

m1643

## Application des lasers aux traitements de surface

Date de publication : 10/10/1996

Par :

**Patricia LAURENS**

Docteur de l'Université Paris VI, Chargé de recherche du CNRS au Laboratoire d'application des lasers de puissance - Unité mixte ETCA - CNRS (LALP)

**Catherine DUBOUCHET**

Docteur de l'Université Paris XI, Ingénieur de recherche chez Peugeot-Citroën (PSA)

**Didier KECHEMAIR**

Ingénieur de l'École polytechnique, Docteur de l'Université Paris XI, Chef du Département « espace et techniques avancées » au ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Ancien Directeur adjoint du Laboratoire d'application des lasers de puissance (LALP)

Cet article fait partie de la base documentaire :

[Archives] Traitement des métaux

Dans le pack :

et dans l'univers : Archives



Cet article peut être traduit dans la langue de votre choix.  
Accédez au service *Traduction à la demande* dans votre espace « Mon compte ». (Service sur devis)

---

Document délivré le : 09/04/2015

Pour le compte : 7200049069 - arts et metiers paristech // 193.48.195.44

---

Pour toute question :

Service Relation clientèle - Techniques de l'Ingénieur  
249 rue de Crimée - 75019 - Paris

par mail [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com) ou au téléphone 00 33 (0) 1 53 35 20 20

# Application des lasers aux traitements de surface

par **Patricia LAURENS**

*Docteur de l'Université Paris VI  
Chargé de recherche du CNRS au Laboratoire  
d'application des lasers de puissance – Unité mixte ETCA – CNRS (LALP)*

**Catherine DUBOUCHET**

*Docteur de l'Université Paris XI  
Ingénieur de recherche chez Peugeot-Citroën (PSA)*

et **Didier KECHEMAIR**

*Ingénieur de l'École polytechnique  
Docteur de l'Université Paris XI  
Chef du Département « espace et techniques avancées »  
au ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche  
Ancien Directeur adjoint du Laboratoire d'application des lasers de puissance (LALP)*

<b>1. Généralités</b> .....	M 1 643 - 2
1.1 Sources laser.....	— 2
1.2 Interaction laser-matière .....	— 3
1.3 Applications .....	— 4
<b>2. Traitement thermique</b> .....	— 5
2.1 Traitement thermique en phase solide .....	— 5
2.2 Traitement thermique en phase liquide.....	— 6
2.3 Traitement thermique avec vaporisation.....	— 7
<b>3. Traitements thermiques avec apport de matière</b> .....	— 8
3.1 Traitement avec apport de gaz réactif.....	— 8
3.1.1 Traitements thermochimiques assistés par laser .....	— 8
3.1.2 Dépôt chimique en phase vapeur assisté par laser (LCVD) .....	— 8
3.2 Traitement avec apport de matériau solide.....	— 9
3.2.1 Dépôt avec fusion du matériau d'apport.....	— 9
3.2.2 Dépôt physique en phase vapeur par laser (LPVD) .....	— 10
<b>4. Traitements photochimiques</b> .....	— 10
<b>5. Traitements mécaniques</b> .....	— 11
5.1 Principe et paramètre de traitement .....	— 11
5.2 Effets sur les matériaux.....	— 11
<b>6. Perspectives</b> .....	— 12
<b>7. Conclusion</b> .....	— 12
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. M 1 643

**L**e laser utilisé comme outil pour induire des transformations dans les matériaux, notamment dans le domaine des traitements de surface, est une technologie innovante « jeune ». Si l'essentiel des idées d'utilisation des effets de l'interaction laser – matériaux sont avancées depuis près de vingt ans, leur mise en pratique sur des sites de production industrielle nécessite, d'une part d'améliorer la compatibilité de la technologie des sources et des systèmes avec

les contraintes liées au monde industriel (fiabilité, maintenance, formation des équipes, baisse du coût des sources,...), et d'autre part de poursuivre les efforts en vue de la maîtrise des applications (connaissances des phénomènes de base, élaboration de cahier des charges de système laser, méthodes de contrôle et d'assurance qualité...). Enfin, le transfert nécessite également une adaptation et une maturation des acteurs industriels. C'est effectivement cette maturité de l'offre, des connaissances scientifiques et de la demande qui marque l'évolution actuelle de la diffusion des applications des lasers de puissance dans l'industrie.

Le marché mondial des ventes de sources laser, après une très forte croissance dans les années 80, se caractérise aujourd'hui par une stabilisation, qu'il convient d'interpréter comme un indicateur de maturité. Le marché des sources laser en vue d'applications industrielles aux transformations des matériaux ne représente que 20 à 25 % du marché total des sources ; néanmoins, il génère un marché de systèmes intégrant une source laser dont le volume est 4 à 5 fois supérieur. Les applications à la découpe, au perçage et au marquage sont les plus développées. Le domaine du soudage est actuellement celui pour lequel les efforts de transfert vers l'industrie sont les plus intenses. Les applications aux traitements de surface (hors marquage) ne représentent encore qu'un très faible pourcentage des installations industrielles mais leur potentiel de développement apparaît cependant important ; elles font l'objet de nombreuses recherches en laboratoire. Ces applications devraient en effet conduire à terme à une optimisation des propriétés des matériaux avec un coût d'élaboration modéré et à une optimisation des gammes de fabrication en profitant des capacités de traitements localisés pouvant intervenir en fin de gamme. Comme exemple de transferts industriels de traitements de surface par laser, on peut citer, entre autres, les traitements avec apport de poudre sur les encoches de chapeaux d'aubes de turbines [2] ou de sièges de soupapes pour moteur automobile [3]. Pour développer les applications des lasers de puissance aux traitements de surface, il apparaît nécessaire de poursuivre les efforts :

- en menant une recherche de base prenant étroitement en compte les enjeux et exigences industriels. Ces dernières peuvent être sévères si le traitement doit être réalisé en fin de gamme sur un produit à forte valeur ajoutée (exemple de la refusion des arbres à cames dans le secteur automobile pour lequel le laser se présente comme une alternative possible au procédé TIG) ;
- en informant les ingénieurs concepteurs que le succès du transfert de la technologie nécessite de prendre en compte, dès la phase de conception des pièces, les spécificités de la technologie laser.

Le présent article présente dans cet esprit un panorama des possibilités de traitements de surface par laser en insistant à la fois sur les recherches en cours et sur les possibilités d'applications connues dans différents secteurs industriels (aéronautique, automobile, construction mécanique,...).

## 1. Généralités

Les contraintes de plus en plus sévères auxquelles sont soumises les pièces mécaniques en service ont fait des traitements de surface des étapes souvent indispensables dans les gammes de fabrication. Ces traitements permettent d'améliorer les propriétés superficielles du matériau afin d'augmenter sa résistance aux sollicitations rencontrées (frottement, érosion, endurance, corrosion,...) et donc sa durée de vie. Parmi les nombreuses techniques déjà existantes, le traitement superficiel par laser apparaît comme un procédé dont les spécificités offrent d'intéressantes perspectives (traitements localisés, temps de traitement réduits, déformations faibles, possibilités d'automatisation du procédé).

### 1.1 Sources laser

Le terme « laser » (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*) s'applique à une source émettant un rayonnement monochromatique spatialement et temporellement cohérent. Cette émission stimulée résulte d'une inversion de population portant un milieu amplificateur dans un état excité par un pompage optique ou électrique. Les longueurs d'onde ( $\lambda$ ) des sources laser vont de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain. Ces sources peuvent fonctionner en mode continu ou pulsé. Les principales sources laser rencontrées dans le traitement de surface sont : le laser à  $\text{CO}_2$  ( $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ), le laser à solide (souvent YAG-Nd) ( $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ ) et le laser à excimère émettant dans l'UV ( $\lambda = 193$  à  $351 \text{ nm}$  selon le mélange gazeux).

### ■ Laser à CO<sub>2</sub>

Le milieu réactif est constitué d'un mélange CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He, à basse pression ; le pompage est réalisé par une décharge électrique (continue ou radiofréquence) dans l'azote suivie d'un transfert d'énergie sur un niveau vibrationnel des molécules CO<sub>2</sub>. Il fonctionne généralement en mode continu avec un rendement élevé (supérieur à 10 %) et peut délivrer des puissances atteignant 40 kW. Ces sources ont atteint une maturité technologique telle que l'on peut assurément les considérer aujourd'hui comme des outils industriels. On les utilise dans de nombreuses applications de transformation des matériaux (traitements superficiels, soudage, découpe...). L'utilisation de laser à CO<sub>2</sub> présente néanmoins certains inconvénients : un encombrement souvent important malgré les efforts des constructeurs, un couplage faible du rayonnement avec les métaux et l'impossibilité d'utiliser un mode de transport du faisceau par fibre optique. Le laser à CO<sub>2</sub> peut également fonctionner en mode impulsionnel [TEA CO<sub>2</sub> (*Transvers Electric Atmospheric*)]. Ses applications sont alors surtout militaires. Dans le domaine civil, il est cependant utilisé dans le secteur médical (dentisterie, dermatologie), ou pour la détection de polluants atmosphériques (technique LIDAR).

### ■ Laser à solide (YAG)

Le laser Nd-YAG (*Yttrium Aluminium Garnet*) est un laser à solide qui émet dans le proche infrarouge ( $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ ) le plus souvent en mode impulsionnel. Le milieu actif à l'état solide est l'ion Nd<sup>3+</sup> (néodyme) placé comme élément de dopage dans un barreau amplificateur de grenat d'aluminium et d'yttrium (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>). Le pompage est optique, classiquement assuré par lampe flash (les recherches s'orientent sur le pompage par diode laser qui offre de nombreux avantages [4]). Il fonctionne, soit en mode déclenché (*Q-switched*) (impulsions : 15 à 700 ns, puissance instantanée très élevée (jusqu'à 10<sup>12</sup> W)), soit en mode relaxé (quelques joules, durée d'impulsions de 0,1 à 20 ms, cadence de répétition des impulsions pouvant atteindre plusieurs centaines de hertz). Des lasers YAG fonctionnant en mode continu ou quasi continu et pouvant délivrer plus de 2 kW sont apparus récemment. Cette augmentation de la puissance disponible, alliée à un encombrement réduit, à un meilleur couplage avec les matériaux et à la possibilité de transport du faisceau par fibre optique en fait un outil bien adapté aux exigences industrielles et certainement promis à un développement important.

### ■ Laser à excimère

Le laser à excimère (ou à exciplexe) est un laser à gaz qui émet en mode impulsionnel dans l'ultraviolet entre 193 et 351 nm selon le mélange gazeux utilisé. Le milieu gazeux est composé d'un gaz rare G (Ar, Xe, Kr) et d'un composé halogéné X (F<sub>2</sub>, HCl). L'excitation, électrique ou par faisceau d'électrons, va conduire à la formation de molécules excitées GX\* [ArF ( $\lambda = 193 \text{ nm}$ ), KrF ( $\lambda = 248 \text{ nm}$ ), XeCl ( $\lambda = 308 \text{ nm}$ ), XeF ( $\lambda = 351 \text{ nm}$ )]. Les énergies délivrées sont de l'ordre du joule et les durées d'impulsions varient de 10 à 150 ns ; les fréquences pouvant atteindre le kHz. Sont apparues en 1992 des sources excimères de forte puissance ( $P_{\text{moyenne}}$  : 500 à 1 000 W) laissant présager un développement de leur utilisation en vue du traitement de surface. Le laser excimère présente des avantages spécifiques : une énergie importante des photons (plusieurs eV) permettant d'accéder à des effets photochimiques, des traitements avec une résolution spatiale submicronique et des effets thermiques très limités, un couplage laser-matière plus efficace dans l'ultraviolet que dans l'infrarouge. Au-dessus de 300 nm, le transport par fibre optique apparaît possible.

