

Modèle scalaire des ondes lumineuses

Extrait du programme de TSI1

Dans la partie 1, [...]. L'introduction de la somme de deux sinusoides à travers le phénomène d'interférences permet de faire ressortir le rôle essentiel que joue le déphasage entre deux signaux dans le signal résultat obtenu. L'approche de la diffraction est purement descriptive et expérimentale, et envisagée comme une propriété universelle des ondes ; l'objectif est ici d'introduire l'approximation de l'optique géométrique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Propagation d'un signal	
Interférences entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence.	Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser le phénomène d'interférences de deux ondes. Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives.
Diffraction à l'infini.	Utiliser la relation $\theta \approx \frac{\lambda}{a}$ entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture. Choisir les conditions expérimentales permettant de mettre en évidence le phénomène de diffraction en optique ou en mécanique.

La partie 2 portant sur l'optique géométrique ne doit pas être enseignée ou évaluée pour elle-même mais avec comme seuls objectifs de servir de point d'appui pour des approches expérimentales en première année et pour l'étude de l'optique physique en deuxième année.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Optique géométrique	
Sources lumineuses. Modèle de la source ponctuelle monochromatique.	Caractériser une source lumineuse par son spectre.
Indice d'un milieu transparent.	Etablir la relation entre la longueur d'onde dans le vide et la longueur d'onde dans le milieu.
Approximation de l'optique géométrique et notion de rayon lumineux.	Définir le modèle de l'optique géométrique et indiquer ses limites.
Réflexion-Réfraction. Lois de Descartes.	Etablir la condition de réflexion totale.
Miroir plan.	Construire l'image d'un objet, identifier sa nature réelle ou virtuelle.
Conditions de Gauss.	Enoncer les conditions permettant un stigmatisme approché et les relier aux caractéristiques d'un détecteur.
Lentilles minces.	Enoncer les définitions et les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence. Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide des rayons lumineux. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal fournies (Descartes uniquement). Mettre en œuvre expérimentalement à l'aide de deux lentilles un dispositif optique d'utilisation courante.
L'œil.	Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur fixe. Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la place d'accommodation.
L'appareil photographique numérique.	Approche documentaire : en comparant des images produites par un appareil photographique numérique, discuter l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image et le rôle du capteur sur la qualité de cette image.

Extrait du programme de TSI2

Le programme d'optique de seconde année s'inscrit dans le prolongement de la partie « Signaux physiques » du programme de première année. Il s'agit pour les étudiants d'approfondir l'étude des phénomènes d'interférences lumineuses, conséquences de la nature ondulatoire de la lumière.

Si certaines notions ont été abordées au lycée et en classe de première année TSI, le formalisme utilisé constitue une avancée importante dans la modélisation des phénomènes décrits ; l'enseignant veillera particulièrement à privilégier les aspects expérimentaux et à utiliser tous les supports de visualisation (expériences de cours, simulations, animations, ...) pour aider les étudiants dans la construction de leurs représentations. L'enseignant ne manquera pas non plus de rappeler que ces phénomènes, étudiés ici dans le cadre de l'optique, sont généralisables à tout comportement ondulatoire.

Les compétences suivantes seront développées dans cette partie du programme :

- maîtriser la notion de phase d'une vibration harmonique et de sa variation au cours d'une propagation ;
- connaître certains ordres de grandeur propres aux phénomènes lumineux dans le domaine du visible (longueur d'onde, durée d'un train d'onde, temps d'intégration d'un capteur) ; faire le lien avec les problèmes de cohérence ;
- maîtriser les outils de l'optique géométrique (rayon de lumière, principe du retour inverse, lois de conjugaison) et de l'optique ondulatoire (chemin optique, surface d'onde, théorème de Malus) afin de conduire un calcul de différence de marche entre deux rayons de lumière dans des situations simples.

