Nettoyage laser des statues

Le nettoyage et la conservation des monuments historiques sont des tâches complexes qui nécessitent des méthodes à la fois efficaces et respectueuses des matériaux originaux. Le nettoyage laser est une méthode sans contact qui utilise des impulsions lumineuses de hautes puissances, focalisées pour éliminer les salissures, les dépôts ou les couches indésirables sur les surfaces. Le laser vaporise les contaminants sans affecter le substrat sous-jacent. Pour cela, les paramètres du laser, tels que la longueur d'onde, la durée des impulsions, l'énergie et la fréquence des impulsions, sont cruciaux pour assurer un nettoyage efficace tout en minimisant les risques pour la surface traitée.

Question simple

A partir d'un bilan d'énergie, exprimer et calculer la masse ainsi que l'épaisseur de dépôt de carbone que peut sublimer une unique impulsion laser d'une puissance égale à 10 MW.

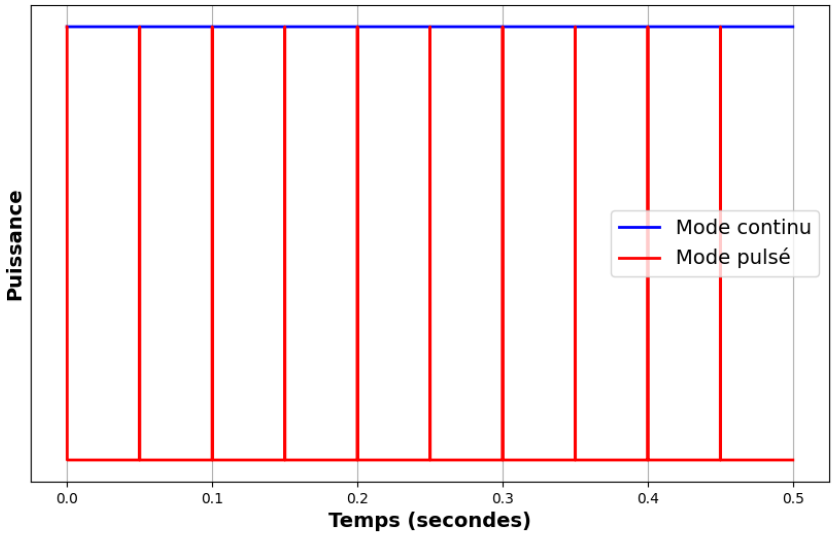
Question ouverte

1) Proposer un modèle pour estimer la durée caractéristique nécessaire pour que le carbone graphite sublimé après un pulse subisse une solidification sachant que le carbone graphite sublimé est éjecté du matériau à une température de 5000°C.

2) On ajuste la puissance de crête du laser de façon à traiter une surface d'épaisseur de 5,0 μm de dépôt de carbone. Proposer et critiquer un modèle pour estimer le temps nécessaire d'utilisation du laser pour restaurer une surface d'un mètre carré.

Document 1 : Description du laser

Le laser utilisé peut fonctionner sous deux modes : un mode dit continu, et un mode dit pulsé :



Les conditions opératoires sélectionnées pour le nettoyage de la statue au laser utilisé en mode pulsé sont les suivantes :

Diamètre du faisceau (mm)	Fréquence des impulsions (Hz)	Durée des impulsions t_P (ns)	Puissance (MW)
6,5	20	10	variable

Document 2 : Données thermodynamiques pour le carbone solide

Température de sublimation : $\theta_{sub} = 3825\ °C$

Enthalpie standard massique de sublimation : $\ell_{sub} = 59{,}6\ kJ \cdot kg^{-1}$

Capacité thermique massique (carbone amorphe solide ou carbone gazeux) : $c = 710\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Masse volumique : $\mu = 2{,}0\ g \cdot cm^{-3}$

Conductivité thermique : $\lambda = 0{,}5\ \ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Coefficient d'échange conducto-convectif :

air (immobile) – carbone : $h = 20\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

air (en mouvement) – carbone : $h = 200\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Nettoyage laser des statues - Correction

Question simple

Système : couche de carbone qui va se sublimer

Transformation monobare : $\Delta H = Q$

H : fonction d'état extensive

$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$ avec $\Delta H_1 = m \times c \times (\theta_{sub} - \theta_{amb})$ et $\Delta H_1 = m \times \ell_{sub}$

$Q = Q_{laser} = P_{laser} \times t_P$

Bilan : $m \times c \times (\theta_{sub} - \theta_{amb}) + m \times \ell_{sub} = P_{laser} \times t_P \Longrightarrow m = \frac{P_{laser} \times t_P}{c \times (\theta_{sub} - \theta_{amb}) + \ell_{sub}}$

AN : $m = \frac{10 \times 10^6 \times 10 \times 10^{-9}}{710 \times (3825 - 20) + 59{,}6 \times 10^3} = 3{,}6 \times 10^{-8}\ kg = 36\ \mu g$

Epaisseur correspondante : $m = S_P \times e \times \mu$ avec S_P = Surface d'un spot : $S_P = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 3{,}3 \times 10^{-5}$ m^2