Il faut aussi signaler l'existence des diodes laser qui émettent dans un domaine de longueur d'onde compris entre 780 et 830 nm. Leur assemblage sous forme de barrette ou d'empilement ainsi que leur multiplexage par lentille ou fibre optique permettent aujourd'hui d'atteindre des densités de puissance de quelques dizaines de kW/cm<sup>2</sup>, valeurs compatibles avec les traitements thermiques de type durcissement superficiel ou la découpe. L'intérêt de cet outil réside dans son encombrement très réduit, sa durée de vie importante et l'absence de maintenance de la source [5].

## 1.2 Interaction laser-matière

### ■ Paramètres de l'interaction

Les paramètres régissant l'interaction laser-matière sont nombreux. Les effets produits dépendent :

- de la source laser (longueur d'onde, temps d'interaction, densité de puissance délivrée) ;
- du matériau [nature (métal, semi-conducteur, diélectrique), phase (solide, liquide ou gazeuse), propriétés physiques (optiques, thermiques), état de surface (nature chimique, rugosité)] ;
- de l'environnement (nature et pression de l'atmosphère de traitement).

Dans le cas de l'interaction laser-métal, l'interaction du rayonnement a lieu avec les électrons libres au voisinage de la surface. Seule une partie de l'énergie émise par la radiation incidente est absorbée par la surface. On définit alors le coefficient d'absorption (ou *couplage*),  $A_\lambda$ , qui est le rapport de la puissance absorbée et de la puissance incidente et qui peut être relié aux paramètres optiques de la surface par la relation :

$$A_\lambda = 1 - R_\lambda = \frac{4 n_\lambda}{(n_\lambda + 1)^2 + k_\lambda^2}$$

avec  $R_\lambda$  coefficient de réflexion à la longueur d'onde incidente  $\lambda$ ,

$n_\lambda, k_\lambda$  indices optiques du matériau à la longueur d'onde incidente  $\lambda$ .

De façon générale, on observe une augmentation du coefficient d'absorption lorsque la longueur d'onde diminue (figure 1). La valeur du coefficient d'absorption est par ailleurs soumise à de nombreux effets perturbateurs, par exemple, la température de la surface (figure 2) ou l'état (rugosité) et la nature chimique de la surface (impuretés, oxydes, ...).

On définit également la profondeur de pénétration,  $\delta_\lambda$  du rayonnement électromagnétique qui est absorbé selon la loi de Beer-Lambert :

$$\delta_\lambda = \frac{\lambda}{4\pi k}$$

et la profondeur thermiquement affectée  $Z$  qui peut, en première approximation, être définie par la relation :

$$Z = (4 at)^{1/2}$$

avec  $t$  temps d'interaction,

$a$  diffusivité thermique du matériau (m<sup>2</sup>/s).

Les valeurs de  $\delta$  et  $Z$  sont données pour différents métaux (tableau 1).

Pour l'ensemble des traitements de métaux, la profondeur affectée thermiquement est supérieure à la profondeur de pénétration du rayonnement. Le couplage laser-métal peut donc être, en pratique, généralement considéré comme un phénomène de surface.

### ■ Effets de l'interaction laser-matière

L'interaction laser-matière a pour conséquence l'excitation des électrons au voisinage de la surface du matériau par absorption des photons incidents suivie de la relaxation en un temps très court (10<sup>-12</sup> s) de ces électrons induisant trois effets.

— **Un effet thermique** par propagation de la chaleur dans le matériau conduisant au chauffage, à la fusion ou à la vaporisation du matériau selon la densité de puissance (10<sup>2</sup> à 10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup>) pour des temps d'interaction variant de la microseconde à la seconde. Ces effets thermiques sont utilisés pour les traitements de surface réalisés en phase solide ou liquide (durcissement, formation d'alliage), la découpe, le soudage, le perçage. Dans le cas où l'énergie

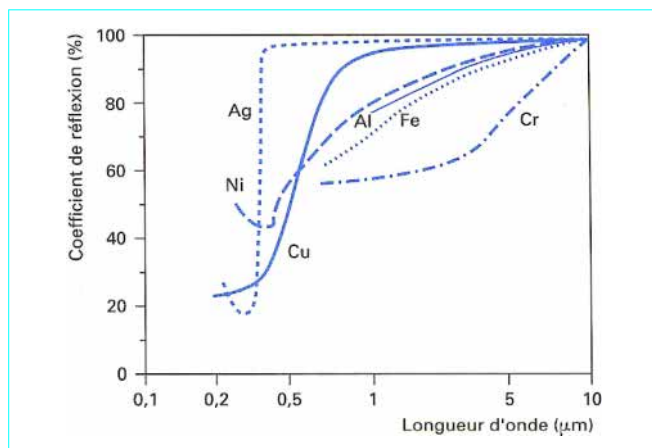


Figure 1 – Coefficient de réflexion en fonction de la longueur d’onde pour différents métaux sous incidence normale

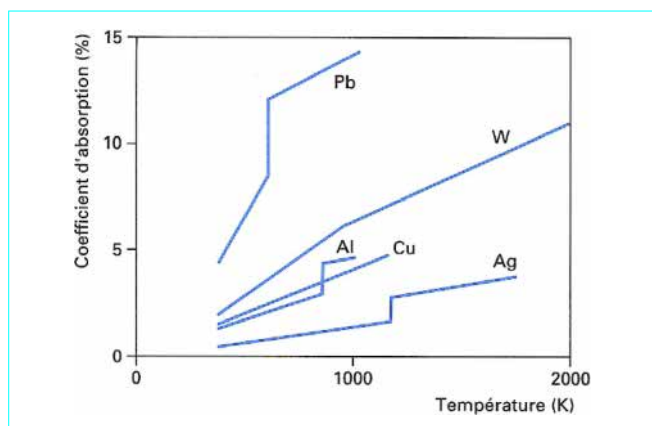


Figure 2 – Évolution du coefficient d’absorption à 10,6 μm en fonction de la température pour différents métaux [6]

matériau sont alors faibles car l’énergie est principalement stockée dans les particules enlevées. Ces effets sont utilisés pour le nettoyage et le décapage de surface, le dépôt (LPVD).

— **Un effet photochimique** provoquant des perturbations des liaisons interatomiques pouvant altérer les propriétés chimiques du solide, du gaz ou l’interface solide-gaz. Dans le cas où l’énergie des photons est de l’ordre de l’énergie de liaison du solide, le traitement pourra induire des ruptures de liaison en surface (traitement des polymères ou gravure du silicium en présence de chlore par laser excimère). Ces effets font principalement l’objet d’étude en laboratoire. Les principales applications concernent les secteurs de la microélectronique et de l’optoélectronique (dépôt et gravure avec des résolutions spatiales submicroniques).

— **Un effet mécanique** pour des durées d’impulsion de l’ordre de la dizaine de nanosecondes et des intensités sur la cible de quelques GW/cm<sup>2</sup>. Le plasma formé lors de l’interaction est intense et se détend dans l’espace en exerçant une pression sur la surface. Il en résulte la formation d’une onde de choc qui se propage dans le matériau et induit une déformation plastique et une mise en contrainte de la matière impactée (amélioration de la tenue en fatigue du matériau). On augmente le niveau et le temps d’application de cette pression sur la surface solide en interposant devant la cible un matériau transparent à la longueur d’onde du laser incident ce qui a pour effet de retarder la détente du plasma (traitement en milieu confiné). Les pressions générées à la surface de la cible peuvent atteindre plusieurs dizaines de kbars. Le phénomène est cependant limité pour des flux incidents supérieurs à 10 GW/cm<sup>2</sup> à partir desquels le matériau de confinement devient absorbant (claquage dans le diélectrique).

### 1.3 Applications

La variété des effets induits lors de l’interaction laser-matière offre un champ d’applications très vaste concernant de nombreux secteurs industriels : l’automobile, l’aéronautique, la microélectronique, la mécanique ou encore le secteur médical, pour des opérations très variées : découpe-perçage, soudage et traitements de surface sur des matériaux très divers (métal, semi-conducteur, céramique, polymère, tissus biologiques) (figure 3). Dans le cadre de cet article, seul sera abordé le traitement de surfaces métalliques en vue de l’amélioration de la tenue en service d’une pièce soumise à une sollicitation qui peut être mécanique (fatigue), tribologique (frottements), chimique (corrosion, oxydation), thermique ou électrique. Le traitement peut alors être :

- purement thermique en phase solide (trempe des aciers), liquide (refusion des aciers), ou avec vaporisation (nettoyage, décapage, marquage) ;
- thermique avec apport de matière en vue de transformations chimiques superficielles du matériau (formations d’alliages ou de dépôts) ; cet apport peut être réalisé sous forme de gaz réactif (traitements thermodiffusionnels, LCVD), de prédépôt sur la surface ou de poudre (alliages) ou d’une cible pulvérisée par laser (LPVD) ;
- photochimique (dépôt, gravure) ;
- mécanique : mise en compression de la surface par choc laser.

En France, les principaux acteurs intervenant dans le développement des traitements de surface par laser sont, en dehors des industriels, des centres techniques et des établissements de recherche (cf. Doc. M 1 643). Cette communauté est animée par différents groupes de travail. En ce qui concerne, l’aspect amont, plusieurs « Groupes de recherche » organisés par le CNRS ont mené des travaux tant sur le développement des sources, que sur les applications des traitements laser. Par ailleurs, le Club Laser de Puissance (CLP) regroupe l’ensemble des partenaires industriels, et établissements de recherche intervenant dans ce secteur.

	Paramètre	Titane	Aluminium
$\delta_\lambda$ (μm)	$\lambda = 0,30 \mu\text{m}$	0,020 4	0,008
	$\lambda = 1,06 \mu\text{m}$	0,025 5	0,01
	$\lambda = 10,6 \mu\text{m}$	0,042 6	0,012
Z(μm)	$t = 10^{-8} \text{ s}$	0,4	1,94
	$t = 10^{-4} \text{ s}$	45	194
	$t = 1 \text{ s}$	4 500	19 000

est très localisée en surface et imposée en un temps très court (< microseconde), on peut avoir liquéfaction et vaporisation quasi instantanée du matériau induisant les phénomènes d’ablation et la formation d’un plasma sur la cible. Les effets thermiques sur le

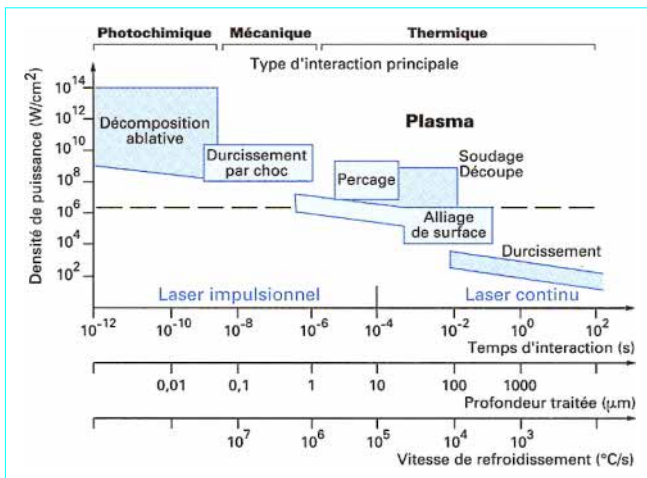


Figure 3 – Effet sur un matériau de l'exposition à un faisceau laser de densité de puissance et de durée d'interaction données [7]

## 2. Traitement thermique

Pour maîtriser l'effet d'un traitement thermique (en phase solide, liquide ou avec vaporisation) sur les transformations induites dans le matériau, différents aspects liés à l'éclairement, au matériau, au couplage et à l'environnement de la zone d'interaction doivent être pris en compte. Il est avant tout nécessaire de contrôler la forme de l'éclairement ainsi que la répartition spatiale de l'énergie dans la zone d'interaction. Pour cela, différentes techniques de mise en forme du faisceau incident ont été développées [8] (optique oscillante, miroir à facettes, kaléidoscope). Par ailleurs, le contrôle du cycle thermique, induit en profondeur dans le matériau, nécessite de prendre en compte le comportement dynamique du couplage laser-matière en cours de traitement et les paramètres thermophysiques du matériau. Dans le cas de traitement en phase solide (trempe des aciers), la stabilité et l'efficacité du couplage laser-matière sont améliorées en déposant sur la surface à traiter un revêtement absorbant (graphite, peinture, phosphate,...) [9] [11]. Enfin, l'environnement gazeux au voisinage de la zone d'interaction est également un paramètre important pour la qualité du traitement (protection particulière contre l'oxydation qui influe sur le couplage et sur les propriétés du matériau). Dans ce domaine, différents dispositifs de protection sont utilisés : soufflage d'argon par buse, maintien en surpression d'argon sous un dispositif en cloche recouvrant l'ensemble de la zone chauffée au cours du traitement [10].

