Chapitre 4.5 - APPLICATIONS des LASERS de FORTE PUISSANCE à l'USINAGE et à la TRANSFORMATION des MATÉRIAUX

4.5.1 INTRODUCTION

Les lasers génèrent un rayonnement faiblement divergent et de grande cohérence. Du point de vue énergétique, il existe pour chaque type de laser une puissance maximale dont la valeur dépend du matériau actif et aussi des astuces technologiques utilisées par le constructeur. Il est convenu d'appeler lasers de forte puissance (ou lasers industriels), ceux dont le faisceau focalisé sur un matériau, induisent des transformations thermiques, rendant possibles des applications comme la découpe et le percage de tous types de matériaux, le soudage et le traitement thermique de matériaux métalliques (Fig. 4-5-1). Ces transformations apparaissent lorsque, dans le faisceau focalisé dont le diamètre se situe entre 10 et 100 microns, l'irradiance est voisine ou supérieure à 10 kW/cm². En mode pulsé plusieurs types de lasers permettent d'atteindre ces valeurs; on sait même, dans des cas spéciaux, générer des puissances instantanées de 10¹⁰ W/cm². Il faut cependant, pour traiter ou usiner un volume suffisamment important de matière, disposer d'un laser pouvant fournir une puissance moyenne se chiffrant en centaines de watts. Il n'existe que très peu de lasers capables de telles performances, les deux plus courants étant le laser à CO2 (jusqu'à 40 kW à la longueur d'onde de 10,6 μ m) et le laser à Nd:YAG (jusqu'à 3 kW à λ =1,06 μ m). Le laser à rubis (λ =0,69 μ m) peut être utilisé pour le percage de certains matériaux. Enfin, des lasers à excimères émettant jusqu'à 300 watts dans la partie UV du spectre ont été développés et sont venus compléter la gamme des lasers de forte puissance utiles pour l'usinage et le traitement de matériaux.



Fig. 4.5-1 : Applications des lasers de puissance en fonction de la densité de puissance et de la durée d'interaction.

La fenêtre infra-rouge du spectre ém n'est pas la mieux adaptée à l'usinage et au traitement des métaux, ceux-ci étant peu absorbants à ces longueurs d'onde. Heureusement, la faible absorption (moins de 10%) observée à la température ordinaire est améliorée au fur et à mesure que la température s'élève. Le rendement global du couplage faisceau-matériau reste en général inférieur à 50% ; ce mauvais rendement est compensé par des avantages par rapport à d'autres sources d'énergie:

très bonne localisation de l'énergie apportée, zone affectée thermiquement négligeable. Malgré une mise en œuvre qui diffère de celle d'une machine classique, la machine à laser est devenue une réalité industrielle dans la plupart des secteurs de l'activité économique.

Nous décrivons dans ce chapitre les principaux effets des faisceaux de laser de forte puissance sur les matériaux, ainsi que les applications correspondantes.

4.5.2 INTERACTION ENTRE FAISCEAUX LASER DE FORTE PUISSANCE ET MATÉRIAUX

4.5.2.1 INTRODUCTION. LES PARAMÈTRES DE L'INTERACTION.

L'interaction entre un faisceau de forte puissance et un matériau est définie par les paramètres du faisceau, ceux du matériau mais aussi par ceux de l'environnement au-dessus de la surface. La figure 4-5-2 indique les conditions générales de l'interaction, telles qu'on les rencontre dans les applications industrielles.



Fig. 4.5-2 : Conditions d'interaction laser -matière dans les applications des lasers de forte puissance.

L'absorption du rayonnement se produit dans une mince couche superficielle, mais le résultat de l'interaction dépend beaucoup des propriétés volumiques du matériau ainsi que des conditions de l'environnement au-dessus de la surface

Le faisceau laser est caractérisé par les paramètres suivants :

- Longueur d'onde d'émission,
- Variation temporelle de la puissance (continue ou pulsée),
- Caractéristiques spatiales : diamètre et divergence,

- Répartition de l'irradiance dans une section transverse (structure de modes spatiaux) de la zone focalisée et stabilité spatiale,

- État de polarisation.

Pour un faisceau continu il faut préciser :

- la puissance moyenne et la stabilité temporelle de la puissance spécifiée.

Pour un faisceau pulsé il faut connaître :

- la durée d'impulsion et fréquence de répétition,
- l'énergie d'impulsion et la densité d'énergie (J/cm²).

Le <u>matériau</u> intervient par ses propriétés de surface (pouvoir réflecteur, rugosité) ainsi que par ses propriétés thermophysiques de volume (conductivité, diffusivité, chaleur spécifique, chaleur latente de fusion, chaleur latente de vaporisation).

L'<u>environnement</u> influe sur les conditions d'interaction par le gaz qui est apporté en surface ainsi que par le mélange gazeux, souvent ionisé, qui apparaît aux fortes densités de puissances du faisceau.

Les effets d'un faisceau laser sur un matériau sont multiples. Les grandes densités de puissance se manifestent avant tout par les phénomènes thermiques, mais au-delà de 0,1 MW/cm², apparaissent des effets comme l'ionisation en cascade donnant lieu à un plasma dont il faut tenir compte pour les applications.

4.5.2.2 - COUPLAGE DE L'ÉNERGIE LASER À LA MATIÈRE. EFFETS ASSOCIÉS.

4.5.2.2.1 Propriétés optiques des surfaces

Le faisceau laser incident sur un matériau se divise dans le cas général suivant :

- un faisceau réfléchi par la surface,

- un faisceau diffusé si la surface est rugueuse,

- un faisceau transmis. La transformation d'un matériau par un rayonnement est possible si celui-ci est opaque à la longueur d'onde considérée. La partie de l'énergie du faisceau absorbée par le matériau se transforme essentiellement en énergie thermique. L'interaction entre le faisceau qui se manifeste sous forme de dispersion et d'absorption s'exprime par un indice complexe donné par :

 $n_c = n + i k_e$; dans laquelle n est l'indice de réfraction du matériau et k_e le coefficient d'extinction. Le coefficient de réflexion R est donné par l'expression

(4.5-1)
$$R = \frac{(n-1)^2 + k_e^2}{(n+1)^2 + k_e^2}$$

Pour une irradiance I₀, incidente sur une surface de coefficient de réflexion R, l'irradiance absorbée I_{abs} est donnée par :

$$(4.5-2)$$
 I_{abs} = $(1-R)$. I₀.

La valeur de R dépend de la nature du matériau mais aussi de son état de surface.

R est également une fonction de la longueur d'onde et de la température. Lorsqu'on considère les courbes donnant R en fonction de la longueur d'onde λ (Fig. 4.5-3), on constate que pour les longueurs d'onde supérieure à 5 µm, la plupart des métaux réfléchissent plus de 90% de l'énergie. Cela signifie que l'énergie laser, au moins au début l'interaction, est très mal utilisée. Un matériau comme l'argent réfléchit 98% d'un faisceau à 10,6 µm (R = 0,98) et se prête donc mal à l'usinage par laser à CO₂. La situation est un peu meilleure avec l'acier dont le coefficient de réflexion à 10,6 µm est égal à 0,95. En pratique, c'est à cause de la diminution de R avec la température que le bilan énergétique global de l'usinage laser reste satisfaisant. Ainsi à la longueur d'onde de 1,06 µm (laser à Nd-YAG), le coefficient de réflexion d'une surface d'aluminium soumise à une densité de puissance de 10⁷ W/cm², passe de 0,7 à 0,2 en moins de 0,2 ms [*Ready*.78]. L'acier soumis à une densité de puissance de 10⁸ W/cm² à 10,6 µm, ne réfléchit plus que 45% du rayonnement après seulement 0,5 µs d'interaction.

Avec les matériaux non métalliques la situation est plus simple et plus favorable. Le rayonnement infra-rouge est absorbé à 90% par la plupart d'entre eux; ce pourcentage varie peu avec la température. La pénétration du rayonnement laser dans le matériau est décrite par l'équation :

(4.5-3) I (x) = I₀ (1-R)
$$e^{-\alpha x}$$

I(x) est l'irradiance du rayonnement à une profondeur x dans le matériau; α le coefficient d'absorption du rayonnement par la matière par unité d'épaisseur, est lié au coefficient d'extinction par l'expression :

$$(4.5-4) \qquad \alpha \left[m^{-1} \right] = \frac{4\pi k_e}{\lambda}.$$



fonction de la longueur d'onde

Ces courbes montrent l'allure de la variation mais ne donnent pas les valeurs exactes. 1: argent; 2: cuivre; 3: tantale; 4: aluminium; 5: nickel; 6: acier au carbone.

La relation (11-2) montre que 63% de l'énergie utile est absorbée par une couche de matière d'épaisseur d = α^{-1} , soit 0,1 à 1 micron pour les métaux. L'absorption de l'énergie rayonnante par la matière est le résultat de l'interaction entre les électrons et le champ électrique du rayonnement. Les électrons, mis en mouvement par le champ, entrent en collision avec le réseau cristallin, qui se met en vibration. L'énergie apparaît alors dans la pièce sous forme thermique. Ainsi, du point de vue de l'ingénieur de production, le laser d'usinage peut être assimilé à une source de chaleur localisée sur une petite surface du matériau. Parmi les autres sources d'énergie, seule le faisceau d'électrons peut rivaliser avec le laser pour la précision avec laquelle de l'énergie peut être transférée à la matière.

L'absorptivité de rayonnement par un matériau peut être modifié par un mauvais état de surface (rugosité, oxydation, impuretés diverses). Outre le faisceau réfléchi, on observe alors la diffusion d'une partie du rayonnement. Il est cependant difficile dans les tentatives de modélisation de l'interaction d'évaluer précisément la quantité d'énergie absorbée car les paramètres changent rapidement avec la température. La figure ci-aprés montre l'allure de la variation de l'absorptivité d'un métal en présence d'un faisceau laser dans l'IR.

4.5.2.2.2 Variation des conditions superficielles - Effet d'un recouvrement

En déposant sur une surface métallique une couche mince d'une substance très absorbante à la longueur d'onde du laser, on peut dans certains cas améliorer le rendement de l'interaction. Le dépôt peut se faire par phosphatation, graphitage ou peinture.



Fig. 4.5-4 : Variation de l'absorptivité d'un matériau métallique (ici Al) en fonction de la température à $\lambda = 1\mu$ m.

Cette courbe explique pourquoi les métaux, bien que très réfléchissants dans l'IR, peuvent quand même être découpés ou soudés par les faisceaux de lasers à CO2 ou Nd:YAG.

4.5.2.2.3 Influence de la polarisation sur le couplage de l'énergie laser dans un matériau

Les propriétés optiques des surfaces des matériaux dépendent de l'état de polarisation du faisceau incident comme le rappelle la figure ci-après. A une incidence de 30°, la composante normale de polarisation est réfléchie environ deux fois mieux que la composante parallèle le rayonnement non réfléchi étant absorbé; de plus les deux composantes de polarisation subissent un retard qui n'est en général pas identique. Il en résulte que l'absorption d'énergie est sensible à la polarisation et que le rayonnement réfléchi présente un état de polarisation différent de celui du faisceau incident. Ce phénomène est gênant dans un système de guidage de faisceau laser, puisqu'il devient difficile de prévoir l'état de polarisation à la sortie.



Fig. 4.5-5 : Coefficient de réflexion de la surface d'un matériau absorbant en fonction de l'angle d'incidence et de la direction de polarisation.

- 1 : polarisation linéaire, normale au plan d'incidence.
- 2 : Polarisation linéaire, parallèle au plan d'incidence.

L'influence de la polarisation sur le couplage laser-matériau apparaît dans certaines applications comme la découpe de tôles minces avec un faisceau présentant une polarisation linéaire. Il est donc préférable alors d'utiliser un faisceau laser à polarisation circulaire.

4.5.2.2.4 Les effets des faisceaux laser de forte irradiance sur la matière

Lorsqu'un matériau est soumis à l'action d'un faisceau laser de forte irradiance, on observe un ou plusieurs des effets suivants :

- Effets thermiques : Chauffage, fusion, vaporisation, ionisation
- Effets mécaniques : onde de choc

- Effets thermochimiques : cassure de molécules + expulsion de matière sous l'effet des fortes pressions créées.



Fig. 4.5-6 : Interaction entre un faisceau laser IR de forte puissance et un matériau absorbant à la longueur d'onde du laser. Effets thermiques.

Le rayonnement subit des réflexions et de la diffusion en surface. L'absorption se fait dans une très mince couche superficielle, provoquant une rapide élévation de la température de surface. L'énergie absorbée se propage sous forme thermique et provoque des

transformations dans un volume d'autant plus grand que la quantité d'énergie apportée est élevée

4.5.2.3 - EFFETS THERMIQUES

4.5.2.3.1 Introduction

Soit un rayonnement d'intensité I_{surf} en surface d'un matériau ayant un coefficient d'absorption α par unité de longueur. L'absorbtion de rayonnement par un matériau entraîne une diminution d'intensité avec la distance de propagation z dans le matériau :

(4.5-5) $I(z) = A I_{surf} e^{-\alpha z}$

A une distance z de la surface, la puissance absorbée par unité de surface est donnée par

(4.5-6)
$$P_a(z) = A I_{surf} (1 - e^{-\alpha z})$$

soit une puissance asorbée par unité de longueur et par unité de section à cet endroit :

(4.5-7)
$$\Phi_{a}(z) \left[W/cm^{3} \right] = \frac{dP_{a}}{dz} = A I_{surf} \alpha e^{-\alpha z}$$

4.5.2.3.2 Chauffage sans changement de phase

Sous l'action de la chaleur, la matière se transforme. La nature exacte de la transformation dépend de la densité d'énergie rayonnante disponible et de la durée de l'interaction.

Le diagramme caractéristique des transformations successives est présenté sur la figure 4-5-7. La portion A-B de la courbe correspond au chauffage du matériau de la température ambiante T_0 jusqu'à sa température de fusion T_F . Le segment BC correspond à la fusion de la matière. La température reste fixe pendant la transformation et le corps absorbe de l'énergie sous la forme de chaleur latente de fusion. De C à D, la matière, sous forme liquide s'échauffe jusqu'à la température de vaporisation T_V . De D à E, le matériau se transforme en vapeur. La chaleur totale Q absorbée par un volume dV de matière vaporisée est égale à :

(4.5-8)
$$Q = \rho dV [C_{th} (T_v - T_0) + L_F + L_v]$$

où ρ (g.cm⁻³) est la masse volumique du matériau, C_{th} (J.g⁻¹.°C⁻¹) la chaleur spécifique, L_F est la chaleur latente de fusion, L_V la chaleur latente de vaporisation. Cette relation ne tient pas compte de la petite variation de volume du corps pendant le chauffage. Le chauffage peut se produire très rapidement sous l'effet d'un rayonnement intense. Les pertes dues à la conduction thermique sont faibles si le rayonnement se présente sous la forme d'une impulsion courte et la zone affectée thermiquement reste limitée au point d'impact du faisceau.

La propagation de la chaleur dans un matériau est décrite par l'équation suivante, donnée par la thermodynamique :

(11-4)
$$C_{\text{th},v} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{\text{th}} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{\text{th}} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{\text{th}} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + S_{\text{th}};$$



Fig. 4.5-7 : Évolution de la température d'un matériau irradié par un faisceau laser.

De A à B: chauffage dans la phase solide; de B à C : fusion; de C à D chauffage dans la phase liquide; de D à E : vaporisation.

 K_{th} (W.cm⁻¹.°C⁻¹) est la conductivité thermique, $C_{th,v}$ (J.cm⁻³.°C⁻¹) est la chaleur spécifique par unité de volume. L'équation (11-4) a pour solution la distribution spatiale et temporelle de température T(x,y,z,t) dans le matériau soumis à une source de chaleur dont la distribution est décrite par $S_{th}(x,y,z,t)$.





(a) A l'équilibre le flux de chaleur Φ_{th} est constant dans le matériau et la température varie quasi-linéairement de T₀ à l'entrée à T₁ en sortie (b).

Le transfert de chaleur dans un solide est illustré sur la figure 4-5-8. A l'équilibre la température varie de T_0 à la face d'entrée, à T_1 à la face de sortie suivant la relation :

(4.5-9)
$$\frac{dU}{dt} = K_{th} \frac{T_0 - T_1}{e} ds$$

où dU/dt est la quantité d'énergie absorbée par unité de temps par l'élément dS de surface du solide d'épaisseur e. Pour un flux de chaleur constant, la quantité $\Delta T = T_0 - T_1$ est inversement proportionnelle à la conductivité thermique du matériau. La chaleur spécifique, autre paramètre important, indique la quantité d'énergie ΔU emmagasinée par un volume unitaire de matière lorsque sa température augmente de ΔT . On a en effet la relation :

(4.5-10)
$$\Delta U = \rho C_{\text{th}} dV \Delta T$$
.

