

HAE602E
Travaux pratiques
Photonique

Liste de contrôle pour chaque compte-rendu :

- Préparer** : Lire le texte de TP *avant* la séance et répondre aux questions maison .
- Décrire** : Décrivez de manière intelligible votre protocole ou schéma expérimental.
- Présenter** : Présentez vos résultats de sorte qu'ils soient porteurs d'information !
Indiquez les unités, décrivez les titres des axes pour les figures et mettez des légendes.
- Analyser** : Analysez vos résultats en comparant aux résultats théoriques attendus.





Table des matières

TPs : Consignes	3
TP1 : Analyse Spectrale Optique	5
TP2 : Polarisation et Diffraction	11
TP3 : Détection de Signaux Optiques Faibles	17
TP4 : Communications optiques	27



TPs

Consignes

Merci de respecter les consignes suivantes lors de la préparation des travaux pratiques (TP), lors des travaux eux-mêmes, et lors de vos comptes-rendus.

1. Préparation

- Lire le texte de TP **avant** la séance et répondre aux questions mises en évidence par le symbole
- Savoir utiliser Matlab ou un tableur pour traiter les données expérimentales (cf. page Moodle du cours pour support si nécessaire).

2. Séances de TPs

- Soyez délicats avec le matériel utilisé, le matériel optique est fragile et couteux !
- Toute absence aux TPs doit être justifiée (les TPs sont obligatoires).
- En cas d'absence à une séance de TP, prendre contact avec les encadrants afin de planifier si possible un rattrapage de la séance.

3. Comptes-rendus

- Il est essentiel de préparer le TP avant de venir !
- Toute courbe ou résultat doit être commentée dans le compte-rendu. En tant que scientifique vous ne devez pas vous contenter de donner un résultat, mais le commenter, l'étayer par un raisonnement scientifique tel qu'une comparaison aux résultats théoriques attendus, la prise en compte de limites expérimentales, etc.
- Toute courbe doit être lisible, chiffres inclus.
- Pour tout chiffre ayant une dimension (axes des courbes inclus), précisez l'unité.
- Tout graphique, courbe ou tableau doit présenter une légende.
- Votre paillasse doit être rangée en sortant (points de pénalité sinon).

Toute remarque constructive permettant d'améliorer la qualité des TPs est bienvenue !

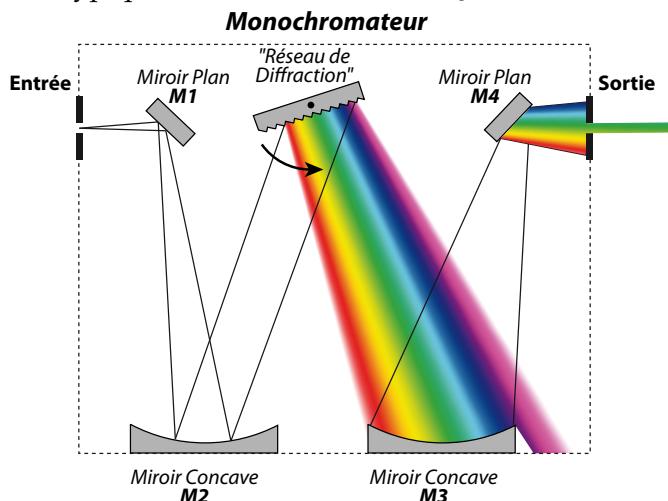
TP1

Analyse Spectrale Optique

I. Aspects théoriques

1 Principe général

Dans ce TP, on propose d'étudier deux sources de lumière très différentes : un laser idéal émettant dans le rouge (laser à gaz Hélium-Néon) et une source de lumière blanche (lampe halogène). Pour cela, vous allez utiliser un "analyseur de spectre optique" ou "monochromateur". Un monochromateur est typiquement constitué de la façon suivante :



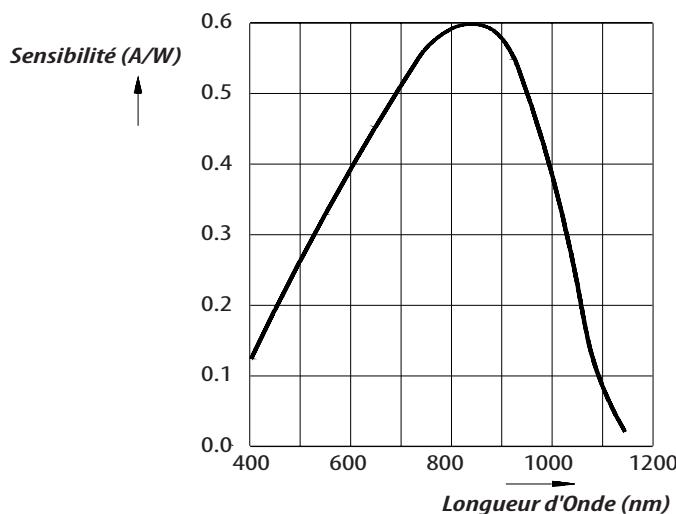
Le cœur d'un monochromateur est un élément dispersif (un "réseau de diffraction") qui sépare avec une grande efficacité les longueurs d'ondes. Par exemple, si on injecte de la lumière blanche sur le réseau, le résultat sera un arc-en-ciel, comme cela est montré sur la figure ci-dessus. Ensuite, la lumière est amenée sur une fente (côté sortie) qui va permettre de sélectionner précisément "la" longueur d'onde choisie.

Ainsi, si nous cherchons à obtenir le spectre en longueur d'onde d'une source de lumière, il suffit de faire tourner le réseau - qui est le seul élément mobile de cet appareil - de façon à faire défiler toutes les longueurs d'ondes au niveau de la fente de sortie. En récoltant cette lumière avec un photodétecteur, le spectre de la source est reconstitué en relevant la puissance optique perçue par le détecteur en fonction de l'angle du réseau (recalibré en longueur d'onde).

2 Sensibilité des détecteurs

Les photodétecteurs les plus répandus - car bon marché, très sensibles et rapides (jusqu'à 50 GHz de bande passante électrique) - sont les photodiodes. Une photodiode convertit la puissance lumineuse qu'elle "voit" en courant électrique : on appelle ce courant "photocourant". Sa sensibilité σ s'exprime donc en A/W.

Hélas, si l'on étudie des sources émettant un spectre large, il faut aussi prendre en compte le fait que les photodiodes n'ont pas une réponse spectrale plate en fonction de la longueur d'onde. Voici typiquement la sensibilité d'une photodiode en Silicium en fonction de la longueur d'onde :



Question 2.1. Équation utile

Afin de gagner du temps lors de vos manipulations, déterminez l'équation de la droite décrite par cette courbe de sensibilité, dans la zone linéaire associée à la réponse quantique, soit entre 400 nm et 750 nm pour cette photodiode. Afin de validez votre équation, vous tracerez la sensibilité en utilisant l'équation que vous avez déterminé, et comparerez à la courbe attendue.

3 Injection dans un monochromateur : utilisation de l'ordre zéro

Injecter dans un monochromateur est à priori compliqué. Imaginons que l'on veuille mesurer la longueur d'onde d'émission d'un laser. On sait que le spectre d'un laser est très étroit. Donc, si on cherche à régler l'alignement et qu'on ne voit rien sortir du monochromateur, on ne peut pas savoir si c'est parce que la rotation du réseau ne permet pas de laisser sortir le faisceau ou si le faisceau est simplement mal injecté.

Pour régler ce problème, on utilise une propriété des réseaux de diffraction : lorsqu'ils sont orientés selon un angle bien précis, appelé "ordre 0", ils se comportent exactement comme un miroir et non comme un élément dispersif, et ne décomposent donc plus la source de lumière incidente en fonction de la longueur d'onde. Cette position est obtenue lorsque le monochromateur est placé sur la longueur d'onde "0 nm". Ainsi, si aucune lumière ne sort lorsque le réseau est positionné sur l'ordre 0, on sait que c'est parce que l'alignement est mal réalisé.

