

Travail demandé

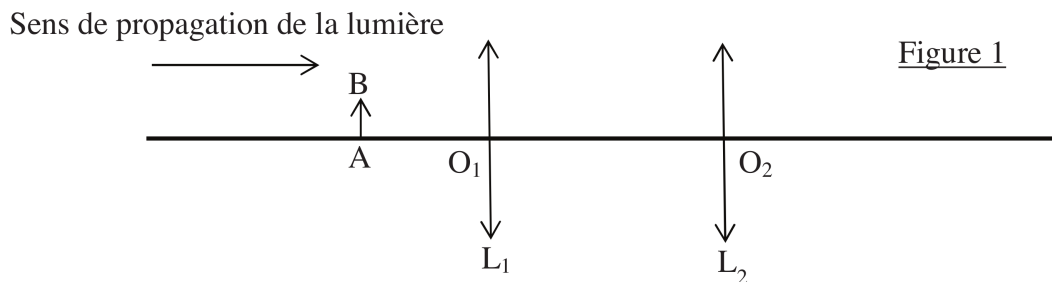
à rendre le 09/01/2026

Chaque étudiant rend une copie même s'il n'est pas interdit de chercher les exercices en groupe.

Problème 1 - Le microscope classique*Ce sujet est extrait de l'épreuve de physique A 2017 de la banque PT.*

Le microscope est modélisé sur la figure 1, par un système de deux lentilles minces convergentes, l'une constituant l'objectif (lentille L_1 de centre O_1 et de distance focale image $f'_1 = 5$ mm), et l'autre constituant l'oculaire (lentille L_2 de centre O_2 et de distance focale image $f'_2 = 15$ mm).

On fixe $\overline{O_1O_2} = D_0 = 120$ mm. On choisit le sens positif dans le sens de propagation de la lumière.



On rappelle la relation de conjugaison d'une lentille et l'expression du grandissement γ :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} .$$

I.1. Les relations précédentes sont valables à condition que les rayons lumineux satisfont les conditions de Gauss. Donner ces 2 conditions.

I.2. Si F'_1 est le foyer image de L_1 et F_2 le foyer objet de L_2 , on définit l'intervalle optique par la grandeur algébrique $\Delta = \overline{F'_1F_2}$. Exprimer Δ en fonction de f'_1 , f'_2 , D_0 , puis calculer sa valeur.

I.3. Un objet réel AB perpendiculaire à l'axe optique est éclairé et placé à une distance d de L_1 , à sa gauche, de façon à ce que l'image A'B' donnée par l'objectif, appelée image intermédiaire se trouve dans le plan focal objet de l'oculaire. L'observation se fait à l'œil placé au contact de l'oculaire.

a. Exprimer d en fonction de f'_1 et Δ , puis calculer sa valeur.

b. Exprimer le grandissement γ_1 induit par l'objectif en fonction de f'_1 et Δ , puis calculer sa valeur.

c. Quel est l'intérêt pour l'observateur de cette position de l'objet ?

d. Faire une construction géométrique faisant apparaître l'objet, l'image intermédiaire, ainsi que l'angle α' sous lequel est observée l'image finale à travers le microscope.

I.4. Le grossissement commercial du microscope est défini par $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ où α est l'angle sous lequel serait vu l'objet à l'œil nu placé à une distance $D = 250$ mm.

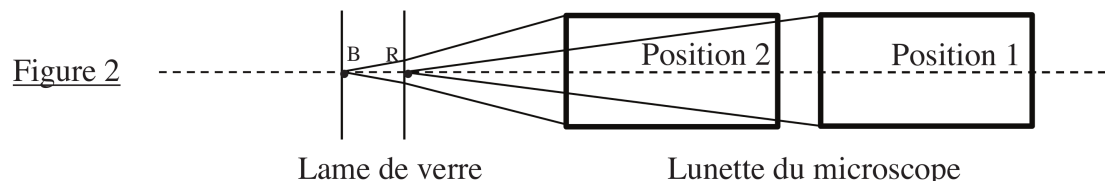
L'objet étant de très petite taille, ces deux angles seront bien sûr très faibles.

Exprimer G en fonction de Δ , D , f'_1 et f'_2 , puis calculer sa valeur.

I.5. On utilise ce microscope pour mesurer l'épaisseur e d'une mince lame de verre à faces parallèles, d'indice $n = 1.5$.