Les deux aspects thermiques, stockage de l'énergie et diffusion de la chaleur, sont contenus dans le terme de diffusivité thermique ou coefficient de diffusion D_{th} (cm²/s) défini par la relation suivante :

(4.5-11)
$$D_{th} = \frac{K_{th}}{\rho C_{th}}$$

Le coefficient de diffusion caractérise la vitesse à laquelle le matériau accepte et diffuse la chaleur. La chaleur diffuse d'autant plus rapidement dans le corps que le coefficient de diffusion est élevé : une faible diffusivité thermique signifie que la pénétration de la chaleur dans le matériau sera limitée. Dans ce cas, la fusion d'une épaisseur suffisante de matière pour une opération de soudage sera difficilement obtenue. Les opérations de perçage ou de gravure seront par contre réalisées facilement.

L'analyse théorique des problèmes de thermique laser est rendue délicate par le fait que les paramètres K_{th} et C_{th} des métaux varient en même temps que la température. Pour résoudre analytiquement l'équation (), on introduit une valeur équivalente de K_{th} et C_{th} qui tient compte de leur évolution en fonction de la température. Les conditions aux limites sont définies par la distribution d'énergie dans le faisceau laser.

4.5.2.3.3 Influence du profil spatial du faisceau : faisceau continu de profil uniforme

Dans le cas où une mince couche superficielle du solide est uniformément chauffée par un faisceau de densité de puissance I_0 à partir de l'instant t=0, la température à l'intérieur du corps à une profondeur z, est donnée par [*Carlslaw.59*] :

ds

(4.5-12)
$$T(z,t) = \frac{2 I_{abs}}{D_{th}} \sqrt{D_{th} t} \text{ ierf} \left(\frac{z}{2 \sqrt{D_{th} t}}\right)$$

Iabs est l'irradiance absorbée par le matériau; ierf est l'intégrale de la fonction erreur

(4.5-13) (a) erf (z) =
$$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{z}^{\infty} \exp(-s^{2})$$

(b) ierf (z) = $\int_{z}^{\infty} \exp(s) ds$

La température de surface du solide augmente suivant la relation :

(4.5-14)
$$T(0,t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} I_{abs} \sqrt{\frac{t}{D_{th}}}$$

La profondeur de pénétration z_{th} de la chaleur après un temps t est donnée par :

$$(4.5-15)$$
 $z_{th} = 2 \sqrt{D_{th} t}$

Pour un matériau en couche mince d'épaisseur e on utilise la notion de constante de temps thermique τ_{th} évaluée par l'expression :

(4.5-16)
$$\tau_{\rm th} = \frac{e^2}{4 D_{\rm th}}$$

 τ_{th} représente la durée de l'impulsion laser nécessaire pour que la chaleur traverse une plaque d'épaisseur e; τ_{th} peut être également défini comme le temps nécessaire pour que la température de la face de la plaque non exposée au rayonnement, atteigne 37% de la température de la face avant, soumise au rayonnement. La durée de l'impulsion capable de faire fondre une plaque sur toute son

épaisseur est sensiblement égale à la constante de temps thermique de celle-ci. Le tableau 11-1 donne quelques valeurs de diffusivité à la température ordinaire et les constantes de temps thermiques de plaques de un millimètre d'épaisseur.

Matériau	Diffusivité thermique (cm2/s)	Constante de temps thermique en ms (pour e = 1 mm)
Argent	1,7	1,4
Aluminium	0,85	2,9
Laiton	0,38	6,6
Cuivre	1,14	2,2
Fer	0,2	12,4
Acier	0,06	44,6
Nickel	0,22	11,4
Titane	0,08	31

Tableau 11.1 : Diffusivités thermiques et constantes de temps thermique de quelques matériaux courants

Le tableau ci-dessus permet de constater que les alliages diffusent moins bien la chaleur que les métaux purs. Du point de vue de l'usinage laser, cela signifie que les alliages se prêtent moins bien à la soudure mais mieux au perçage, que les métaux purs. On peut également remarquer que les constantes de temps thermique de plaques de un mm ou moins correspondent aux durées des impulsions de lasers solides (quelques millisecondes); ces lasers peuvent donc être utilisés pour le soudage. Les lasers solides déclenchés ont des impulsions beaucoup plus courtes $(10^{-6} à 10^{-8} s)$ et sont donc utiles pour un chauffage très rapide allant jusqu'à la vaporisation ; les applications correspondantes sont le perçage et le marquage.

Une bonne diffusivité thermique favorise l'opération de soudage, mais en même temps augmente les pertes puisque la chaleur se propage rapidement dans toutes les directions. En pratique, des essais sont nécessaires pour trouver un compromis entre les différents paramètres du rayonnement laser (durée d'impulsions, fréquence d'impulsions, puissance moyenne).

Afin de réduire au minimum la zone affectée thermiquement par diffusion de la chaleur, la puissance laser à utiliser doit être suffisamment élevée. Pour certaines applications (soudage, traitement thermique) la surface du matériau ne doit cependant pas atteindre la température de vaporisation. Dans le cas de l'acier par exemple, la vaporisation de la surface commence après 4 μ s environ, lorsque la densité de rayonnement atteint 1 MW.cm⁻² et après seulement 50 ms si la densité n'est que de 10 kW.cm⁻². Lorsque la surface commence à se volatiliser, la couche fondue n'a atteint qu'une épaisseur de 3 μ m dans le premier cas alors que dans le second cas, elle est de 0,5 mm.

4.5.2.3.4 Influence du profil spatial du faisceau : faisceau à profil Gaussien

La relation (....) est obtenue dans l'hypothèse d'une surface uniformément chauffée par le rayonnement. On s'approche un peu plus de la réalité en considérant une source de chaleur de forme circulaire, de rayon W. Considérons d'abord le cas où l'irradiance est uniforme dans la section du faisceau. La puissance contenue dans le rayonnement incident étant P, l'irradiance absorbée par le matériau I_{abs} est donnée par :

(4.5-17)
$$I_{abs} = \frac{(1 - R) P}{\pi W^2}.$$

La température à l'intérieur du matériau varie à partir du centre de la surface chauffée suivant [Carlslaw.59] :

(4.5-18)
$$T(z,t) = \frac{I_{abs} z_{th}}{K_{th}} \left[\operatorname{ierf}\left(\frac{z}{z_{th}}\right) - \operatorname{ierf}\left(\frac{\sqrt{z^2 + W^2}}{z_{th}}\right) \right]$$

La profondeur de pénétration z_{th} a été définie par (11.10). Pour exploiter la relation (11-12), Duley [*Duley.83*] introduit deux paramètres sans dimension : $\Theta = \frac{W K_{th}}{I_{abs}} T$ proportionnel à la

température et $\Gamma = \frac{2\sqrt{D_{th}}}{W}\sqrt{t}$ proportionnel à \sqrt{t} . En pratique le faisceau a souvent un profil gaussien. La correction nécessaire pour tenir compte de l'allure gaussienne est la suivante :

(4.5-19)
$$\Theta_{Gauss}(z,t) = \frac{0.88 \text{ W K}_{th}}{I_{abs}} T(z,t)$$

La variation de Θ en fonction de Γ^2 est représentée sur la figure 4-5-9. La courbure z=0 montre l'évolution de la température à la surface. Les deux courbes indiquent l'évolution de la température à des profondeurs égales respectivement à une fois et deux fois le rayon de la surface chauffée. La température augmente rapidement pendant une durée voisine de W²/D_{th}, puis lentement au-delà.

La relation (11-13) montre que la température de la surface chauffée tend vers la valeur :

(4.5-20)
$$T_{surf} = \frac{(1-R) P}{\pi W^2 K_{th}}.$$

La relation (11-20) permet de calculer la puissance minimale nécessaire pour que la surface chauffée commence à fondre. Cette condition est donnée par T $(0, \infty) = T_F$, T_F étant la température de fusion. Le tableau ci-après donne le résultat du calcul pour quelques métaux courants. Les valeurs de densité de rayonnement ont été obtenues en prenant le coefficient de réflexion du matériau pour $\lambda = 10.6 \,\mu\text{m}$ au voisinage de la température de fusion et pour un chauffage dans le vide. On remarque qu'il faut environ $10^4 \,\text{W/cm}^2$ pour que les métaux commencent à fondre.



Fig. 4.5-9 : Évolution de la température en fonction du temps à différentes profondeurs d'un matériau solide chauffé par un faisceau laser à profil gaussien.

Matériau	Au	Al	W	Mo	Mg	Pt	Ni	Cu	Zn	Sn	Pb
Intensité incidente (kW/cm2)	83	40	28	23	20	17	14	11	10	3	1

Densité de puissance de rayonnement de laser à CO₂ appliqué à un matériau épais, provoquant un début de fusion de la surface.

4.5.2.3.5 Influence de la durée de l'interaction

Le calcul exact de la distribution spatiale de température, créée dans un matériau sous l'action d'un faisceau gaussien instantané a été fait par Ready [*Ready*.71]. La distribution d'irradiance qui résulte de l'apport instantané à la surface d'un matériau, d'une quantité d'énergie U_0 distribuée suivant une gaussienne est donné par l'expression suivante :

(4.5-21)
$$T_{inst,Gauss}(r, z, t) = \frac{U_0}{\rho C_{th} \sqrt{\pi D_{th} t} (4D_{th}t + W^2)} \exp\left[2\left(-\frac{z^2}{4D_{th} t} - \frac{r^2}{4D_{th}t}\right)\right]$$

En pratique l'apport d'énergie se fait pendant un temps limité de durée Δt .

Considérons les 2 cas suivant [Bass.80]:

1^{er}cas : impulsion 'courte', pendant laquelle la chaleur n'a pas le temps de diffuser latéralement de façon significative.

La condition d'impulsion courte est traduite par la relation :

(4.5-22) $w >> 2\sqrt{D_{th}\Delta t}$,

où Δt est la durée de l'impulsion. La distribution de température créée par une impulsion vérifiant la relation (11-22), est obtenue en remplaçant dans (11-21) U₀ par I₀ Δt . M. Bass [*Bass.80*] donne l'exemple du cuivre pour lequel D_{th} = 1 cm².s⁻¹. Si le rayon W du faisceau est égal à 0,5 mm, l'impulsion doit avoir une durée telle que

(4.5-23) (a) $\Delta t \ll 0.6 \text{ ms}$

Pour l'acier ($D_{th} \approx 0,15 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$) la condition (11-16) donne une durée d'impulsion:

(b) $\Delta t < 4$ ms.

Les lasers Nd-YAG déclenchés fournissent des impulsions dont la durée satisfait aux conditions (11-23a,b). La relation (11-121 peut alors être utilisée pour déterminer la distribution de températures due à une impulsion. En pratique, le chauffage par impulsions est difficile à décrire, car en général on ne connaît pas la forme exacte des impulsions. On peut cependant estimer que pendant une impulsion de durée Δt , le matériau est chauffé sur une profondeur voisine de $\sqrt{D_{th}} t$. La fraction d'énergie laser absorbée étant une fonction de la température, il est donc souhaitable d'élever rapidement la température de la surface pour arriver rapidement à la fusion. Les impulsions délivrées par certains lasers à CO₂, peuvent être mises en forme pour que l'impulsion commence par un pic de grande irradiance. Le profil d'une telle impulsion est présenté sur la figure ci-après.



Fig. 4.5-10 : Impulsion de laser mise en forme pour une meilleure efficacité de couplage de l'énergie laser dans le matériau.

L'irradiance instantanée plus élevée au début de l'impulsion permet d'élever plus rapidement la température superficielle et d'améliorer ainsi le couplage de l'énergie laser dans la pièce. On parle parfois de 'super impulsion'.

2^{ème} cas : Impulsions longues et rayonnement continu.

Pour obtenir la distribution de température due à un faisceau Gaussien agissant pendant une durée Δt , il faut intégrer la relation (11-21). Ce calcul est assez compliqué et ne donne un résultat simple que pour le point se trouvant au centre de la surface chauffée :

(4.5-24) T(0,0,
$$\Delta t$$
) = $\frac{I_{abs}}{\sqrt{\pi}} \frac{W_0}{D_{th}} \arctan \sqrt{\frac{4D_{th} \Delta t}{W_0^2}}$

 W_0 est le rayon du faisceau laser. Il est facile de vérifier que la relation (11-10) obtenue dans l'hypothèse du chauffage par un faisceau circulaire uniforme d'un solide semi-infini, et la relation (11-19), correspondant au faisceau Gaussien, donnent des résultats comparables. La différence entre les 2 températures $T(0,0,\infty)$ n'est que de 10% environ. Pour une description simplifiée de la pénétration de la chaleur dans un solide irradié par un faisceau laser, il suffit donc de considérer que l'énergie est introduite de façon uniforme sur un disque de rayon W et de calculer la température T(z,t) à un instant t par la relation (11-12).

4.5.2.3.6 Chauffage de la phase liquide

Nous considérons maintenant le problème de la fusion de la matière, tel qu'il se pose dans une opération de soudage au laser. Il s'agit, au cours de cette opération de chauffer le matériau pour que l'état de fusion soit atteint sur une épaisseur déterminée, avant que la surface commence à vaporiser (Fig. 11).



Fig. 4.5-11 : Fusion de la matière par un faisceau laser d'irradiance uniforme.

Pour les applications de soudage et d'alliage de surface, la surface ne doit pas atteindre l'état de vaporisation. Pour un rayonnement d'irradiance donnée, il existe une profondeur maximale ΔZ_{liqu} de matière qui peut être fondue sous l'action du faisceau laser sans qu'il y ait perte de matière par vaporisation.

Le modèle précédemment décrit permet de prévoir que sous l'action d'un rayonnement absorbé d'irradiance I_{abs} , la surface du solide commence à fondre après un temps Δt_F :

(4.5-25)
$$\Delta t_{\rm F} = \frac{\pi \ {\rm K}^2_{\rm th,sol} \ \left({\rm T}_{\rm F} - {\rm T}_0\right)^2}{4 {\rm D}_{\rm th,sol} \ {\rm I}^2_{\rm abs}}$$

 $K_{th,sol}$ et $D_{th,sol}$ caractérisent le matériau solide ; T_F est la température de fusion, T_0 est la température ambiante. La profondeur de pénétration de la chaleur Z_{th} dans le matériau après un temps d'interaction Δt est donnée par :

$$(4.5-26) \quad z_{th}(\Delta t) = 2 \sqrt{D_{th} \Delta t}$$

La profondeur Δz_{liqu} déjà fondue à l'instant où la surface atteint la température de vaporisation est donnée par la relation :

(4.5-27)
$$\Delta z_{\text{liqu}} = 1,2 \frac{K_{\text{th,liqu}}}{I_{\text{abs}}} (T_{\text{v}} - T_{\text{F}}).$$

En soudage de tôles minces, Δz_{liqu} correspond approximativement à l'épaisseur maximale qui peut être soudée. En pratique, le temps d'interaction nécessaire pour qu'une plaque d'épaisseur e soit fondue sur toute son épaisseur sous l'action du faisceau laser est égal à la constante de temps thermique τ_{th} définie précédemment (relation 11-16).

4.5.2.3.7 Vaporisation

La surface irradiée atteint la température de vaporisation T_V après un temps Δt_V donné par [*Ready*.71]:

(4.5-28)
$$\Delta t_{\rm V} = \frac{\pi}{4} \frac{\rho K_{\rm th} C_{\rm th}}{(1-R)^2 I_{\rm abs}^2} (T_{\rm V} - T_0)^2$$

Lorsque la température T_v est atteinte, l'interface gaz - liquide se déplace à la vitesse V_{gl} :

$$(4.5-29) \quad V_{gl} = \frac{I_{abs}}{\rho L_V}$$

où L_V (J.s⁻¹) est la chaleur latente de vaporisation; cette relation a été obtenue en supposant que $L_V >> L_F$).