### 2.1 Traitement thermique en phase solide

Le traitement thermique en phase solide s'applique à la trempe martensitique superficielle d'aciers faiblement ou non alliés et vise à améliorer les propriétés tribologiques et mécaniques du matériau (usure, flexion, torsion).

#### ■ Principe du traitement

La trempe par laser utilise généralement un laser CO<sub>2</sub> continu délivrant quelques kilowatts. Les densités de puissance utilisées sont de l'ordre du kW/cm<sup>2</sup> ; le temps d'interaction  $\tau_s$  varie de 0,1 à 1 s. Les substrats métalliques sont revêtus d'un matériau absorbant à la longueur d'onde du laser incident afin d'améliorer le rendement du traitement. Le cycle thermique induit la formation d'une couche

martensitique en surface dont l'épaisseur est de quelques centaines de micromètres, caractérisée par une microdureté élevée et des contraintes résiduelles de compression (figure 4). La localisation en surface du dépôt d'énergie lors d'un traitement par laser (l'épaisseur de la zone thermiquement affectée est typiquement inférieure au millimètre) limite les distorsions et évite un réusinage ultérieur des pièces.

Outre l'avantage lié à l'aspect très localisé en surface du dépôt d'énergie, la technique laser permet d'atteindre des vitesses de refroidissement élevées (plusieurs centaines de degrés par seconde) qui assurent un phénomène d'autotrempe de la zone superficielle par la masse du substrat restée froide. La profondeur de trempe est modulable : elle dépend de la densité de puissance absorbée par le matériau et du temps d'interaction. Il faut néanmoins pour obtenir une trempe de bonne qualité respecter certains critères [11] liés à des consignes de températures et des temps de maintien en température des zones à transformer. Par ailleurs, la vitesse de refroidissement doit être supérieure à la vitesse critique de trempe (condition en pratique toujours respectée en trempe laser).

L'ensemble de ces critères fait apparaître la nécessité de disposer, d'une part, d'outils de modélisation permettant de prévoir le couple optimal puissance laser/vitesse de défilement de la pièce sous le faisceau pour un traitement déterminé et, d'autre part, de moyens de contrôle et de régulation en temps réel de la température de surface au cours du traitement. Des modèles analytiques permettent d'accéder à la profondeur traitée, et à la dureté à partir des paramètres de traitement [13] [14]. Il est alors possible de prévoir, pour un acier de composition donnée, le couple puissance/vitesse pertinent afin de tremper le matériau sur une certaine profondeur sans dépasser en surface la température de fusion. Les résultats mettent en évidence que la fenêtre de fonctionnement est relativement restreinte d'où la nécessité de régler la température de surface en cours de traitement en corrigeant la puissance laser et/ou la vitesse en cours d'opération. La régulation peut alors être réalisée à partir du suivi de la température de surface par un régulateur simple de type PID (proportionnel, intégral et dérivé) [14].

#### ■ Applications

Les applications concernent, par exemple, le durcissement des congés de raccordement des vilebrequins dans l'industrie automobile. Actuellement, les traitements de trempe des aciers utilisent un mode de chauffage par induction ; c'est une technique performante mais qui présente l'inconvénient de provoquer des distorsions de la pièce traitée.

La trempe des aciers par laser a fait l'objet de nombreuses études en laboratoire, travaux généralement soutenus par de grands groupes du secteur automobile, mais néanmoins les exemples de mise en œuvre industriels de ce procédé sont peu nombreux. Parmi les industriels soutenant des études dans ce domaine, on peut citer General Motors, Ford, Fiat, Peugeot-Citroën et des constructeurs allemands dont l'objectif concerne le traitement de congés de vilebrequins [15] [16]. De nombreuses études sont également publiées en Russie ; elles citent des exemples de traitements par laser transférés en production dans les secteurs automobile et aéronautique [17] [18]. Enfin, Nissan réalise par laser, entre autres composants, le durcissement de congés de vilebrequins [19].

En conclusion, le traitement de trempe par laser est un procédé relativement bien maîtrisé ; cependant les progrès constants des techniques concurrentes conduisent à la nécessité d'un bilan technico-économique détaillé dans chaque cas d'application. Il faut également souligner que la technique laser ne présente un réel intérêt que dans le cas où la zone à traiter est de dimensions réduites (largeur traitée de quelques centimètres). En effet, le traitement de grande surface par juxtaposition de traitements laser successifs se recouvrant partiellement induit, au voisinage de la zone de recouvrement, une zone de revenu (faible dureté, contraintes de traction) [20]. Enfin, les difficultés liées à la maîtrise précise du couplage entre le faisceau incident et le substrat nécessitent probablement encore des efforts en vue de la mise en œuvre du contrôle et de la régulation

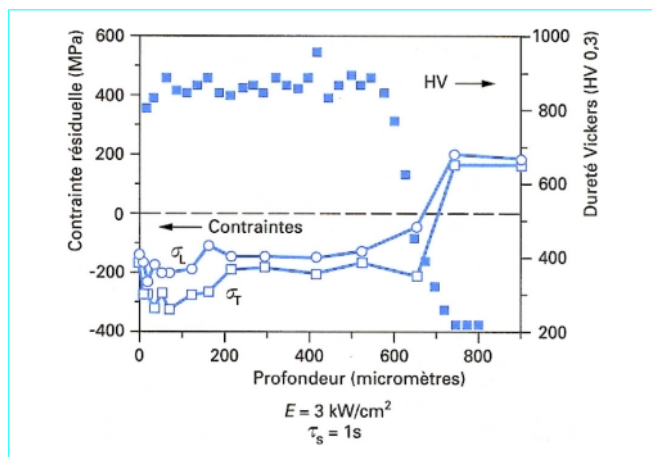


Figure 4 – Évolutions des contraintes résiduelles longitudinale et transversale ( $\sigma_L$  et  $\sigma_T$ ) et de la microdureté en fonction de la profondeur pour un acier X55C1 revêtu de graphite ayant subi un traitement de trempe par laser  $\text{CO}_2$  [11]

du procédé pour rendre ce dernier robuste et fiable, et donc susceptible de satisfaire les exigences industrielles.

## 2.2 Traitement thermique en phase liquide

Un traitement thermique avec refusion superficielle est un procédé visant à améliorer les propriétés de surface (propriétés mécaniques, tenue à la corrosion, ...) par une modification de la structure cristalline du matériau sans modification de la composition chimique [21].

### ■ Principe du traitement

Les traitements sont généralement réalisés par laser  $\text{CO}_2$  continu (les progrès de la technologie laser YAG devraient faire un outil intéressant pour ces applications) avec des densités de puissance comprises entre  $10^4$  et  $10^7 \text{ W/cm}^2$  et des temps d'interaction de la milliseconde à la seconde. Le traitement, au cours duquel la température de la surface doit rester comprise entre la température de fusion et la température de vaporisation, conduit à la formation d'un bain liquide dont la profondeur est typiquement de quelques centaines de micromètres. Après le passage du faisceau, il y a resolidification rapide de la matière (figure 5). On peut ainsi modifier la nature des phases initiales (apparition des phases métastables), leur taille, leur morphologie (structure cellulaire ou dendritique) et leur distribution. Dans certains cas, on peut même obtenir une amorphisation de la surface dont les propriétés mécaniques et la tenue à la corrosion sont excellentes (l'amorphisation d'alliages Fe-Cr-P peut induire une résistance à la corrosion supérieure à celle obtenue pour les meilleurs aciers inoxydables [22] [23]). La vitesse de resolidification locale à l'interface bain fondu-solide dépend de la vitesse de refroidissement et du gradient thermique dans le bain qui peuvent être reliés à la densité de puissance absorbée et au temps d'interaction. Les forts gradients de température dans le bain liquide introduisent des mouvements de convection (effet Marangoni) permettant une homogénéisation de la zone refondue.

### ■ Applications

L'intérêt industriel pour ce procédé concerne essentiellement la refusion des arbres à cames dans le secteur automobile en vue de l'amélioration de leur tenue à l'usure. On peut ainsi par refusion transformer en surface la fonte grise en fonte blanche et

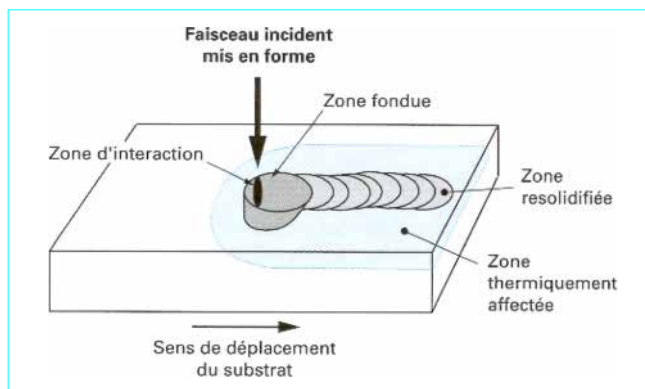


Figure 5 – Principe du traitement thermique par laser en phase liquide

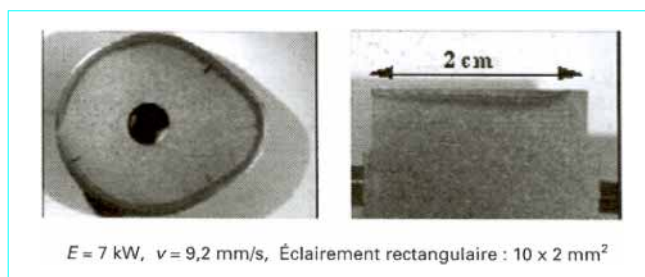


Figure 6 – Coupes perpendiculaire et transversale d'une came refondue par un traitement laser à  $\text{CO}_2$

augmenter la dureté superficielle (figures 6 et 7). Il faut néanmoins assurer un préchauffage des pièces au voisinage de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  pour éviter l'apparition de fissures dans la zone resolidifiée.

Les travaux réalisés en Allemagne ont conduit à la réalisation d'une machine laser de traitement des arbres à cames [24] ; la refusion par laser des arbres à cames est utilisée en production chez Volkswagen depuis 1993 [25]. Les traitements par refusion d'outils rapides de coupe ont également conduit à des résultats intéressants en vue de leur durcissement [26] [27]. La refusion d'alliage Al-Si induit une augmentation significative de la dureté, mais on préfère dans ce cas un traitement en phase liquide avec apport de poudre ou de pré-dépôt permettant une amélioration supérieure de la résistance à l'usure.

L'intérêt de la technique laser par rapport aux techniques concurrentes (refusion par plasma ou procédé par arc TIG) réside principalement dans une réduction des déformations de surface des pièces qui nécessitent généralement une reprise d'usinage. Une étude comparative entre les procédés laser et TIG fait apparaître une légère supériorité du traitement laser (en terme de dureté des couches traitées) ; cependant, l'emploi du procédé TIG est encore souvent préconisé pour des raisons économiques [28].

