



CONCOURS D'ENTREE ECINE

JUIN 2016

PHYSIQUE

DUREE DE L'EPREUVE : 2h00

Le sujet comporte 8 pages

Calculatrice autorisée

I - HORLOGE A FONTAINE ATOMIQUE

Afin d'améliorer la précision de la mesure du temps, des expériences de refroidissement d'atomes sont programmées pour 2017 par des physiciens de l'UIR en collaboration avec le CNES (Centre national d'études spatiales), lors d'une série de vols paraboliques en avion permettant de se placer dans les conditions de gravité réduite.

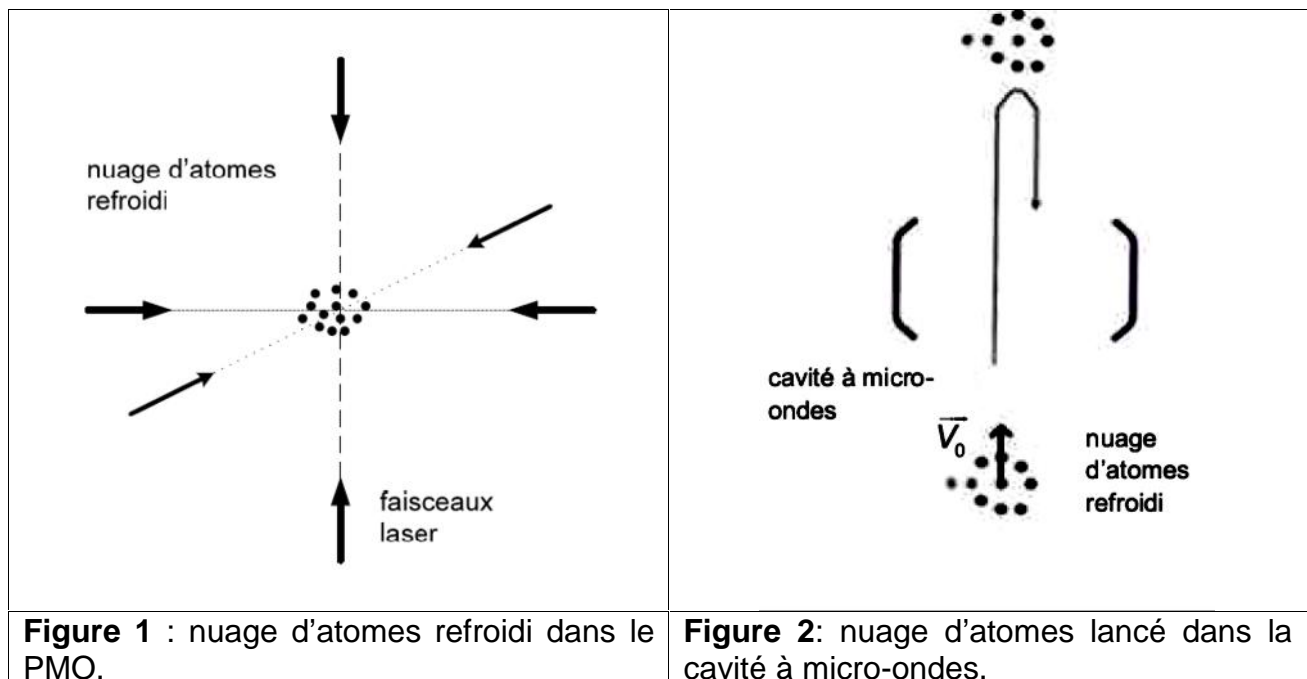
Les horloges à fontaine atomique de césium sont des horloges parmi les plus précises à ce jour. Elles utilisent une radiation dont la fréquence correspond à la transition hyperfine entre deux niveaux d'énergie atomique de l'atome de césium. Quand les atomes sont « lents » ou « froids », on peut mesurer avec grande précision la fréquence correspondant à cette transition d'énergie atomique. La précision et la stabilité des horloges atomiques sont telles qu'elles constituent aujourd'hui les étalons de temps. Une horloge de ce type, construite à l'observatoire de Paris, atteint une précision relative de 10^{-15} .

