

Modèle scalaire des ondes lumineuses

Extrait du programme de TSI1

Dans la partie 1, [...]. L'introduction de la somme de deux sinusoïdes 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'ELECTROMAGNETISME A L'OPTIQUE GEOMETRIQUE	4
1.1	OPTIQUE GEOMETRIQUE	4
1.2	LIMITES DE L'OPTIQUE GEOMETRIQUE.....	5
2	PROPAGATION D'UNE VIBRATION SCALAIRE	6
2.1	DEFINITION DU MODELE.....	6
2.2	ONDE SPHERIQUE, ONDE PLANE	6
2.3	RETARD DE PHASE D'UNE ONDE PLANE PROGRESSIVE LUMINEUSE MONOCHROMATIQUE	7
2.4	CHEMIN OPTIQUE	7
2.5	SURFACE D'ONDE	9
2.6	EFFET D'UNE LENTILLE MINCE DANS L'APPROXIMATION DE GAUSS	9
3	COHERENCE D'UNE SOURCE.....	10
3.1	DIFFERENTS TYPES DE SOURCES LUMINEUSES.....	10
3.2	MODELE D'EMISSION	10
4	INTENSITE LUMINEUSE.....	12
4.1	LES DETECTEURS LUMINEUX.....	12
4.2	INTENSITE LUMINEUSE	12
5	QUESTIONS DE COURS	13
6	QUESTIONS A CHOIX MULTIPLES.....	13
7	EXERCICES	14
7.1	SURFACE D'ONDE APRES UNE LAME PRESENTANT UN DEFECT D'EPAISSEUR.....	14
7.2	TRANSFORMATION DES SURFACES D'ONDE PAR UNE LENTILLE CONVERGENTE.....	14
7.3	CALCULS DE CHEMINS OPTIQUES.....	14
7.4	TEMPS DE COHERENCE ET LARGEUR SPECTRALE	14

1 De l'électromagnétisme à l'optique géométrique

La lumière étant une onde électromagnétique elle n'est décrite correctement que par la donnée du champ électromagnétique $\{\vec{E}, \vec{B}\}$, dont la structure générale est très complexe. Mais plusieurs types de simplifications sont possibles.

1.1 Optique géométrique

1.1.1 Cadre d'application

Pour une onde plane progressive dans un milieu LHI transparent, on peut caractériser l'onde par :

-

-

Ces deux quantités sont justement celles qui décrivent localement un rayon lumineux tel qu'il a été défini en optique géométrique. Cependant, le modèle de l'optique géométrique n'est valide que dans certains cas de figures.

Remarque :

Cette condition impose d'utiliser des instruments d'optiques (lentilles, miroirs, ...) de taille plus importante que la longueur d'onde.

1.1.2 TP de révision

1.1.2.1 Matériel à disposition

- | | |
|---|---------------------------|
| - Banc d'optique | - Miroir |
| - Source lumineuse avec objet P | - Supports pour lentilles |
| - Lentilles minces (distances focales : 100, 200, 250 mm) | - Ecran |

1.1.2.2 Détermination de distance focale

1.1.2.2.1 Méthode d'autocollimation

En prenant la lentille de votre choix, retrouver sa distance focale en utilisant la méthode d'autocollimation. Faire un schéma pour expliquer la méthode. Faire la manipulation et compléter le schéma en relevant scrupuleusement les positions des différentes parties sur le banc d'optique. Evaluer l'incertitude sur votre mesure.

1.1.2.2.2 Formules de conjugaison

On rappelle la formule de conjugaison de Descartes :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'} \quad \text{où} \quad \begin{cases} O : \text{centre optique de la lentille} \\ A' : \text{image de A via la lentille} \\ A : \text{objet} \\ f' : \text{distance focale} \end{cases}$$

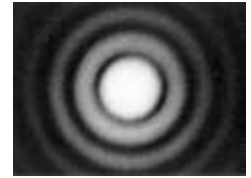
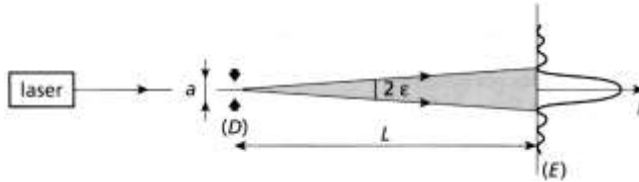
Faites des mesures adéquates de distances pour retrouver la distance focale de la lentille que vous avez choisie. Détailler le protocole et les mesures effectuées. Le calcul de la distance focale doit être fait à partir de plusieurs mesures. Evaluer l'incertitude sur vos mesures.

