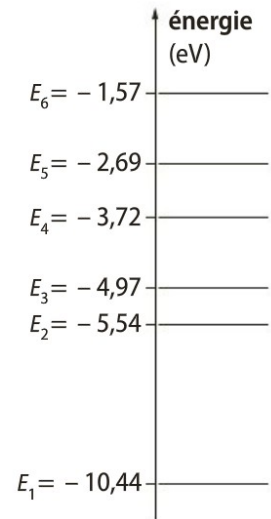
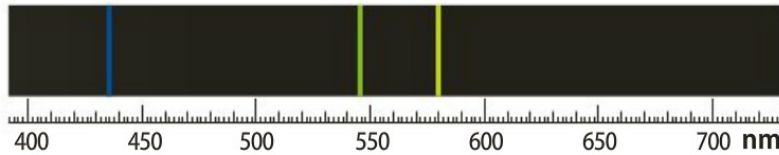




## Chapitre n°16 : Transferts quantiques d'énergie

### Exercice n°1 : Spectre d'émission du mercure (rappel 1S)

Le spectre d'émission du mercure contient trois raies intenses : jaune, verte et bleu indigo de longueurs d'ondes respectives  $\lambda_J = 579,2 \text{ nm}$  ;  $\lambda_V = 546,2 \text{ nm}$  ;  $\lambda_B = 436,0 \text{ nm}$



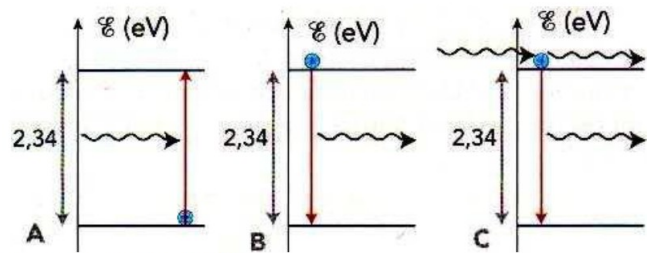
1. Calculer l'énergie, en eV, des photons de longueurs d'onde  $\lambda_J, \lambda_V, \lambda_B$ .
2. Le diagramme simplifié des niveaux d'énergie de l'atome de mercure est donné ci-contre.
  - a. Quelle raie d'émission du mercure correspond à la désexcitation des atomes de mercure des niveaux  $E_6$  à  $E_4$  ? A quelles désexcitations correspondent les deux autres ? Justifier.
  - b. Sur le diagramme simplifié, représenter par des flèches les trois désexcitations évoquées dans l'exercice.

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

### Exercice n°2 : Absorption ou émission ?

On a représenté trois transitions électroniques :

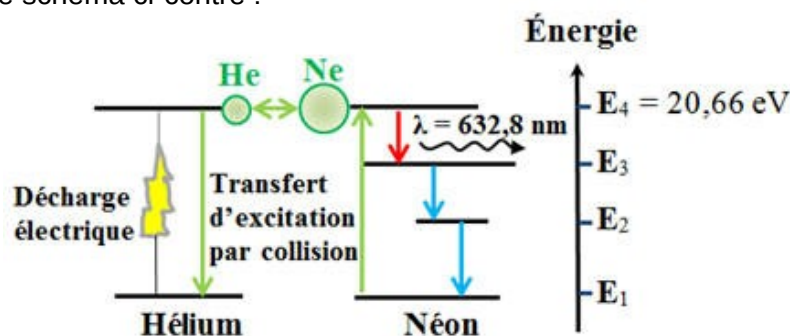
1. Quel(s) schéma(s) représente(nt) :
  - a. une absorption ?
  - b. une émission stimulée ?
  - c. une émission spontanée ?
2. Dans le cas de l'émission stimulée, calculer la longueur d'onde du photon incident.
3. Quelles sont les caractéristiques du photon émis par émission stimulée ?