Dans cet exercice, on s'intéresse au principe de fonctionnement d'une horloge à fontaine atomique.

Dans une enceinte sous vide, un nuage d'atomes de césium est d'abord piégé et refroidi à quelques microkelvins dans un piège magnéto-optique (PMO) à l'aide de six faisceaux laser (figure 1) ; ainsi le nuage d'atomes ne s'éparpille pas trop vite sous l'effet de l'agitation thermique.

Après extinction des faisceaux laser, le nuage est lancé vers le haut (figure 2). Les atomes de césium passent alors dans une cavité à micro-ondes où ils interagissent avec une radiation électromagnétique.

Puis ils poursuivent leur mouvement vers le haut en ralentissant sous l'effet de la pesanteur et retombent en traversant une deuxième fois la cavité à micro-ondes.

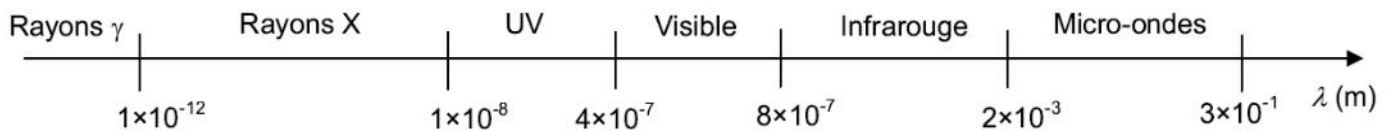


La précision de ce type d'horloge est d'autant plus grande que le temps séparant les deux passages par la cavité à micro-ondes est grand.

Avec une fontaine haute de un mètre, ce temps est de l'ordre de la seconde, ce qui est cent fois plus qu'avec un jet atomique conventionnel.

Données :

- constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s ;
- accélération de la pesanteur terrestre : $g = 9,8$ m.s⁻² ;
- masse d'un atome de césium : $M = 2,207 \times 10^{-25}$ kg ;
- longueur d'onde du rayonnement émis par chaque laser : $\lambda = 852$ nm ;
- fréquence de la transition hyperfine de l'atome de césium : 9193 MHz ;
- domaines du spectre électromagnétique en fonction de la longueur d'onde :

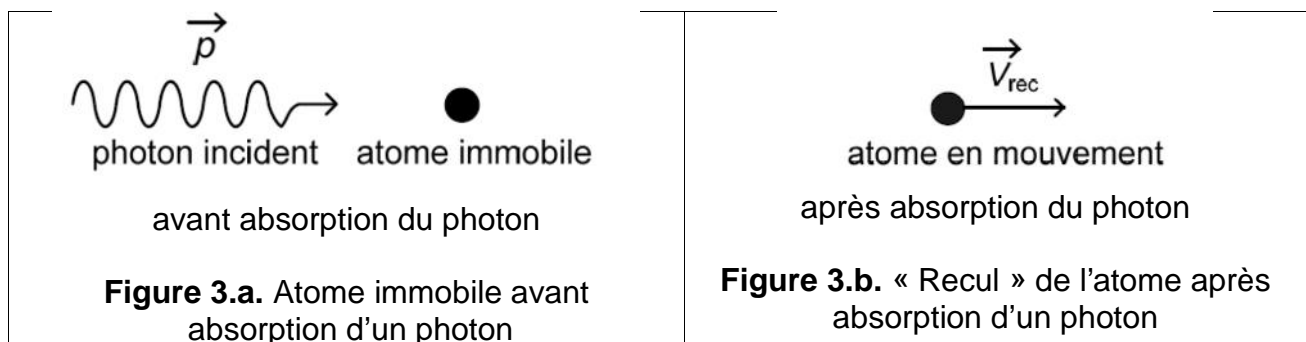


1. Quelques principes mis en œuvre dans le refroidissement d'un nuage d'atomes

1.1. Interaction laser - atome de césium au repos

On s'intéresse à un atome initialement immobile dans le référentiel du laboratoire. La quantité de mouvement du système {atome + photon} se conserve. Après absorption d'un photon de quantité de mouvement $p = \frac{h}{\lambda}$ (figure 3.a), l'atome est animé d'une vitesse de « recul » \vec{V}_r ,

de même direction et de même sens que le photon incident (figure 3.b).