La partie 1 introduit les outils nécessaires. L'intensité lumineuse est introduite comme une puissance par unité de surface. Le théorème de Malus (orthogonalité des rayons de lumière et des surfaces d'ondes) est admis.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Modèle scalaire des ondes lumineuses	
Chemin optique. Déphasage dû à la propagation. Surfaces d'ondes. Théorème de Malus (admis).	Exprimer le retard de phase en un point en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique.
Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	Associer une description de la formation des images en termes de rayon de lumière et en termes de surfaces d'onde. Utiliser la propriété énonçant que le chemin optique séparant deux points conjugués est indépendant du rayon de lumière choisi.
Modèle d'émission. Relation (admise) entre la durée des trains d'ondes et la largeur spectrale.	Citer l'ordre de grandeur du temps de cohérence Δt de quelques sources de lumière. Utiliser la relation $\Delta f \cdot \Delta t \approx 1$ pour lier la durée des trains d'ondes et la largeur spectrale $\Delta \lambda$ de la source.
Détecteurs. Intensité lumineuse. Facteur de contraste.	Exploiter la propriété qu'un capteur optique quadratique fournisse un signal proportionnel à l'énergie lumineuse reçue pendant son temps d'intégration. Citer l'ordre de grandeur du temps d'intégration de quelques capteurs optiques. Mettre en œuvre une expérience utilisant un capteur CCD.

Formation expérimentale

Nature et méthodes	Capacités exigibles
3. Optique	
Analyser une lumière.	Identifier, à l'aide d'un polariseur, une onde polarisée rectilignement et déterminer sa direction de polarisation.
Analyser une figure d'interférence.	Mettre en œuvre un photodétecteur en sortie d'un interféromètre.

Sommaire

- 1 De l'électromagnétisme à l'optique géométrique**
 - 1.1 Optique géométrique**
 - 1.2 Limites de l'optique géométrique**
- 2 Propagation d'une vibration scalaire**
 - 2.1 Définition du modèle**
 - 2.2 Retard de phase d'une onde plane progressive lumineuse monochromatique**
 - 2.3 Chemin optique**
 - 2.4 Surface d'onde**
- 3 Amplitude scalaire et système optique**
 - 3.1 Onde plane, onde sphérique**
 - 3.2 Effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss**
- 4 Cohérence d'une source**
 - 4.1 Différents types de sources lumineuses**
 - 4.2 Modèle d'émission**
- 5 Intensité lumineuse**
 - 5.1 Les détecteurs lumineux**
 - 5.2 Intensité lumineuse**
- 6 Questions de cours**
- 7 Questions à choix multiples**
- 8 Exercices d'application directe du cours**
 - 8.1 Surface d'onde après une lame présentant un défaut d'épaisseur**
 - 8.2 Transformation des surfaces d'onde par une lentille convergente**
 - 8.3 Calculs de chemins optiques**
 - 8.4 Temps de cohérence et largeur spectrale**
- 9 Exercices type écrit (à rendre en DM pour le 16/03/2020)**

6 Questions de cours

- 1) Qu'appelle-t-on amplitude lumineuse ou amplitude scalaire ? On donnera son expression en un point M et à un instant t en fonction du retard de phase $\varphi(M)$, puis en fonction de la durée de propagation entre la source S et le point M.
- 2) Définir la notion de chemin optique. Comment se simplifie-t-elle dans un milieu d'indice n constant ? Exprimer l'amplitude lumineuse en fonction du chemin optique entre la source S et le point M.
- 3) Définir la notion de surface d'onde. Énoncer le théorème de Malus. Définir la notion de stigmatisme rigoureux et approché. Que peut-on dire du chemin optique entre deux points conjugués ?
- 4) Expliquer le modèle d'émission d'une source. Comment peut-on relier le temps de cohérence Δt et la largeur spectrale d'une source ? Deux formules sont attendues.
- 5) Comment fonctionne un récepteur lumineux ? Définir la notion d'intensité lumineuse (phrase et formule). Définir la notion de contraste.

