliages étudiés, à une fluence $F_{\text{sat}} \sim 15 \text{ J cm}^{-2}$ pour l'aluminium récupéré et 20 J cm^{-2} pour l'aluminium industriel. Une diffusion d'une partie du faisceau par la

matière éjectée, entraînant ainsi une perte d'énergie réellement déposée à la surface du milieu ce qui peut retarder la saturation de la profondeur d'ablation. La quantification de la diffusion du faisceau laser par les particules éjectées, pendant l'ablation, est une perspective pertinente qui permettrait de compléter ce travail.

L'analyse quantitative des éléments chimiques après l'irradiation laser montre que la plus part des éléments se trouvent par des concentrations élevées dans la deuxième et la troisième zone contrairement à la première zone, à cause de la perte de matière dans la première zone.

Pour les lasers nanoseconde, l'énergie principale est perdue par la diffusion thermique dans la cible irradiée, car il y a assez de temps pour transformer l'énergie optique en énergie thermique et propager la chaleur. Fusion ou/et évaporation peuvent prendre place si la température de la surface dépasse le point critique. Lorsque l'énergie d'irradiation est supérieure au seuil d'ablation; sa conduite à l'ionisation est donc à la formation du plasma.

Pour les processus laser –métal, après la connaissance de la fluence seuil d'ablation c'est possible d'obtenir le résultat désiré par le choix du flux du faisceau laser.

Les deux alliages étudiés (aluminium industriel et aluminium récupéré) contiennent plusieurs éléments chimiques, chaque alliage est composé de plus de six éléments chimiques. C'est donc un matériau complexe, et son interaction avec une impulsion laser de forte intensité entraîne des mécanismes singuliers et très complexes.

L'interaction laser- métal implique que des mécanismes restent débatables, parce que l'interaction entre des impulsions laser courtes et un métal est très complexe et les effets d'irradiation peuvent être influencés par les propriétés du métal et les conditions de l'entourage.

En perspective à cette étude sur l'interaction laser – aluminium, l'étude de la de la profondeur (quantité) de matière éjectée pourrait se poursuivre à l'aide de mesure de la diffusion thermique, avec l'étude de l'influence d'autres paramètres tels que la longueur d'onde, la durée de l'impulsion et la cadence de tirs. La distribution de l'oxygène après l'irradiation peut s'exploiter pour déduire la distribution de la température lors de l'irradiation en simulant l'interaction laser-métal.

On cite aussi parmi les perspectives de ce travail, une étude comparative entre le même alliage industriel et récupéré de la même composition pour montrer l'influence du laser sur le même alliage dans deux cas différents.

REFERENCES

- [1] J. Wilson et J. F. B. Hawkes, Laser principles and Application, International Series in Optoelectronics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1994.
- [2] P. A. Hilton (2002), In the Beginning..., Intl Congr on Appl on Application of Lasers and Electro-Optics, Scottsdale, USA (ICALEO'2002).
- [3] B. Vannes, Les lasers de puissance, Hermes.
- [4] Encyclopaedia Encarta (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Laser>)
- [5] Bela A. Lengyl, introduction à la physique du laser, p 11, 1966.
- [6] Introduction aux lasers, ULICE Optronique, 2001.
- [7] Laser- wikipédia, "[http://fr. wikipédia. Org/wik/laser](http://fr.wikipedia.org/wiki/Laser)"
- [8] D. F. Nelson and R. J Collins, the polarisation of the output from a ruby optical maser, advance in quantum electronics, Columbia Univ. Press, New York, pp. 70-82, 1961.
- [9] Cédric Mas, Thèse Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2003.
- [10] w. w. Rigrod, Appl. Phys. Lett. 2, 51-53, 1963.
- [11] M. Bessis, F. Gires, G. Mayer, G. Nomarski, Compt. Rend. 255, 1010-1012, 1962.
- [12] R. C. Rosan, M. K. Healy, and W. F. McNary, Spectroscopicultra- microanalysiswith a laser, science142, 263-237, 1963.
- [13] A. T. Ellis and M. E. Fourney , Application of a ruby laser to high-speed photography, Proc. IEEE 51, 942, 1963.
- [14] J. Dutta Majumdar and I. Manna, S⁻adhan⁻a, Vol. 28, Parts 3 & 4, , pp. 495–562,2003.
- [15] Ludovic, Thèse doctorat, L'école nationale supérieure d'arts et métiers, Paris, 2003.
- [16] CEA, l'interaction laser – matière, conférence de presse, 1999.