La relation (11-29) permet d'évaluer la profondeur de perforation par une impulsion de durée connue. En pratique, les valeurs de profondeur obtenues sont en général inférieures à celles ainsi obtenues, car il existe des pertes de chaleur par convection dont il n'est pas tenu compte dans le modèle. Ces pertes sont négligeables dans le cas d'impulsions intenses et courtes et les opérations de perçage sont mieux réalisées avec ce type d'impulsions, pour lesquelles le temps de perçage est court par rapport à la constante de temps thermique définie précédemment. Pour des impulsions de durée voisine de la microseconde, l'irradiance de rayonnement nécessaire pour percer efficacement des métaux dont le coefficient de réflexion est voisin de 0,9, se situe entre 1 et 10 MW/cm². Pour les matériaux non métalliques, l'absorption infrarouge est presque complète et une densité de puissance de 0,1 MW/cm² est suffisante. Une densité de puissance de 1 kW/cm² est une valeur acceptable pour les matériaux isolants si les impulsions ont une durée plus longue (1 à 10 ms). Les valeurs de densité de puissance indiquées dans le tableau 11.3, correspondent à un minimum. Avec 1 MW/cm² appliquée à du cuivre, la vaporisation commence seulement après 30 ms. Une valeur plus intéressante d'irradiance se situe autour de 100 MW/cm², puisqu'alors la vaporisation commence après 3 µs. Une telle irradiance est facilement obtenue avec les lasers solides déclenchés (Nd-YAG, Alexandrite, Rubis).

Processus physique	Lasers à Nd-YAG	Laser à CO2
	et lasers visibles	
Fusion	105	105
Vaporisation	10 ⁶ à 10 ⁷	10 ⁶ à 2x10 ⁷
Formation de plasma	1,5x10 ⁸	> 107

Tableau 11.3 : Effets d'un faisceau laser de forte puissance sur un matériau et niveaux minimaux d'irradiance associés (en W.cm⁻²).

La figure 12 [*Ready.83*] montre les zones d'apparition des différents phénomènes physiques liés aux effets thermiques de l'interaction laser de puissance - matière en fonction de l'irradiance du rayonnement et de la durée d'interaction. A chaque zone du diagramme, correspondent des applications industrielles de transformation de matériaux. On distingue :

- la zone de chauffage en phase solide observée en présence d'un rayonnement de densité inférieure à environ 10^4 W/cm². L'application correspondante est le traitement de surface.

- la zone de fusion obtenue pour une irradiance de 10^5 à 10^7 W/cm². Applications: soudage, découpe en présence d'un jet de gaz, alliage de surface.

- la zone de vaporisation obtenue avec des faisceaux de grande irradiance (10^6 à 10^8 W/cm²). Applications: perçage, découpe, marquage et usinages divers.

Le plasma qui apparaît en surface aux fortes irradiances peut, suivant le cas, aussi bien améliorer le couplage de l'énergie laser dans la pièce que dégrader ce couplage.



Fig. 4.5-12 : Transformation d'un matériau sous l'action d'un faisceau laser de forte puissance.

4.5.2.4 - ÉMISSION DE PARTICULES

Lorsqu'un rayonnement de grande irradiance comme celui que fournit un laser solide en mode déclenché, (puissance crête des impulsions : 10 MW ou plus) est focalisé sur un matériau, on observe des effets multiphotoniques : plusieurs photons sont absorbés simultanément par un électron dont l'énergie cinétique devient suffisante pour quitter le matériau.

4.5.2.5 - FORMATION DE PLASMA

4.5.2.5.1 Introduction

La formation d'un plasma est observée au-dessus d'une cible métallique lorsque celle-ci reçoit une rayonnement d'irradiance comprise entre 1 et 100 MW/cm². Pour des valeurs d'irradiance voisine de $0,1 \text{ MW / cm}^2$, la vapeur formée est faiblement ionisée et reste transparente au rayonnement laser; l'absorption de rayonnement est localisée à la surface du matériau irradié. Avec l'augmentation de l'irradiance, la formation d'un capillaire rend l'interaction plus complexe. Le couplage de l'énergie laser dans le matériau est amélioré par les réflexions multiples sur les parois du capillaire. La vapeur, soumise à une plus grande densité de puissance est ionisée et la pression intérieure augmente. Le gradient de pression provoque des mouvements rapides de matière fondue. Il se forme un plasma à partir des vapeurs métalliques; ce plasma en restant d'abord confiné près de la surface est transparent au rayonnement laser. Cependant, avec l'augmentation de la puissance laser, on observe parfois un étalement rapide du nuage ionisé qui finit par former au-dessus de la surface un écran qui absorbe et réfracte le faisceau laser [*Herziger.86*].



Fig. 4.5-13 : Plasma d'interaction laser-matière au-dessus d'une cible métallique.

Un contrôle du plasma est nécessaire pour stabiliser les conditions de l'interaction En soudage, on utilise parfois un dispositif de soufflage afin d'éliminer en partie les effets néfastes du plasma (absorption et réfraction du rayonnement incident).

4.5.2.5.2 Mécanisme de formation du plasma

Les causes de l'ionisation et les conditions de l'établissement du plasma ne sont pas faciles à établir avec précision. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer le phénomène sans qu'il soit toujours possible d'établir la part due à chacun d'eux.

- <u>Ionisation par absorption simultanée de plusieurs photons</u> : Ce mécanisme est important dans le visible et dans l'UV mais pas dans l'IR : il faudrait l'absorption simultanée de 128 photons de laser CO2 (d'énergie 0,124 eV) pour ioniser un atome d'argon (énergie d'ionisation = 15,8 eV)

- <u>Absorption d'énergie par les électrons via le 'Bremstrahlung inverse' (BI)</u>. Le Bremstrahlung inverse est la principale cause d'absorption d'énergie par le plasma. Il s'agit de l'absorption d'un photon par un électron dans le champ d'une particule lourde, atome ou ion; il en résulte pour l'électron une accélération et une oscillation dans le champ du rayonnement ém.

- <u>Claquage</u> du gaz et/ou des vapeurs métalliques par un phénomène d'avalanche : Un phénomène d'avalanche est déclenché par la présence dans le volume occupé par le faisceau laser de grande irradiance, d'un ou plusieurs électrons libres qui se mettent à osciller sous l'action du champ. Ces électrons libres sont naturellement présents en petit nombre dans le milieu ou sont arrachés des défauts de surface par interaction avec le champ du rayonnement. Si l'irradiance du rayonnement est suffisante, les électrons libres acquièrent suffisamment d'énergie pour ioniser d'autres atomes par collision. Ce mécanisme de formation des électrons est en compétition avec des mécanismes de recombinaison.

4.5.2.5.3 Seuil d'apparition du plasma

Le seuil d'apparition d'un plasma est le résultat d'un équilibre entre les mécanismes d'ionisation et les mécanismes tendant à diminuer le nombre d'électrons. C'est ainsi qu'en tenant compte de l'énergie des collisions élastiques dans un gaz froid, l'énergie électronique maximale E_{max} en eV est donnée par la relation [*Optics.90*] :

$$E_{max} = 5.8 \times 10^{20} \frac{A I}{(\omega + v_m)^2}$$

A est la masse atomique; I en W/cm² est l'irradiance laser; v_m est la fréquence des collisions élastiques; ω en rd/s est la fréquence du rayonnement laser. L'ionisation peut commencer lorsque

 E_{max} devient supérieure au potentiel d'ionisation. La formule ci-dessus montre comment le seuil d'irradiance varie avec le potentiel d'ionisation et la pression du gaz (en relation avec la fréquence des collisions élastiques). On pourrait également penser d'après la relation ci-dessus que le seuil serait plus bas dans l'IR que dans le visible; en réalité on observe le contraire sans pour autant que le seuil dans l'IR soit suffisamment élevé pour que l'ionisation multiphotonique en soit l'explication. Il semblerait qu'aucune modélisation ne puisse décrire précisément l'effet de seuil.

Le seuil d'apparition de l'ionisation des vapeurs métalliques est lié à la densité de vapeur et à la densité électronique ($I_b = 10^6 \text{ W/cm}^2 \text{ pour } d_e = 1 \text{ MW /cm}^2$).

Le seuil d'apparition du plasma du gaz de protection dépend du potentiel d'ionisation du gaz. Pour un rayonnement de laser à CO2 en présence d'Argon, le seuil d'apparition du plasma de gaz se situe à environ 2 kW ($d > 1 MW/cm^2$) [Herziger.86]

L'hélium s'ionise moins vite que l'argon, est plus léger; il en résulte que l'hélium se disperse plus vite au-dessus des vapeurs métalliques, le plasma formé est peu étendu, reste localisé à la surface, est plus chaud et permet une soudure obtenue plus profonde.

4.5.2.5.4 Pertes d'énergie par le plasma :

Le plasma est un milieu très instable qui prend de l'énergie au faisceau laser et le restitue en partie par le biais de divers phénomène comme la diffusion des électrons à l'extérieur du volume occupé par le faisceau laser ou l'émission directe de rayonnement par le plasma. Le rayonnement émis est dû à plusieurs types de transition:

- Transition d'un état lié vers un autre état lié; cette transition se traduit par un spectre de lignes discrètes.

- Transition d'un état libre vers un état lié ou recombinaison électronique (électron+ion -> atome neutre). Cette transition correspond à un spectre continu.

- Transition d'un état libre vers un état libre ou "émission Bremsstrahlung": un photon est émis lors du freinage d'un électron dans le champ d'un ion lourd. Ce rayonnement est continu et couvre tout le spectre de l'UV à l'IR.

4.5.2.5.5 Mouvement dans le plasma.

Le plasma d'interaction formé lors de l'interaction entre un faisceau laser de forte irradiance et un matériau, est un milieu très instable. Dans certaines conditions on observe un déplacement rapide du plasma le long du faisceau. Suivant la vitesse de déplacement, on parle soit d'une onde de combustion (*Laser Supported Combustion Wave*) lorsque la vitesse est subsonique, soit d'une onde de détonation (*Laser Supported Detonation Wave*) lorsque la vitesse est supersonique.

4.5.2.6 - EFFETS MÉCANIQUES ET ACOUSTIQUES. CRÉATION D'ONDE DE CHOC

L'augmentation rapide de la température en surface d'un matériau irradié par un faisceau laser entraîne la dilatation d'une mince couche de matière. Il apparaît alors un gradient de pression qui se propage vers l'intérieur du matériau. Une telle onde de pression générée par une impulsion de grande puissance de crête provoque une onde de choc qui peut induire des transformations dans le matériau. On peut donc envisager d'utiliser un laser pulsé comme le laser à Nd:verre pour durcir des matériaux. L'onde de choc a aussi des effets nocifs : des contraintes résiduelles sont parfois observées dans des pièces soudées par laser.

4.5.2.7 - PHOTOABLATION

L'apparition des lasers émettant des impulsions courtes de rayonnement UV a permis la mise en évidence de phénomènes non thermique lors de l'interaction entre ces faisceaux et la matière. On observe en particulier une désorption collective de produits de décomposition formés en quelques nanosecondes d'exposition au rayonnement UV. Ce phénomène dit de photoablation est particulièrement évident lors de l'irradiation de polymères dans lesquels l'absorption des photons UV

provoque la rupture des liaisons inter atomiques. Les petits fragments de molécules ainsi formés sont projetés violemment hors de la surface sous l'action du gradient de température et de la pression élevée.





Si l'exposition est suffisamment courte les effets thermiques, sans disparaître complètement, deviennent négligeables devant la photodécomposition.

Il existe un seuil de densité de rayonnement au-dessus duquel l'ablation est observée. Ce seuil est de 1 à quelques dizaines de MW/cm^2 suivant la longueur d'onde et la nature du matériau irradié.

L'ablation de matériaux est obtenue aussi avec d'autres longueurs d'onde que l'UV (Nd:YAG et CO₂ pulsés notamment). Les rayonnements UV présentent deux avantages :

- meilleure absorption de rayonnement par les matériaux (d'où une faible pénétration). Dans le cas des métaux, l'épaisseur de la couche absorbante est d'environ 50 nm. L'épaisseur de la couche fondue par une impulsion de 20 ns est d'environ 1 μ m.

- longueur d'onde plus courte (d'où une meilleure résolution).

Applications de la photoablation : chirurgie, microlithographie, micro-usinage (kevlar et de matériaux composites utilisés dans l'industrie aéronautique, silicium en micro-électronique), de façon générale gravure et micro-usinage de tous matériaux sensibles à la chaleur.

4.5.3 COMPOSANTS ET SYSTÈMES UTILISÉS EN USINAGE ET TRAITEMENT LASER DE MATIÈRE

4.5.3.1 -USINAGE PAR FAISCEAU LASER : LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES

Une analyse complète du processus de transformation de matière par rayonnement laser doit prendre en considération tous les paramètres caractérisant le faisceau et le matériau à usiner. Ces paramètres sont énumérés

1. Le <u>Faisceau laser</u> : longueur d'onde, distribution de l'irradiance dans une section (modes transverses), diamètre, divergence, polarisation, puissance, stabilité de la puissance; dans le cas d'une émission impulsionelle il faut ajouter : puissance moyenne, énergie d'impulsion, durée d'impulsion et plage de variation de cette durée, taux de répétition.

2. <u>La chaîne de transport du faisceau</u> : fibre optique ou système à miroirs, lentilles, diviseurs, miroir à transformation de polarisation, modulateur, homogénéiseur.

3. La <u>tête de focalisation du faisceau</u> : Matériau de la lentille, distance focale de la lentille, géométrie de la buse, position de la tache de focalisation, nature et débit du gaz de couverture.

5. Le <u>faisceau au point de focalisation</u> : diamètre minimum, profondeur de focalisation.

6. Le gaz de couverture : Nature et débit du gaz.

7. Le <u>matériau</u> : caractéristiques physiques: coefficient d'absorption, conductivité thermique, diffusivité thermique, densité, capacité thermique, chaleurs spécifiques de fusion et de vaporisation ; température de fusion, température de vaporisation, état de surface; vitesse de déplacement par rapport au faisceau. Il faut noter que certaines caractéristiques physiques changent avec la température : le coefficient d'absorption d'un acier à 10 μ m passe d'environ 30 % à la température ordinaire, à 50% à la température de fusion.



Il est possible d'évaluer les effets d'un faisceau laser sur un matériau en déterminant l'irradiance à la surface de la pièce. En tenant compte de la durée d'interaction faisceau-matière, on peut estimer l'énergie spécifique apportée par le faisceau. La durée d'interaction sera plus ou moins longue suivant l'effet recherché : chauffage de la surface sans fusion, fusion en profondeur, vaporisation.

La figure ci-après indique les ordres de grandeur des puissances nécessaires pour les applications courantes.



Fig. 4.5-2 : Applications courantes des lasers industriels et puissances correspondantes.

4.5.3.2 Les composants d'un système laser industriel

Un système laser de traitement de matériaux comprend les éléments suivants :

- un générateur de rayonnement laser alimenté en eau, électricité (triphasé) et en gaz
- une unité de commande;
- une chaîne de transport du faisceau jusqu'au poste de travail,
- un dispositif de focalisation du faisceau sur la pièce pourvue d'une alimentation en gaz;

- un système de déplacement relatif pièce-faisceau associé à son unité de commande et de programmation de trajectoire;

- les éléments de sécurité assurant la protection des personnes et des appareils.



Fig. 4.5-3 : Les principaux éléments d'un système laser industriel.

Parmi les paramètres de l'environnement influant sur le fonctionnement des lasers industriels, on peut citer :

- la température
- les vibrations
- les impuretés (poussières, humidité, ...).

4.5.3.3 Les lasers de puissance

11.1.3.3.1 Lasers à CO2

Les lasers à dioxyde de carbone sont les lasers les plus couramment utilisés en usinage car les puissances qu'ils fournissent sont supérieures à celles des autres lasers, de quelques watts jusqu'à environ 40 kilowatts. Diverses technologies ont été dévelppées pour augmenter la puissance, tout en limitant l'encombrement :

- les lasers TEA
- les lasers à flux lent
- les lasers à flux axial rapide
- les lasers à flux transverse rapide.

Les plus récents, les lasers SLAB à refroidissement par diffusion sur les électrodes d'excitation, sont le résultat d'un compromis entre la puissance produite, la qualité de faisceau et l'encombrement.

