# Laser et stockage optique

Bac S 2013 Nouvelle-Calédonie rattrapage (ancien programme) · Exercice 2 **10 points** **Durée conseillée 1 h 40**

**1.1** Calculer l'énergie d'un photon associé à la radiation de longueur d'onde $\lambda = 405$ nm émise par une diode laser de lecteur blu-ray.

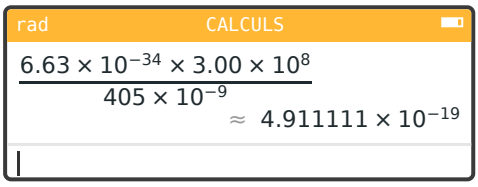
**Données utiles** $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s ; $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m · s$^{-1}$ ; $\lambda = 405$ nm $= 405 \times 10^{-9}$ m

L'énergie d'un photon de longueur d'onde $\lambda$ dans le vide est $E = h\nu = \dfrac{hc}{\lambda}$.

$$E = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{405 \times 10^{-9}}$$

$$E = 4{,}91 \times 10^{-19} \text{ J}$$

**À LA CALCULATRICE**




**PIÈGE**
Laisser $\lambda$ en nanomètres : le résultat serait faux d'un facteur $10^9$. La longueur d'onde se convertit en mètres avant le calcul.

**COMPRENDRE**
Trois chiffres significatifs, comme $h$, $c$ et $\lambda$. En électronvolts, cette énergie vaut environ 3,07 eV : un photon violet est plus énergétique qu'un photon rouge.

**1.2** Indiquer le processus d'émission d'une DEL et celui d'un laser, puis donner au moins deux caractéristiques de la lumière émise par le laser.

D'après le document 1 :

- la DEL émet sa lumière par **émission spontanée** : chaque photon est émis au hasard, indépendamment des autres ;
- le laser émet par **émission stimulée** : un photon incident provoque l'émission d'un second photon identique à lui (même fréquence, même direction, même phase).

Caractéristiques de la lumière laser (deux suffisent) :

- elle est **monochromatique** (une seule longueur d'onde) ;
- elle est **directive** (faisceau très peu divergent) ;
- elle est **cohérente** (ondes en phase) ;
- sa puissance est **concentrée** sur une très petite surface.

DEL : émission spontanée ; laser : émission stimulée. Lumière laser monochromatique, directive, cohérente.

**COMPRENDRE**
Le laser et l'émission stimulée ne figurent plus au programme actuel de spécialité. Le photon et la relation $E = h\nu$, eux, y sont toujours.

**MÉTHODE**
Les deux mots attendus sont écrits dans le second extrait du document 1. Pour une question « indiquer », on repère l'information dans le document et on la restitue avec le vocabulaire exact.

**1.3** La profondeur d'une cuvette vaut $\lambda/4$. Pour chacun des cas (a) et (b) du document 3, calculer la distance supplémentaire $\delta$ parcourue par le rayon (2) par rapport au rayon (1).

Cas (a) : les rayons (1) et (2) se réfléchissent tous les deux sur le plateau, à la même hauteur. Ils parcourent la même distance :

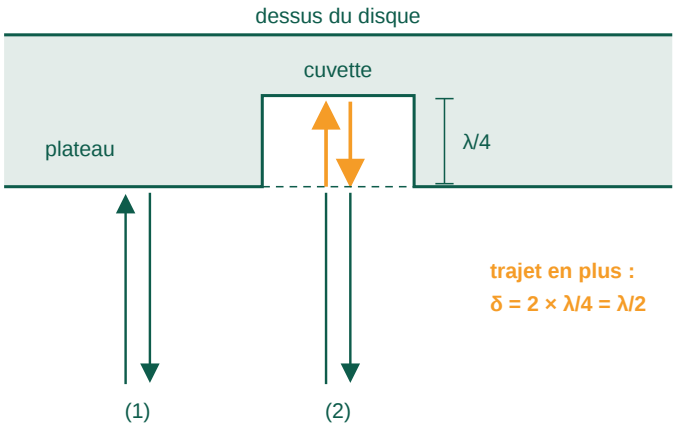
$$\delta_a = 0$$

Cas (b) : le rayon (1) se réfléchit sur le plateau, le rayon (2) au fond de la cuvette. Le rayon (2) parcourt en plus la profondeur $\frac{\lambda}{4}$ à l'aller, puis de nouveau au retour :

$$\delta_b = 2 \times \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}$$

Cas (a) : $\delta = 0$ ; cas (b) : $\delta = \frac{\lambda}{2}$

**PIÈGE**
Répondre $\delta = \lambda/4$ dans le cas (b). Le rayon (2) entre dans la cuvette puis en ressort : la profondeur est parcourue deux fois.




