

LP3 : Aspects ondulatoires en optique

Leçon présentée par Mélanie

Element imposés possibles : diffraction, interférences, différence de marche, couleurs interférentielles

Niveau : Terminale spécialité (Caractériser les phénomènes ondulatoires : Diffraction et interférences)

Prérequis :

- Optique géométrique (2nde)
- Ondes mécaniques progressives et ondes périodiques (1ere)
- Modèle ondulatoire de la lumière (1ere)
- Retard entre deux ondes (1ere)
- Périodicité temporelle et spatiale (Terminale)
- Superposition de deux ondes (Term)

Difficultés :

- Notions assez abstraites : échelles de grandeurs microscopique
- Confusion diffraction et interférences
- Chemin optique : peut être difficile à appréhender

séquence pédagogique Dans le cadre de l'étude des ondes, on a vu les ondes acoustiques et l'effet Doppler au cours précédent. Ici, on essaie de décrire le comportement ondulatoire de la lumière. Dans la suite de la séquence, optique géométrique et aspect corpusculaire de la lumière.

TD : Interférences à la surface de l'eau : première approche des interférences, déduction des conditions d'interférences constructives / destructives

TP : Exercices/activités sur des applications (couleur ailes papillon)

Capacité numérique : Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, la somme de deux signaux sinusoïdaux périodiques synchrones en faisant varier la phase à l'origine de l'un des deux.

Problématique : Comment prouver le comportement ondulatoire de la lumière ?

Objectif : reconnaître et caractériser un phénomène d'interférence, de diffraction.

Bibliographie

- LLS : animation [ici](#)
- belin
- Hachette
- Lumière et luminescence

Contents

1	Diffraction	2
1.1	Définition et conditions d'observations	2
1.2	Mise en évidence dans le cas de la lumière	3
1.3	Application : mesure de l'épaisseur d'un cheveu	3
1.4	Limites dues à la diffraction	3

2	Superposition de deux ondes	4
2.1	Dispositif des fentes d'Young	4
2.2	Approche ondulatoire du phénomène	4
3	Caractérisation des interférences	5
3.1	Condition d'interférences	5
3.2	Expression de l'interfrange	5
3.3	Application : détermination de la longueur d'onde du laser	6

Introduction

source : lumière et luminescence p22

Si on regarde de bulles de savons, *manip qualitative souffler sur liquide à bulles* on y voit des couleurs. On retrouve cette observation sur de très fines feuilles de verre soufflée. Ces couleurs visibles alors que la lumière environnante semble blanche découvertes par Hooke en 1665 intrigue les physiciens.

La même année, Grimaldi illumine un petit objet par une source lumineuse ponctuelle et observe que l'image résultante n'est pas nette, comme on l'attendrait si la lumière se propageait rectilignement. On observe des couleurs autour de l'image. Ces couleurs sont les mêmes que celles observées par Hooke. Grimaldi invente alors le nom de diffraction pour décrire ce phénomène.

Ces phénomènes, entre autres, ont mené les physiciens à s'interroger sur la nature de la lumière.

Deux théories s'opposent alors : celle de [Huygens](#), qui compare la lumière au son et la décrit comme un phénomène vibratoire qui se propage par ondes. Et celle de Newton, qui postule que la lumière est constituée de corpuscules. C'est la [dualité onde-corpuscule](#).

Dans ce cours, nous allons nous mettre dans les pas d'un physicien de l'école ondulatoire pour tenter de prouver ce comportement de la lumière.

1 Diffraction

Le premier élément est alors la diffraction car c'est un phénomène observé à notre échelle pour des ondes. Essayons de le mettre en évidence pour la lumière.

1.1 Définition et conditions d'observations

Diffraction : modification de la direction de propagation d'une onde progressive périodique lorsque celle-ci rencontre un obstacle ou une ouverture.

C'est ce que l'on observe sur le *diapo houle qui passe entre deux digues*, animation. On passe alors d'ondes planes à des ondes sphériques. On le caractérise par un écart angulaire noté θ et appelé angle caractéristique de diffraction.