11.1.3.3.2 Lasers à Néodyme-YAG

Le schéma d'un laser à Nd-YAG de puissance apparaît dans le chapitre V de ce document. Le faisceau d'un laser solide de forte puissance est beaucoup plus divergent que celui d'un laser à CO₂ de puissance équivalente. Pour cette raison, on utilise en sortie un objectif afocal pour diminuer la divergence. De même il n'est pas envisageable de guider le faisceau sur des distances de plusieurs mètres à l'aide de miroirs. La table d'usinage se trouve donc en général prés de la cavité laser. Une solution de plus en plus utilisée consiste à injecter le faisceau dans une fibre optique pour l'amener à la machine d'usinage qui peut alors se trouver loin du laser. Des fibres permettant le transport de puissances de 2 kW à 1 μ m ont été développées.

Les lasers à Nd:YAG génèrent des faisceaux impulsionnels ou continus. En impulsion des énergies de plus de 100 J peuvent être obtenues. Les durées d'impulsion utilisées varient entre 0,1 ms et 20 ms. Au-delà le faisceau exerce sur les matériaux, une action proche de celle d'un faisceau continu.

En continu, des puissances voisines de 2 kW sont couramment obtenues. Les lasers solides du type NdYAG sont progressivement remplacés par des lasers à fibre avec comme dopants, l'erbium ou l'ytterbium. La qualité de faisceau est nettement améliorée et proche de celle des lasers à gaz.

11.1.3.3.3 Lasers à Excimères

Les lasers à excimères (ou plus correctement à exciplexes) ont pour milieu actif des molécules biatomiques d'un halogénure de gaz rare n'existant que pendant un temps très court à l'état excité). Le mélange gazeux, utilisé sous pression élevée, est excité par une décharge électrique brève, précédée d'une préionisation par éclair UV, faisceau d'électrons ou rupteur de tension de décharge. Les impulsions obtenues ont une durée de 10 à 40 ns.

Les puissances moyennes disponibles vont de quelques watts à 300 W. Un prototype de 1 KW a fonctionné en 1993 chez le constructeur Sopra et un laser de 2 kW est en développement.

11.1.3.3.4 Autres lasers de puissance

11.3.3.1.4.1 Le laser à Oxyde de Carbone

L'utilisation de l'oxyde de carbone comme milieu actif permet d'otenir une émission à la longueur d'onde de 5 µm. Cette longueur d'onde offre une meilleure absorption par les matériaux métalliques et le transport par fibre optique est possible. Le rendement est d'environ 15% mais seulement à très basse température et un refroidissement à l'azote liquide est nécessaire à son fonctionnement. Des lasers de 5 kW ont été produits, et il devrait être possible d'aller jusqu'à 20 kW. Le coût reste cependant prohibitif pour un usage industriel.

11.3.3.1.4.2 Laser chimique à Oxygène-Iode (Laser COIL)

La longueur d'onde est de 1,31 μ m. Le transport par fibre en SiO₂ est possible. Le faisceau est de bonne qualité car le milieu actif est utilisé à faible pression, les turbulences restant faibles. Une puissance de 1 KW a été obtenu en 1989 par un fabricant japonais. Des utilisations industrielle ne sont cependant pas envisagées car la technologie utilisée reste trop complexe.

11.1.3.3.5 Les applications des lasers de puissance. Choix du laser

Le choix d'un laser pour une application donnée de transformation de matériau n'est pas toujours évident. Aucun modèle ne permet de prendre en compte tous les paramètres de l'interaction avec suffisamment de précision, pour que le résultat soit connu sans essai préalable. Le nombre d'essai à effectuer est limité par le nombre de types de lasers de puissance disponibles.

Le tableau 11-7 indique, pour ces lasers, quelques unes des applications pour lesquelles ils peuvent être utilisés. Comme le montre le tableau, les deux principaux lasers utilisés pour l'usinage de matériaux sont le laser à CO2 et le laser à Nd-YAG. Les caractéristiques de ces deux lasers sont suffisamment différentes pour que leurs domaines d'utilisation ne se recouvrent pas totalement.

Les longueurs d'onde sont très différentes: 1 μ m et 10 μ m; les matériaux n'absorbent pas de la même façon l'un et l'autre rayonnement, le faisceau du Nd:YAG étant mieux absorbé.

En faible puissance et à divergence comparable le rayonnement du laser Nd:YAG peut être focalisé sur une tache plus petite que celui du CO2. Le faisceau du laser à CO2 est en général moins divergent que celui du laser à Nd:YAG; les taches de focalisation obtenues en pratique sont du même ordre de grandeur malgré la longueur d'onde plus courte pour le Nd:YAG.

Le rendement de fonctionnement est pour le CO2 de 6 à 15 % alors que pour le Nd:YAG on observe un rendement de 1 à 3 %. Un laser à Nd:YAG de 250 W exige donc une alimentation électrique de même puissance que celle d'un laser à CO_2 de 1500 W.

Le laser à CO2, grâce aux puissances continues de plusieurs kilowatts qu'il peut délivrer, est intéressant pour les applications de découpe et de soudage de tôles de fortes épaisseurs. Le laser à Nd:YAG est plutôt utilisé pour les opérations de micro-usinage et pour le traitement de matériaux très réfléchisssants.

Les lasers à excimères, dont la principale caractéristique est d'émettre un rayonnement pulsé dans l'UV $(0,1 a 0,3 \mu m)$ restent limités en puissance maximale à quelques centaines de watts. Ils sont utilisés dans l'industrie des semiconducteurs pour l'enlèvement de matière par photoablation. Ces lasers sont aussi utilisés en photolithographie. Les lasers à excimères sont relativement coûteux comparés aux lasers à Nd:YAG et CO2 (dans un rapport de 5 et 10 respectivement); leur utilisation se limitera probablement aux applications spécifiques mentionnées ci-dessus.

Type de laser	longueur d'onde (µm)	Energie, Puissance	Applications
CO ₂ continu	10,6	1 à 2 kW	Découpe de matériaux organiques, découpe et soudage de métaux de qq mm d'épaisseur
CO ₂ continu	10,6	2 à 20 kW	Soudage et découpe de matériaux métalliques de fortes épaisseurs
CO ₂ pulsé	10,6	0,5 à 20 J	Soudage, marquage par masque
Nd:YAG pulsé ou Yt, Er fibre	proche de 1	0,5 à qq joules	Soudage par points, perçage, découpre, ajustage de composants, marquage
Nd:YAG continu ou Yt, Er fibre	proche de 1	qq kW	Soudage, traitement de surface, découpe avec les lasers à fibre récents (bonne qualité de faisceau)
Excimère	UV	dizaines de W	micro usinage, nettoyage, micro structuration de surfaces
laser solide à impulsions femtoseconde	proche de 1 (et doublage - triplage de fréquence)	jusqu'à 20 W	micro structuration, micro découpe,

Tableau 4.7 : Lasers industriels et applications correspondantes.

4.5.3.4 - COMPOSANTS OPTIQUES DE RÉFLEXION ET DE TRANSMISSION

4.5.3.4.1 Propagation des faisceaux laser de puissance

Un rayonnement laser se propageant librement dans un milieu interagit avec celui-ci même lorsqu'il s'agit d'un milieu transparent. En pratique le milieu ne peut pas être parfait et les phénomènes de d'**absorption** et de **diffusion** introduisent toujours des perturbations : diminution de la quantité d'énergie transportée, modification de la distribution d'énergie dans le faisceau.

11.1.3.4.1 Absorption

Les matériaux n'étant jamais parfaitement transparents, chaque matériau se caractérise par une courbe de transmission en fonction de la longueur d'onde. Il convient donc, pour les composants de déviation ou de focalisation, de choisir les matériaux appropriés. Parmi les matériaux présentant une bonne transmission aux longueurs d'onde des lasers de puissance, on peut citer :

- pour le moyen infra-rouge (en particulier à 10,6 μ m) : ZnSe, KCl, NaCl, Ge, GaAs. Le Séléniure de Zinc est en général utilisé pour la fabrication de lentilles pour λ =10,6 μ m. Ce matériau présente l'avantage d'être transparent dans le visible (utile pour les alignements à l'aide du faisceau rouge d'un petit laser à HeNe). D'autre part, il a une très faible absorption dans le moyen IR et peut être utilisé pour la fabrication de lentilles de focalisation de faisceaux, jusqu'à 5 kW environ.

- pour le proche infra-rouge (laser Nd:YAG), les matériaux transparents dans le visible,
- pour l'ultra-violet (lasers à excimères) : MgF2, LiF, CaF.

11.1.3.4.2 Diffusion

La diffusion est la redistribution de l'énergie du rayonnement suivant toutes les directions de l'espace par les petites particules présentes dans le volume de propagation. Le rayonnement laser subit une diffusion en surface ou en volume des matériaux traversés.

- En surface des matériaux solides : L'importance du phénomène est liée à la qualité de la surface (polissage) et à l'état de la surface (poussière).

- En volume : On distingue :

- la diffusion par les petites particules ($< \lambda/10$) ou diffusion Rayleigh pour laquelle le taux de diffusion croit proportionnellement à λ^{-4} ;



Fig. 4.5-4 : Diffusion par des particules

a : Diagramme de diffusion par des petites particules. La diffusion se fait essentiellement vers l'avant et vers l'arrière suivant la direction de propagation.

- la <u>diffusion par les grosses particules</u> pour laquelle le rayonnement diffusée par une partie de la particule n'est plus en phase avec le rayonnement diffusé par une autre partie; il en résulte une diminution de la diffusion



b : Diagramme de diffusion par des grosses particules. La diffusion se fait essentiellement vers l'avant dans la direction de propagation.

4.5.3.4.2 Composants de transmission : lentilles et fenêtres

Les composants optiques (fenêtres transparentes, miroirs, lentilles) utilisés en usinage laser doivent supporter des densités de puissances de rayonnement élevées. Les propriétés de transmission des matériaux n'étant pas identiques à 1 μ m et à 10 μ m, il faut distinguer les optiques pour laser à Nd:YAG et celles pour lasers à CO2

<u>Pour les lasers à Nd:YAG</u>, les matériaux transparents dans le visible conviennent, par exemple un matériau courant comme le BK-7 dont la fenêtre de transmission s'étend de $0,4 \mu m$ à $1,4 \mu m$.

<u>Pour les lasers à CO</u>₂, très peu de matériaux présentent suffisamment peu d'absorption pour être utilisés dans la fabrication de lentilles : ce sont le germanium, le séléniure de zinc, le tellure de cadmium. Le chlorure de sodium et le chlorure de potassium sont aussi transparents à 10 μ m et présentent une absorption faible mais ont l'inconvénient d'être très hygroscopiques. Le ZnSe offre un bon compromis; il présente une faible absorption à 10,6 μ m et conduit bien la chaleur. Les lentilles en ZnSe peuvent être utilisées pour des faisceaux de 5 kW si elles sont refroidies (eau pour la monture,

gaz pour l'optique) ; il est prudent d'utiliser un joint en indium entre la monture et la lentille pour accélérer la dissipation thermique.

Germanium (Ge)	Transparent entre 1,8 et 14 μ m	
Arséniure de Gallium (GaAs)	Transparent entre 1 et 15 µm	
	Bon comportement thermique à forte puissance	
Séléniure de Zinc (ZnSe)	Transparent entre 0,6 et 22 μm.	
	Très faible absorption.	
	Très bonne conductivité thermique.	
	Transparence dans le visible.	

Tableau 11.4 : Matériaux transparents aux faisceaux de laser à CO2

Composants optiques divers :

- Fenêtre : une lame à faces parallèles, traitées anti-réflexion pour séparer deux milieux gazeux.



Fig. 4.5-5 : Lame de sélection de faisceau

 il s'agit d'une lame traitée anti-réflexion pour un faisceau laser et réfléchissante pour l'autre faisceau. Placée sous une incidence de 45° sur le chemin du faisceau de laser de puissance, cette lame permet de superposer deux faisceaux de longueur d'onde différentes.

4.5.3.4.3 Composants de réflexion.

Les caractéristiques d'un miroir pour faisceau de forte irradiance sont : coefficient de réflexion, propriétés thermiques du substrat, caractéristiques mécaniques, coût. Une bonne conductivité thermique du substrat réduit les déformations dues à l'absorption du rayonnement. Les matériaux les plus courants pour le substrat sont le **cuivre** et le **silicium**; le **molybdène** est un bon candidat à cause de sa très grande conductivité. Le miroir le plus simple est constitué par un bloc de cuivre (R=98,8) ou molybdène (R=98,5) poli. Une meilleure réflexivité est obtenue à l'aide d'un dépôt d'or ou d'argent (R=99,5). Une bonne résistance à l'usure lors des nettoyages, ainsi qu'une faible réactivité chimique sont obtenues par l'intermédiaire d'un recouvrement diélectrique multicouche.

Silicium	Faible coût Puissance laser : quelques kW (avec refroidissement)
Molybdène	Résistant, recommandé pour un environnement pollué Peut être utilisé sans recouvrement (R≈98%)
Cuivre	Bonne conductivité thermique (recommendé pour les grandes puissances. Plus cher, car difficiles à polir. Grandes précautions nécessaires au nettoyage, même si la surface est dorée

Tableau 11-5 : Matériaux pour miroirs à λ =10,6 μ m



(R=99,4%)

multicouche améliore la résistance à l'usure ainsi que la réflectivité (R=98,9 à 99,7%)

Fig. 4.5-6 : Miroirs pour faisceaux de lasers à CO₂.

Ici le substrat représenté est en cuivre. On utilise également le silicium, qui présente une très bonne stabilité thermique et une plus faible densité (2,3 g.cm⁻³ contre 8,9 g.cm⁻³ pour le cuivre) et le molybdène qui offre une meilleure résistance à l'usure. Les réflectivités sont données pour un faisceau non polarisé à incidence normale.

4.5.3.4.4 Miroir 'polarisant'

Notons aussi que le coefficient de réflexion d'un miroir est sensible à la polarisation du faisceau lorsque l'angle d'incidence est différent de 0°. Il est difficile en général de conserver l'état de polarisation d'un faisceau après plusieurs réflexions.

Les effets dus à la polarisation sont négligeables lorsque le faisceau à la sortie du laser a une polarisation rectiligne, à 45° de la verticale. Afin de rendre les applications, comme le perçage ou la découpe, insensibles à la polarisation, le dernier miroir de renvoi à 90° transforme la polarisation linéaire en polarisation circulaire. La transformation est obtenue par déphasage relatif de 90° des deux composantes de polarisation dans le. recouvrement diélectrique biréfringent déposé sur le miroir. La transformation est optimale pour une position unique du miroir.



Fig. 4.5-7 : Modification d'un faisceau laser par un miroir 'polarisant'.

4.5.3.4.5 Entretien des miroirs et des lentilles

L'absorption d'une partie du rayonnement par les composants optiques peut entraîner une baisse des performances de la machine ou même la destruction d'un composant. Lors de l'utilisation d'un faisceau de grande puissance, les optiques doivent être refroidies par circulation d'eau. L'utilisateur doit encore prendre la précaution d'éviter toute contamination des optiques par des graisses ou des poussières; l'absorption de rayonnement par le matériau contaminant provoque en effet un échauffement localisé pouvant entraîner la rupture du composant. Il est donc vivement recommandé de vérifier régulièrement l'état de propreté des composants optiques utilisés avec des faisceaux de forte puissance.

<u>Qualité des composants optiques</u> : Les défauts à la surface d'un composant optique sont évalués par rapport à la longueur d'onde du rayonnement pour lequel ils sont destinés. Une 'bonne' lentille présente des irrégularités qui ne dépassent pas $\lambda/20$.

<u>Recouvrement de surface</u>. Afin d'améliorer la transmission de la lentille, les fabricants proposent des traitements de surface qui minimisent les pertes par réflexion. Ces traitements sont fragiles, et il

importe de les nettoyer avec précaution (jet d'air puis léger frottement à l'aide d'un papier absorbant spécial, imbibé d'acétone ou de propanol de grande pureté).

4.5.3.5 - TRANSPORT ET GUIDAGE DE FAISCEAU LASER DE PUISSANCE

Le transport du faisceau laser de la source au matériau peut s'effectuer de deux façons:

- par un ensemble de miroirs,
- par un guide d'onde.

4.5.3.5.1 - Systèmes à miroirs

Un dispositif de transport et guidage idéal de faisceau laser doit amener le faisceau jusqu'au lieu d'utilisation sans modifier aucun des paramètres du faisceau; en pratique un tel système n'existe pas. Le dispositif de transport est caractérisé par sa transmission globale, et les modifications qu'il apporte à l'état de polarisation du faisceau. Dans la pratique, il faut également s'assurer :

- qu'aucun composant ne se déforme par échauffement, ce qui peut entraîner une déformation du faisceau,

- et que le faisceau ne subit pas de diffraction sur les supports des optiques; la présence de phénomènes de diffraction apparaît sous la forme d'une modulation dans la distribution d'irradiance.