Il faut également souligner l'apparition de travaux mettant en évidence les potentialités de traitement de refusion de surface métallique par laser excimère. Dans ce cas, les profondeurs affectées par le traitement sont de l'ordre de quelques micromètres mais au durcissement superficiel du matériau s'ajoute généralement une amélioration de l'état de surface (diminution de la rugosité superficielle, élimination de porosités) favorable pour la tenue à l'usure ou pour la résistance à la corrosion. Dans ce domaine, des essais intéressants de faisabilité ont été effectués en Allemagne sur des arbres à cames et des valves de soupape [29].

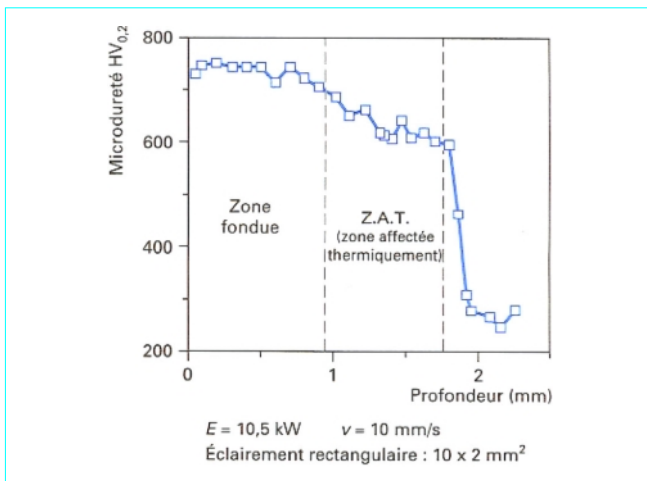


Figure 7 – Augmentation de la microdureté superficielle de la fonte grise après refusion superficielle par laser à CO<sub>2</sub>

## 2.3 Traitement thermique avec vaporisation

On utilise dans ce cas des lasers pulsés (CO<sub>2</sub>, Nd-YAG, excimère) qui vont délivrer une densité de puissance instantanée très élevée (de 10<sup>6</sup> à 10<sup>11</sup> W/cm<sup>2</sup>) pendant une impulsion de courte durée (10<sup>-8</sup> à 10<sup>-6</sup> seconde). Ces impulsions répétées vont conduire à une vaporisation rapide de la surface. Les vapeurs vont être susceptibles de s'ioniser et d'entraîner la formation d'un plasma dont la durée de vie est de quelques millisecondes. Outre des effets thermiques, pourront être associés des effets d'onde de choc générés par l'expansion du plasma susceptible d'interagir avec la surface ou des effets *explosifs* dus à une absorption d'énergie très importante sur un temps très bref. Les applications concernent le nettoyage, le décapage de surface, ou la modification d'état de surface (rugosité, texture).

### Nettoyage – Décapage de surface

Ce traitement vise à l'élimination soit d'une pollution superficielle (élimination de graisse, de poussières ou salissures diverses), soit d'une couche superficielle chimiquement liée au substrat (peinture, revêtement, oxyde, ...) sans modification des propriétés du matériau sous-jacent (figure 8). Le nettoyage ou le décapage résulte de la vaporisation de la couche superficielle par absorption du faisceau incident. Les traitements sont généralement réalisés à l'air. Néanmoins, dans le cas du nettoyage, une technique par voie humide (film de liquide sur le substrat) est plus particulièrement adaptée à l'élimination de particules submicroniques (microélectronique). L'évaporation explosive à l'interface solide-liquide conduit à une ablation du film liquide entraînant les particules. Les seuils de densités d'énergie pour le nettoyage sont typiquement de 30 à 300 mJ/cm<sup>2</sup> en ultraviolet (quelques J/cm<sup>2</sup> en infrarouge) selon la nature et l'épaisseur de la couche de pollution.

Le domaine d'applications est très vaste et utilise des lasers pulsés ultraviolet, visible ou infrarouge. On peut citer principalement :

- le nettoyage par voie humide, appliqué avec succès aux tranches de silicium (*wafers*) (particules : Au, Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) par laser KrF [31]. Une machine de nettoyage automatisée conçue pour être utilisée en production a été testée. Elle fonctionne soit en voie sèche, soit en voie humide et permet d'atteindre des vitesses de nettoyage de 0,2 m<sup>2</sup>/min sur des wafers de silicium [32] ;
- le décapage de peinture pour l'entretien des avions (carlingue), le secteur naval (coque de navire) ou d'édifices métalliques

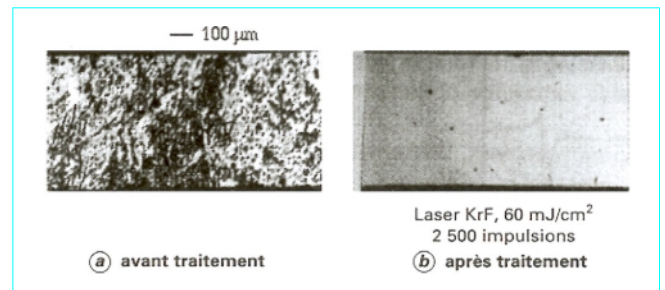


Figure 8 – Exemple de nettoyage par laser à excimère d'une surface contaminée par une couche de résine époxy de quelques micromètres d'épaisseur [30]

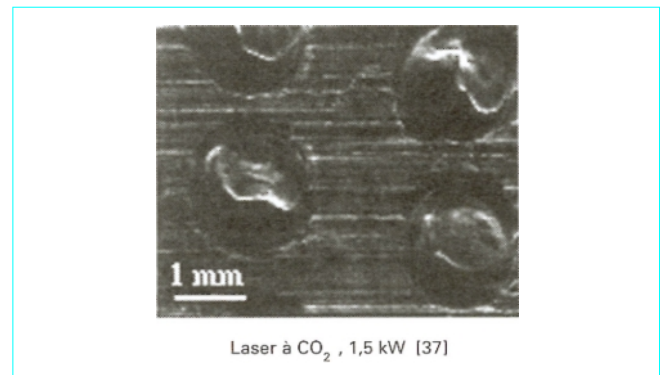


Figure 9 – Exemple de texturation de cylindre [37]

(ponts) [34] [35]. Ce procédé est employé aux États-Unis dans l'armée de l'air et l'US Navy avec un laser TEA CO<sub>2</sub> [34]. Au Japon, le décapage par laser YAG de défauts de peinture sur des carrosseries automobiles est en cours de développement [35] ;

- le décapage de salissures d'origine chimique ou biologique de bâtiments ou monuments historiques. Une machine utilisant un laser YAG a été commercialisée par la société BMI en collaboration avec le Laboratoire de recherche des Monuments Historiques (décapage des cathédrales d'Amiens et de Clermont-Ferrand) [35] [36] ;
- le décapage de moules (verrière, industrie automobile, ...) ;
- le marquage au masque de câbles dans le secteur aéronautique [36]. La société Aérospatiale exploite une machine de marquage par laser TEA CO<sub>2</sub> permettant l'ablation d'une couche de vernis clair et l'apparition d'une couche sombre de contraste.

Les techniques classiques de décapage sont soit de type abrasif (sablage, micropoudrage), soit utilisent des solvants. Dans tous ces cas, les effluents sont importants et souvent toxiques et ces techniques n'autorisent pas de décapage sélectif dans le cas de système multicouche (cas des peintures sur substrats métalliques).

### Modification d'état de surface

Ce traitement vise à modifier l'état de surface d'un substrat par une évaporation superficielle contrôlée. Les applications industrielles concernent :

- le marquage dans les industries de la microélectronique, de l'automobile [36] ;
- la texturation de surface [29] [38] par exemple (figure 9) dans des cylindres de laminage (Procédé Lasertex [37]). Depuis 1987, Nissan utilise un procédé laser pour obtenir des carrosseries dépolies et améliorer l'adhérence de la peinture et l'aspect de la tôle peinte (brillance) [35].



### 3. Traitements thermiques avec apport de matière

Un traitement thermique avec apport de matière est un traitement visant à améliorer les propriétés de surface par une modification de la nature chimique de celle-ci. Pour cela, on ajoute avant ou en cours de traitement d'autres éléments soit à l'état gazeux en atmosphère contrôlée (traitement thermodiffusionnel, LCVD), soit sous forme solide (prédépot, poudres), en vue de la création d'alliages ou de dépôts de surface. Au cours de l'opération, le substrat est maintenu en phase solide (traitement thermodiffusionnel, LCVD, LPVD) ou en phase liquide (alliage, incrustation). Le laser est alors utilisé soit pour chauffer principalement le substrat (traitement avec apport de gaz réactif, dépôt chimique), soit pour fondre l'ensemble substrat-matériau d'apport (dépôt de poudre, formation d'alliage par prédépôt), soit pour vaporiser une cible à déposer sur le substrat (LPVD).

#### 3.1 Traitement avec apport de gaz réactif

Au cours d'un traitement avec apport de gaz réactif, le laser est utilisé pour chauffer superficiellement le matériau en phase solide ou le porter à l'état liquide. Les espèces chimiques réactives vont alors s'adsorber sur la surface, se dissocier et soit diffuser dans la matrice du substrat en phase solide ou liquide (traitements thermodiffusionnels assisté par laser), soit s'accumuler et conduire à la formation d'un dépôt sur la surface [dépôt chimique en phase vapeur assisté par laser (LCVD)]. Dans les deux cas, ces traitements visent à modifier les propriétés de surface du substrat (propriétés mécaniques, tribologiques, optiques, électriques, thermiques...) et peuvent donc s'appliquer à de nombreux domaines.

##### 3.1.1 Traitements thermochimiques assistés par laser

Les traitements thermodiffusionnels sont classiquement réalisés en four ou assistés par plasma à l'état solide. Ils concernent la nitruration, l'oxydation, la carburation ou la boruration de métaux ou de semi-conducteurs. La croissance de couche résulte généralement de la diffusion thermiquement activée du métalloïde (N, C ...) au travers des sites de diffusion de la matrice solide. La diffusion des espèces dans le matériau va conduire, en accord avec les diagrammes de phases, à la formation de différents composés (pour la nitruration du titane, on observera de la surface vers l'intérieur du matériau, la formation de couches TiN très dure ( $HV_{0,1} = 2\ 000$ ),  $Ti_2N$  et d'une solution d'azote dissous dans le titane Ti(N)).

Les traitements thermodiffusionnels assistés par laser (principalement  $CO_2$  continu) sont encore à l'étude en laboratoire ; leurs atouts par rapport aux techniques classiques résultent de l'aspect localisé du dépôt d'énergie sur la pièce, des temps très rapides de montée à haute température au voisinage de la température de fusion ou en phase liquide. Les épaisseurs de composés formés par traitement en phase solide sont typiquement de quelques micromètres [38] [39] [40] (identiques au traitement en four mais réalisés en quelques secondes au lieu de plusieurs heures en four). Les traitements en phase liquide conduisent, grâce à l'existence de mouvements de convection dans le bain liquide, à des composés à structure dendritique (dendrites de TiN dans une matrice de titane enrichie en azote dans le cas de la nitruration) dont l'épaisseur atteint plusieurs centaines de micromètres [41] [42] [43].

La nitruration d'alliages de titane (TA6V) en atmosphère d'azote visant à améliorer les propriétés tribologiques de l'alliage (frottement [38] [43], érosion [41]) est un des traitements thermodiffusionnels les plus étudiés en raison de son application potentielle

dans le secteur aéronautique pour lequel cet alliage léger présente un intérêt évident. La nitruration du titane par laser trouve également des applications en médecine (prothèse de la hanche) [44] ou en microélectronique (couche barrière de diffusion). Les tests tribologiques des pièces traitées mettent en évidence une amélioration de la tenue à l'usure abrasive (figure 10) d'autant plus importante que la couche de niture est épaisse.