On en déduit : $e = \frac{m}{S_P \times \mu}$ AN : $e = \frac{3{,}6 \times 10^{-8}}{3{,}3 \times 10^{-5} \times 2000} = 5{,}4 \times 10^{-7}\ m = 0{,}54\ \mu m$

Question ouverte

1) Système : couche de carbone qui vient de se sublimer

Transformation monobare : $dH = \delta Q = -hS_P \times (T - T_{amb})dt$ (perte thermique par convection, loi de Newton)

avec $dH = m \times c \times dT$

$\Longrightarrow m \times c \times dT = -hS_P \times (T - T_{amb})dt \Longrightarrow \frac{dT}{dt} + \frac{hS_P}{mc}T = \frac{hS_P}{mc}T_{amb} \Longrightarrow T(t) = A \times e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{amb}$

Avec $\tau = \frac{mc}{hS_P}$

A t=0, $T(t=0) = T_1 = 5000 + 273 = A + T_{amb}$

$\Longrightarrow A = T_1 - T_{amb} \Longrightarrow T(t) = (T_1 - T_{amb}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{amb}$

En notant $T(t = t_{sol}) = T_{sub} \Longrightarrow T_{sol} = (T_1 - T_{amb}) \times e^{-\frac{t_{sol}}{\tau}} + T_{amb} \Longrightarrow t_{sol} = -\tau \times ln\left(\frac{T_{sol} - T_{amb}}{T_1 - T_{amb}}\right)$

AN : $\tau = \frac{3{,}6 \times 10^{-8} \times 710}{200 \times 3{,}3 \times 10^{-5}} = 3{,}9 \times 10^{-3}\ s$ (air en mouvement autour de la particule « éjectée »)

$t_{sol} = 1{,}0 \times 10^{-3}\ s = 1{,}0\ ms$ soit très rapidement bien avant le pulse suivant (période = 1/20 = 0,05 s = 50 ms)

2) Calcul de l'énergie fournie par le laser et de la masse sublimée pour un pulse

En reprenant le calcul de la question simple : $m' \times (c \times (\theta_{sub} - \theta_{amb}) + \ell_{sub}) = P'_{laser} \times t_P = E'_{laser}$

Or $m \times (c \times (\theta_{sub} - \theta_{amb}) + \ell_{sub}) = E_{laser}$ d'après la question simple

$\Longrightarrow \frac{E'_{laser}}{E_{laser}} = \frac{m'}{m} = \frac{e'}{e} \Longrightarrow E'_{laser} = \frac{e'}{e} \times E_{laser} = \frac{e'}{e} \times P_{laser} \times t_P$

AN : $E'_{laser} = \frac{5{,}0}{0{,}54} \times 10 \times 10^6 \times 10 \times 10^{-9} = 0{,}926\ J$ pour un pulse

$m' = \frac{e'}{e} \times m = 3{,}6 \times 10^{-7}\ kg$ pour un pulse

Calcul de la masse totale

$m_{tot} = S_{tot} \times e' \times \mu \Longrightarrow m_{tot} = 1 \times 5 \times 10^{-6} \times 2000 = 1{,}0 \times 10^{-2}\ kg$

Calcul du nombre d'impulsions laser nécessaire

$N = \frac{m_{tot}}{m'} = 30000$ impulsions

Calcul du temps nécessaire pour sublimer une surface d'1,0 $\boldsymbol{m^2}$ **de carbone**

En négligeant t_P devant la période T : $\Delta t = N \times T = \frac{N}{f} \Longrightarrow \Delta t = 1{,}5 \times 10^3\ s = 25\ mn$

<u>**Critiques :**</u>

<u>Hypothèses simplificatrices de ce modèle</u> : pertes de chaleur ?

Perte par conduction thermique ?

Epaisseur caractéristique de la couche de carbone chauffée par un pulse :

$\boldsymbol{D = \frac{\lambda}{\mu c} = \frac{L^2}{\tau} \Longrightarrow L^2 = \frac{\lambda\tau}{\mu c}}$ AN : $\boldsymbol{L} = \sqrt{\frac{0{,}5\times10\times10^{-9}}{2000\times710}} = 5{,}9 \times 10^{-8}\ \boldsymbol{m} = 0{,}059\ \boldsymbol{\mu m}$

donc conduction thermique très localisée, on peut négliger la déperdition d'énergie thermique par conduction thermique dans le matériau

Perte par convection ?

D'après la loi de Newton : $\boldsymbol{\Phi_{conv} = hS_P \times (\theta_{sub} - \theta_{amb}) \Longrightarrow \mathrm{E}_{conv} = hS_P \times (\theta_{sub} - \theta_{amb}) \times t_P}$

AN : $\mathrm{E}_{conv} = 50 \times 3{,}3 \times 10^{-5} \times (3825 - 20) \times 10 \times 10^{-9} = 6{,}3 \times 10^{-8}\ J$

Or $E'_{laser} = 0{,}926\ J \Longrightarrow \boldsymbol{\mathrm{E}_{conv} \ll E'_{laser}}$: on peut négliger la déperdition d'énergie thermique par convection

Finalement, la principale hypothèse simplificatrice dans notre modèle est la non-tenue compte du **recouvrement des spots laser** : le temps réel est plus long