**1.3** · Cas (b), vue en coupe : le rayon (2) parcourt deux fois la profondeur de la cuvette

**1.4.1** Comparer l'intensité lumineuse du faisceau réfléchi sur un plateau avec celle du faisceau réfléchi dans une cuvette.

Sur la figure 3 du document 2, l'intensité lumineuse réfléchie est maximale quand le faisceau éclaire un plateau, et elle passe par un minimum quand il éclaire une cuvette.

L'intensité réfléchie sur un plateau est nettement plus grande que celle réfléchie en face d'une cuvette.

**MÉTHODE**
« Comparer » demande une conclusion nette (plus grande, plus petite, égale) appuyée sur un document : ici, la courbe de la figure 3 superposée au profil de la piste.

**1.4.2** Préciser, dans chacun des deux cas précédents, la nature des interférences (constructives ou destructives).

**Données utiles** $\delta_a = 0$ et $\delta_b = \frac{\lambda}{2}$ (1.3)

Cas (a) : $\delta = 0 = k\,\lambda$ avec $k = 0$. Les rayons (1) et (2) se superposent en phase : les interférences sont **constructives**, l'intensité est maximale.

Cas (b) : $\delta = \frac{\lambda}{2} = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda$ avec $k = 0$. Les rayons se superposent en opposition de phase : les interférences sont **destructives**, l'intensité est minimale.

Plateau (a) : interférences constructives ; cuvette (b) : interférences destructives.

**PIÈGE**
Citer « constructives » ou « destructives » sans condition sur $\delta$ ne suffit pas : il faut comparer $\delta$ à $\lambda$ (multiple entier, ou demi-entier).

**COMPRENDRE**
La profondeur $\lambda/4$ n'est pas choisie au hasard : elle donne exactement $\delta = \lambda/2$, donc une extinction. Ce résultat explique l'observation de la question 1.4.1.

**1.5** Comment les variations d'intensité lumineuse sont-elles associées aux « bits » (de valeur 0 ou 1) ?

Sur la figure 3, les bits de valeur 1 sont alignés avec les bords des cuvettes, là où l'intensité réfléchie change (passage d'un plateau à une cuvette, ou l'inverse). Partout ailleurs, le long d'un plateau comme au fond d'une cuvette, les bits valent 0.

Une variation de l'intensité lumineuse (front montant ou descendant) code un bit 1 ; une intensité qui ne varie pas code un bit 0.

**PIÈGE**
Écrire « plateau = 1, cuvette = 0 ». Sur la figure 3, des 0 se trouvent aussi bien sur les plateaux que dans les cuvettes : c'est le changement de niveau qui porte le 1.

**2.1** Justifier la valeur de la fréquence d'échantillonnage utilisée pour numériser le son.

**Données utiles** son audible : de 20 Hz à 20 kHz ; $f_e = 44{,}1$ kHz (document 4)

La fréquence la plus élevée d'un son audible est $f_{max} = 20$ kHz.

D'après le théorème de Shannon, la fréquence d'échantillonnage doit vérifier $f_e \geq 2\,f_{max}$, soit $f_e \geq 40$ kHz.

$f_e = 44{,}1\ \text{kHz} \geq 40\ \text{kHz}$ : la condition de Shannon est respectée, tous les sons audibles sont numérisés correctement.

**COMPRENDRE**
Une fréquence d'échantillonnage beaucoup plus grande n'apporterait rien d'audible, mais augmenterait le nombre d'échantillons, donc la place occupée sur le disque.

**2.2** Calculer le pas en tension du convertisseur analogique-numérique, de tension maximale $U_{max} = 10$ V.

**Données utiles** $U_{max} = 10$ V ; $n = 16$ bits (document 4) ; $p = \dfrac{U_{max}}{2^n}$

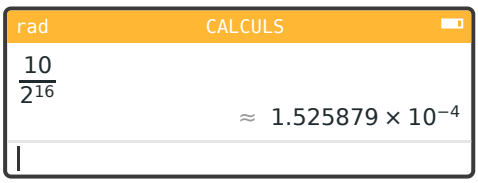
Chaque échantillon est codé sur $n = 16$ bits.

$$p = \frac{U_{max}}{2^n} = \frac{10}{2^{16}} = \frac{10}{65\,536}$$

$p = 1{,}5 \times 10^{-4}\ \text{V} = 0{,}15\ \text{mV}$

**COMPRENDRE**
Deux chiffres significatifs, comme $U_{max}$. Avec 16 bits, la tension peut prendre $2^{16} = 65\,536$ valeurs : plus $n$ est grand, plus le pas est petit et plus la numérisation est fidèle.

