DS n°1 – TS1 2012
Ondes & lumière

Exercice 1 – Le LASER au quotidien

Saviez-vous que si vous regardez des DVD, naviguez sur le web, scannez les codes barre et si certains peuvent [suite à une opération] se passer de leurs lunettes, c'est grâce à l'invention du LASER, il y a 50 ans !

Intéressons-nous aux lecteurs CD et DVD qui ont envahi notre quotidien. La nouvelle génération de lecteurs comporte un laser bleu (le blu-ray) dont la technologie utilise une diode laser fonctionnant à une longueur d'onde $\lambda_B = 405$ nm d'une couleur bleue (en fait violacée) pour lire et écrire les données. Les CD et les DVD conventionnels utilisent respectivement des lasers infrarouges et rouges. Les disques Blu-ray fonctionnent d'une manière similaire à celle des CD et des DVD.

Le laser d'un lecteur blu-ray émet une lumière de longueur d'onde différente de celles des systèmes CD ou DVD, ce qui permet de stocker plus de données sur un disque de même taille (12 cm de diamètre), la taille minimale du point sur lequel le laser grave l'information étant limitée par la diffraction.

Pour stocker davantage d'informations sur un disque, les scientifiques travaillent sur la mise au point d'un laser ultra violet.

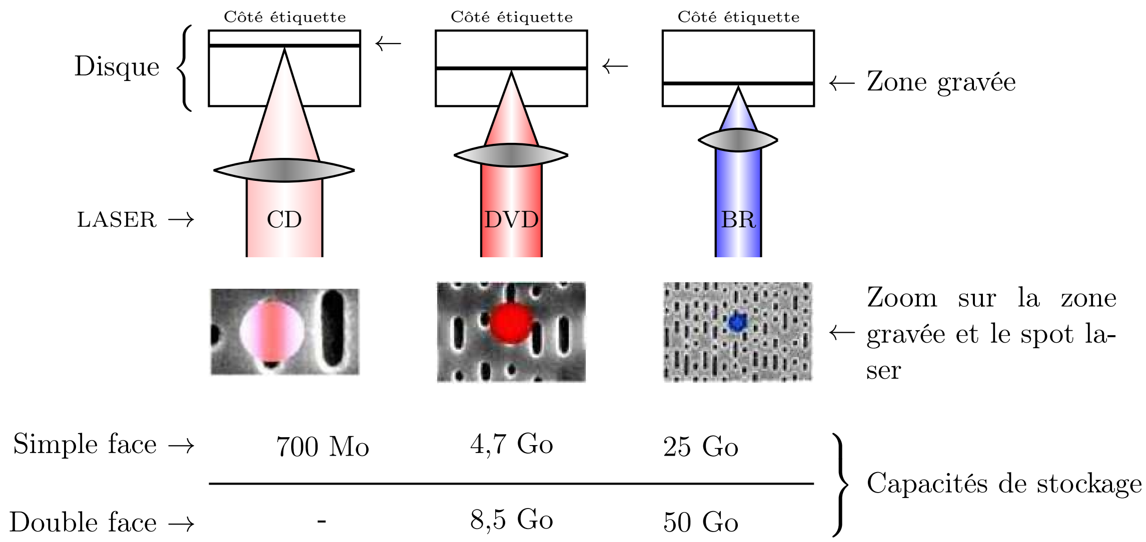

Figure 1 – Caractéristiques des disques CD, DVD et Blu-ray.

1. À propos du texte

1.1. Quel est le nom du phénomène physique responsable de l'irisation d'un CD ou d'un DVD éclairé en lumière blanche ?

1.2. Calculer la valeur de la fréquence ν_B de la radiation utilisée dans la technologie blu-ray.
Donnée : Célérité de la lumière dans le vide et dans l'air : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1.3. Comparer la longueur d'onde du laser blu-ray à celle des systèmes CD ou DVD.

2. Diffraction

On veut retrouver expérimentalement la longueur d'onde λ_D de la radiation monochromatique d'un lecteur DVD.
On utilise pour cela le montage de la figure 2, a étant le diamètre du fil, θ le demi-écart angulaire.

