

Polarisation, Interférométrie & Fontaine laser



Etudiants :

BRIQUET Orianne

GAVRILENCO Ana

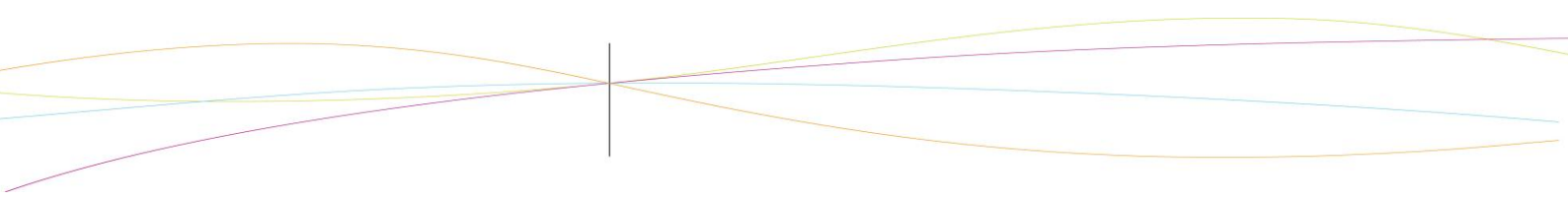
LIN Jinxing

SANTA MARIA MAIS Loïc

YUSOF Bukhari

Enseignant- responsable du projet :

HONORE David



Cette page est volontairement gardée vierge.

Date de remise du rapport : 18/06/2012

Référence du projet : STPI/P6-3/2012 – 034

Intitulé du projet : **Polarisation, interférométrie, strioscopie et fontaine laser**

Type de projet : **Expérimental et bibliographique**

Objectifs du projet :

Le premier objectif est d'observer les différents phénomènes optiques à travers quatre expériences, deux d'entre elles déjà entamées par le groupe de l'année précédente. Dans ce cas, on se propose de trouver des améliorations et de les mettre en point.

Le second objectif est de développer nos capacités de travail en équipe dans la réalisation d'un projet.

Mots-clefs du projet:

Optique, strioscopie, polarisation, interféromètre de Michelson, fontaine laser

Si existant, le n° de cahier laboratoire associé: **A30230**

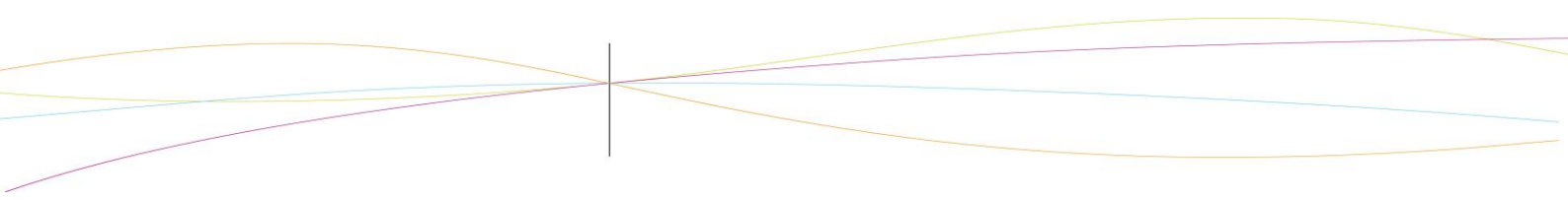


Table des matières

Contents

Table des matières	1
Introduction.	2
Organisation du travail.	3
I) Interféromètre de Michelson.	4
1) Généralités et Principe.	4
a) Point historique.....	4
b) Description de l'interféromètre.....	5
c) La théorie.	5
d) Réglage de l'interféromètre.....	5
e) Éclairage de l'interféromètre par le collimateur.	5
f) Réglage du parallélisme de la compensatrice et de la séparatrice à l'aide de l'optique géométrique.	6
g) Réglage de l'interféromètre en anneaux.	6
h) Stabilisation des anneaux.	6
i) Visualisation de l'évolution temporelle des anneaux.	7
2) Manipulations.	8
II) Strioscopie :	9
1) Principe et applications	9
a) Points historiques	10
b) Applications	11
c) Explication du fonctionnement.....	12
d) Variations & distinctions.....	13
e) Explications théoriques	14
f) Diffraction de Fraunhofer.....	15
3) Manipulations.....	16
III) Polarisation	20
1) Polarisation rectiligne:	20
a) Qu'est-ce que c'est le polariseur ?	20
b) Qu'est-ce que c'est l'analyseur (polariseur2) ?	20
2) Loi de Malus	20
4) Action d'un objet transparent uniaxe sur une lumière polarisée rectilignement	23
5) Biréfringence.	25
IV) Fontaine laser :	26
a) Principe et applications.....	26
b) Explications théoriques.....	27
c) Manipulations	30
Conclusion	33
Bibliographie	34

Introduction

C'est dans le cadre de notre formation d'ingénieur que l'INSA de Rouen nous a demandé de réaliser un projet physique. Il fait partie intégrante de notre programme d'étudiants STPI 2.

A cours d'une première séance nous nous sommes réunis avec notre responsable de projet pour exposer les objectifs et les attentes liés à ce projet.

Il a développé les principales modalités du contenu du projet, les caractéristiques exigées et les conditions dans lesquelles seraient réalisés nos projets respectifs, soient : répondre à des applications physiques, être réalisé en groupe d'étudiants, et contenir une partie pratique expérimentale, accompagnée de ce dossier écrit.

Après avoir rapidement pris connaissance de notre groupe de travail, nous avons discuté des possibilités de manipulations que nous pouvions produire. En tenant compte de nos connaissances optiques préalables, de notre capacité à rechercher de nouvelles informations et notre aptitude à les assimiler et les réappliquer, nous avons pris la décision commune de réaliser une série d'expériences relatives au sujet principal.

Le projet sur lequel notre groupe fut affecté est lié à une des plus importantes branches de la physique : l'optique. L'optique est un domaine qui traite de la lumière et de ses propriétés, du rayonnement électromagnétique, de la vision ainsi que les systèmes utilisant ou émettant de la lumière. Comme c'est un domaine assez vaste, on a décidé de s'investir dans des sujets plus particuliers, qui d'après nous sont intéressants du point de vue théorique mais également du point de vue pratique. Globalement, à la base de ce projet se trouvent deux approches fondamentales : l'optique géométrique et l'optique ondulatoire. L'optique géométrique propose une analyse de la propagation de la lumière basée sur des principes simples : la propagation rectiligne et le retour inverse de la lumière. Elle a pu expliquer les phénomènes de la réflexion et de la réfraction. L'optique ondulatoire considère la lumière comme une onde ; elle prend en compte les phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation.

Notre projet de physique comporte quatre grandes parties : la stioscopie, la polarisation, l'interféromètre Michelson et la fontaine laser. Ces sous-thèmes sont liés entre eux par la mise en évidence de la propagation de la lumière mais dans des conditions différentes, ce qu'on a étudié à l'aide de différentes manipulations décrites par la suite.

Organisation du travail

Notre groupe est formé de 5 personnes. Avant de commencer le projet, on s'est proposé d'effectuer individuellement des recherches bibliographiques et de lire le rapport de projet de l'an dernier qui a déjà travaillé en partie sur notre sujet, afin que pour la première séance on aurait déjà une image générale de phénomènes concernant notre projet. Comme il s'agissait d'un travail expérimental et plusieurs thèmes à traiter, nous nous sommes divisés en sous-groupes de 2 et 3 pour réussir d'analyser en détail chaque expérience. Ainsi, Loic et Jinxing étaient en charge de la polarisation et l'interféromètre Michelson; Oriane, Bukhari et Ana pour la strioscopie et la fontaine laser. Aussi, lors de la première séance à l'aide de Monsieur Honoré, on a fait un planning de travail pour bien s'encadrer au niveau du temps.

Table 1 : tableau de la répartition des séances

Planning de travail	
<i>Le sujet</i>	<i>Nombre de séances</i>
La strioscopie	6
La polarisation	3
L'interféromètre Michelson	6
La fontaine laser	3
L'analyse/ Le bilan/Le travail sur le rapport	5

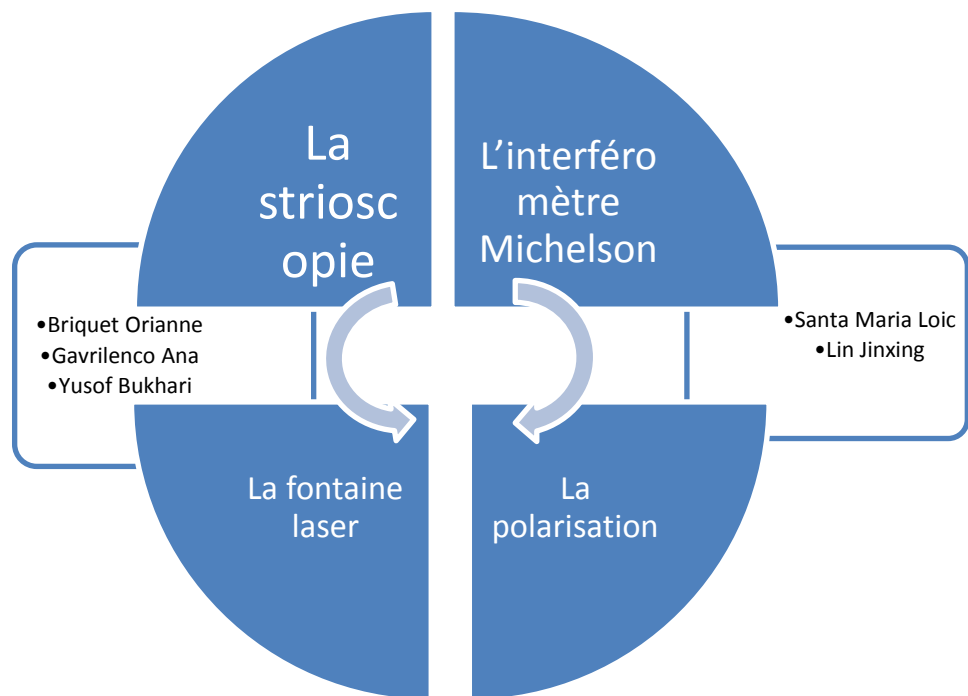


Figure 1 : Diagramme de la répartition des tâches

I) Interféromètre de Michelson.

1) Généralités et Principe.

a) Point historique.

L'interféromètre de Michelson (parfois appelé abusivement le Michelson) est un dispositif optique inventé par Albert Abraham Michelson qui produit des interférences par division d'amplitude. Il est constitué essentiellement de deux miroirs et d'une lame semi-réfléchissante. Les deux configurations possibles d'utilisation sont la configuration en lame d'air et celle en coin d'air.

Albert Abraham Michelson construit un interféromètre afin de tenter de mesurer la vitesse de la terre par rapport à l'éther, milieu hypothétique permettant la propagation de la lumière, vue comme une onde. En 1878, il réussit sa première mesure de la vitesse de la lumière, ce qui lui vaut le prix Rumford en 1888.

La résolution de son interféromètre de 1881 étant trop proche de l'écart qu'il voulait mesurer, ce n'est qu'à la suite de son association avec Edward Morley en 1887 que les problèmes de l'existence de l'éther et de l'invariance de la vitesse de la lumière furent posés, résolus en 1905 par la théorie de la relativité restreinte.