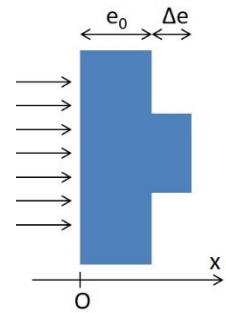
7 Questions à choix multiples

8 Exercices d'application directe du cours

8.1 Surface d'onde après une lame présentant un défaut d'épaisseur

Une onde plane se propageant dans l'air arrive en incidence normale sur une lame d'indice n présentant un défaut d'épaisseur.

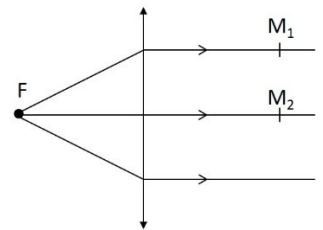
- 1) Donner la forme de la surface d'onde avant et après la lame.
- 2) Quelle est la différence de chemin optique, après la lame à la même abscisse x , entre un rayon ayant traversé le défaut et un autre ne l'ayant pas traversé ? En déduire la différence de phase.



8.2 Transformation des surfaces d'onde par une lentille convergente

On place une source ponctuelle au foyer objet F d'une lentille convergente.

- 1) Quelle est la forme des surfaces d'onde avant la lentille pour l'onde émise par la source ponctuelle placée en F ?
- 2) Qu'en est-il après la lentille ?
- 3) Que dire des chemins optiques (FM_1) et (FM_2) ?
- 4) Comment est-ce possible, vu les distances respectives parcourues ?



8.3 Calculs de chemins optiques

On considère une lentille mince convergente, dans l'air ; 2 cas :

- elle est éclairée par une source ponctuelle placée dans le plan focal objet, hors du foyer ;
- elle reçoit un faisceau de lumière parallèle sous une incidence α

Dans les deux cas, on posera $PM = a$.

Calculer les différences de chemin optique suivantes :

1) $(AQ) - (AP)$	2) $(AM) - (AP)$	3) $(QA) - (PA)$	4) $(MA) - (PA)$

8.4 Temps de cohérence et largeur spectrale

- 1) Retrouver simplement le temps de cohérence pour une source de lumière blanche.
- 2) Déduire du temps de cohérence du laser ($\Delta t \approx 10^{-8} \text{ s}$) son étendue spectrale $\Delta \lambda$.

9 Exercices type écrit (à rendre en DM pour le 13/03/2019)

9.1 Première partie : Rayon lumineux

La propagation de l'onde lumineuse s'effectue dans un milieu transparent, diélectrique, linéaire, homogène et isotrope.

La vitesse de la lumière dans le vide est notée $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Une source lumineuse ponctuelle située en S émet, de manière pulsée, des trains d'ondes lumineuses supposées de même pulsation ω . Dans le modèle scalaire de la lumière, la fonction de l'onde monochromatique est caractérisée en un point M et à l'instant t par le signal lumineux ou vibration lumineuse : $s(M, t) = a \cos(\omega t - \varphi(M, t))$, où a est l'amplitude supposée constante de l'onde et $\varphi(M, t)$ son retard de phase en M et à l'instant t par rapport au point de référence S .

Le modèle des trains d'ondes suppose que la phase à la source φ_S reste constante pendant des intervalles de temps de durée constante τ_c entre lesquels elle change aléatoirement de valeur. L'onde émise durant cet intervalle de temps appelé temps de cohérence est nommée « train d'onde ». Le train d'onde est ainsi limité dans le temps et se propage dans le vide à la célérité c . La phase de l'onde φ_S à la source S prend une nouvelle valeur aléatoire à chaque nouveau train d'onde.