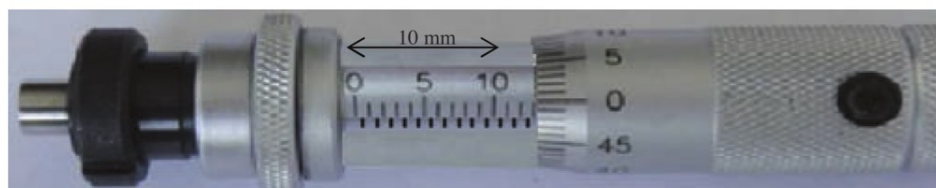
On colle une petite pastille bleue (B) sur la face gauche de la lame et une petite pastille rouge (R) sur sa face droite.

On positionne d'abord la lunette (ensemble objectif+oculaire) du microscope de façon à faire la mise au point sur la pastille rouge (Figure 2, Position 1). Puis, grâce à une vis micrométrique, on translate la lunette d'une distance ε , de façon à faire la mise au point sur l'image de la pastille bleue (Figure 2, Position 2) :



La figure 3 ci-dessous montre la position 2 de la vis micrométrique, la position 1 correspondant à la graduation 40 de la partie mobile.

Figure 3



a. Déterminer la valeur mesurée de ε en mm, avec une estimation de l'incertitude de mesure.

b. En tenant compte du phénomène de réfraction et en considérant les rayons lumineux très peu inclinés par rapport à l'axe optique, exprimer e en fonction de n et ε , puis calculer sa valeur.

II - Découverte de Proxima du Centaure

Il s'agit d'un extrait du concours Centrale-Supelec 2020 filière MP.

II Découverte de Proxima du Centaure

II.A – Première observation de l'étoile

L'étoile *Proxima Centauri* a été découverte en 1915 par l'astronome britannique Robert Innes, alors directeur de l'observatoire de l'Union à Johannesburg en Afrique du Sud. C'est une étoile de type naine rouge, de masse $M_E = 2,44 \times 10^{29}$ kg et de rayon $R_E = 9,81 \times 10^4$ km. Elle est située à $D_E = 3,99 \times 10^{13}$ km soit 4,22 années-lumière du Soleil.

Dans la suite du sujet, toutes les applications numériques seront faites à la longueur d'onde moyenne du visible $\lambda_{\text{obs}} = 600$ nm.

Q 13. Justifier, par un argument d'ordre de grandeur, que la distance entre la Terre et Proxima du Centaure peut être approximée à 4,22 années-lumière.

Pour voir l'étoile *Proxima Centauri*, un instrument d'optique est utilisé. Il est modélisé dans la suite par deux lentilles :

- une lentille convergente L_1 objectif, de centre optique O_1 , de foyer principal objet F_1 , de foyer principal image F'_1 et de distance focale image $f'_1 = 8$ m ;
- une lentille divergente L_2 de projection, de centre optique O_2 , de foyer principal objet F_2 , de foyer principal image F'_2 et de distance focale image $f'_2 = -0,02$ m.

Si le point objet A et le point image A' sont conjugués par la lentille L de focale f' et de centre O , d'après la Formule de Descartes on a

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$$

et le grandissement transversal est

$$\gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA}.$$

L'instrument d'optique est pointé vers l'étoile *Proxima Centauri*.

Q 14. Où est située l'image de l'étoile par la lentille L_1 , appelée image intermédiaire A_1B_1 ? Illustrer cette situation par un schéma.

Q 15. Déterminer l'expression de la taille de cette image intermédiaire A_1B_1 (non algébrique) en fonction du rayon R_E de l'étoile et des caractéristiques de la lentille objectif L_1 .

Q 16. La lentille de projection L_2 , divergente, sert à faire de l'image intermédiaire A_1B_1 une image définitive $A'B'$, réelle, non inversée et agrandie d'un facteur 4. Calculer la distance O_1O_2 pour respecter ces contraintes.

Q 17. Illustrer par un schéma la position de A_1B_1 , de $A'B'$ et de L_2 (sans représenter L_1).

Q 18. En 1915, l'image définitive $A'B'$ de l'étoile se formait sur une plaque photographique de dimension 24 mm \times 36 mm, composée de cristaux de 10 μ m de chlorure d'argent, précipité blanc qui noircit à la lumière. L'image définitive de l'étoile *Proxima Centauri* est-elle vue comme ponctuelle ou étendue sur la plaque photo ?