- [17] Malot, Thèse doctorat, Université de Bourgogne, 2001.
 - [18] M. von Allmen, "Laser-Beam Interactions with Materials", Chap. 2, p. 6-48, éd. Springer-Verlag, 1987.
 - [19] D. Bauerle. Laser Processing and Chemistry. Edition Springer. 3ème edition, 2000.
 - [20] François Brygo, Thèse doctorat, Université de Bourgogne, 2005.
 - [21] J. A Folkes, Surf. Coat. Techn., 63, p.65-71,1994.
 - [22] Y. G. Yingling, P. F. Conforti, B. J. Garrison. Appl. Phys. A. 79, 757, 2004.
 - [23] S.L. Jacques, S.A. Prahl. Lasers in surgery and medicine 6, 494 - 503, 1987.
 - [24] L.V. Zhigilei, B.J. Garrison. Appl. Phys. Lett. 74, 9, 1341 - 1343, 1999.
 - [25] K. Dreisewerd. Chem. Rev. 103, 395 - 425, 2003.
 - [26] B. Majaron, D. Sustercic, M. Lukac, N. Funduk. Appl. Phys. B. 66, 479 - 487, 1998.
 - [27] E. Papagiakoumou, D.N. Papadopoulos, M.G. Khabbaz, M.I. Makropoulou, A.A. Serafetinides. Appl. Surf. Science 233, 234 - 243, 2004.
 - [28] L.V. Zhiligei, B.J. Garrison. J. Appl. Phys. 88, 3, 1281 - 1298, 2000.
 - [29] J. A Folkes, Surf. Coat. Techn., 63, p.65-71,1994.
 - [30] Dimitris PANTELIS, « Techniques de l'Ingénieur, Traité Matériaux métalliques », MD-M 1 240.
 - [31] Jean- Eric, Centre Ciaire, 1997.
 - [32] SteenW M (ed.) Laser material processing (NewYork: Springer Verlag), 1991.
 - [33] Duley W, Laser surface treatment of metals: NATO-ASI Series (E) No.: 115 (eds) CW Draper, P Mazzoldi (Boston: Martinus Nijhoff) p. 3, 1986.
 - [34] Mordike B L, Materials science and technology (eds) RW Cahn, P Haasen, E J Kramer (Weinheim: VCH) 15: 111, 1993
 - [35] Draper CW, Laser and electron beam processing of materials (eds) CWWhite, P S Peercy (NewYork: Academic Press) p. 721, 1980.
 - [36] Mazumdar J, Lasers for materials processing (ed.) M Bass (New York: North Holland) p. 113, 1983.
 - [37] Rykalin N N, Uglov A, Kokora A, Laser machining and welding (Moscow: Mir), 1978.
 - [38] Von Allem M, Laser annealing of semiconductors (eds) J M Poate, J W Mayer (New York: Academic Press) p. 43, 1982.
-