Néanmoins, le traitement induit une diminution de la tenue en fatigue du matériau traité qui peut être limitée, par une réduction de la température maximale au cours du traitement, par un préchauffage du substrat, par une dilution du gaz de traitement conduisant à diminuer la concentration de TiN dans le matériau ou encore par un post-traitement mécanique par choc laser. L'oxydation des aciers est également un domaine potentiel d'applications puisque ce traitement permet une augmentation du couplage  $CO_2$ -métal et donc du rendement des traitements de trempe ou de perçage par laser  $CO_2$  sans ajout de revêtement [45].

#### 3.1.2 Dépôt chimique en phase vapeur assisté par laser (LCVD)

Les mécanismes de dépôt LCVD sont identiques à ceux de dépôt CVD classique. Néanmoins l'aspect thermique localisé du chauffage par laser fait de la LCVD un outil particulièrement bien adapté aux microdépôts en microélectronique (résolution latérale micrométrique). C'est ainsi que le dépôt par LCVD d'or, de tungstène, d'aluminium, ... est utilisé pour la réparation ou la personnalisation de circuits intégrés (figure 11) [46] [47] [48] [49]. Les précurseurs gazeux utilisés pour déposer des métaux sont des organométalliques qui se décomposent sur la surface et conduisent à la formation de dépôt métallique dont la résistivité est compatible avec les applications concernées. Les vitesses de dépôt par LCVD peuvent atteindre  $1\ \mu m/s$ . Le procédé de dépôt peut être néanmoins délicat à contrôler si la température du substrat varie au cours du traitement (cas lors de la connexion de lignes métalliques sur un substrat non métallique : les pertes thermiques par diffusion hors de la zone irradiée seront beaucoup plus importantes au moment où la jonction métallique avec la ligne existante est réalisée).

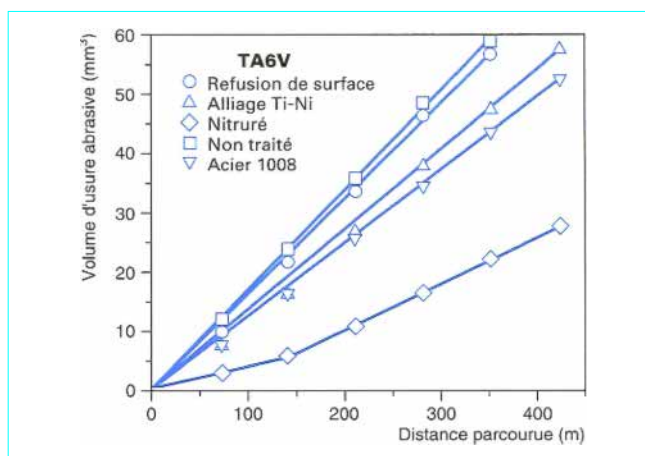


Figure 10 – Comparaison de la tenue à l'usure abrasive de l'alliage TA6V nitruré par laser en phase liquide avec d'autres types de traitement (refusion, refusion avec formation d'alliage Ti-Ni) et avec un acier [43]

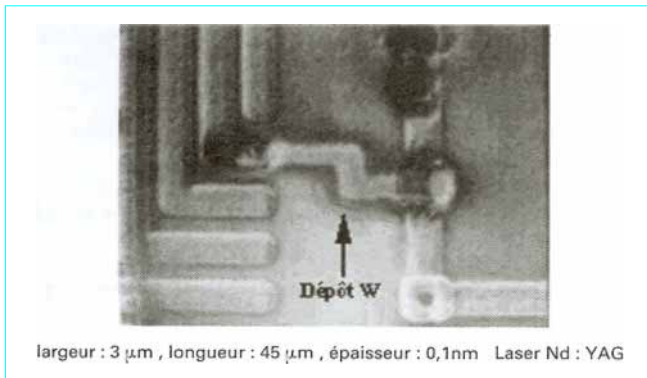


Figure 11 – Exemple de réparation de circuit : ligne de tungstène déposée par LCVD [46]

### 3.2 Traitement avec apport de matériau solide

Dans ce cas, le matériau d'apport à allier ou à déposer est initialement sous forme solide et doit être généralement soit fondu pour la création d'alliage ou de dépôt de surface, soit vaporisé pour réaliser un dépôt LPVD (Laser Physical Vapor Deposition).

#### 3.2.1 Dépôt avec fusion du matériau d'apport

Un traitement avec fusion du matériau d'apport est un procédé au cours duquel on incorpore à un substrat superficiellement fondu un matériau extérieur afin d'améliorer les propriétés de surface du substrat initial (résistance à l'usure, à l'oxydation ou à la corrosion) tout en maintenant les propriétés en volume inchangées.

##### ■ Principe du traitement

Parmi les traitements thermiques avec apport de matériau on distingue, selon le niveau de dilution du matériau d'apport dans le substrat, deux effets différents (figure 12).

— la formation d'un dépôt de surface. Le matériau d'apport est fondu lors de son passage dans le faisceau et se dépose sur le substrat (dont la profondeur fondue est de quelques micromètres) ; la faible dilution (< 5 %) permet de conserver en surface les propriétés du matériau d'apport.

— la création d'un alliage de surface, pour lequel, outre la fusion du matériau d'apport, une fusion relativement importante du substrat est nécessaire (quelques centaines de micromètres). L'interdiffusion des différentes espèces chimiques et l'existence de forts mouvements de convection dans le bain liquide contribuent dans ce cas à homogénéiser la couche formée ; l'adhésion entre le substrat et l'alliage est excellente. L'incrustation constitue un cas particulier d'alliage de surface où le matériau d'apport demeure infondu.

Le matériau d'apport peut se présenter sous différentes formes : fil en translation placé sous le faisceau laser, prédépôt par technique plasma, lit de poudres ou galettes prédisposées à la surface du substrat, jet de poudres véhiculé par un gaz porteur et injecté soit latéralement, soit dans l'axe du faisceau laser. Un traitement de bonne qualité est caractérisé par une bonne adhérence avec le substrat, une absence de porosité et de fissure, et une composition chimique homogène avec un taux de dilution maîtrisé.

Plusieurs phénomènes physiques interviennent lors de la réalisation de dépôts ou d'alliages de surface : l'interaction entre le faisceau laser, le matériau d'apport et le substrat, la création d'un bain liquide où se produisent des transferts convectifs et diffusifs et enfin

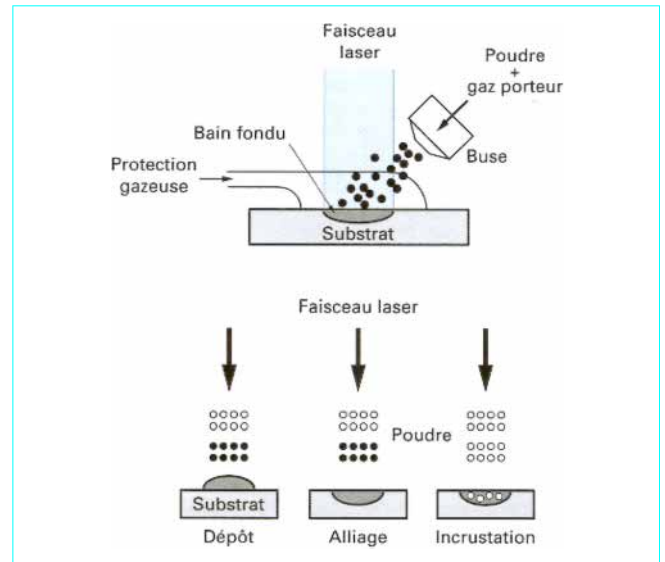


Figure 12 – Principe d'un traitement thermique par laser avec apport de matériau (jet de poudre) et effets possibles sur les matériaux

la solidification du bain fondu. Le procédé avec apport de poudre fait également intervenir des phénomènes de mécanique des fluides liés à l'amenée de la poudre : il est indispensable de réaliser un écoulement pulvérulent stable, homogène et adapté à la forme de l'éclairement incident permettant d'obtenir un taux élevé de captation des poudres dans le bain fondu.

Dans le cas du dépôt, la nécessité de maintenir un faible taux de dilution rend indispensable l'optimisation des paramètres opératoires et donc l'analyse des différentes étapes du procédé. Différentes études expérimentales et théoriques se sont attachées à évaluer l'atténuation du faisceau lors de la traversée du nuage de particules [50] [51] [52] [53] [54]. Des travaux expérimentaux récents ont conduit à la réalisation en laboratoire d'un banc instrumenté de dépôt permettant de caractériser les différentes grandeurs intervenant dans un traitement avec apport de poudre (mesure du débit massique de poudre et de sa répartition dans le faisceau laser, caractérisation des écoulements gazeux, mesure de température de surface, étude des puissances transmises et diffusées à travers le jet de poudre) [55]. Les résultats ont fait apparaître qu'il serait possible, grâce aux mesures des différents paramètres en cours de traitement, de contrôler la dilution du matériau d'apport. La dilution est liée à la quantité d'énergie qu'échange le substrat par transferts radiatif (irradiation directe du substrat par le faisceau laser), convectif et conductif (échange d'énergie avec les poudres). Pour un niveau de dilution donné, la puissance surfacique nécessaire à la formation du revêtement dépend de la quantité de matériau à déposer, de la vitesse de défilement du substrat sous le faisceau laser et des propriétés physiques des matériaux de base et d'apport.

##### ■ Applications

Les traitements de surface par laser avec apport de poudre intéressent de nombreux industriels essentiellement dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique afin d'augmenter la durée de vie de pièces mécaniques. Dans l'industrie, le dépôt est classiquement réalisé par un procédé de projection sous plasma au cours duquel on revêt la surface en projetant à grande vitesse un matériau sous forme de poudres préalablement fondues en milieu plasma. Le principal défaut de ce procédé est lié à l'absence de chauffage du substrat qui provoque un manque d'adhérence de la couche superficielle ainsi que l'apparition de porosités et de

fissurations. Le traitement avec apport de matériau, réalisé par laser CO<sub>2</sub> continu, ne présente pas ces limitations, ce qui justifie l'intérêt croissant porté à ce procédé. Par ailleurs, la technique laser permet un traitement localisé aux seules zones soumises aux sollicitations. Les applications concernent, par exemple, la réalisation de dépôts tenant à l'usure et à l'oxydation, applicables sur les ailettes de compresseur (les dépôts par laser de base cobalt sur les bords d'attaque d'aubes de turbine en acier [56] ou sur les encoches de chapeaux d'aubes de turbine [57] [2] sont utilisés dans l'industrie).

Le dépôt de stellite sur des soupapes d'admission de moteurs automobiles ou diesels marins permet d'assurer leur protection contre l'usure et la corrosion (figure 13) [58] [59]. L'addition de nickel, de cobalt, de chrome ou de fer améliore le comportement tribologique d'alliages d'aluminium (figure 14), alliages très utilisés dans les secteurs aéronautique et automobile du fait de leurs bonnes propriétés structurales [55] [60] [61]. L'inclusion de carbure de titane dans une matrice d'aluminium permet de renforcer significativement les caractéristiques d'usure par frottement. La résistance à l'usure et à la corrosion d'aciers à outils peut être considérablement améliorée par l'incrustation de carbures de tungstène [62]. L'apport de matériau assisté par laser est particulièrement bien adapté au traitement de superalliages peu soudables, tels que les superalliages à base nickel.

Le traitement de refusion par laser de prédépôts est utilisé pour améliorer le comportement de barrières thermiques d'éléments de moteurs diesels ou de turbines à gaz fonctionnant à haute température (tenues aux chocs thermiques, à la corrosion et à l'oxydation) [63]. Le procédé permet également de répondre à des problèmes de réparation de pièces endommagées en service (valves, arbres, ...) [59]. En conclusion, ce procédé présente de nombreux avantages : taux de déformation induit très faibles, dépôt d'énergie localisé et précis, excellente adhésion du revêtement et enfin, niveaux de dilution très faibles.

