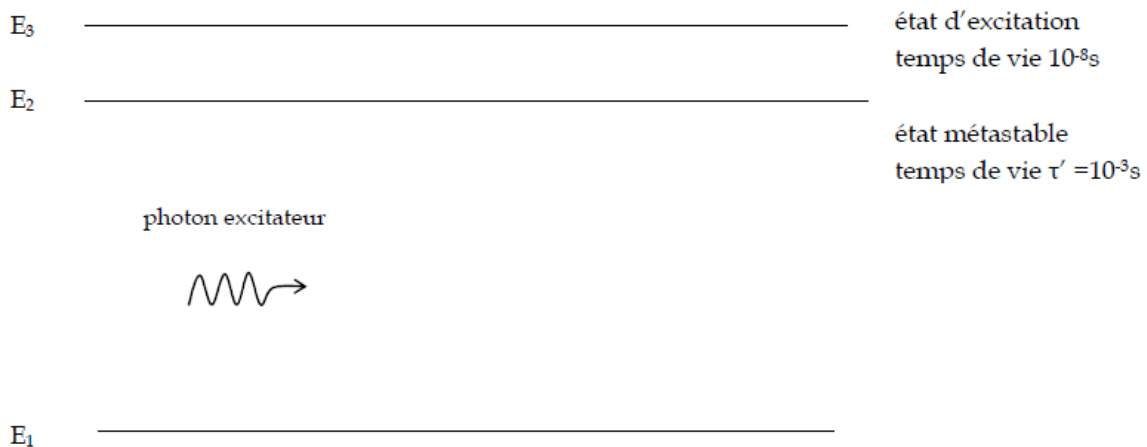


**L'usage d'une calculatrice N'EST PAS autorisé****Exercice 1****Données :**

vitesse de la lumière dans le vide (ou l'air)  $c=3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

constante de Planck:  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ .

1. Le schéma suivant donne le principe du fonctionnement du laser a rubis : le rubis est un cristal d'alumine dans lequel sont inclus des ions chrome.



1.1. Préciser la signification du mot LASER.

1.2. Préciser le rôle des ions chrome.

1.3. Refaire le schéma et représenter les transitions correspondant :

- a. au pompage optique (inversion de population)
- b. à l'émission laser.

1.4. On donne  $E_3 - E_1 = 2,26 \text{ eV}$  .

- a. Un photon d'énergie  $E_3 - E_1$  peut-il induire un rayonnement laser ? Justifier.
- b. Quelle serait la longueur d'onde du rayonnement émis par ce LASER ?

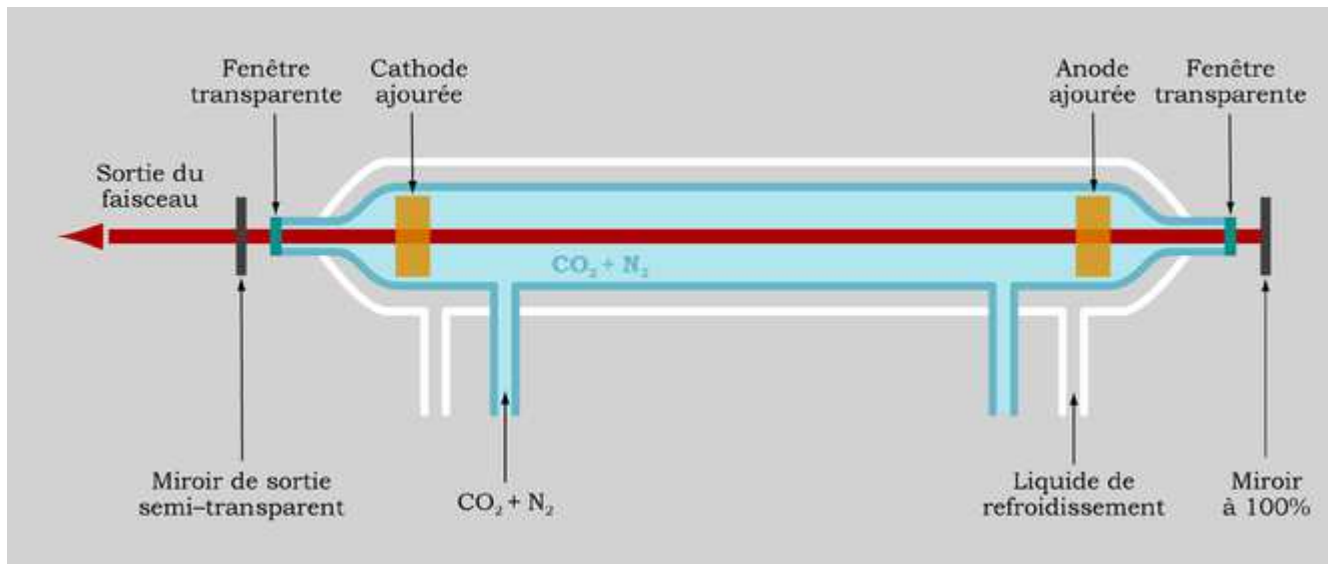
1.5. Expliquer en quelques lignes la signification des termes suivants :

