

Physique : ondes et optique

OSSIK · COURS 11-03 · LE CORRIGÉ · RÉVISION 0.5

PASS - majeure santé - classement d'après la maquette publique de Paris Cité, sans lien avec l'université. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ta faculté fait foi.

Sommaire du cours

Partie 1 · Ondes, acoustique et formation des images	1
Partie 2 · Optique géométrique : réfraction, lentilles et instruments	6
Partie 3 · Oscillations, interférences et diffraction	11

Partie 1 · Ondes, acoustique et formation des images

Approfondissements autonomes : 11-03, partie 2 construit les conventions de réfraction et de lentilles ; 11-03, partie 3 développe oscillations, interférences et diffraction. Ce chapitre conserve la vue d'ensemble reliant ondes et images.

Prérequis et objectifs

Connaître sinusoides, angles, rapports et conversions de fréquence. Un rayon géométrique et une onde ne représentent pas le même niveau de description.

À l'issue de ce cours, vous devez pouvoir :

- Relier célérité, fréquence et longueur d'onde.
- Calculer un niveau acoustique et un trajet.
- Construire une image avec les conventions d'une lentille.

Fondements du thème

Propager une perturbation

Une onde transporte de l'énergie et de l'information sans transporter nécessairement la matière sur toute la distance parcourue. Une onde périodique possède une fréquence $f = 1/T$ et une longueur d'onde $\lambda = v/f$. Une onde mécanique nécessite un milieu ; une onde électromagnétique peut se propager dans le vide. La fréquence est fixée par la source et se conserve lors du passage stationnaire d'une interface, tandis que vitesse et longueur d'onde peuvent changer.

L'intensité représente une puissance par surface. Pour une source ponctuelle isotrope sans absorption, elle décroît en $1/r^2$. Le niveau d'intensité sonore vaut $L = 10 \log_{10}(I/I_0)$, avec une référence I_0 annoncée. Multiplier l'intensité par dix ajoute 10 dB ; la doubler ajoute environ 3 dB. On ne somme pas directement les niveaux en décibels de sources indépendantes : on additionne d'abord les intensités.

Réfraction, lentilles et limites de résolution

L'indice optique $n = c/v$ compare la vitesse de la lumière dans le vide à celle dans le milieu. La loi de Snell-Descartes s'écrit $n_1 \sin i = n_2 \sin r$, les angles étant mesurés à la normale. La réflexion totale n'est possible que du milieu d'indice le plus élevé vers celui d'indice inférieur et au-delà de l'angle critique. La diffraction devient importante quand une ouverture est de taille comparable à la longueur d'onde ; elle limite la résolution même d'une optique parfaite.

Une lentille mince convergente possède une distance focale positive dans la convention usuelle. Sa vergence vaut $1/f'$ en m^{-1} , appelée dioptrie. Les relations de conjugaison exigent une convention de distances orientées ; ne pas mélanger une formule signée et des distances toutes positives. L'œil forme une image sur la rétine. L'accommodation modifie la puissance du cristallin. Dans le modèle élémentaire, la myopie est corrigée par une lentille divergente et l'hypermétropie par une lentille convergente, mais l'examen individuel dépasse ce cours.

La polarisation décrit l'orientation des oscillations d'une onde transverse. Pour une lumière polarisée rectilignement traversant un analyseur idéal, la loi de Malus donne $I = I_{\max} \cos^2 \theta$. Le contraste optique peut dépendre de l'absorption, de la diffusion ou de la phase : une image n'est pas seulement une carte de « transparence ».

Développements et raisonnements

Phase et propagation

Une onde sinusoïdale progressive peut s'écrire $y(x,t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$. L'amplitude A décrit l'importance de la perturbation ; $\omega = 2\pi f$ indique sa rapidité temporelle et $k = 2\pi/\lambda$ sa variation spatiale. Une phase constante se déplace à $c = \omega/k = \lambda f$. Les particules du milieu oscillent autour de leur position moyenne : la propagation du signal n'exige pas qu'une même particule traverse toute la distance.

La fréquence est fixée par la source. Lorsqu'une onde passe dans un autre milieu sans modulation temporelle de l'interface, sa fréquence reste la même tandis que sa célérité et sa longueur d'onde peuvent changer. Une onde sonore ne traverse pas le vide, car elle nécessite un milieu matériel. Une onde électromagnétique peut s'y propager. Les modèles d'atténuation et de réflexion diffèrent selon l'onde et le milieu.

Intensité et logarithmes

L'intensité représente une puissance par surface. Pour une source ponctuelle isotrope sans absorption, la même puissance se répartit sur une sphère de surface $4\pi r^2$: I est proportionnelle à $1/r^2$. Doubler la distance divise l'intensité par quatre. Le niveau $L = 10 \log_{10}(I/I_0)$ transforme ce rapport en différence : une multiplication de l'intensité par dix ajoute 10 dB ; par deux, environ 3 dB.

Le coefficient 20 utilisé pour une amplitude de pression vient du fait que l'intensité est proportionnelle au carré de cette amplitude dans les mêmes conditions de milieu. Il ne faut pas appliquer $20 \log$ à une intensité. Deux sources cohérentes peuvent interférer ; additionner leurs intensités comme si elles étaient indépendantes peut alors être incorrect.

Une convention optique complète

Pour une lentille mince convergente, adoptons des distances algébriques le long d'un axe orienté dans le sens de propagation. La relation est $1/OA' - 1/OA = 1/f$. Un objet réel placé avant la lentille a OA négatif ; f est positif. Le grandissement est $\gamma = OA'/OA$. Un grandissement négatif signifie une image renversée. Énoncer cette convention évite d'apprendre plusieurs formules apparemment incompatibles.