II. Pratique expérimentale

Vous utiliserez dans cette partie soit le monochromateur vendu par Newport soit celui vendu par SPEX. Vous adapterez donc vos manipulations au spectromètre à disposition.

1 Etude d'une source de lumière blanche

Dans cette partie, vous avez intérêt à travailler en éteignant la lumière de la pièce.

Allumez l'ordinateur, le monochromateur et le pico-ampèremètre UDT. Appuyez sur le bouton "start/stop" puis "display/illum" du pico-ampèremètre. Ensuite, lancez le logiciel qui permet de piloter le monochromateur (dans le répertoire *Photonique* sur le bureau).

Si vous utilisez le monochromateur SPEX, au lancement du logiciel, il vous est demandé un calibrage : il suffit de lire la longueur d'onde affichée sur le compteur en face avant du monochromateur tel que mentionné sur la figure ci-après, et de recopier cette valeur dans le logiciel.



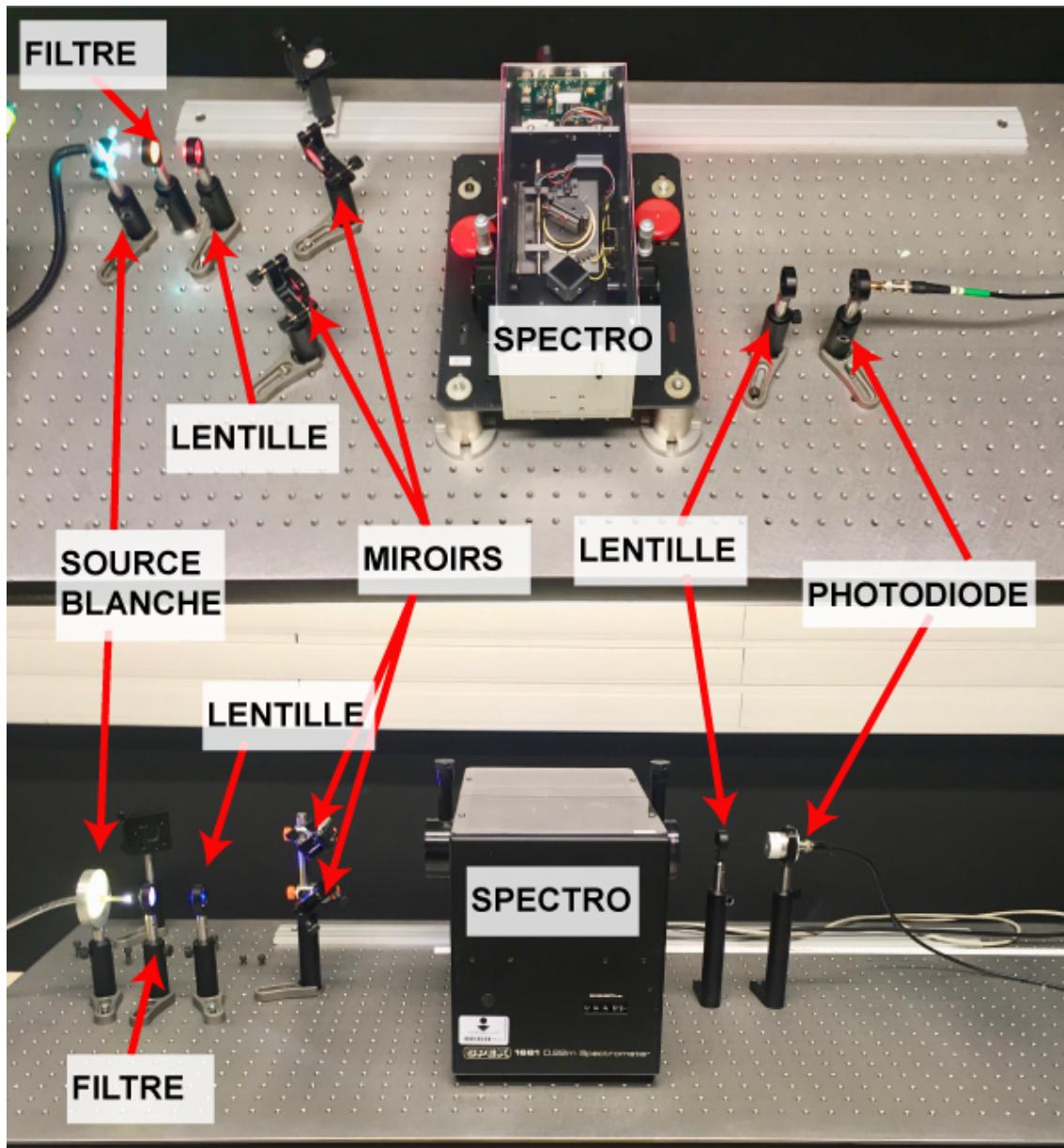
Avant de commencer une quelconque mesure, vous allez devoir régler le banc optique. Vous devez réaliser l'un des bancs de mesure présentés ci-après, selon que vous utilisez le monochromateur *Newport* (figure du haut) ou *SPEX* (figure du bas).



Manipulation

Vous allez ici aligner le montage optique.

- Placez le monochromateur sur l'ordre 0. Pour cela, utilisez le logiciel pour demander un "déplacement absolu" à la longueur d'onde de 0 nm. Ouvrez les 2 fentes (entrée et sortie) à la plus grande taille possible.
- Collimatez la source blanche avec une lentille et réglez les miroirs pour l'injecter dans le monochromateur. **Les sources blanches ont des durées de vie très courtes (moins de 100 h) donc merci de les éteindre quand vous ne les utilisez pas !**
- Placez la photodiode et la lentille en sortie. Réglez la distance entre la lentille et la photodiode, la position et l'orientation de tous les miroirs (entrée et sortie) pour avoir le photocourant le plus grand possible sur la photodiode.



Question 1.1

Quelle est la valeur du photocourant que vous obtenez ?

Question 1.2

Utilisez le logiciel pour placer le réseau à 633 nm. Qu'observez-vous sur le miroir M3 ? Est-ce attendu compte-tenu des aspects théoriques présentés dans la première partie ?

Question 1.3

Utilisez maintenant le logiciel pour réaliser la mesure du spectre de la lampe, vous observerez le spectre de 400 nm à 800 nm par pas de 10 nm. Récupérez les données afin de tracer le spectre mesuré. Le signe du photo-courant devra être inversé sur le tracé, et la courbe devra être jointe à votre rapport.

Question 1.4

Utilisez la courbe de sensibilité de la photodiode donnée dans la partie théorique et l'équation établie par vos soins avant le TP pour représenter le spectre en puissance lumineuse perçue plutôt qu'en photocourant. Insérez ce résultat dans votre rapport.

Question 1.5

Que concluez-vous sur le spectre d'une source dite "blanche" ?

Question 1.6

On souhaite maintenant utiliser cette source blanche pour connaître la proportion de lumière qu'il transmet en fonction de la longueur d'onde. Placez le filtre sur le chemin du faisceau de lumière blanche, par exemple après l'objectif de collimation. Mesurez le spectre obtenu, toujours dans une plage de 400 nm à 800 nm par pas de 10 nm.

Question 1.7

Déduisez-en le spectre de transmission de ce filtre en fonction de la longueur d'onde.

Question 1.8

Déterminez la valeur du coefficient de transmission là où le filtre est passant, ainsi que la longueur d'onde de coupure.

Question 1.9

En vous référant à ce que vous connaissez en électronique, quel nom donneriez-vous à ce filtre ?

2 Etude d'un Laser Hélium-Néon

Sécurité

Vous utilisez dans cette partie un laser de classe 3B : **ces lasers sont dangereux en cas de vision directe du faisceau, vous devez donc porter des lunettes de sécurité oculaire**. La vision des réflexions *diffuses* est normalement sans danger si la vision s'effectue avec une distance minimale entre la cornée et l'écran de 13 cm et une durée de 10 s. De même, le danger pour la peau est faible, particulièrement aux puissances optiques auxquelles vous travaillez (10 mW). Par précaution pour vos yeux et votre peau, respecter ces consignes :



- Portez les lunettes de protection laser.
- Ne jamais regarder directement le faisceau du laser ou ses réflexions.
- Ne pas diriger le faisceau vers d'autres personnes.
- Ne pas faire fonctionner le laser à hauteur des yeux.
- Ne pas mettre ses yeux à la hauteur du faisceau laser.