- émission spontanée
- émission stimulée
- inversion de population

2. Un laser a CO<sub>2</sub> émet un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  . Il émet des impulsions de durée  $t = 0,8 \text{ ms}$  . La fréquence des impulsions est  $f = 250 \text{ Hz}$  . La puissance du laser lorsqu'il émet est  $P = 350 \text{ W}$  . A la sortie, le faisceau est concentré sur une tâche de diamètre  $D = 0,10 \text{ mm}$  .

2.1. Calculer l'énergie libérée par impulsion.

2.2. Calculer l'énergie libérée au cours d'un fonctionnement de 8 s du laser.



## EXERCICE 2. DUALITE ONDE CORPUSCULE (9 points)

Données :

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Lorsqu'un noyau de fluor 18 ( $Z=9$ ,  $A=18$ ) subit une désintégration de type  $\beta^+$ , on obtient un positron. On donne l'extrait de la classification périodique des éléments : C, N, O, F, Ne, Na, Mg, .... Ce positron peut alors être utilisé pour rencontrer un électron et former un couple de 2 photons. L'énergie de ces photons est  $E = 255 \text{ keV}$  (pour chaque photon).

- 1) Calculer la longueur d'onde de ces photons.
- 2) Ces photons peuvent être focalisés grâce à une lentille gamma et on peut observer le phénomène de diffraction. Faire un schéma représentant ce phénomène. Que peut-on en conclure sur la nature des photons ?
- 3) Les photons sont considérés comme des corpuscules ( particules ). Quelle est la masse d'un photon ?
- 4) Un ballon de 500 g se déplace avec une vitesse de  $54 \text{ km.h}^{-1}$ . Déterminer la longueur d'onde associée à ce ballon et en conclure qu'il est impossible de diffracter des corps macroscopiques.
- 5) Un électron possède une énergie de 1 GeV. Déterminer la longueur d'onde associée à cet électron. Peut-il être diffracté ? Justifier.

### 6) Effet photoélectrique

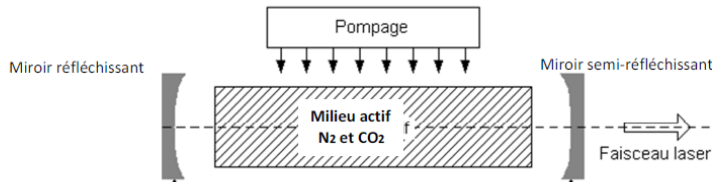
On éclaire une plaque de zinc par une radiation UV de longueur d'onde  $0,25 \mu\text{m}$ .