La vergence vaut $1/f$ en mètres et s'exprime en dioptries. Deux lentilles minces accolées additionnent approximativement leurs vergences. Cette approximation suppose un faible espacement ; des systèmes séparés exigent davantage d'informations. La diffraction limite la séparation de détails même si les défauts géométriques sont corrigés.

Phénomène	Invariant ou relation	Piège
Changement de milieu	Fréquence conservée	Imposer λ constante
Propagation sphérique	Puissance totale conservée sans pertes	Intensité constante
Niveau acoustique	Logarithme d'un rapport	Additionner des dB comme des puissances
Image réelle convergente	Distances signées	Oublier le renversement

Atelier de calcul et analyse de sensibilité

Une onde de 2,0 MHz se propage à 1500 m/s. Sa longueur d'onde vaut 0,750 mm. Dans un second milieu à 3000 m/s, elle devient 1,50 mm si la fréquence reste identique. Un écho reçu après 80 μ s dans le premier milieu provient d'une profondeur de $1500 \times 80 \times 10^{-6}/2 = 0,060$ m. Le facteur deux distingue la profondeur du trajet total.

Une intensité acoustique passe de 2×10^{-6} à 8×10^{-6} W/m². L'augmentation de niveau vaut $10 \log_{10}(4) = 6,021$ dB. Une hausse de 6 dB correspond donc ici à une intensité quadruplée et à une amplitude de pression doublée si l'impédance ne change pas. Ces deux multiplicateurs ne sont pas interchangeables.

Une lentille de focale image +10 cm observe un objet situé à -30 cm. La conjugaison donne $1/OA' = 10 - 3,333 = 6,667$ m⁻¹, donc $OA' = +15$ cm. Le grandissement est -0,50. L'image est réelle, de l'autre côté de la lentille, renversée et deux fois plus petite. Si l'objet s'approche à -5 cm, on obtient $OA' = -10$ cm et $\gamma = +2$: l'image devient virtuelle et droite. Le signe révèle ici un changement de nature de l'image.

Approfondissement et contrôle du modèle

Réflexion totale et ouverture d'un système optique

La loi de Snell peut conduire à $\sin r$ supérieur à un si l'on tente de réfracter depuis un milieu d'indice élevé vers un milieu d'indice inférieur avec une incidence trop grande. Cette impossibilité géométrique marque la réflexion totale dans le modèle idéal. L'angle critique vérifie $\sin i_c = n_2/n_1$ lorsque n_1 dépasse n_2 . Le phénomène n'apparaît pas dans le sens inverse avec la même condition.



Une ouverture plus large laisse passer davantage de lumière et peut diminuer une limite de diffraction, mais elle peut aussi accentuer certaines aberrations d'un système réel. Améliorer un seul paramètre n'améliore donc pas automatiquement toute l'image. De même, une longueur d'onde plus courte peut améliorer une limite de séparation sans résoudre un manque de contraste ou un bruit important.

Pour interpréter une image, séparer la formation géométrique, l'étalement ondulatoire et la détection. Une lentille peut former une image au bon endroit tout en transmettant une information insuffisante pour distinguer deux objets proches.

Mise à l'épreuve : Amplitude, intensité et décibels

Problème. Deux ondes progressives se propagent dans le même milieu linéaire. La seconde a une amplitude de pression acoustique trois fois plus grande. Par quel facteur son intensité est-elle multipliée, et quelle différence de niveau obtient-on ?

Résolution. À impédance acoustique identique, l'intensité est proportionnelle au carré de la pression efficace. Le facteur vaut donc 9. La différence de niveau est $10 \log_{10}(9) = 9,54 \text{ dB}$, également égale à $20 \log_{10}(3)$. Utiliser $10 \log_{10}(3)$ sur une amplitude sous-estimerait le résultat d'un facteur deux en décibels. La comparaison suppose une même définition de l'amplitude et un même milieu ; avec des impédances différentes, le seul rapport de pressions ne suffit pas. Un niveau absolu exige en outre une valeur de référence, alors qu'une différence compare ici directement les deux ondes.

Schéma de raisonnement

Lire une onde et une image

1. Source • 2. Propagation • 3. Interface • 4. Signal ou rayon reçu • 5. Interprétation

Les cinq étapes sont communes à plusieurs dispositifs, mais une construction par rayons ne montre ni diffraction ni interférences. La description doit être adaptée à l'échelle des structures.

Exercices progressifs

1. Onde de 2 MHz à 1500 m/s : longueur d'onde ?
2. Distance doublée d'une source isotrope idéale ?
3. Lentille de focale +0,25 m ?
4. Une source isotrope est observée deux fois plus loin, sans absorption. Variation du niveau d'intensité ?
5. Une lentille convergente a une vergence de 5 dioptries. Focale ?
6. Un rayon passe de $n_1 = 1$ à $n_2 = 1,5$ avec une incidence de 30° . Calculer l'angle réfracté.

Corrections argumentées

1. $\lambda = 1500/(2 \times 10^6) = 0,75 \text{ mm}$.
2. Intensité divisée par quatre et niveau diminué d'environ 6 dB.
3. Vergence +4 dioptries. Le signe positif correspond ici à une lentille convergente.
4. L'intensité est divisée par quatre, donc le niveau diminue de $10 \log_{10}(4) = 6,02 \text{ dB}$.
5. $f' = 1/5 = 0,20 \text{ m}$, soit 20 cm. Le mètre est nécessaire pour la définition de la dioptrie.
6. Snell donne $\sin r = (1/1,5) \sin 30^\circ = 1/3$, donc $r = 19,47^\circ$. Le rayon se rapproche de la normale en entrant dans le milieu d'indice supérieur.

