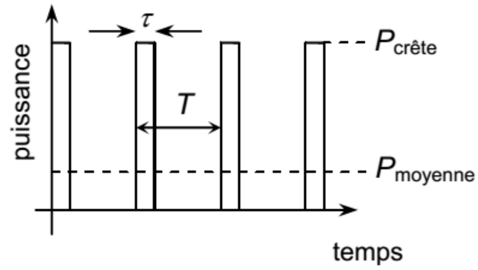
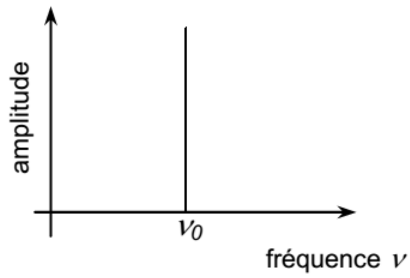
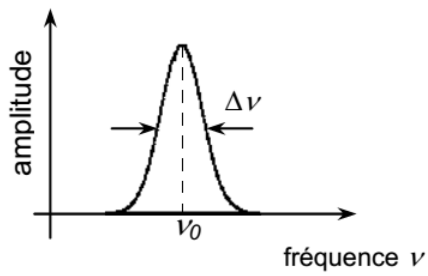
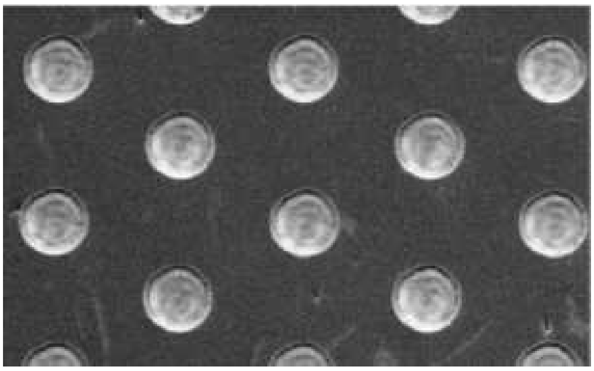
MICRO-TEXTURATION DE SURFACE PAR UN LASER FEMTOSECONDE

	Laser continu	Laser pulsé de période de répétition T
Évolution de la puissance au cours du temps		
Spectre en fréquence		

La micro-texturation de surface est une technologie qui permet d'optimiser la lubrification des pièces métalliques en contact, par exemple dans les moteurs employés dans les sports mécaniques (formule 1, moto grand prix, etc.). Cette micro-texturation est réalisée sur des matériaux appelés DLC (Diamond Like Carbon) déposés en fines couches sur les pièces à lubrifier. Grâce à l'utilisation d'un laser à impulsions ultra-brèves, on crée à la surface des pièces mécaniques un réseau de motifs (cavités, rainures, etc.) ayant des dimensions de quelques dizaines de micromètres qui se comportent comme des micro-réservoirs d'huile (après lubrification).

D'après MAG'MAT | N° 31 | Juillet - Décembre 2009



Les lasers pulsés

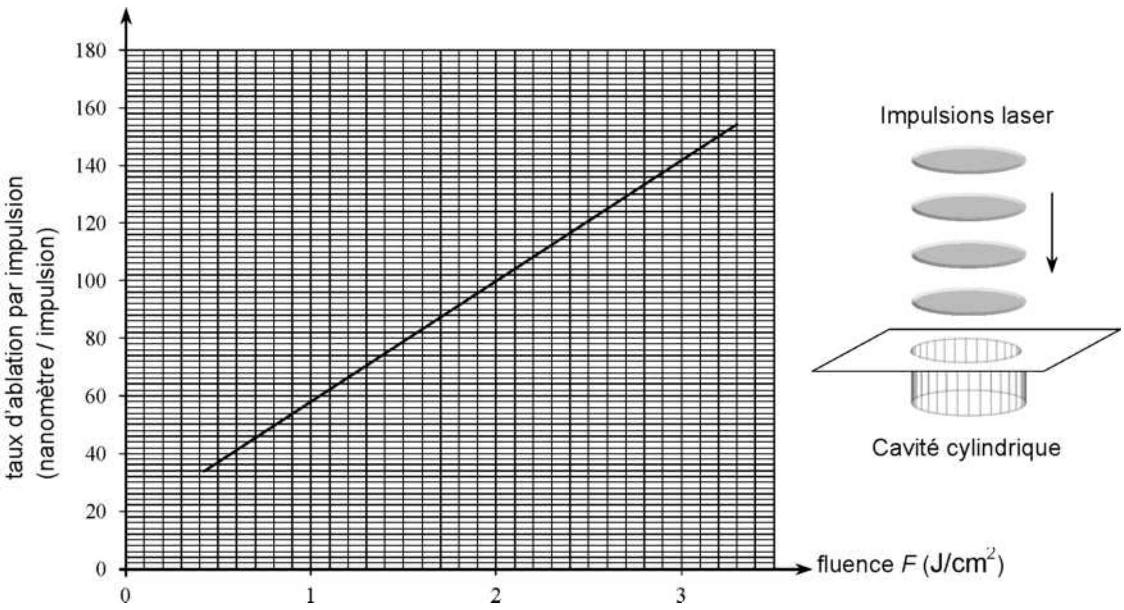
À la différence d'un laser conventionnel qui produit un rayonnement continu, les lasers pulsés émettent des flashs lumineux très brefs qu'on appelle des impulsions. La durée t et la cadence (fréquence) f de ces impulsions sont réglables. Un laser pulsé est dit « femtoseconde » si la durée t est de l'ordre d'une à quelques centaines de femtosecondes. Contrairement aux lasers continus qui produisent un rayonnement monochromatique, les lasers pulsés émettent un rayonnement polychromatique dans une bande de fréquence de largeur $\Delta\nu$ centrée sur une fréquence ν_0 (voir schéma). Les énergies des impulsions femtosecondes peuvent paraître faibles (de l'ordre du mJ à f = 1 kHz) mais leur brièveté fait que la puissance instantanée du laser durant une impulsion (puissance de crête) peut atteindre plusieurs gigawatts dans le domaine industriel.