6.1. Déterminer l'énergie cinétique maximale de sortie des électrons et leur vitesse.

On éclaire le zinc par la lumière d'un arc électrique en interposant une plaque de verre qui absorbe les ondes de longueurs d'onde inférieure à  $0,42 \mu\text{m}$ .

6.2. Un effet photoélectrique est-il observé ? Motiver votre réponse.

A la différence des lampes classiques, les lasers émettent un faisceau lumineux directif et intense dont la lumière est monochromatique et cohérente. Cette lumière produite par amplification, utilise l'émission stimulée de rayonnement. Il est nécessaire de réaliser une opération préalable d'inversion de population des molécules de gaz (milieu actif) confinées dans la cavité laser.



Les photons émis par émission stimulée dans la cavité sont sélectionnés selon une seule direction de propagation ; ils se réfléchissent sur les miroirs et initient d'autres émissions stimulées. En moyenne 1% du nombre total de photons ayant frappé le miroir semi-réfléchissant s'en échappent.

Le laser à CO<sub>2</sub> est constitué d'une cavité contenant un mélange de dioxyde de carbone et de diazote.

Le diazote est utilisé pour réaliser l'inversion de population. Une fois excitées, les molécules de diazote cèdent leur énergie aux molécules de dioxyde de carbone en les portant dans un état vibratoire d'énergie  $E_2$ .

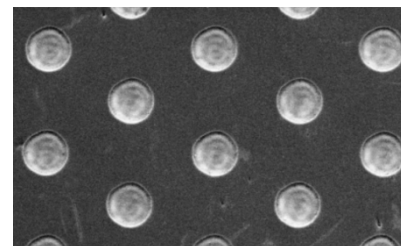
Les molécules de dioxyde de carbone peuvent alors donner lieu à l'émission stimulée.

**Données :**  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$  ;  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  ;  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

1. Quel est l'intérêt de l'inversion de population des molécules de CO<sub>2</sub> ? De quelle façon l'inversion de population est-elle réalisée dans la cavité laser ?
2. Indiquer par une flèche la transition d'énergie correspondant à l'inversion de population.
3. La transition traduisant l'*inversion de population* est-elle de nature électronique ou vibratoire ?
4. A quel type de transfert d'énergie correspond cette transition d'énergie ?
5. Indiquer par une flèche en pointilles la transition d'énergie de nature vibratoire responsable de l'effet laser.
6. Calculer, en électron-volt, la variation d'énergie associée à l'émission de la radiation laser de longueur d'onde  $\lambda = 9,6 \mu\text{m}$ .

### EXERCICE III - MICRO-TEXTURATION DE SURFACE PAR UN LASER FEMTOSECONDE (5 points)

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 microréservoirs d'huile (après lubrification).

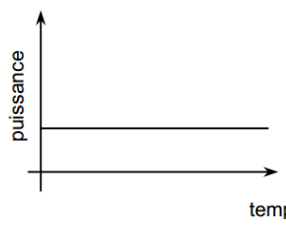
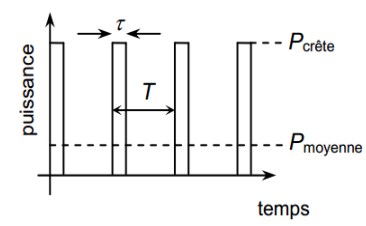
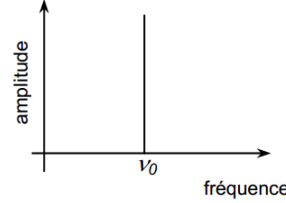
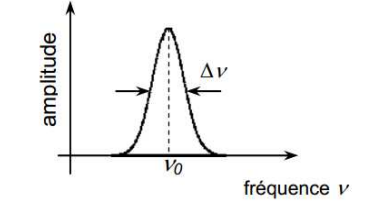


D'après MAG'MAT | N° 31 | Juillet - Décembre 2009

#### Les lasers pulsés

À la différence d'un laser conventionnel qui produit un rayonnement continu, les lasers pulsés émettent des flashes lumineux très brefs qu'on appelle des impulsions. La durée  $\tau$  et la cadence (fréquence)  $f$  de ces impulsions sont réglables. Un laser pulsé est dit « femtoseconde » si la durée  $\tau$

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  $\nu_0$  (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.