- [39] White CW, Aziz M J Surface alloying by ion, electron and laser beams (eds) L E Rehn, S T Picraux, H Wiedersich (Metals Park O: ASM) p. 19,1987.
- [40] Perepezko J H, Boettinger W J, Surface alloying by ion, electron and laser beams (eds) L E Rehn, S T Picraux, H Wiedersich (Metals Park, Ohio: ASM) p. 51,1987.
- [41] Picraux S T, Follstaedt D M, Laser–solid interactions and transient thermal processing of materials (eds) J Narayan, W L Brown, R A Lemons (New York: North-Holland) p. 751,1983.
- [42] Einstein A Z. Phys 18: 121, 1917.
- [43] Kopfermann H, Ladenburg R, Phys. Chem. Abt. A139: 375, 1928.
- [44] Maiman T H, Nature (London) 187: 493, 1960.
- [45] Andrews J G, Atthey D R, J. Phys. D9: 2181, 1976.
- [46] Laeng J, Stewart J G, Liou F W, Int. J. Prod. Res. 38: 3973–3996, 2000.
- [47] Dawas C (ed.), Laser welding (New York: McGraw-Hill), 1992.
- [48] Duley W W (ed.), Laser welding (New York: John Wiley & Sons) p. 1, 1999.
- [49] Draper C W, Poate J M, Int. Met. Rev. 30: 85–108, 1985.
- [50] Molian P A, Surface modification technologies-An engineers guide (ed.) T S Sudarshan (New York: Marcel Dekker) p. 421, 1989.
- [51] Draper C W, Ewing C A J. Mater. Sci. 19: 3815, 1984.
- [52] Chan K C, Liang J, Compos. Sci. Technol. 61: 1265–1270, 2001.
- [53] Chan K C, Yau C L, Lee W B, J. Laser Appl. 12: 34–40, 2000.
- [54] Chen G, Xu X, Poon C C, A C, J. Appl. Mech. 66: 772–779, 1999.
- [55] Magee J, Watkins K G, Steen W M, Calder N J, Sidhu J, Kirby Jn, J. Laser Appl. 10: 149–155, 1998.
- [56] Van den Burg M, De-Hosson J T M, Interface Sci. 3: 107–118, 1995.
- [57] Gaumann M, Bezencon C, Canalis P, Kurz W, Acta Mater. 49: 1051–1062, 2001.
- [58] Cleton, Jouneau P H, Henry S, Gaumann M, Buffat P A, Scanning 21: 232–237, 1999.
- [59] Ruys A J, Kerdic J A, Sorrell C C, J. Mater. Sci. 31: 4347–4355, 1996.
- [60] Wihua-Wang W, Holl M R, Schwartz D T, J. Electrochem. Soc. 148: C363–C368, 2001.
- [61] Greco A, Licciulli A, Maffezzoli A, J. Mater. Sci. 36: 99–105, 2001.
- [62] Lu L, Fuh J Y H, Chen Z D, Leong C C, Wong Y S, Mater. Res. Bull. 35: 1555–1561, 2000.
- [63] Daneshvar K, Raissi M, Bobbio S M, J. Appl. Phys. 88: 2205–2210, 2000.
- [64] Wanke M C, Lehmann O, Muller K, Qingzhe W, Stuke M, Science 275: 1284–1286, 1997.
-

- [65] Lehmann O, Stuke M, Science 270: 1644–1646,1995.
- [66] LuY F, Qiu H, J. Appl. Phys. 88: 1082–1087,2000.
- [67] Seifert G, Kaempfe M, Berg K J, Graener H, Appl. Phys. B71: 795–800, 2000.
- [68] LuY F, SongW D, Hong M H, Chong T C, Low T S, Appl. Phys. A64: 573–578, 1997.
- [69] Muggli P, Brogle R, Joshi C, J. Optical Soc. B12: 553–558, 1995.
- [70] Parmar R S, (ed.) Welding engineering and technology (New Delhi: Khanna), 1999.
- [71] Lancaster J F (ed.) Metallurgy of welding (London: George Allen and Unwin)
- [72] Yue T M, LauW, S Mater. Manuf. Process. 11: 17–29, 1996.
- [73] Aluminium, article de wikipédia, l'encyclopédie libre, 2005.
- [74] Institut de soudure - www.isgroue. Com.
- [75] Weckman D C, Kerr HW, Liu J T, Metall. Mater. Trans. B28: 687–700, 1997.
- [76] Wang H M, ChenY L, Yu L G, Mater. Sci. Eng. A293: 1–6, 2000.
- [77] Leong K H, Kirkham P A, Jr Meinert K C, J. Laser Appl. 12: 181–184,2 000.
- [78] Hirose A, Todaka H, Yamaoka K, Kurosawa N, Kobayashi K F, Metall. Mater. Trans.A30: 2115–2120, 1999.
- [79] Laser ablation and Desorption. J.C. Miller, R.F. Haglund. Experimental methods in the physical science Vol 30. Academic Press, 1998.
- [80] A. Mele, A.G. Guidoni, R. Kelly, C. Flamini, S. Orlando, Appl. Surf. Sci. 109 584–590, 1997.
- [81] B.C Stuart, M.D. Feit, A.M. Rubenchik, B.W. Shore, M.D. Perry. Phys. Rev. Lett. Vol 74, 12, 2248 - 2252, 1995.
- [82] B.C. Stuart, M.D. Feit, S. Herman, A.M. Rubenchik, B.W. Shore, M.D. Perry. J. Opt. Soc. Am. B13, 2, 459, 1996.
- [83] L.V. Zhigilei. Chem Rev., 103, 321- 347, 2003.
- [84] H. Li, S. Costil , V. Barnier, R. Oltra, O. Heintz, C. Coddet. Surafce coating & technologie, 2006.
- [85] Chih-Yang Wu_, Chun-Wei Shu, Zhi-Chang YehOptics and Lasers in Engineering 44 (2006) 842–857
- [86] Paterson C, Holmes AS, Smith RW. J Appl Phys 1999;86:6538–46
- [87] W.M. Steen, Laser Material Processing, 3rd editionSpringer, London, UK, 2003.
- [88] C. Köner, R. Mayerhofer, M. Hartmann, H.W. Bergmann, Appl. Phys. A 63 123, 1996.
-