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

### Exercice n°3 : Fonctionnement du laser hélium-néon

Le milieu laser d'un laser hélium-néon est un mélange d'hélium et de néon sous très faible pression. Lorsque le laser fonctionne, les atomes d'hélium sont excités par une décharge électrique. Ces atomes entrent en collision avec des atomes de néon dans leur état fondamental. Ces derniers se retrouvent dans un état excité d'énergie  $E_4$ , dit de longue vie. Des émissions spontanées entre les niveaux d'énergie  $E_4$  et  $E_3$ , amorcent des émissions stimulées entre ces deux mêmes niveaux. Les atomes de néon subissent ensuite deux désexcitations spontanées et rapides vers les niveaux d'énergie  $E_2$  puis  $E_1$ . Toutes ces étapes sont représentées sur le schéma ci-contre :



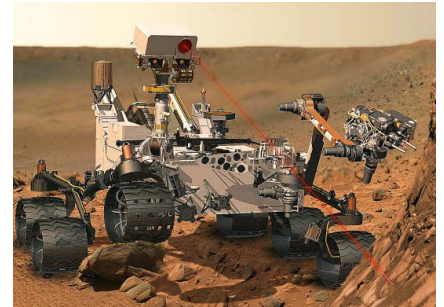
1. Comment excite-t-on :

- a. les atomes d'hélium?
- b. les atomes de néon?
2. Comment est initiée l'émission stimulée?
3. a. Au cours de quelle transition des photons de longueur d'onde 632,8 nm sont-ils émis?
- b. Quelle est l'énergie d'un photon émis?
- c. En déduire l'énergie du niveau  $E_3$ .

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

#### **Exercice n°4 : ChemCam (Calédonie 2014)**

Le 6 août 2012, Curiosity, le Rover de la mission martienne, a posé ses bagages sur Mars pour y étudier son sol. Laboratoire de haute technologie, Curiosity comprend de nombreux instruments dont un sur lequel la France a beaucoup travaillé : ChemCam. Cet appareil analyse par spectrométrie la lumière d'un plasma issue d'un tir laser sur les roches, permettant de remonter à la composition du sol.



#### **Données :**

- constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  ;
- célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

#### **1. Le laser de ChemCam**

##### **Document 1. Principe de fonctionnement de Chemcam**

ChemCam met en œuvre la technique LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) d'analyse spectroscopique induite par ablation laser. Son laser pulsé émet un rayonnement à 1067 nm délivrant environ 15 mJ pour une durée d'impulsion de 5 ns. L'interaction du faisceau laser pulsé de forte puissance avec un matériau provoque un échauffement brutal de la surface éclairée, une vaporisation et une ionisation sous forme d'un plasma. Il est important de comprendre que le plasma se formera si, au niveau de la cible, la puissance par unité de surface (ou l'irradiance) est supérieure à un seuil de  $1,0 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ . C'est pourquoi ChemCam est pourvu d'un système de focalisation du faisceau laser qui est tel qu'au niveau de la cible le diamètre du faisceau est d'environ  $D = 350 \mu\text{m}$ .

Dans ces conditions, les atomes et les ions éjectés sont alors dans des niveaux d'énergie excités. En se désexcitant, ils émettent un rayonnement qui est analysé par spectroscopie entre 250 et 900 nm. On obtient ainsi un spectre d'émission atomique. La détermination des longueurs d'onde de raies présentes sur ce spectre permet d'identifier les atomes ou ions présents dans la cible.

D'après : <http://www.msl-chemcam.com/>

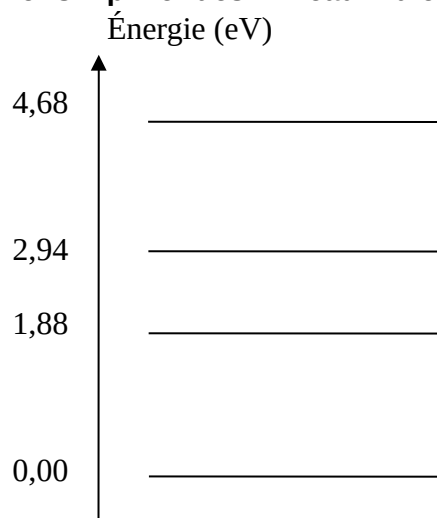
- 1.1. Donner deux propriétés du laser.
- 1.2. Le laser de ChemCam émet-il de la lumière visible ? Justifier.
- 1.3. Montrer que les caractéristiques du faisceau laser utilisé par ChemCam permettent bien d'obtenir une irradiance suffisante pour créer un plasma.

#### **2. Test de fonctionnement de l'analyseur spectral de ChemCam**

Afin de vérifier que l'analyseur spectral de ChemCam fonctionne bien, on réalise au laboratoire le spectre d'émission atomique d'une roche témoin contenant l'élément calcium.