Références et portée

- Source 1 : openstax.org
- Source 2 : openstax.org

Sources consultées le 1er octobre 2026 pour les notions signalées. Développements, situations et calculs pédagogiques OSSIK ; données fictives. La concordance complète avec les supports universitaires de l'année et la relecture scientifique humaine restent à réaliser. Les modèles biomédicaux ne fournissent aucune décision thérapeutique individuelle.

Partie 2 · Optique géométrique : réfraction, lentilles et instruments

1. Le rayon comme approximation

L'optique géométrique décrit la propagation de lumière par des rayons. Elle convient quand les dimensions importantes sont grandes devant la longueur d'onde et lorsqu'on ne cherche pas à prédire finement diffraction et interférences. Un rayon indique une direction de propagation ; il ne représente pas une trajectoire observable d'un photon isolé dans toutes les situations. Le cours 11-03, partie 3 traite ce que cette approximation laisse de côté.

L'indice de réfraction $n = c/v$ compare la vitesse de phase dans le vide à celle du milieu, pour une fréquence donnée. Il est sans dimension et peut dépendre de la fréquence : c'est la dispersion. Dans un milieu transparent homogène et isotrope, on représente les rayons par des droites. Une variation d'indice peut courber leur trajet. Absorption et diffusion ne se déduisent pas du seul indice réel utilisé dans ce cours.

Les distances, angles et sens doivent être définis. Pour une interface, les angles se mesurent par rapport à la normale, et non à la surface. Pour une lentille, nous utilisons plus loin des distances algébriques sur un axe orienté de gauche à droite, sens incident de la lumière. Une autre convention peut être correcte, mais il faut convertir toutes les grandeurs et les équations ensemble.

2. Réflexion et réfraction

L'angle réfléchi est égal à l'angle incident. Pour la réfraction entre deux milieux transparents, $n_1 \sin i = n_2 \sin r$. Si n_2 dépasse n_1 , le rayon réfracté se rapproche de la normale. Sa fréquence reste celle imposée par la source ; sa vitesse et sa longueur d'onde changent. Avec $\lambda = v/f$, une lumière de longueur d'onde 600 nm dans le vide a une longueur d'onde de 400 nm dans un milieu $n = 1,50$ dans cette approximation.

À incidence normale, le rayon n'est pas dévié même si les indices diffèrent. Cela ne signifie pas que toute l'énergie est transmise : une fraction peut être réfléchie. La loi des angles prédit une géométrie, non directement le partage d'intensité. Pour deux milieux non absorbants à incidence normale, la réflectance $R = [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)]^2$ permet un premier bilan. Pour air-verre $n_1 = 1$ et $n_2 = 1,5$, elle donne 0,04, soit 4 % à une interface. Il faut tenir compte des interfaces multiples pour un objet réel.

3. Réflexion totale et guidage

La réflexion totale ne peut apparaître que lorsqu'on passe d'un indice élevé n_1 à un indice plus faible n_2 . À l'angle critique, le rayon transmis est tangent à l'interface : $\sin i_c = n_2/n_1$. Au-delà, la loi de Snell n'admet plus d'angle réel de propagation transmise dans le second milieu. Un champ évanescents peut néanmoins exister près de l'interface ; « aucune énergie ne passe jamais dans aucun dispositif » serait une conclusion trop générale.

Dans une fibre idéale à cœur plus réfringent que la gaine, certains rayons sont guidés par réflexion totale. L'angle d'entrée admissible dépend des indices et du milieu extérieur. Une courbure trop forte ou des défauts introduisent des pertes. La formule d'angle critique doit s'appliquer à l'interface cœur-gaine, pas automatiquement à l'interface d'entrée air-cœur.

4. Former une image ponctuelle

Une image réelle est un lieu où les rayons issus d'un même point objet convergent effectivement ; un écran peut l'intercepter. Une image virtuelle est un point d'où les rayons semblent provenir lorsqu'on les prolonge en sens inverse. Elle peut être vue à travers un instrument, mais on ne la recueille pas directement sur un écran placé à cet endroit.

Le modèle de lentille mince remplace un ensemble de deux réfractions par une déviation dans un plan. Les rayons proches de l'axe et faiblement inclinés définissent le domaine paraxial. Hors de ce domaine, les rayons issus d'un point ne se rejoignent pas nécessairement en un même point : les aberrations demandent une description plus complète. Une belle construction à trois rayons est donc la prédiction d'un modèle, et non une garantie de netteté parfaite.

5. Conjugaison et grandissement avec signes

On note O le centre de la lentille, A le point objet sur l'axe, A' son image et $f' = OF'$ sa distance focale image. Pour une lentille mince dans le même milieu de part et d'autre, $1/OA' - 1/OA = 1/f'$. L'objet réel à gauche a OA négatif. Une lentille convergente a f' positif ; une divergente f' négatif. Toutes les distances doivent partager la même unité.

Le grandissement transversal $\gamma = A'B'/AB = OA'/OA$. Un γ négatif signifie une image renversée ; sa valeur absolue compare les tailles. Pour $OA = -30$ cm et $f' = +10$ cm, $1/OA' = 1/10 - 1/30 = 1/15$, donc $OA' = +15$ cm et $\gamma = -0,5$. L'image est réelle, renversée et deux fois plus petite.

Pour $OA = -5$ cm avec la même lentille, $1/OA' = 1/10 - 1/5 = -1/10$. L'image se trouve à -10 cm, du côté objet ; $\gamma = +2$. Elle est virtuelle, droite et agrandie. Le changement de type d'image vient du passage de l'objet à l'intérieur de la distance focale, pas d'un changement de nature de la lentille.