Comparer les deux méthodes précédentes.

1.2 Limites de l'optique géométrique

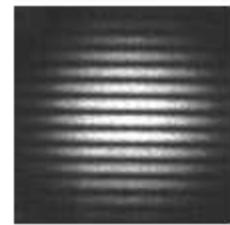
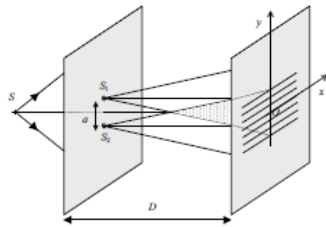
La notion de rayon lumineux suppose qu'on ne s'intéresse qu'à un mince pinceau de lumière. On place alors un diaphragme devant une source de lumière quasi ponctuelle et monochromatique. Pour essayer de caractériser ce rayon lumineux, on va petit à petit diminuer l'ouverture du diaphragme. Or, plus celle-ci diminue et plus le faisceau de lumière émergent s'élargit. En effet, on se rapproche alors de la limite d'application de l'optique géométrique, puisque la longueur typique a se rapproche de la valeur de la longueur d'onde.

C'est le phénomène de diffraction.



Voici l'expérience réalisée par Thomas Young en 1809. Un écran opaque, percé de deux petits trous, est éclairé par une source S quasi ponctuelle et monochromatique. On observe la lumière atteignant un écran placé un peu plus loin. Sur l'écran sont alternées des bandes claires et sombres. Si l'optique géométrique était respectée, on ne devrait voir sur l'écran que deux points lumineux.

Cette expérience met en évidence le phénomène d'interférences, étudié au prochain chapitre.



2 Propagation d'une vibration scalaire

2.1 Définition du modèle

D'après les observations précédentes, il apparaît donc nécessaire au-delà de l'approximation de l'optique géométrique de garder une trace de la phase de l'onde et de son amplitude.

Pour une onde électromagnétique polarisée rectilignement, le champ électrique se met sous la forme :

Comme ce dernier est constant, on peut l'omettre et donc ne garder qu'une grandeur scalaire, que l'on appelle **vibration lumineuse** ou **amplitude lumineuse**.

Définition :

Remarque :

Ce modèle ne permet pas de rendre compte des expériences de polarisation. Il n'est donc valable que dans les deux cas suivants :

- la lumière est polarisée rectilignement avec la même direction en tout point
- la lumière est non polarisée partout.

2.2 Onde sphérique, onde plane

Soit une onde lumineuse émise par une source S ponctuelle telle que :

L'onde se propage jusqu'à un point M . Elle y arrive donc avec un temps de retard (ou durée de propagation) t_r , telle que :

Sauf que de manière générale, une source ponctuelle S émet une onde lumineuse dont la structure est sphérique. Il y a décroissance en $1/r$ de l'amplitude pour une nécessaire conservation de l'énergie :

Cependant, localement, à grande distance de la source, on peut assimiler l'onde sphérique à une **onde plane**. Les variations de phase deviennent prépondérantes devant la variation d'amplitude et cette dernière peut être considérée comme constante. Alors on a bien :

2.3 Retard de phase d'une onde plane progressive lumineuse monochromatique

L'amplitude lumineuse d'une onde lumineuse ici considérée comme une OPPM d'amplitude s_0 et de **retard de phase** $\varphi(M)$ s'écrit sous la forme :



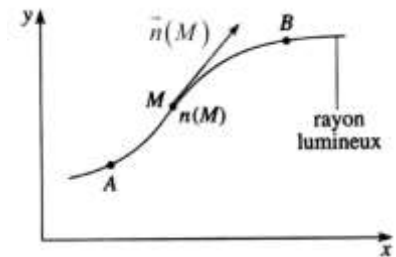
Remarque :

Ce temps de retard va dépendre du chemin optique parcouru par l'onde dans le milieu que l'on notera (SM) et de sa vitesse de propagation.

2.4 Chemin optique

Dans le cas général, l'indice du milieu peut varier de façon continue, et le rayon lumineux ne se propage plus en ligne droite mais courbe. On introduit alors la notion de **chemin optique**.

Définition :



Remarque :

L'indice optique d'un milieu n'est pas toujours constant (exemple : mirage).

Cas particulier : Milieu homogène

Si le milieu est homogène (indice optique n constant), la lumière se propage en ligne droite comme dans le vide.