- 2.1. Justifier pourquoi deux atomes (ou ions) différents ne donnent pas le même spectre d'émission.
- 2.2. À l'aide du document 2, identifier, pour l'ion  $\text{Ca}^+$ , la transition énergétique correspondant à la raie de longueur d'onde 423 nm. Détailler votre démarche.
- 2.3. Le document 4 présente le spectre de la roche témoin. L'analyseur spectral de ChemCam fonctionne-t-il correctement ? Justifier.

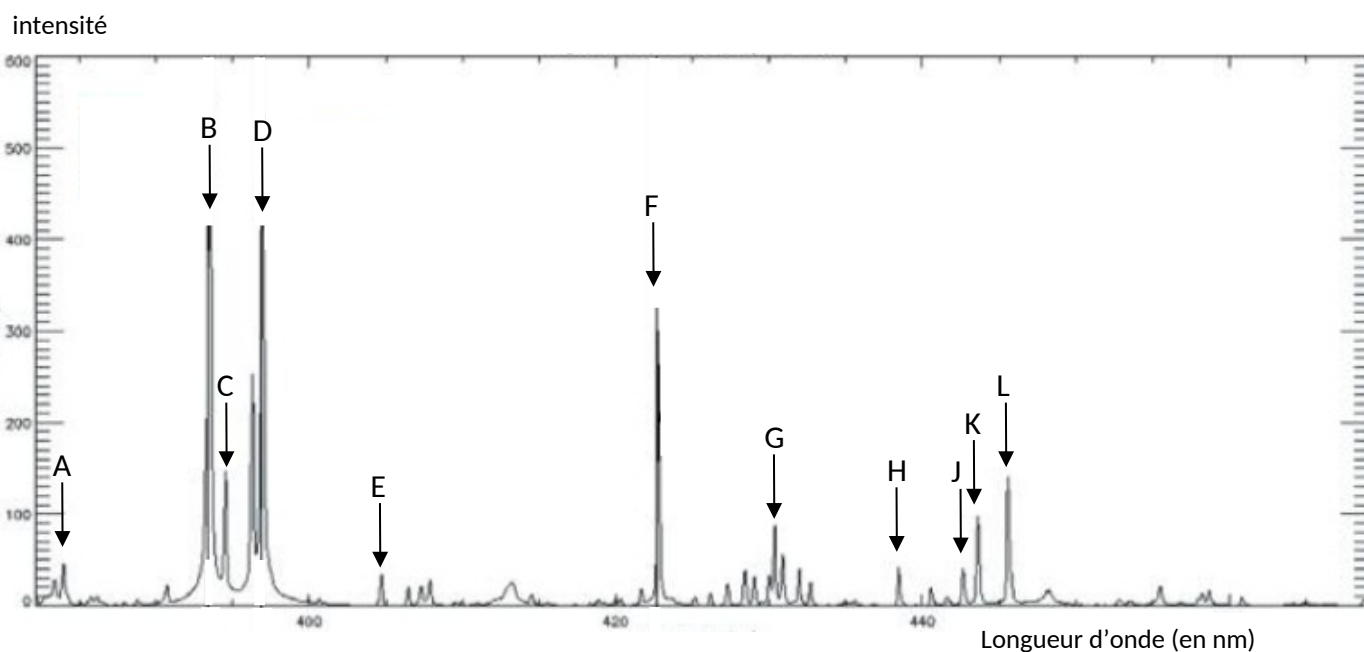
**Document 2. Diagramme simplifié des niveaux d'énergie de l'élément calcium sous forme d'ion  $\text{Ca}^+$**



**Document 3. Longueurs d'onde (en nm) des raies d'émission entre 380 nm et 460 nm de l'élément Ca sous forme d'ion  $\text{Ca}^+$**

Calcium	394	397	423	443	444	446
---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