Q 19. À l'occasion du centenaire de la découverte de Proxima du Centaure, en 2015, la photo de l'étoile a été reprise avec l'instrument d'optique de l'époque mais la plaque photographique a été remplacée par un capteur CCD (Charge Coupled Device) de 100 millions de pixels, de taille identique à la plaque photo originelle. L'image définitive de l'étoile *Proxima Centauri* est-elle vue comme ponctuelle ou étendue sur le capteur photosensible ? L'efficacité quantique QE d'un capteur CCD donne le taux de transformation de la lumière en charge, soit la probabilité qu'un photon incident donne « naissance » à un électron dans le capteur. Pour la longueur d'onde étudiée, cette sensibilité quantique QE est de 30 %.

Q 20. Sachant que la puissance surfacique reçue sur Terre par le Soleil dans le visible est de 600 W·m⁻² et que la lentille d'entrée de l'instrument est de diamètre $D_1 = 50$ cm, de combien d'électrons sera composé le signal résultant de l'étoile pour une exposition de 12 minutes du capteur ? Quelle est la charge produite par le capteur ?

Q 21. La diffraction par la lentille d'entrée L_1 est-elle gênante pour les observations ?

II.B – Mesure de la distance entre la Terre et l'étoile

La parallaxe est l'effet du changement de position de l'observateur sur ce qu'il perçoit.

La parallaxe annuelle est, par définition, l'angle qui mesure le déplacement, au cours de l'année, de la position apparente, perçue depuis la Terre, d'une étoile proche par rapport aux étoiles lointaines (figure 4).

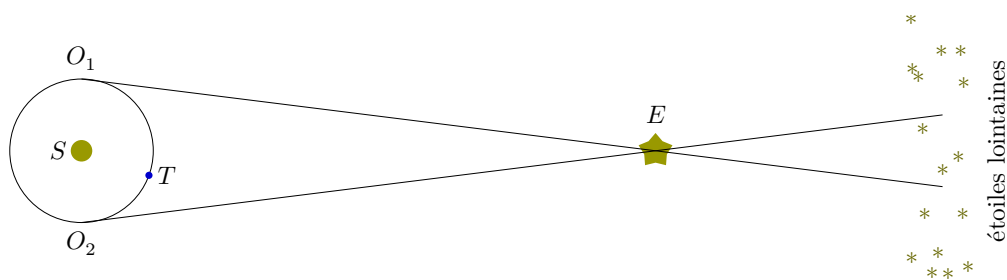


Figure 4 Schéma explicatif de la mesure de parallaxe solaire

Sur la figure 4, deux instants d'observation sont représentés par O_1 et O_2 .

Le satellite Hipparcos (High Precision Parallax Collection Satellite) a mesuré la parallaxe de $P_E = 1545$ millisecondes d'arc pour *Proxima Centauri*.

Q 22. Calculer, à partir de cette valeur de la parallaxe P_E , la distance séparant l'étoile *Proxima Centauri* du système solaire et comparer à la valeur donnée au début de cette partie.

Q 23. Pourquoi la distance entre la Terre et le Soleil varie-t-elle au cours de l'année ?

II.C – Mesure du rayon de l'étoile

En 2002, le VLT (Very Large Telescope) utilisa l'interférométrie pour mesurer le diamètre angulaire de *Proxima Centauri* : $\alpha \simeq 1,02 \pm 0,08$ milliseconde d'arc. Connaissant sa distance, obtenue par la méthode de la parallaxe, il est alors possible de déterminer son rayon.

II.C.1) L'étoile est d'abord supposée ponctuelle et l'instrument d'optique est pointée sur elle. L'étoile se situe à l'infini sur l'axe optique de l'instrument, elle est repérée par son centre S . Le dispositif d'interférométrie est modélisé par deux trous d'Young de taille identique, respectivement en T_1 et T_2 , séparés d'une distance a réglable. Ce dispositif est placé devant la lentille convergente L_1 de l'instrument d'optique. Pour simplifier, on ne tiendra pas compte dans cette partie de la seconde lentille L_2 et les observations sont donc effectuées dans le plan de l'image intermédiaire. Un point M dans ce plan est repéré par son abscisse x (figure 5).