Michelson contribua à la mise au point de la technique de la synthèse d'ouverture, imaginée par Hippolyte Fizeau, pour déterminer le diamètre apparent des étoiles par des méthodes interférométriques.

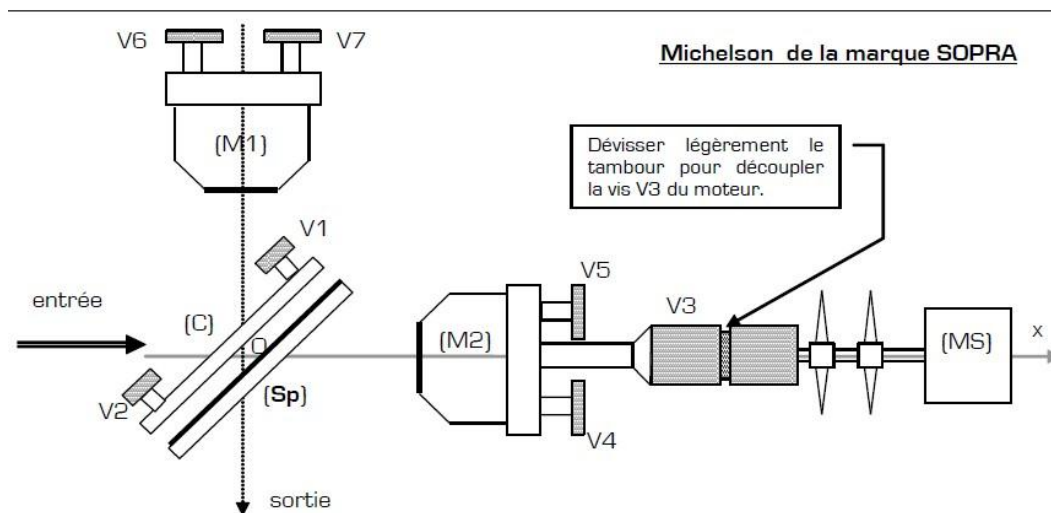


Figure 2 : Interférences lumineuses avec l'interféromètre de Michelson

b) Description de l'interféromètre.

L'interféromètre de Michelson comporte deux miroirs perpendiculaires M1 et M2, une séparatrice à 45° et une lame compensatrice C parallèle à la séparatrice Sp.

c) La théorie.

La source de lumière envoie un rayon vers la lame séparatrice. Quand le rayon passe la lame séparatrice, il est divisé en deux rayons. Un des deux rayons va au miroir M1 et revient par le même trajet réfléchissant par le miroir M1. C'est pareil entre l'autre rayon et le miroir M2. La différence de longueur d des bras de l'interféromètre induit une différence de marche entre les deux rayons égale à $2d$.

d) Réglage de l'interféromètre.

Égalisation grossière des longueurs des bras du Michelson.

Si nécessaire, tournez la molette pour égaliser à l'œil la longueur des bras I1 et I2. Ne pas utiliser de réglet pour éviter d'altérer le revêtement des miroirs.

Mise à hauteur des éléments du banc optique.

La source, la lentille et le filtre sont rassemblés à l'extrémité du banc proche de l'entrée de l'interféromètre et dégrossir, à l'œil, les hauteurs des différents éléments et les adapter à la hauteur de l'axe optique du Michelson.

Réglage du collimateur par la méthode d'auto collimation.

Le collimateur est réglé à l'infini par la méthode d'auto collimation. Utiliser un miroir plan auxiliaire et observer la netteté de la tache lumineuse de retour dans le plan du trou source. Utiliser un petit trou.

e) Éclairage de l'interféromètre par le collimateur.

Mettre délicatement un papier calque devant le miroir M2 pour ne conserver que les images dues au miroir M1, la séparatrice Sp et la compensatrice C.

Lorsque la séparatrice et la compensatrice ne sont pas parallèles, le champ à la sortie du Michelson présente une série d'images du collimateur –un trou dans le cas de la figure – alignées sur une droite inclinée par rapport à l'horizontale. La tache centrale est la plus lumineuse et servira de tache de référence pour continuer le réglage.

Déplacer le banc d'éclairage en translation et rotation horizontale pour éclairer le champ de

l'interféromètre de façon symétrique. Opérer de même sur les hauteurs de la lentille et du trou pour éclairer le centre du champ de l'interféromètre.

f) Réglage du parallélisme de la compensatrice et de la séparatrice à l'aide de l'optique géométrique.

Lorsque la séparatrice et la compensatrice sont parallèles, la série d'images est confondue avec une seule image provenant du miroir M1 uniquement, M2 étant toujours masqué par un papier calque. Jouer sur les deux vis de réglage grossier de la compensatrice pour confondre la série d'images.

g) Réglage de l'interféromètre en anneaux.

Retirer délicatement le papier calque et observer le champ du Michelson à la sortie de l'interféromètre. Deux taches apparaissent dans le champ provenant des deux trajets 1 et 2. En agissant sur les vis de réglage grossiers V4 et V5 du miroir M2. Ces deux taches se confondent et les miroirs M1 et M2 sont réglés au niveau de l'optique géométrique et presque réglés au niveau de l'optique ondulatoire.

Remplacer le diaphragme par un écran dépoli. En général, un phénomène d'interférence est visible. Si ce n'est pas le cas, refaire le réglage précédent avec plus de finesse. Le dépoli est utilisé pour augmenter l'étendue de la source et observer ainsi la localisation des anneaux, à l'infini.

Amener le centre des anneaux dans la région d'observation avec les vis V4 et V5.

Pour faciliter cette étape du réglage, on peut si nécessaire augmenter le contraste des phénomènes d'interférence en déplaçant très légèrement le banc de la source lumineuse.

h) Stabilisation des anneaux.

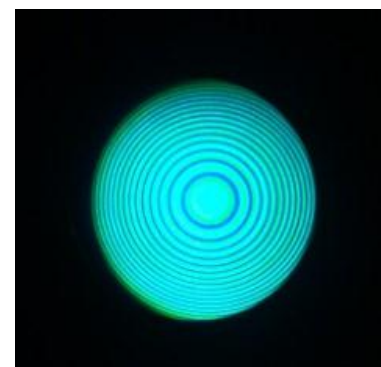
Placer l'œil à la sortie de l'interféromètre et le déplacer de bas en haut puis de gauche à droite en restant dans le champ de l'appareil c'est à dire dans la zone de lumière. Observer le centre des anneaux et compter le nombre d'anneaux rentrant ou sortant du centre.

Si ce nombre d'anneaux est plus élevé en déplacement vertical, régler d'abord cette direction en jouant sur la vis de réglage fin V6 pour stabiliser ce défilement des anneaux. Le sens de la vis est déterminé en observant le point haut du champ –par exemple –et en compensant le défaut de défilement des anneaux en tournant la vis V6 dans un sens arbitraire. Changer de sens si la stabilisation n'est pas atteinte.

Agir dans l'autre direction avec l'autre vis de réglage fin puis reprendre le réglage précédent car ces vis agissent par l'intermédiaire de lames de ressort et ne sont donc pas complètement indépendantes. Les anneaux doivent être stabilisés parfaitement après ce réglage, sauf peut-être sur les bords du champ.

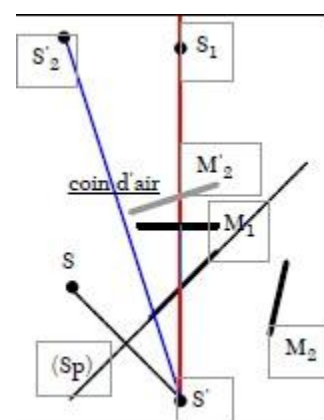
i) Visualisation de l'évolution temporelle des anneaux.

Mettre le moteur du déplacement du miroir M2 en marche. Visualiser l'évolution des anneaux.



Coin d'air

Si M1 et M'2 (la réflexion de M2 par la lame) se coupent en faisant un angle ϵ très faible, formant ainsi un coin d'air d'angle ϵ , les images S2 et S'1 de S sont quasiment alignées sur un axe orthogonal à l'axe optique : un écran placé orthogonalement à cet axe permet d'observer des franges d'interférences quasi-rectilignes, parallèles à « l'intersection » des miroirs. Une fois encore, la position de l'écran peut être quelconque sur l'axe : les franges sont délocalisées.



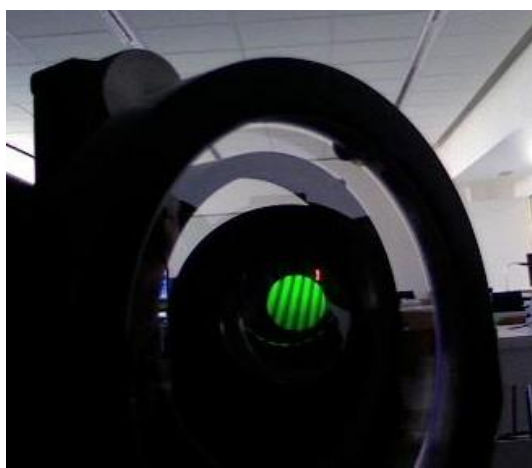
Réglage du coin d'air

On commence avec la vue des anneaux stables et on tourne la vis de molette V3 jusqu'à ce que l'on trouve une image homogène, ce qui veut dire que la longueur des bras est exactement la même.

On trouve une homogénéité à l'aide d'un filtre pour distinguer uniquement deux couleurs différentes, noir et vert. On trouve l'homogénéité quand on voit uniquement une image verte.

On a trouvé l'homogénéité de l'image avec une mesure de 0,008 de la vis de molette. Avec le filtre, on ne voit pas une grande différence quand on met le gaz sec. Juste avec le filtre de 546 nm (vert).

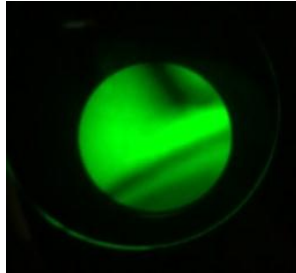
Et puis, on tourne les vis de réglage grossiers V4 et V5 du miroir M2 pour pencher le miroir M2, ainsi, on obtient un coin d'air entre M1 et M'2. On arrête de tourner V4 ou V5 quand on trouve une image des franges parallèles et nettes.



2) Manipulation

1. Changer l'indice entre le miroir M2 et la lampe séparatrice avec du gaz sec.

Pour observer le changement d'image par rapport à l'indice entre le miroir M2 et la lampe séparatrice, on a utilisé du gaz sec. On met du gaz sec sur interféromètre pour voir comment l'onde réagit avec une différence d'indice et on remarque un effet assez extraordinaire où on dirait un courant d'eau qui passe à travers l'image.



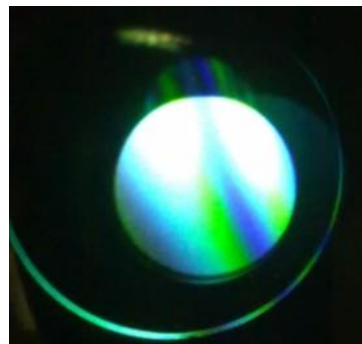
Remarque : On a trouvé des difficultés au moment de prendre des vidéos et des photos parce qu'on trouvait des luminosités qui nous ne permettaient pas de bien visualiser l'image. Le problème est peut être que la salle est dans le noir et la camera est réglé pour avoir l'image la plus claire possible, du coup l'image qui est déjà claire devient trop lumineuse.