Durée réelle mise pour aller de A à B dans le milieu :

Chemin parcouru dans le vide pendant t_r :

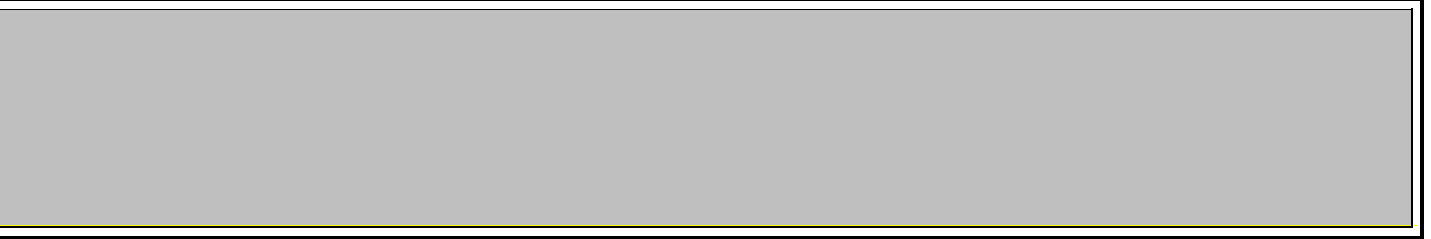
Dans le cas particulier d'un milieu homogène, le chemin optique de A à B est égal à :

Alors l'amplitude lumineuse de l'onde au point M peut se mettre sous la forme :

Et si l'on se trouve dans le vide :

Généralisation :

L'amplitude lumineuse d'une onde lumineuse ici considérée comme une OPPM d'amplitude s_0 et de **retard de phase** $\varphi(M)$ dans un milieu d'indice n s'écrit sous la forme :

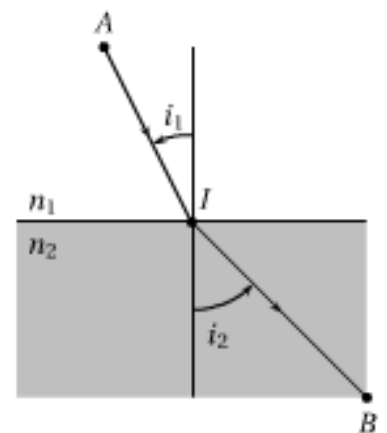


Remarque :

Le déphasage d'une OPPM, à cause de sa propagation entre deux points A et B , se met sous la forme :

Exemple :

Considérons le cas de la réfraction d'une onde lumineuse lorsqu'elle rencontre un dioptre entre deux milieux homogènes. Quel est le temps de parcours pour aller de A à B ? En déduire une expression du chemin optique en fonction des indices des milieux.



Supplément :

Définition :

Pour un milieu quelconque d'indice n , on définit le **chemin optique**, (AB) , sur un rayon lumineux curviligne quelconque de A à B (d'abscisse curviligne s) par :

$$L_{AB} = (AB) = \int_A^B n(M) ds$$

2.5 Surface d'onde

Définition :

Conséquence :

Théorème de Malus (admis) :

Remarque : dans un milieu d'indice constant

2.6 Effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss

Définition :

Un système optique (S) est dit **rigoureusement stigmatique** pour un couple de points A et A' si tout rayon lumineux passant par A passe par A' après avoir traversé le système (S) .

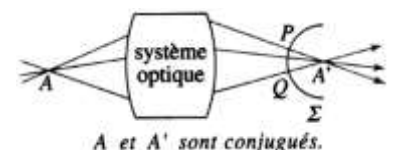
On dit encore que A et A' sont conjugués par rapport à (S) .

Remarque :

Le stigmatisme rigoureux est parfois impossible à réaliser. On se contente en général du **stigmatisme approché**. Alors, tous les rayons issus du point objet A passent au voisinage immédiat d'un point A'

On se place alors dans les **conditions de Gauss** : tous les rayons lumineux qui traversent le système optique font avec l'axe des angles faibles : ces rayons sont dits **paraxiaux**.

Propriété :



Remarque :

On dit aussi que le chemin optique séparant deux points conjugués est indépendant du rayon de lumière choisi.

3 Cohérence d'une source

3.1 Différents types de sources lumineuses

3.1.1 Lampe à filament

Le principe d'une lampe à filament est de porter le filament de la lampe à haute température par effet Joule. Les charges contenues dans le filament possèdent alors une agitation thermique importante et émettent un rayonnement électromagnétique (dans le domaine du visible notamment), dit rayonnement thermique.

Son spectre est continu et couvre l'ensemble du visible et son maximum se situe proche de l'infrarouge.

Remarque : Le rayonnement solaire est de ce type mais avec un maximum dans le jaune-orange.