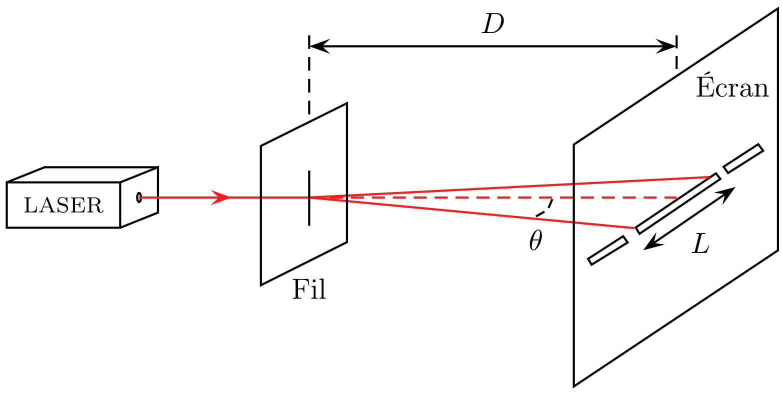

Figure 2 – Diffraction de la lumière par un fil.

2.1. *Expression de λ*

2.1.1. Établir la relation entre θ, L (largeur de la tache centrale de diffraction) et D (distance entre le fil et l'écran). On supposera θ suffisamment petit pour considérer $\tan\theta \simeq \theta$ avec θ en radian.

2.1.2. Donner la relation entre θ, λ_D et a, en indiquant l'unité de chaque grandeur.

2.1.3. En déduire la relation :

$$\lambda_\mathrm{D} = \frac{La}{2D}$$

2.2. *Détermination de la longueur d'onde λ_D de la radiation d'un laser de lecteur DVD.*

Pour la figure de diffraction obtenue avec un laser « DVD », on mesure $L = 4,8$ cm.

On remplace alors le laser « DVD » par le laser utilisé dans le lecteur blu-ray, sans modifier le reste du montage. On obtient une tache de diffraction de largeur $L' = 3,0$ cm.

À partir de ces deux expériences, calculer la valeur de la longueur d'onde λ_D de la radiation monochromatique d'un lecteur DVD, et comparer au résultat de la question **1.3**.

3. Dispersion

Un CD est constitué de polycarbonate de qualité optique dont l'indice de réfraction est $n = 1,55$ pour la radiation lumineuse utilisée dans le lecteur CD.

3.1. Soit v la vitesse de la radiation dans le polycarbonate, donner la relation entre les grandeurs physiques n, c et v.

3.2. Quelle grandeur caractéristique de la radiation du laser n'est pas modifiée lorsque son rayon passe de l'air dans le disque ?

3.3. *Détermination de la longueur d'onde λ_C d'un laser CD.*

3.3.1. Le laser utilisé pour lire les CD a une longueur d'onde $\lambda_\mathrm{CD} = 780$ nm dans le vide. Montrer que la longueur d'onde λ_C du laser CD dans le polycarbonate vérifie :

$$\lambda_\mathrm{C} = \frac{\lambda_\mathrm{CD}}{n}$$

3.3.2. Calculer λ_C.

Exercice 2 – Radar & contrôle routier

L'effet Doppler fut présenté par Christian DOPPLER *en 1842 pour les ondes sonores puis par Hippolyte* FIZEAU *pour les ondes électromagnétiques en 1848. Il a aujourd'hui de multiples applications.*

Un radar de contrôle routier est un instrument servant à mesurer la vitesse des véhicules circulant sur la voie publique à l'aide d'ondes radar. Le radar émet une onde continue qui est réfléchie par toute cible se trouvant dans la direction pointée. Par effet Doppler, cette onde réfléchie possède une fréquence légèrement différente de celle émise : plus grande fréquence pour les véhicules s'approchant du radar et plus petite pour ceux s'en éloignant.

En mesurant la différence de fréquence entre l'onde émise et celle réfléchie, on peut calculer la vitesse de la « cible ».

Mais les radars Doppler sont utilisés dans d'autres domaines...

En météorologie, le radar Doppler permet d'analyser la vitesse et le mouvement des perturbations et de fournir des prévisions de grêle, de pluies abondantes, de neige ou de tempêtes.