Ce laser représentant un réel danger pour votre rétine et celle de vos collègues, vous travaillez ici avec les lunettes de protection adaptées et la lumière allumée. Ne travaillez pas dans la précipitation! Une fois les alignements réalisés, vous pouvez enlever les lunettes dès lors que le faisceau est orienté sur le détecteur.

Manipulation

Réalisez un alignement similaire à ce qui a été fait dans la partie précédente, toujours en vous plaçant à l'ordre 0, **mais dans un premier temps, ne placez pas la photodiode sur le montage car la puissance du laser pourrait endommager la photodiode lorsque le réseau est sur l'ordre 0.**

Question 2.1

Fermez le plus possible la fente d'entrée et réajustez les réglages pour obtenir sur un écran la plus forte intensité possible. Ceci n'obturera pas le faisceau car ces fentes imposent une ouverture minimale non nulle. Comparez la tâche de lumière obtenue sur le réseau avec celle que vous aviez lorsque la fente était ouverte. A quelle fonction mathématique (que vous connaissez bien) la répartition d'intensité lumineuse sur le réseau vous fait-elle penser?

Question 2.2

Placez maintenant la photodiode en sortie avec un tube pour éviter de détecter la lumière ambiante. Tout en conservant la fente d'entrée fermée, fermez plus possible la fente de sortie et réajustez les réglages pour obtenir un maximum de photocourant sur la photodiode. Quelle valeur de photocourant obtenez-vous?

Question 2.3

Mesurez maintenant le spectre du laser Hélium-Néon. Décidez vous-même de la plage de longueur d'onde à explorer (vous savez que le He-Ne est rouge, ce qui doit vous guider sur la plage de mesure à choisir) et utilisez un pas de 0,2 nm. Importez les données afin de tracez ce spectre et insérez le dans votre rapport.

Question 2.4

A-t-on besoin de traiter ce spectre avec la courbe de sensibilité de la photodiode pour avoir une idée précise du spectre du laser? Si oui faites-le, si non expliquez pourquoi.

3 Conclusion Générale

Question 3.1

Mesurez la largeur à mi-hauteur du spectre mesuré avec le laser ainsi que la largeur à mi-hauteur du spectre de la lampe.

Question 3.2

Sachant que la largeur spectrale est très inférieure à 1 pm pour le laser, que mesurez-vous en réalité?

TP2

Polarisation et Diffraction

Sécurité

Vous utilisez dans le cadre de ces travaux pratiques un laser de classe 3B : **ces lasers sont dangereux en cas de vision directe du faisceau, vous devez donc porter des lunettes de sécurité oculaire.** La vision des réflexions *diffuses* est normalement sans danger si la vision s'effectue avec une distance minimale entre la cornée et l'écran de 13 cm et une durée de 10 s. De même, le danger pour la peau est faible, particulièrement aux puissances optiques auxquelles vous travaillez (10 mW). Par précaution pour vos yeux et votre peau, respecter ces consignes :



- Portez les lunettes de protection laser.
- Ne jamais regarder directement le faisceau du laser ou ses réflexions.
- Ne pas diriger le faisceau vers d'autres personnes.
- Ne pas faire fonctionner le laser à hauteur des yeux.
- Ne pas mettre ses yeux à la hauteur du faisceau laser.

Consignes

- **Ne mettez pas les doigts sur les lentilles et encore moins sur le réseau !**
- Répondez aux questions théoriques indiquées par le symbole avant la séance.
- Nous vous conseillons l'utilisation du logiciel gratuit Open Office ou de Matlab (installés en TP).

1 Polarisation

Objectifs du TP

L'objectif de ce TP est de vous familiariser avec le matériel optique, et la mesure en optique. À ces fins, vous étudierez la loi de Malus expérimentalement et devrez interpréter les mesures effectuées afin de vous assurer que vous mesurez bien ce que vous souhaitez.

2 Questions préliminaires



Question 2.1 : Loi de Malus

Soit une onde électromagnétique polarisée rectilignement et passant à travers un polariseur. Rappelez l'expression de la loi de Malus, loi décrivant la transmission du signal à travers le polariseur en fonction de l'angle relatif entre les axes de polarisation du faisceau et du polariseur.

Au cours des travaux pratiques, vous mettrez en place le montage expérimental décrit sur la figure 1. Le faisceau de sortie du laser He-Ne est collimaté, et sera focalisé sur une photodiode à l'aide d'une lentille de focale 50 mm.

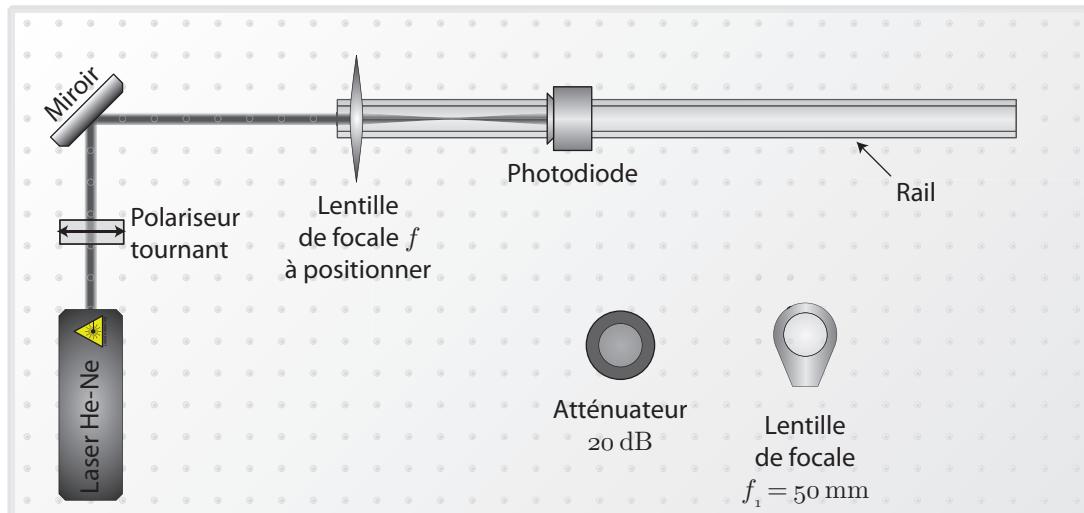


FIGURE 1 – Montage expérimental pour l'étude de la loi de Malus.



Question 2.2 : Optique géométrique

Effectuez un schéma optique de votre montage expérimental en utilisant le formalisme habituellement utilisé en optique géométrique. À quelle distance devez-vous placer la lentille de la photodiode afin de vous assurer de collecter le plus de puissance possible sur la surface limitée de la photodiode ?



3 Partie expérimentale

Manipulation

Ajustez le miroir de renvoi du faisceau afin de vous assurer que le faisceau réfléchi est parallèle au rail, et de hauteur constante. Cette étape doit être effectuée avec **grand soin**, car cet alignement conditionne la facilité des réglages optiques pour la suite des expériences.

Placez maintenant la photodiode, connectée à un multimètre avec une charge 50Ω en parallèle afin de réduire les effets de saturation. Vous pourrez ainsi lire un photo-voltage proportionnel à la puissance optique détectée, et alignez cette photodiode afin de maximiser ce dernier. Une fois alignée, placez la lentille de focalisation entre le miroir de renvoi et la photodiode et maximisez le photo-voltage.

Question 3.1 : Mesure préliminaire

Mesurez puis tracez l'évolution du signal détecté en fonction de l'angle du polariseur.

Question 3.2 : Confrontation théorique

Tracez sur le même graphe la courbe théorique, et interprétez votre résultat. Votre mesure permet normalement de déterminer le taux de polarisation du laser défini comme le rapport entre la puissance mesurée selon l'axe propre d'émission du laser sur la puissance mesurée sur l'axe orthogonal. Pouvez-vous mesurer ce taux de polarisation ? Vous justifierez votre réponse. Pour votre information, vous trouverez en annexe la spécification du laser (cf. annexe) donnant le taux de polarisation du laser.