### 3.2.2 Dépôt physique en phase vapeur par laser (LPVD)

L'objectif recherché est ici la réalisation d'un dépôt à partir d'une cible irradiée par laser sur un substrat en vue de l'amélioration de ses propriétés de surface (tribologique, optique, thermique, électrique, ...). Ce traitement, classiquement réalisé par évaporation ou pulvérisation de la cible par plasma, bombardements ionique ou électronique [64], s'applique dans de nombreux secteurs industriels [mécanique (outils), microélectronique, optique, etc.]. Les avantages résultant d'une technique par laser pulsé sont liés à l'évaporation instantanée et « explosive » qui va permettre un dépôt dont la stœchiométrie est très proche de celle de la cible. Les films obtenus sont denses, cristallins ou amorphes et les substrats peuvent être maintenus à basse température au cours du traitement. Si les vitesses instantanées de dépôt au cours de l'impulsion sont élevées (100 μm/s), les vitesses moyennes restent faibles (1 nm/s) par rapport aux autres techniques (10 à 50 nm/s). Enfin, l'effet de détente du plasma sur la cible peut conduire à l'émission et au dépôt néfaste de gouttelettes sur le substrat. Les principales applications du dépôt assisté par laser concernent le dépôt de céramiques (nitrure, carbure, oxyde), de supraconducteurs [65] [66], de pseudo-diamant [66] [67], de couche magnétique ou piézo-électrique [64].

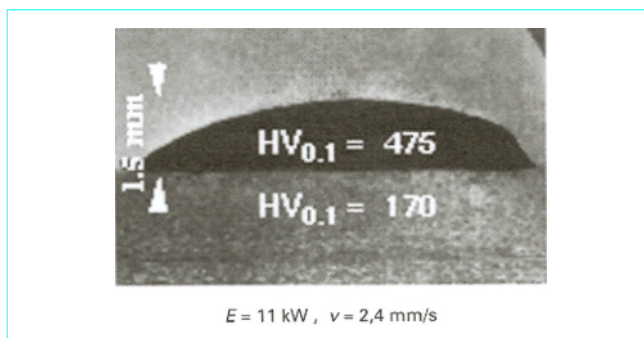


Figure 13 – Coupe transversale d'un dépôt par laser de stellite (en noir) sur un acier inoxydable [59]

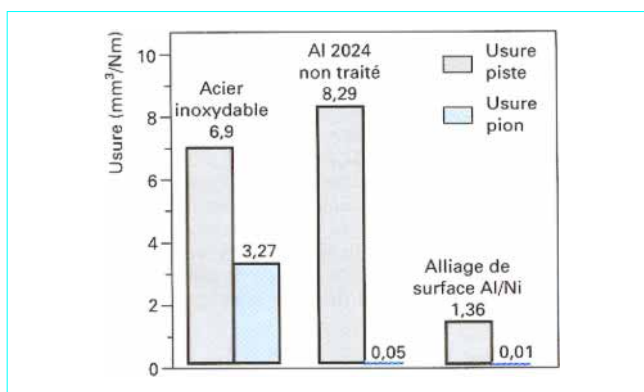


Figure 14 – Amélioration de la tenue à l'usure par frottement résultant de la formation d'un alliage de surface Al-Ni sur un substrat d'aluminium par traitement laser avec apport de poudre [55]

## 4. Traitements photochimiques

Un traitement photochimique (ou photolytique) est défini comme un processus dont la réactivité chimique résulte de perturbations des liaisons interatomiques dues à l'excitation des électrons par absorption d'au moins un photon. Cette absorption peut entraîner une modification de la réactivité du gaz (excitation électronique, dissociation, ionisation), du solide (ionisation de la surface, fragmentation) ou d'espèces adsorbées à l'interface gaz-solide (excitation électronique, ionisation). Ce processus nécessite des photons de forte énergie (domaine UV) et on utilise donc principalement des lasers à excimère (ou des lampes UV). L'avantage d'un processus photochimique par rapport à un processus thermiquement activé réside dans la possibilité d'une réactivité sélective (selon la longueur d'onde) sur une surface dont la géométrie est définie par la dimension de la zone éclairée sans effet thermique. Cette absence d'effet thermique permet de réaliser des motifs dont les dimensions sont de l'ordre du dixième de micromètre (en traitement thermique, dimensions minimales : quelques micromètres). Le principal secteur d'applications concerne la photoablation des polymères pour lesquels l'énergie des photons UV est de l'ordre de grandeur des liaisons dans les polymères [68].

L'application de traitements photochimiques à des matériaux inorganiques reste pour le moment limitée et ne concerne que la gravure et le dépôt LCVD à vocations microélectronique et opto-électronique. On peut ainsi citer l'étude des mécanismes de la gravure du silicium par le chlore [69] ou par  $\text{XeF}_2$  [70], du tungstène par  $\text{NF}_3$  ou de  $\text{InP}$  par  $\text{CF}_3\text{Br}$  [71]. Pour les techniques de dépôt, l'utilisation de phénomènes photochimiques permet une meilleure résolution spatiale que des techniques pyrolytiques ; néanmoins apparaissent des problèmes liés à la pollution des dépôts par le carbone dans les dépôts métalliques à partir d'organométalliques gazeux. Il en résulte que les dépôts sont réalisés en associant à la réaction photolytique des effets pyrolytiques qui permettent également d'augmenter les vitesses de dépôt (faibles en photolytique). C'est par exemple le cas du dépôt épiaxial de silicium à partir de  $\text{Si}_2\text{F}_6$  [72] ou de titane à partir de  $\text{TiCl}_4$  [73]. L'application encore peu développée de ces traitements par laser à excimère (ou restreinte aux secteurs de la microchimie) doit trouver en partie son explication dans la faible puissance couramment délivrée par les lasers à excimère. L'apparition de lasers de forte puissance devrait ouvrir la voie à de nouvelles applications.

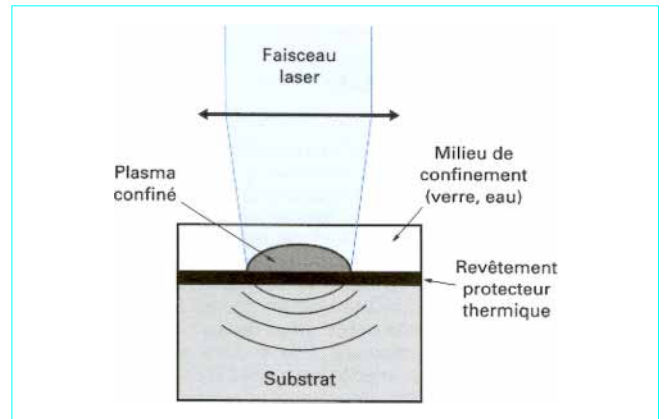


Figure 15 – Principe du traitement mécanique par choc laser

## 5. Traitements mécaniques

Un traitement mécanique par choc laser a pour objectif la mise en contrainte du matériau en vue de l'amélioration de sa tenue en fatigue. Il s'agit d'un procédé au stade de l'étude en laboratoire.

### 5.1 Principe et paramètre de traitement

Le principe du traitement repose sur la création d'une onde de choc dans le matériau avec une pression suffisante en surface pour déformer plastiquement le matériau (figure 15) ; cette onde de choc résulte de l'interaction d'un laser YAG pulsé délivrant des impulsions courtes (quelques dizaines de nanosecondes) dont la densité d'énergie atteint quelques  $\text{GW}/\text{cm}^2$  sur le matériau en milieu confiné (eau, verre, ...). On obtient alors une mise en compression du matériau sur des épaisseurs qui peuvent atteindre quelques millimètres (figure 16).

Les techniques utilisées dans l'industrie pour la mise en compression de surface sont essentiellement le grenailage (projection de billes d'aciers) et le galetage (écrasement par un galet) ; le galetage est utilisé dans l'industrie automobile pour améliorer la limite d'endurance de congé de vilebrequins [74].

Les principaux paramètres intervenant dans un traitement par choc laser en milieu confiné sont : l'intensité, la durée et la forme temporelle de l'impulsion laser, la géométrie de l'impact (carré ou circulaire) et la nature du milieu de confinement.

La pression maximale atteinte en surface est proportionnelle à la racine carrée de l'intensité de l'impulsion jusqu'à un certain flux incident au-delà duquel des effets de claquage dans le milieu de confinement font chuter la pression en surface du matériau (typiquement  $10 \text{ GW}/\text{cm}^2$ , pour un confinement par une couche d'eau).

En ce qui concerne la durée et la forme de l'impulsion [75], les résultats des recherches ont mis en évidence que les pressions les plus élevées (de l'ordre de 5 GPa) sont obtenues avec une impulsion dont la durée est de l'ordre de 30 ns et qui présente un front de montée rapide (typiquement 2 à 3 ns). Cette optimisation de la pression générée en surface du matériau lors de l'interaction est un élément important pour le traitement de matériaux présentant une limite d'élasticité élevée.

Une géométrie d'impact carré est préférée à une géométrie circulaire ; elle permet d'obtenir un champ de contraintes plus uniforme sur l'ensemble de la zone traitée.

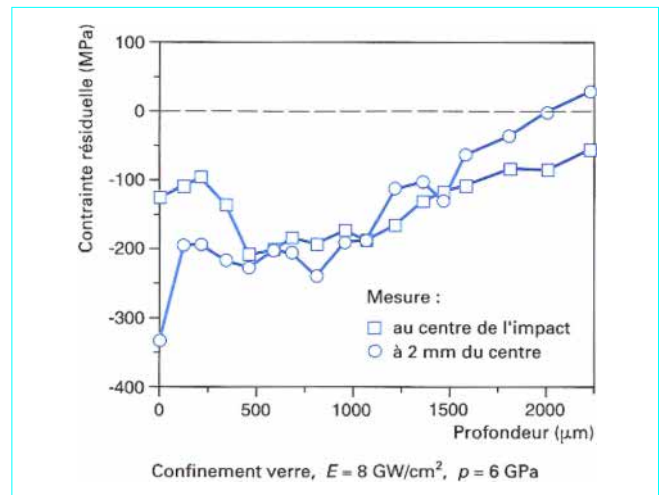


Figure 16 – Profils de contraintes résiduelles en différents endroits de la zone impactée pour un acier 55C1 après traitement mécanique par choc laser [11]

La nature du milieu de confinement est également un paramètre important. Celui-ci doit être transparent au rayonnement, avoir un seuil de claquage élevé et doit pouvoir s'appliquer aisément sur des pièces de géométrie complexe. Les revêtements actuellement retenus pour ce type de traitement sont soit l'eau, soit un vernis.

### 5.2 Effets sur les matériaux

Les effets du choc laser sur l'amélioration de la tenue en fatigue ont été notamment étudiés sur des alliages d'aluminium (« bon candidat » pour le traitement par choc laser : faible limite d'élasticité, module d'écroutissage important) [76] [77] [78]. Une augmentation de la limite de fatigue de 25 à 30 % par rapport au matériau initial a été observée et attribuée à l'augmentation du temps d'amorçage des fissures. La comparaison avec un traitement mécanique par grenailage a mis en évidence l'efficacité supérieure du traitement par choc laser sur des alliages d'aluminium (figure 17).