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

### Caractéristiques techniques d'un « laser femtoseconde » infrarouge

Fréquence centrale du rayonnement émis	$\nu_0 = 375$ 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	$\tau = 150$ fs
Puissance de crête atteinte durant une impulsion	$P_{crête} = 1,0$ GW
Diamètre de la section circulaire du faisceau	$D = 98$ $\mu\text{m}$

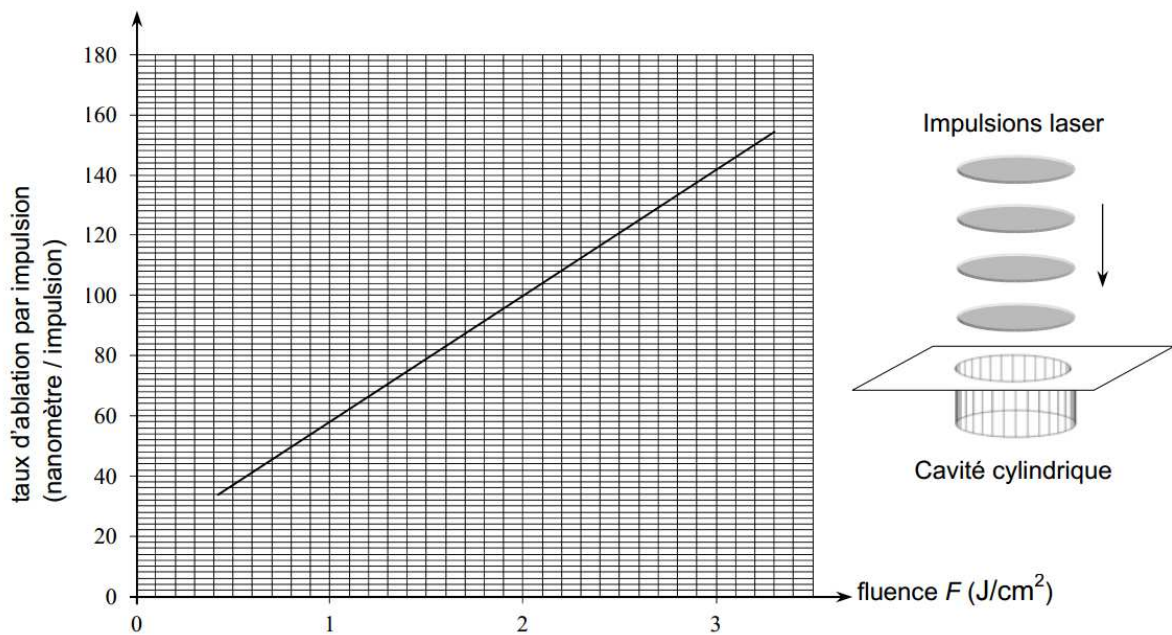
## Cavité de diamètre $D$ et de profondeur $p$ dans une couche de DLC

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.

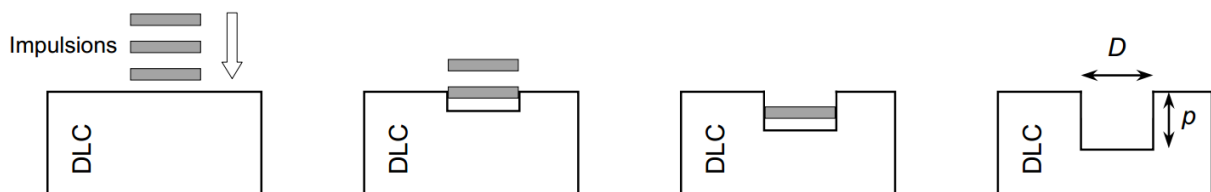
On admet que le diamètre de la cavité gravée correspond au diamètre  $D$  du faisceau laser utilisé.