4 Diffraction et interférences

Introduction

Dans cette partie, vous allez étudier la diffraction d'un faisceau par différents éléments discrets tels que de simples trous ou des réseaux de diffraction. Le montage expérimental est présenté Fig. 2. L'élément diffractant est éclairé par un faisceau collimaté, et le faisceau diffracté est observé en champ lointain à une distance D de l'objet diffractant. La caméra sera utilisée pour observer la diffraction par une fente et par un micro-trou circulaire, une feuille de papier millimétrée sera utilisée pour observer la diffraction par un réseau en transmission. Un atténuateur optique pourra être utilisé pour éviter la saturation de la caméra.

4.1 Partie théorique



Question 4.1 : diffraction par une fente

Soit une fente fine infiniment longue de largeur a , rappelez l'expression de l'intensité diffractée par la fente dans le plan d'observation et la représenter graphiquement.

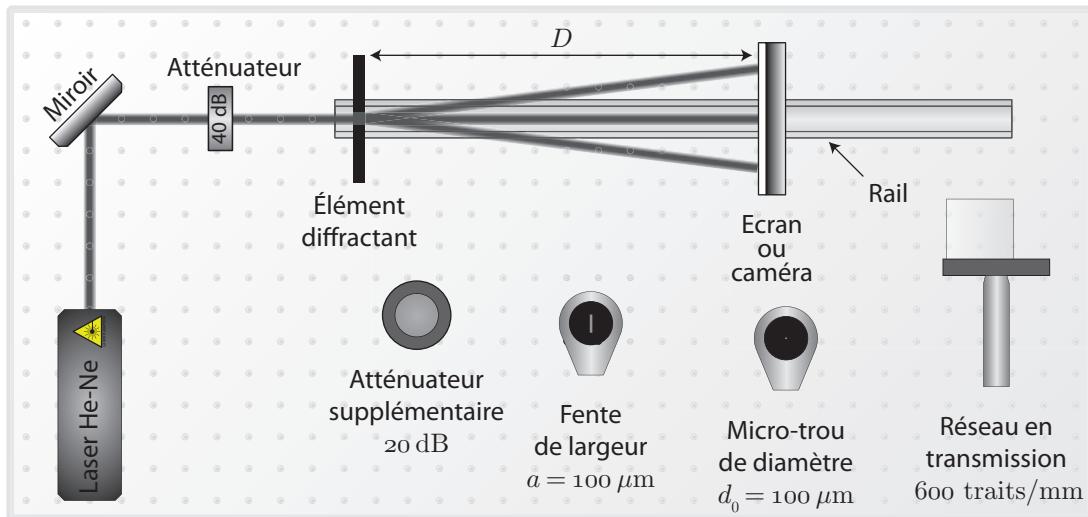


FIGURE 2 – Montage expérimental pour l'étude de la diffraction par des éléments discrets.



Question 4.2 : diffraction par un micro-trou circulaire

Soit un trou circulaire de diamètre d_0 , rappelez l'expression de l'intensité diffractée par le trou dans le plan d'observation et la représenter graphiquement. En supposant les angles de diffraction petits, exprimez l'expression de l'intensité diffractée en fonction des coordonnées cartésiennes (X, Y) dans le plan d'un écran situé à une distance D du diaphragme. Vous pourrez utiliser le fait que $J_1(x) \approx x/2$ si x est proche de 0, afin de simplifier votre résultat.



Question 4.3 : diffraction par un réseau de diffraction

Soit un réseau de diffraction comportant N fentes infiniment fines de pas a , rappelez l'expression de l'intensité diffractée par le réseau et la représenter graphiquement. En supposant les angles de diffraction petits, exprimez l'expression de l'intensité diffractée en fonction des coordonnées cartésiennes (X, Y) dans le plan d'un écran situé à une distance D du réseau de diffraction.

4.2 Partie expérimentale



Question 4.4 : diffraction par une fente

Placez une fente comme élément diffractant. Commencez par enlever l'atténuateur afin d'observer sur l'écran la figure de diffraction. Replacez ensuite l'atténuateur et ajustez la position de la caméra afin d'observer la figure de diffraction.

- Relevez l'allure de la figure de diffraction obtenue et la comparer à la théorie.
- Déterminez de cette figure de diffraction la largeur de la fente.



Question 4.5 : diffraction par un micro-trou

Placez maintenant un micro-trou comme élément diffractant. Commencez par enlever l'atténuateur afin d'observer sur l'écran la figure de diffraction. Replacez ensuite l'atténuateur et ajustez la position de la caméra afin d'observer la figure de diffraction.

- Relevez l'allure de la figure de diffraction obtenue et comparer à la théorie.
- Déduire le diamètre du trou de la figure de diffraction.

Question 4.6 : diffraction par un réseau

Placez maintenant un réseau de diffraction comme élément diffractant, en faisant très attention à ne pas mettre les doigts sur le réseau ! Vous observerez ici la figure de diffraction sur un écran seulement.

- Relevez l'allure de la figure de diffraction obtenue et comparer à la théorie.
- Déduire de cette figure le nombre de traits par millimètres du réseau.



5 Annexes : spécifications

Product Specification Sheet

High-Power, HeNe Lasers: Red

Description

Thorlabs high-power, red (632.8 nm), Helium-Neon lasers exhibit outstanding stability and performance with power outputs up to 17 mW. This classic tube design features four 4-40 holes located on the front for easy mounting of accessories.

An external power supply is included.

Specifications

Specification	Value
Wavelength	633 nm
Maximum Output Power	10.0 mW @ 633 nm
Minimum Output Power*	5.0 mW
Power 3 Seconds After Turn-On**	>75%
Polarization	Linear > 500:1
Mode Structure	TEM ₀₀ > 99%
1/e ² Beam Diameter	0.80 mm
Beam Divergence	1.01 mrad
Longitudinal Mode Spacing	441 MHz
Beam Drift After 30 Minute Warm-Up	<0.20 mrad
Long Term Beam Drift	<0.05 mrad
Noise (30 Hz – 10 MHz)	<1% RMS
Starting Voltage	<10 kVDC
Operating Voltage	2400 VDC
Operating Current	5.25 mA

Specification	Value
Series Resistors in Housing	94 kΩ
Shock	15 g for 11 msec
Weight	650 grams
Dimensions	
- Length	425.5 ± 1.0 mm (16.75 ± 0.04")
- Diameter	44.5 ± 0.5 mm (1.75 ± 0.02")
CDRH Classification	IIIb
CE	3B

* 30 minute warm-up to minimum specified output power
** 3-5 second CDRH delay incorporated into all power supply models. The start time <5 seconds.

Environmental Specification

	Operating	Non-Operating
Temperature	-20 to 70 °C	-40 to 80 °C
Humidity	≤80%	≤95%
Altitude	0 to 3,000 meters	0 to 6,000 meters

12106-S01 Rev B – 4/23/2010
Specifications subject to change without notice.

HAE602E/TP2

2022–2023

16

TP3

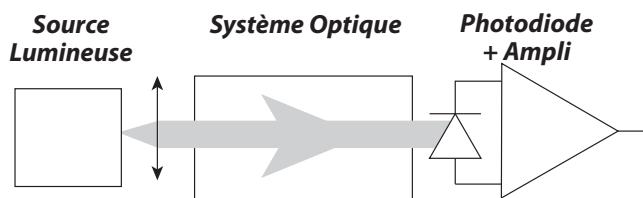
Détection de Signaux Optiques Faibles

I. Aspects théoriques

L'objectif de ce TP est de vous familiariser avec la détection de signaux de très faible amplitude en optique. La technique qui est présentée ici — les systèmes à détection synchrone — est très usuelle et se retrouve dans beaucoup de systèmes de mesure, que ce soit en laboratoire ou dans des produits commerciaux.

1 Mesure d'un signal : Contributions non désirées

La figure ci-dessous représente un système très élémentaire de mesure optique.