Dans la situation décrite par les figures 3.a et 3.b, montrer que la valeur de la vitesse de « recul » V_{rec} dans le référentiel du laboratoire, a pour expression : $V_{rec} = \frac{h}{\lambda M}$ avec h la constante de Planck, λ la longueur d'onde du laser, et M la masse de l'atome de césium. Calculer la valeur de la vitesse V_{rec} .

1.2. Interaction laser - atome de césium en mouvement dans le référentiel du laboratoire On restreint l'étude au cas particulier où l'atome de césium est en mouvement dans le référentiel du laboratoire décrit par la figure 4.

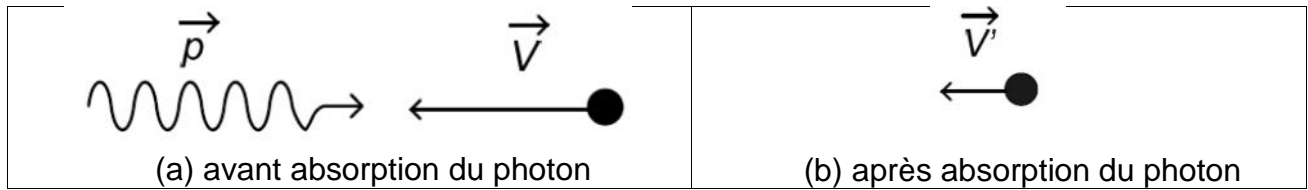


Figure 4. Absorption d'un photon par un atome en mouvement

La conservation de la quantité de mouvement pour le système {atome+photon} permet d'écrire la relation :

$\frac{h}{\lambda} - MV = -MV'$, avec V et V' les vitesses de l'atome respectivement avant et après absorption d'un photon.

1.2.1. Interpréter cette relation en justifiant chacun de ses termes et de ses signes.

Exprimer V' en fonction de V et de V_{rec} et conclure dans ce cas sur l'effet produit par l'absorption d'un photon sur la vitesse de l'atome de césium.

L'absorption d'un photon se fait sur une durée de l'ordre de $\Delta t = 30$ ns pour l'atome de césium.

1.2.2. Calculer l'ordre de grandeur de l'accélération subie par cet atome lors de l'absorption d'un photon. Le comparer à l'accélération de cet atome en chute libre.

1.3. Le piège magnéto-optique (PMO)

Dans le PMO, les six faisceaux laser sont disposés par paire selon trois directions orthogonales de l'espace.

Par paire, selon une direction, ils se propagent dans des sens opposés (figure 1).

On considère un atome de césium de vitesse \vec{V} dans le référentiel du laboratoire en interaction avec une paire de faisceaux laser de fréquence ϵ . On se place dans le cas où l'atome de césium se rapproche du laser de gauche, tandis qu'il s'éloigne du laser de droite comme illustré sur la figure 5.

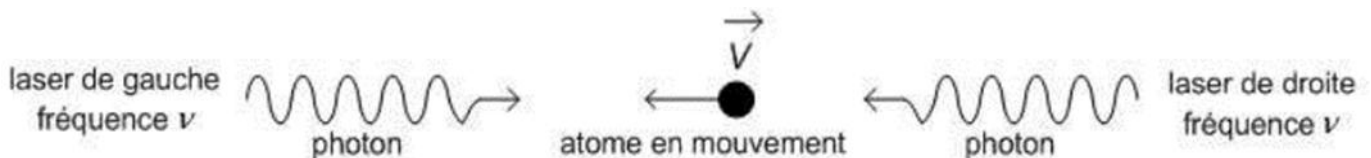


Figure 5. Ralentissement d'un atome à l'aide d'une paire de faisceaux laser

Dans le référentiel lié à l'atome, les fréquences des deux faisceaux laser perçues par l'atome de césium sont différentes.