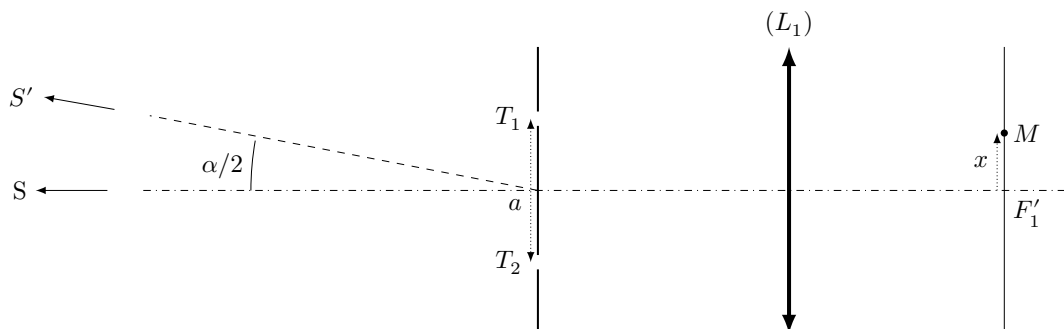


Figure 5 Schéma du dispositif d'interférométrie pour la mesure du rayon de l'étoile *Proxima Centauri*

Q 24. Faire un schéma des deux rayons lumineux passant par T_1 et T_2 qui convergent vers le point M . Représenter la différence de marche entre ces deux rayons sur ce schéma.

Q 25. Établir l'expression de l'ordre d'interférence $p_S(M)$, produit par la source S au point M .

Q 26. Décrire alors la figure d'interférences.

Q 27. En notant I_0 l'intensité moyenne, donner, sans démonstration, l'expression de l'intensité lumineuse $I(M)$ dans le plan d'observation.

II.C.2) L'étoile est à présent modélisée comme une source étendue vue sous un diamètre angulaire α . On considère un autre point source S' à la périphérie de l'étoile (figure 5).

Q 28. Faire un schéma des deux rayons lumineux issus de S' , passant par T_1 et T_2 et qui convergent vers le point M . Représenter la différence de marche entre ces deux rayons sur ce schéma.

Q 29. Établir l'expression de l'ordre d'interférence $p_{S'}(M)$ produit par la source S' au point M .

Q 30. En déduire l'expression de la plus petite valeur de a qui conduit au brouillage de la figure d'interférence produite par les deux sources incohérentes S et S' .

Q 31. Faire l'application numérique et commenter.

Q 32. Expliquer qualitativement pourquoi le raisonnement précédent, utilisant deux sources ponctuelles l'une située au centre et l'autre sur le bord apparent de l'étoile, rend compte des observations obtenues avec l'objet étendu qu'est la véritable étoile.

Problème III - Surveillance sismique d'un site nucléaire

Ce sujet est extrait de l'épreuve de physique CCS MP 2016.

III Surveillance sismique d'un site nucléaire

Un sismomètre est destiné à mesurer les mouvements du sol. Il est constitué d'un bâti fixé au sol dans lequel une masse peut osciller en cas de sollicitation sismique. Dans le cas d'un sismomètre classique une bobine solidaire de la masse mobile est plongée dans un champ magnétique ce qui permet de détecter ses mouvements et de mesurer leur vitesse. Pour améliorer la précision, des capteurs optiques peuvent être utilisés. Les plus précis sont les capteurs interférométriques, qui sont plutôt utilisés en laboratoire et servent aussi d'étalon pour les chaînes de mesure de déplacement ou de vitesse d'un sismomètre mécanique plus classique. L'objet en mouvement ou le capteur à étalonner est muni d'un réflecteur qui est inclus dans un interféromètre (type Michelson). Le déplacement de l'objet est donc transformé en déplacement de franges d'interférence et un compteur de franges permet de connaître le déplacement dû aux vibrations avec une très grande précision. Un schéma simplifié de ce genre de dispositif est représenté sur la figure 9 où O est un point fixe du laboratoire et O' est lié à la table.