Dans ce système très simple, la lumière émise par la source lumineuse va, après un passage dans le système optique, être convertie en courant électrique par la photodiode (on parle de **photocourant**). Ce courant est ensuite amplifié par un amplificateur. Ce dernier transforme ce petit courant à l'entrée en une tension assez forte en sortie : c'est un **amplificateur transimpédance**. Le gain de ce type d'amplificateur est donc exprimé en Ω .

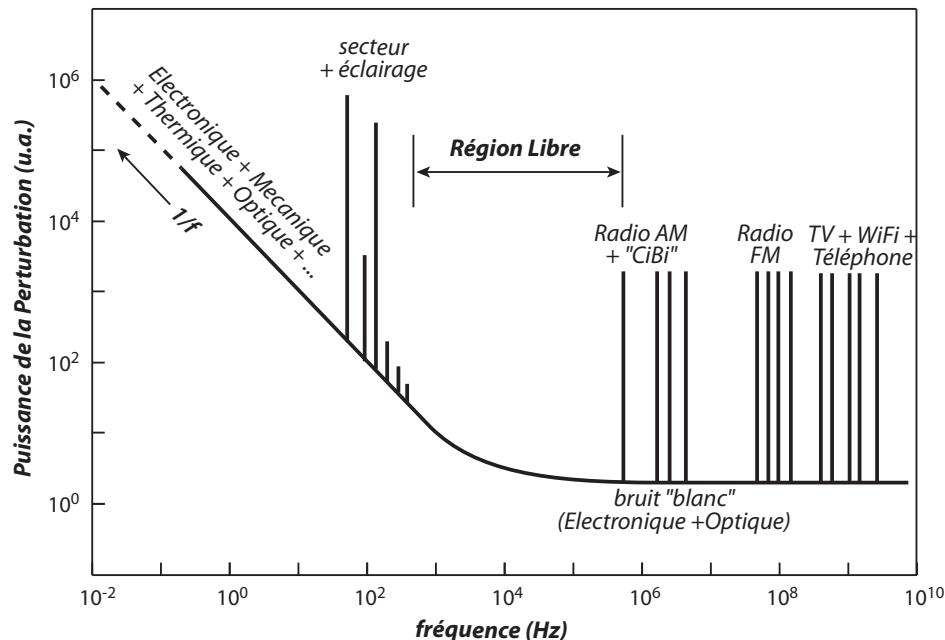
Tant que la puissance optique à la sortie du système optique à étudier est suffisamment forte, il n'y a pas de problème. En revanche, si l'on se retrouve avec des signaux faibles, par exemple parce que le système optique a beaucoup atténué la lumière, on peut ne plus arriver à mesurer le signal. En effet, la tension à la sortie de l'amplificateur contient, en plus du signal à mesurer, un ensemble de signaux parasites qui dégradent la qualité de la mesure :

- Des composantes continues non désirées : tension d'offset de l'amplificateur, courants liés aux imperfections de la photodiode, détection de la lumière ambiante...
- Du bruit de fond : il s'agit d'un signal aléatoire de faible amplitude généré par tous les composants électroniques. Pour se faire une idée de ce qu'est le bruit de fond, il suffit de

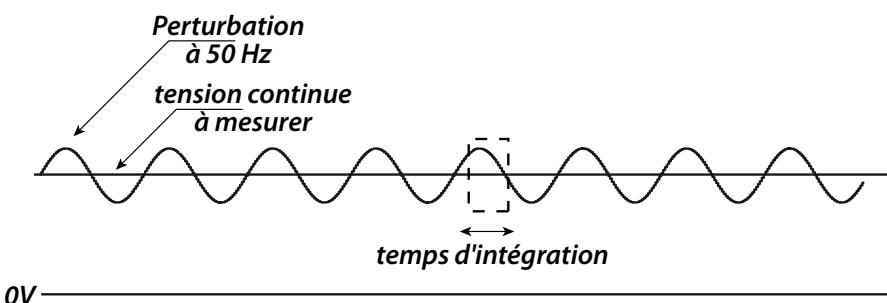
prendre un oscilloscope et de l'utiliser sur le calibre le plus faible en absence de signal d'entrée. On observe alors un "gazon" autour de $V = 0$: il s'agit du bruit de fond de l'oscilloscope.

- Des interférences et parasites dus à l'environnement : 50 Hz (secteur, éclairage), fluctuations mécaniques, dérives thermiques, captage des ondes radio, TV, téléphone...

Il faut noter également que les interférences, les parasites et le bruit de fond sont plus forts en basse fréquence qu'en haute fréquence. Il est pratique d'utiliser une tendance en $1/f$ pour représenter cette idée, car elle croît lorsque la fréquence diminue. Un spectre typique de ces différentes contributions est représenté sur la figure ci-dessous :



On comprend donc bien que, si le signal continu à mesurer est faible, il va être compliqué de le détecter. Dans ce contexte, supposons que l'on réalise une mesure de la composante continue. Pour cela, l'appareil va mesurer la valeur moyenne du signal sur "un certain temps" que l'on va appeler "temps d'intégration" et que l'on notera τ . Imaginons que l'on cherche à mesurer un signal de composante continue faible en présence d'une ondulation à 50 Hz parasite tel que représenté sur la figure suivante.



On voit très bien que la valeur moyenne de signal est composée de la composante continue + la valeur moyenne du sinus sur le temps d'intégration. L'appareil mesure donc à chaque

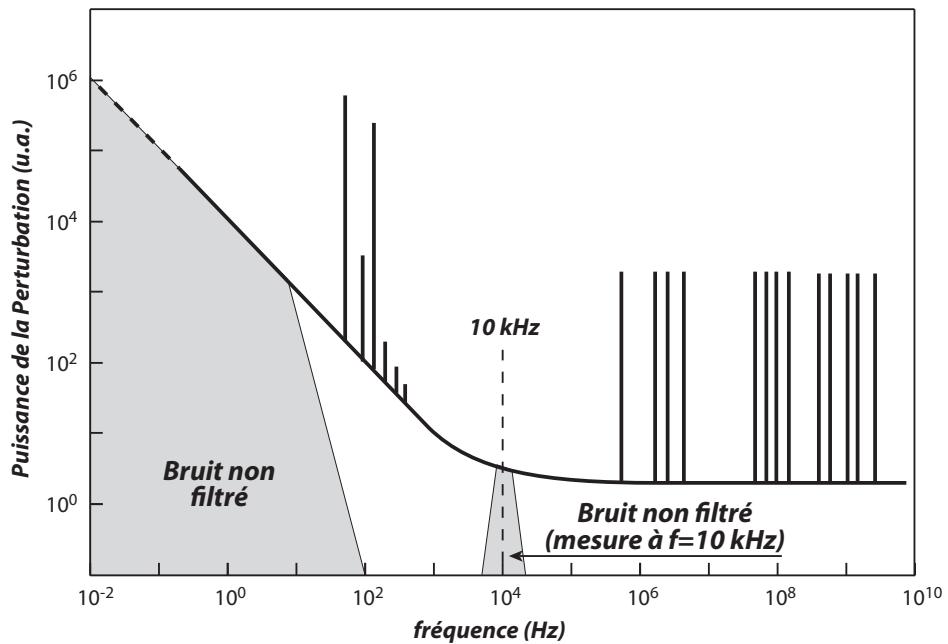
instant T :

$$\int_T^{T+\tau} [v_0 + v_1 \sin(2\pi ft)] dt$$

Or cette valeur dépend fortement de l'instant T auquel la mesure a débuté, à cause de la présence de la tension parasite à 50 Hz : on n'intègre jamais la même portion du sinus dans la mesure, on a donc une mesure fluctuante et imprécise.

Pour résoudre ce problème, on pourrait penser qu'il suffit d'utiliser des temps d'intégration qui sont multiples de 50 Hz : ainsi, on intègre le sinus sur sa période et le résultat est 0. C'est tout à fait juste, mais en disant cela on néglige tous les autres parasites observables sur le spectre donné plus haut.