En imagerie médicale, le radar Doppler permet d'étudier le mouvement des fluides biologiques. Une sonde émet des ondes ultrasonores et ce sont les globules rouges qui font office d'obstacles et les réfléchissent. L'analyse de la variation de la fréquence des ondes réfléchies reçues par cette même sonde permet ainsi de déterminer la vitesse du sang dans les vaisseaux.

Cet exercice propose d'étudier le principe de l'effet Doppler sonore. Pour simplifier cette approche, la réflexion de l'onde sur l'obstacle ne sera pas prise en compte.

Par ailleurs, on rappelle que plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu.

1. Un véhicule muni d'une sirène est immobile.

La sirène retentit et émet un son de fréquence $f = 680$ Hz. Le son émis à la date $t = 0$ se propage dans l'air à la vitesse $c = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ à partir de la source S.

On note λ la longueur d'onde correspondante.

La figure 3 ci-dessous représente le front d'onde à la date $t = 4T$ (T étant la période temporelle de l'onde sonore.)

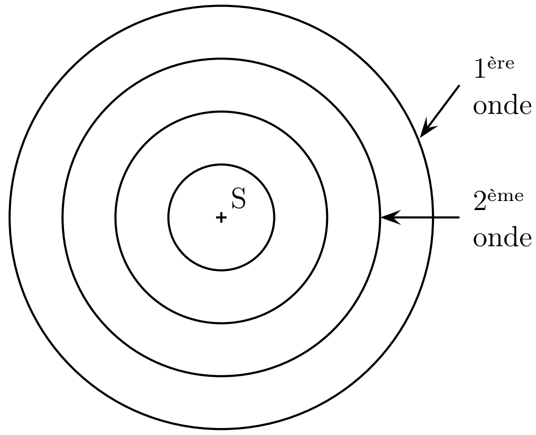

Figure 3 – Véhicule immobile.

Répondre par « vrai » ou « faux » aux sept affirmations suivantes en justifiant son choix.

1.1. Une onde sonore est une onde transversale.

1.2. Une onde mécanique se propage dans un milieu matériel avec transport de matière.

1.3. La longueur d'onde est indépendante du milieu de propagation.

1.4. Un point M distant du point S d'une longueur égale à 51,0 m du milieu reproduit le mouvement de la source S avec un retard $\Delta t = 1,5$ s.

1.5. Le front d'onde a parcouru $d = 40,0$ m à la date $t = 3T$.

1.6. Deux points situés à la distance $d' = 55,0$ m l'un de l'autre dans la même direction de propagation vibrent en phase.

1.7. L'onde se réfléchit sur un obstacle situé à la distance $d'' = 680$ m de la source. L'écho de l'onde revient à la source 2,0 s après l'émission du signal.

2. Le véhicule se déplace maintenant vers la droite à la vitesse v inférieure à c.

La figure 4 donnée ci-après représente le front de l'onde sonore à la date $t = 4T$.

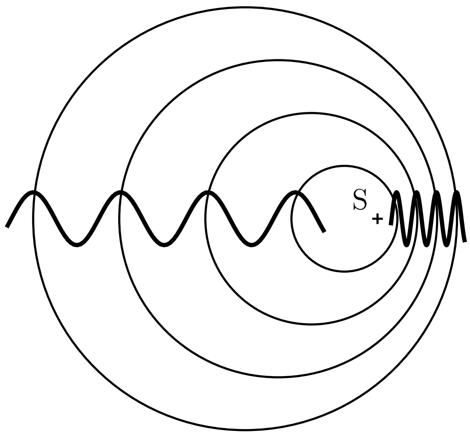

Figure 4 – Véhicule en mouvement.

2.1. Donner la définition d'un milieu dispersif. L'air est-il un milieu dispersif pour les ondes sonores ?

2.2. Le véhicule se rapproche d'un observateur immobile.

Pendant l'intervalle de temps T, le son parcourt la distance λ. Pendant ce temps, le véhicule parcourt la distance $d = vT$. La longueur d'onde λ' perçue par l'observateur à droite de la source S a donc l'expression suivante :

$$\lambda' = \lambda - vT \qquad (1)$$

2.2.1. Rappeler la relation générale liant la vitesse de propagation, la longueur d'onde et la fréquence.

2.2.2. En déduire que la relation (1) permet d'écrire :

$$f' = f\frac{c}{c-v}$$

f' étant la fréquence perçue par l'observateur.