A l'aide d'une lentille convergente on a réussi à agrandir l'image et entre la webcam et cette lentille on a mis en place un polariseur afin de rendre l'image plus claire. Le polariseur nous permet d'obtenir une lumière polarisée rectilignement dans une certaine direction, ce qui rend l'image plus nette.)

On fait aussi l'expérience avec du gaz sec avec des différents filtres. Le vert de 546 nm, violet 436 nm et orange 578 nm. On voit normalement une différence de grosseur des franges avec chaque filtre avec la même distance à chaque fois.

2. Changer l'indice entre le miroir M2 et la lampe séparatrice avec le fer de soudure.

Pour changer l'indice, il y a une autre méthode qui s'agit de la chaleur. Normalement, la chaleur peut bien changer l'indice d'air. Ainsi, on utilise le fer de soudure. Tout d'abord, on chauffe le fer de soudure puis on le met entre le miroir M2 et la lampe séparatrice. A ce moment, on peut clairement observer le changement d'image.



II) Strioscopie :

Un des objectifs de notre projet était d'étudier expérimentalement le phénomène de la strioscopie. Alors premièrement nous nous sommes intéressées de définir cette notion du point de vue scientifique et théorique.

D'après la définition, la strioscopie est une méthode optique de visualisation pour isoler dans une image des détails comme des faibles variations d'indice lors de la compression de l'air ou d'autres fluides. L'idée fondamentale de cette méthode est de retirer la lumière qui n'a pas été déviée par l'objet étudié, ce qu'on a essayé de mettre en pratique pendant les premières cours de P6.

Le phénomène qu'on a eu l'occasion d'analyser et les résultats obtenus peuvent être expliqué du point de vue de l'optique ondulatoire. Le fait qu'on observe les bords de notre objet sur l'écran et due à la diffraction, plus particulièrement diffraction de Fraunhofer.

1) Principe et applications

a) Points historiques

Elle est largement utilisée en aéronautique, bien que son rôle devienne de moins en moins important du fait du développement des simulations de mécanique des fluides par ordinateur.

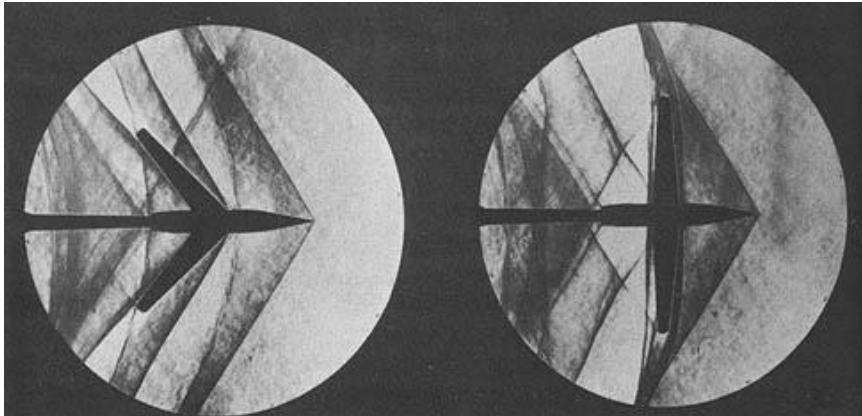
La strioscopie est une application du filtrage spatial en optique de Fourier. En effet, la diffraction de Fraunhofer nous indique que la lentille crée, dans son plan focal image, la transformée de Fourier de l'objet en question. On visualise ainsi, dans ce plan, les fréquences spatiales associées à l'objet, et le filtre cité plus haut est placé dans ce même plan afin d'éliminer certaines de ces fréquences spatiales. Cette interprétation ondulatoire de la strioscopie la rend comparable à un filtrage passe-haut.

On peut parfois remarquer les troubles dans l'air au-dessus des radiateurs ou du goudron chaud : la strioscopie permet de visualiser ce type de turbulences avec une bonne précision. En optique, elle donne également lieu à des expériences didactiques spectaculaires, comme la mise en relief d'empreintes sur une plaque de verre ou encore la visualisation de la dissolution du sucre dans l'eau.

b) Applications

Le concept de la strioscopie permet de visualiser des faibles variations de densité, des ondes de choc et également des parties isolées d'une image en enlevant tous les rayons inutiles. Il n'est pas surprenant que la strioscopie est très utile dans de nombreux domaines dont l'aéronautique. Elle permet de mieux visualiser et d'expliquer les phénomènes physiques qui font intervenir des flux.

En **aéronautique**, la strioscopie permet de visualiser et d'expliquer, entre autres, des perturbations aériennes, qu'elles soient causées par l'effet de chaleur ou par une pression quelconque. Par exemple, on peut observer en détail la poussée d'un réacteur ou étudier les variations d'indices de réfraction d'une compression des fluides lors des essais en soufflerie ou dans des tunnels de tir. À grande vitesse (de Mach 0,8 allant jusqu'au-delà de Mach 5), les fortes variations de masse volumique donc du gradient de densité dans le champ observé produisent une déviation des rayons lumineux. Ces déviations sont aussi liées à celle de la température et de la pression. Ensuite, un appareil spécial adapté ne capte que les faisceaux déviés. Cette technique permet donc de montrer les effets des variations brutales de densité de l'air sur un fuselage d'un avion qui sert après à mieux adapter et à perfectionner la forme du nez, des ailes et des empennages en caractérisant le mur du son à partir des différentes conditions de vols et de météo. Malgré son utilité, l'avancement technologique depuis ces dernières années notamment la possibilité de créer une simulation de mécanique des fluides par ordinateur fait que cette technique soit de moins en moins utilisée.



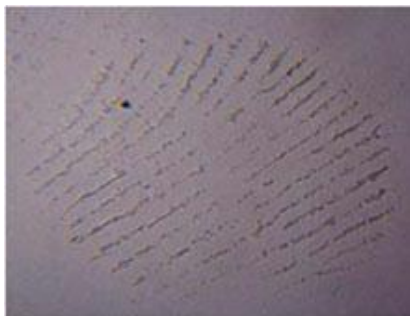
Application de la strioscopie: Mirage en soufflerie supersonique avec différentes formes d'objet

En **médecine**, la strioscopie permet l'étude de la chaleur produite par le corps humain. Dr Garry Settles a photographié et filmé ses étudiants en train de tousser mis en ligne sur le site web du New England Journal of Medicine. Cela pour montrer que des phénomènes ordinaires "invisibles" comme la toux et l'éternuement peuvent en effet, être des principaux modes de propagation de maladies comme la grippe, la tuberculose et autres infections graves. Pour réaliser cette expérience, l'individu est placé dans une pièce froide sans courant d'air. Le panache de sa toux est rendu perceptible grâce à l'air chaud expectoré qui se mélange à l'atmosphère ambiante. Les turbulences de l'air sont captées par les déviations des rayons lumineux. D'une certaine façon, cette technique permet aux médecins de mieux appréhender les processus de contamination infectieuse.



Application de la strioscopie: Le panache d'air formé par un toux

En **optique**, la strioscopie donne également lieu à des expériences didactiques spectaculaires, comme la mise en relief d'empreintes sur une plaque de verre ou encore la visualisation de la dissolution du sucre dans l'eau. Grâce aux expériences simples facilement trouvables sur internet, on étudie les variations d'épaisseur ou d'indice d'un objet. Les ondes diffractées de celles-ci ne sont pas arrêtées. Dans l'exemple d'une empreinte digitale sur une plaque de verre, les images des creux et des bosses apparaissent en clair sur fond noir car l'éclairement est proportionnel au carré du déphasage.



À gauche, une empreinte digitale sur une plaque de verre. Après avoir réalisé un filtrage passe-haut on obtient l'image à droite.

On peut également avoir la possibilité d'étudier la dissolution du sucre dans de l'eau. Un récipient d'eau contenant le sucre (éventuellement d'autres objets que l'on cherche à observer) est placé entre deux miroirs sphériques de même point focal. Sur le premier miroir, on y réfléchit une source lumineuse d'une taille très petite et de l'autre côté, on place notre appareil de photo ou caméra vers le second miroir en mettant un obstacle optique afin de conserver que les rayons déviés qui permettra ensuite de voir ce phénomène aussi simple mais intéressant de la dissolution du sucre dans de l'eau.

c) Explication du fonctionnement

En effet seuls les rayons déviés par celui-ci correspondent à des turbulences (ou fréquences spatiales hautes en optique). Pour réaliser cela, il faut d'abord réaliser une image de la source de lumière à l'aide d'une lentille convergente. À l'endroit précis de l'image géométrique passent les rayons qui n'ont pas subi de déviation (fréquences spatiales nulles). On les élimine avec un *filtre*. Les autres rayons (qui ont été déviés) ne sont pas focalisés au même endroit et peuvent donc passer afin de former une image filtrée. En résumé, on élimine le fond continu de l'image et, conséquemment, les détails ou turbulences de l'objet, qui étaient « noyés » dans ce fond continu, ont un contraste grandement amélioré.

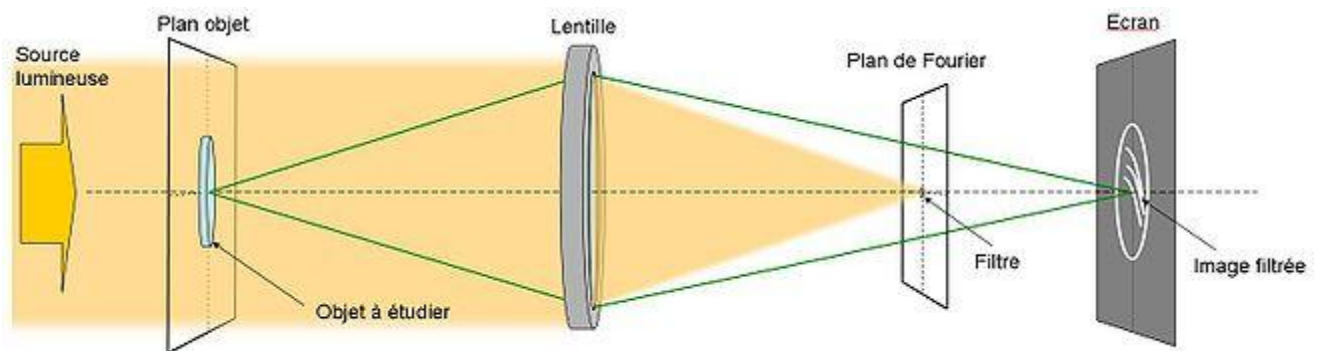


Figure 3 : schéma du montage strioscopique

Le faisceau orange est émis par une source lumineuse. Le faisceau encadré par les rayons verts est la partie de cette lumière qui a été diffractée par l'objet à étudier. La lumière directe de la source, qui converge, est éliminée par le filtre, et les rayons verts forment l'image filtrée de l'objet.

Le filtre utilisé est simplement un *point*, un fil de fer, ou une lame ("couteau de Foucault").

d) Variations & distinctions

On distingue la strioscopie en éclairage incohérent (méthode de Toepler-Foucault ou méthode « Schlieren ») dont le principe fait appel à l'optique géométrique et à la déviation des rayons lumineux de la strioscopie en éclairage cohérent (laser) dont le principe fait appel à la notion de filtrage des fréquences spatiales.

e) Explications théoriques

La diffraction est le phénomène d'éparpillement de la lumière que l'on observe dans le cas d'une onde spatialement limitée. Nous allons ici en étudier les causes physiques et les propriétés, qui découlent d'un principe appelé principe d'Huygens Fresnel.