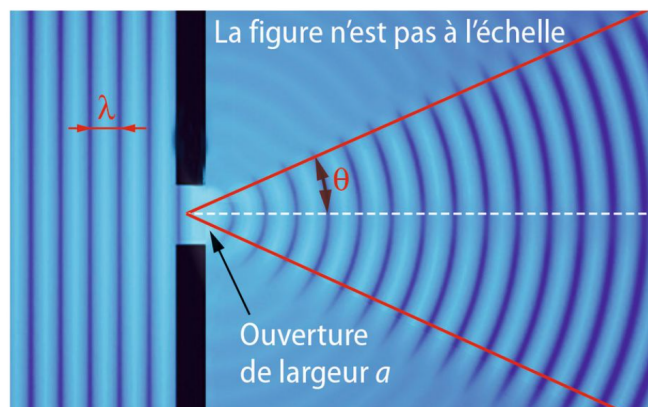


Figure 1: Définition du phénomène de diffraction (source : belin)

Observations :

- Cette modification se fait dans un plan perpendiculaire à l'axe principal de l'obstacle ou de l'ouverture.
- Le phénomène de diffraction ne modifie ni la longueur d'onde ni la fréquence de l'onde.
- Cette diffraction n'a pas lieu à chaque obstacle. Si on prend cette houle mais avec une ouverture grande par rapport à l'écart entre deux vagues, on ne voit une modification de la direction de propagation qu'aux bords de l'obstacle.

On en déduit alors que le phénomène de diffraction, s'observe lorsque les dimensions de l'ouverture sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde et st d'autant plus marquée que la taille de l'obstacle ou de l'ouverture est faible.

Dans le cas d'une onde progressive périodique, on peut également établir une relation entre θ , λ et a :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

1.2 Mise en évidence dans le cas de la lumière

Si la lumière est une onde, on n'aura alors pas de phénomène de diffraction lumineuse lorsque l'on regarde un livre : le livre est bien plus grand que la longueur d'onde de la lumière visible (centaine de nm).

On prend donc un objet suffisamment petit. Je prends alors une fente de 100 nm.

exp : Pour observer le cône de diffraction, taper les broches du tableau sur le chemin optique.

Le cône de diffraction est difficile à quantifier, je prends alors un écran et je le met loin de mon objet pour avoir une grande image. (conditions de Fraunhofer).

On y voit plusieurs tâches (figure 2)

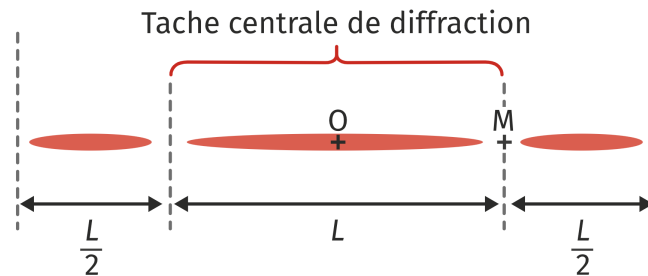


Figure 2: Allure des tâches sur l'écran dans le cas de la diffraction de fraunhofer (source : LLS)

Dans le cas d'une grande distance entre l'objet et l'écran ($D \gg a$), on peut relier la taille de la tache centrale de diffraction à l'angle θ et à la distance entre l'objet et l'écran D par :

$$\theta = \frac{L}{2D}$$

1.3 Application : mesure de l'épaisseur d'un cheveu

On trace une courbe d'étalonnage $L = f(\frac{1}{a}) = \frac{2D\lambda}{a}$. On garde D et λ fixes. On a donc un coefficient directeur qui vaut $2D\lambda$.

En reportant le point obtenu avec le cheveu sur la droite, on obtient son épaisseur.

Faire des incertitudes de type B : avec la pente on obtient l'incertitude de λD et avec la mesure de L on a son incertitude : on applique la formule correspondant aux incertitudes composées.

1.4 Limites dues à la diffraction

Pouvoir de résolution des appareils optiques, choix de la longueur d'onde de lecture du CD (Hachette).

