Micro-texturation de surface par un laser femtoseconde

Bac S 2015 Métropole (ancien programme) · Exercice 3 **5 points** **Durée conseillée 50 min**

1.1 Le laser femtoseconde présenté est dit « infrarouge ». Justifier.

Données utiles $\nu_0 = 375\ \text{THz} = 375 \times 10^{12}\ \text{Hz}$; $c = 3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; rouge : de 620 nm à 780 nm

Longueur d'onde dans le vide associée à la fréquence centrale : $\lambda_0 = \dfrac{c}{\nu_0}$

$$\lambda_0 = \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{375 \times 10^{12}} = 8{,}00 \times 10^{-7}\ \text{m} = 800\ \text{nm}$$

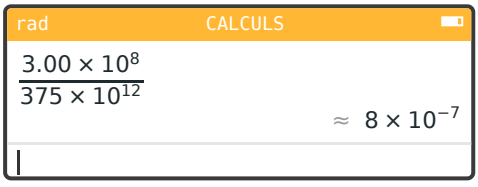
Cette longueur d'onde dépasse 780 nm, limite supérieure du rouge, donc du visible.

$\lambda_0 = 800\ \text{nm} > 780\ \text{nm}$: le rayonnement central appartient au domaine **infrarouge**.

PIÈGE
Oublier de convertir les térahertz en hertz ($1\ \text{THz} = 10^{12}\ \text{Hz}$), ou conclure sans comparer la valeur trouvée à la borne de 780 nm.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs, comme ν_0 et c. Le fonctionnement du laser (émission stimulée) n'est plus au programme actuel de spécialité ; les relations utilisées ici le sont toujours.

À LA CALCULATRICE



1.2 Ce laser apparaît rouge à l'observateur. Justifier.

Données utiles $\nu_0 = 375\ \text{THz}$; $\Delta\nu = 100\ \text{THz}$; rouge : de 620 nm à 780 nm

Le laser pulsé est polychromatique : il émet dans une bande de largeur $\Delta\nu$ centrée sur ν_0, donc de $\nu_0 - \dfrac{\Delta\nu}{2} = 325\ \text{THz}$ à $\nu_0 + \dfrac{\Delta\nu}{2} = 425\ \text{THz}$.

À la fréquence la plus élevée correspond la longueur d'onde la plus courte :

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{c}{\nu_{\text{max}}} = \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{425 \times 10^{12}} = 7{,}06 \times 10^{-7}\ \text{m} = 706\ \text{nm}$$

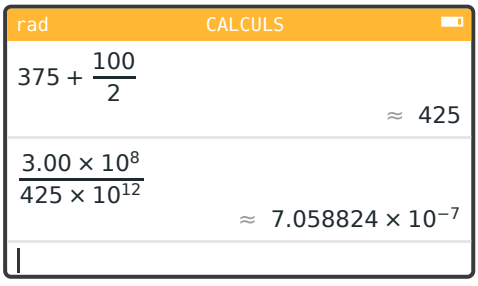
Le laser émet donc aussi des radiations de longueur d'onde comprise entre 706 nm et 780 nm, qui sont visibles et rouges.

$620\ \text{nm} < \lambda_{\text{min}} = 706\ \text{nm} < 780\ \text{nm}$: une partie du rayonnement est dans le rouge, le faisceau apparaît **rouge**.

PIÈGE
Ajouter $\Delta\nu$ entier à ν_0 : la bande est centrée, elle s'étend de $\Delta\nu/2$ de part et d'autre.

COMPRENDRE
Fréquence et longueur d'onde varient en sens inverse. L'autre extrémité de la bande (325 THz, soit 923 nm) est encore plus loin dans l'infrarouge : l'œil ne la perçoit pas.

À LA CALCULATRICE



2.1 Montrer que l'énergie transportée par une seule impulsion du laser est égale à 0,15 mJ.

Données utiles $P_{\text{crête}} = 1{,}0\ \text{GW} = 1{,}0 \times 10^{9}\ \text{W}$; $\tau = 150\ \text{fs} = 150 \times 10^{-15}\ \text{s}$

D'après le schéma, la puissance vaut $P_{\text{crête}}$ pendant toute la durée τ de l'impulsion. L'énergie transportée est donc :

$$E = P_{\text{crête}} \times \tau$$

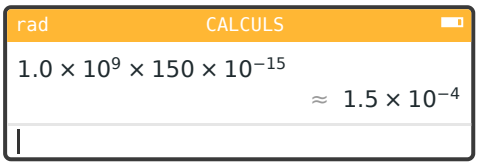
$$E = 1{,}0 \times 10^{9} \times 150 \times 10^{-15} = 1{,}5 \times 10^{-4}\ \text{J}$$

$E = 1{,}5 \times 10^{-4}\ \text{J} = 0{,}15\ \text{mJ}$: c'est bien la valeur annoncée.

PIÈGE
Utiliser la période de répétition $T = 1/f$ à la place de τ : entre deux impulsions, le laser n'émet rien.

COMPRENDRE
Une énergie modeste délivrée en un temps extrêmement court donne une puissance énorme : c'est tout l'intérêt de l'impulsion femtoseconde.

À LA CALCULATRICE



2.2 Évaluer le nombre de photons produits par le laser durant une seule impulsion.

Données utiles $E = 1{,}5 \times 10^{-4}\ \text{J}$ (2.1) ; $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$; $\nu_0 = 375 \times 10^{12}\ \text{Hz}$

Hypothèse : on attribue à tous les photons la fréquence centrale ν_0. Chaque photon transporte alors l'énergie $E_{\text{photon}} = h\,\nu_0$.