On pourrait se dire aussi qu'un filtre passe bas de constante de temps très grande permettrait de résoudre le problème. Il n'en n'est rien car un filtre passe-bas ne filtrera pas les fréquences les plus basses, qui sont justement celles qui contiennent la perturbation la plus forte, comme le montre la figure ci-dessous :

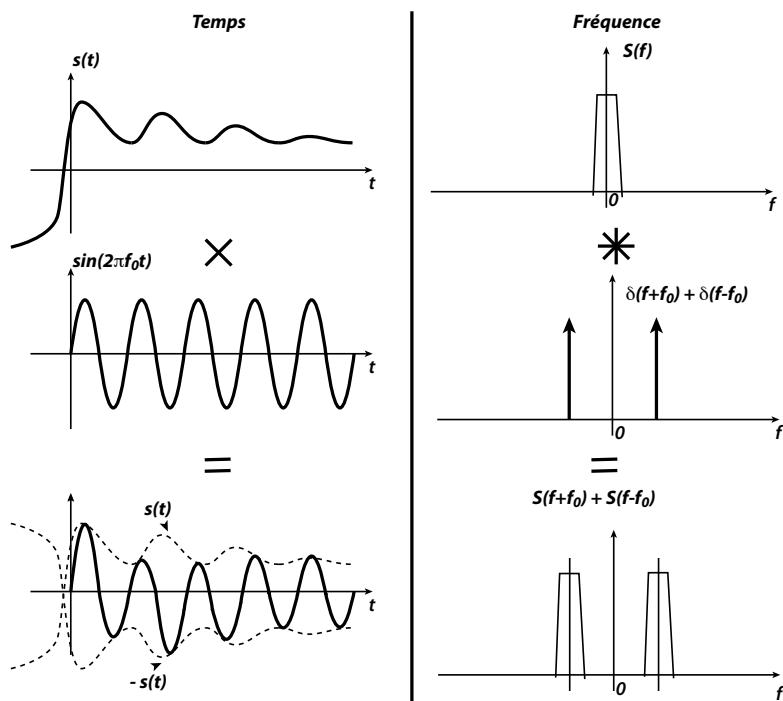


En revanche, si on cherchait à mesurer la valeur efficace d'un signal sinusoïdal dans une bande de fréquences peu perturbée, par exemple autour de 10 kHz, avec un filtre modérément étroit (donc facile à réaliser), la mesure se ferait avec une erreur minime car on travaille dans une bande de fréquence éloignée des parasites : c'est ce que montre la figure ci-dessus. De plus, les composantes continues parasites ne seraient pas perçues puisque en dehors du gabarit du filtre. C'est cette idée qui est exploitée par les systèmes à détection synchrone : décaler le signal continu à mesurer dans une zone peu perturbée du spectre.

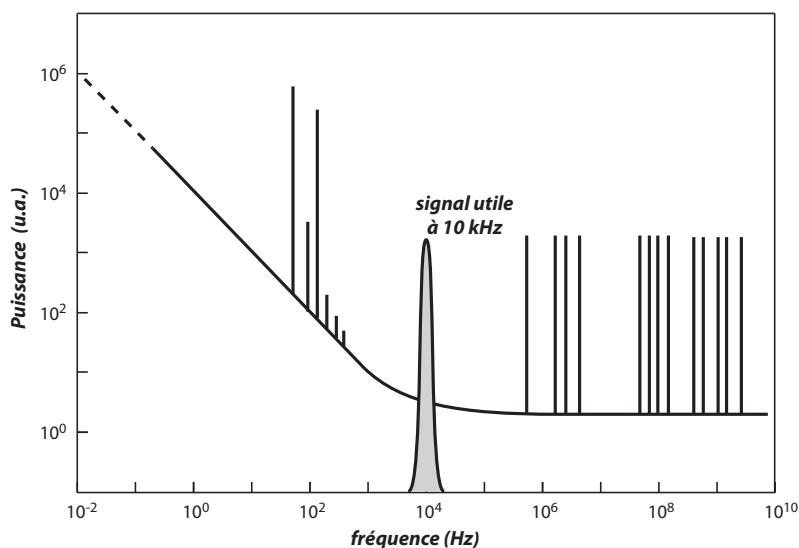
2 Une solution : la détection synchrone

2.1 Principe Général

Pour décaler le signal à plus haute fréquence, il suffit de réaliser une modulation d'amplitude. En effet, si on dispose d'un signal $s(t)$ à basse fréquence et que nous le multiplions par une sinusoïde pure à haute fréquence, les propriétés de l'analyse de Fourier et du produit de convolution montrent que l'on se ramène à une simple translation en fréquence comme l'illustre la figure ci-dessous :



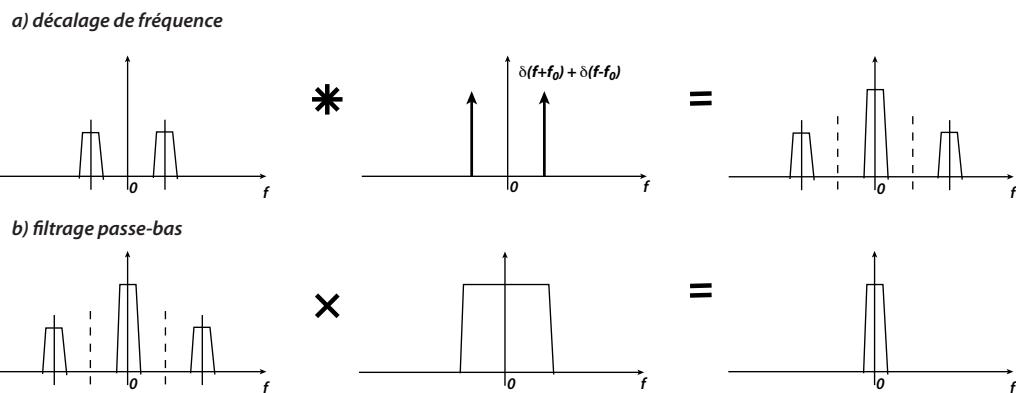
C'est donc cette opération que l'on va réaliser lors de l'émission du signal optique. A la réception, le signal modulé sera superposé aux perturbations déjà décrites. Le signal perçu sera donc celui qui est donné sur la figure ci-dessous :



Après que le signal soit passé à travers le système optique, il suffira de mesurer la valeur efficace du signal autour de la fréquence porteuse pour récupérer la composante continue avec un temps d'intégration correspondant au gabarit du filtre.

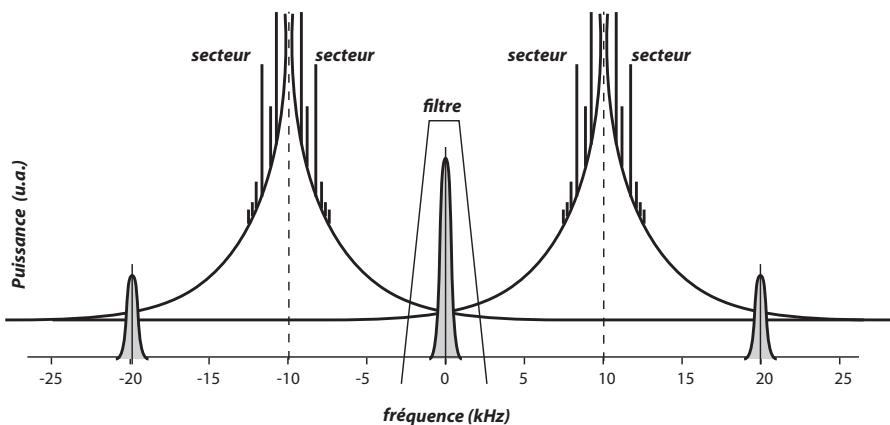
Malheureusement, un tel filtre, centré à une fréquence relativement élevée et présentant un très haut coefficient de qualité (bande très étroite) est irréalisable en pratique avec un circuit électronique. Qui plus est, même si un tel filtre existait, il ne suivrait pas en temps réel les fluctuations de fréquence de la porteuse.