Le coefficient de transmission global est égal au produit des coefficients de réflexion/transmission de tous les composants de la chaîne. Ce coefficient doit rester constant en cours d'utilisation, ce qui est le cas si les optiques ne subissent ni échauffement, ni pollution. Afin de réduire les risques de détérioration par les poussières ou l'humidité, il convient de faire circuler de l'air sec en légère surpression à l'intérieur de l'enceinte de passage du faisceau.

L'état de polarisation du faisceau de sortie est difficile à évaluer lorsque la chaîne de transport est constituée d'un grand nombre de composants. En pratique, il est souvent utile de transformer la polarisation linéaire du faisceau à la sortie du laser en polarisation circulaire juste avant la tête de focalisation; cette transformation est assurée par un miroir à retard de phase placé juste avant la lentille de focalisation.

Dans les systèmes où le faisceau se déplace par rapport à une pièce aux formes complexes, un ensemble de miroirs mobiles rend possible l'orientation du faisceau suivant une direction quelconque. Il peut être possible de placer l'oscillateur laser directement sur le bras d'un robot ; le poids d'un laser de puissance inférieure à 1 kW permet d'envisager cette solution.

4.5.3.5.2 . - Guide d'onde

Il existe trois principaux types de guides d'onde pour les rayonnements visibles et proches du visible. Ce sont :

- les fibres multimodes à saut d'indice,
- les fibres multimodes à gradient d'indice et

- les fibres monomodes. Pour le guidage de faisceaux de grande puissance, on utilise uniquement des fibres multimodes qui présentent un cœur de plus grande section, pouvant supporter sans dommages de fortes irradiances.

Le matériau utilisé pour le guidage de faisceaux de lasers à Nd:YAG est la silice dont la transmission à 1 μ m est très bonne. La difficulté consiste à introduire le faisceau dans la fibre; la moindre contamination à l'entrée (ou à la sortie de la fibre) provoque la fusion du matériau à cet endroit.

Pour le rayonnement à 10.6 μ m du laser à CO2, le guidage ne paraît possible que grâce à l'emploi de guides d'onde métalliques creux [*Engel.88*]. Ces guides d'onde ne sont utilisables que pour des puissances relativement faibles. Pour les faisceaux de puissance supérieure au kilowatt seuls les systèmes à miroirs peuvent être utilisés.

Une fibre optique utilisée pour les faisceaux de forte irradiance présente un cœur dont le diamètre est voisin de 1 mm. Des effets thermiques et électriques introduisent une limitation à la puissance qui peut être véhiculée par la fibre. Le problème thermique se pose essentiellement aux extrémités de la fibre, en particulier à cause des impuretés qui peuvent s'y déposer. Une absorption de 1 % est déjà une valeur excessive pouvant entraîner la fusion pour une puissance incidente de 100 W. En pratique l'extrémité de la fibre doit donc être protégée des poussières ambiantes et refroidie.

Les effets électriques doivent également être pris en considération. Les matériaux utilisés pour les fibres sont des isolants mais aux valeurs élevées de champ électrique les électrons finissent par être arrachés de leur site causant la destruction du matériau par un phénomène d'avalanche. Pour une tension continue ce phénomène se produit lorsque le champ atteint 5.10^6 V.cm⁻¹ environ. La limite de rupture dépend de la fréquence du rayonnement (variation en ω^{-2}) ainsi que de sa durée (variation en $\tau^{1/2}$ pour des impulsions de durée τ inférieure à la microseconde). Le seuil de rupture dépend aussi du degré de pureté du matériau. La limite théorique du niveau de perte pour une longueur d'onde voisine de 2,5 µm se situe entre 10^{-2} et 10^{-3} dB.km⁻¹.

En pratique, une fibre utilisée pour le transport de faisceau d'un laser à Nd:YAG présente une ouverture numérique voisine de 0,18 (soit un angle d'admission de 20°). L'atténuation est de 5 à 10 dB.km⁻¹. Les puissances crêtes admissibles se situent entre 30 et 800 kW suivant le diamètre de cœur. L'irradiance maximale pour une fibre en quartz est de $3x10^5$ W/cm². Le tableau suivant montre les paramètres du faisceau laser injecté dans une fibre.

Matériau	λ(μm)	Т	pertes	coeur	P (W)	Seuil(W/cm ²)
SiO2	1,06	100 µs	1 dB/km	10 µm	500	109
SiO2	1,06	cont.	1 dB/km	10 µm	100	5.106
KRS-5	10,6	cont	0,2-1dB/m	250 μm	20	4.104
guide creux	10,6	cont.	1 dB/m	3 mm	800	

Tableau 11-6 : Quelques caractéristiques de guides IR



Fig. 4.5-8 : Transport de faisceau de laser à Nd:YAG de puissance par fibre optique.

Les divergences Θ et les diamètres D_i aux différents endroits sont liés par les relations

 $\Theta_1 D_1 = \Theta_2 D_2$ et $\Theta_3 D_3 = \Theta_4 D_4$.

4.5.3.6 - FOCALISATION ET MISE EN FORME DE FAISCEAUX DE LASERS DE GRANDE PUISSANCE

4.5.3.6.1 - Composants optiques de focalisation

Il existe plusieurs combinaisons de composants optiques pour assurer la focalisation d'un faisceau laser. Suivant le cas il peut s'agir :

- d'une lentille rafractive unique aux faces sphériques ; aux fortes puissances, celle-ci doit être refroidie afin d'éviter les déformations par échauffement.

- d'une lentille asphérique. L'asphéricité d'une face permet d'éliminer les aberrations, en particulier l'aberrtion sphérique qui limite la taille de la tache focale. L'usinage d'une forme asphérique est difficile, et ces lentilles ont un prix plus élevé que les lentilles sphériques.

- d'une série de lentilles (objectif de focalisation).

- d'une lentille diffractive ; la focalisation est assurée par un réseau de diffraction gravée sur une surface plane ou courbe. En pratique, pour les faisceaux de puissance, la lentille reste réfractive ; la diffraction est utilisée pour minimiser les aberrations.

- de télescopes (Type Kepler ou système afocal, type Galilée pour les faisceaux de forte énergie); dans ce cas les défauts liés à un désalignement par rapport à l'axe optique sont corrigés plus facilement que dans le cas des lentilles;

- d'un un miroir sphérique concave.

- d'un miroir paraboliques cette solution est préférable pour les faisceaux de très grande puissance (5 kW ou plus).



(a) Miroir sphérique, focalisation en dehors de l'axe ; (b) Miroir sphérique, focalisation axiale ;
(c) Miroir parbolique ; (d) Miroir du type 'Cassegrain'

<u>Lentille ou miroir ?</u> Lorsque la puissance du faisceau laser le permet, il est préférable de focaliser le faisceau à l'aide d'une lentille ; dans le cas des miroirs paraboliques, l'astigmatisme ne permet pas de focaliser à la limite de la diffraction.

4.5.3.6.2 - Tête de focalisation du faisceau

La tête de focalisation doit assurer les fonctions suivantes:

- Réglage de la position de la tache de focalisation par déplacement de la lentille;

- Refroidissement de la lentille;

- Distribution d'un jet de gaz centré sur le faisceau au moyen d'une buse adaptée. Pour les opérations d'usinage de pièces de forme complexe, la tête doit être orientable autour de deux axes (Fig. 10).

- Protection des optiques. L'optique de focalisation étant directement exposée aux vapeurs et aux particules de matière fondue projetée depuis la zone d'interaction, il est nécessaire de la protéger par un jet de gaz neutre.

La tête de focalisation est équipée d'un dispositif de réglage manuel en hauteur. Pour certaines applications, comme la découpe de tôles planes, un dispositif de suivi automatique de profil est indispensable.



Fig. 4.5-10 : Tête de focalisation orientable. Un réglage manuel (1) permet de positionner l'extrémité de la buse par rapport à la surface de la pièce. Un réglage automatique (2) relié à un suiveur de profil permet de conserver cette distance.

4.5.3.6.3 - Composants optiques de mise en forme du faisceau

Pour certaines applications des faisceaux de lasers de puissance comme le traitement de surface, il est préférable de disposer d'une distribution uniforme de l'irradiance dans le faisceau. Pour cela, le profil spatial du faisceau peut être modifié à l'aide de divers composants. Des exemples sont donnés ci-après.





(a) par miroirs vibrants (b) par miroir multifacettes (c) par kaléidoscope (cavité à surface intérieure réfléchissante) (d) kinoform (miroir holographique).

4.5.4 ENLÈVEMENT DE MATIÈRE PAR LASER.

4.5.4.1 INTRODUCTION

Nous traitons ci-après des opérations d'usinage pour lesquelles il y a enlèvement de matière : perçage, découpe, marquage, ajustage dynamique de composants mécaniques ou électroniques. Pour vaporiser un matériau, il faut lui apporter beaucoup plus d'énergie que pour sa fusion. En conséquence le faisceau est focalisé sur une tache aussi petite que possible afin d'augmenter l'irradiance disponible. Le meilleur résultat est obtenu à l'aide d'un faisceau TEM00. Un gaz peut être utilisé soit pour améliorer le couplage de l'énergie laser dans la matière, soit pour éjecter le matériau dés qu'il atteint l'état de fusion.

Le tableau ci-dessous indique, pour un acier inox, le début de la vaporisation en fonction de densité

de puissance appliquée. Remarquons que pour une densité de puissance de 1 MW/cm², la vaporisation du matériau commence après quelques microsecondes seulement; les pertes d'énergie par conduction thermique pendant un temps aussi court sont négligeables et la matière est vaporisée en surface avant que la fusion commence.

Densité de puissance (MW/cm ²)	Durée de chauffage au début de la vaporisation (s)	Epaisseur au début de la vaporisation (mm)
1	3,5.10-6	3.10-3
0,1	4,5.10 ⁻⁴	3.10 ⁻²
0,01	0,45	0,3

Tableau 11-8 : Durée du chauffage et épaisseur fondue avant de début de la vaporisation pour un acier inox soumis à différentes valeurs de densité de puissance.

Il faut noter que l'efficacité de l'enlèvement de matière par laser ne varie pas linéairement avec la valeur de la densité de puissance appliquée. Les phénomènes d'absorption et de réfraction du faisceau par les vapeurs ionisées perturbent en effet le couplage d'énergie dans la cible dès que le seuil de claquage du gaz est dépassé. En pratique une optimisation du processus est nécessaire.

4.5.4.2 - MARQUAGE.

Le laser offre une grande flexibilité pour le marquage de caractères et de symboles sur les pièces manufacturées. L'opération peut être réalisée à très grande vitesse. Deux méthodes de marquage sont utilisées: le marquage par masque et le marquage par balayage.

4.5.4.2.1 Marquage par masque:

Le principe de cette méthode est présenté sur Fig. 12. Le masque utilisé présente une ouverture complexe dont la forme est celle du contour à marquer. Une lentille intercepte le rayonnement diffracté par le masque et forme une image sur la surface de l'objet à marquer. Un laser à CO_2 pulsé du type TEA ou un laser à excimère est utilisé pour cette application. L'opération est réalisée en une impulsion unique et s'applique à tous les matériaux organiques.



Fig. 4.5-12 : Marquage par masque.

Le symbole à marquer apparaît sous la forme d'une ouverture dans un masque. La lentille fait l'image du masque sur la surface de la pièce.

4.5.4.2.2 Marquage par balayage.

La figure 13 montre le principe du marquage par balayage. Le laser utilisé est un laser à Nd:YAG. Dans le cas d'un laser à pompage continu modulé par un Q-switch acousto-optique, la puissance nécessaire est de 10 à 40 W. Le faisceau est agrandi en passant à travers un objectif. Le balayage est réalisé à l'aide de deux miroirs galvanométriques. L'orientation des miroirs est commandée par un micro-ordinateur qui sert également à la génération des formes à marquer. Les vitesses obtenues sont d'environ dix signes alphanumériques par seconde.



Fig. 4.5-13 : Marquage d'une surface par balayage du faisceau au moyen de miroirs galvanométriques.

4.5.4.3 *PERÇAGE.*

Le laser est l'outil idéal pour le perçage de trous de petits diamètres aussi bien dans un matériau très dur comme la céramique que dans un matériau mou comme le caoutchouc. Le diamètre du trou est limité par la dimension de la tache de focalisation du faisceau, c'est-à-dire une dizaine de microns dans le cas d'un faisceau de laser à Nd:YAG monomode. La zone affectée thermiquement s'étend sur quelques microns seulement autour du trou. La profondeur maximale réalisable, de l'ordre du centimètre pour les métaux, est donnée par [*Ready*.78]

(4.5-30)
$$D_{\text{max}} = \frac{(1-R) J_0}{S \rho [C_{th} (T_V - T_0) + L_v]};$$

 J_0 est l'énergie de l'impulsion, S, l'aire de la tache de focalisation, ρ , la densité, C_{th} , la chaleur spécifique, T_v , la température de vaporisation, T_0 , la température ambiante et L_v la chaleur latente de vaporisation. D_{max} tend à augmenter si un gaz neutre est utilisé afin d'éjecter le matériau fondu.

Les paramètres caractéristiques d'un trou percé par faisceau laser sont :

- le rapport p/ $\Phi_{1/2}$ de la profondeur p sur le diamètre $\Phi_{1/2}$ à mi-hauteur,
- la rugosité de la surface intérieure,
- les dépôts de matière sur la surface supérieure,
- les scories à la surface inférieure.

Pour les métaux, le rapport p/ $\Phi_{1/2}$ se situe entre 8 et 12. Des valeurs plus élevées peuvent être obtenus dans les matériaux organiques et céramiques.

La forme du trou dépend de la structure transverse du faisceau, une forme régulière étant obtenue avec un faisceau du type TEM_{00} . Les aspérités de la surface du trou ont une hauteur moyenne d'une dizaine de microns.

Le perçage par faisceau laser présente les avantages suivants:

- aucun effort n'est appliqué au matériau;
- le matériau peut être très dur comme le diamant;
- il n'y a pas de risque de contamination par l'outil;
- le diamètre du trou peut atteindre une dizaine de microns;
- le rapport de la profondeur du trou sur le diamètre atteint 15:1.

Parmi les inconvénients on peut noter que le matériau éjecté se recondense en partie sur les bords. La surface du trou n'est pas parfaitement lisse et le profil du trou a parfois une allure plus conique que cylindrique.

Le laser de puissance le mieux adapté au perçage est le laser à Nd:YAG. Les trous obtenus ont une profondeur de 5 à 10 mm et un diamètre de 0,1 à 1 mm. Le mode TEM00 permet de faire des trous de diamètre compris entre 0,02 à 0,2 mm et de profondeur allant jusqu'à 1,5 mm. La tolérance sur la position des trous est d'environ 10 μ m. Les lasers à CO2 impulsionnels conviennent bien au perçage de matériaux organiques mais peuvent aussi être utilisés pour les métaux.

On peut encore noter les particularités suivantes du faisceau laser en perçage :

- le perçage de trous borgnes,
- l'ébarbage d'un trou percé au foret

- le perçage de trous obliques. Le faisceau laser convient donc pour le perçage de trous de refroidissement dans les aubes de turbines de réacteurs. De façon générale, le faisceau laser est un l'outil le mieux adapté pour le perçage de matériaux soit très durs, comme les céramiques, soit très mous comme les caoutchoucs. L'une des premières applications a d'ailleurs été le perçage des tétines de biberon.

TECHNIQUE	AVANTAGES DU LASER
Usinage par décharge électrique	Vitesse plus grande, pas d'usure d'outil, plus grand rapport profondeur/diamètre, perçage de tous matériaux
Usinage électrochimique	Plus grand rapport profondeur/diamètre, perçage de tous matériaux, absence de déformation, ébarbage inutile.
Ultra-son	Plus rapide, plus grand rapport profondeur/ diamètre, perçage de matériaux mous, ébarbage inutile.
Faisceau d'électrons	Opération en atmosphère ambiante.

Tableau 11-9 - Avantages du laser par rapport aux autres techniques de perçage.