6. Retrouver la construction géométrique

Un rayon parallèle à l'axe ressort en passant par F' pour une convergente. Un rayon passant par O est non dévié dans le modèle mince. Un rayon dont la direction incidente passe par le foyer objet ressort parallèle à l'axe. Deux rayons suffisent à localiser l'image ; un troisième sert de contrôle.

La relation de grandissement se lit sur les triangles construits autour du rayon passant par O . Le signe vient de l'orientation des hauteurs et distances. Pour une image virtuelle, les prolongements sont dessinés comme tels ; confondre un prolongement avec un rayon réellement parcouru conduit à de faux bilans de trajet. Un tracé doit aussi montrer les flèches du sens de propagation.

Une image située « à l'infini » correspond à des rayons émergents parallèles ; cela survient pour un objet au foyer objet. L'équation conduit alors à $1/OA' = 0$. On ne doit pas remplacer mécaniquement OA' par un très grand nombre sans reconnaître ce cas limite.

7. Vergence et associations

La vergence d'une lentille mince dans l'air est $P = 1/f'$, avec f' en mètres ; elle s'exprime en dioptries, m^{-1} . Une focale de $+0,20$ m correspond à $+5$ dioptries. Pour deux lentilles minces accolées, les vergences s'ajoutent dans le modèle paraxial. Si elles sont séparées, il faut former une première image puis l'utiliser comme objet pour la seconde ; une simple addition n'est plus généralement suffisante.

Exemple : une première lentille $f_1' = 10$ cm reçoit un objet à 30 cm en amont et forme son image 15 cm en aval. Une seconde lentille $f_2' = 10$ cm est située 25 cm après la première : cette image intermédiaire est donc à 10 cm en amont de la seconde, exactement à son foyer objet. Les rayons finaux sont parallèles. La géométrie de séparation est ici aussi importante que les focales.

8. Œil réduit, loupe et résolution

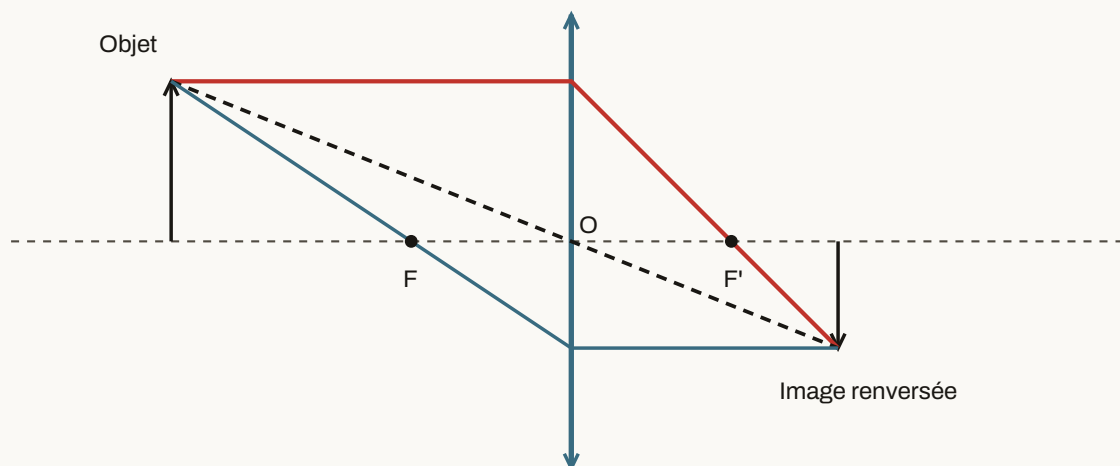
Un œil réduit est un modèle optique, distinct de l'anatomie détaillée : il associe un système convergent à une surface réceptrice. Pour un objet lointain, des rayons presque parallèles doivent former l'image sur cette surface. Modifier la convergence change la position d'image ; l'accommodation réelle ne se réduit cependant pas à déplacer une lentille mince isolée. Les mécanismes histologiques et sensoriels relèvent du cours 07-02, partie 6.

Une loupe augmente l'angle apparent d'un objet ; ce grossissement angulaire n'est pas le même rapport que le grandissement transversal d'une image sur écran. Un microscope associe une formation d'image intermédiaire et une observation. Agrandir davantage une image floue n'ajoute pas d'information. La diffraction introduit une limite de séparation qui dépend de la longueur d'onde et de l'ouverture, même pour des lentilles sans aberration.

Le contraste, la luminosité et la résolution sont différents. Fermer un diaphragme peut limiter les aberrations mais diminue la lumière et peut renforcer les limitations de diffraction. Il faut préciser le critère étudié plutôt que d'affirmer qu'un réglage « améliore l'image » dans tous les sens.

Lecture visuelle : Lentille convergente : image réelle et renversée

Lentille convergente : construire une image réelle



Distances positives : $f = 6$ cm ; objet à 15 cm ; image à 10 cm.

Modèle paraxial, lentille mince ; grandissement $= -10/15 = -2/3$.

Construction dans l'approximation paraxiale d'une lentille mince convergente. Les distances indiquées sont des longueurs positives : objet à 15 cm, focale 6 cm, image à 10 cm. Le rayon parallèle sort par F' ; le rayon passant par O reste rectiligne ; celui dirigé par F ressort parallèle. Le dessin indique les sens, sans représenter une lentille épaisse.

Question de lecture

L'image est-elle agrandie ? Retrouver sa distance avec les longueurs positives.