2.2.3. Le son perçu est-il plus grave ou plus aigu que le son d'origine ? Justifier.

2.3. Dans un deuxième temps, le véhicule s'éloigne de l'observateur à la même vitesse v.

2.3.1. Donner, sans démonstration, les expressions de la nouvelle longueur d'onde λ'' et de la nouvelle fréquence f'' perçues par l'observateur en fonction de f, v et c.

2.3.2. Le son perçu est-il plus grave ou plus aigu que le son d'origine ? Justifier.

2.4. Exprimer, puis estimer en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, en arrondissant les valeurs à des nombres entiers, la vitesse du véhicule qui se rapproche de l'observateur sachant que ce dernier perçoit alors un son de fréquence $f' = 716$ Hz.

Exercice 1 – Le laser

1.1. Il s'agit de la diffraction de la lumière blanche sur les petits orifices de la zone gravée. Ces orifices sont tellement petits qu'ils sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière visible ($a \sim \lambda$), d'où une diffraction bien visible.

1.2.

$$\lambda_{\mathrm{B}} = \frac{c}{\nu_{\mathrm{B}}} \quad \Leftrightarrow \quad \nu_{\mathrm{B}} = \frac{c}{\lambda_{\mathrm{B}}}$$

Application numérique :

$$\nu_{\mathrm{B}} = \frac{3,00 \times 10^{8}}{405 \times 10^{-9}} = 7,41 \times 10^{14}\ \mathrm{Hz}$$

1.3. $\lambda_{\mathrm{B}} < \lambda_{\mathrm{D}} < \lambda_{\mathrm{CD}}$: en passant de l'infrarouge (λ_{CD} pour le CD), au rouge (λ_{D} pour le DVD) et finalement au bleu (λ_{B} pour le Blu-ray), la longueur d'onde diminue.

2.1.1. Dans le triangle rectangle contenant l'angle θ :

$$\tan\theta = \frac{\frac{L}{2}}{D}$$

L'angle θ étant petit, et exprimé en radians :

$$\tan\theta \simeq \theta \quad \Rightarrow \quad \theta \simeq \frac{L}{2D}$$

2.1.2. En exprimant θ en radians (rad), λ_{D} en mètres (m) et a en mètres (m) :

$$\theta = \frac{\lambda_{\mathrm{D}}}{a}$$

2.1.3. En regroupant les deux formules précédentes :

$$\frac{L}{2D} = \frac{\lambda_{\mathrm{D}}}{a} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_{\mathrm{D}} = \frac{La}{2D} \qquad \text{c. q. f. d.}$$

2.2. Utilisons la relation précédente :

$$\lambda_{\mathrm{D}} = \frac{La}{2D} \quad \text{et} \quad \lambda_{\mathrm{B}} = \frac{L'a}{2D}$$

Isolons les termes constants : diamètre a du fil, distance fil-écran D :

$$\frac{\lambda_{\mathrm{D}}}{L} = \frac{a}{2D} \quad \text{et} \quad \frac{\lambda_{\mathrm{B}}}{L'} = \frac{a}{2D}$$

L'égalité entre les deux équations nous offre la possibilité d'exprimer λ_{D} en fonction des données à notre disposition :

$$\frac{\lambda_{\mathrm{D}}}{L} = \frac{\lambda_{\mathrm{B}}}{L'} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_{\mathrm{D}} = \lambda_{\mathrm{B}}\frac{L}{L'}$$

Pour l'application numérique, on peut laisser la longueur d'onde du Blu-ray en nanomètres, et les largeurs des taches centrales de diffraction en centimètre (puisqu'il s'agit de calculer un rapport de longueur) :

$$\lambda_{\mathrm{D}} = 405 \times \frac{4,8}{3,0} = 648\ \mathrm{nm}$$

Le respect des chiffres significatifs impose d'exprimer le résultat avec seulement deux chiffres significatifs (on rappelle λ_{B} pour comparer) :

$$\lambda_{\mathrm{D}} = 0,65\ \mu\mathrm{m} \quad \text{et} \quad \lambda_{\mathrm{B}} = 0,405\ \mu\mathrm{m}$$

On vérifie bien que le laser utilisé pour les DVD est dans le rouge. Par rapport à la question **1.3**, on vérifie bien que la longueur d'onde utilisée pour le DVD est supérieure à celle utilisée pour le Blu-ray.