**À LA CALCULATRICE**




**2.3** À partir de la fréquence d'échantillonnage, retrouver par le calcul la valeur du débit binaire mentionnée dans la notice.

**Données utiles** $f_e = 44{,}1$ kHz ; 16 bits par canal ; 2 canaux ; 1 octet = 8 bits ; valeur de la notice : $176\ \text{ko} \cdot \text{s}^{-1}$

Chaque seconde, on prélève $f_e = 44{,}1 \times 10^3$ échantillons sur chacun des 2 canaux, et chaque échantillon occupe 16 bits. Le débit binaire est donc :

$$D = 2 \times 16 \times f_e = 2 \times 16 \times 44{,}1 \times 10^3 = 1{,}41 \times 10^6\ \text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$$

En octets : $D = \dfrac{1{,}411 \times 10^6}{8} = 1{,}76 \times 10^5\ \text{octet} \cdot \text{s}^{-1}$

$D = 176\ \text{ko} \cdot \text{s}^{-1}$ : on retrouve la valeur de la notice.

**PIÈGE**
Oublier le facteur 2 des deux canaux stéréo, ou oublier de diviser par 8 : la notice donne le débit en kilooctets par seconde, pas en bits par seconde.

**COMPRENDRE**
Le débit binaire n'est plus au programme actuel de spécialité. Ici $1\ \text{ko} = 10^3$ octets et $1\ \text{Mo} = 10^6$ octets.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$2 \times 16 \times 44.1 \times 10^3$
$\approx$ 1411200

$\frac{2 \times 16 \times 44.1 \times 10^3}{8}$
$\approx$ 176400

**2.4** Retrouver la capacité de stockage, en Mo, d'un CD-ROM audio pouvant contenir 74 minutes de son.

**Données utiles** $D = 176$ ko $\cdot$ s$^{-1}$ (2.3) ; $\Delta t = 74$ min ; valeur de la notice : 780 Mo

La capacité est la quantité de données lues pendant la durée $\Delta t = 74 \times 60 = 4\,440$ s :

$$C = D \times \Delta t = 176 \times 4\,440 = 7{,}81 \times 10^5 \text{ ko}$$

$C = 7{,}8 \times 10^2$ Mo, en accord avec les 780 Mo de la notice.

**PIÈGE**
Laisser la durée en minutes alors que le débit est donné par seconde. Puis convertir : $1$ Mo $= 10^3$ ko.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$176 \times 74 \times 60$
781 440

**2.5** Quelle serait la durée de lecture, en heures, d'un signal audio de même débit enregistré sur un disque blu-ray de capacité 22 Go ?

**Données utiles** $C' = 22$ Go $= 22 \times 10^9$ octets ; $D = 176$ ko $\cdot$ s$^{-1}$ $= 176 \times 10^3$ octet $\cdot$ s$^{-1}$ (2.3)

Comme $C' = D \times \Delta t'$ :

$$\Delta t' = \frac{C'}{D} = \frac{22 \times 10^9}{176 \times 10^3} = 1{,}25 \times 10^5 \text{ s}$$

En heures : $\Delta t' = \frac{1{,}25 \times 10^5}{3\,600} = 34{,}7$ h.

$\Delta t' \approx 35$ h

**MÉTHODE**
Vérification par proportionnalité : 780 Mo correspondent à 74 min, donc 22 Go, soit 28 fois plus de données, correspondent à environ $28 \times 74$ min, c'est-à-dire 35 h.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\frac{22 \times 10^9}{176 \times 10^3}$
$\approx$ 125000

$\frac{\frac{22 \times 10^9}{176 \times 10^3}}{3600}$
$\approx$ 34.72222

**3.1** Proposer une justification à l'appellation « blu-ray ».

**Données utiles** laser blu-ray : $\lambda = 405$ nm ; violet : 400-445 nm ; bleu : 475-510 nm ; laser du CD : $\lambda = 780$ nm

« Blu-ray » signifie « rayon bleu ». Le laser de ce lecteur émet à $\lambda = 405$ nm, à l'extrémité violet-bleu du spectre visible, alors que le laser d'un lecteur de CD émet à 780 nm, du côté du rouge.

D'après le tableau des données, la couleur exacte de cette radiation est le violet (400-445 nm) : le nom retient la couleur voisine, le bleu.

L'appellation rappelle la couleur du faisceau laser, de courte longueur d'onde (405 nm, violet proche du bleu).