C'est pourquoi, à la réception, on choisit une autre stratégie : on réalise une démodulation d'amplitude en multipliant le signal reçu par la fréquence porteuse (dans notre exemple 10 kHz) afin de ramener le signal utile en bande de base, comme le montre la figure ci-après. Ensuite, il suffit de filtrer ce signal pour récupérer la composante continue.



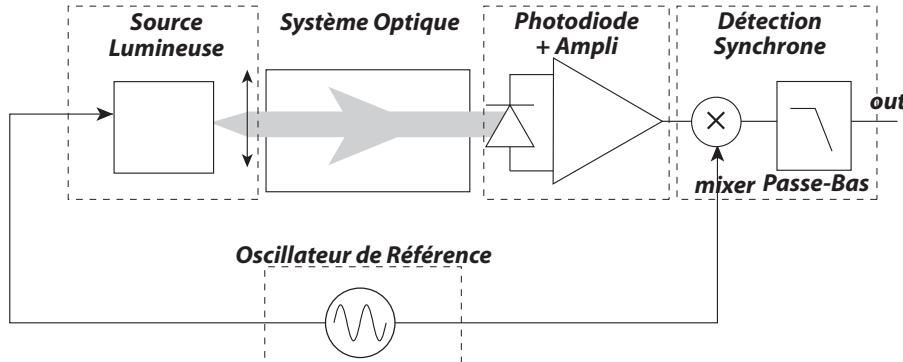
Ceci peut donner l'impression que l'on va retrouver tous les défauts d'une détection en bande de base, puisque le signal final se retrouve en bande de base. Il n'en n'est rien parce que le signal a été amplifié **avant** démodulation, donc dans un régime dans lequel les perturbations sont les plus faibles.

Ce traitement, appliqué à notre exemple, est représenté sur la figure ci-dessous. On voit bien que les perturbations liées au bruit et à l'environnement ont été rejetées. De plus, les composantes continues dues au système de détection sont décalées autour de 10 kHz et sortent donc du gabarit du filtre. On voit, cette fois-ci, que l'augmentation du temps d'intégration, i.e. de la constante de temps associée au filtre de fin de chaîne, va obligatoirement améliorer la mesure, puisque les parasites les plus forts ont été éloignés du signal utile.



2.2 Schéma général d'un système à détection synchrone

Le schéma général d'un système à détection synchrone pour les mesures optiques est donné sur le schéma ci-dessous :



Une détection synchrone est donc un appareil de mesure qui a deux entrées, à savoir l'oscillateur de référence et le signal à mesurer, et une sortie, qui donne le signal après filtrage.

2.3 Importance de la phase

Pour terminer, notons que dans toute cette description de la détection synchrone, nous n'avons jamais parlé de phase. Or le déphasage entre l'oscillateur de référence et le signal perçu par la photodiode a une importance forte. Ce déphasage peut exister, par exemple parce que l'amplificateur introduit un déphasage à la fréquence de travail qui a été choisie.

Regardons ce qui se passe en cas de déphasage. On a vu que la détection synchrone réalisait le produit entre le signal de référence et le signal d'entrée. Si les deux sont déphasés, alors le produit réalisé $P(t)$ par la détection synchrone revient à :

$$P(t) = K V_{ref} \cos(2\pi f t) V_{sig} \cos(2\pi f t + \phi)$$

où K est un coefficient de proportionnalité constant. Pour obtenir le spectre, il faut linéariser cette expression :

$$P(t) = \frac{K}{2} V_{ref} V_{sig} \{\cos(\phi) + \cos(4\pi f t + \phi)\}$$

Si le filtrage passe-bas est suffisamment efficace, on élimine les termes à haute fréquence, et il reste en sortie de détection synchrone le signal $S(t)$:

$$S(t) = \frac{K}{2} V_{ref} V_{sig} \cos(\phi)$$

Autrement dit, si le déphasage entre les deux signaux vaut $\pi/2$, alors on ne détecte rien... Ainsi, pour que la détection soit la plus efficace possible, il faut impérativement avoir un déphasage de 0° entre les deux signaux à l'entrée.

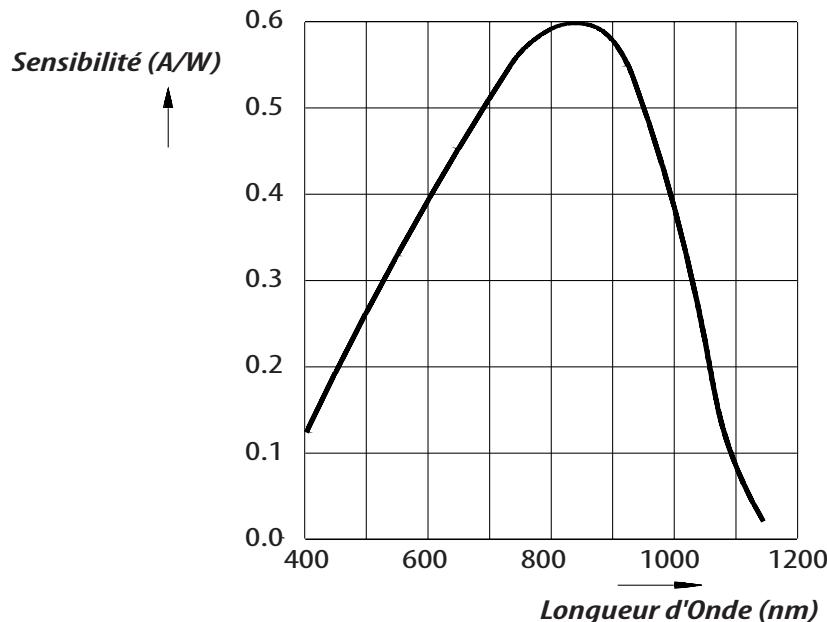


Question 2.1 : Importance de la phase

Pourquoi existe-t-il un déphasage entre les deux signaux d'entrée lors de vos mesures ?

3 Sensibilité du détecteur

Les photodétecteurs les plus répandus — car bon marché, très sensibles et rapides (jusqu'à 50 GHz de bande passante électrique) — sont les photodiodes. Une photodiode convertit la puissance lumineuse qu'elle "voit" en courant électrique : on appelle ce courant "photocourant". Sa sensibilité σ s'exprime donc en A/W. Voici typiquement la sensibilité d'une photodiode en Silicium en fonction de la longueur d'onde :



Question 3.1

Le signal en sortie de photodiode sera ensuite transformé en tension à l'aide d'un amplificateur transimpédance de gain R (Ω). Déterminez comment évaluer la puissance optique P incidente sur la photodiode en fonction de la tension V en sortie de l'amplificateur transimpédance, connaissant le gain R de l'amplificateur et la sensibilité σ de la photodiode (à une longueur d'onde donnée).

4 Atténuation optique

Dans ce TP, vous utiliserez des atténuateurs optique. **L'atténuation optique est souvent exprimée en densité optique (OD)**, l'atténuation de la puissance optique est alors $\eta = 10^{OD}$. Vous effectuerez des mesures avec ou sans atténuateur optique au cours de ce TP, et comparez les mesures en sortie d'amplificateur transimpédance.

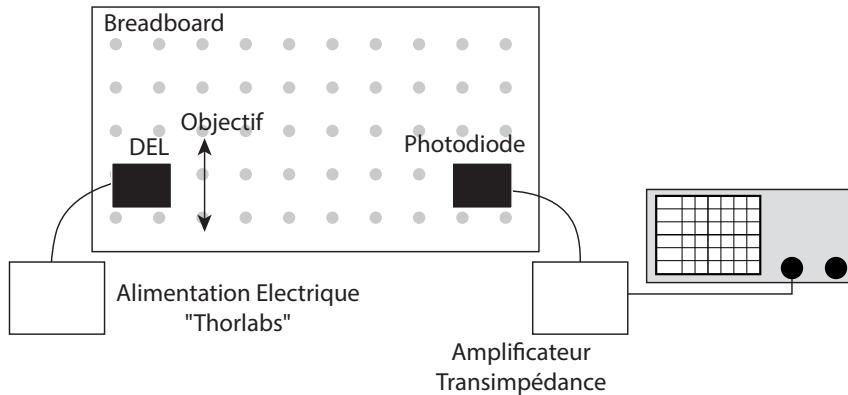


Question 4.1

Montrez que faire le rapport des puissances optiques avec/sans atténuateur, ou faire le rapport des tensions observées à la sortie de l'amplificateur transimpédance avec/sans atténuateur, donnent le même résultat.