3.1.

$$n = \frac{c}{v}$$

3.2. La fréquence ν (et donc la période T) ne sont pas modifiées lorsque la lumière change de milieu. En revanche la célérité v et la longueur d'onde λ dépendent du milieu.

3.3.1. Formons le rapport des longueurs d'onde λ dans le vide et λ_{C} dans le polycarbonate, en éliminant la fréquence ν pour retrouver la formule de l'indice n :

$$\left.\begin{array}{l} \lambda = \dfrac{c}{\nu} \\[2ex] \lambda_{\mathrm{C}} = \dfrac{v}{\nu} \end{array}\right\} \quad \Rightarrow \quad \frac{\lambda}{\lambda_{\mathrm{C}}} = \frac{c}{v} = n$$

$$\Leftrightarrow \quad \lambda_{\mathrm{C}} = \frac{\lambda}{n} \qquad \text{c. q. f. d.}$$

3.3.2. Pour l'application numérique, on peut laisser les longueurs d'ondes en nanomètres (nm) :

$$\lambda_{\mathrm{C}} = \frac{780}{1,55} = 503\ \mathrm{nm}$$

Exercice 2 – Radar & contrôle routier

1.1. **Faux** : une onde sonore est une onde longitudinale, la direction de la perturbation étant parallèle à la direction de propagation ;

1.2. **Faux** : par définition, une onde correspond à la propagation d'une perturbation avec transport d'énergie mais sans transport de matière, et quand elle est mécanique, elle se propage dans un milieu matériel élastique ;

1.3. **Faux** : lorsque la longueur d'onde dépend forcément du milieu, puisque la célérité c des ondes dépend du milieu ;

1.4. **Faux** :

$$c = \frac{\mathrm{SM}}{\Delta t} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta t = \frac{\mathrm{SM}}{c}$$

Application numérique :

$$\Delta t = \frac{51,0}{340} = 0,15\ \mathrm{s}$$

donc l'affirmation est fausse (1,50 s annoncé).

1.5. **Faux** : à la date $t = 3T$, le front d'onde a parcouru la distance $d = 3\lambda$; calculons λ :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{680} = 0,500\ \mathrm{m}$$

et par suite : $d = 3\lambda = 3 \times 0,500 = 1,50$ m. Donc l'affirmation est fausse.

1.6. **Vrai** : deux points vibrent en phase si ils sont séparés par une longueur d'onde ($d' = \lambda$, points vibrants en phase les plus proches) ou même par plusieurs longueurs d'onde ($d' = n\lambda$, points vibrants en phase non consécutifs, séparés par n longueurs d'ondes). Divisons la distance proposée par λ pour tester si on obtient un nombre entier :

$$\frac{d'}{\lambda} = \frac{55,0}{0,500} = 110$$

L'affirmation est donc véridique.

1.7. **Faux** : lorsque l'écho repasse par le point source, il a fait un aller-retour jusqu'à l'obstacle et donc a parcouru une distance $2d''$; Calculons la durée $\Delta t''$ nécessaire à cette propagation :

$$c = \frac{2d''}{\Delta t''} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta t'' = \frac{2d''}{c}$$

Application numérique :

$$\Delta t'' = \frac{2 \times 680}{340} = 4,00 \text{ s}$$

L'affirmation est donc fausse.

2.1. Un milieu dispersif est un milieu dans lequel la célérité de l'onde dépend de la fréquence :

$$c = c(f)$$

L'air est un milieu non dispersif pour la propagation du son, dans un (très) large domaine de fréquences.