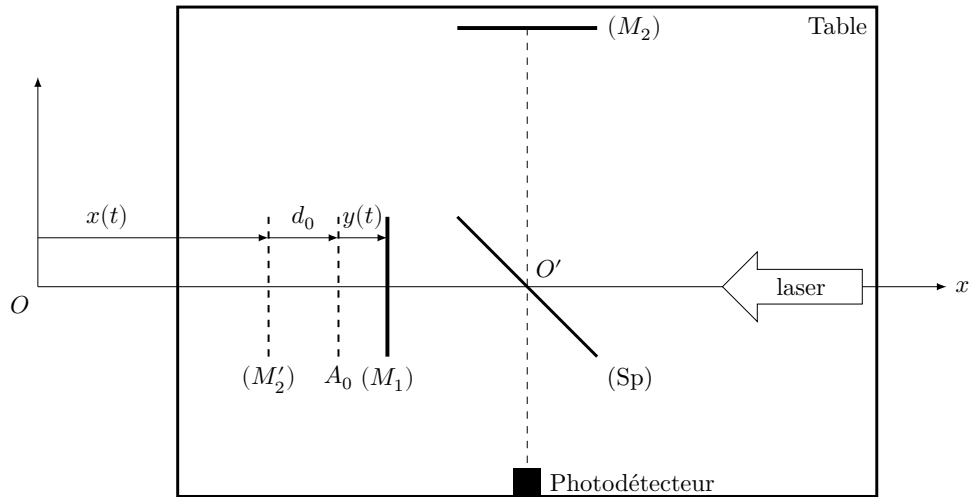


Figure 9 Interféromètre de Michelson dans un sismomètre optique

La lame séparatrice (Sp) a un facteur de réflexion en énergie égal à $1/2$ et un facteur de transmission en énergie égal à $1/2$ également. Elle est supposée infiniment fine (compensée par une lame compensatrice adéquate). Le dispositif est éclairé par un laser hélium-néon : la lumière issue de ce laser est assimilée à une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ , se propageant selon (Ox). L'interféromètre est fixé sur une table horizontale. Le miroir (M_2) est fixe par rapport à cette table alors que le miroir (M_1) est libre de se déplacer le long de l'axe (Ox). Les deux miroirs (M_1) et (M_2) forment un angle de $\pi/2$. On note (M'_2) le symétrique du miroir (M_2) par rapport à la séparatrice (Sp).

La position de la table, suivant l'axe (Ox), par rapport au laboratoire est repérée par l'abscisse $x(t)$ de (M'_2). Au repos, en l'absence de vibration de la table, cette abscisse vaut X_0 et le miroir (M_1) est situé en A_0 (point fixe dans le référentiel de la table) à une distance d_0 de (M'_2).

On impose à la table une vibration sinusoïdale dans la direction (Ox), d'amplitude X_M et de pulsation ω . Cette vibration provoque un déplacement $y(t) = Y_M \cos(\omega t)$ du miroir (M_1) par rapport à la table. On admet que la connaissance de $y(t)$ permet de déterminer $x(t)$. L'objectif de cette partie est de déterminer Y_M (on ne cherchera pas à établir le lien entre Y_M et X_M).

III.A – Exprimer la différence de marche $\delta(t)$ entre l'onde lumineuse reçue par le photodétecteur et ayant été réfléchi par le miroir (M_2) et l'onde ayant été réfléchi par le miroir (M_1).

III.B – Le photodétecteur délivre un courant d'intensité $I(t)$ proportionnelle à la puissance lumineuse reçue. Montrer que $I(t) = \frac{1}{2} I_{\max} (1 + \cos(\phi(t)))$, avec $\phi(t) = \Phi_0 + \frac{4\pi}{\lambda} y(t)$. Exprimer Φ_0 .

III.C – La détermination de $y(t)$ est liée à la mesure sans ambiguïté et avec une bonne sensibilité de la phase $\Phi(t)$. La phase $\Phi(t)$ du signal reçu est composée d'un terme constant Φ_0 et d'un terme harmonique. Le terme continu rend compte de la configuration de l'interféromètre en l'absence de secousse sismique. La sensibilité de la détermination de $y(t)$ sera liée à la valeur de Φ_0 , comme le montre la figure 10, où figurent deux points particuliers Q et R (dont la position est liée à la valeur de Φ_0).

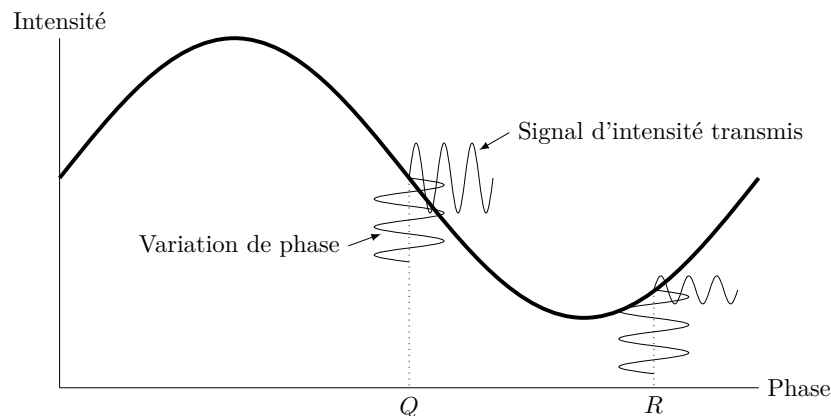


Figure 10

Pour quelle(s) valeur(s) de Φ_0 la sensibilité $\frac{dI}{d\phi}$ de la mesure sera-t-elle optimale ?