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  $\text{cm}^2$ ).



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  $\Delta t$  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 :

Préfixe	tera	femto
Abréviation	T	f
Puissance de 10	$10^{12}$	$10^{-15}$

- la valeur de la célérité de la lumière dans le vide (ou dans l'air) doit être connue par le candidat ;
- constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s.

**1. Domaine d'émission du laser femtoseconde**

1.1. Le laser femto seconde présenté est dit « infrarouge ». Justifier.

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

**2. Caractéristiques d'une impulsion du laser femtoseconde**

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

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

**3. Gravure par le laser femtoseconde**

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

Déterminer la fluence du laser étudié, puis la durée  $\Delta t$  nécessaire à la gravure d'une cavité circulaire cylindrique de 98  $\mu\text{m}$  de diamètre et de 6  $\mu\text{m}$  de profondeur.

*Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie même si elle n'a pas abouti.*

*La démarche suivie est évaluée et nécessite donc d'être correctement présentée.*

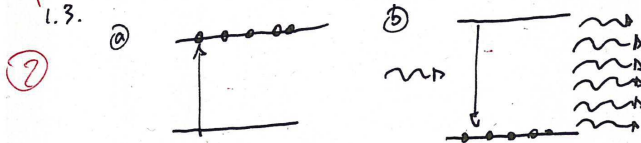
L'usage d'une calculatrice N'EST PAS autorisé

Exercices 1 ET 2

CORRECTION DS9

h: 1

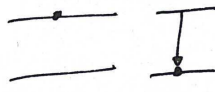
- 1.1. LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.  
 1.2. les ions chrome  
 1.3.



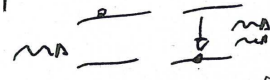
1.4. un photon d'énergie  $E_3 - E_1$  peut induire un rayonnement LASER.  
 ① En effet cette énergie correspond à une transition énergétique permise possible de rubis

②  $\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{\Delta E} \Rightarrow \lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{2,26 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 550 \text{ nm}$

1.5. Emission spontanée: un atome excité se désexcite vers un niveau d'énergie plus faible



Emission stimulée: un atome excité se désexcite sous l'effet d'une OER qui sera amplifiée



Inversion de population: tous les atomes sont sous un état excité.

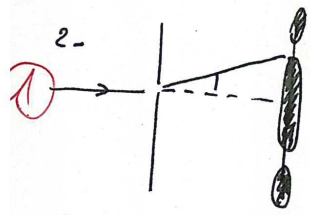
① e.1.  $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{10,6 \cdot 10^{-6}} = 1,9 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 0,084 \text{ eV}$

e.2.  $E_{\text{tot}} = P \cdot t$  t: durée totale des impulsions.  
 1 impulsion  $t_1 = 0,8 \text{ ns}$   
 $f = 250 \text{ Hz}$ : 250 impulsions à la seconde  
 et on a il y a donc  $8 \cdot 250 = 2000$  impulsions.  
 $t = 0,8 \text{ ns} \times 2000 = 1600 \text{ ns}$

$E_{\text{tot}} = 350 \times 1,6 = 560 \text{ J}$

n:?? 3 points

1 -  $E = \frac{hc}{\lambda}$       $\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{255 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-18}} = \underline{4,9 \cdot 10^{-12} \text{ m}}$



Les photons ont un comportement ondulatoire

3 -  $h\nu = mv$       $v = c$  pour les photons  
 donc  $m = \frac{h}{\lambda c} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{4,9 \cdot 10^{-12} \cdot 3,0 \cdot 10^8} = \underline{4,5 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}$

4 -  $m = 500 \text{ g}$       $\nu = 54 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$       $mv = \frac{h}{\lambda}$       $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{0,500 \cdot 15} = \underline{8,8 \cdot 10^{-35} \text{ m}}$   
 la longueur d'onde est bien trop faible par rapport aux distances macroscopiques