4.5.4.4 COUPAGE.

4.5.4.4.1 - Introduction

L'opération de coupage par faisceau laser est plus facile à réaliser que le perçage d'un trou. Il est en effet possible de faire une entaille sans que le matériau atteigne l'état de vaporisation sur toute son épaisseur. Pour cela il suffit d'éliminer la couche liquide au fur et à mesure de sa formation à l'aide d'un jet de gaz inerte. Trois mécanismes peuvent être mis en œuvre pour couper à l'aide d'un faisceau laser :

- par vaporisation du métal ; une puissance instantanée élevée est alors nécessaire car la vaporisation requiert jusqu'à 10 fois plus d'énergie que la fusion.

- par fusion et soufflage à l'aide d'un gaz inerte. La température de vaporisation n'est pas atteinte ; le métal fondu quitte la zone d'interaction sous la pression d'un gaz inerte comme l'argon ou l'hélium. Cette technique est intéressante pour les métaux qui s'oxydent facilement.

- par réaction exothermique entre le métal chauffé et un gaz actif. Le gaz (oxygène) est alors amené à une pression suffisante pour souffler le métal fondu comme dans le deuxième cas.

Le laser est l'outil idéal pour découper rapidement et sans bavures la plupart des matériaux. Les matériaux organiques absorbent bien le rayonnement infra-rouge des lasers de puissance et sont en général très bien découpés. Les métaux ont une grande réflexivité à température ambiante et nécessitent des puissances continues élevées. A puissance incidente donnée, les épaisseurs maximale de coupe et la qualité de l'entaille varient beaucoup d'un métal à l'autre.

4.5.4.4.2 Coupage de matériaux métalliques.

11.2.4.4.1 Paramètres de coupage par laser

Les paramètres intervenant dans le coupage de matériaux métalliques en tôle mince sont les suivants:

- le diamètre de la tache de focalisation du faisceau,
- la vitesse de déplacement relatif pièce-buse,
- la nature le débit du gaz d'apport.

L'entaille à travers le matériau est caractérisée par :

- sa largeur,
- l'épaisseur coupée,
- l'étendue de la zone affectée thermiquement,
- la rugosité des flancs et le pas des stries observées,

- la hauteur des scories formées ainsi que leur adhérence à la pièce,
- l'épaisseur de la zone coupée régulièrement.

Les bords d'une pièce coupée par faisceau laser présentent des stries dont la forme est caractéristique de conditions de coupage. Ces stries sont le résultat de l'action combinée du faisceau laser et du flux de gaz sur la cible métallique en mouvement. Chaque strie correspond à un petit capillaire traversé par le faisceau. Aux grandes vitesses de déplacement de la cible, les stries ont tendance à s'incurver vers le bas.



Fig. 4.5-14 : Paramètres caractérisant une découpe par faisceau laser.

(a) Coupe transversale de l'entaille. Le: largeur moyenne de l'entaille;

(b) Aspect du bord de coupe. P_r: profondeur de coupe régulière; H_S: hauteur moyenne des scories.

Les diverses études théoriques réalisées [*Babenko.73*, *Duley.74*, *Gonsalves.72*] n'ont pas permis d'établir de façon précise les paramètres de découpe pour un matériau donné à partir de ses caractéristiques physiques. En pratique, une optimisation est nécessaire sur chaque machine et pour chaque matériau.

Pour un ensemble donné de paramètres de découpe, il existe toute une plage de variation du couple vitesse-puissance. En général on recherche une vitesse de découpe aussi rapide que le permet la machine. La vitesse maximale pour laquelle le matériau est encore totalement coupé, croit linéairement avec la puissance appliquée. A puissance incidente donnée, il est préférable de couper à la vitesse maximale afin de minimiser la largeur de l'entaille et la zone affectée thermiquement. Aux grandes vitesses, la qualité de coupe a également tendance à s'améliorer: les bords deviennent plus réguliers et les scories sont moins nombreuses. Cette tendance s'observe quel que soit le matériau bien que pour certains matériaux les scories ne disparaissent pas complètement.

La vitesse de coupe et la profondeur de pénétration sont augmentées lorsque le faisceau laser est accompagné d'un jet de gaz. Ce gaz, suivant sa nature, a trois fonctions:

1- protéger l'optique de focalisation des fumées, poussières et matière fondue,

2- éjecter la matière fondue,

3- améliorer par un effet thermique le rendement et la qualité de la découpe.

La dernière fonction correspond soit à un refroidissement rapide de la pièce dans le cas d'un matériau inflammable, soit à un apport calorifique supplémentaire par combustion. L'oxygène en contribuant par sa combustion au chauffage de la pièce, permet d'augmenter la vitesse de découpe jusqu'à un facteur 2. Un gaz neutre favorise un profil propre et non oxydé. Notons qu'un gaz est toujours nécessaire car la première fonction indiquée ci-dessus doit être assurée dans tous les cas. L'arrivée du gaz se fait par l'intermédiaire d'une buse qui permet un écoulement dans la direction du faisceau. Il importe, pouir une bonne qualité de coupe que le jet de gaz et le faisceau soient bien

centrés par rapport à la buse. La forme de la buse n'a pas une influence critique sur les paramètres de coupe. Le diamètre de sortie doit être aussi petit que le permet le faisceau afin de limiter la consommation de gaz ; en pratique, on utilise un diamètre de 0,7 à 3 mm. L'intérieur est de préférence recouvert d'un matériau réfléchissant à la longueur d'onde du laser. L'effet du jet de gaz semble optimisé pour une distance pièce-buse légèrement inférieure au diamètre de sortie de la buse (0,4 à 2, 5 mm environ).

La lentille de focalisation d'une buse de coupage sont choisies en fonction de l'épaisseur du matériau à couper. Pour un matériau métallique mince (1 à 2 mm), la distance focale de la lentille sera voisine de 50 mm ; pour des épaisseurs moyennes (10 à 20 mm), c'est une focale de 120 mm qui sera préférable et pour les épaisseurs supérieures pour des matériaux comme le bois ou le plexiglas, la distance focale pourra être de 250 mm. Pour une découpe optimale, la tache focale de la lentille est positionnée légèrement à l'intérieur du matériau à couper.



Fig. 4.5-15 : Vitesse maximale de coupe de différentes épaisseurs d'acier par un faisceau laser de 200 W en fonction du débit d'oxygène (d'après [*Duley.83*]).

La découpe par faisceau laser présente les avantages suivants:

- les métaux oxydables sont coupés facilement à grande vitesse,

- la largeur de l'entaille est plus faible que celle obtenue avec les autres méthodes thermiques; elle se situe entre 0,1 et 0,5 mm,

- la ZAT est négligeable.

Certains métaux très réfléchissants à $10,6 \mu m$ ne sont pas bien coupés par un laser à CO2. Le laser à Nd: YAG pulsé peut alors être une solution. L'entaille produite par un faisceau de laser à Nd:YAG est, à puissance et optique de focalisation identiques, plus large que celle produite par un faisceau de laser à CO2; ceci est dû à la mauvaise cohérence spatiale du faisceau de laser à Nd:YAG. Le faisceau de 400 W d'un laser à CO2, focalisé par une lentille de 10 cm de distance focale, produit une entaille de 0,2 mm de large alors que dans les mêmes conditions, on obtiendra une largeur de 0,5 mm avec un laser à Nd:YAG.

Laser	Matériau	Epaisseur (mm)	Vitesse (m/mn)	Commentaires
co ₂	Acier	10	6	Bons résultats, sauf
(> 1 kW)	Mat. organique	20	12	pour les matériaux métalliques
	Bois	20	3	réfléchissants dans l'IR(Cu, Ag)
Nd:YAG (0,2à 0,5kW)	Acier	0,5	2,5	

Tableau 11-10 : Quelques performances des lasers en coupage.

11.2.4.4.2 Effet de la polarisation sur la 'qualité' de découpe par laser.

La polarisation du faisceau a également une influence sur la qualité de la découpe. Le couplage optimal énergie laser-pièce est obtenu lorsque la direction de polarisation du faisceau est perpendiculaire à la surface de la pièce [*Halewijn.92*]. La figure ci-après montre, que pour un faisceau polarisé linéairement, la quantité d'énergie absorbée par la pièce dépend de la direction de déplacement relatif pièce-faisceau. Pour rendre la qualité de coupe indépendante de la direction de déplacement de la pièce, il est préférable d'utiliser un faisceau à polarisation linéaire.



un matériau.

L'absorption de rayonnement par la pièce est plus grande en (b) qu'en (c). La découpe n'est donc pas identique sur les deux parties de la trajectoire. Avec un faisceau polarisé circulairement, il n'y aurait pas de différence.

4.5.4.4.3 - Coupage de matériaux non métalliques.

Les lasers à CO2 de puissance comprise entre 100 et 2000 W peuvent être utilisés pour couper la plupart des matériaux jusqu'à des épaisseurs voisines du centimètre. Les avantages à utiliser un laser pour la découpe sont les suivants:

- il est possible d'obtenir une très bonne qualité de coupe ne nécessitant aucune reprise,
- les pertes de matière sont très faibles grâce à une largeur d'entaille voisine de 0,1 mm,

- le faisceau laser peut servir en même temps plusieurs postes de travail,
- il est possible de découper suivant des contours complexes et de commencer au milieu de la pièce,
- le faisceau peut être introduit à travers une fenêtre dans un milieu protégé,

- il est possible de faire une coupe sélective, par exemple dénuder un fil électrique tout en laissant le métal intact,

- aucune force n'est appliquée à la pièce.

On peut ajouter que le laser se prête bien à la commande numérique. Les machines de découpe par laser peuvent être entièrement automatisées. Les nuisances sont limitées à l'émission de fumées, éliminées par un dispositif d'aspiration.

Parmi les matériaux couramment coupés par laser, on peut citer le bois, les plastiques, les textiles. Pour le bois, le laser ne présente pas d'intérêt particulier par rapport à la scie mécanique, sauf pour la découpe suivant des motifs complexes. L'air constitue le gaz d'apport le plus efficace.

Les plastiques se découpent à peu prés de la même façon avec un jet d'oxygène, d'azote, d'hélium ou d'air. Le gaz n'améliore pas sensiblement la profondeur de coupe mais assure une coupe de meilleure qualité.

La découpe de textile est une opération courante dans l'industrie. Le laser présente pour cette application l'avantage d'une grande précision de coupe ainsi qu'une automatisation complète permettant de changer rapidement la forme des pièces découpées.

4.5.4.4 - Le laser comparé aux techniques concurrentes de coupage de matériaux minces

Parmi les autres techniques de coupage utilisées dans l'industrie, seule la technique du plasma offre une précision et une qualité de coupe comparable à celles obtenues par faisceau laser. Le laser présente sur les procédés thermiques les avantages d'un bord de coupe non oxydé et d'une entaille de largeur réduite.

Par rapport aux procédés mécaniques comme le grignotage, le poinçonnage et le cisaillage, le laser offre:

- des vitesses de coupe plus élevées en contours curvilignes ;
- une flexibilité plus grande dans l'exécution de petites séries ;

- une découpe sans contact et donc sans effort appliqué à la pièce ; les contraintes mécaniques sont ainsi réduites.

- la possibilité d'exécuter des petites séries de pièces différentes avec le même matériel.

Le laser offre de meilleures performances que l'oxycoupage et la torche au plasma pour le coupage de matériaux d'épaisseurs de l'ordre du centimètre :

- l'entaille est plus petite,

- les contours sont moins oxydés,

- les vitesses sont plus élevées. Pour les épaisseurs inférieures au centimètre, le laser est en concurrence avec les procédés mécaniques. En général, malgré un prix de revient élevé, le laser est la meilleure solution pour la découpe de pièces de faible épaisseur en petites séries.

Le laser est souvent mis en concurrence avec le jet d'eau, une autre technique développée récemment pour les découpes de matériaux minces. Le tableau ci-après donne quelques éléments de comparaison entre les deux techniques [*Defaux.89*].

Avantages	Technique	Inconvénients
Grande vitesse	Laser à CO2	Zone thermiquement affectée Tête de focalisation nécessaire
Précision		Dégagement de gaz et fumées
Facilement automatisable		Ne convient pas pour certains matériaux (Verre, Cu, Al)
		Investissement élevé
		Maintenance coûteuse
Outil froid(pas de ZAT)		Ne coupe pas les métaux
Simplicité d'emploi	Jet d'eau	Vitesse plus faible et précision moins bonne que le laser
ceux du laser et du jet d'eau abrasif)	pure	Humidité
Applicable aux matériaux hétérogènes		Bruit
Outil froid (pas de ZAT)	Lot d'oon	Faible vitesse (48 mm/mn) pour un acier de 20 mm d'épaisseur)
Applicable aux metaux tres réfléchissants qui ne peuvent être	abrasif	Coûts d'exploitation élevés
coupés par lasers à CO2(Cu, Al)		Traitement des effluents délicats
Épaisseurs coupées allant jusqu'à 50 mm pour les aciers, 80 mm pour les céramiques et 120 mm pour les verres		Humidité et particules abrasives dangereuses pour les machines
feuilletés.		Bruit

Tableau 11-13 :	Quelques élémen	ts de comparaison	laser -jet d'eau	i pour la découpe
-----------------	-----------------	-------------------	------------------	-------------------

4.5.4.5 PRÉDÉCOUPE.

La découpe de matériaux durs et fragiles comme la céramique, le verre ou le silicium, peut être obtenue par cassure le long d'une ligne marquée par un faisceau laser. Cette technique de découpe est économique puisqu'elle ne nécessite que l'enlèvement d'une mince couche de matière mais ne peut s'appliquer qu'aux lignes droites.

4.5.4.6 ÉQUILIBRAGE DYNAMIQUE DE COMPOSANTS MÉCANIQUES.

Le faisceau laser permet d'usiner une pièce sans contact mécanique. Il est donc possible de l'utiliser pour enlever de la matière sur des pièces en mouvement afin, par exemple, d'équilibrer une pièce en rotation. L'appareillage doit permettre la localisation de la matière excédentaire et la synchronisation des impulsions laser avec la rotation de la pièce. L'équilibrage dynamique est possible sur des pièces en rotation jusqu'à des vitesses de 20 000 tours par minute.

4.5.4.7 FABRICATION DE COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES.

Le laser a rendu possible la fabrication de composants électroniques de grande précision. Les caractéristiques du composant sont ajustées par enlèvement de matière sur le composant inséré dans le circuit d'utilisation. L'utilisation d'impulsions laser de courte durée permet de limiter les dégâts dus aux effets thermiques.

Parmi les applications de l'enlèvement de matière par laser dans l'industrie électroniques, on peut citer:

- la fabrication de condensateurs à couches de tantale-chrome-or,

- la fabrication de masques dans la réalisation de circuits électroniques complexes,

- la découpe directe de circuits ou de résistances en couches minces sur un substrat transparent,

- l'ajustage dynamique de composants: résistances, condensateurs, quartz,

- la fabrication de matériaux en couches minces par évaporation sous l'action du faisceau.

4.5.4.8 MICRO-USINAGE PAR ABLATION

Au début des années 80 sont apparus de nouveaux lasers utilisés pour la transformation des matériaux : les lasers à excimères émettant un rayonnement dans l'ultra-violet. Ces lasers présentent plusieurs avantages par rapport aux laser émettant dans l'infra-rouge :

- la longueur d'onde plus petite (entre 0,1 et 0,4 $\mu m)$ permet un usinage de plus grande précision.

- la grande énergie des photons permet l'enlèvement de matière par rupture directe des liaisons interatomiques, en particulier dans les matériaux organiques ; la zone affectée thermiquement est ainsi très réduite, voire inexistante.

- le faisceau est impulsionnel avec des impulsions de 15 à 30 ns ; les puissances crêtes sont donc très élevées.

- l'absorptivité des matériaux est meilleure dans l'UV que dans l'IR.

- le faisceau présente une section rectangulaire d'environ 10 cm^2 avec un profil assez régulier et peut être directement projeté sur la piéce à traiter.

4.5.4.8.1 Micro-usinage et structuration de surfaces

Les lasers à excimères sont particulièrement attractifs pour les applications où il s'agit d'enlever une très faible quantité de matière avec une grande précision. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des matériaux organiques, mais les céramiques sont aussi de bons candidats. Avec des impulsions de 100

J/cm², la quantité de matière enlevée par impulsion (ou taux d'ablation) varie entre 0,1 et 2 μ m. Le profil de faisceau a une allure rectangulaire avec des variations d'irradiance dans la section (Fig. 17); un homogénéiseur est en général utilisé avant l'introduction du faisceau à travers le masque et le système de projection.



Fig. 4.5-17 :

Profil spatial d'un faisceau de laser à excimère.



Fig. 4.5-18 : Schéma d'une machine d'usinage par laser à excimère.