Figure 4 : Mise en évidence du phénomène de diffraction

f) Diffraction de Fraunhofer

Principe d'Huygens – Fresnel:

Ce principe est à la base de l'interprétation du phénomène de diffraction et s'appuie sur

une théorie exclusivement ondulatoire.

Son énoncé comporte deux parties:

- (1) La contribution d'Huygens (1678) : *La lumière se propage de proche en proche. Chaque élément de surface atteint par elle se comporte comme une source secondaire qui émet des ondelettes sphériques dont l'amplitude est proportionnelle à cet élément.*
- (2) La contribution de Fresnel (1818) : *L'amplitude complexe de la vibration lumineuse en un point est la somme des amplitudes complexes des vibrations produites par toutes les sources secondaires. On dit alors que toutes ces sources interfèrent pour former la vibration au point considéré.*

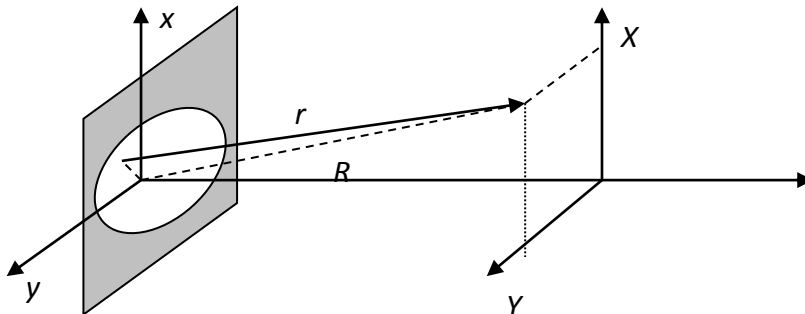
Mathématiquement, ceci signifie que l'amplitude d'une onde au point P , $\psi(P)$, se met sous la forme: $\psi(P) = \sum_i \psi_i(M_i) Q_i \frac{e^{ikr_i}}{r_i} \Delta S_i$, ou en notation continue:

$$\psi(P) = \int_S \psi(M) Q \frac{e^{ikr}}{r} dS$$

Le coefficient Q est homogène à l'inverse d'une longueur et dépend de l'angle que fait \overrightarrow{MP} avec la normale à la surface en M .

Approximation de Fraunhofer:

Considérons une onde monochromatique tombant sur un diaphragme D plan quelconque.



D'après le schéma, il vient :

$$r = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + z^2 + x^2 + y^2 - 2xX - 2yY}$$

$$\text{Soit } r = R \sqrt{1 + \frac{x^2 + y^2}{R^2} - \frac{2xX + 2yY}{R^2}}$$

L'approximation de Fraunhofer consiste à dire deux choses:

- Q est une constante
- Le développement binomial de r ne contient que des termes du premier ordre en x et y

La deuxième condition s'écrit alors:

$r = R \left(1 - \frac{xX + yY}{R^2} \right) = R - \frac{xX + yY}{R}$. En introduisant alors le vecteur unitaire $\vec{e} = \frac{\overrightarrow{OP}}{R}$, on a alors $r = R - \vec{e} \cdot \overrightarrow{OM}$

L'amplitude au point P s'écrira donc, dans le cadre de cette approximation:

$$\psi(P) = Q \frac{e^{ikR}}{R} \int_D \psi(M) e^{-i\vec{k} \cdot \overrightarrow{OM}} \quad , \quad \text{où } \vec{k} = k\vec{e} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{e}$$

Au dénominateur on n'a gardé que le terme à l'ordre zéro car les variations de l'amplitude sont beaucoup plus faible que celles de la phase pour une même variation de x . En effet, pour une variation de l'ordre de λ , l'amplitude varie en $\frac{\lambda}{R^2} \ll 1$ alors que la phase, elle, varie de 2π .

Conditions d'observation:

Les résultats établis ci-dessus sont valables uniquement dans le cadre de l'approximation de Fraunhofer, c'est-à-dire lorsque R est grand devant la taille du diaphragme.

Précisons les ordres de grandeur. Pour cela, développons r jusqu'à l'ordre suivant:

$$r = R \left(1 - \frac{xX + yY}{R^2} + \frac{x^2 + y^2}{2R^2} \right) = R - \frac{xX + yY}{R} + \frac{x^2 + y^2}{2R}$$

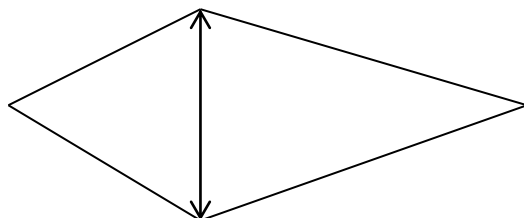
Il faut pour être en diffraction de Fraunhofer que, par exemple, le troisième terme soit inférieur à 10^{-2} dans la phase, soit $\frac{\pi}{\lambda} \frac{x^2 + y^2}{R} < 0,01$. Calculons alors à quelle distance doit

être le point d'observation P . On a $R > \frac{100\pi}{\lambda} (x^2 + y^2)$, ce qui donne, pour $\lambda = 0,6\mu\text{m}$:

- pour une ouverture de diamètre $100\mu\text{m}$, $R > 1,3\text{m}$
- pour une ouverture de diamètre 1 mm , $R > 130\text{m}$
- pour une ouverture de diamètre 10 cm , $R > 1,300\text{km}$

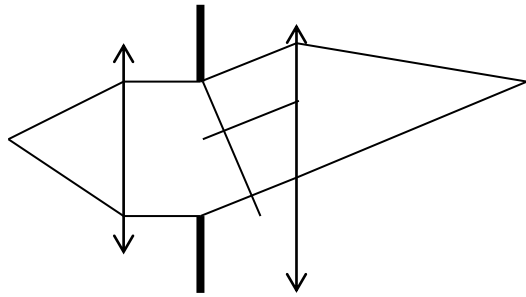
On voit donc que pour des diamètres usuels, l'approximation de Fraunhofer est extrêmement drastique. Cependant, c'est elle qui joue un rôle prépondérant dans la description de la tache de diffraction autour de l'image géométrique d'un objet par un système optique, comme par exemple une lentille, qui diaphragme l'onde.

En effet, considérons un montage simple où on fait l'image d'un objet par une lentille L de diamètre fini:



Pour comprendre pourquoi c'est exactement et rigoureusement la diffraction de Fraunhofer qui intervient, remarquons que ce montage est équivalent à deux lentilles et un diaphragme

placées comme suit:



La différence de phase entre deux rayons arrivant en P est alors exactement celle qu'ils présenteraient après la diffraction par le diaphragme et avoir interféré à l'infini.

Ainsi, au point P , l'amplitude s'écrit:

$$\psi(P) = A \int_D \psi(M) e^{-\frac{2i\pi}{\lambda} \vec{e} \cdot \overline{OM}}$$

La tâche de diffraction autour de l'image géométrique d'un point par un système optique (que l'on peut toujours décomposer comme on l'a fait avec la lentille) est donc rigoureusement décrite par la diffraction de Fraunhofer. C'est donc là que cette approximation prend toute son importance.

Pratiquement, il existe donc deux méthodes pour observer l'amplitude diffractée par un diaphragme:

- soit de manière approchée avec un écran suffisamment éloigné
- soit de manière rigoureuse au niveau de l'image par une lentille de la source lumineuse, avec le diaphragme placé contre la lentille.

De manière générale, cependant, ce n'est pas l'amplitude que l'on observe mais l'intensité. Celle-ci est donnée par $I(P) = |\psi(P)|^2$, soit

$$I(P) = \frac{Q^2}{R^2} \left| \int_D \psi(M) e^{-\frac{2i\pi}{\lambda} (\alpha \cdot x + \beta \cdot y)} \right|^2. \text{ Par ailleurs, on s'intéressera souvent plus à une}$$

répartition d'intensité relative, et donc on omettra par la suite le facteur de proportionnalité, tant dans l'expression de l'amplitude que dans celle de l'intensité.

Lien avec la transformée de Fourier:

Si on introduit les coordonnées du vecteur $\vec{e}(\alpha, \beta)$, on aura alors:

$$\psi(P) = \int_D \psi(M) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} (\alpha \cdot x + \beta \cdot y)}.$$

On introduit alors les nouvelles variables $u = \frac{\alpha}{\lambda}$ et $v = \frac{\beta}{\lambda}$, appelées fréquences spatiales en raison de leur dimension physique qui est l'inverse d'une longueur.

L'amplitude s'écrit alors:

$$\psi(P) = \int_D \psi(M) e^{-2i\pi(u \cdot x + v \cdot y)}.$$

Par ailleurs, dans le cas des petits angles, c'est-à-dire pour une observation autour de l'axe

optique, conditions fréquentes d'utilisation, on aura $R \approx z$ et donc $u = \frac{X}{\lambda.z}$; $v = \frac{Y}{\lambda.z}$. Les variations de l'amplitude en fonction de u et v sera donc similaire, à une homothétie près, aux variations de l'amplitude en fonction des coordonnées spatiales du point P . Nous pourrons donc donner la répartition d'intensité sur un écran indifféremment en fonction des deux systèmes de coordonnées, et donc identifier l'allure de la répartition l'intensité en variables (u,v) à celle en variable spatiale (X,Y) .

Considérons à présent un faisceau tombant parallèlement sur un diaphragme. C'est ce qui se passe en particulier dans le cas d'observation rigoureuse de Fraunhofer, en vertu de la décomposition du système en deux lentilles.

Généralement, le diaphragme est caractérisé par une *fonction transmittance*, défini par:

$\psi(M) = t(x, y)\psi_0(M)$, où $\psi_0(M)$ est l'amplitude complexe de l'onde incidente en M . La fonction transmittance peut être complexe, la phase éventuelle traduisant le fait que le diaphragme provoque un déphasage de l'onde qui le traverse. Par ailleurs on peut étendre sa définition à tout l'espace en la prenant nulle en tout point n'appartenant pas au diaphragme.

Dans le cas d'une onde plane, $\psi_0(M)$ ne dépend pas de M et on a donc:

$$\psi(P) = \psi_0 \iint t(x, y) e^{-2i\pi(u.x+v.y)} dx dy$$

et pour l'intensité:

$$I = I_0 \left| \iint t(x, y) e^{-2i\pi(u.x+v.y)} dx dy \right|^2$$

On voit donc que *l'amplitude transmise par un diaphragme est la transformée de Fourier de la transmittance du diaphragme*. Cette propriété sera mise à profit à plusieurs reprises pour déterminer les propriétés de la diffraction de Fraunhofer.

3) Manipulations

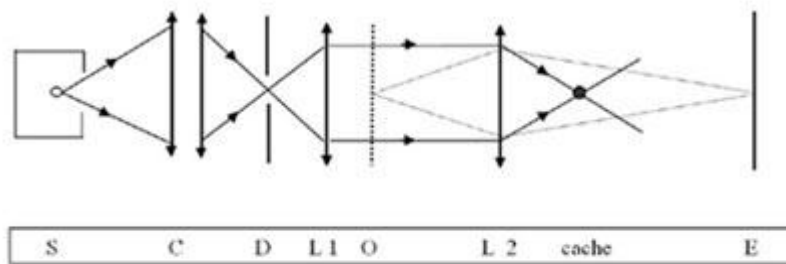
L'utilité de cette méthode réside dans l'étude des limites (bords) d'un objet de petites dimensions avec beaucoup de précision. Avec un objet de type rectiligne (ex : fente droite) les limites donnent des images diffractées qui sont donc censées être droites aussi. Si l'image obtenue ne paraît pas droite comme l'objet, on déduit que ce dernier présente des irrégularités, pourtant invisibles à l'œil nu.