- [89] P. Pasquet, R. del. Coso, J. Boneberg, P. Leiderer, R. Oltra, J.P. Boquillon, *Appl. Phys.* A69, 1999.
- [90] Jez weston, thèse Ph. D, Université de Cambridge, 1999.
- [91] Paray. F, B. Kulunk, et al. *Materials Science and technology* 12 (4): 315-322, 1996.
- [92] Polmear, J. R. *Light alloys*, Edward Arnold, 1989.
- [93] N. M. Bulgakova & A. V. Bulgakov. *Appl. Phys. A* 73, p.199-208 , 2001.
- [94] J. K. Chen, J. E. Beraun, L. E. Grimes & D. Y. Tzou. *AIAA J. Thermophys. Heat Transf.* 17, p.35-42 ,2003.
- [95] T. E. Itina, J. Hermann, Ph. Delaporte & M. Sentis. *Thin Solid Films* 453-454, p.513-517, 2004.
- [96] T. E. Itina, F. Vidal, Ph. Delaporte & M. Sentis. Numerical study of ultrashort laser ablation of metals and of laser plume dynamics. *Appl. Phys. A* 79, p.1089-1092, 2004.
- [97] S. Laville, F. Vidal, T. W. Johnston, O. Barthélemy, M. Chaker, B. Le Drogoff, J. Margot & M. Sabsabi. *Phys. Rev. E* 66, p.066415,2002.
- [98] F. Vidal, T. W. Johnston, O. Barthélemy, M. Chaker, B. Le Drogoff, J. Margot & M. Sabsabi. *Phys. Rev. Lett.* 86, p.2573-2576, 2001.
- [99] F. Vidal, T. W. Johnston, J.-C. Kieffer & F. Martin. *Phys. Rev. B* 70, p.184125, 2004.
- [100] J. P. Dufour, M. Gerland, P. Darquey, *Scripta metallurgica*, Vol 23, pp. 283-488, 1989.
- [101] Jean-Philippe Colombier, thèse doctorat, Université Jean Monnet de Saint-Etienne,2005.
- [102] A. Ampere Tseng, ying-Tung Chen, Kung-Jeng Ma, *Optics and lasers inEngineering*, 41, 827-847, 2004.
- [103] T. Lippert, " *Polymers and light*". Ed. Springer, 2004.
- [104] R. Srinivasan, B. Braren. *Chem. Rev.* 89, 1303 -1316, 1989.
- [105] L.V. Zhiligei, B.J. Garrison. *J. Appl. Phys.* 88, 3, 1281 - 1298, 2000.
- [106] W. Kautek, J. Kruger, S. Sartania, C. Speilmann, F. Krausz, *Appl phys Lett*, 69(21): 3146-8, 1996.
- [107] J. M. Fishburn, M. J. Withford, D. W. Coutts, J. A. Piper, *Appl. Surf. sci*, 252, 5182-5188, 2006.
- [108] N. M. Bulgakova & I. M. Bourakov. *Appl. Surf. Sci.* 197/198, p.41-44, 2002.
- [109] L. Baziz, A. Nouiri, Y. A. Yousef, *laser physics*, Vol. 16, No. 12, pp. 1643-1646, 2006.
-

[110] L. Baziz, A. Nouiri, Y. A. Yousef, Abhath Al-Yarmouk (Basic science and Engineering),
Vol. 15, No. 2, pp. 257-264, 2006.

