

La puissance lumineuse du laser absorbée par le métal est convertie en chaleur et utilisée pour usiner des pièces métalliques. Etudions dans la deuxième partie deux applications pratiques : le traitement thermique de l'acier en vue de son durcissement et l'usinage de pièces métalliques (perçage puis découpe) à l'aide d'un faisceau laser.

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATIONS DU LASER AU TRAITEMENT ET A L'USINAGE DE PIÈCES

I.- Traitement thermique de l'acier par laser

Le traitement thermique consiste en un chauffage de la couche superficielle d'une pièce en acier à une température supérieure à $T_a = 1293 \text{ K}$, à partir de laquelle se forme l'austénite (austénitisation). Les couches superficielles doivent être ensuite refroidies très rapidement à une température inférieure à $T_c = 993 \text{ K}$, ce qui provoque la formation de martensite. La dureté de l'acier s'en trouve alors très sensiblement augmentée (austénite et martensite sont deux phases du diagramme d'équilibre fer-carbone).

Etudions tout d'abord dans ce paragraphe la phase de chauffage de la pièce à l'aide d'un laser CO_2 pulsé, de longueur d'onde $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$. Le faisceau laser incident est supposé parfaitement cylindrique, sa section ayant une aire S . L'évolution de la densité de puissance incidente (puissance par unité de surface) en fonction du temps a un profil de type créneau (pulse) dont la représentation est donnée ci-dessous. Le temps t_p représente la durée de l'impulsion laser.

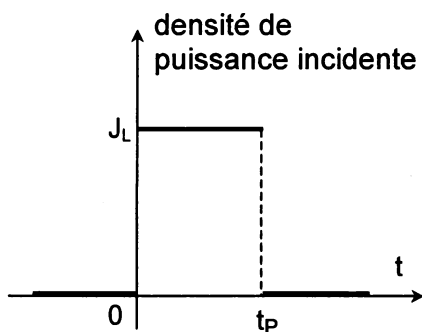


figure 2.

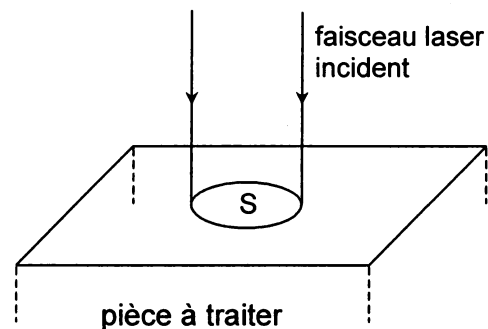


figure 3.

- I.1** La réflectivité R de l'acier pour le rayonnement utilisé est $R = 0,82$. En déduire littéralement puis numériquement la densité de puissance J_0 absorbée par l'acier. Donnée : $J_L = 4,0 \cdot 10^4 \text{ W.cm}^{-2}$.

Adoptons un modèle simplifié dans lequel la pièce en acier occupe le demi-espace défini par $z > 0$. Pour l'instant $t < 0$, l'acier est en équilibre thermique, sa température étant uniforme et valant $T_0 = 293 \text{ K}$. On désigne par ρ et C la masse volumique et la capacité thermique massique de ce milieu et on suppose que ces grandeurs restent constantes vis à vis de la température.

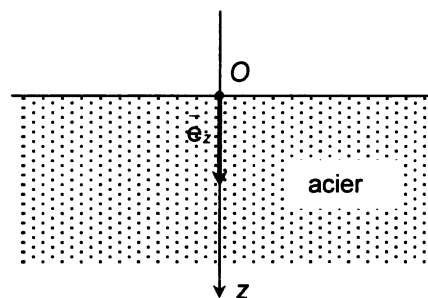


figure 4.

Supposons que les échanges thermiques au sein de la pièce se fassent exclusivement par conduction thermique (tout transfert en surface de type conducto-convectif sera négligé).

La distribution de température est supposée unidimensionnelle, de la forme : $T = T(z, t)$.