Les variations locales d'épaisseur optique d'une lame transparente ne sont pas visibles. Elles affectent la phase de l'onde qui traverse l'objet, non son amplitude.

L'œil n'étant pas sensible aux phases du phénomène lumineux, l'image paraît uniformément éclairée.

L'une des méthodes permettant de visualiser les variations d'épaisseur ou d'indice est la strioscopie.

Figure 5 : schéma du parcours des ondes lumineuses



Legende : S source, C condenseur, D diaphragme, L1 lentille convergente ($f = 200 \text{ mm}$), O objet, L2 lentille convergente ($f = 125 \text{ mm}$), Cache petites pastilles noires sur support, E écran.

a) Réalisation du montage

S : laser vert (classe II) ou rouge (633nm)

L1 & L2 + D : extenseur de faisceau : L1 placée dans le plan focal objet de L2 (150mm)

L'image obtenue est à l'infini pour avoir une tache de taille constante de manière à observer plus distinctement l'image (sur un mur blanc), on agrandi le faisceau laser pour que le rayonnement de l'objet sur la fente (obstacle) soit d'intensité plus importante

Lentille L3 : distance focale : 150mm

Objet : taille de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la source lumineuse

placé avant le foyer objet pour ne pas obtenir une image à l'infini : à -200mm

filtre (obstacle ou cache) : fente, point placé dans le plan focal image de L3 : 100mm



Figure 6 : Photographie du montage dans les conditions de l'expérience

On règle le tirage du condenseur pour faire converger le faisceau sur le diaphragme. La lentille L1 réalise un faisceau parallèle qui éclaire l'objet O. L'objet O est ainsi éclairé en lumière cohérente.

La lentille L2 fait en S' l'image de la source S, et l'image de l'objet sur l'écran (O et E sont conjugués par L2).

b) Observations

Variation de taille de différents éléments du montage :

En faisant varier la taille de l'obstacle, on remarque que plus la fente est petite, plus la diffraction reste lumineuse.

Plusieurs essais avec différentes tailles de lentille L3 nous permet de choisir une lentille de distance focale 100mm. En effet, si cette distance est trop grande, l'image sera trop petite pour une bonne visibilité du phénomène. Ainsi, les lentilles de 300 et 150 mm ne nous semblaient pas suffisantes.

Le grandissement associé à la lentille L3 (100mm) est d'environ 9,6. Grandir l'objet par 10 nous paraît suffisant pour obtenir une image d'environ 30mm sur le mur blanc.

D'après des variations de tailles des image et objet, il semble que le résultat soit plus efficacement observable avec des objets et obstacles petits et surtout d'ordre de grandeur similaire.

Cependant, les résultats sont peu concluants pour des objets et images très petits.



Figure 7 : mise en évidence du phénomène de strioscopie

Remplacement du laser vert par le rouge dans le montage

Le laser rouge à une luminosité plus intense mais un faisceau de plus petite taille (tache sur le mur plus petite aussi), donc on perd de la précision sur la forme et la taille de l'image mais on compense par une meilleure luminosité qui permet de mettre d'avantage en évidence la diffraction des contours.

La variation de la « nature » du support objet (matériaux) n'a pas de réelle impact sur le résultat. En effet, les rayons étant stoppés sur la gauche et la droite de l'objet, la diffraction reste la même (l'unique et infime différence pouvant provenir de l'irrégularité des contours de l'objet). Donc le choix de matériau n'est à prendre en compte que s'il y a une différence de précision de découpe des contours.

Nous avons voulu illustrer cela en utilisant une fente métallique. L'image observée sur le mur laissait apparaître de petites imperfections que l'on imagine provenir de la coupure imprécise des bords. Une alternative valable pourrait être de choisir un support plus lisse ou moins rigide, donc plus facile à découper, comme le verre ou le papier (expérience de confirmation faite avec du papier)

Difficultés rencontrées

Lors de la manipulation, il nous fut impossible de masquer uniquement la fente à la source

car l'objet était très petit.

De plus, une attention particulière concernant la sécurité nous demandait de toujours rester vigilants quant à la réflexion des rayons du laser sur les supports métalliques (réfléchissants) des lentilles et diaphragme. Nous placions alors un écran en carton opaque (non réfléchissant) sur le bord du montage, pour éviter le contact avec les yeux notamment.

Proposition d'amélioration

Si l'on désire conserver la bonne luminosité du laser rouge, mais essayer d'agrandir encore un peu plus la taille de l'image, il est concevable d'intégrer une deuxième série de lentilles (L1' et L2') pour agrandir le faisceau. L'expérience ne fut réalisable en laboratoire car le banc et les paillasses étaient trop courtes pour accueillir un autre système.

Le problème d'hétérogénéité de l'intensité lumineuse des rayons du laser n'a pas de conséquence directe sur l'expérience. Il est vrai que les rayons centraux du faisceau du laser sont plus lumineux mais l'important vient dans le fait que la symétrie droite/gauche de l'intensité est respectée.

Choisir un objet petit et aux contours étroits et très rapprochés (ex : le zéro « 0 » d'une plaque d'objets d'environ 1mm) fait apparaître une diffraction moins efficace. En effet, les contours diffractés sont moins bien observés et semblent se confondre.

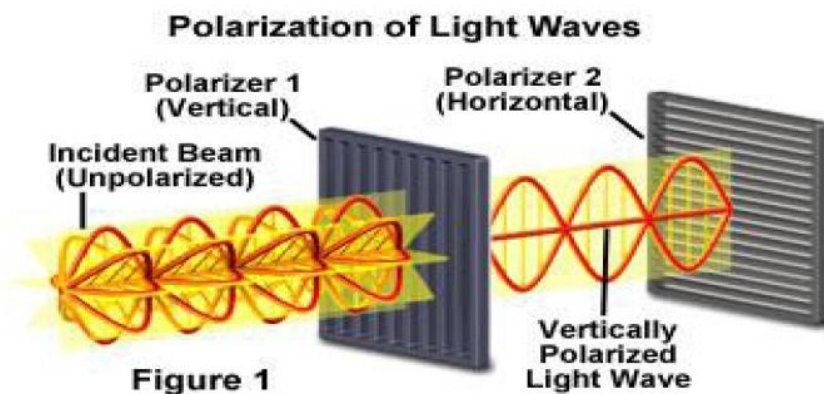
III) Polarisation.

La lumière est une onde électromagnétique. Son caractère ondulatoire a été mis en évidence au travers des phénomènes de diffraction et d'interférences. La polarisation traduit aussi le caractère ondulatoire d'un phénomène physique.

La calcite a la propriété de produire par transmission deux images d'un même objet. Dès 1669, Huygens tente d'expliquer ce phénomène dans le cadre de sa théorie des ondes. Au début du 19^{ème} siècle, Fresnel et Arago remarquent que la polarisation a des effets sur les figures d'interférences. Leur tentative d'interpréter le phénomène échoue car leur théorie de la propagation de la lumière est fondée sur une idée fautive : le concept d'onde longitudinale nécessitant un milieu de propagation (l'éther). Il faudra attendre la théorie de Maxwell de l'électromagnétisme pour élucider le problème.

L'histoire veut que ce soit Etienne-Louis Malus (1775-1812) qui ait découvert le phénomène de polarisation de la lumière par réflexion. La lumière du soleil couchant se reflétait dans les vitres du Sénat avant d'atteindre son laboratoire après avoir subi une deuxième réflexion sur sa fenêtre.

Figure 8 : schéma du principe de polarisation



1) Polarisation rectiligne:

Une onde dont le champ électrique \vec{E} garde une orientation constante de vecteur unitaire \vec{u} est dite polarisée rectilignement selon \vec{u} ; \vec{u} sert à définir la polarisation rectiligne de l'onde.

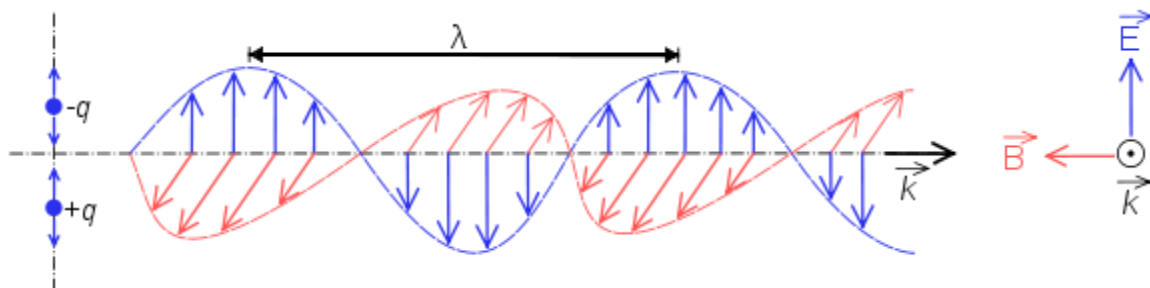


Figure 9: schéma du parcours des ondes polarisées

Onde lumineuse avec champ magnétique \vec{B} et champ électrique \vec{E} à angle droit l'un de l'autre.

a) Qu'est-ce que c'est le polariseur ?

Un polariseur est un outil qui convertit la polarisation d'une onde lumineuse en un certain état de polarisation : la plupart des polariseurs permettent d'obtenir une lumière polarisée rectilignement dans une certaine direction. Dans ce cas, cette direction est appelée l'axe du polariseur.

Il est constitué d'un film polymère qui transforme une onde non polarisée en une onde polarisée linéairement. Il est caractérisé par son axe de transmission auquel on associe le vecteur u .

Les polariseurs sont présents dans de nombreuses expériences d'optique et sont donc utilisés dans des instruments d'optique. Ils sont également utiles en photographie.

b) Qu'est-ce que c'est l'analyseur (polariseur2) ?

Le but de l'opération est de décrire un dispositif à même de détecter les ondes rectilignement polarisée. En fait, il s'agit tout simplement d'un dispositif exactement identique à un polariseur mais dont le but est d'agir sur une onde déjà polarisée.

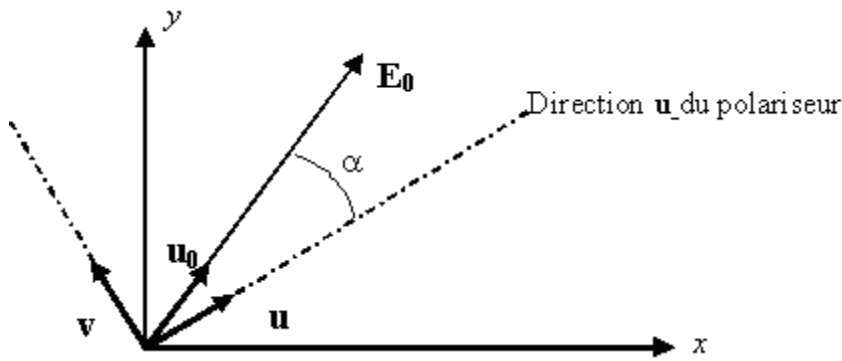
2) Loi de Malus

Cette loi donne la valeur de l'intensité lumineuse (I) qui émerge d'un analyseur en fonction de l'intensité (I_0) qui sort du polariseur.

$$I = I_0 \cos^2 \alpha$$

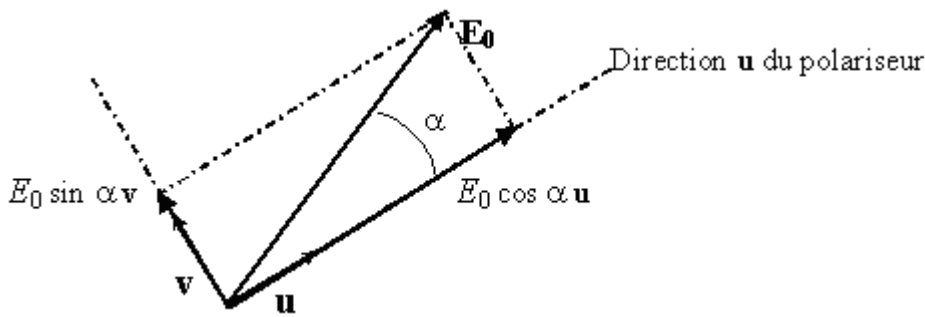
Démonstration :
Elle repose sur la linéarité des lois de l'électromagnétisme.
Soient :

- E_0 et I_0 sont l'amplitude et l'intensité de l'onde qui arrive sur l'analyseur.
- E et I sont l'amplitude et l'intensité de l'onde qui émerge de l'analyseur.
- α est l'angle entre la direction de polarisation initiale u_0 et la direction de polarisation de l'analyseur u .