La lumière se propage de S à M le long d'un rayon lumineux avec pour vitesse au point P : $v(P) = \frac{c}{n(P)}$ où $n(P)$

est l'indice de réfraction du milieu en P ; par définition, le chemin optique (SM) entre les points S et M du rayon

lumineux est : $(SM) = \int_S^M n(P) dl(P)$. L'élément d'arc de la courbe suivie par la lumière est noté $dl(P)$; il est défini

en P et est parcouru par la lumière à la vitesse de propagation $v(P)$ pendant la durée dt .

L'onde se propage sans déformation, le signal $s(M, t)$ reproduit le signal de la source avec un retard $\tau(M)$.

1) Relier le chemin optique (SM) à la durée de propagation du signal $\tau(M)$. Conclure quant à l'interprétation du chemin optique.

2) Dans le domaine visible, pour une longueur d'onde moyenne dans le vide λ_m de l'ordre de 600 nm, calculer l'ordre de grandeur de la pulsation ω_m du signal lumineux.

3) Etablir l'expression du retard de phase $\varphi_{P \rightarrow M} = \varphi(M, t) - \varphi(P, t)$ lié à la propagation entre P et M , en fonction du chemin optique (PM) et de la longueur d'onde λ_0 de l'onde étudiée dans le vide.

4) Définir une surface d'onde. Justifier le caractère d'onde sphérique associé au signal lorsque celui-ci se propage dans un milieu d'indice n constant. Énoncer le théorème de Malus.

5) Quel instrument d'optique permet d'obtenir une onde plane à partir d'une source ponctuelle ? Illustrer votre réponse à l'aide d'un schéma faisant apparaître les surfaces d'onde.

L'intensité lumineuse $I(M)$ est mesurée par un détecteur quadratique placé en M sensible à la valeur moyenne temporelle de $s^2(M, t)$. Elle est conventionnellement définie au point M (à une constante multiplicative près) par :

$$I(M) = \langle s^2(M, t) \rangle.$$

Cette moyenne temporelle est effectuée sur un temps de réponse τ_R du détecteur toujours très grand devant les temps de cohérence temporelle des sources supposés identiques à τ_c . Ce temps de cohérence est la durée moyenne de passage des trains d'ondes en un point donné de l'espace.

6) Donner des ordres de grandeurs de temps de cohérence de sources usuelles. Dans le cas du laser de longueur d'onde moyenne λ_m , relier le temps de cohérence à son étendue spectrale $\Delta\lambda$. Faire l'application numérique.

9.2 Deuxième partie : CCP TSI 2019

En se promenant, le randonneur peut observer des oiseaux, des insectes et les belles couleurs de leurs ailes (papillons), carapaces (coléoptères, mouches) ou plumes. Il constate que, souvent, la couleur observée est changeante selon l'angle de vue : on parle d'irisation. La simple présence d'un pigment coloré ne peut pas expliquer ces variations de couleurs. Il s'agit en effet d'une couleur liée à la structure microscopique de l'aile, la carapace ou la plume : certaines sont constituées d'un empilement régulier de couches de deux matériaux d'indices optiques différents. Le nombre de couches va de deux à plus de cent selon les cas.

On souhaite expliquer le phénomène optique responsable des irisations. On s'intéresse à une unique couche d'épaisseur e d'un matériau noté c_1 , délimitée par deux couches d'épaisseur négligeable d'un autre matériau noté c_2 . Ces trois couches sont plongées dans l'air comme illustré sur la **figure 5**. On note n_o l'indice optique de l'air et n l'indice optique du matériau c_1 , n et n_o étant différents.

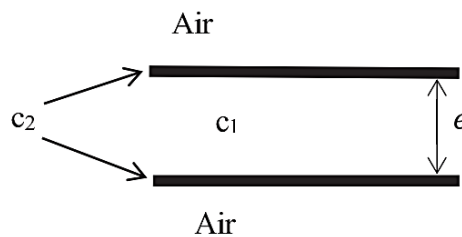


Figure 5 - Multicouche

On considère un rayon lumineux incident supposé monochromatique ; on note λ sa longueur d'onde dans le vide. Le rayon lumineux se divise en un rayon transmis et un rayon (a) réfléchi dans l'air. Le matériau c_2 constitue l'interface sur laquelle le rayon lumineux se divise. Le rayon transmis est lui-même réfléchi puis en partie transmis dans l'air. Le rayon qui ressort est noté (b). Les rayons (a) et (b) sont parallèles : voir la **figure 6**.