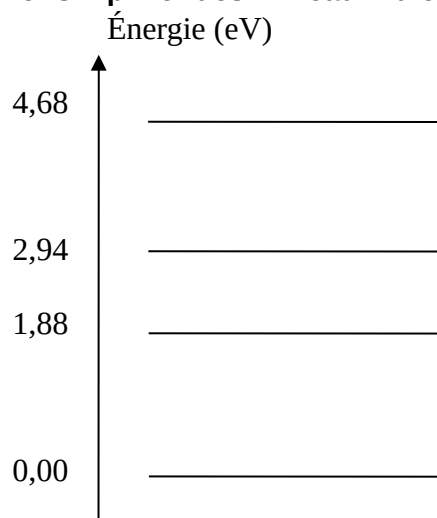
**Document 4. Spectre d'émission atomique de la roche témoin réalisé par l'analyseur spectral de ChemCam dans le cadre du test de fonctionnement**



D'après supplément CNES Mag n°54

- 2.1 Justifier pourquoi deux atomes (ou ions) différents ne donnent pas le même spectre d'émission.
- 2.2 À l'aide du document 2, identifier, pour l'ion  $\text{Ca}^+$ , la transition énergétique correspondant à la raie de longueur d'onde 423 nm. Détailler votre démarche.
- 2.3 Le document 4 présente le spectre de la roche témoin. L'analyseur spectral de ChemCam fonctionne-t-il correctement ? Justifier.

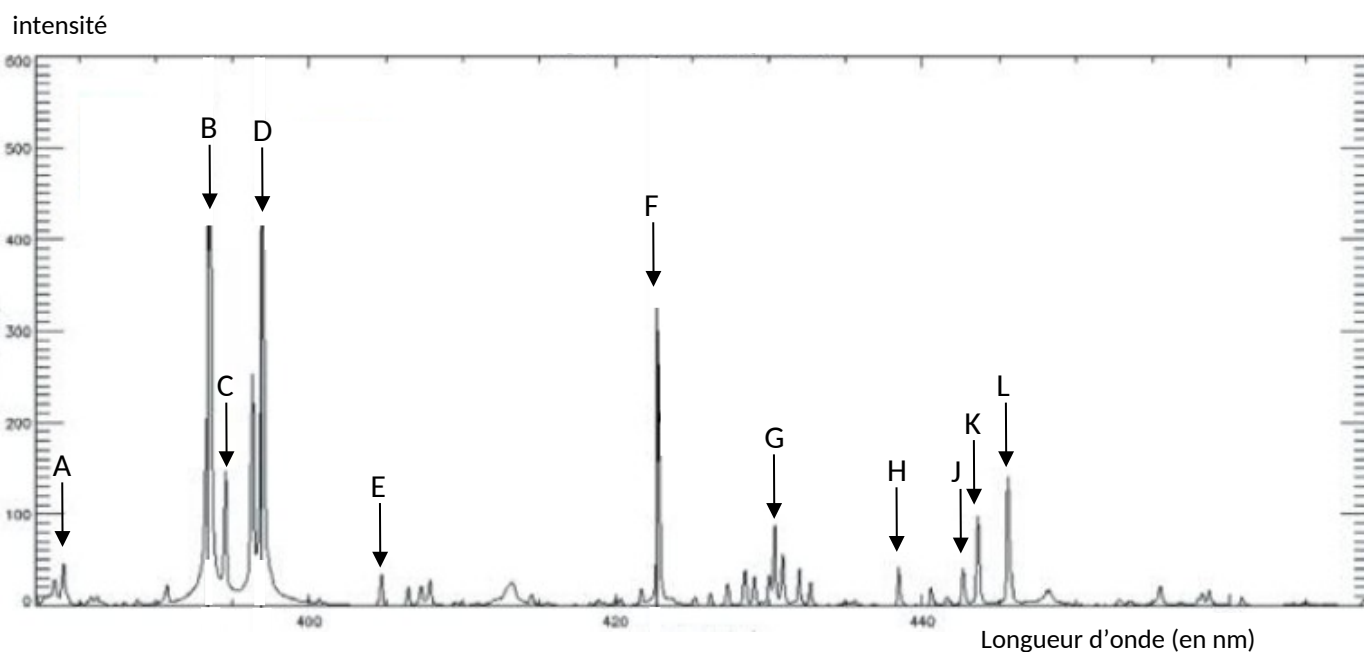
**Document 2. Diagramme simplifié des niveaux d'énergie de l'élément calcium sous forme d'ion  $\text{Ca}^+$**



**Document 3. Longueurs d'onde (en nm) des raies d'émission entre 380 nm et 460 nm de l'élément Ca sous forme d'ion  $\text{Ca}^+$**