L'onde polarisée selon u_0 est identique à la superposition de deux ondes polarisées selon deux directions u et v telles que, en une position donnée de l'espace et à une date donnée :

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{u}_0 = E_0 \cdot \cos \alpha \cdot \mathbf{u} + E_0 \cdot \sin \alpha \cdot \mathbf{v}$$



L'amplitude en sortie du polariseur vaut : $E_0 \cos(\alpha)$ et son intensité $I = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot c (E_0^2 \langle \cos^2 \alpha \rangle) = I_0/2$.

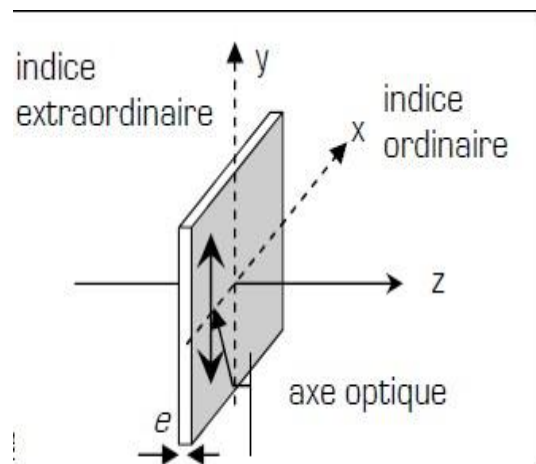
Dans le cas où α vaut 90° , on retrouve la situation expérimentale du polariseur et de l'analyseur croisés.

3) Modélisation d'une lame à retard de phase.

Soit une onde lumineuse polarisée rectilignement dans une direction quelconque perpendiculaire à Oz , tombant sous incidence normale sur une lame uniaxe, d'axe optique parallèle à la face d'entrée. On peut décomposer la vibration en :

- une composante perpendiculaire à l'axe optique, l'indice suivant cette direction étant noté n_x ,
- une composante parallèle à l'axe optique, l'indice suivant cette direction étant noté n_y .

Ces deux vibrations présentent entre elles la différence de marche $\delta = (n_y - n_x) e$, si e est



l'épaisseur de la lame.

4) Action d'un objet transparent uniaxe sur une lumière polarisée rectilignement

Pour vérifier le changement d'image le long de la différence de marche, on fait une expérience de la polarisation avec une règle entre le polariseur et l'analyseur.

Tout d'abord, on installe des équipements comme le schéma ci-dessous :

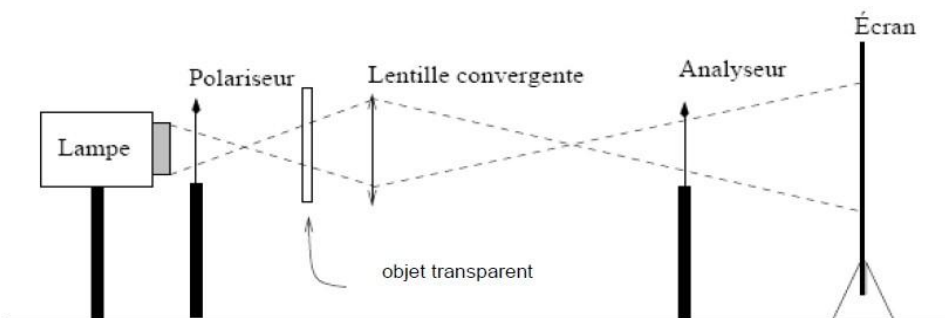
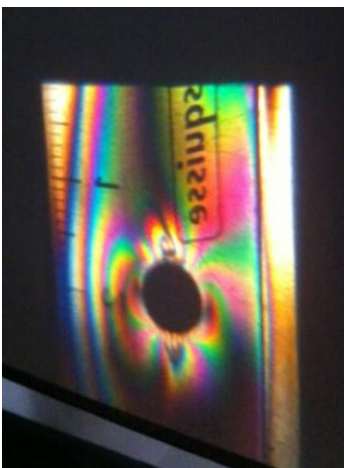


Figure 10 : Photographie du montage de polarisation dans les conditions réelles de manipulation

Puis, on fixe une règle entre le polariseur et l'analyseur. Et on obtient l'image suivante :



Dans cette image, on peut bien observer qu'il y a des franges parallèles en couleur comme l'arc en ciel à gauche de la règle. Pourquoi cet effet ? Parce que l'épaisseur de la règle est de plus en plus grande de gauche au milieu. La différence d'épaisseur change la marche de lumière ainsi change la réfraction de la lumière. Car le changement d'épaisseur de la règle est régulier, on peut observer les franges à peu près parallèles. Car l'épaisseur est de plus en plus grande, on peut observer le changement de couleur comme l'arc en ciel.

Figure 11 : Photographie du résultat visuel lors de la polarisation

Si on regarde le trou noir, on remarque que tout autour il a des couleurs différentes, c'est-à-dire des épaisseurs différentes. Ceci est provoqué par des erreurs de fabrication, c'est-à-dire que lorsqu'on fait un trou à la règle avec une machine on modifie à l'intérieur de la règle sa composition, on peut dire qu'on la détruit à l'intérieur.

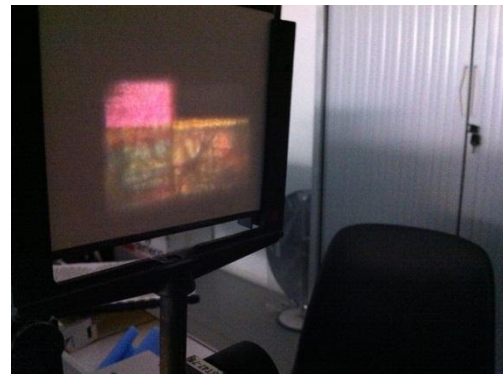
On a réalisé une autre expérience pour voir les différents couleurs dans la polarisation en utilisant une lame transparente et en ajoutant, dans un côté de la lame, du scotch afin de créer une épaisseur et donc voir un changement de couleur. La couleur dépend de l'épaisseur de scotch et de son orientation si on empile plusieurs couches, on obtient différentes couleurs. Les effets colorés sont dus à la variation d'indice de réfraction avec la longueur d'onde ainsi qu'à la variation de phase avec la longueur d'onde.

Voici la lame utilisé pour l'expérience :



On voit le scotch dans différentes épaisseurs, ceci est fait exprès pour pouvoir remarquer différentes couleurs lorsqu'on fera l'expérience.

Cette image représente les différentes épaisseurs avec le scotch et les différentes couleurs. On voit que dans la partie plus basse l'image n'est pas nette et ceci est dû à ce que le scotch, à force d'en mettre beaucoup de couches, on trouve des traits (imperfections) qui font que l'image ne soit pas claire. Mais on voit une partie rose assez nette où on a l'épaisseur la plus petite avec le scotch. La partie d'en haut à droite est où on n'a pas mis du scotch et donc la lumière ne passe pas par cet endroit lorsque les polariseurs sont perpendiculaires.



Une autre méthode pour retrouver des résultats un peu de la même façon est l'utilisation de la biréfringence, voici une petite introduction pour la biréfringence et on pense que cela pourrait être un bon sujet pour les projets P6-3 des ans prochains.

5) Biréfringence.

La biréfringence est la propriété physique d'un matériau dans lequel la lumière se propage de façon anisotrope. Dans un milieu biréfringent, l'indice de réfraction n'est pas unique, il dépend des directions de propagation et de polarisation du rayon lumineux.

Un effet spectaculaire de la biréfringence est la double réfraction par laquelle un rayon lumineux pénétrant dans le cristal est divisé en deux. C'est pourquoi, sur la photographie ci-contre, l'inscription apparaît en double après avoir traversé le cristal de calcite. Ce phénomène est caractéristique des milieux biréfringents, à tel point que les termes « double réfraction » et « biréfringence » sont parfois confondus. Le second tire d'ailleurs son étymologie du premier.

Lorsqu'on parle de biréfringence, on sous-entend en général biréfringence linéaire, c'est-à-dire qu'on considère les indices de réfraction pour des ondes polarisées rectilignement. Par analogie, on utilise parfois l'expression biréfringence circulaire pour désigner l'activité optique. En effet, ces deux phénomènes peuvent se décrire de manière très similaire, mais ils ont des origines microscopiques différentes.

IV) Fontaine laser :

a) Principe et applications

La "fontaine lumineuse" est une expérience permettant de mettre en évidence le guidage de la lumière par réflexion interne totale dans un jet d'eau.

Le principe est simple : pour que la lumière puisse être guidée dans un milieu 1, il faut que le milieu 2 entourant le milieu 1 présente un indice de réfraction plus faible. C'est une condition indispensable à l'obtention de la réflexion totale, qui dans le cadre simple de l'optique géométrique permet d'expliquer le guidage de la lumière dans les fibres optiques par exemple.

Dans les fibres justement, on s'arrange lors de la fabrication à ce que le "cœur" de la fibre (là où la lumière se propage) ait un indice de réfraction légèrement supérieur à celui de la "gaine" qui l'entoure.

La lumière est ainsi guidée.

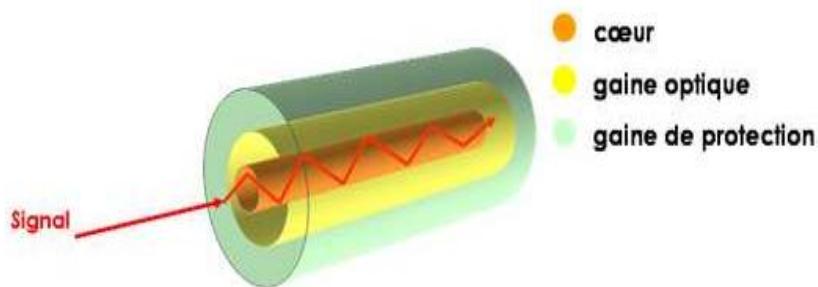


Figure 12 : schéma du principe d'une fibre optique

Il existe une autre condition : les rayons doivent faire un angle important par rapport à la normale à l'interface cœur/gaine. En injectant des rayons avec des incidences quelconques, seuls ceux suffisamment inclinés seront guidés.