1.3.1. Quel est le phénomène mis en jeu ? Comparer chacune des deux fréquences perçues par rapport à la fréquence ϵ .

1.3.2. Pour obtenir un ralentissement de l'atome de césium dans la situation de la figure 5, indiquer le photon (gauche ou droite) qui doit être absorbé par l'atome en mouvement.

Les atomes de césium sont ralentis au centre de six faisceaux laser. On définit la fréquence de résonance atomique par $\epsilon_{12} = \frac{E_2 - E_1}{h}$ où E_1 et E_2 sont les énergies des deux niveaux d'énergie de l'atome de césium mis en jeu. La probabilité pour un atome de césium

d'absorber un photon d'un faisceau laser est d'autant plus grande que la fréquence du faisceau perçue par l'atome est proche de la fréquence de résonance atomique.

1.3.3. Parmi les propositions ci-dessous choisir celle qui convient et la justifier.

Pour obtenir un ralentissement efficace des atomes de césium, la fréquence ϵ des lasers est réglée de sorte que :

- ϵ est égale à ϵ_{12} .
- ϵ est légèrement inférieure à ϵ_{12} .
- ϵ est légèrement supérieure à ϵ_{12} .

2. Principe de la fontaine de césium

Lorsqu'un atome de césium passe dans la cavité à micro-ondes, il est excité par le rayonnement produit dans la cavité. Ce rayonnement a la même fréquence que celle associée à la transition hyperfine de l'atome de césium.

2.1. Justifier le terme « micro-ondes » attribué à la cavité.

On suppose qu'à l'instant $t = 0$, le nuage atomique dans l'enceinte sous vide est à l'altitude $z = 0$. Il est lancé vers le haut avec une vitesse initiale $V_0 = 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (figure 6).

2.2. Montrer que la date t_{max} à laquelle le nuage d'atomes atteint le sommet de la fontaine a

pour expression : $t_{max} = \frac{V_0}{g}$. En déduire l'expression de la hauteur H de la fontaine : $H = \frac{V_0^2}{2g}$

2.3. Calculer les valeurs de t_{max} et de H puis vérifier la cohérence de ces valeurs avec le texte introductif.

2.4. Quel est selon vous l'intérêt de disposer d'horloges extrêmement précises ? Justifier votre réponse.

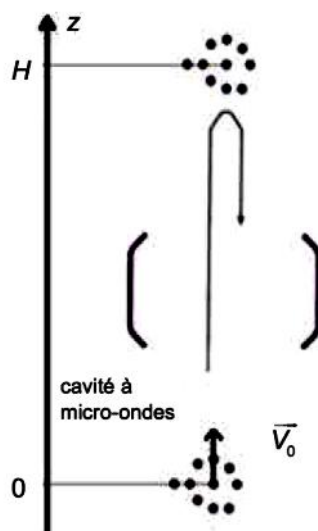


Figure 6. Mouvement du nuage d'atomes après extinction des faisceaux laser.

II – THERMOGRAPHIE ET ECONOMIE D'ENERGIE

(Aucune connaissance spéciale n'est nécessaire pour traiter cette partie).

La thermographie infrarouge permet de contrôler l'isolation thermique d'un bâtiment et de visualiser les déperditions énergétiques. À partir de cette information, chaque citoyen a la possibilité d'agir pour une meilleure isolation de son habitat, de réduire sa facture d'énergie et, du même coup, de limiter ses émissions de gaz à effet de serre.