2.2.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \Leftrightarrow \quad c = \lambda f$$

2.2.2. Utilisons la formule précédente pour éliminer λ et λ' de l'expression (1) proposée dans l'énoncé :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{et} \quad \lambda' = \frac{c}{f'}$$

où la célérité c du son dans l'air est une constante (absence de dispersion). On reporte dans l'expression (1) :

$$\lambda' = \lambda - vT \quad \Rightarrow \quad \frac{c}{f'} = \frac{c}{f} - vT$$

Il faut aussi éliminer T dans cette formule. L'énoncé indique que T est l'intervalle de temps pendant lequel le son parcourt la distance λ. L'énoncé redonne ainsi une des définitions de la période spatiale λ, T étant alors la période temporelle, inverse de la fréquence f du son :

$$T = \frac{1}{f}$$

On remplace dans l'expression précédente :

$$\frac{c}{f'} = \frac{c}{f} - \frac{v}{f}$$

Ainsi on obtient une formule qui ne fait intervenir que c, v, f et f'. Il reste encore à isoler f' pour obtenir une formule identique à celle proposée par l'énoncé :

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \quad \frac{c}{f'} = \frac{c-v}{f} \\ &\Leftrightarrow \quad \frac{f'}{c} = \frac{f}{c-v} \\ &\Leftrightarrow \quad f' = f\frac{c}{c-v} \qquad \text{c. q. f. d.} \end{aligned}$$

2.2.3. Le rapport multipliant f est supérieur à un :

$$c > c - v \quad \text{donc} \quad \frac{c}{c-v} > 1$$

Par suite, $f' > f$: le son est de fréquence plus élevée, donc plus aigu.

2.3.1. On procède par mimétisme avec la situation précédente. Le véhicule s'éloignant au lieu de s'approcher, sa vitesse relative par rapport à l'observateur est opposée, donc on change « simplement » $-v$ en $+v$ dans les formules, sans démonstration.
Pour la longueur d'onde λ'' perçue :

$$\lambda'' = \lambda + vT$$

et pour la fréquence f'' perçue :

$$f'' = f\frac{c}{c+v}$$

2.3.2. La situation présente est opposée à la situation précédente ; par suite, le son est de fréquence plus faible $f'' < f$, donc plus grave.

2.4. Transformons l'expression trouvée à la question **2.2.2** pour exprimer v :

$$\begin{aligned} f' = f\frac{c}{c-v} \quad &\Leftrightarrow \quad c - v = c\frac{f}{f'} \\ &\Leftrightarrow \quad -v = c\frac{f}{f'} - c \\ &\Leftrightarrow \quad v = c\left(1 - \frac{f}{f'}\right) \end{aligned}$$

Application numérique :

$$v = 340 \times \left(1 - \frac{680}{716}\right) = 17,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Conversion des mètres par seconde en kilomètres par heure, avec l'arrondi à l'unité demandé :

$$v = 17,1 \times \frac{3\,600}{1\,000} = 62 \text{ km/h}$$

⋆⋆⋆

Grille DS1 TS1 2012

Conventions : ■ = 1 point
⊠ = 1/2 point
+❑ = Bonus 1/4 point
−❑ = Malus 1/4 point
❑ = 0 point

Malus pour les chiffres significatifs **- ...**

❑ Malus
❑ Malus
❑ Malus
❑ Malus

1 – Le Laser **.../16**

❑ Diffraction
❑ $\nu_{\mathrm{B}} = c/\lambda_{\mathrm{B}} = 7,41 \times 10^{14}$ Hz, tor
❑ $\nu_{\mathrm{B}} = c/\lambda_{\mathrm{B}} = 7,41 \times 10^{14}$ Hz, tor
❑ $\lambda_{\mathrm{B}} < \lambda_{\mathrm{D}} < \lambda_{\mathrm{CD}}$
❑ $\theta \simeq L/2D$, démontré
❑ $\theta \simeq L/2D$, démontré
❑ $\theta = \lambda_{\mathrm{D}}/a$ + unités
❑ $\lambda_{\mathrm{D}} = La/2D$, démontré
❑ $\lambda_{\mathrm{D}} = \lambda_{\mathrm{B}} L/L'$ ou méthode équivalente
❑ $\lambda_{\mathrm{D}} = 0,65\ \mu$m
❑ On a bien $\lambda_{\mathrm{B}} < \lambda_{\mathrm{D}}$
❑ $n = c/v$
❑ ν (et donc T) non modifiés
❑ $\lambda_{\mathrm{C}} = \lambda/n$, démontré
❑ $\lambda_{\mathrm{C}} = \lambda/n$, démontré
❑ $\lambda_{\mathrm{C}} = 503$ nm