Le vecteur densité de courant thermique, noté \vec{J} , est relié à la température par la loi de Fourier :

$$\vec{J}(z, t) = -K \frac{\partial T}{\partial z} \vec{e}_z = J(z, t) \vec{e}_z ,$$

où K désigne la conductivité thermique de l'acier, supposée constante. On rappelle que le flux de \vec{J} à travers une surface S représente la quantité de chaleur traversant cette surface par unité de temps.

I.2.a Quelle est la signification du signe " - " dans la loi de Fourier ?

Considérons un cylindre à l'intérieur du métal, d'axe Oz , dont les bases sont situées dans les plans de cotes z et $z + dz$ et désignons par S l'aire de la section de ce cylindre.

I.2.b Etablir à l'aide du premier principe de la thermodynamique l'équation aux dérivées partielles (appelée équation de la chaleur) vérifiée par la température $T(z, t)$:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (E6)$$

Déterminer l'expression de D (diffusivité thermique) et préciser sa dimension.

I.2.c Montrer que $J(z, t)$ obéit à la même équation que $T(z, t)$, c'est à dire :

$$\frac{\partial J}{\partial t} = D \frac{\partial^2 J}{\partial z^2} \quad (E7)$$

Intéressons-nous à la phase de chauffage : $t \in [0, t_p]$. L'interaction laser-acier est prise en compte en supposant que la surface libre de la pièce est soumise à une densité de flux de chaleur donnée par :

$$\forall t \in [0, t_p], \quad \vec{J}(0, t) = J_0 \vec{e}_z ,$$

J_0 étant la densité de puissance absorbée, supposée indépendante du temps.

Les conditions aux limites et initiale décrivant le phénomène s'écrivent donc comme suit :

$$\begin{cases} \forall t \in [0, t_p] & J(0, t) = -K \frac{\partial T}{\partial z}(0, t) = J_0 \\ \forall z > 0, & T(z, 0) = T_0 \end{cases} \quad (E8)$$

I.3 Traduire la condition initiale sur la température en une condition initiale sur J en déterminant $J(z, 0)$ pour $z > 0$.

Une solution de l'équation (E7) correspondant à notre problème est de la forme :

$$J(z, t) = A f(u) ,$$

où A est une constante, u la grandeur définie par $u = \frac{z}{2\sqrt{Dt}}$ et f une fonction ne

dépendant que de la variable u et dont l'expression est : $f(u) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-x^2) dx$.

I.4 Quelle est la dimension de u ? Vérifier que l'expression proposée pour $J(z, t)$ est bien solution de (E7) et déterminer la constante A .

Pour $t \in [0, t_p]$, la température en un point de cote z du métal s'écrit sous la forme :

$$T(z, t) = T_0 + \frac{2J_0}{K} \sqrt{Dt} F(u) \quad (\text{E9})$$

avec :

$$F(u) = \frac{\exp(-u^2)}{\sqrt{\pi}} - u f(u) \quad (\text{E10})$$

- I.5** Vérifier à l'aide de la loi de Fourier que l'expression proposée pour $T(z, t)$ permet de retrouver l'expression de $J(z, t)$ donnée à la question **I.4**. Quelle est l'expression de la température $T_S(t)$ à la surface libre du métal ?
- I.6** A l'aide du graphe de la fonction $F(u)$ fourni en annexe, calculer la valeur numérique de la profondeur d pour laquelle $T = T_a$ à l'instant t_p (fin de l'impulsion laser).
Données : $K = 35 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, $D = 1,0.10^{-5} \text{ u.S.I.}$ et $t_p = 40 \text{ ms}$.
- I.7** Quelle est la température à la surface libre à l'instant t_p ?
- I.8** La température de fusion de l'acier considéré étant $T_F = 1800 \text{ K}$, quelle devrait être la durée t'_p de l'impulsion laser pour que cette température soit atteinte à la surface de la pièce à la fin de l'impulsion ?