**3.2** Calculer la capacité de stockage (nombre de bits stockés) d'un CD-ROM, puis l'exprimer en Mo.

**Données utiles** $R_{int} = 2{,}5$ cm ; $R_{ext} = 5{,}8$ cm ; $\ell = 0{,}83$ µm ; $a = 1{,}67$ µm ; $S_C = \pi\,(R_{ext}^2 - R_{int}^2)$ ; $s = \ell \times a$

Le nombre de bits est le quotient de la surface gravée par la surface occupée par un bit :

$$N = \frac{S_C}{s} = \frac{\pi\,(R_{ext}^2 - R_{int}^2)}{\ell \times a}$$

$$N = \frac{\pi \times \left[(5{,}8 \times 10^{-2})^2 - (2{,}5 \times 10^{-2})^2\right]}{0{,}83 \times 10^{-6} \times 1{,}67 \times 10^{-6}} = 6{,}2 \times 10^{9} \text{ bits}$$

En octets : $\dfrac{6{,}2 \times 10^{9}}{8} = 7{,}8 \times 10^{8}$ octets.

$N = 6{,}2 \times 10^{9}$ bits, soit une capacité de $7{,}8 \times 10^{2}$ Mo

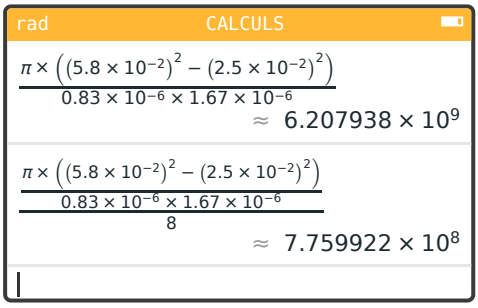
**PIÈGE**

Les rayons sont en centimètres, $\ell$ et $a$ en micromètres : tout se convertit en mètres. Ne pas confondre non plus $R_{ext}^2 - R_{int}^2$ avec $(R_{ext} - R_{int})^2$.

**COMPRENDRE**

Ce modèle simple redonne la capacité annoncée par la notice (780 Mo, question 2.4) : l'estimation $s = \ell \times a$ est donc réaliste.

**À LA CALCULATRICE**



**3.3** Rédiger un paragraphe argumenté (10 lignes environ) : quels paramètres physiques du lecteur et du disque blu-ray permettent d'obtenir une capacité de stockage bien supérieure à celle du CD-ROM ?

**Données utiles** $d = \dfrac{1{,}22\,\lambda}{\sin\alpha}$ avec $\sin\alpha = \text{O.N.}$ ; CD : 780 nm, O.N. = 0,45, $a = 1{,}67\ \mu\text{m}$, $\ell = 0{,}83\ \mu\text{m}$ ; blu-ray : 405 nm, O.N. = 0,85, $a = 0{,}32\ \mu\text{m}$, $\ell = 0{,}15\ \mu\text{m}$

Les deux disques ont la même surface gravée. La capacité dépend donc seulement de la surface $s = \ell \times a$ occupée par un bit : plus les cuvettes sont courtes et les sillons serrés, plus on stocke de bits.

Or une cuvette ne peut être lue que si la tache du laser n'est pas trop large devant elle. Le diamètre de cette tache, $d = \dfrac{1{,}22\,\lambda}{\text{O.N.}}$, est imposé par la diffraction. Deux paramètres du lecteur le réduisent :

- une longueur d'onde plus petite : 405 nm au lieu de 780 nm ;
- une ouverture numérique plus grande : 0,85 au lieu de 0,45.

On obtient $d_{CD} = \dfrac{1{,}22 \times 780}{0{,}45} = 2{,}1\ \mu\text{m}$ et $d_{BR} = \dfrac{1{,}22 \times 405}{0{,}85} = 0{,}58\ \mu\text{m}$ : la tache est environ 3,6 fois plus fine.

Le disque blu-ray peut alors porter des cuvettes plus courtes (0,15 µm au lieu de 0,83 µm) et des sillons plus proches (0,32 µm au lieu de 1,67 µm). La surface d'un bit passe de $0{,}83 \times 1{,}67 = 1{,}4\ \mu\text{m}^2$ à $0{,}15 \times 0{,}32 = 0{,}048\ \mu\text{m}^2$ : elle est divisée par 29 environ, et la capacité est multipliée d'autant ($29 \times 0{,}78\ \text{Go} \approx 22\ \text{Go}$).

Longueur d'onde plus courte et ouverture numérique plus grande donnent une tache plus fine, donc des cuvettes plus petites et des sillons plus serrés : environ 29 fois plus de bits sur la même surface.

**MÉTHODE**

Un paragraphe argumenté suit trois temps : l'idée (un bit plus petit), la cause physique (la relation donnant $d$, avec les valeurs du tableau), la conséquence chiffrée. Chaque affirmation s'appuie sur une donnée du sujet.

**À LA CALCULATRICE**