Utilisation d'une caméra infrarouge

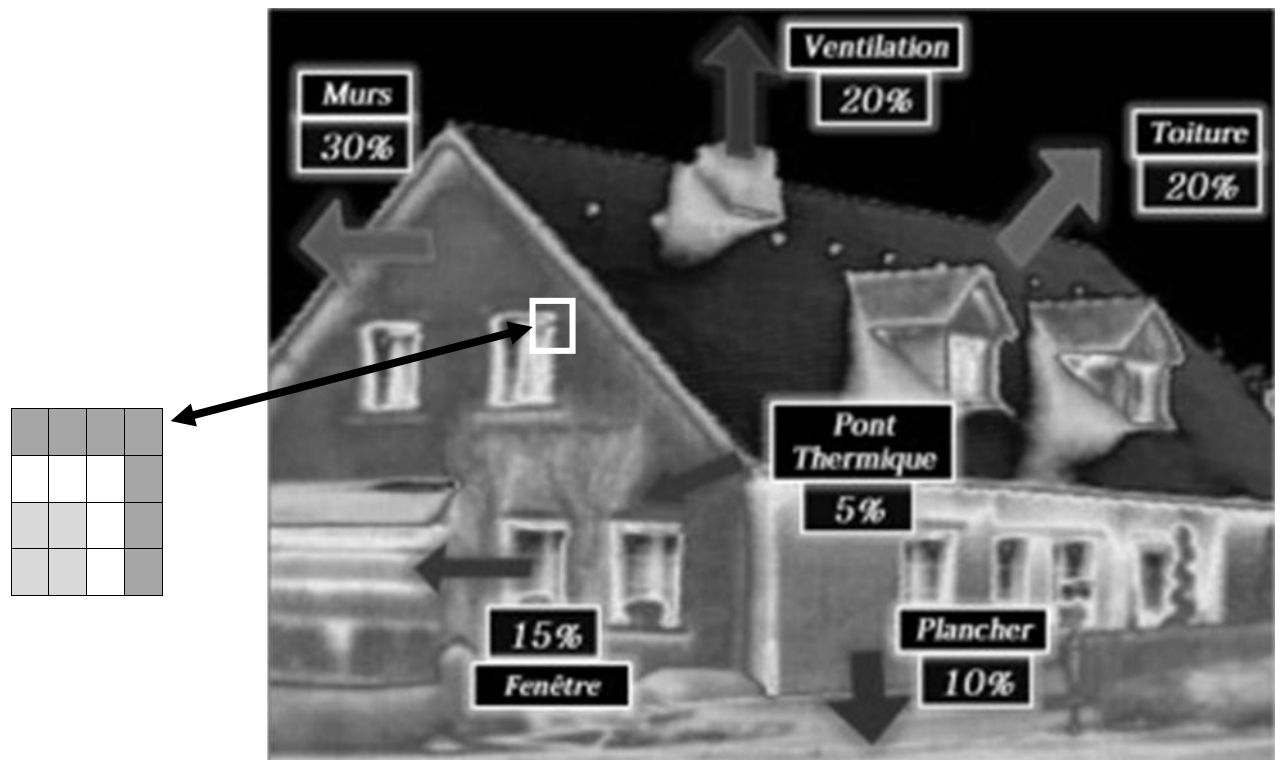
Une caméra infrarouge permet de capter des rayonnements infrarouges et restituer les informations obtenues sous la forme d'une image visible.

Son principe repose sur le phénomène physique selon lequel chaque corps dont la température est supérieure au zéro absolu émet un rayonnement électromagnétique.

Elle est utilisée pour effectuer la thermographie de façade permettant de mettre en évidence les ponts thermiques et les défauts d'isolation.

En thermographie infrarouge, on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15 μm .

Dans l'image ci-dessous, les parties les plus claires correspondent aux zones où les pertes d'énergie sont maximales.