On a alors pu montrer que la lumière diffracte, à l'image des ondes. Mais la diffraction ne constitue pas une preuve assez forte du comportement ondulatoire de la lumière. Les physiciens continuent de s'y opposer car elle ne

permet pas de concilier le trajet rectiligne de la lumière et la propagation par ondes. Il leur faut un argument plus fort.

C'est plus d'un siècle plus tard, en 1801, qu'[Young](#) propose une expérience qui permettra de réhabiliter la théorie ondulatoire : et si au lieu d'éclairer une fente, on en éclairait deux ?

2 Superposition de deux ondes

On appelle cette partie superposition afin de ne pas gâcher la surprise, on reste dans la démarche de découverte.

2.1 Dispositif des fentes d'Young

Schéma du dispositif expérimental (figure 3)

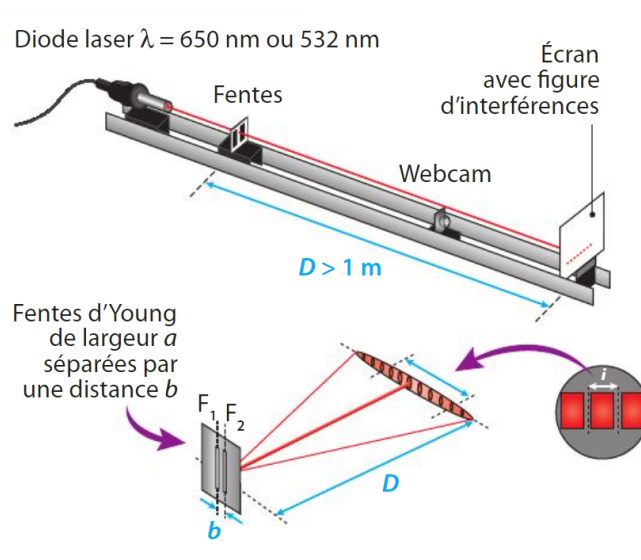


Figure 3: Schéma du dispositif expérimental (source : Hachette)

On utilise deux fentes de largeur a séparées d'une distance b et on visualise la figure sur l'écran à une distance D .

On observe alors des **franges brillantes** et des franges sombres, il s'agit d'une **figure d'interférences**. On la caractérise par l'écart i entre deux franges brillantes ou deux franges sombres : l'**interfrange**.

Mais pourquoi obtient-on de l'obscurité en additionnant de la lumière ?

On ne peut expliquer ce comportement que par une approche ondulatoire.

2.2 Approche ondulatoire du phénomène

Animation avec les vagues ici. S_1 et S_2 sont deux sources de même fréquence (synchrones) qui frappent la surface de l'eau. On a un flotteur rouge dont on enregistre le mouvement. Selon sa position, le flotteur n'a pas le même mouvement. On voit des zones où il ne bouge pas et des zones où l'amplitude de son mouvement est plus grande que celle d'une source.

Lorsque deux ondes de même nature se croisent (deux ondes mécaniques par exemple), leurs elongations s'additionnent ; elles **interfèrent**. On a alors en tout point M du flotteur

$$s(M, t) = s_1(M, t) + s_2(M, t)$$

On remarque que les interférences sont expliquées par le retard d'une des deux ondes par rapport à l'autre.

Pour certaines positions de la surface de l'eau, les deux ondes provenant des sources S_1 et S_2 sont **en phase**. Ces deux ondes se renforcent, le flotteur oscille donc de manière maximale.

Les interférences sont **constructives**.

Pour d'autres positions de la surface de l'eau, les deux ondes provenant des sources S1 et S2 sont en **opposition de phase**.

Les deux ondes s'annulent, le flotteur est donc immobile.

Les interférences sont **destructives**.

Dans le montage optique, chaque fente correspond à une source lumineuse et leurs intensités s'additionnent dans l'espace. Les interférences destructives correspondent à une franges sombre et constructives à des franges brillantes.