Fig. 4.5-19 : Micro-usinage de la surface d'un polymère

(a) impulsion d'un laser à excimère ; (b) impulsion d'un laser à CO2. La zone affectée thermiquement apparaît nettement dans le cas du faiceau IR alors que dans le cas du faisceau UV elle est inexistante.

4.5.4.8.2 Nettoyage de surface

Les impulsions laser peuvent être utilisée pour enlever de façon sélective des impuretés à la surface d'un substrat. Parmi les applications, on peut citer le nettoyage de moules de fonderie, le nettoyage de monuments historiques et d'œuvres d'art, l'enlèvement de vieilles peintures sur des pièces métalliques.

4.5.4.8.3 Deposition de matiére par ablation

Le phénomène d'ablation de matiére par lasers impulsionnels a permis le développement d'une nouvelle technique de préparation de composants pour l'électronique ou l'optique : la déposition par laser impulsionnels. La matière d'une cible placée dans une enceinte sous vide est vaporisée et éjectée sous l'action d'impulsions laser de courte durée. Un substrat est placé au voisinage du panache de matiére vaporisée ainsi formé, recevant cette matiére sous la forme d'un dépôt de surface. En déplaçant cible et substrat, on obtient une couche uniforme aux propriétés intéressantes en électronique ou optique intégrée.

4.5.5 SOUDAGE LASER.

4.5.5.1 Présentation du problème

La fusion rapide de matière par faisceau laser a permis l'utilisation de cette forme d'énergie pour souder ou traiter thermiquement des matériaux très divers. Le soudage laser est une opération délicate ; il ne faut en effet pas éjecter la matière fondue comme lors d'une découpe et on doit éviter de perdre de la matière par vaporisation. Le soudage au laser est possible soit avec un faisceau continu (laser à CO2), soit avec un laser pulsé (laser à CO2 ou laser à Nd-YAG). Une densité de puissance comprise entre 0,1 et 1 MW.cm⁻² est nécessaire.

Un gaz est en général soufflé sur la zone d'interaction. Ce gaz a deux fonctions.

- Comme en découpe le gaz dévie les particules de matière éjectées en direction de l'optique de focalisation qui est ainsi protégée.

- L'utilisation d'un gaz neutre permet d'éviter l'oxidation du cordon de soudure.

Les processus physiques mis en jeu en soudage laser ne sont pas les mêmes à faible et à forte puissance. Pour une puissance incidente pouvant aller jusqu'à 2 kW environ, c'est la diffusivité thermique du matériau qui est le paramètre déterminant. Un cordon de soudage réalisé dans ces conditions a une section semi-circulaire. Aux plus fortes puissances, le couplage de l'énergie laser dans la pièce est amélioré par un phénomène de capillarité; des matériaux métalliques d'une épaisseur de l'ordre du centimètre peuvent être ainsi soudés (figure ci-dessous).



Aux puissances très élevées, on observe l'ionisation des vapeurs métalliques et du gaz de couverture. Le plasma ainsi formé peut devenir gênant en se propageant le long du faisceau ; une partie de l'énergie laser est alors absorbé et diffusé avant arrivée sur la piéce. L'utilisation d'un jet auxiliaire d'hélium pour soufler hors du faisceau les vapeurs ionisées, permet de repousser la limite maximale d'utilisation du faisceau.

La technique de soudage par laser présente les avantages suivants :

- l'absence de contact entre l'outil et la pièce,
- le chauffage du matériau est très rapide,
- la zone affectée thermiquement est très peu étendue,
- les contraintes résiduelles sont très faibles ou inexistantes,
- les déformations sont très limitées.

La très bonne localisation de la chaleur apportée au matériau, est particulièrement appréciée en micro-électronique pour les opérations de soudage de précision.

Les soudures laser ont une bonne tenue mécanique. La résistance à la rupture et la dureté sont voisines ou supérieures à celles du métal de base. Par exemple, la résistance au cisaillement de la soudure de 2 fils de nickel de 0.5 mm de diamètre atteint jusqu'à 70 % de la résistance des fils [*Pfluger.65*]. Le faisceau laser peut être utilisé pour souder deux fils mis bout à bout, côte à côte ou croisés. On peut également souder un fil sur un ruban ou un ruban sur un ruban.

La meilleure soudure est obtenue dans le cas où on permet au faisceau de chauffer simultanément les deux pièces. Soulignons également qu'il n'est pas nécessaire de dénuder les fils avant la soudure, le faisceau laser se chargeant de cette opération par vaporisation du revêtement, très absorbant dans l'infrarouge.

Avec le faisceau laser, on peut aussi, dans certains cas, souder des matériaux différents: nickel et cuivre, nickel et titane, tantale et molybdène.

Le succès d'une soudure au laser est lié à l'observation des précautions suivantes [Anderson.65] :

- les deux pièces sont de préférence chauffées simultanément;

- la distance entre lentille de focalisation et pièce à souder est égale à la distance focale à 2% prés. Le faisceau est focalisé légèrement en dessous de la surface;

- un gaz inerte, azote ou argon, doit être utilisé pour les matériaux réactifs.



4.5.5.2 - SOUDAGE AVEC DES LASERS DE FAIBLE ET MOYENNE PUISSANCE (INFÉRIEURE À 2 KW)

Les phénomènes physiques mis en jeu lors du chauffage des pièces à assembler dépendent du niveau de puissance du faisceau laser. Aux faibles puissances il se forme une couche liquide à partir de laquelle la chaleur se propage sur une faible épaisseur, la géométrie de la surface étant peu modifiée. Le couplage de l'énergie laser se fait alors par absorption directe du rayonnement à la surface. A forte puissance, l'apparition d'une cavité au sein du bain fondu change les conditions de couplage, comme décrit au pargraphe suivant.

Lors du soudage de deux pièces par faisceau laser, un contact parfait entre les deux pièces n'est pas indispensable. L'interstice ne doit cependant pas être trop grand pour être rempli par le métal fondu; une distance de 0.1 à 0.2 mm ne semble pas affecter la qualité de la soudure. Les tolérances sur les positions des pièces peuvent être exprimées en fonction de leur épaisseur. Si la distance entre les deux pièces est supérieure au quart environ de leurs épaisseurs, les soudures obtenues sont poreuses. Dans le cas où une meilleure proximité ne peut être réalisée, un apport de matériau doit être envisagé.

De nombreux essais de soudure au laser ont été réalisés depuis 1965, d'abord avec des lasers solides à impulsions puis avec des lasers CO2 continus de quelques centaines de Watts. Ces essais ont permis d'établir la relation entre profondeur de pénétration et vitesse de déplacement du matériau par

rapport au faisceau pour différents matériaux. Les résultats obtenus obenus à l'Irepa¹ avec un acier doux avec une puissance laser de 1,2 kW et moins sont présentés sur la figure 22.



Fig. 4.5-22 : Épaisseur de soudure en fonction de la vitesse de déplacement relatif faisceau-pièce pour diverses puissances de laser à CO2. Matériau : fer doux

Avantages	Inconvénients
Faible zone affectée thermiquement	Nécesssité d'une grande précision de positionnement
Atmosphère ambiante	Profondeur limitée(12 mm d'acier à 5 kW)
Des matériaux différents peuvent être assemblés	Contrôle de processus difficile
Vitesses importantes (0,5 m/mn à 5 kW pour un acier de 12 mm d'épaisseur)	

Tableau 11-14 : Avantages et Inconvénients du soudage par faisceau laser

4.5.5.3 SOUDAGE AU LASER À CO2 CAS DES LASERS DE TRÈS GRANDE PUISSANCE (SUPÉRIEURE À 2 KW).

Lorsque la puissance du rayonnement laser est supérieure au kilowatt, on observe un autre mécanisme de pénétration de la chaleur dans la pièce. Sous l'action du rayonnement, il y a formation d'une cavité dans le métal; l'énergie du faisceau est absorbée par la couche liquide tapissant la paroi et le fond de cette cavité.

L'utilisation d'un faisceau de très forte puissance entraîne la formation d'un **plasma** au-dessus de la cible. Il a été montré que ce plasma absorbe et réfracte le faisceau laser. Aux densités de puissance voisine ou inférieure à 1 MW.cm², les vapeurs ionisées restent confinées au voisinage de la surface et réémettent dans le milieu environnant un rayonnement à large spectre avec une dominance dans l'UV. Ces nouvelles radiations sont bien absorbées par le métal et globalement le bilan énergétique reste favorable. Avec l'augmentation de puissance, le panache ionisé tend à se développer, perturbant ainsi l'action du faisceau. L'obtention d'un cordon régulier n'est alors possible que par un soufflage approprié des vapeurs.

¹ IREPA-LASER http://www.irepa-laser.com/

Il existe des lasers de puissance supérieure à 10 kW destinés à des opérations de soudage (et de traitement thermique) ; les modèles de 3 à 5 kW sont plus courants et permettent de souder des tôles d'acier jusqu'à 1 cm d'épaisseur. Comme dans les cas des faibles puissances, la meilleure soudure est obtenue lorsque le faisceau est focalisé légèrement en dessous de la surface. Les épaisseurs maximales d'acier pouvant être soudées avec un laser à CO2, dépendent des caractéristiques spatiales du faisceau et de la puissance disponible: 0.5 mm pour 300 W, 5 mm pour 1 kW, 10 mm pour 5 kW.



Fig. 4.5-23 : Zone d'interaction entre le faisceau laser et le matériau au cours d'une opération de soudage en forte épaisseur.

Le rayonnement est piégé par la cavité qui s'est formé. La quasitotalité de l'énergie laser est alors couplée à la pièce.

Le processus de soudage profond avec les lasers de grande puissance est similaire au soudage par faisceau d'électrons. On observe cependant une différence aux faibles vitesses vitesses de déplacement. Alors que la pénétration du faisceau d'électrons augmente lorsque la vitesse de déplacement de la pièce diminue, l'épaisseur de la couche fondue sous l'action du faisceau laser tend à se saturer. Le laser présente cependant l'avantage de pouvoir être utilisé à la pression atmosphérique.

Les matériaux qui se prêtent bien au soudage par faisceau laser sont : les aciers, le titane, les alliages de bronze et laiton, l'Inconel 625. D'autres matériaux peuvent être soudés mais avec quelques difficultés comme le cuivre, certains aciers utilisés pour l'outillage, l'aluminium. Les matériaux trés réfléchissants comme le zinc, l'argent ou l'or sont difficilement soudables au laser ; il en est de même des aciers galvanisés, à cause de la faible température de vaporisation du zinc par rapport à celle de l'acier.



Fig. 4.5-24 : Allure typique d'un cordon de soudage au laser.

Remarquer la partie supérieure élargie par étalement de la chaleur à l'intérieur du matériau et chauffage par le rayonnement émis par le plasma d'interaction. En profondeur le cordon reste étroit grâce à l'amélioration du couplage d'énergie par le capillaire.

Matériau	Épaisseur	Vitesse	
	(mm)	(m/mn)	
Acier doux	2	1,5	Tableau 11-15 : Performances
Acier doux	4	0,43	
Acier inox	0,5	10,8	matériaux courants à l'aide d'un
Acier inox	6,5	0,35	laser à CO2 de 2 kW (d'après
Titane	4	0,53	[]
Alliage Ti	2	3	

4.5.5.4 - SOUDAGE PAR FAISCEAU DE LASER À ND: YAG

Les lasers à Nd:YAG impulsionnels peuvent être utilisés pour le soudage de matériaux de faible épaisseur. Une impulsion laser de 0.5 joule à quelques joules, de durée 0.5 à quelques millisecondes, focalisée sur la surface d'un métal, permet d'atteindre les 10^6 W/cm² nécessaires à la fusion du matériau sur une épaisseur de quelques dixièmes de millimètres. Avec une série de ces impulsions, il est possible de réaliser un cordon de soudure sur deux tôles minces ou sur une tôle mince pressée contre un substrat épais. Un recouvrement de 50% des points de soudure suffit pour rendre celle-ci étanche à l'hélium.

Les lasers à Nd:YAG trouvent de nombreuses applications de soudage dans l'industrie électronique. Les avantages recherchés sont :

- une grande précision (de l'ordre de 10 µm),
- une excellente qualité de soudure,
- l'absence de déformation de la pièce.

Le laser à Nd:YAG est également la solution idéale pour les soudages délicats rencontrés en micromécanique: soudage de ressorts de montres sur leur axe; soudage de boîtiers métalliques au voisinage de composants électroniques ou optiques fragiles. Les épaisseurs soudées varient entre 10 μ m et 1.5 mm.

Bien que de nombreux essais de soudage laser à Nd:YAG aient été réalisés dans les laboratoires, il est souvent difficile de corréler les différents résultats. Une bonne approche du problème consiste à faire réaliser une série d'essais afin de comparer les performances du laser à CO2 et celles du laser à Nd:YAG et dans ce dernier cas, de déterminer:

- la puissance moyenne nécessaire,
- les limites de la durée d'impulsion,
- la fréquence de répétition des impulsions.

Des essais comparatifs réalisés avec un laser à Nd:YAG et un laser à CO2 ont montré que pour l'acier, à puissance égale, les profondeurs de soudure sont à peu prés les mêmes. Les résultats différent dans le cas des métaux de grande conductivité pour lesquels le laser à Nd:YAG donne de meilleurs résultats. Le laser à Nd:YAG, grâce à son fonctionnement par impulsion, convient mieux également pour les pièces délicates ne devant subir qu'un minimum de contraintes thermiques. Néanmoins, la puissance maximale disponible émise par un laser à Nd:YAG, soit environ 400 W, limite à 1.5 mm environ les épaisseurs qui peuvent être soudées.

4.5.5.5 - COMPARAISON ENTRE LE SOUDAGE PAR LASER ET LES TECHNIQUES CONCURRENTES

Un cordon de soudage réalisé par laser présente un état de pureté supérieur à celui obtenu avec d'autres techniques comme l'arc électrique ou le plasma ;on y observe une teneur en azote et oxygène de 20 à 30 % inférieure à celle du métal de base. Cette particularité vient du mode de chauffage. Avec le faisceau laser, le phénomène de conduction n'est pas prédominant, la zone de forte énergie restant le bain de fusion. Le gradient de chaleur favorise l'évacuation des impuretés vaporisées en dehors du bain liquide. Les inclusions non métalliques sont ainsi éjectées hors du métal, entraînant une purification du cordon.

Par rapport aux autres techniques de soudage (TIG, miniplasma, faisceau d'électrons) le laser offre une plus grande flexibilité. Le laser peut en particulier servir en temps partagé à plusieurs opérations de nature différente : soudage, découpe, traitement thermique. Avant d'installer un laser, il est utile de répertorier toutes les opérations susceptibles d'être effectuées par le laser. Les aspects économiques ne sont pas toujours à l'avantage du laser; mais peu de sources d'énergie offrent à la fois précision, rapidité et souplesse.

TECHNIQUE	AVANTAGES DU LASER		
Arc électrique	Pas de métal d'apport, déformation négligeable, vitesse plus grande.		
Résistance	Avantages ci-dessus + absence de contact avec la pièce, soudage de zones à accès difficile.		
Faisceau d'électrons	Opération en atmosphère ambiante, soudage de matériaux magnétiques		

Le tableau ci-après donne quelques avantages du laser par rapport à d'autres procédés de soudage.

Tableau 11-16 - Avantages du laser par rapport à quelques autres techniques de soudage.

4.5.6 TRAITEMENTS DE SURFACE

4.5.6.1 - INTRODUCTION

Certaines piéces mécaniques subissent en surface des actions provoquant leur usure rapide. Il est donc souhaitable de traiter ces surfaces pour les rendre plus résistantes, suivant le cas à la fatigue, au frottement, à l'oxydation ou à la corrosion.

Plusieurs types de traitement peuvent être envisagés : le durcissement par choc thermique, la refusion d'une couche superficielle avec ou sans injection de particules dures, le revêtement de la surface par un dépôt en couche mince (rechargement, glaçage).

4.5.6.2 - TRANSFORMATIONS THERMIQUES

Les surfaces de certains métaux acquièrent une dureté exceptionnelle et une grande résistance aux contraintes mécaniques et thermiques après un ou plusieurs cycles de chauffage et refroidissement rapides. Ce processus, dit de traitement thermique, peut être avantageusement réalisé à l'aide d'un faisceau laser. Le durcissement de la pièce est obtenu en ajustant la puissance du faisceau laser afin que la température de la surface de la pièce reste légèrement inférieure à la température de fusion du matériau. La durée de l'action du faisceau est ajustée afin que la transformation de phase se produise sur la profondeur désirée. Le gradient de température entre la surface et la masse provoque le changement de phase.