Caractéristiques de l'écran de la caméra

La définition du détecteur infrarouge (et de l'écran de la caméra) est de $640 \times 480 = 307\,200$ pixels.

En codage RVB 24 bits, il est possible de coder un très grand nombre de couleurs en affectant, à l'aide d'une méthode adaptée, à chaque pixel trois valeurs relatives au rouge,

au vert et au bleu, chaque valeur étant codée sur un octet. Il est également possible d'obtenir des nuances de gris en affectant trois valeurs identiques.

1. Obtention d'une image thermographique

- 1.1. Après avoir cité une longueur d'onde typique d'un rayonnement correspondant au domaine des infrarouges, déterminer la nature de la transition d'énergie mise en jeu dans le domaine de l'infrarouge.

Données

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

Énergie du photon absorbé	Nature de la transition d'énergie mise en jeu
1,5 eV – 10 eV	Transition entre niveaux d'énergie électroniques
0,003 eV – 1,5 eV	Transition entre niveaux d'énergie vibratoires

- 1.2. La caméra infrarouge peut comporter un pointeur laser qui indique exactement l'objet sur lequel la caméra est pointée.
Citer la propriété du laser qui permet précisément cette utilisation.
- 1.3. Sur l'image du premier document, quelle est la zone la plus froide de la maison ?
- 1.4. Combien de nuances de gris peut-on distinguer en codage RVB 24 bits ?
Justifier.

Données

- un codage numérique sur n bits permet de coder 2^n niveaux ;
 - un octet est composé de 8 bits.
- 1.5. Un pixel noir est codé R(0)V(0)B(0). Comment un pixel blanc serait-il codé ?
- 1.6. La taille de l'image, exprimée en octets, représente la taille associée au codage de tous les pixels qui la constituent.
Quelle est la taille de l'image codée en niveaux de gris ?

- 1.7. Choisir, parmi les propositions ci-après, le tableau de nombres correspondant au codage de la zone entourée d'un cadre blanc sur l'image infrarouge du premier document. Justifier.

Tableau a

R	10	10	10	10
V	0	0	0	0
B	100	100	100	100
R	23	23	23	10
V	15	15	15	0
B	82	82	82	100
R	210	210	23	10
V	100	100	15	0
B	105	105	82	100
R	210	210	23	10
V	100	100	15	0
B	102	105	82	100

Tableau b

R	75	75	75	75
V	75	75	75	75
B	75	75	75	75
R	10	10	10	75
V	10	10	10	75
B	10	10	10	75
R	232	232	10	75
V	232	232	10	75
B	232	232	10	75
R	232	232	10	75
V	232	232	10	75
B	232	232	10	75

Tableau c

R	10	10	10	10
V	10	10	10	10
B	10	10	10	10
R	215	215	215	10
V	215	215	215	10
B	215	215	215	10
R	82	82	215	10
V	82	82	215	10
B	82	82	215	10
R	82	82	215	10
V	82	82	215	10
B	82	82	215	10

2. Enregistrement et stockage des données numériques

Dans l'objectif d'établir un bilan de performance énergétique du bâtiment, on réalise, à 24 images par seconde, un film en noir et blanc d'une durée $Ut = 15$ min.

Pourra-t-on l'enregistrer, dans un format compressé caractérisé par un taux de compression de 95%, sur un disque CD ?

Donnée :

Capacité d'un disque CD : 750 Mo.

Compression des données

La compression de données est l'opération informatique consistant à transformer une suite de bits A en une suite de bits B plus courte pouvant restituer les mêmes informations en utilisant un algorithme particulier. Opération de codage, elle diminue la taille (de transmission ou de stockage) des données.

Le taux de compression τ , exprimé en pourcentage, mesure l'efficacité de l'algorithme de compression. Il peut être défini comme le gain en volume apporté au volume initial des données :

$$\tau = 1 - \frac{\text{taille du fichier compressé}}{\text{taille du fichier initial}}$$