Correction de lecture

$1/6 = 1/15 + 1/10$. Le grandissement transversal vaut $-10/15 = -2/3$: l'image est réelle, renversée et réduite. Avec des distances algébriques orientées vers la droite, $OA = -15$ cm et $OA' = +10$ cm.

Application de synthèse : distinguer trois erreurs de mise au point

Un montage fournit une image floue. Trois hypothèses sont proposées : l'écran n'est pas au plan conjugué ; la lentille présente des aberrations ; le détecteur échantillonne trop grossièrement l'image. Ces hypothèses ne se testent pas par la même modification. Déplacer l'écran peut corriger une défocalisation, sans éliminer une aberration chromatique. Réduire l'ouverture peut modifier les aberrations et la diffraction, sans créer des pixels supplémentaires. Changer le nombre de pixels n'améliore pas nécessairement la réponse optique.

La première démarche est donc géométrique : fixer objet, lentille et écran, calculer la position prévue et confronter son signe à un tracé. La deuxième examine le domaine paraxial et spectral : des rayons éloignés de l'axe ou de longueurs d'onde différentes ne suivent pas tous le même modèle focal. La troisième étudie l'acquisition : taille des pixels, signal et bruit. Une même apparence visuelle peut résulter de plusieurs étages du système.

Question supplémentaire. Si un écran ne recueille aucune image nette d'un objet situé entre la lentille convergente et son foyer, suffit-il de continuer à déplacer cet écran derrière la lentille ? **Réponse.** Non, le modèle prévoit une image virtuelle du côté objet. Le calcul ne demande pas une recherche plus longue d'un plan réel inexistant. Un observateur peut voir cette image à travers la lentille, mais cette observation fait intervenir son propre système optique.

Cette analyse distingue une erreur de manipulation d'une prédiction normale du modèle. Elle apprend aussi à ne pas traiter tout flou comme un défaut unique. Avant d'optimiser une image, il faut dire si l'objectif est de la former sur un écran, d'augmenter l'angle apparent, de séparer deux détails ou de mesurer une intensité. Ces objectifs imposent des contrôles différents.

9. Exercices progressifs

1. Un rayon arrive à 30° de la normale de l'air vers $n = 1,50$. Calculer l'angle réfracté et le comparer à l'angle initial.
2. Pour $n_1 = 1,50$ vers l'air, déterminer l'angle critique. Un angle de 50° permet-il un rayon transmis propagatif ?
3. Une longueur d'onde dans le vide vaut 500 nm. Trouver sa valeur dans $n = 1,25$ et dire ce qui arrive à la fréquence.
4. Une convergente de focale 8 cm reçoit un objet à 24 cm en amont. Déterminer position, nature et grandissement de l'image.
5. Une divergente $f' = -10$ cm reçoit un objet à 20 cm en amont. Même question.
6. Deux lentilles accolées ont les vergences $+8$ et -3 dioptries. Calculer la focale équivalente.

7. Un objet est exactement au foyer d'une convergente. Pourquoi chercher une image à une distance finie échoue-t-il ?
8. Une personne confond « grossissement doublé » et « deux détails deux fois plus proches deviennent séparables ». Formuler une objection physique.

10. Corrections en étapes

1. Snell donne $\sin r = \sin 30^\circ / 1,5 = 1/3$. Ainsi $r = 19,47^\circ$, donc le rayon se rapproche de la normale. Mesurer depuis la surface inverserait l'interprétation.
2. $\sin i_c = 1/1,5$, donc $i_c = 41,81^\circ$. À 50° , l'incidence dépasse ce seuil et il y a réflexion totale dans les hypothèses indiquées.
3. $\lambda = \lambda_0/n = 400 \text{ nm}$. La fréquence est inchangée à une interface stationnaire : la vitesse est diminuée du même facteur que la longueur d'onde.
4. $OA = -24 \text{ cm}$; $1/OA' = 1/8 - 1/24 = 1/12$. $OA' = +12 \text{ cm}$; $\gamma = -0,5$. Image réelle, renversée et réduite.
5. $1/OA' = -1/10 - 1/20 = -3/20$. $OA' = -6,667 \text{ cm}$; $\gamma = 1/3$. Image virtuelle, droite et réduite. La réponse négative n'est pas une erreur : elle donne un côté.
6. $P = 5 \text{ m}^{-1}$, donc $f' = 0,20 \text{ m}$. L'addition repose sur l'accolement et l'approximation mince ; on ne l'étend pas sans contrôle à des lentilles séparées.
7. Les rayons émergents sont parallèles et $1/OA' = 0$. Le modèle place l'image à l'infini. Un écran fini ne recueille pas une image ponctuelle nette.
8. Le grossissement modifie l'échelle apparente ; la résolution dépend aussi de l'ouverture, de la longueur d'onde, des aberrations et du bruit. Une image peut devenir plus grande sans fournir de détails nouveaux.

Références et portée

OpenStax, [lentilles minces](#) ; OpenStax, [réfraction](#) ; OpenStax, [réflexion totale](#). Références de physique vérifiées le 2 octobre 2026 ; exemples calculés pour ce document. Complément disciplinaire autonome, sans certification d'exigibilité locale ni proposition de correction clinique individuelle.

Partie 3 · Oscillations, interférences et diffraction

1. Ce qui oscille et ce qui se propage

Une oscillation décrit une variation répétée dans le temps. Une onde décrit aussi la propagation spatiale d'une perturbation. Un point d'une corde peut osciller autour de sa position moyenne tandis que le motif se déplace sur la corde ; la matière ne traverse pas nécessairement tout le trajet de l'onde. Dans un modèle linéaire, de faibles perturbations peuvent se superposer. Cette propriété simplifie le calcul mais peut échouer pour des amplitudes importantes.