Rappel :

λ (nm)	< 400	500	550	590	630	> 750
f (Hz)	$> 7,5 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$	$5,5 \cdot 10^{14}$	$5,1 \cdot 10^{14}$	$4,8 \cdot 10^{14}$	$< 4,0 \cdot 10^{14}$
Couleur	ultra violet	bleu	vert	jaune orangé	rouge	infra rouge

3.1.2 Lampe spectrale

De manière fondamentale, la lumière est constituée de photons d'énergie : $E = h\nu$ où h est la constante de Planck et ν la fréquence de l'onde. L'émission d'un photon s'interprète au niveau microscopique par le passage d'un électron d'un niveau excité à un niveau de plus basse énergie.

Ces lampes contiennent une vapeur atomique (vapeur de mercure, de sodium, ...). Un flux d'électron parcourt cette vapeur entre les électrodes contenues dans l'ampoule. Ces électrons entrent en collision avec les atomes, qui sont alors excités. La désexcitation de ceux-ci provoque l'émission de photons.

Son spectre est constitué de raies discrètes, caractéristiques des atomes de la vapeur. Elles sont fines de l'ordre de 0,01 à 0,1 nm. Elles ne peuvent être purement monochromatiques. En effet, la mécanique quantique et plus précisément le principe d'incertitude d'Heisenberg, imposent un étalement minimal en pulsation $\Delta\omega$ pour un processus durant le temps Δt : $\Delta\omega\Delta t \geq 1$.

3.1.3 Laser

Voir approche documentaire.

Contrairement aux deux types précédents de sources lumineuses, l'émission d'un photon par désexcitation d'un atome n'est pas spontanée mais stimulée. Cette dernière est déclenchée par un photon incident résonant, c'est-à-dire de même fréquence ν . Le photon émis est cohérent avec le photon incident : il a même fréquence, même direction de propagation et est en phase avec lui. Pour que l'émission induite soit importante, il est nécessaire que beaucoup d'électrons soient dans le niveau excité 1 et le restent suffisamment longtemps pour pouvoir réaliser une émission stimulée. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une excitation, par un procédé nommé pompage optique, amenant massivement les électrons du niveau fondamental à un niveau excité : on obtient l'inversion de population voulue. Le milieu contenant les atomes est ensuite placé dans une cavité résonante.

La lumière produite peut en première approximation être considérée comme monochromatique et quasi parallèle.

3.2 Modèle d'émission

Pour modéliser les conditions microscopiques et expérimentales nécessaires à l'émission d'un rayonnement lumineux. On considère que le rayonnement émis par la source est constitué par la superposition de **trains d'onde**.

Chaque train d'onde (comme une impulsion) est de durée finie moyenne appelée **temps de cohérence** Δt et possède une phase à l'origine φ_0 constante. Il est constitué d'un très grand nombre d'oscillations de la grandeur vibrante de période $T = \frac{1}{f}$. A la fin de ce temps Δt , l'onde s'annule. Puis, elle reprend pendant un nouveau temps Δt avec une phase à l'origine différente et aléatoire.

Cela permet donc de représenter le caractère discontinu de la lumière.

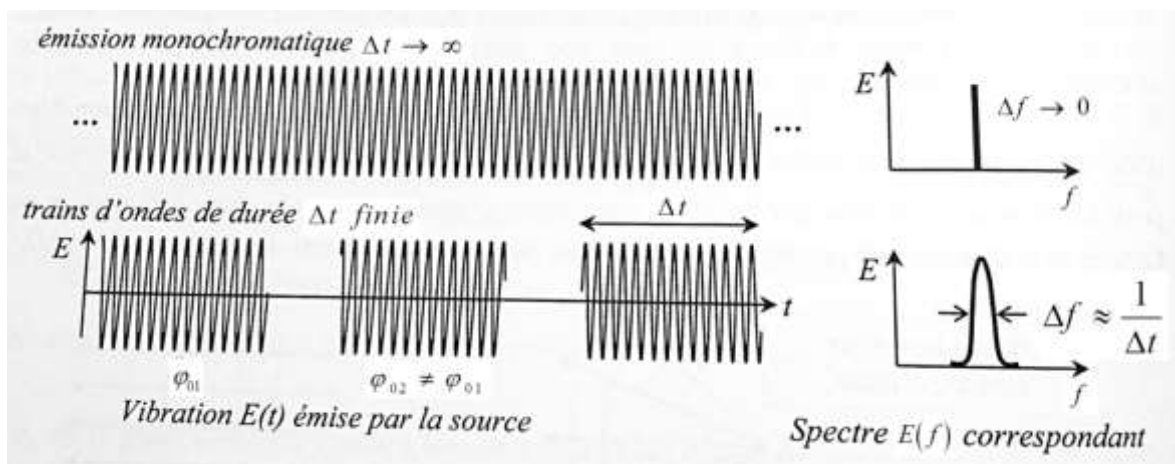
De plus, pour une fonction non périodique de durée Δt , on admet que la largeur de son spectre Δf est telle que :