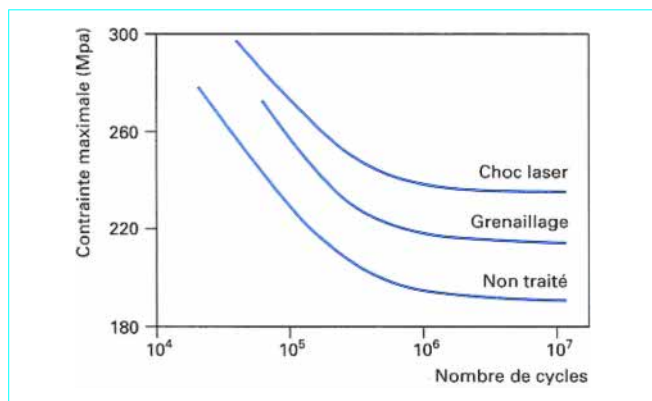


Figure 17 – Courbes de Wöhler – Comparaison de la tenue à l'endurance d'alliage d'aluminium non traité, traité par grenailage et par choc laser [78]

Le traitement par choc laser d'acier a également été étudié et comparé au grenailage. Globalement les deux techniques conduisent sur un acier inoxydable à un gain de 20 % sur la limite d'endurance. Sur un acier 35 CD4 50 HRC [79], la limite d'endurance passe de 680 MPa sur le matériau de base à 730 MPa après grenailage et à 890 MPa après choc laser. La supériorité d'un traitement sur l'autre est étroitement liée à la nature de la sollicitation appliquée. Un des atouts du choc laser par rapport au grenailage réside dans le fait qu'il n'entraîne aucune modification chimique ou métallurgique de la surface ; la modification de l'état de surface en terme de rugosité est nettement inférieure à celle obtenue par grenailage. Par conséquent, le traitement mécanique par laser peut être envisagé sur des pièces ayant préalablement subi un traitement thermique ou chimique superficiel sans détérioration des propriétés acquises. C'est ainsi que l'on peut traiter par choc laser des pièces ayant subi un prétraitement de trempe par laser dans le but d'améliorer la tenue en fatigue [11]. En effet, ce traitement mécanique permet d'augmenter en valeur absolue la contrainte induite en surface du matériau et d'éliminer la zone en traction, située à l'interface martensite-matériau de base, caractéristique d'un traitement thermique par laser CO<sub>2</sub>. De même, il apparaît possible d'appliquer cette technique de mise en compression des zones de traction à d'autres types de traitements thermiques ou thermochimiques par laser.

En conclusion, le traitement mécanique par choc laser apparaît comme un procédé prometteur pour améliorer le comportement mécanique des matériaux, notamment dans le cas où les caractéristiques physiques et/ou chimiques de la surface du matériau doivent être conservées. Néanmoins, le développement de ce type de traitement se heurte aujourd'hui à la faible cadence des sources laser susceptibles de délivrer les puissances élevées requises. Cette faible cadence d'impulsion liée au prix élevé de ces sources limite actuellement l'intérêt industriel pour ce procédé. L'avenir de cette technologie est donc directement lié au développement de sources de forte cadence. Les études s'orientent sur la possibilité d'utiliser un laser à excimère de forte puissance qui présente des avantages évidents : cadence de tirs d'une dizaine de Hz, longueur d'onde plus courte qui permet de retarder les phénomènes de claquage dans les matériaux diélectriques.

## 6. Perspectives

La variété des effets induits lors de l'interaction laser-matière ouvre la voie à de nombreuses applications des procédés laser dans le domaine des traitements de surface.

Dans le domaine des traitements thermiques et thermochimiques par laser CO<sub>2</sub>, la connaissance des phénomènes de base et la technologie des sources sont relativement bien maîtrisées. Les travaux doivent maintenant s'orienter vers le contrôle, la régulation et l'automatisation de procédé. Soulignons néanmoins que les progrès en cours des technologies YAG et diode laser pourraient faire évoluer ces traitements vers une diversification des sources utilisées.

Les traitements thermiques, mécaniques ou photochimiques utilisant des sources à excimère ou à solides sont des procédés plus novateurs utilisant des sources dont la technologie évolue. Les perspectives de développement sont alors liées, d'une part aux évolutions technologiques des sources (cas typique, le choc laser, pour lequel il n'existe aujourd'hui aucune source adaptée aux exigences industrielles), et d'autre part aux progrès des études et de la mise au point du procédé. Dans le domaine du choc laser, les travaux ont essentiellement porté sur l'amélioration des propriétés d'endurance des matériaux ; des solutions à des problèmes tribologiques, ou de tenue à la corrosion devraient également émerger. Les potentialités des traitements par laser excimère sont également vastes. L'avantage de cette technique réside dans l'aspect très localisé du traitement avec des effets thermiques réduits. Cette technique devrait trouver un essor rapide dans les applications pour lesquelles il faut procéder à un traitement « chirurgical » couche par couche sans altération du substrat (décapage de peinture, du nettoyage de surface « fragile »). Enfin, il apparaît également que la combinaison de traitements thermiques et mécaniques, même si elle n'est actuellement pas viable industriellement, soit une ouverture combinant les potentialités des deux traitements.

Le développement d'applications industrielles de procédés laser nécessite une étape de mise en concurrence avec les procédés classiques. Le bilan technico-économique ne doit pas uniquement considérer la comparaison des procédés en vue d'une transformation donnée, mais également tenir compte d'éléments liés à l'ensemble de l'organisation de la production (réductions des stocks et du nombre d'opérations sur une gamme de fabrication, améliorations de la qualité, de la protection de l'environnement et des conditions de travail). De façon générale, les progrès du transfert des résultats de recherche des applications des lasers de puissance vers l'industrie constituent un cas d'école du problème général de la diffusion des technologies innovantes. Le succès de ce type d'entreprises repose sur l'amélioration du dialogue entre les centres de recherche et les industriels potentiellement utilisateurs et sur la prise en compte des aspects pluridisciplinaires de recherche et de leurs conséquences dans l'intégration de systèmes industriels. Enfin, la formation et l'information de l'ensemble des acteurs au niveau industriel (investisseurs, ingénieurs, techniciens) sont également des étapes clés du succès de l'intégration de nouvelles technologies.

## 7. Conclusion

Grâce à la diversité des effets induits dans l'ensemble des traitements de surface par laser, il apparaît que cette gamme de procédés est capable d'offrir des solutions variées à l'amélioration des propriétés de surface des matériaux (traitements thermiques avec ou sans modification chimique de la surface, traitements mécaniques, traitements photolytiques). Les applications concernent des matériaux très divers soumis à différents types de sollicitations (résistance à l'usure, à l'érosion, à l'oxydation, à la fatigue, ...); on peut également utiliser ce procédé en vue de la préparation de surface pour un traitement ultérieur (décapage, préparation de surface avant collage, ...). Les atouts essentiels des procédés laser sont variés et peuvent avoir une répercussion économique importante : l'aspect localisé du traitement permet de traiter uniquement la zone soumise aux sollicitations (réduction du temps de traitement, de la quantité d'énergie et de matière consommées); le dépôt superficiel d'énergie permet d'une part de conserver les propriétés massives du matériau,

et d'autre part limite les déformations de la pièce (suppression d'étape de finition, possibilité de traitement sur un produit quasi fini) ; les cinétiques de chauffage rapide et la possibilité de maintien à température élevée permettent une réduction importante des temps de traitement dans le cas des traitements thermiques. Malgré des potentialités importantes, les procédés laser dans le domaine des traitements de surface n'ont pas encore connu le développement industriel qu'ils méritent. Il s'agit d'une technologie encore jeune à

laquelle le monde industriel préfère souvent des procédés peut être moins performants mais totalement maîtrisés, moins coûteux et « qui ont fait leurs preuves » ; par ailleurs, le concept de « machine laser » intégrant l'ensemble de la technologie (source, transport du faisceau, contrôle et régulation) et fonctionnant alors comme une « boîte noire » parfaitement fiabilisée pour l'utilisateur doit être développé pour rendre cet outil plus attractif et séduisant aux yeux des utilisateurs potentiels.

---

# Application des lasers aux traitements de surface

par **Patricia LAURENS**

Docteur de l'Université Paris VI  
Chargé de recherche du CNRS au laboratoire  
d'application des lasers de puissance – Unité Mixte ETCA – CNRS (LALP)

**Catherine DUBOUCHET**

Docteur de l'Université Paris XI  
Ingénieur de recherche chez Peugeot-Citroën (PSA)

et **Didier KECHEMAIR**

Ingénieur de l'école polytechnique  
Docteur de l'Université Paris XI  
Chef du Département « espace et techniques avancées »  
au Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
Ancien Directeur adjoint du laboratoire d'application des lasers de puissance (LALP)

## Références bibliographiques

- [1] Laser Focus World « Annual review of the laser market » publié dans chaque premier numéro annuel.
- [2] KERRAND (E.) et CARIOU (F.). – *Procédé laser de dépôt pour application à des aubes de turbines à gaz*. Bulletin de liaison n° 9, éd. par le Club Laser de Puissance, p. 17 (1992).
- [3] MIKAME (K.). – *Application of laser material processing in Toyota Motor corporation*. Proceed. LAMP'92, vol. 2, Nagaoka – Japon, p. 947 (1992).
- [4] JENNY (S.). – *Diode pumping expands market for solid state lasers*. Laser Focus World, p. 121, juin 1994.
- [5] TÖNSHOFF (H.K.) et al. – *Diode Laser for Materials Processing*. J. de Phys. IV, vol. 4, Colloque C4, Supplément au Journal de Physique III, p. C4-59, août 1994.
- [6] PROKHOROV (A.M.), KONOV (V.I.), URSU (I.) et MIHAILESCU (I.N.). – *Laser Heating of Metals*. Éd. par Adam Hilger New York (1990).
- [7] *Technique d'Utilisation des Photons*. Collection ELECTRA (1993).
- [8] PANTELIS (D.). – *Laser de puissance – Traitement et utilisation*. Techniques de l'Ingénieur, traité Sciences fondamentales, A1095 (1992).
- [9] TRAFFORD (D.N.H.). – *Traitement thermique avec un laser de haute puissance*. Heat Treatment, 79 (261), p. 32 (1980).
- [10] Brevets EP 174915, EP 206080 (1986).
- [11] DUBOUCHET (C.). – *Traitements thermo-mécaniques de surfaces métalliques à l'aide de lasers CO<sub>2</sub> continus et de laser impulsionnel*. Thèse, Université Paris XI (1993).
- [12] SHERCLIFF (H.R.). – *The prediction of case depth in laser transformation hardening*. Met. Trans. A, vol. 22A, p. 2459 (1991).
- [13] ASHBY (M.F.). – *The transformation hardening of steel surfaces by laser beam-hypoeutectoid steels*. – Acta Metallur., vol. 32, n° 11, p. 1935 (1984).
- [14] BATAILLE (F.) et al. – *Thermal regulation applied to CO<sub>2</sub> Laser surface treatments*. Meas. Sci. Technol., 3, p. 50 (1992).
- [15] BREVETS : DE 305551 C2, (1982), WP C21D/2385944 (1982).
- [16] WISSENBAACH (K.) et al. – *Surface treatment of car engine components with laser radiation*. Proceed. « ISATA », Hofburg – Allemagne, p. 333 (1990).
- [17] ABLAEV (A.A.). – *Laser hardening of repaired A-41 engine crankshafts*. Metal Sci. Heat Treatments, vol. 31, n° 1-2, p. 12 (1989).
- [18] LEVCHENKO (A.A.) et al. – *Laser hardening of crankshaft made of high strength cast iron*. Phys. Chem. Mater. Treat., vol. 21, n° 1, p. 44 (1987).
- [19] SHIBATA (K.) et al. – *Proceed of ISATA*. Wiesbaden – RFA, p. 6 (1989).
- [20] NIZERY (F.) et al. – « *Treatment of overlapping runs by cw CO<sub>2</sub> laser* », dans « *Laser treatment of materials* ». Proceed. ECLAT'92, éd. B.L. Mordike – DGM, Germany, p. 311 (1992).
- [21] FRENK (A.) et KURZ (W.). – *Formation des microstructures dans les traitements laser*. École de Printemps « Laser de puissance et traitements des Matériaux » France éd. aux Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, p. 195 (1991).
- [22] BERGMAN (H.W.) et MORDIKE (B.L.). – *Laser and electron beam melted amorphous layers*. J. of Mater. Sci., vol. 16, p. 863 (1981).
- [23] ANTIONE (C.) et al. – *Surface amorphous and crystalline structures in laser glazed Fe-Ni-P-B and Fe-Ni-Cr-P-B alloys*. J. of Mater. Sci. Letters, vol. 3, p. 141 (1984).
- [24] RÖPP (W.). – *Machining Systems for Laser Remelting of Camshafts*. Third International Focal Spot users Seminar organisé par United Technologies Industrial Lasers, Orlando-USA, mars 1992.
- [25] MORDIKE (B.L.). – *Laser Surface Treatment in the automotive industry*. Third International Focal Spot users Seminar organisé par United Technologies Industrial Lasers Orlando-USA, mars 1992.
- [26] CORNET (A.). – *Traitement des arêtes de coupe par refusion sous faisceau laser*. Proceed. « Interactions : Traitements thermiques – Traitement de surface » organisé par la Société Française de Métallurgie, Paris, n p. 71, mai 1992.
- [27] VILAR (R.) et al. – *Laser Surface Melting of Martensitic Stainless Tools Steels*. Proceed of LAMP'92, vol. 2, Nagaoka – Japon, p. 779 (1992).
- [28] EL LEITHY (A.) et al. – *Traitement superficiels des fontes grises par refusion TIG et refusion laser*. Mémoires et Études Scientifiques – Revue de Métallurgie, p. 409, juil-août 1992.
- [29] SCUBERT (E.) et BERGMANN (H.W.). – *Modification of metallic surfaces par means of excimer lasers : fundamentals and applications*. Laser in Engineering, vol. 2, p. 111 (1993).