Pour un déplacement $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$, A est l'amplitude, ω la pulsation en rad/s et φ la phase initiale. La période T vaut $2\pi/\omega$ et la fréquence $f = 1/T$ vaut $\omega/(2\pi)$. Confondre fréquence et pulsation introduit un facteur 2π . La phase d'un sinus ou cosinus est sans dimension ; en calcul différentiel, son angle s'exprime en radians.

L'amplitude peut représenter un déplacement, une pression ou une tension selon le système. Son unité n'est donc pas toujours le mètre. Une intensité énergétique, exprimée en W/m^2 , est une autre grandeur. Le passage de l'amplitude à l'intensité dépend du milieu et du type d'onde.

2. Construire l'oscillateur harmonique

Une masse m attachée à un ressort idéal de raideur k subit $F = -kx$ autour de sa position d'équilibre. La seconde loi de Newton donne $m x'' + kx = 0$. En remplaçant x par $A \cos(\omega_0 t + \varphi)$, $x'' = -\omega_0^2 x$; il faut donc $\omega_0^2 = k/m$. La période propre est $T_0 = 2\pi \sqrt{m/k}$. La racine porte sur un rapport de dimension s^2 : N/m divisé par kg vaut s^{-2} .

La vitesse est $v = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$ et l'accélération $-\omega_0^2 x$. Aux positions extrêmes, la vitesse s'annule alors que la norme de l'accélération est maximale. Au passage par l'équilibre, la vitesse est maximale et l'accélération nulle. La force et le déplacement sont opposés, pas la force et la vitesse à tous les instants.

L'énergie mécanique vaut $mv^2/2 + kx^2/2 = kA^2/2$. La somme est constante tandis que ses deux contributions s'échangent. Doubler l'amplitude quadruple l'énergie dans le domaine linéaire. Le pendule simple peut approcher un oscillateur harmonique pour de petits angles, car $\sin \theta \approx \theta$; sa période approchée dépend alors de la longueur et de g . L'amplitude ne disparaît de cette période que dans cette approximation.

3. Amortissement et excitation

Un frottement visqueux proportionnel à la vitesse conduit à $m x'' + b x' + kx = 0$. Le coefficient b a l'unité kg/s . Dans le régime sous-amorti, la solution oscille avec une amplitude décroissante $\exp(-bt/(2m))$. La pulsation d'oscillation est $\sqrt{k/m - b^2/(4m^2)}$, inférieure à la pulsation propre non amortie. Les régimes critique et sur-amorti ne présentent pas les mêmes oscillations.

Sous une force extérieure périodique $F_0 \cos(\omega t)$, la réponse stationnaire dépend de la fréquence et de l'amortissement. Une forte réponse près d'une fréquence propre constitue une résonance. Il serait faux de conclure à une amplitude infinie pour tout système réel : dissipation, non-linéarité, limites mécaniques et durée d'excitation interviennent. Une réponse peut aussi être déphasée par rapport à l'excitation.

Cette description aide à comprendre pourquoi un capteur ou une structure peut amplifier certaines composantes et atténuer d'autres. Elle ne permet pas de décider de la sécurité d'une exposition sonore ou vibratoire ; cela demanderait un contexte, des normes et des mesures adaptés.

4. Onde progressive et phase

Une onde sinusoïdale se propageant vers les x croissants s'écrit $y(x,t) = A \cos(\omega t - k_{\text{ond}} x + \varphi)$, où $k_{\text{ond}} = 2\pi/\lambda$. Ici k_{ond} est un nombre d'onde, différent de la raideur k du ressort. Un point de phase constante satisfait $\omega t - k_{\text{ond}} x = \text{constante}$; sa vitesse vaut $\omega/k_{\text{ond}} = \lambda f$. Le signe devant x fixe le sens de propagation avec la convention choisie.

Deux points séparés de Δx présentent un déphasage spatial de norme $2\pi\Delta x/\lambda$. Une séparation $\lambda/2$ correspond à π radians, soit une opposition de phase. Une séparation λ correspond à une phase identique modulo 2π . Deux signaux peuvent avoir la même fréquence et des phases différentes.

La vitesse de phase peut dépendre de la fréquence dans un milieu dispersif. Une impulsion contient plusieurs fréquences : sa forme peut se modifier pendant le trajet. Assimiler systématiquement la vitesse du motif sinusoïdal à celle de toute information serait excessif. Pour les exercices simples, la célérité est supposée constante dans la bande considérée.

5. Superposition et interférences

Deux ondes de même fréquence et de phase relative stable se superposent. Pour deux amplitudes égales A , la somme de deux cosinus donne une amplitude résultante $2A|\cos(\Delta\varphi/2)|$. Si l'intensité d'une onde seule est I_0 et si le coefficient de conversion amplitude-intensité est le même, l'intensité résultante vaut $4I_0 \cos^2(\Delta\varphi/2)$.

Pour $\Delta\varphi = 0$, elle atteint $4I_0$; pour $\Delta\varphi = \pi$, elle s'annule dans le modèle idéal. Ce n'est pas une création ou une disparition globale d'énergie : les interférences redistribuent l'énergie dans l'espace et dépendent des sources et des conditions aux limites. Lorsque la phase varie aléatoirement pendant l'intégration du détecteur, le terme d'interférence moyen peut s'annuler : les intensités s'ajoutent alors sans franges stables.

Une différence de marche δ produit $\Delta\varphi = 2\pi\delta/\lambda$ lorsque λ désigne la longueur d'onde du milieu commun. Si les trajets traversent des indices différents, il faut comparer les chemins optiques, sommes ou intégrales de $n \, dl$, avec la longueur d'onde dans le vide. Des déphasages de réflexion peuvent également intervenir ; ils doivent être précisés dans l'énoncé.