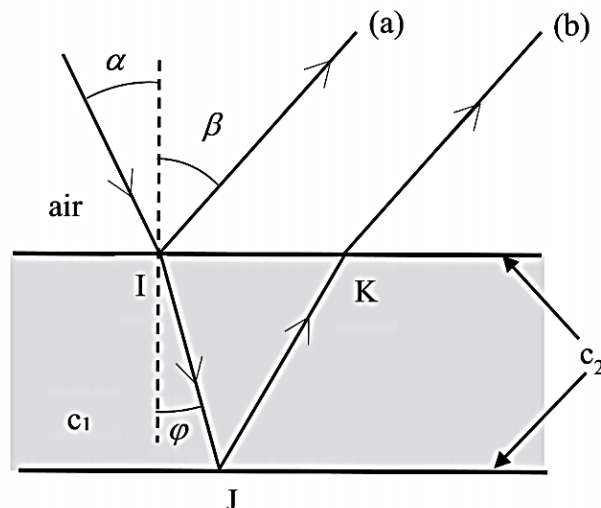


Figure 6 - Trajet des rayons lumineux

Q59. Déterminer l'angle β . Justifier.

Q60. Pourquoi le rayon IJ change-t-il de direction par rapport au rayon incident ? Nommer le phénomène en jeu.

Q61. Les deux rayons (a) et (b) interfèrent. Expliquer en rappelant les conditions pour que le phénomène d'interférences apparaisse.

Les interférences ont lieu à l'infini, les rayons (a) et (b) étant parallèles.

On donne la différence de marche à l'infini entre les rayons (a) et (b) :

$$\delta = 2 n e \cos (\varphi) + \frac{\lambda}{2} . \quad (8)$$

Q62. Donner sans démonstration l'expression de l'intensité lumineuse résultant de la superposition des rayons (a) et (b). On introduira et définira les notations utiles. On supposera l'intensité lumineuse du rayon (a) pris seul identique à celle du rayon (b) pris seul.

Q63. Montrer que :

$$\delta = 2 e \sqrt{n^2 - n_o^2 \sin^2(\alpha)} + \frac{\lambda}{2} . \quad (9)$$

Q64. Démontrer que l'on voit de la lumière dans la direction β telle que $\delta = p\lambda$ où p est un entier. Comment qualifie-t-on les interférences dans ce cas ?

En réalité la lumière incidente est une lumière blanche : c'est la lumière du soleil. Elle contient toutes les longueurs d'onde du spectre visible.

Q65. Expliquer alors que selon l'angle d'observation β de la structure, la lumière réfléchie observée n'a pas la même couleur.

Q66. Supposons que la structure observée soit plongée dans l'eau : sur le schéma de la **figure 5**, page 14 l'air est remplacé par de l'eau. Quel paramètre est modifié ? Cela induit un changement de la couleur observée dans une direction donnée. Expliquer.

On suppose que l'on peut modéliser une aile de papillon par la structure multicouche étudiée précédemment.

Q67. On observe cette aile de papillon sous un angle de 30° . Dans l'air d'indice optique 1,0, l'aile a une couleur bleue. Plongée dans l'acétone d'indice optique 1,4, l'aile a une couleur verte. Montrer que cette observation permet d'estimer e , connaissant l'indice optique de la couche c_1 . On ne demande pas de réaliser cette estimation.

Q68. Si l'épaisseur e est grande, il arrive que la structure devienne transparente : le phénomène d'interférences n'a plus lieu. Expliquer.