Quelques points historiques

La première fontaine lumineuse répertoriée semble être celle de **Jean-Daniel Colladon**, un contemporain de Fresnel et Maxwell, au milieu du XIXe siècle. Il eut l'idée de concentrer les rayons issus d'une lampe sur l'embouchure du jet d'eau créé par un réservoir percé sur un de ses cotés. Une expérience similaire fut réalisée dès 1840 par Jacques Babinet, précurseur du principe même de ce que sera la fibre optique.

La **première fontaine laser en France est née à Marseille en 2006 au laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM), sous l'impulsion de Sandrine Ferri**. Avec des moyens vraiment rudimentaires, plus proche de la fontaine à 10 euros que de celle du Laboratoire de Physique des Lasers, on observe le guidage de la lumière, mais difficilement la réflexion totale. Le montage utilisait un seul pointeur laser rouge et un réservoir vraiment bricolé :

Sébastien Forget, maître de conférence au Laboratoire de Physique des Lasers (LPL), entreprend de construire une **fontaine lumineuse laser en préparation du stand que le LPL tient chaque année** à la fête des Sciences Avec un stagiaire il crée en août 2007 une fontaine lumineuse où 3 lasers émettant à proximité des couleurs primaires rouge, verte et bleue se mélangent dans un jet d'eau. L'emploi de ces couleurs permet de montrer de façon pédagogique à un large public la synthèse additive des couleurs. La fontaine est faite avec relativement peu de moyens, mais de manière efficace.

A plus grande échelle, et avec des moyens plus élaborés, il est possible de réaliser une fontaine laser géante avec plusieurs jets de différentes couleurs et au débit variable. Le cas concret de celle réalisée par le Laboratoire de Physique des Lasers dans le cadre de la célébration des 50 ans du laser en est l'illustration parfaite.

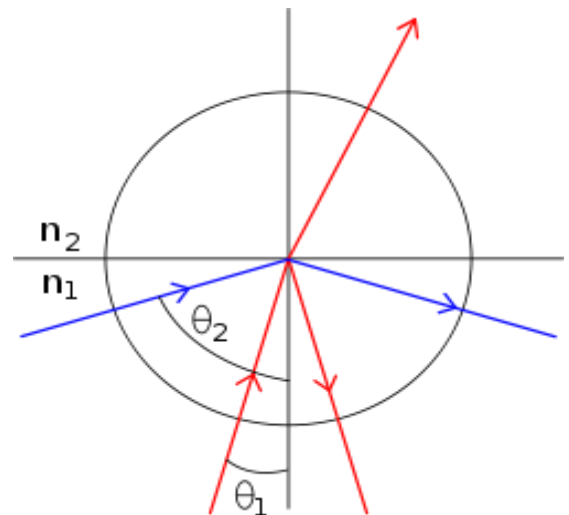
La fontaine laser a pour utilité d'expérimenter de façon simple et visuelle les bases de l'optique géométrique et la vision des couleurs. Ses objectifs pédagogiques de vulgarisation scientifique à travers des événementiels font de cette manifestation une version macroscopique de la fibre optique pour expliquer le guidage de la lumière par réflexion totale dans les jets d'eau.

b) Explications théoriques

Notions physiques complémentaires

Réflexion totale de la lumière

Pour expliquer ce phénomène du point de vue théorique on fait un rappel de la notion de réflexion totale. En optique géométrique, le phénomène de réflexion totale survient lorsqu'un rayon lumineux arrive sur la surface de séparation de deux milieux d'indices optiques différents avec un angle d'incidence supérieur à une valeur critique : il n'y a alors plus de rayon réfracté transmis et seul subsiste un rayon réfléchi. Ce phénomène n'intervient que lorsque le rayon lumineux incident se trouve dans un milieu d'indice de réfraction plus grand que l'éventuel rayon réfracté : réfraction de type verre/air par exemple. Ce phénomène est à la base des communications par fibre optique.



Si l'on considère un dioptre séparant deux milieux d'indices n_1 et n_2 , la loi de Snell-Descartes pour la réfraction permet de montrer qu'il existe un *angle d'incidence limite* au-delà duquel la réfraction est impossible. Cela n'est possible que dans le cas où $n_1 > n_2$ où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction de chaque milieu.

Sur le schéma ci-contre, l'angle θ_1 est plus petit que l'angle limite et le rayon rouge est à la

fois réfléchi et réfracté. Pour le rayon bleu incident selon l'angle θ_2 supérieur à l'angle critique, il y a réflexion totale. L'angle limite est donné par la loi de Snell-Descartes, et l'on a :

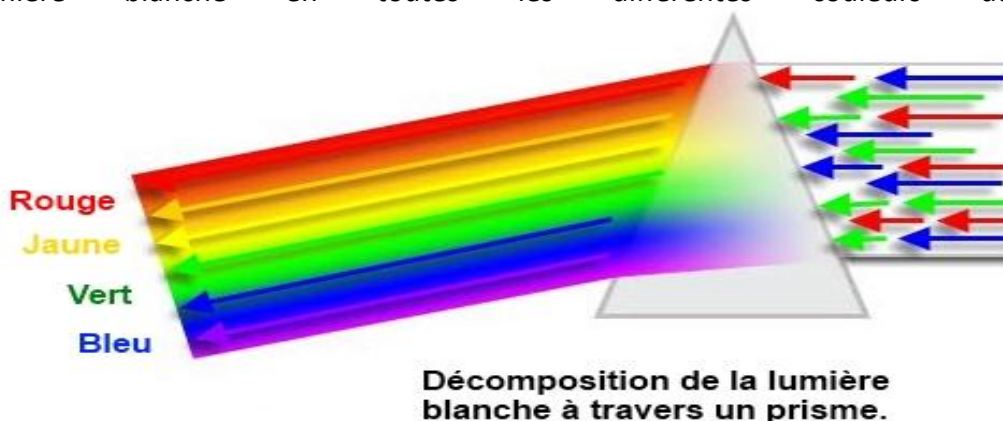
$$\theta_l = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

La mesure de l'angle limite permet ainsi de connaître le rapport des indices de réfraction des deux matériaux, et si l'un est connu de mesurer l'autre. Ce principe est utilisé dans les réfractomètres.

Superposition et mélange des couleurs

La couleur est la perception subjective qu'à l'œil d'une ou plusieurs fréquences d'ondes lumineuses, avec une (ou des) amplitude(s) donnée(s). La sensation de couleur, pour un humain, est un mélange de rouge, de bleu et de vert, qui correspondent aux maximums d'absorption des cônes de la rétine. L'intensité totale perçue par ces cellules sensorielles correspond à la notion de luminosité (claire ou sombre), et les intensités relatives perçues restituent la couleur. Si les couleurs vives se démarquent des autres, la limite entre ces couleurs n'est pas précise.

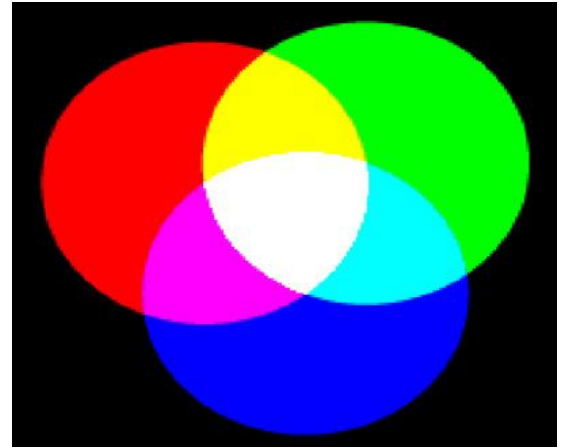
Le principe de la synthèse additive des couleurs consiste à s'efforcer de reconstituer, pour un œil humain, l'équivalent (l'apparence) de toute couleur visible, par l'addition, selon des proportions bien choisies, de lumières provenant de trois sources monochromatiques (par exemple des spots) dont les longueurs d'onde sont choisies une fois pour toutes pour répondre au mieux à cet objectif. En observant l'arc-en-ciel, on peut voir que les gouttelettes de pluie, dans le lointain, décomposent la lumière en six couleurs, comme le feraient des prismes. Newton reproduisit ce phénomène en décomposant la lumière solaire grâce à un prisme optique (un prisme droit en verre à base triangulaire). Il réussit à décomposer la lumière blanche en toutes les différentes couleurs du spectre.



Le physicien Young fit le contraire de Newton. Il recomposa la lumière. Il fit converger les six couleurs du spectre et obtint la lumière blanche. Il alla même plus loin en démontrant que les six couleurs du spectre pouvaient être réduites à trois. C'est-à-dire qu'il pouvait recomposer la lumière blanche avec ces trois couleurs.

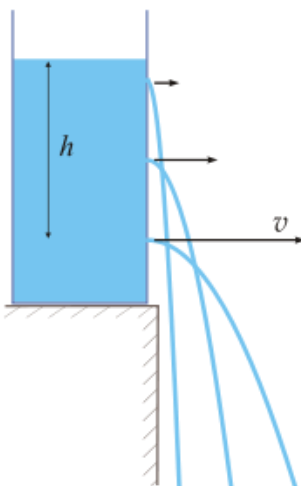
Il démontra aussi qu'en les mélangeant deux par deux, il pouvait obtenir les autres. Et c'est ainsi qu'on différencia les couleurs primaires des secondaires.

Ce système de mélange de lumières signifie que plus on ajoute de couleurs plus on obtient de clarté. Par exemple, le vert et le rouge (les couleurs qu'on a utilisé dans notre expérience) donnent le jaune indéniablement plus clair. On parle dans ce cas de système additif.



Théorème de TORRICELLI

Pour procéder à notre expérience de fontaine laser, il a fallu percer deux trous au bord du récipient afin qu'on puisse observer la sortie de deux jets d'eau. On souhaite, de plus, projeter deux rayons laser de différentes couleurs (rouge et vert) à travers chaque jet d'eau qui sont à une hauteur différente. Le but étant de pouvoir étudier le croisement des deux jets d'eau qui, grâce au principe du mélange des couleurs, va permettre d'observer la couleur jaune (la couleur formée issue du mélange entre le vert et le rouge). Pour ce faire, il est nécessaire que les deux jets d'eau se croisent et pour cela, il a fallu régler la hauteur des deux sorties d'eau pour avoir des débits d'eau sortants assez satisfaisant permettant le croisement de ces deux jets d'eau. On fait appel donc à la théorème de Toricelli pour estimer la force des débits d'eau sortants nécessaires pour faire apparaître le croisement des deux jets d'eau à une distance observable du bord de récipient.



Le théorème de Toricelli qui est dérivé de l'équation de Bernoulli et découvert par Evangelista Toricelli en 1643, établit que le carré de la vitesse d'écoulement d'un fluide sous l'effet de la pesanteur est proportionnelle à la hauteur située au-dessus de l'ouverture par laquelle il s'échappe du récipient qui le contient.

$$v = \sqrt{2gh}$$

- v: la vitesse d'écoulement
- g: l'accélération de la pesanteur
- h: la hauteur de fluide

On a besoin de garder un écoulement d'eau du robinet constant dans le récipient pour garder le même débit sortant des jets d'eau et donc conserver sa vitesse.