6. Deux ouvertures : calculer l'interfrange

Deux sources cohérentes séparées de a éclairent un écran à distance D , grande devant a . Aux petits angles, $\delta \approx ax/D$ pour un point d'abscisse x . Les maxima satisfont $\delta = m\lambda$ et sont séparés par l'interfrange $i = \lambda D/a$. Vérifier les dimensions donne une longueur. Augmenter D agrandit le motif ; augmenter a rapproche les franges.

Une largeur finie de chaque ouverture module l'ensemble par une enveloppe de diffraction. Le schéma de deux sources ponctuelles est donc une première approximation. La visibilité des franges dépend aussi de l'équilibre d'intensité, de la cohérence et de la résolution du détecteur. L'absence de franges visibles n'établit pas que la lumière aurait cessé d'avoir un caractère ondulatoire.



7. Diffraction et pouvoir séparateur

Une ouverture finie produit un étalement angulaire. Pour une fente de largeur a dans les conditions de diffraction lointaine, les premiers minima vérifient $\sin \theta = \pm \lambda/a$. Aux petits angles et sur un écran à distance D , la largeur entre premiers minima vaut approximativement $2\lambda D/a$. Réduire l'ouverture élargit la tache centrale.

Pour une ouverture circulaire idéale, le premier minimum de la tache d'Airy apparaît à un angle voisin de $1,22\lambda/d$, avec d diamètre. Le critère de Rayleigh fournit une convention de séparation de deux sources ponctuelles : ce n'est pas une frontière universelle entre toute information récupérable et toute information perdue. Bruit, contraste et traitement influencent les performances réelles.

En microscopie, l'ouverture numérique $n \sin \alpha$ et la longueur d'onde participent à la résolution latérale. L'immersion ne se résume pas à augmenter une taille apparente ; elle modifie les angles collectés et le chemin optique. Les relations simplifiées demandent de préciser le critère employé et le mode d'éclairage.

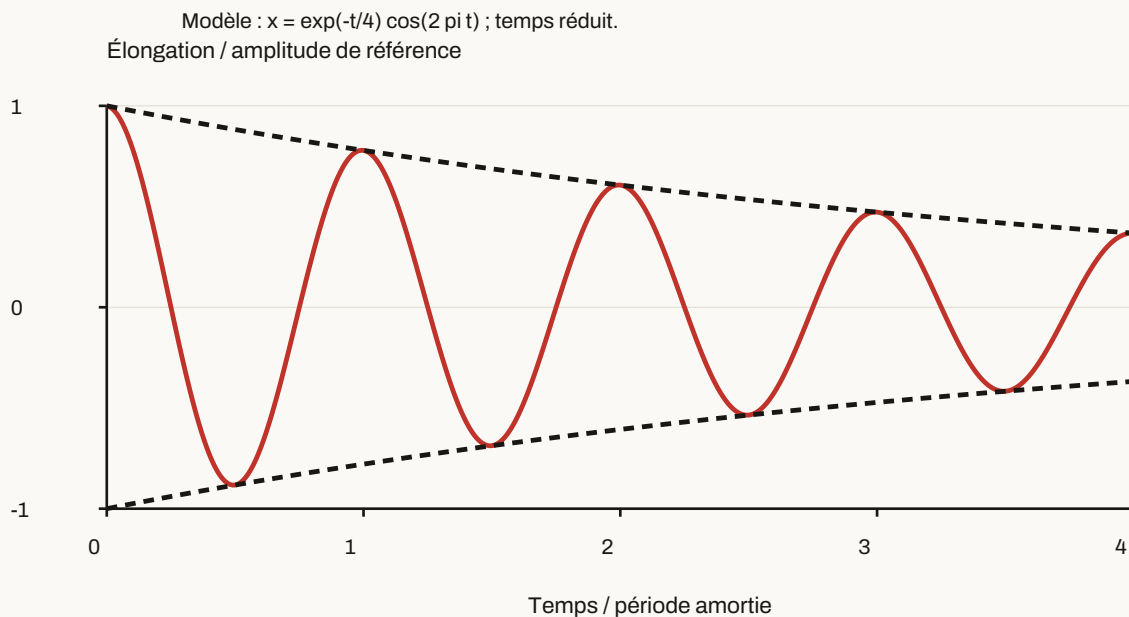
8. Ondes stationnaires et battements

Deux ondes de même fréquence se propageant en sens opposés peuvent former une onde stationnaire. Certains points, les nœuds, restent immobiles ; d'autres oscillent avec une amplitude maximale. Sur une corde fixée aux deux extrémités de longueur L , les modes permis ont $\lambda_n = 2L/n$ et $f_n = nv/(2L)$. Les conditions aux limites imposent les longueurs d'onde compatibles.

Deux fréquences proches f_1 et f_2 produisent des battements : l'enveloppe de l'amplitude varie lentement et les maxima d'intensité se répètent à $|f_1 - f_2|$. Un battement n'est pas nécessairement une nouvelle onde indépendante émise à cette seule fréquence. Décomposer le signal aide à distinguer fréquence porteuse et modulation.

Lecture visuelle : Oscillation amortie : lire la période et l'enveloppe

Oscillation amortie : enveloppe et période distinctes



L'enveloppe borne les extrema ; elle n'est pas la trajectoire oscillante.