REFERENCES

- [1] J. Wilson et J. F. B. Hawkes, *Laser principles and Application*, International Series in Optoelectronics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1994.
 - [2] P. A. Hilton (2002), *In the Beginning...*, Intl Congr on Appl on Application of Lasers and Electro-Optics, Scottsdale, USA (ICALEO'2002).
 - [3] B. Vannes, *Les lasers de puissance*, Hermes.
 - [4] Encyclopaedia Encarta (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Laser>)
 - [5] Bela A. Lengyl, *introduction à la physique du laser*, p 11, 1966.
 - [6] *Introduction aux lasers*, ULICE Optronique, 2001.
 - [7] Laser- wikipédia, "<http://fr.wikipedia.org/wiki/Laser>"
 - [8] D. F. Nelson and R. J Collins, *the polarisation of the output from a ruby optical maser*, *advance in quantum electronics*, Columbia Univ. Press, New York, pp. 70-82, 1961.
 - [9] Cédric Mas, *Thèse Doctorat*, Université Pierre et Marie Curie, 2003.
 - [10] w. w. Rigrod, *Appl. Phys. Lett.* 2, 51-53, 1963.
 - [11] M. Bessis, F. Gires, G. Mayer, G. Nomarski, *Compt. Rend.* 255, 1010-1012, 1962.
 - [12] R. C. Rosan, M. K. Healy, and W. F. McNary, *Spectroscopicultra- microanalysiswith a laser*, *science*142, 263-237, 1963.
 - [13] A. T. Ellis and M. E. Fourney , *Application of a ruby laser to high-speed photography*, *Proc. IEEE* 51, 942, 1963.
 - [14] J. Dutta Majumdar and I. Manna, *Sādhanā*, Vol. 28, Parts 3 & 4, , pp. 495–562,2003.
 - [15] Ludovic, *Thèse doctorat*, L'école nationale supérieure d'arts et métiers, Paris, 2003.
 - [16] CEA, *l'interaction laser – matière*, conférence de presse, 1999.
 - [17] Malot, *Thèse doctorat*, Université de Bourgogne, 2001.
 - [18] M. von Allmen, "Laser-Beam Interactions with Materials", Chap. 2, p. 6-48, éd. Springer-Verlag, 1987.
 - [19] D. Bauerle. *Laser Processing and Chemistry*. Edition Springer. 3ème edition, 2000.
 - [20] François Brygo, *Thèse doctorat*, Université de Bourgogne, 2005.
 - [21] J. A Folkes, *Surf. Coat. Techn.*, 63, p.65-71,1994.
 - [22] Y. G. Yingling, P. F. Conforti, B. J. Garrison. *Appl. Phys. A.* 79, 757, 2004.
 - [23] S.L. Jacques, S.A. Prahl. *Lasers in surgery and medicine* 6, 494 - 503, 1987.
 - [24] L.V. Zhigilei, B.J. Garrison. *Appl. Phys. Lett.* 74, 9, 1341 - 1343, 1999.
 - [25] K. Dreisewerd. *Chem. Rev.* 103, 395 - 425, 2003.
-

-
- [26] B. Majaron, D. Sustercic, M. Lukac, N. Funduk. *Appl. Phys. B.* 66, 479 - 487, 1998.
- [27] E. Papagiakoumou, D.N. Papadopoulos, M.G. Khabbaz, M.I. Makropoulou, A.A. Serafetinides. *Appl. Surf. Science* 233, 234 - 243, 2004.
- [28] L.V. Zhilgei, B.J. Garrison. *J. Appl. Phys.* 88, 3, 1281 - 1298, 2000.
- [29] J. A Folkes, *Surf. Coat. Techn.*, 63, p.65-71,1994.
- [30] Dimitris PANTELIS, « Techniques de l'Ingénieur, Traité Matériaux métalliques », MD-M 1 240.
- [31] Jean- Eric, Centre Claire, 1997.
- [32] SteenW M (ed.) *Laser material processing* (NewYork: Springer Verlag), 1991.
- [33] Duley W, *Laser surface treatment of metals: NATO-ASI Series (E) No.: 115* (eds) CW Draper, P Mazzoldi (Boston: Martinus Nijhoff) p. 3, 1986.
- [34] Mordike B L, *Materials science and technology* (eds) RW Cahn, P Haasen, E J Kramer (Weinheim: VCH) 15: 111, 1993
- [35] Draper CW, *Laser and electron beam processing of materials* (eds) CWWhite, P S Peercy (NewYork: Academic Press) p. 721, 1980.
- [36] Mazumdar J, *Lasers for materials processing* (ed.) M Bass (New York: North Holland) p. 113, 1983.
- [37] Rykalin N N, Uglov A, Kokora A, *Laser machining and welding* (Moscow: Mir), 1978.
- [38] Von Allem M, *Laser annealing of semiconductors* (eds) J M Poate, J W Mayer (New York: Academic Press) p. 43, 1982.
- [39] White CW, Aziz M J *Surface alloying by ion, electron and laser beams* (eds) L E Rehn, S T Picraux, HWiedersich (Metals Park O: ASM) p. 19,1987.
- [40] Perepezko J H, BoettingerW J, *Surface alloying by ion, electron and laser beams* (eds) L E Rehn, S T Picraux, HWiedersich (Metals Park, Ohio: ASM) p. 51,1987.
- [41] Picraux S T, Follstaedt D M, *Laser–solid interactions and transient thermal processing of materials* (eds) J Narayan, W L Brown, R A Lemons (NewYork: North-Holland) p. 751,1983.
- [42] Einstein A Z. *Phys* 18: 121, 1917.
- [43] Kopfermamm H, Ladenburg R, *Phys. Chem. Abt. A*139: 375, 1928.
- [44] Maiman T H, *Nature (London)* 187: 493, 1960.
- [45] Andrews J G, Atthey D R, *J. Phys.* D9: 2181, 1976.
- [46] Laeng J, Stewart J G, Liou FW, *Int. J. Prod. Res.* 38: 3973–3996, 2000.
- [47] Dawas C (ed.), *Laser welding* (NewYork: McGraw-Hill), 1992.
- [48] DuleyWW (ed.), *Laser welding* (NewYork: JohnWiley & Sons) p. 1, 1999.
- [49] Draper CW, Poate J M, *Int. Met. Rev.* 30: 85–108, 1985.
-

