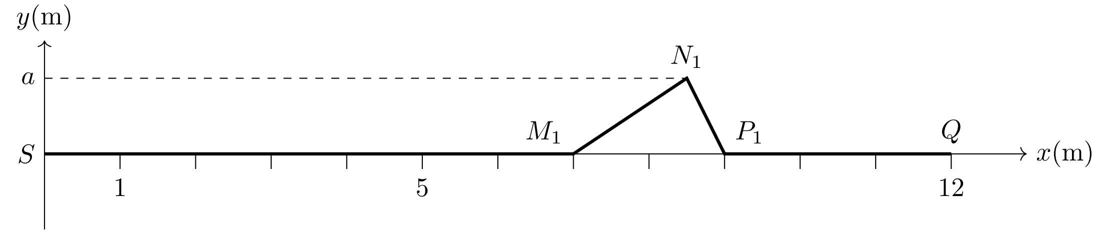
TD9 : Ondes

Exercice 1 : Onde progressive le long d'une corde

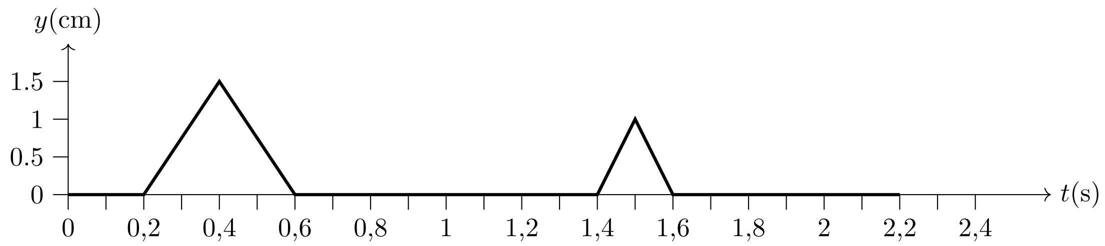
On étudie la propagation sans amortissement d'une perturbation le long d'une corde élastique. Au temps $t = 0$, le front de l'onde quitte l'extrémité S de la corde. On trace ci-dessous la forme de la corde au temps $t_1 = 2{,}3\,\text{s}$.



1. Calculer, en la justifiant, la célérité c de l'onde qui se déplace le long de la corde.
2. Pendant combien de temps un point de la corde est-il mis en mouvement par le passage de l'onde ?
3. Au temps t_1, quels sont les points de la corde qui s'élèvent ? Quels sont ceux qui descendent ?
4. Représentez sur le graphique l'allure de la corde à $t_2 = 1s$.
5. Tracez l'évolution temporelle de la position de la corde au point Q($x = 12\,\text{m}$). On fera apparaître sur le graphique la valeur de t aux instants où le mouvement de la corde est modifié.

Exercice 2 : Impulsions sur une corde tendue

On pince à deux reprises une corde horizontale tendue, initialement immobile. On génère ainsi deux perturbations de la hauteur moyenne de la corde. On repère les positions sur la corde grâce à un axe (Ox) horizontal et sa hauteur par un axe (Oy) vertical dont l'origine correspond à la hauteur de la corde à l'équilibre. La vitesse de propagation des perturbations est $v = 2\,\text{m/s}$. La première perturbation est émise à $t = 0$. La figure ci-dessous représente les variations de hauteur de la corde en un point M donné au cours du temps.



1. Déterminer la longueur de chaque perturbation sur la corde.
2. Quelle est la distance d du point M à la source O des perturbations ?
3. Quelle est la distance entre les deux fronts des perturbations ?
4. Représenter l'évolution temporelle de la hauteur de la corde au point M' situé à la distance $d' = 1\,\text{m}$ de la source O.
5. Dessiner l'allure de la corde à $t = 2\,\text{s}$.

Exercice 3 : Ondes sismiques

Lors d'un tremblement de terre, deux types d'ondes sont générées, des ondes longitudinales (P), et des ondes transversales (S) qui se propagent avec des célérités différentes notées respectivement $c_p = 8{,}0\,\text{km}\,\text{s}^{-1}$ et $c_s = 4{,}5\,\text{km}\,\text{s}^{-1}$. Un sismographe qui enregistre ces ondes note que les premières ondes P arrivent 3 minutes avant les premières ondes S.

1. À quelle distance l'épicentre du tremblement de Terre se trouve-t-il ?
2. Comment pourrait-on localiser précisément l'épicentre ?