III.D – On choisit pour toute la suite un réglage tel que $d_0 = \lambda/8$. La figure 11 donne les enregistrements $I(t)/I_{\max}$ obtenus pour une vibration de la table de fréquence f . Les deux graphes correspondent à la même expérience, celui du bas présente un agrandissement d'une partie de celui du haut.

Dans cette sous-partie, on détaillera les raisonnements suivis.

III.D.1) Aux points A et B , le miroir mobile (M_1) rebrousse chemin. De quelle quantité $\Delta\delta$, en fonction de Y_M , a varié la différence de marche δ entre les instants t_A et t_B correspondant à ces deux points ?

III.D.2) Déterminer la fréquence f de la vibration appliquée au système.

III.D.3) Exprimer $\Delta\delta$ en fonction de λ .

III.D.4) Donner alors la valeur de Y_M .

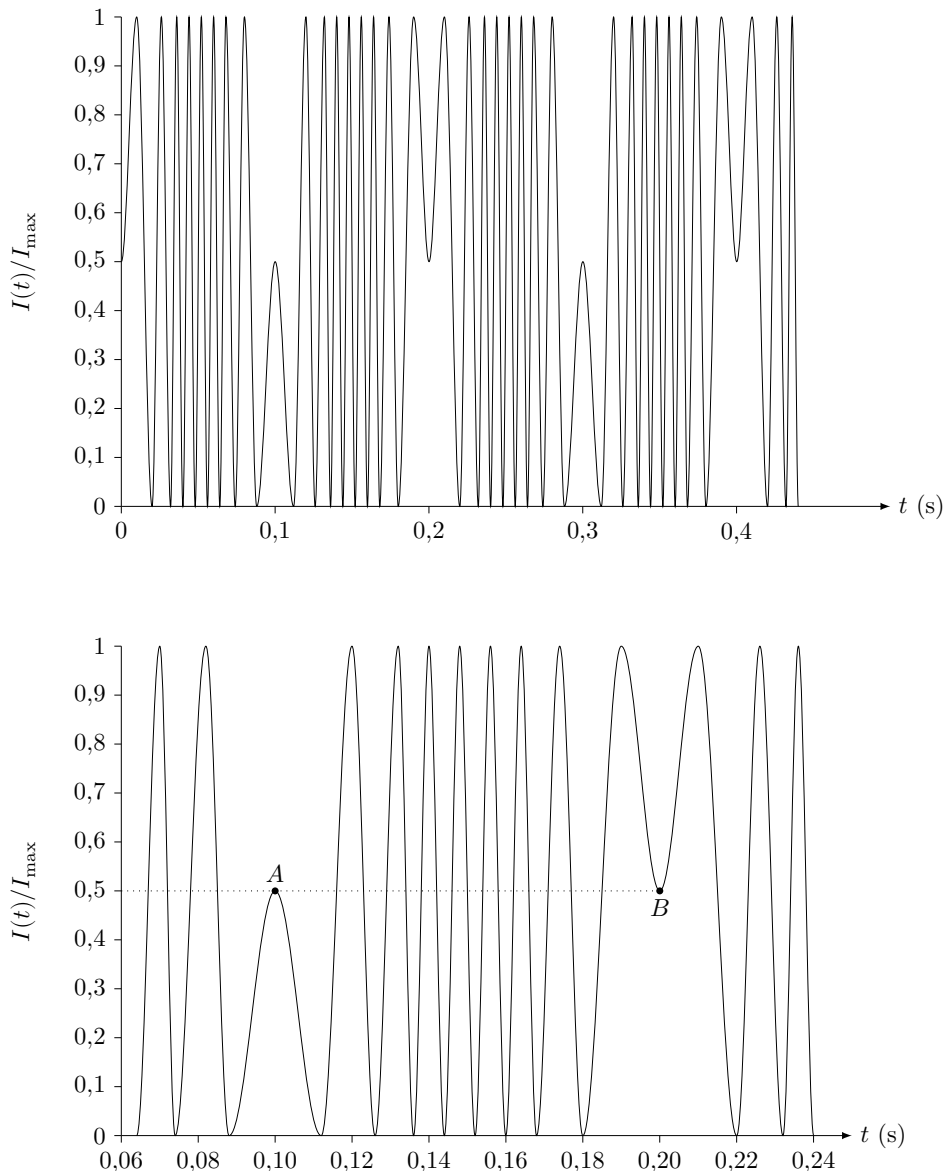


Figure 11

III.E – Les figures 12 et 13 donnent les enregistrements $I(t)/I_{\max}$ obtenus pour des vibrations de la table de fréquence f identique à la précédente, mais d'amplitudes légèrement différentes.

III.E.1) Donner la valeur de Y_M dans le cas de la figure 12.

III.E.2) Donner la valeur de Y_M dans le cas de la figure 13.

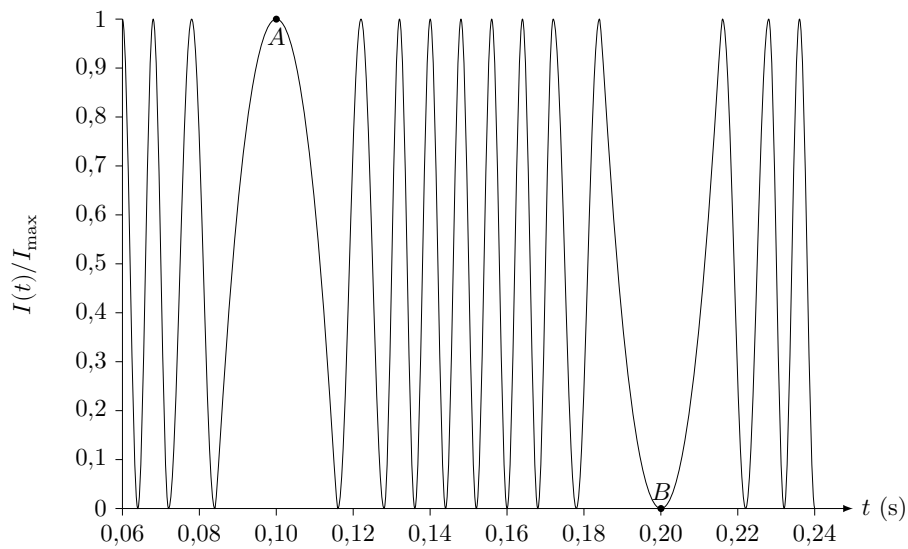


Figure 12

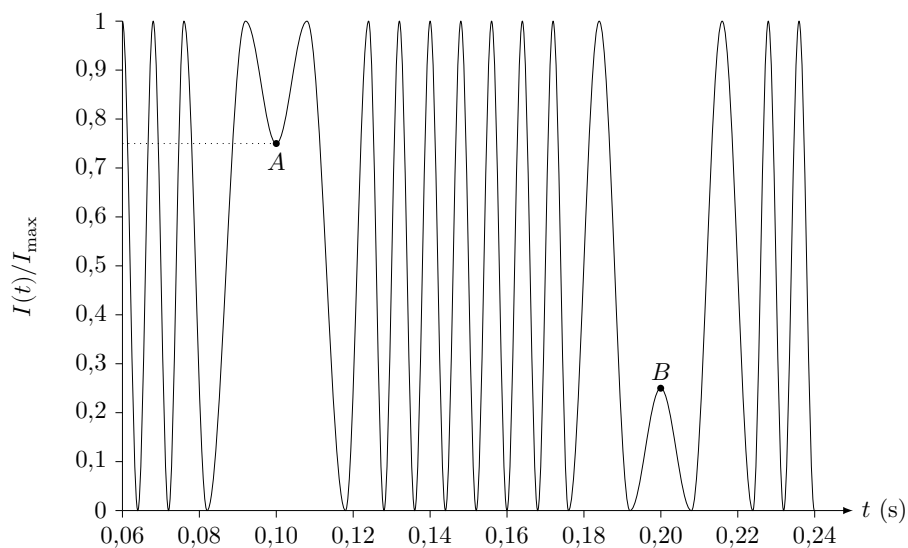


Figure 13