-
- [50] Molian P A, Surface modification technologies-An engineers guide (ed.) T S Sudarshan (NewYork: Marcel Dekker) p. 421, 1989.
- [51] Draper CW, Ewing C A J. *Mater. Sci.* 19: 3815, 1984.
- [52] Chan K C, Liang J, *Compos. Sci. Technol.* 61: 1265–1270, 2001.
- [53] Chan K C, Yau C L, Lee W B, *J. Laser Appl.* 12: 34–40, 2000.
- [54] Chen G, Xu X, Poon C C, A C, *J. Appl. Mech.* 66: 772–779, 1999.
- [55] Magee J, Watkins K G, Steen W M, Calder N J, Sidhu J, Kirby Jn, *J. Laser Appl.* 10: 149–155, 1998.
- [56] Van den Burg M, De-Hosson J T M, *Interface Sci.* 3: 107–118, 1995.
- [57] Gaumann M, Bezencon C, Canalis P, Kurz W, *Acta Mater.* 49: 1051–1062, 2001.
- [58] Cleton, Jouneau P H, Henry S, Gaumann M, Buffat P A, *Scanning* 21: 232–237, 1999.
- [59] Ruys A J, Kerdic J A, Sorrell C C, *J. Mater. Sci.* 31: 4347–4355, 1996.
- [60] Wiehwa-Wang W, Holl M R, Schwartz D T, *J. Electrochem. Soc.* 148: C363–C368, 2001.
- [61] Greco A, Licciulli A, Maffezzoli A, *J. Mater. Sci.* 36: 99–105, 2001.
- [62] Lu L, Fuh J Y H, Chen Z D, Leong C C, Wong Y S, *Mater. Res. Bull.* 35: 1555–1561, 2000.
- [63] Daneshvar K, Raissi M, Bobbio S M, *J. Appl. Phys.* 88: 2205–2210, 2000.
- [64] Wanke M C, Lehmann O, Muller K, Qingzhe W, Stuke M, *Science* 275: 1284–1286, 1997.
- [65] Lehmann O, Stuke M, *Science* 270: 1644–1646, 1995.
- [66] Lu Y F, Qiu H, *J. Appl. Phys.* 88: 1082–1087, 2000.
- [67] Seifert G, Kaempfe M, Berg K J, Graener H, *Appl. Phys.* B71: 795–800, 2000.
- [68] Lu Y F, Song W D, Hong M H, Chong T C, Low T S, *Appl. Phys.* A64: 573–578, 1997.
- [69] Muggli P, Brogle R, Joshi C, *J. Optical Soc.* B12: 553–558, 1995.
- [70] Parmar R S, (ed.) *Welding engineering and technology* (New Delhi: Khanna), 1999.
- [71] Lancaster J F (ed.) *Metallurgy of welding* (London: George Allen and Unwin)
- [72] Yue T M, Lau W, *S Mater. Manuf. Process.* 11: 17–29, 1996.
- [73] Aluminium, article de wikipédia, l'encyclopédie libre, 2005.
- [74] Institut de soudure - www.isgroue.com.
- [75] Weckman D C, Kerr H W, Liu J T, *Metall. Mater. Trans.* B28: 687–700, 1997.
- [76] Wang H M, Chen Y L, Yu L G, *Mater. Sci. Eng.* A293: 1–6, 2000.
- [77] Leong K H, Kirkham P A, Jr Meinert K C, *J. Laser Appl.* 12: 181–184, 2000.
- [78] Hirose A, Todaka H, Yamaoka K, Kurosawa N, Kobayashi K F, *Metall. Mater. Trans.* A30: 2115–2120, 1999.
- [79] *Laser ablation and Desorption*. J.C. Miller, R.F. Haglund. *Experimental methods in the physical science* Vol 30. Academic Press, 1998.
-