On a alors expliqué la figure d'interférences par une approche ondulatoire de la lumière.

Remarque : C'est grâce à des interférences destructives que les casques à réduction de bruit fonctionnent.

Mais si je prends de la lumière quelconque, je ne crée pas de pénombre, de même on voit rarement des occasions où le son est totalement nul à un point d'une salle. Quelles sont conditions d'interférences ?

3 Caractérisation des interférences

3.1 Condition d'interférences

Deux ondes peuvent interférer si elles ont la **même fréquence** (synchrones) et qu'elles ont un **déphasage constant** l'une par rapport à l'autre. On dit alors qu'elles sont **cohérentes**.

Le caractère constructif ou destructif de la superposition de deux ondes en un point P dépend du **retard** d'une onde par rapport à l'autre ou, de manière équivalente, à la différence de trajet appelé différence de **chemin optique** δ (m).

Le chemin optique entre la source 1 et le point M est : $l_{S1M} = n_{milieu} S1M$! approximation, en réalité on intègre. Pourquoi importance de l'indice optique du milieu ? Différence de vitesse.

On obtient alors une différence de chemin optique.

$$\delta = l_{S2M} - l_{S1M} = n(S2M - S1M)$$

Ce qui nous permet de définir les **conditions d'interférence** :

- Constructive : les ondes sont en phase $\delta = k\lambda, k \in (Z)$
- Destructive : les ondes sont en opposition de phase $\delta = (k + 1/2)\lambda, k \in (Z)$

3.2 Expression de l'interfrange

Simulation ici : si on rapproche l'écran, i diminue donc i prop à D . Si on rapproche les deux sources (b), i augmente. Si on diminue la longueur d'onde du laser, i diminue.

On repère le point de l'écran par sa coordonnée x , lorsque $D \gg b$ on peut exprimer la différence de chemin optique par :

$$\delta_k = \frac{n_{milieu} x_k b}{D}$$

On a alors

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\delta_k D}{n_{milieu} b} - \frac{\delta_{k+1} D}{n_{milieu} b}$$

Condition d'interférences constructives : $\delta = k\lambda$

Donc la distance entre deux franges brillantes est :

$$i = \frac{\lambda D}{n_{milieu} b}$$

On retrouve alors les observations de l'expérience.

3.3 Application : détermination de la longueur d'onde du laser

fiche ici

Dans le montage, on a $b = 300 \pm 1 \mu\text{m}$, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

$$\text{Or, } i = \frac{\lambda D}{n_{\text{air}} b} = \frac{\lambda D}{b}$$

On mesure sur l'écran plusieurs interfranges et on moyenne pour les incertitudes. On trace une droite $i = f(D)$ de pente $\frac{\lambda}{b}$.

Résultat : on a une pente de 0,002 donc une longueur d'onde de $\lambda = (60 \pm 8 \times 10^{-8} \text{ m})$

Conclusion

On a alors mis en oeuvre et caractérisé les expériences historiques qui ont menées les physiciens à considérer le modèle ondulatoire de la lumière. Ces deux phénomènes, diffraction et interférences sont visibles au quotidien. On essaiera alors d'expliquer les couleurs de la bulle de savon en TD.

Au cours de la prochaine suivante, nous allons utiliser le modèle ondulatoire pour nous intéresser à l'étude d'instruments optiques limités par la diffraction.

Mais il ne faut pas tout de suite écarter le modèle corpusculaire de la lumière car il nous reste un phénomène à expliquer : l'interaction lumière-matière.

Question

- Difficile : notions abstraites. Couleur des ailes de papillon, plus concret ? Casque antibruit.
- Condition d'interférence, pourquoi hypothèses comment expliquer à un élève ? Monochromatique : on veut la moyenne des signaux donc avec trop de longueur d'ondes on a moyenne nulle et les figures d'interférences se superposent.
- Fentes d'young, figure ressemble à une figure de diffraction et on a les interférences dedans ? Enveloppe de la figure de diff et à l'intérieur interférences?
- Caractériser le phénomène d'interférence ?

Retours

-