Calcium	394	397	423	443	444	446
---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

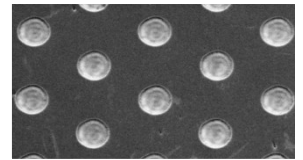
**Document 4. Spectre d'émission atomique de la roche témoin réalisé par l'analyseur spectral de ChemCam dans le cadre du test de fonctionnement**



D'après supplément CNES Mag n°54

## Exercice n°5 : Micro-texturation de surface par un laser femtoseconde (Métropole 2015)

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

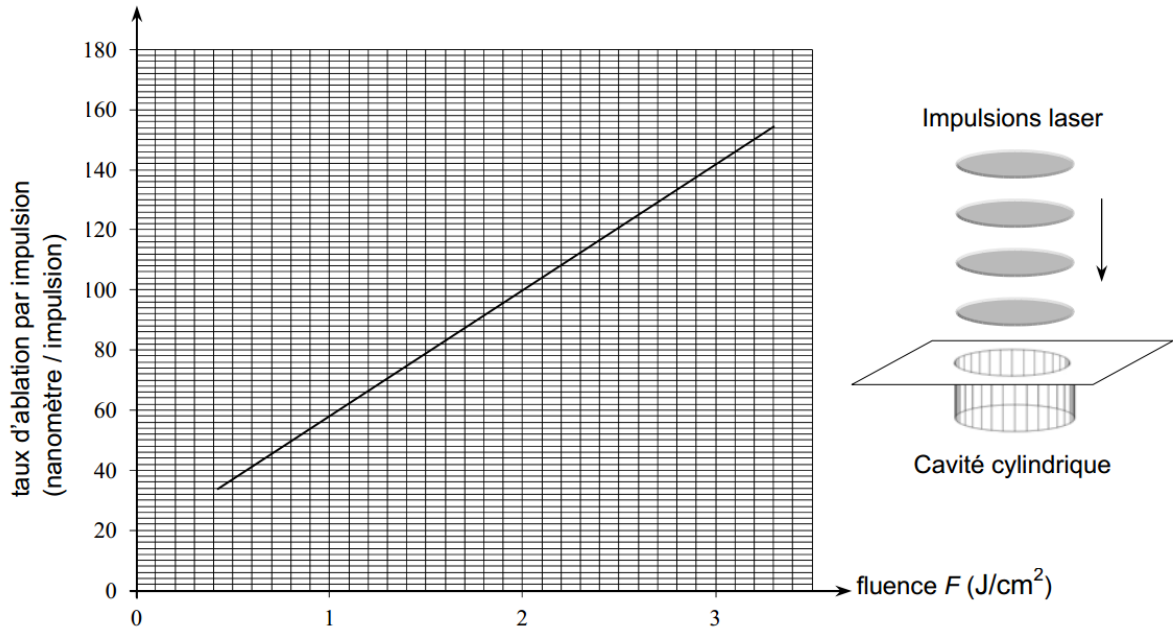
Fréquence centrale du rayonnement émis	$\nu_0 = 375 \text{ THz}$
Largeur de la bande de fréquence d'émission	$\Delta\nu = 100 \text{ THz}$
Cadence (fréquence) des impulsions	$f = 1 \text{ kHz}$
Durée d'une impulsion	$\tau = 150 \text{ fs}$
Puissance de crête atteinte durant une impulsion	$P_{\text{crête}} = 1 \text{ GW}$
Diamètre de la section circulaire du faisceau	$D = 98 \text{ }\mu\text{m}$

### 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.

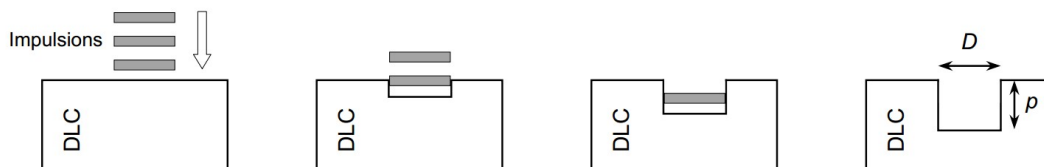
On admet que le diamètre de la cavité gravée correspond au diamètre  $D$  du faisceau laser utilisé.

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 cm<sup>2</sup>).

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 <sup>12</sup>	10 <sup>-15</sup>

- 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 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.*