Propriété :

On peut relier la durée des trains d'onde à la largeur spectrale d'une source par :

Remarques :

On comprend que suivant ce modèle une source purement monochromatique n'existe pas car alors



Plus une source possède un spectre étendu, plus les trains d'onde qu'elle émet sont courts. On dit que la source possède une faible cohérence temporelle.

Pour une lampe spectrale : $\Delta\lambda \approx 0,1 \text{ nm}$ $\Rightarrow$ pour $\lambda = 600 \text{ nm}$ $\Rightarrow$

Pour une lumière blanche :

Pour un laser :

On peut définir aussi la **longueur du train d'onde** L_c tel que dans un milieu d'indice n :

4 Intensité lumineuse

4.1 Les détecteurs lumineux

Les récepteurs lumineux ne sont sensibles qu'à la valeur moyenne de la puissance lumineuse qu'ils reçoivent ou encore fournissent un signal proportionnel à l'énergie lumineuse reçue pendant son temps d'intégration.

En effet, les récepteurs lumineux (photocellules, pellicules photo, œil, ...) ont des temps d'intégration τ_r très grands devant la période des ondes lumineuses dans le visible $T = 10^{-14} \text{ s}$:

- pour l'œil :

- pour une photodiode :

- pour une pellicule photo :

Le détecteur moyenne donc (sur une durée τ_r) le signal qui lui est envoyé.

4.2 Intensité lumineuse

On appelle **intensité lumineuse** en un point M la puissance lumineuse moyenne reçue, δP , par unité de surface, δS , sur un capteur placé en M :

La lumière étant une onde électromagnétique, sa puissance découle du calcul du vecteur de Poynting d'où :

La puissance lumineuse moyenne reçue est donc proportionnelle à la valeur moyenne de l'amplitude lumineuse au carré, il en va de même pour l'intensité lumineuse.

Définition :

L'**intensité lumineuse**, I (en candela, Cd) est proportionnelle à la moyenne temporelle du carré de l'amplitude lumineuse au point M :

Remarque :

En optique ondulatoire, on ne fait que comparer les intensités lumineuses en deux points, on ne détermine pas de valeur numérique de l'intensité lumineuse. La valeur de la constante K n'est donc pas utile à connaître. Elle est souvent prise égale à 1.

L'**intensité lumineuse** d'une OPPM se met alors sous la forme pour $K = 1$:

5 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.

6 Questions à choix multiples

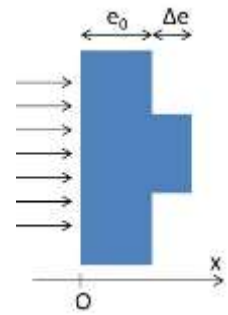
En ligne sur la plateforme Moodle accessible via Atrium : section « Optique ondulatoire / Modèle scalaire / Test ».

7 Exercices

7.1 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'épaisseur e_0 d'indice n présentant un défaut d'épaisseur Δe .

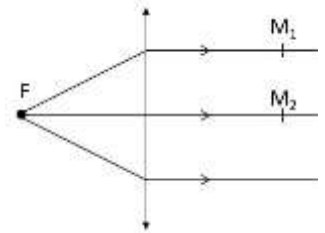
- 1) Dessiner la forme de la surface d'onde avant et après la lame.
- 2) Quelle est la différence de chemin optique, après la lame à la même abscisse x , entre un rayon ayant traversé le défaut et un autre ne l'ayant pas traversé ? En déduire la différence de phase.



7.2 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 ?



7.3 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) $(MA) - (PA)$

7.4 Temps de cohérence et largeur spectrale

- 1) Retrouver simplement le temps de cohérence (durée d'un train d'onde) pour une source de lumière blanche.
- 2) Déduire du temps de cohérence du laser ($\Delta t \approx 10^{-8} s$) son étendue spectrale $\Delta \lambda$.
- 3) On donne l'étendue spectrale d'une lampe spectrale ($\Delta \lambda = 0,1 nm$) centrée sur la longueur d'onde $\lambda = 589 nm$. Trouver son temps de cohérence.