-
- [80] A. Mele, A.G. Guidoni, R. Kelly, C. Flamini, S. Orlando, *Appl. Surf. Sci.* 109 584–590, 1997.
- [81] B.C Stuart, M.D. Feit, A.M. Rubenchik, B.W. Shore, M.D. Perry. *Phys. Rev. Lett.* Vol 74, 12, 2248 - 2252, 1995.
- [82] B.C. Stuart, M.D. Feit, S. Herman, A.M. Rubenchik, B.W. Shore, M.D. Perry. *J. Opt. Soc. Am. B*13, 2, 459, 1996.
- [83] L.V. Zhigilei. *Chem Rev.*, 103, 321- 347, 2003.
- [84] H. Li, S. Costil , V. Barnier, R. Oltra, O. Heintz, C. Coddet. *Surface coating & technologie*, 2006.
- [85] Chih-Yang Wu_, Chun-Wei Shu, Zhi-Chang Yeh *Optics and Lasers in Engineering* 44 (2006) 842–857
- [86] Paterson C, Holmes AS, Smith RW. *J Appl Phys* 1999;86:6538–46
- [87] W.M. Steen, *Laser Material Processing*, 3rd edition Springer, London, UK, 2003.
- [88] C. Köner, R. Mayerhofer, M. Hartmann, H.W. Bergmann, *Appl. Phys. A* 63 123, 1996.
- [89] P. Pasquet, R. del. Coso, J. Boneberg, P. Leiderer, R. Oltra, J.P. Boquillon, *Appl. Phys. A*69, 1999.
- [90] Jez weston, thèse Ph. D, Université de Cambridge, 1999.
- [91] Paray. F, B. Kulunk, et al. *Materials Science and technology* 12 (4): 315-322, 1996.
- [92] Polmear, J. R. *Light alloys*, Edward Arnold, 1989.
- [93] N. M. Bulgakova & A. V. Bulgakov. *Appl. Phys. A* 73, p.199-208 , 2001.
- [94] J. K. Chen, J. E. Beraun, L. E. Grimes & D. Y. Tzou. *AIAA J. Thermophys. Heat Transf.* 17, p.35-42 ,2003.
- [95] T. E. Itina, J. Hermann, Ph. Delaporte & M. Sentis. *Thin Solid Films* 453-454, p.513-517, 2004.
- [96] T. E. Itina, F. Vidal, Ph. Delaporte & M. Sentis. Numerical study of ultrashort laser ablation of metals and of laser plume dynamics. *Appl. Phys. A* 79, p.1089-1092, 2004.
- [97] S. Laville, F. Vidal, T. W. Johnston, O. Barthélemy, M. Chaker, B. Le Drogoff, J. Margot & M. Sabsabi. *Phys. Rev. E* 66, p.066415,2002.
- [98] F. Vidal, T. W. Johnston, O. Barthélemy, M. Chaker, B. Le Drogoff, J. Margot & M. Sabsabi. *Phys. Rev. Lett.* 86, p.2573-2576, 2001.
- [99] F. Vidal, T. W. Johnston, J.-C. Kieffer & F. Martin. *Phys. Rev. B* 70, p.184125, 2004.
- [100] J. P. Dufour, M. Gerland, P. Darquey, *Scripta metallurgica*, Vol 23, pp. 283-488, 1989.
- [101] Jean-Philippe Colombier, thèse doctorat, Université Jean Monnet de Saint-Etienne,2005.
- [102] A. Ampere Tseng, ying-Tung Chen, Kung-Jeng Ma, *Optics and lasers in Engineering*, 41, 827-847, 2004.
-