II.- Usinage d'une feuille de métal par vaporisation

Etudions tout d'abord le **perçage** par vaporisation d'une mince couche d'aluminium déposée sur un substrat thermiquement isolant. Les conditions opératoires sont celles de la figure 5. La feuille métallique horizontale, d'épaisseur constante e , reçoit perpendiculairement à sa surface un pulse laser de durée t_p et de densité de puissance J_L . Le faisceau est supposé parfaitement cylindrique, de diamètre Φ .

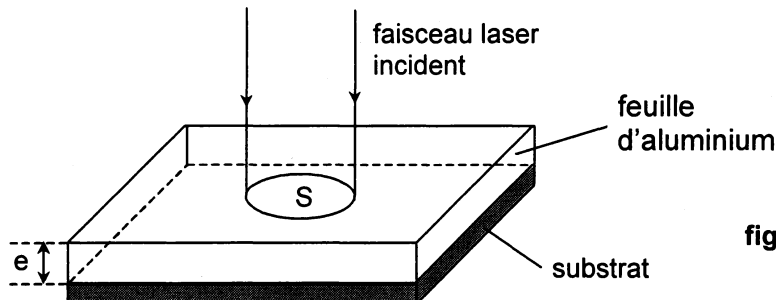


figure 5.

La feuille métallique est immobile par rapport au faisceau laser. Désignons par (\mathcal{S}) le système défini par la masse d'aluminium contenue initialement dans le volume cylindrique de diamètre Φ et d'épaisseur e et définissons les hypothèses de travail suivantes :

- la puissance lumineuse absorbée est totalement convertie en chaleur cédée à (\mathcal{S}) ;
- tout échange thermique entre (\mathcal{S}) et le reste de la feuille est négligé ;
- l'épaisseur e étant petite, il est admis qu'à chaque instant t , la température est uniforme dans (\mathcal{S}) et notée $T(t)$. Avant l'irradiation, la température est égale à $T_0 = 293 \text{ K}$;
- le perçage s'effectue sous la pression atmosphérique constante $P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$.

II.1.a Définir la chaleur latente de changement d'état d'un corps pur.

II.1.b Ecrire la relation liant la variation d'enthalpie de (\mathcal{S}) et la quantité de chaleur échangée avec le milieu extérieur.

L'irradiation de l'aluminium provoque son échauffement de T_0 à la température de fusion T_F , sa fusion, puis l'échauffement du métal liquide de T_F à la température de vaporisation T_V et enfin, sa vaporisation totale.

II.2.a Déterminer l'expression littérale de la variation d'enthalpie de (\mathcal{S}) correspondant à cette transformation thermodynamique.

(Utiliser les grandeurs thermodynamiques fournies dans le tableau en annexe)

II.2.b Le laser utilisé est un YAG-Nd³⁺ pulsé avec $t_p = 50$ ms. Calculer les durées correspondant à chacune des étapes du processus.

II.2.c Représenter schématiquement l'évolution de la température du métal en fonction du temps.

II.2.d La durée de l'impulsion laser t_p étant imposée, en déduire la densité de puissance incidente minimale $(J_L)_{\min}$ nécessaire à la réalisation de cette transformation. On notera R la réflectivité de l'aluminium pour le rayonnement étudié.

II.2.e La réflectivité étant $R = 0,72$ et l'épaisseur de la couche métallique $e = 0,5$ mm, déterminer numériquement $(J_L)_{\min}$. En déduire la puissance moyenne minimale du faisceau sachant que le diamètre du trou est $\Phi = 0,8$ mm.

II.2.f Les lasers utilisés ont en réalité une puissance moyenne imposée. La valeur $(J_L)_{\min}$ et le diamètre du faisceau peuvent être ajustés à l'aide d'un montage optique convenable. Proposer un montage utilisant deux ou trois lentilles (convergentes ou divergentes) qui permette d'agrandir (ou de réduire) la section du faisceau lumineux.