Caractéristiques techniques d'un « laser femtoseconde » infrarouge

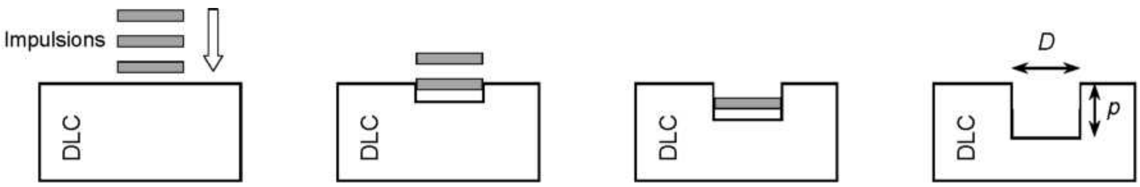
Fréquence centrale du rayonnement émis	ν_0 = 375 THz
Largeur de la bande de fréquence d'émission	$\Delta\nu$ = 100 THz
Cadence (fréquence) des impulsions	f = 1,0 kHz
Durée d'une impulsion	τ = 150 fs
Puissance de crête atteinte durant une impulsion	$P_{crête}$ = 1,0 GW
Diamètre de la section circulaire du faisceau	D = 98 µm

Cavité de diamètre D et de profondeur p dans une couche de DLC

Lorsqu'on dirige un faisceau laser pulsé femtoseconde vers une surface recouverte de DLC, chaque impulsion laser apporte suffisamment d'énergie pour graver (creuser) une cavité cylindrique dans la couche de DLC.
On admet que le diamètre de la cavité gravée correspond au diamètre D du faisceau laser utilisé.
On a tracé ci-dessous la courbe donnant le taux d'ablation du DLC par impulsion, c'est-à-dire la profondeur de la cavité gravée par une seule impulsion laser, en fonction de la fluence F du laser utilisé. La fluence est obtenue en divisant l'énergie d'une impulsion laser (en J) par la surface circulaire gravée (en cm).



On admettra, comme le montre les schémas ci-dessous, que la profondeur totale *p* de la cavité gravée est proportionnelle au nombre d'impulsions reçues et donc à la durée Δt de la gravure.



Données

Gamme de longueurs d'onde correspondant aux radiations visibles « rouges » : [620 nm - 780 nm] ;
Préfixes utilisés dans le système international d'unités :
1 tera (T) = 10^{12} 1 femto (f) = 10^{-15}
Constante de Planck : h = $6{,}63\times10^{-34}$ J.s.
Vitesse de la lumière : $3{,}00\times10^{8}$ m.s^{-1}

Relation entre puissance et énergie : $Energie = Puissance \times Temps$

Questions

I- Domaine d'émission du laser femtoseconde
1) Le laser femto seconde présenté est dit « infrarouge ». Justifier.
La fréquence centrale de ce laser est f = 375 THz = $3{,}75\times10^{14}$ Hz
La relation entre fréquence et longueur d'onde est donnée par

$$\lambda = \frac{c(m.s^{-1})}{f(Hz)} = \frac{3{,}00\times10^{8}\,m.s^{-1}}{3{,}75\times10^{14}\,Hz} = 0{,}8\times10^{-6}\,m = 800\,nm$$