2 – Radar **.../16**

❑ 1.1, Faux, longitudinale
❑ 1.2, Faux, sans transport de matière
❑ 1.3, Faux, λ dépend du milieu, justifié
❑ 1.4, Faux, $\Delta t = \mathrm{SM}/c = 0,15$ s
❑ 1.5, Faux, $3\lambda = 1,50$ m
❑ 1.6, Vrai, d'/λ est entier
❑ 1.7, Faux, $\Delta t'' = 2d''/c = 4,00$ s
❑ Air non dispersif pour le son
❑ $c = \lambda f$
❑ $f' = fc/(c - v)$ démontré
❑ $f' = fc/(c - v)$ démontré
❑ $c/(c - v) > 1$ donc $f' > f$ donc plus aigu
❑ λ'' et f' avec des $+v$, sans démonstration
❑ $c/(c + v) < 1$ donc $f'' < f$ donc plus grave
❑ $v = c(1 - f/f')$ ou équivalent
❑ $v = 62\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$

Total 1 + 2 + Malus .../32

Note **.../20**

Grille DS1 TS1 2012

Conventions : ■ = 1 point
⊠ = 1/2 point
+❑ = Bonus 1/4 point
−❑ = Malus 1/4 point
❑ = 0 point

Malus pour les chiffres significatifs **- ...**

❑ Malus
❑ Malus
❑ Malus
❑ Malus

1 – Le Laser **.../16**

❑ Diffraction
❑ $\nu_{\mathrm{B}} = c/\lambda_{\mathrm{B}} = 7,41 \times 10^{14}$ Hz, tor
❑ $\nu_{\mathrm{B}} = c/\lambda_{\mathrm{B}} = 7,41 \times 10^{14}$ Hz, tor
❑ $\lambda_{\mathrm{B}} < \lambda_{\mathrm{D}} < \lambda_{\mathrm{CD}}$
❑ $\theta \simeq L/2D$, démontré
❑ $\theta \simeq L/2D$, démontré
❑ $\theta = \lambda_{\mathrm{D}}/a$ + unités
❑ $\lambda_{\mathrm{D}} = La/2D$, démontré
❑ $\lambda_{\mathrm{D}} = \lambda_{\mathrm{B}} L/L'$ ou méthode équivalente
❑ $\lambda_{\mathrm{D}} = 0,65\ \mu$m
❑ On a bien $\lambda_{\mathrm{B}} < \lambda_{\mathrm{D}}$
❑ $n = c/v$
❑ ν (et donc T) non modifiés
❑ $\lambda_{\mathrm{C}} = \lambda/n$, démontré
❑ $\lambda_{\mathrm{C}} = \lambda/n$, démontré
❑ $\lambda_{\mathrm{C}} = 503$ nm

2 – Radar **.../16**

❑ 1.1, Faux, longitudinale
❑ 1.2, Faux, sans transport de matière
❑ 1.3, Faux, λ dépend du milieu, justifié
❑ 1.4, Faux, $\Delta t = \mathrm{SM}/c = 0,15$ s
❑ 1.5, Faux, $3\lambda = 1,50$ m
❑ 1.6, Vrai, d'/λ est entier
❑ 1.7, Faux, $\Delta t'' = 2d''/c = 4,00$ s
❑ Air non dispersif pour le son
❑ $c = \lambda f$
❑ $f' = fc/(c - v)$ démontré
❑ $f' = fc/(c - v)$ démontré
❑ $c/(c - v) > 1$ donc $f' > f$ donc plus aigu
❑ λ'' et f' avec des $+v$, sans démonstration
❑ $c/(c + v) < 1$ donc $f'' < f$ donc plus grave
❑ $v = c(1 - f/f')$ ou équivalent
❑ $v = 62\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$

Total 1 + 2 + Malus .../32

Note **.../20**