5 -  $\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-18}} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$      il peut être diffracté par des atomes (même ordre de grandeur)

6-1 -  $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{0,25 \cdot 10^{-6}} = \underline{7,9 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$

6.2.  $0,25 < 0,42 \mu\text{m}$  L'onde a une longueur d'onde  $\lambda = 0,25 \mu\text{m}$  et donc absorbe.  
 Il n'y a pas d'effet photoélectrique



## EXERCICE III- MICRO-TEXTURATION DE SURFACE PAR UN LASER FEMTOSECONDE (5 points)

### 1. Domaine d'émission du laser femtoseconde

1.1. On calcule la longueur d'onde centrale du laser, sachant que  $\nu_0 = 375$  THz,

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} \quad \lambda_0 = \frac{3,0 \times 10^8}{375 \times 10^{12}} = 8,0 \times 10^{-7} = \mathbf{800 \text{ nm}} > 780 \text{ nm}$$

le laser émet dans le domaine de l'infrarouge.

1.2. On calcule la longueur d'onde minimale produite par le laser :  $\nu_{\max} = \nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2}$

$$\nu_{\max} = 375 + \frac{100}{2} = 425 \text{ THz} \quad \text{On en déduit la longueur d'onde } \lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{3,0 \times 10^8}{425 \times 10^{12}} = 7,06 \times 10^{-7} \text{ m} = 7,1 \times 10^2 \text{ nm}$$

620 nm <  $\lambda_{\min}$  < 780 nm le laser émet aussi dans le rouge, il apparaît donc rouge.

### 2. Caractéristiques d'une impulsion du laser femtoseconde

2.1. Soit l'énergie délivrée par le laser lors d'une impulsion :

$$E = P_{\text{crête}} \cdot \tau$$

$$E = 1,0 \times 10^9 \times 150 \times 10^{-15} = 150 \times 10^{-6} \text{ J} = \mathbf{0,15 \text{ mJ}}$$

2.2. On suppose que tous les photons ont la même énergie égale à  $h \cdot \nu_0$  (ce qui n'est pas le cas puisque le laser n'est pas monochromatique).

Soit N le nombre de photons produit lors d'une impulsion :

$$N = \frac{E}{h \cdot \nu_0} = \frac{0,15 \times 10^{-3}}{6,63 \times 10^{-34} \times 375 \times 10^{12}} = \mathbf{6,0 \times 10^{14} \text{ photons.}}$$

3. Soit F la fluence du laser :

(« obtenue en divisant l'énergie d'une impulsion laser par la surface circulaire gravée (en cm<sup>2</sup>) »)

$$F = \frac{E}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot D^2}$$

Le diamètre vaut 98 μm, soit  $98 \times 10^{-6} \times 10^2 = 9,8 \times 10^{-3}$  cm

$$F = \frac{4 \times 0,15 \times 10^{-3}}{\pi \times (9,8 \times 10^{-3})^2} = 2,0 \text{ J/cm}^2.$$

Sur la courbe page 9 on peut lire que pour une fluence de 2,0 J/cm<sup>2</sup>, le taux d'ablation (= profondeur de la cavité gravée par une seule impulsion) est de 100 nm/impulsion.

Soit n le nombre d'impulsions nécessaire pour obtenir une profondeur de 6 μm = 6 × 10<sup>3</sup> nm :

$$n = \frac{6 \times 10^3}{100} = 60 \text{ impulsions.}$$

La période des impulsions est de  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1,0 \times 10^3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ s} = 1,0 \text{ ms.}$

$$\Delta t = n \cdot T$$

$$\Delta t = 60 \times 1,0 = \mathbf{60 \text{ ms.}}$$

Remarque : En réalité, il faut  $59T + \tau = 59 \times 1,0 \times 10^{-3} + 150 \times 10^{-15} = 59 \text{ ms.}$