Le domaine visible étant compris entre 380 et 780nm, le laser se situe légèrement en-dehors de cette plage et sa longueur d'onde centrale est donc bien infrarouge.
2) Ce laser apparaît rouge à l'observateur. Justifier.
Le laser femtoseconde n'est pas monochromatique, sa fréquence s'étale autour de 375THz, mais elle peut aller jusqu'à 425THz (375+50 THz). Si on refait le calcul précédent avec cette fréquence, on trouve

$$\lambda = \frac{c(m.s^{-1})}{f(Hz)} = \frac{3{,}00 \times 10^{8}\,m.s^{-1}}{4{,}25 \times 10^{14}\,Hz} = 0{,}705 \times 10^{-6}\,m = 705\,nm$$ qui correspond à une radiation rouge

II- Caractéristiques d'une impulsion du laser femtoseconde

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

On utilise la relation donnée dans l'énoncé :

$$Energie(J) = Puissance(W) \times Temps(s) = 1\,GW \times 150\,fs = 10^{9}\,W \times 1{,}5 \times 10^{-13}\,s = 1{,}5 \times 10^{-4}\,J = 0{,}15\,mJ$$

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

Cette question n'est pas facile !

Dans la question précédente, on nous fait calculer l'énergie libérée par le laser, la logique suggère donc que c'est cette énergie qui va nous permettre de trouver le nombre de photons.

Il faut donc utiliser une formule donnant l'énergie d'un photon, puis appliquer la proportionnalité pour trouver le nombre de photons émis.

La formule qui donne l'énergie d'un photon en fonction de sa fréquence est $E = h \times \nu$

L'énoncer nous demande d'<u>**évaluer**</u> et non de **calculer** le nombre de photons : une valeur approximative est demandée et non une valeur exacte.

Nous allons donc considérer que tous les photons ont une fréquence de 375 THz, même si en pratique c'est faux puisque les photons sont émis avec une fréquence de 375±50 THz.

L'énergie véhiculée par un photon ayant une fréquence de 375 THz est donc :

$$E = h \times \nu = 6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}75 \times 10^{14} = 24{,}86 \times 10^{-20} = 2{,}486 \times 10^{-19}\,J$$

Il ne reste plus qu'à appliquer une relation de proportionnalité, si N est le nombre total de photons émis, on a la relation de proportionnalité suivante :

$$Nombre\,de\,photons\,N = \frac{Energie\,d'une\,impulsion}{Energie\,d'un\,photon} = \frac{1{,}5 \times 10^{-4}}{2{,}486 \times 10^{-19}} = 0{,}603 \times 10^{15} = 6{,}03 \times 10^{14}\,photons$$

Le laser émet donc environ $6{,}03 \times 10^{14}$ photons à chaque impulsion.

III- Gravure par le laser femtoseconde

On utilise le laser femtoseconde pour graver une cavité dans une couche de DLC.

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

C'est une question de recherche qui a posé beaucoup de problèmes aux bacheliers de la session 2015

Il faut utiliser le graphique évoquant la « fluence » du laser. Vous ne savez pas ce que c'est, rassurez-vous, les bacheliers ne le savaient pas non et d'ailleurs j'ai découvert ce mot en corrigeant l'exercice ! Cela ne vous empêchera pas de trouver la réponse…

<u>**a. Calcul de la fluence**</u>

La fluence est d'après l'explication fournie la puissance qu'applique le laser sur une surface donnée : il faut donc calculer la surface en question.

L'énoncé nous parle d'une cavité de 98µm de diamètre, on va donc calculer sa surface

$$S = \frac{\pi \times D^{2}}{4} = \frac{\pi \times (98 \times 10^{-6})^{2}}{4} = 7{,}54 \times 10^{-9}\,m^{2}$$

Le graphique utilise les cm² comme unité donc on convertit $7{,}54 \times 10^{-9}$ m² = $7{,}54 \times 10^{-5}$ cm²

On calcule maintenant la fluence : $F = \frac{1{,}5 \times 10^{-4}}{7{,}54 \times 10^{-5}} \simeq 2\,J.cm^{-2}$

<u>**b. Calcul du nombre d'impulsions**</u>

Une lecture graphique nous donne un taux d'ablation de 100nm par impulsion.

Comme il nous faut percer une profondeur de 6µm, il nous faut

$$Nombre\,d'impulsions = \frac{profondeur\,totale}{profondeur\,d'une\,impulsion} = \frac{6 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-9}} = 60\,impulsions$$

<u>**c. Calcul de la durée de gravure d'une cavité**</u>

$$Durée\,\Delta t = nombre\,d'impulsions \times durée\,entre\,2\,impulsions = 60 \times \frac{1}{fréquence} = \frac{60}{1000} = 6 \times 10^{-2}\,s$$