- [103] T. Lippert, " Polymers and light". Ed. Springer, 2004.
 - [104] R. Srinivasan, B. Braren. Chem. Rev. 89, 1303 -1316, 1989.
 - [105] L.V. Zhilgei, B.J. Garrison. J. Appl. Phys. 88, 3, 1281 - 1298, 2000.
 - [106] W. Kautek, J. Kruger, S. Sartania, C. Speilmann, F. Krausz, Appl phys Lett, 69(21): 3146-8, 1996.
 - [107] J. M. Fishburn, M. J. Withford, D. W. Coutts, J. A. Piper, Appl. Surf. sci, 252, 5182-5188, 2006.
 - [108] N. M. Bulgakova & I. M. Bourakov. Appl. Surf. Sci. 197/198, p.41-44, 2002.
 - [109] L. Baziz, A. Nouri, Y. A. Yousef, laser physics, Vol. 16, No. 12, pp. 1643-1646, 2006.
 - [110] L. Baziz, A. Nouri, Y. A. Yousef, Abhath Al-Yarmouk (Basic science and Engineering), Vol. 15, No. 2, pp. 257-264, 2006.
-

TITLE :

**STUDY OF LASER- METAL INTERACTION
APPLICATION OF ALUMINIUM ALLOYS**

ABSTRACT

During the last years the laser technology is largely used in industry. Among the applications of the laser on metals one quotes primarily: the welding, cutting, the drilling and surface treatments.

We studied in this work the laser interaction –metal and one specified our study on two types of commercial aluminium alloys industrial and recovered, by the use of two pulse lasers; the laser Nd: Yag and the laser excimère CO₂ laser is also used.

Then we analyzed the changes which appear after the laser irradiation such as: microstructural changes, chemical distribution of the elements, depth of craters and hardening, by various experimental techniques such as the electron microscope with sweeping coupled with energy dispersion spectroscopy X, the profilometry and measurements of microhardness.

Key word: Industrial aluminium, recovered aluminium, laser irradiation, ablation threshold.

Titre :

**ETUDE DE L'INTERACTION LASER-METAL
APPLICATION SUR LES ALLIAGES D'ALUMINUM**

Résumé

Pendant les dernières années la technologie laser est largement utilisée dans l'industrie. Parmi les applications du laser sur les métaux on cite essentiellement : la soudure, la découpe, le perçage et les traitements de surface.

On a étudié dans ce travail l'interaction laser –métal et on a appliqué notre étude sur deux types d'alliages d'aluminium commercial, industriel et récupéré, par l'utilisation de deux lasers impulsionnels; le laser Nd: Yag et le laser excimère. Un laser CO₂ est aussi utilisé.

Puis on a analysé les changements qui apparaissent après l'irradiation laser tels que : les changements microstructuraux, la distribution chimique des éléments, la profondeur de des cratères et le durcissement, par différentes techniques expérimentales telles que le microscope électronique à balayage couplé à la spectroscopie X à dispersion d'énergie, la profilométrie et les mesures de microdureté.

Mot clés : Aluminium industriel, aluminium récupéré, irradiation laser, seuil d'ablation,.

العنوان:

دراسة التفاعل ليزر - معدن

تطبيق على سبائك الألمنيوم

ملخص

أصبحت في السنوات الأخيرة تكنولوجيا الليزر واسعة الاستعمال خاصة في الصناعة و من بين تطبيقاته على المعادن نذكر التلحيم، القطع، الثقب و المعالجات السطحية. سنحاول في هذا العمل دراسة التفاعل ليزر - معدن و خصصنا دراستنا على نوعين من سبائك الألمنيوم التجاري، الصناعي و المسترجع، و هذا باستعمال نوعين من الليزر المتقطع Nd:Yg و excimère و كذلك ليزر CO₂. وقد حللنا التغيرات التي طرأت على العينات بعد المعالجة بالليزر مثل: التغيرات البنيوية، توزيع العناصر الكيميائية، عمق المناطق المشعة و الصلادة بمختلف التقنيات: مثل المجهر الالكتروني الماسح (MEB) المربوط بمطيافية الأشعة السينية و قياسات الصلادة.

الكلمات الدالة: ألمنيوم صناعي، ألمنيوم مسترجع، ليزر، تشعيع، عتبة الاستئصال.