*Intéressons-nous maintenant à la **découpe** d'une feuille d'aluminium d'épaisseur constante $e = 1$ mm. A cet effet, un laser YAG-Nd³⁺ restant fixe irradie une feuille métallique déplacée selon un mouvement de translation uniforme de vitesse V , perpendiculairement à la direction du faisceau. Le laser employé fonctionne en mode continu (c'est à dire non pulsé) avec une puissance moyenne constante $P_L = 700$ W et un diamètre $\Phi = 0,5$ mm. La réflectivité de l'aluminium est $R = 0,72$.*

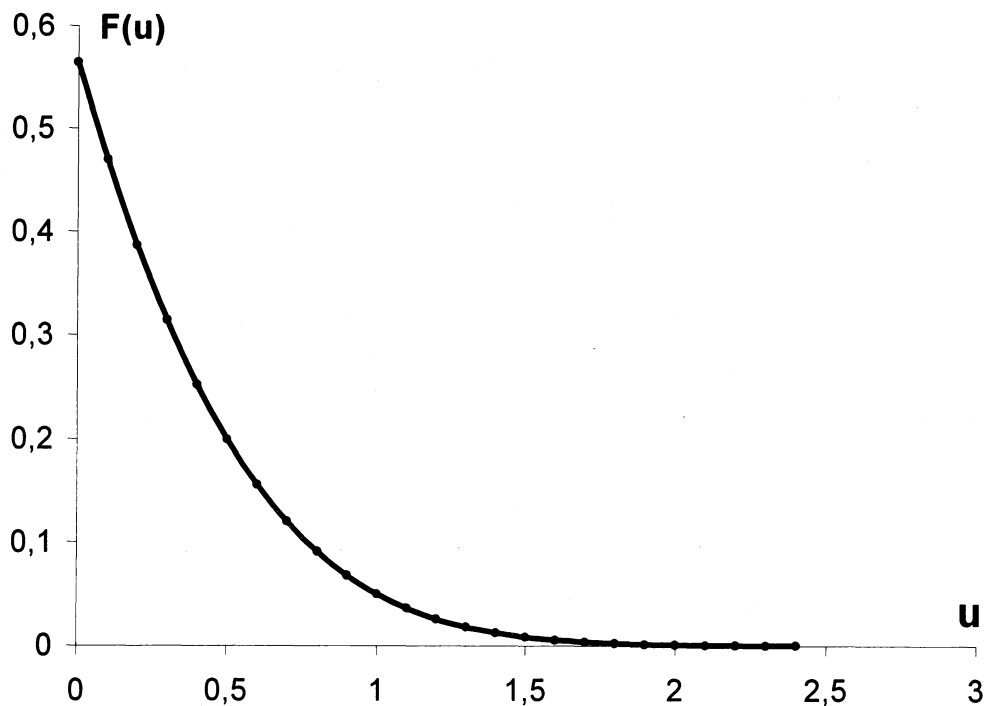
II.3.a Déterminer la vitesse maximale V_M de découpe de la feuille.

Application numérique : calculer V_M .

En réalité, la vitesse de découpe est bien inférieure à la valeur V_M précédemment calculée.

II.3.b Analyser les causes d'erreurs possibles. Quelles sont, dans les hypothèses de départ, celles qui vous paraissent les plus simplificatrices ?

Graphe de la fonction $F(u) = \frac{\exp(-u^2)}{\sqrt{\pi}} \cdot u f(u)$



Données relatives au perçage par un faisceau laser

Grandeurs thermodynamiques relatives à l'aluminium		
T_F	Température de fusion (K)	933
T_V	Température de vaporisation (K)	2 740
L_F	Chaleur latente massique de fusion ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	397
L_V	Chaleur latente massique de vaporisation ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	10 500
ρ_S	Masse volumique du solide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 700
$c_{p(S)}$	Capacité thermique massique à pression constante du solide ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)	900
$c_{p(L)}$	Capacité thermique massique à pression constante du liquide ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1 090

Les températures de changement d'état ainsi que les chaleurs latentes sont données pour la pression $P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$.

Les variations de ρ et c_p avec la température seront négligées.