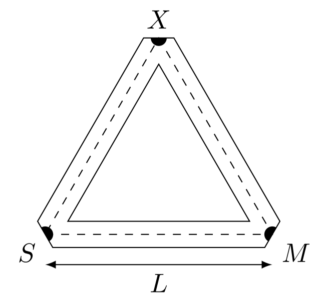
Exercice 4 : Effet Doppler

L'effet Doppler correspond au décalage de la fréquence d'une onde lorsque l'émetteur et le récepteur sont en mouvement relatif. Une source sonore émet une onde sinusoïdale de célérité c à la fréquence f dans la direction x. Un observateur situé en M et animé d'une vitesse v suivant le même axe x reçoit le son.

1. Écrire la fonction représentant l'onde émise par la source dans la direction des x croissants.
2. Quelle est la position $x_M(t)$ de l'observateur au cours du temps ?
3. Écrire la fonction qui représente l'onde reçue par l'observateur en mouvement.
4. Que vaut le fréquence f' entendue par l'observateur en fonction de f, v et c ?
5. Comment est modifiée le son que l'on perçoit lorsque l'on s'approche de sa source ? Que se passe-t-il si c'est la source sonore qui bouge ?

Exercice 5 : Interférences dans un tube triangulaire

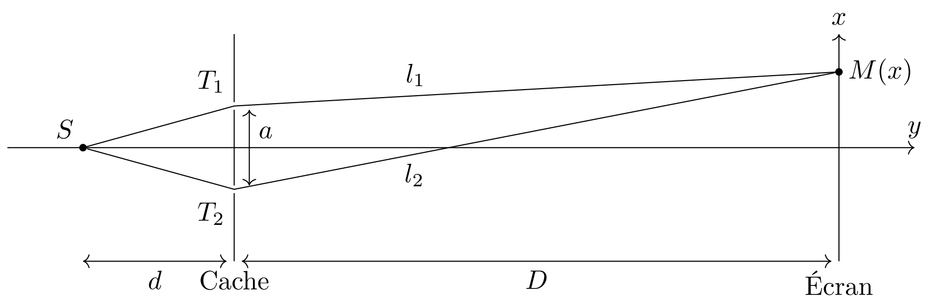
On considère la configuration représentée sur la figure ci-contre. Dans un triangle équilatéral de côté L, un haut parleur en S émet un son à une fréquence ν, qui ensuite se propage à la vitesse v_s. En faisant varier cette fréquence, on constate une variation de l'intensité du son perçu par le micro en M. En X, on suppose une réflexion parfaite du son.



1. Expliquer qualitativement pourquoi il s'agit d'un phénomène d'interférences.
2. Exprimer, en fonction de L et de la longueur d'onde λ, la différence de phase $\Delta\varphi_1$ entre la source S et le micro M pour l'onde qui parcourt le chemin direct entre ces deux points.
3. Donner l'expression (en fonction des mêmes quantités qu'à la question 2) de la différence de phase due au trajet parcouru $\Delta\varphi_{SM}$ entre la source S et le point M pour l'onde qui passe par X.
4. Lors de la réflexion (totale) en X, il y a un déphasage $\Delta\varphi_r = \pi$. Donner finalement l'expression pour la différence de phase $\Delta\varphi_2$ entre S et M pour l'onde qui est réfléchie en X.
5. À quelle condition sur $\Delta\varphi_1$ et $\Delta\varphi_2$ obtient-on un maximum d'intensité en M ? Un minimum d'intensité en M ?
6. Étant donné que $L = 25\,\text{cm}$, et que la vitesse du son $v_s = 300\,\text{m/s}$, déterminer la plus basse fréquence ν qui donne un maximum d'intensité en M.

Exercice 6 : Trous d'Young

Une source lumineuse S émet une onde sinusoïdale de longueur d'onde dans le vide λ_0 en direction d'un cache situé à une distance d percé de deux trous de petite taille espacés d'une distance a. On suppose que chacun des trous renvoie l'onde dans toutes les directions et notamment vers un écran situé à une distance D des trous. On suppose que $a \ll D$



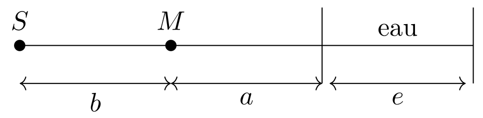
1. Les ondes issues des deux trous produisent des interférences. Expliquer qualitativement pourquoi on observe ce phénomène, et comment il se manifeste dans le cas présent.
2. Calculer la différence de marche δ entre les ondes issues des deux trous arrivant au point M repéré par sa distance x à l'axe y (en supposant $x \ll D$). On rappelle que si $x \ll 1$ alors $\sqrt{1+x} \simeq 1 + x/2$.
3. En déduire l'amplitude de l'onde résultante (en supposant que les deux ondes qui interferent ont la même amplitude) en $M(x)$. On rappelle la formule de Fresnel donnant l'amplitude Y résultant de la superposition de deux ondes de même fréquence et d'amplitudes A et B, déphasées de $\Delta\varphi$:

$$Y = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB\cos(\Delta\varphi)} \tag{1}$$

4. L'intensité lumineuse est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde lumineuse. Déterminer l'expression de l'intensité lumineuse $I(x)$ et tracer son allure.
5. Quel phénomène explique que chacun des trous ré-émette l'onde incidente dans toutes les directions ? Quelle doit être l'ordre de grandeur de la taille des trous ?