Modèle en temps réduit $\tau = t/T$: $x/A = \exp(-\tau/4) \cos(2\pi\tau)$. Les pointillés $\pm \exp(-\tau/4)$ encadrent la courbe. L'exponentielle modifie l'amplitude tandis que la phase du cosinus fixe la période amortie. Les extrema de la courbe complète ne sont pas exactement aux extrema du cosinus seul.

Question de lecture

Après quatre périodes, quelle fraction de l'enveloppe initiale reste-t-il ?

Correction de lecture

$\exp(-4/4) = \exp(-1) \approx 0,368$, soit 36,8 %. Il s'agit de l'amplitude de l'enveloppe à cet instant ; la valeur instantanée comporte aussi le facteur cosinus.

Application de synthèse : lire une oscillation amortie

Une enveloppe décroissante et une oscillation ne décrivent pas la même échelle de temps. Pour $x(t) = A \exp(-\gamma t) \cos(\omega t + \varphi)$, le temps $1/\gamma$ décrit la baisse de l'enveloppe, tandis que $2\pi/\omega$ décrit le retour de phase. Compter des périodes ne mesure donc pas directement une demi-vie d'amplitude. Si γ est faible devant ω , on observe de nombreuses oscillations avant une diminution importante ; si les échelles deviennent comparables, l'interprétation en « amplitude presque constante sur une période » se dégrade.

La vitesse n'est pas simplement $-A\omega \exp(-\gamma t) \sin(\omega t + \varphi)$: dériver le produit ajoute le terme $-\gamma A \exp(-\gamma t) \cos(\omega t + \varphi)$. Oublier cette dérivée de l'enveloppe introduit une approximation qui doit être annoncée. Les instants de maximum du déplacement ne coïncident donc pas exactement avec les maxima du seul cosinus lorsque l'amortissement n'est pas négligeable.



Question supplémentaire. Deux signaux présentent la même fréquence apparente mais l'un décroît rapidement et l'autre très lentement. Peut-on conclure qu'ils ont la même dissipation ? **Réponse.** Non. La fréquence renseigne sur une répétition ; la décroissance de l'enveloppe apporte une autre information. Il faut estimer les deux paramètres avec une fenêtre de mesure qui les distingue.

Une amplitude mesurée peut aussi diminuer par éloignement géométrique ou interférence, sans absorption locale identique. Pour une onde, suivre l'amplitude dans l'espace et suivre l'amplitude d'un oscillateur au cours du temps ne sont pas automatiquement la même expérience. La variable indépendante, les conditions de propagation et la définition du signal doivent accompagner toute exponentielle ajustée.

9. Exercices progressifs

1. Pour $m = 0,20$ kg et $k = 80$ N/m, calculer ω_0 , T_0 et l'énergie pour $A = 1$ cm.
2. Une onde a $f = 2$ MHz et $v = 1500$ m/s. Calculer λ et le déphasage entre deux points séparés de 0,375 mm.
3. Deux ondes cohérentes identiques ont $\Delta\phi = \pi/2$. Exprimer l'intensité totale en fonction de I_0 .
4. Avec $\lambda = 600$ nm, $D = 2$ m et $a = 0,50$ mm, calculer l'interfrange.
5. Une fente de 0,10 mm est observée à 1 m avec $\lambda = 500$ nm. Calculer la largeur centrale approchée.
6. Une corde $L = 0,50$ m porte des ondes à 100 m/s. Donner les trois premières fréquences permises.
7. Deux fréquences de 440 et 444 Hz sont superposées. Trouver la fréquence de battement et la période correspondante.
8. L'amplitude d'une oscillation amortie diminue de moitié. Que devient son énergie mécanique dans l'approximation où elle est proportionnelle au carré de l'enveloppe ?

10. Corrections expliquées

1. $\omega_0 = \sqrt{400} = 20$ rad/s ; $T_0 = 2\pi/20 = 0,3142$ s. Convertir $A = 0,01$ m : énergie = $80 \times 0,01^2/2 = 0,004$ J. Le carré de l'amplitude intervient après conversion.

2. $\lambda = 1500/(2 \times 10^6) = 0,75 \text{ mm}$. La séparation vaut $\lambda/2$, d'où $\Delta\varphi = \pi$ modulo 2π . Une opposition de phase ne signifie pas une fréquence différente.
3. $I = 4I_0 \cos^2(\pi/4) = 2I_0$. Ce résultat égal à la somme des intensités est ici dû à un déphasage particulier, et ne justifie pas d'ignorer l'interférence dans les autres cas.
4. $i = 600 \times 10^{-9} \times 2/(0,50 \times 10^{-3}) = 2,4 \text{ mm}$. Le rapport λ/a vaut 0,0012, compatible avec un petit angle pour les premières franges.
5. Largeur $= 2 \times 500 \times 10^{-9} \times 1/10^{-4} = 0,010 \text{ m}$, soit 10 mm. Il s'agit de la distance entre deux minima, pas d'une demi-largeur.
6. $f_1 = 100/(2 \times 0,50) = 100 \text{ Hz}$; $f_2 = 200 \text{ Hz}$; $f_3 = 300 \text{ Hz}$. Le mode $n = 0$ ne constitue pas une oscillation vibratoire de ce modèle.
7. La différence vaut 4 Hz ; les maxima de l'enveloppe d'intensité se répètent toutes les 0,25 s. La vibration rapide reste autour de 442 Hz.
8. L'énergie est divisée par quatre. La dissipation explique cette diminution ; utiliser la même demi-vie pour amplitude et énergie serait une erreur.

Références et portée

OpenStax, oscillateur harmonique ; OpenStax, interférences de Young ; OpenStax, diffraction par une fente. Exercices originaux ; complément disciplinaire et non liste certifiée des exigences du PASS local. Aucune recommandation d'exposition physique.