On ne veut pas mettre beaucoup trop d'eau dans le récipient, car les vitesses des jets d'eau vont être trop élevées et l'eau va donc dépasser le bord de l'évier et on ne veut pas non plus mettre trop peu d'eau ou percer les trous trop près l'un de l'autre car les faibles vitesses des jets d'eau vont résulter à un dégoulinement qui ne permettra pas d'observer le croisement de ces jets d'eau, d'où l'importance de connaître le théorème de Toricelli.

c) Manipulations :

Réalisation du montage

Nous avons choisi de travailler dans la salle dite « Laverie TP » pour utiliser le robinet comme source d'eau facile et une évacuation du jet rapide et pratique dans l'évier. Des prises électriques y étaient aussi à notre disposition.

L'eau est un milieu aqueux et non vitreux. Couplée à une « gaine » faite d'air, un contraste d'indice $n(\text{eau}) > n(\text{air})$ se crée, même supérieur à celui d'une fibre optique classique.

Nous avons fait le choix comme récipient d'une bouteille en plastique (facile à percer) et transparente, pour pouvoir observer facilement (alignement laser-trou), dans laquelle nous avons fait percer de deux trous de 2,5 mm de diamètre grâce à un foret, espacés d'environ 50mm.



Figure 13 : Photographie du montage de fontaine laser réel

La nécessité d'un faisceau très directif pour une bonne distinction de réflexion au départ du jet et les moyens matériels du laboratoire nous a laissé la seule possibilité d'utiliser deux couleurs primaires : vert & rouge.

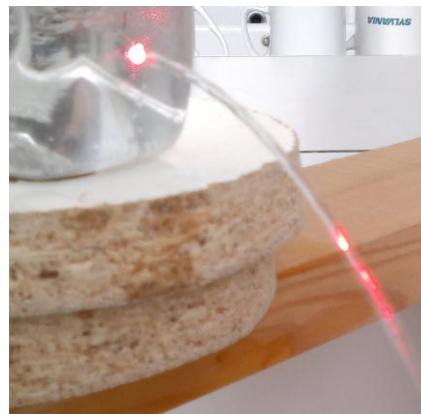


Figure 14 : fontaines laser vert et rouge

Nous avons pu créer un faisceau jaune par superposition des deux premiers. Enfin, nous avons essayé de tout placer au même niveau, la position du laser sur le banc déterminant la hauteur de l'ensemble des autres équipements (seule hauteur non réglable).

Observations

On observe très nettement que le faisceau du laser suit la trajectoire du jet d'eau. Il semble comme guidé par l'eau, qui lui impose ce mouvement hyperbolique.

De plus, l'intersection des deux jets révèle distinctement le résultat attendu : une couleur de faisceau jaune.

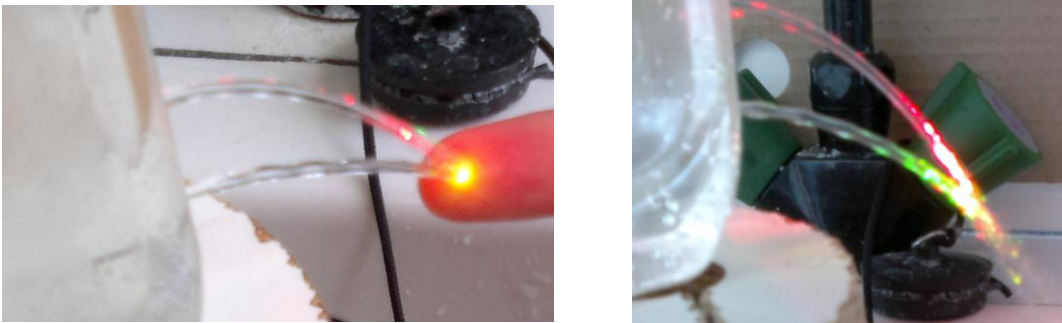


Figure 15 : faisceau jaune

Difficultés rencontrées

Bien que la pièce fut dépourvue de rideaux, la luminosité était suffisante pour une bonne observation ; on sait que les lasers sont aussi efficaces à la lumière du jour, comme les pointeurs.

Nous avons également rencontré une difficulté de créer un jet suffisamment peu turbulent (nombre de Reynolds < 3000) et de portée suffisante (explication par la pression). En effet, le jet devient discontinu en gouttelettes à partir d'un certain dénivelé. Il semblait donc nécessaire de faire se produire l'intersection des jets avant ce point de discontinuité.

Nous n'avons pas bénéficié d'assez de temps pour mettre en place un système de pompe pour un jet continu. Mais le montage est simple à régler et donc prêt à l'utilisation en moins de 2 minutes : il suffit de remplir le récipient et d'aligner le laser avec le trou percé dedans. De même que nous aurions voulu faire l'expérience à l'aide d'un grand laser rouge puis d'un petit pointeur pour comparer l'impact de la puissance sur le reste du montage.

Comme pour le montage strioscopique, nous avons prêté une attention particulière à la sécurité concernant le laser, et avec la sécurité électricité/eau des branchements des appareils à côté du robinet.

Variations et propositions d'amélioration

Variations & alternatives

Proposition d'améliorations

Matériel nécessaire pour des effets plus remarquables :

- ✓ 3 lasers, si possible de couleurs différentes
- ✓ Une grande bassine
- ✓ Une bonne pompe à eau

Remarques pour les manipulations :

- ✓ Pour que l'effet soit spectaculaire, il faut que les jets d'eau soit assez "intenses", c'est à dire assez gros et assez puissants. Pour cela, il faut dimensionner la cuve, la position et la taille des trous : plus la hauteur d'eau sera grande, plus les jets seront puissants. Si les diamètres des trous sont trop petits, les parois du jet ne seront pas lisses et le guidage peu efficace : des trous assez grands sont préférables, mais attention il faut que les pompes puissent suivre !
- ✓ Le fait d'utiliser 3 lasers de couleurs différentes permet d'observer en plus la synthèse additive des couleurs : il suffit d'envoyer dans un même jet deux ou trois lasers : on peut ainsi obtenir quasiment toutes les couleurs possibles !

La présentation de la fontaine est accompagnée d'une lampe colorée à fibre, de fibres optiques. On permet le réglage par le public de l'intensité des lasers avec des commandes électroniques. Le débit des jets d'eau devient aussi réglable. Le laser bleu a été remplacé et émet 20 mW.

Le grand lien de la fontaine avec le laser lui permet de trouver des applications diverses, notamment dans l'industrie, la médecine, la recherche, la télécommunication optique, les écrans (synthèse additive) ou même les imprimantes (soustractive).

En travaillant sur la partie Strioscopie, on a fait connaissances avec une autre notion qui est l'ombroscopie, un phénomène qu'on pourrait aussi mettre en pratique et étudier.

Conclusion.

En débutant ce projet, nous nous étions fixés plusieurs objectifs à atteindre et compte tenu du travail réalisé pendant ces 13 semaines de cours, nous sommes maintenant capables d'établir un bilan de notre étude.

Tout d'abord, nous sommes satisfaits d'avoir eu l'opportunité d'effectuer des analyses sur tous les phénomènes qui nous furent proposés. Chaque manipulation nous a permis de mettre en lumière certaines notions d'optiques préalablement découvertes en cours, à travers des applications concrètes, pédagogiques et enrichissantes d'un point de vue expérimental.

En effet, il nous fut permis d'utiliser le matériel mis à notre disposition de manière entièrement autonome et indépendante. Cette liberté de pouvoir mener à bien un projet en s'inspirant de ses propres ambitions est une caractéristique de travail d'équipe que nous espérons retrouver dans l'exercice de nos futures fonctions d'ingénieurs.

L'expérience de projets d'équipe antérieurs nous a avantageusement évitée de rencontrer des difficultés au niveau de l'organisation du travail et de la répartition des tâches. La division de l'équipe en sous-groupes nous a laissé nous concentrer sur des expériences différentes. Mais il n'était pas exclu de pouvoir partager nos impressions et opinions en collaborant parallèlement sur un problème ou une difficulté.

Nous pouvons également affirmer qu'une motivation générale régnée au sein du groupe grâce à un sentiment commun de volonté d'évoluer autour d'un objectif commun.

Concernant les difficultés qu'on a pu rencontrer, le manque de temps est certainement le point le plus important. Nous avons correctement réparti les séances en début de cycle pour ne pas se voir dépasser par le temps. Cependant, la plupart des manipulations nous demandèrent de continuelles améliorations au fur et à mesure de l'évolution des expériences. Bien que nous ayons tenu en compte ce facteur, nous nous sommes donné le droit d'élargir le rayon de nos recherches, le projet ne nous imposant que peu de limites.

Pour l'interféromètre de Michelson, on peut en conclure que cette expérience nous a servi pour mieux comprendre la propagation de la lumière et voir comment deux rayons lumineux ont une interférence.

En ce qui concerne la polarisation, on a trouvé que ce projet était très intéressant mais encore une fois, on aurait aimé avoir plus de séances sur ce projet afin de l'améliorer. Également pour la Polarisation on s'est rencontré avec un autre grand sujet qui est la Biréfringence, et qu'on souhaite pour des groupes des ans prochains continuer cette expérience.

Enfin, nous sommes plusieurs à considérer que la fontaine laser fut la partie la plus enrichissante. Ses dimensions très ludiques et pédagogiques et la dimension très visuelle des couleurs nous ont particulièrement intéressées. C'est un principe facile à comprendre et à mettre en pratique, qu'il nous semble bon d'approfondir et d'en diffuser les avantages pour que d'autres groupes de travail, après nous, puissent mettre en application les améliorations que nous avons ici proposé, de manière à récolter le sentiment d'utilité et d'efficacité que pourrait nous offrir notre travail.

Bibliographie.

Ouvrage:

- «Faire de la physique autour des fontaines lasers », article de Sébastien FORGET & Paul-Eric POTTIE paru dans la revue de la Société Française de Physique : Reflets de la physique n°21 (octobre 2010) : Le laser 50 ans de découvertes.

Sites web:

(Fontaine Laser)

- fontaines au LPL : www-lpl.univ-paris13.fr:8090/fontaine_laser.html
- www.50ansdulaser.fr
- www.cnrs.fr/50ansdulaser/spip.php?article70
- www.fontainelaser.fr
- steveveloso.com/index.htmlhttp://www-lpl.univ-paris13.fr:8090/fontaine_laser.htm
- http://fontainelaser.in2p3.fr/IMG/pdf/forget_fontaineslasers_apres_retour_referee.pdf
- <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=8496>
- <http://cpge.pmf.free.fr/physpc/M%E9caFluTD3-Euler-Bernoulli-2011-2012.pdf>
- <http://plrostand.free.fr/download/Fluidique2.pdf>

(Strioscopie)

- <http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/OPT/DocsOptique/Notices/OptiqueDeFourier.pdf>

Michelson:

- http://patrick.kohl.pagesperso-orange.fr/spectro_oem/spectro_oem_7.htm
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%A9rom%C3%A8tre_de_Michelson
- <http://www.cpge-brizeux.fr/casiers/jnb/cours/tp-tpcours/TPCours-michelson.pdf>
- http://alainrobichon.free.fr/cours/Physique/Optique/Michelson_partie1.pdf

Polarisation:

- <http://www.dotapea.com/chap06polaris.htm>
- http://alainrobichon.free.fr/cours/Physique/Optique/Polarisation_lumiere.pdf
- [http://www.delfaud.fr/Collegues/Physique/TP_Physique/TP5\(%20Polarisation%20\).pdf](http://www.delfaud.fr/Collegues/Physique/TP_Physique/TP5(%20Polarisation%20).pdf)
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Polariseur>
- http://patrick.kohl.pagesperso-orange.fr/spectro_oem/spectro_oem_7.htm