Exercice 7 : Bulle de savon

Considérons une bulle de savon éclairée par une source S d'onde lumineuse monochromatique de longueur d'onde dans le vide λ_0. La bulle est constituée d'un film d'eau d'épaisseur e. Une partie de la lumière incidente est réfléchie à l'interface air-eau puis une seconde partie est réfléchie à l'interface eau-air. Lors de sa réflexion sur l'interface air-eau, l'onde subit un déphasage supplémentaire de π.



1. Expliquer pourquoi on observe un phénomène d'interférences en M.
2. La célérité de la lumière dans l'eau vaut c/n_e où c est la célérité de la lumière dans le vide. Combien vaut la longueur d'onde λ_e dans l'eau en fonction de λ ? Exprimer les nombres d'onde dans l'air (k_a) et dans l'eau (k_e) en fonction de λ et n_e.
3. Montrer que les phases $\varphi_1(t)$ et $\varphi_2(t)$ des ondes se réfléchissant sur la première et la seconde interface sont données par :
$$\varphi_1(t) = k_a(2a+b) - \omega t + \pi$$
$$\varphi_2(t) = k_a(2a+b) + 2\,e\,k_e - \omega t$$
En déduire le déphasage $\Delta\varphi$ entre les deux ondes qui interfèrent en M.
4. Pour quelles longueurs d'ondes (dans l'air) obtient-on des interférences constructives ? destructives ?
5. A.N. : Pour $e = 0{,}25\,\mu\mathrm{m}$ et n_e=1,4, quelles sont les longueurs d'onde du spectre visibles pour lesquelles les interférences sont constructives ? destructives ? De quelle couleur apparaît la bulle ?
6. Expliquez qualitativement pourquoi une bulle plus épaisse ($e > 1\,\mu\mathrm{m}$) apparaît blanche.

Exercice 8 : Battements

On place au point O de l'axe x deux haut parleurs émettant des sons à deux fréquences légèrement différentes f_1 et f_2 en direction d'une personne placé en $M(x_M)$ qui écoute.
1. Écrire la fonction représentant l'onde émise par chacun des deux haut-parleurs sur l'axe x.
2. Écrire la fonction représentant l'onde sonore reçue par la personne sous la forme d'un produit de deux fonctions trigonométriques.
3. Pour des fréquences $f_1 = 2000\,\mathrm{Hz}$ et $f_2 = 2001\,\mathrm{Hz}$, décrire le son perçu par la personne qui écoute.
4. Tracez l'allure de l'évolution temporelle de l'onde sonore perçue.

Exercice 9 : Stroboscopie

On cherche à étudier le mouvement d'une roue en l'éclairant avec un stroboscope. En diminuant progressivement la fréquence du stroboscope depuis une valeur très élevée on observe pour la première fois la roue pratiquement immobile pour une fréquence de 40 Hz.
1. Peut-on déterminer le sens de rotation de la roue avec ce stroboscope ? Expliquer comment.
2. La fréquence de 40 Hz est légèrement inférieure à la fréquence de stabilisation, pour laquelle la roue apparaît fixe. À cette fréquence de 40 Hz, on constate que la roue semble tourner lentement sur elle-même. En suivant le mouvement d'une petite marque, on constate qu'il lui faut $T_A = 30\,\mathrm{s}$ pour effectuer un tour complet. Quelle est précisément la fréquence de rotation de la roue ?
3. Quelles sont les fréquences permettant de stabiliser le mouvement de la roue ? Comment peut-on être sûr que la première fréquence permettant de stabiliser le mouvement de la roue correspond à la fréquence maximale ?

Exercice 10 : Quelques petits problèmes

1. Supposons que le son puisse se propager dans l'espace, vous criez une question à un ami sur la Lune, il vous répond, combien de temps met sa réponse à arriver ?
2. Jim et Bob jouent au tennis, à quelle distance du court doit-on se trouver pour entendre Jim frapper la balle lorsqu'on voit Bob la frapper (et inversement) ?
3. On dirige un pointeur laser vers la Lune, quelle est l'ordre de grandeur de la taille de la tâche lumineuse sur la Lune ?