- [30] LU (Y.F.) et AOYAGI (Y.). – *Laser Induced Dry cleaning in air*. Jpn. J. Appl. Phys., vol. 33, p. L430 (1994).
- [31] TAM (A.C.) et al. – *Laser Cleaning Techniques for removal of surface particules*. J. Appl. Physics, 71 (7), p. 3515 (1992).
- [32] PARK (H.K.), GRIGOROPOULOS (C.P.), YAVES (O.), LEUNG (W.P.), POON (C.C.) et TAM (A.C.). – *Practical application of laser cleaning for removal of surface contaminant*. Conf. on Laser and Electro-Optics Europe, Amsterdam – Hollande (1994).
- [33] BERGMANN (H.W.) et al. – *Paint stripping with short pulse laser*, dans « Laser treatment of materials ». Proceed. ECLAT'92, éd. B.L. Mordike – DGM, Germany, p. 533 (1992).
- [34] LAUVIGE (O.). – *Quand le laser nettoie du sol au plafond*. L'Usine Nouvelle n° 2390, p. 71, déc. 1992.
- [35] SHIBATA (K.). – *Recent trends in laser material processing in the Japanese automotive industry*, dans « Laser treatment materials », éd. B.L. Mordike – DGM, Germany, p. 433 (1992).
- [36] *Technique d'utilisation des photons*. Collection ELECTRA, p. 433 (1993).
- [37] CRAHAY (J.) et al. – *Present state of development of the Lasertex process*. Proceed. of « Laser in Manufacturing », Paris, p. 245 (1986).
- [38] LAURENS (P.) et KECHEMAIR (D.) et al. – *CO<sub>2</sub> laser assisted solid state nitridation of TA6V titanium alloys*. Proceed. of LAMP'92, vol. 2, Nagaoka – Japon, p. 861 (1992).
- [39] WAUTELET (M.) et ANDREWS (R.). – *Laser assisted oxidation of metallic films on insulators*. Philosophical Mag. B, 55 (2), p. 261 (1987).
- [40] MASSOUD (J.P.) et COQUERELLE (G.). – *High power laser surface treatments on TA6V in order to improve its erosion resistance*. Proceed. of 6th World Conf. on Titanium, France, p. 1847 (1988).
- [41] MORDIKE (B.L.). – *Properties of laser nitrided surface layers on titanium*. « High power lasers », éd. par A. Niku-Lari et B.L. Mordike, Pergamon Press, p. 3 (1989).
- [42] LEE (S.Z.) et BERGMANN (H.W.). – *Laser surface alloying of titanium and titanium alloys*. Proceed. of 6th World Conf. on Titanium, France, p. 1811 (1988).
- [43] YERRAMAREDDY (S.) et BAHADUR (S.). – *The effect of laser surface treatments on the tribological behaviour of TA6V*. Wear of Metals (ASME), p. 451 (1991).
- [44] FINK (V.) et BERGMANN (H.W.). – *Laser surface treatment of implants*, dans « Laser treatment of materials ». Proceed. ECLAT'92, éd. B.L. Mordike – DGM, Germany, p. 451 (1992).
- [45] KINSMAN (G.) et DULEY (W.W.). – *CO<sub>2</sub> laser drilling of copper following excimer laser pre-treatment*. Apply. Phys. Lett., 56 (11), p. 996 (1990).
- [46] COMITA (P.B.) et BAUM (T.H.). – *Laser induced chemical vapor deposition of metals for microelectronic processing*. Proceed. of LAMP'92, vol. 2, Nagaoka – Japon, p. 1209 (1992).
- [47] MULLER (H.G.) et al. – *Laser process for personalization and repair of multi chip modules*. Laser in Microelectronic Manufacturing (SPIE), n° 1598, p. 132 (1991).
- [48] PELOUS (G.) et al. – *IC rewriting by laser micro-chemistry*. Laser in Microelectronic Manufacturing (SPIE), n° 1598, p. 149 (1991).
- [49] MORISHIGE (Y.). – Proceed. of LAMP'92, vol. 2, p. 1203, juin 1992.
- [50] LAGAIN (P.). – *Contribution expérimentale aux traitements de surface par laser avec apport de poudre*. Thèse Université Aix-Marseille (1989).
- [51] MARDSEN (C.F.) et al. – *Power absorption during the laser cladding process*, dans Laser treatment of materials. Proceed. ECLAT'92, éd. B.L. Mordike – DGM, Germany, p. 375.
- [52] MATZUNDER (J.), KAR (A.) et SINGH (J.). – *Theoretical and experimental studies of laser cladding of Ni-Cr-Al-Hf alloys with extended solution of HF*. Proceed. of LAMP'87, Osaka – Japon, p. 649 (1987).
- [53] HOADLEY (A.F.A.) et RAPPAZ (M.). – *A thermal model of laser cladding by powder injection*. Metallurgical Transac. B, vol. 23B, p. 631 (1992).
- [54] HOADLEY (A.F.A.) et RAPPAZ (M.). – *Heat flow simulation of laser remelting with experimental validation*. Metallurgical Transac. B, vol. 22B, p. 101 (1991).
- [55] HERSCHKORN (C.). – *Traitement de surface par laser CO<sub>2</sub> de puissance avec apport de poudre ; application aux alliages de surface aluminium-nickel*. Thèse de l'Université Paris XI (1994).
- [56] COULON (P.A.) et al. – *Characterisation and wear resistance of cobalt base coatings deposited on steam turbine components*, dans « Laser treatment of materials ». Proceed. ECLAT'92, éd. B.L. Mordike – DGM, Germany, p. 509 (1992).
- [57] DUHAMEL (R.F.). – *Production of laser hard-facing of jet engine turbine blades*. Proceed. Manufacturing Applications of Lasers (SPIE), vol. 621, p. 31 (1986).
- [58] CRIQUI (B.) et al. – *Blindage des soupapes de moteur – Comparaison des différents procédés : chalumeau, TIG, Plasma, Laser*. Communication au Colloque Européen COMETT, Les Applications des Lasers de Puissance, Montignac – France, oct. 1993.
- [59] DENNEY (P.E.). – *Laser material processing : exemples from the USA*. Laser Treatment of materials. Proceed. ECLAT'92, éd. B.L. Mordike – DGM, Germany, p. 71 (1992).
- [60] ALMEIDA (A.) et al. – *Laser alloying of Al and 7175 Al alloy for enhanced corrosion resistance*. Proceed. of ICALCO'93, Orlando – USA, p. 903 (1993).
- [61] FOUQUET (F.) et al. – *Alliages de surface avec prédépôts, revêtements et alliages avec projection*. École de Printemps, Laser de puissance et traitements des Matériaux, France, éd. aux Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, p. 217 (1991).
- [62] PELLETIER (J.M.) et al. – *Improvement of mechanical properties of steels by addition of tungstene carbides : laser cladding and laser welding*. Laser treatment of materials. Proceed. ECLAT'92, éd. B.L. Mordike – DGM, Germany, p. 211 (1992).
- [63] HAUTEFEUILLE-BEYLAT (L.) et al. – *Amélioration des propriétés de surface par refusion laser*. École de Printemps, Laser de puissance et traitements des Matériaux, France, éd. aux Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, p. 304 (1991).
- [64] JACKSON (T.J.) et PALMER (S.B.). – *Oxide superconductor and magnetic metal thin film deposition by pulsed laser ablation : a review*. J. Phys. D : Appl. Phys. 27, p. 1581-1594 (1994).
- [65] ONO (M.), KAMIMOTO (Y.) et KOBASAWA (M.). – *High - T<sub>c</sub> Superconducting films of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>-δ prepared by excimer laser deposition*. Proceed. of LAMP'92, vol. 2, Nagaoka – Japon, p. 909 (1992).
- [66] SCHAFFER (R.D.) et al. – *Material processing with excimer lasers*. Material and Manufacturing Processes, 5 (4), p. 617 (1990).
- [67] MINETA (S.) et al. – *Preparation of CBN and DLC films by CO<sub>2</sub> laser PVD with simultaneous ion supply*. Proceed. of LAMP'92, vol. 2, Nagaoka – Japon, p. 897 (1992).
- [68] YABE (A.) et NIINO (H.). – *Surface modification of polymers with excimer lasers and its applications*. Laser Ablation of Electronic Materials – basic mechanisms and applications, éd. par Fogarassy (E.) et Lasare (S.), Elsevier Science Publishers, Hollande, p. 199 (1992).
- [69] MOGYORISI (P.) et al. – Appl. Phys. A, 45, p. 293 (1988).
- [70] HOULE (F.A.). – Phys. Rev. Letter, 61, p. 1871 (1988).
- [71] PEYRE (J.L.) et al. – *Excimer laser assisted etching of solids for microelectronics*. Proceed. of Laser Assisted Processing (ECO1, Hambourg – Allemagne, p. 145 (1988).
- [72] FOWLER (B.) et al. – *Modelling of photochemical processes in excimer laser deposition of titanium from TiCl<sub>4</sub>*, dans « Laser treatment of materials ». Proceed. ECLAT'92, éd. B.L. Mordike – DGM, Germany, p. 509 (1992).
- [74] RENARD (C.). – *Optimisation de la trempe superficielle par laser d'alliages base fer : Application à l'amélioration du comportement en fatigue de vilebrequins*. Thèse de l'Université Claude Bernard, Lyon (1992).
- [75] DEVAUX (D.). – *Caractérisation des plasmas formés par laser impulsif en géométrie confinée. Application au choc laser*. Thèse de l'Université Paris XI (1993).
- [76] CLAUER (A.H.) et al. – *Effect of laser induced shock waves on metals*. Proceed. de Application of laser in materials processing, ASM, p. 29 (1989).
- [77] VACCARI (J.A.). – *Laser shocking extend fatigue life*. Am. Machinist, p. 62 (1992).
- [78] PEYRE (P.). – *Traitement mécanique superficiel d'alliages d'aluminium par ondes de choc laser – Caractérisation des effets induits et application à l'amélioration de la tenue en fatigue*. Thèse de l'Université de technologie de Compiègne (1993).
- [79] FOURNIER (J.). – *Le choc laser : un traitement de surface concurrent futur du galeage et du grenailage*. Traitement Thermique, 239, p. 27 (1990).



## Organismes

Club Laser de puissance CLP.

Association pour la promotion des applications des lasers de puissance.

Auprès de cet organisme, on trouve :

- les centres de recherche et les laboratoires qui travaillent dans ce domaine ;
- les normes et les réglementations diverses ;
- les utilisateurs des systèmes laser ;
- les données du marché des lasers industriels ;
- une documentation variée.