Nombre de photons dans une impulsion : $N = \dfrac{E}{h\,\nu_0}$

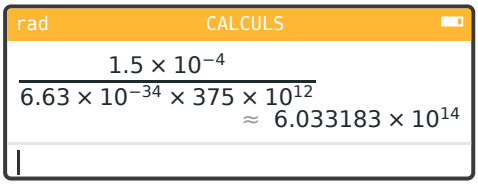
$$N = \frac{1{,}5 \times 10^{-4}}{6{,}63 \times 10^{-34} \times 375 \times 10^{12}} = 6{,}0 \times 10^{14}$$

$N \approx 6{,}0 \times 10^{14}$ photons par impulsion.

PIÈGE
À la calculatrice, mettre le dénominateur $h\,\nu_0$ entre parenthèses, sinon le résultat est multiplié par ν_0 au lieu d'être divisé.

COMPRENDRE
Le rayonnement est polychromatique : les photons n'ont pas tous la même énergie. Le spectre étant symétrique autour de ν_0, cette fréquence sert de valeur moyenne ; d'où le verbe « évaluer ».

À LA CALCULATRICE



3 Déterminer la fluence du laser étudié, puis la durée Δt nécessaire à la gravure d'une cavité cylindrique de 98 µm de diamètre et de 6 µm de profondeur.

Données utiles $E = 1{,}5 \times 10^{-4}$ J (2.1) ; $D = 98$ µm ; $p = 6$ µm ; $f = 1{,}0$ kHz ; courbe du taux d'ablation en fonction de la fluence

Fluence. C'est l'énergie d'une impulsion divisée par l'aire du disque gravé, exprimée en cm² : $F = \dfrac{E}{S}$ avec $S = \pi \left(\dfrac{D}{2}\right)^2$.

Rayon : $\dfrac{D}{2} = 49\ \mu\text{m} = 49 \times 10^{-6}\ \text{m} = 4{,}9 \times 10^{-3}\ \text{cm}$

$$F = \frac{1{,}5 \times 10^{-4}}{\pi \times (4{,}9 \times 10^{-3})^2} = 2{,}0\ \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Profondeur gravée par impulsion. Sur la courbe, pour $F = 2{,}0\ \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$, on lit un taux d'ablation de 100 nm par impulsion.

Nombre d'impulsions. La profondeur est proportionnelle au nombre d'impulsions reçues, et $p = 6\ \mu\text{m} = 6\,000$ nm :

$$n = \frac{6\,000}{100} = 60 \text{ impulsions}$$

Durée. Le laser émet $f = 1{,}0 \times 10^3$ impulsions par seconde, soit une impulsion toutes les $T = \dfrac{1}{f} = 1{,}0 \times 10^{-3}$ s :

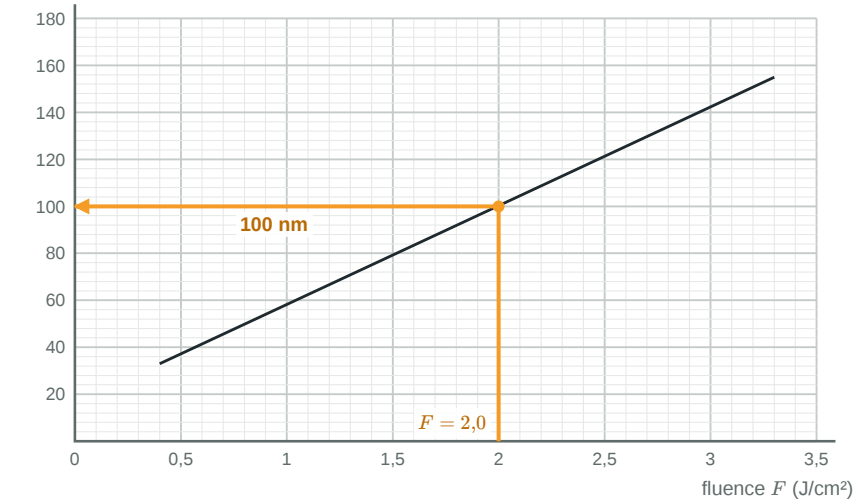
$$\Delta t = n \times T = \frac{n}{f} = \frac{60}{1{,}0 \times 10^3} = 6{,}0 \times 10^{-2}\ \text{s}$$

$F = 2{,}0\ \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ et $\Delta t \approx 6{,}0 \times 10^{-2}\ \text{s} = 60\ \text{ms}$

PIÈGE
La fluence est en J/cm² : convertir le rayon en centimètres ($1\ \mu\text{m} = 10^{-4}\ \text{cm}$) et ne pas confondre diamètre et rayon, sinon F est divisée par 4.

COMPRENDRE
La durée des impulsions (150 fs) est négligeable devant T : seul le temps d'attente entre impulsions compte. En toute rigueur, 60 impulsions occupent 59 périodes, soit 59 ms.

MÉTHODE
Résolution de problème : annoncer chaque étape (fluence, lecture graphique, nombre d'impulsions, durée), puis conclure par une phrase. La démarche est notée même si elle n'aboutit pas.



3 · Taux d'ablation du DLC en fonction de la fluence, avec la lecture pour le laser étudié

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\dfrac{1.5 \times 10^{-4}}{\pi \times (4.9 \times 10^{-3})^2} \approx 1.988608$

$\dfrac{6000}{100} \approx 60$

$\dfrac{60}{1.0 \times 10^3} \approx 0.06$