Les avantages du laser en traitement thermique sont les suivants:

- l'étape de trempe classique est inutile; le matériau est seulement chauffé.

- la transformation thermique est limitée à la zone éclairée par le faisceau; le traitement peut donc être localisé sur une partie de la pièce.

- l'automatisation du traitement est facile.

Les matériaux les plus couramment traités au laser sont les aciers et les fontes. L'épaisseur de matière transformée est fonction de l'irradiance du rayonnement et du temps d'interaction et peut facilement être modifié en cours de traitement. On cherche en général à traiter une épaisseur voisine de 0.5 mm. Afin d'améliorer le couplage de l'énergie laser en énergie de chauffage de la pièce, il est parfois nécessaire de recouvrir la surface à traiter d'une poudre dont l'absorption est meilleure que celle du matériau de base.

Le laser à Nd:YAG pulsé est mal adapté au traitement thermique de surface. Ce sont les lasers à CO2 de puissance supérieure à 1.5 kW qui sont utilisés pour cette application.

La faible dimension de la tache focale du faisceau laser peut être compensée par un balayage rapide du faisceau sur la surface à traiter au moyen d'un miroir à multiples facettes, monté sur un axe de rotation : le déplacement de la pièce permet le traitement suivant un deuxième axe (figure ci-après).



Di

4.5.6.3 - REFUSION OU GLAÇAGE DE SURFACE

La surface de la pièce est chauffée rapidement jusqu'à une température entre la fusion et la vaporisation. La solidification rapide entraîne, pour certains matériaux, l'apparition d'une phase métastable aux propriétés physiques intéressantes. Il se crée en particulier une microstructure trés fine, plus dure que le matériau en volume. Ce traitement en phase liquide donne de bons résultats dans le cas des fontes ou dans le traitement des aciers d'outils de coupe. Le procédé est efficace si le chauffage a lieu pendant un temps trés court, par exemple une densité de flux de quelques MW.cm2 appliquée pendant une microseconde.

Si le glaçage est réalisé à l'aide d'un autre métal, on parle de placage. En déposant ainsi du chrome sur un acier, on augmente la dureté de la surface.

La refusion de surface peut être également faite dans le but d'injecter dans le bain de fusion des particules dures. On procède alors comme pour la réalisation d'un alliage localisé ou d'un rechargement, techniques que nous décrivons ci-après.

4.5.6.4 - ALLIAGE SUPERFICIEL LOCALISÉ

Le faisceau laser peut être aussi utilisé pour réaliser un alliage localisé ou une métallisation de surface. L'alliage localisé consiste à déposer sur la surface à traiter, un matériau sous forme de poudres ou de feuilles minces, puis à chauffer à l'aide du faisceau laser. Le matériau d'apport et une couche superficielle de la pièce entrent en fusion. Le mélange se produit par diffusion provoquée par le

gradient de température. L'alliage ainsi obtenu confère localement à la surface des propriétés exceptionnelles de dureté ou de résistance à l'abrasion. La technique d'alliage de surface par faisceau laser promet d'être économiquement rentable; en effet, l'apport de la matière nécessaire à l'alliage est limité au minimum.

Une application qui a fait ses preuves consiste à faire un alliage à base de nickel sur un acier pour en améliorer la tenue à l'abrasion et la corrosion.

4.5.6.5 - RECHARGEMENT DE SURFACE

Le rechargement de surface (ou *cladding*) consiste à fixer à la surface d'un substrat une couche d'un matériau dur ou résistant à l'usure en réduisant la fusion du substrat au minimum. En évitant l'alliage, on évite que le substrat dégrade les propriétés du matériau apporté. Le matériau déposé arrive sous forme de poudres ou est prédéposé sur le substrat. Cette application a déjà trouvé des applications industrielles : recouvrement de pales de turbine ou de valves de moteurs à explosion.



4.5.6.6 - DURCISSEMENT PAR CHOC

Une impulsion laser de grande énergie et de courte durée provoque à la surface d'un matériau une vaporisation rapide accompagnée d'une onde de choc. Dans certains matériaux métalliques, cette onde de choc peut entraîner des contraintes de compression, et par conséquence d'un durcissement. Ce type de traitement de surface peut améliorer la tenue en fatigue du matériau. Le laser le mieux adapté à ce type de traitement est le laser à Nd:verre.

4.5.7 LE LASER DE PUISSANCE ET SON ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL

4.5.7.1 - MACHINES D'USINAGE LASER

4.5.7.1.1 - Déplacements relatifs du faisceau et de la pièce usinée

Dans la plupart des applications d'usinage ou de traitement de matériau par laser, un mécanisme de déplacement de la pièce par rapport au faisceau est indispensable. Deux possibilités peuvent se présenter :

- L'opération a lieu sur une pièce encombrante et lourde: la pièce reste immobile et le faisceau se déplace par un jeu de miroirs.

- La pièce est peu encombrante et sa géométrie est simple : le faisceau reste fixe et la pièce est déplacée. Dans tous les cas la tache de focalisation doit être positionnée avec une précision comprise entre 0,01 et 0,1 mm suivant l'application.

Pour les applications où le faisceau doit balayer la pièce à grande vitesse comme pour le marquage, on utilise des déflecteurs à miroirs galvanométriques.



Fig. 4.5-27 : Exemple de machine d'usinage 3-D par laser. Le système comprend 5 axes : 3 translations et 2 rotations. Une structure légère en fibre de carbone assure un minimum d'inertie aux parties mobiles. [11-11]

4.5.7.1.2 Évacuation des fumées

Le traitement des matériaux organiques par faisceau laser se fait en général avec dégagement d'abondantes fumées résultant de la combustion du matériau. Une hotte d'aspiration des fumées doit être prévue dans toute installation d'usinage par laser. La solution la plus efficace consiste à aspirer à la fois par le haut et par le bas car une partie des fumées est refoulée vers le bas par le gaz de protection éjecté à travers la buse.

4.5.7.1.3 Dispositifs de sécurité

Les lasers utilisés en usinage doivent être manipulés avec de grandes précautions. En effet, contrairement aux autres procédés de fabrication, ici l'outil est invisible. Le faisceau laser, à cause de sa grande directivité, présente un grand danger pour la peau et pour l'oeil. Dans le cas des lasers de fortes puissances les dangers de brûlures par exposition au faisceau, sont réels. Toutes les mesures doivent donc être prises afin que l'utilisateur ou toute autre personne se trouvant à proximité, ne puisse être exposé au faisceau direct ou aux réflexions par la pièce usinée ou son support. Les mesures élémentaires de sécurité sont les suivantes:

- le trajet du faisceau, de la source à la pièce, doit être enfermé;
- la zone d'usinage doit être entourée d'un matériau opaque au rayonnement laser utilisé;
- l'accès au laser doit être contrôlé;

 l'opérateur doit porter des lunettes de protection; celles-ci doivent être traitées par un recouvrement réfléchissant à 1,06µm pour les lasers à Nd:YAG et peuvent être ordinaires pour les lasers à CO2;

- des signes visuels et sonores doivent prévenir les autres personnes de l'état de fonctionnement du laser;

- les réglages du faisceau doivent être faits par un personnel qualifié.

Enfin, il ne faut pas négliger :

- les dangers électriques liés à la présence d'une alimentation à haute tension
- les dangers de pollution chimique lors de l'usinage de certains matériaux organiques.

4.5.7.1.4 Machines d'usinage et commandes associées

La découpe et le soudage de matériaux par faisceau laser ne se posent pas uniquement en terme de laser. La mécanique d'une part, pour le positionnement de la tache focalisée, l'électronique et l'informatique d'autre part pour la définition et le suivi de trajectoires complexes par le faisceau, jouent un rôle essentiel. Les trajectoires sont définies par un logiciel de DAO. Les données sont ensuite modifiées en tenant compte des spécificités de l'usinage par laser ainsi que des caractéristiques dynamiques de la machine. Un processeur spécialisé transfère les informations à la Commande Numérique reliée aux axes [*Charles.88*]

4.5.7.1.5 - Maintenance des systèmes laser

4.5.7.2 ATELIER FLEXIBLE ET LASER

Nous avons déjà souligné que les avantages du laser pour les différentes opérations d'usinage ne doivent pas être évalués sur une application unique, mais sur l'ensemble des possibilités du laser. Le laser a déjà fait ses preuves en tant qu'outil compétitif et parfois irremplaçable pour un grand nombre d'opérations d'usinage. Mais c'est dans un environnement adapté à ses particularités que le laser offre la plus grande rentabilité. On peut prévoir que des ateliers intégrant la technologie laser se développeront de plus en plus au cours des prochaines années, donnant tout son sens au concept d'atelier flexible.

4.5.7.3 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS LIÉS À L'UTILISATION DE LASERS POUR LA TRANSFORMATION DE MATÉRIAUX

Le faisceau laser présente les <u>avantages</u> suivants pour les applications de transformation des matériaux.

- L'énergie apportée au matériau est localisée sur une très petite surface, en général de diamètre voisin de 0,1 mm. Il y a très peu de perte de matière.

- L'apport d'énergie est très rapide ; la vitesse est souvent limitée par la mécanique de positionnement dynamique.

- La zone affectée thermiquement est peu étendue.

- Les opérations sont rapides et précises.

- La pièce traitée n'est pas en contact avec l'outil : aucune contrainte mécanique n'est exercée sur la pièce et les risques de contamination sont faibles. Des pièces de petites dimensions, des matériaux trés durs ou trés mous peuvent être usinés sans difficultés. Il n'y a pas usure de l'outil.

- La qualité obtenue est en général satisfaisante, les reprises de fabrication ne sont généralement pas nécessaires.

- Le faisceau peut servir plusieurs postes en temps partagé.

- L'opération a lieu sous atmosphère gazeuse à pression ambiante.

- Le laser se prête bien à l'utilisation au sein d'un atelier flexible à condition que les particularités du laser soient prises en compte dès la conception.

Parmi les inconvénients des lasers, on peut citer:

- la nécessité de disposer de personnels formés à l'utilisation des lasers,

- le danger du rayonnement pour les utilisateurs,
- une fiabilité limitée de certains composants: optiques, lampes de pompage des lasers solides;
- l'adaptation nécessaire des procédures de fabrication,

- l'insuffisance de techniques de contrôles de processus.

L'inconvénient principal est souvent le coût d'installation élevé. La meilleure rentabilité à moyen terme est obtenue lorsque l'ensemble de l'implantation de l'atelier a été revue en tenant compte des particularités du faisceau laser et de ses possibilités multiples. De façon générale l'outil laser s'impose :

- lorsque le composant est fragile et que la zone affectée thermiquement doit être réduite,

- lorsque le matériau est difficile à usiner,
- lorsqu'il faut éviter toute contamination et tout contact électrique.

4.5.7.4 LES LASERS DE FORTE PUISSANCE DANS LES DIFFÉRENTS SECTEURS INDUSTRIELS

L'outil laser a commencé son essor industriel dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique avant de trouver des applications dans tous les domaines de la production.

4.5.7.4.1 Le laser dans l'industrie électronique

Le laser a trouvé de multiples applications dans l'industrie électronique. On peut citer en particulier

- le soudage de fils de petit diamètre et de thermocouples (avec le faisceau laser, il est en particulier possible de souder des fils émaillés sans enlèvement préalable de l'émail),

- le soudage d'électrodes à travers une enceinte de verre,

- le marquage des disques de silicium,
- le dénudage de fils sans détérioration du matériau conducteur,

- l'ajustage de composants (résistances, condensateurs, oscillateur à quartz) dans leurs circuits de test,

- l'inscription des cédéroms,

•

- la photolithographie. Les lasers les plus utilisés sont les lasers à Nd:YAG et les lasers à excimères.

4.5.7.4.2 Le laser dans l'industrie mécanique

Le faisceau laser est devenu un outil très courant dans les industries mécanique pour la découpe de matériaux de faible épaisseur (0,5 à 5 mm). A peu près tous les matériaux peut être coupés par laser; seuls les métaux très réfléchissants comme le cuivre et l'aluminium résistent aux fortes intentés du faisceau laser. Le soudage des métaux est également souvent réalisé par laser, bien que cette technique soit plus difficile à maîtriser que le coupage.

Comme applications on peut citer : la découpe de lames de scie circulaires à l'aide d'un laser à CO₂ de 1,5 kW, le coupage de tableaux de bord de voitures, le soudage d'éléments de carosseries, le soudage de boitiers d'excitateurs cardiaques, le perçage d'ailettes de turbines.

Le faisceau laser, en ne nécessitant de contact entre la pièce et l'outil, a permis l'apparition d'applications nouvelles comme l'ajustage dynamique de pièces en mouvement. Les composants de l'horlogerie classique ont ainsi gagné en précision grâce au laser.

Parmi les multiples possibilités du laser dans l'industrie mécanique, on peut encore mentionner le perçage des trous de petits diamètres (dizaine de microns) dans les matériaux aussi bien mous que très durs.

4.5.8 TECHNIQUES DE MESURE ET DE CARACTÉRISATION DE L'INTERACTION.

Parmi les points qui pourraient également être développés dans ce chapitre, il y a : la caractérisation du faisceau de puissance, l'analyse du profil spatial du faisceau, le contrôle de procédé ... Ce texte n'avait pas la prétention d'être exhausif ...

4.5.9 **BIBLIOGRAPHIE**

- Un ouvrage récent sur l'usinage et le traitement laser de matériaux : « The theory of Laser Material Processing », John Dowden, Editor, Springer Series in Material Sciences, ISBN-13 978-1-4020-9339-5, 2009 (Bibl Insa Strasbourg I4a-DOW) avec en particulier un chapitre sur le *cladding* et un autre sur l'interaction entre un métal des impulsions laser femtosecondes.
- <u>Références citées :</u>

[Anderson.65] - J. E. Anderson, J. E. Jackson; Welding J., N°44, p. 264, 1965

- [Babenko.73] V. P. Babenko, V. P. Tychinski, Sov. J. of Quantum Electronics, N°2, p99, 1973
- [Bass.80] M. Bass; Laser heating of solids, Physical Processes on Laser-Material Interaction, Nato Advanced Study Institute Series, Serie B, Vol. 84, p. 89, 1980
- [Carlslaw.59] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, Conduction of heat in solids, Oxford University Press, 1959
- [*Charles*.88] P. Charles, T. Engel, R. Ferguson, J. Fontaine, B. Keith, W. Klings; "A laser cutting and welding cell for 3-D metal sheet", Proc. of the 4th International Conference on Lasers in Manufacturing, pp223-232, Stuttgart, Sept. 1988
- [Defaux.89] M. Defaux, "Jet d'eau ou laser : la découpe à la carte", Technologies, 28, Juillet 1989
- [Duley.74] W. W. Duley and J. N. Gonzalves, Opt. Laser Techn., 6, p78, 1974
- [Duley.83] W. W. Duley, Laser processing of materials; Plenum Press, New York, 1983
- [Gonsalves. 72] J. N. Gonsalves and W. W. Duley, J. of Applied Physics, 43, p4684, 1972
- [Engel.79] S. L. Engel; Laser Focus, Fev. 1979, p. 44
- [*Engel.88*] T. Engel, J. Fontaine; "Guidage de faisceau de laser à CO2"; Proc. de la conférence OPTO 88, p407, mai 1988
- [*Halewijn.92*] "Laser material processing : effects of polarization and cutting velocity" ; H. J. van Halewijn, The Industrial Laser Handbook, 92-93 edition, pp108-111), Springer-Verlag, (1992)
- [*Herziger*.86] G. Herziger, E. W. Kreuz, K. Wissensenbach; "Fundamentals of laser processing materials", SPIE Proc. Vol. 668, 1986
- [Locke.74] E. V. Locke, R. A. Hella; IEEE J. of Qu. Electronics, QE-10, p. 179, 1974
- [Optics.90] Optics and Laser Technology, 22, p381, dec. 1990
- [Pfluger.65] A. R. Pfluger, P. M. Mass; Welding J., N° 44, p264, 1965
- [Ready.71] J. F. Ready, Effects of high power laser radiation; Academic Press, New York, 1971
- [Ready. 78] J. F. Ready, Industrial applications of lasers; Academic Press, 1978
- [Ready.83] J. F. Ready, Proceeding of the IEEE, Vol. 70, N° 6, 1983