II. Partie Pratique

Nous allons utiliser un montage optique pour mesurer l'atténuation procurée par des atténuateurs du commerce. Pour cela, réalisez le montage décrit ci-après, vous devrez prévoir une distance assez grande (> 10 cm) entre l'objectif et la photodiode pour pouvoir insérer des éléments optiques.



1 Importance de la lumière ambiante

Question 1.1

Mesurez la tension moyenne observée en sortie de transimpédance la DEL éteinte. Ajoutez maintenant le tube noir en le vissant sur la photodiode, et mesurez de nouveau la tension moyenne en sortie de transimpédance. De ces deux mesures, pensez-vous qu'il soit utile de conserver le tube dans la suite de ce TP ? Vous justifierez bien entendu votre réponse.

2 Linéarité et caractérisation du système opto-électronique

Manipulation

Commencez par alimenter la DEL avec un courant ≈ 30 mA (son émission est à 633 nm). Collimatez la lumière sortant de la DEL avec l'objectif en faisant attention de tronquer le moins possible le faisceau émis. Ensuite, placez la photodiode de façon à ce qu'elle détecte le flux, et ajustez le placement de l'objectif pour que la lumière soit légèrement focalisée sur le photodétecteur.

Question 2.1

Mesurez l'évolution de la tension mesurée en sortie du transimpédance en fonction du courant d'alimentation de la DEL pour des valeurs variant entre 0 et 50 mA. Tracez ensuite le résultat obtenu entre -50 mA et 50 mA sachant que pour la diode électroluminescente la puissance de sortie est nulle pour un courant négatif. Selon le montage réalisé, il est possible que vous observiez une saturation du signal de sortie du transimpédance.



Question 2.2

Pour quel courant d'alimentation de la DEL obtenez-vous comme tension de sortie du transimpédance la moitié de la tension maximale observée ? Notez bien cette valeur, vous traveillerez par la suite avec ce courant d'alimentation moyen.

3 Mesure en continu

Question 3.1 : Mesure sans atténuateur

Donnez la valeur du photocourant collecté par la photodiode. De la courbe de sensibilité présentée dans la partie théorique, déduire la puissance optique associée.

Question 3.2 : Mesure avec atténuateur

Insérez maintenant sur le trajet du faisceau lumineux l'atténuateur #1, et donnez la puissance optique associée. Vérifiez que le niveau de puissance mesuré après atténuation est cohérent avec la valeur d'atténuation donnée par le constructeur.

Vous noterez que la tension mesurée est non négligeable à comparer à celle initialement mesurée DEL éteinte sans tube, d'où l'importance d'avoir gardé le tube pour les mesures afin de s'affranchir de la lumière ambiante.

4 Observation de la modulation

Question 4.1

Retirez maintenant l'atténuateur et le tube noir, et envoyez un signal sinusoïdal de fréquence 1 kHz à l'aide du GBF sur l'entrée "modulation" du contrôleur de courant. Observez le signal de sortie de l'amplificateur transimpédance sur l'oscilloscope, et ajustez l'amplitude du GBF de sorte que ce signal soit bien sinusoïdal.

Question 4.2

Placez l'oscilloscope en mode "FFT" pour observer la transformée de Fourier du signal. Si l'oscilloscope est bien réglé (notamment la base de temps), vous observez un pic à la fréquence de modulation, ainsi qu'un certain "environnement". Récupérez ce spectre à l'aide de la fonction *eea* sous *Matlab* et mettez-le en forme. Attention, en mode FFT, l'oscilloscope utilise les dB comme unité verticale.

Question 4.3

Placez l'atténuateur #1 sur le trajet du faisceau et observez l'influence sur le spectre. Récupérez encore une fois ce spectre et tracez-le sur le même graphe que précédemment. Déduisez-en l'atténuation procurée par l'atténuateur #1.

(Attention, question piège... Appelez l'enseignant pour discuter de ce point.)

Question 4.4

Ajoutez maintenant l'atténuateur #2 sur le trajet du faisceau. Qu'observez-vous ?



5 Utilisation de la détection synchrone

Retirez les atténuateurs optiques.

Question 5.1

Utilisez le signal de synchronisation du GBF (sortie TTL) comme référence (REF IN) pour la détection synchrone, et connectez la sortie de l'amplificateur transimpédance sur l'entrée signal de la détection synchrone (voie A). Réglez le calibre de la détection synchrone de manière automatique en utilisant la fonction *auto sen.*, et réglez le déphasage entre les deux voies à l'aide de la fonction *auto phase*.

Quelle est l'amplitude du signal vue par la détection synchrone ?

Attention : La détection synchrone met du temps avant d'afficher le bon résultat. Ce temps est dû au filtre passe-bas dont la constante de temps est grande puisqu'il coupe bas en fréquence.

Question 5.2

Montrez pourquoi utiliser le signal de synchronisation du GBF comme signal de référence ne pose pas de problème pour la détection synchrone.

Question 5.3

Placez l'atténuateur #1 sur le trajet du faisceau, et déduisez-en l'atténuation procurée par cet atténuateur. Exprimez-la en dB.

Question 5.4

Placez l'atténuateur #2 sur le trajet du faisceau. Que constatez-vous ? Vissez maintenant le tube noir sur la photodiode, et déduisez-en l'atténuation procurée par cet atténuateur. Exprimez-la en dB.

Question 5.5

Placez les deux atténuateurs sur le trajet du faisceau et mesurez la transmittance équivalente à l'ensemble. Que constatez-vous ? Que concluez-vous ?

TP4

Communications optiques

Introduction

Toutes les liaisons télécoms longues distances et/ou haut-débit sont des fibres optiques dans lesquelles l'information est codée par la lumière. Pour les modulations en amplitude, il n'est pas possible de moduler directement l'amplitude du laser, car sa fréquence serait aussi modulée. Des modulateurs externes sont utilisés, principalement basés sur l'interféromètre de Mach-Zehnder, interféromètre à deux ondes réalisé en optique intégrée, et connectorisé à des fibres optiques à ses deux extrémités. Dans ce TP, vous étudierez cet interféromètre puis montrerez que vous pouvez l'utiliser pour transmettre une information, en l'occurrence un son grâce à une modulation d'amplitude analogique du signal optique. Enfin, vous montrerez qu'une modulation haut-débit est possible grâce à l'utilisation d'un synthétiseur hautes-fréquences.

Sécurité des personnes



Vous travaillez dans le cadre de ces travaux pratiques avec un laser infrarouge à 1550 nm. Ce laser peut être dangereux en cas de vision directe et prolongée du faisceau. Ainsi, évitez de regarder la sortie de la fibre optique lorsque le laser est allumé. Ne pas diriger le faisceau vers d'autres personnes.

Sécurité du matériel

- **Fibres optiques** : Consultez l'annexe sur les fibres optiques si vous n'avez jamais travaillé avec ces composants.
- **Laser** : Les diodes laser craignent les pics de courant (risque de les détruire!). Pour éviter cela, il faut utiliser correctement les boîtiers d'alimentation. Pour alimenter une diode laser, allumez d'abord le bouton "LINE" en bas à gauche du panneau avant du contrôleur. Assurez-vous que le courant demandé est minimum, puis appuyez sur le bouton "ON". Ensuite vous pouvez ajuster et moduler le courant, l'alimentation protège la diode de tout effet transitoire indésirable pour la diode. Pour éteindre la diode laser, il faut faire l'opération exactement inverse. Notez que les diodes laser que vous utilisez en TP sont d'une fiabilité éprouvée (ce sont des lasers télécom garantis pour fonctionner plus de 10 ans en continu), leur destruction ne pourrait provenir que d'une mauvaise manipulation de votre part.
- **Photodiode** : Toujours s'assurer qu'il n'y a pas de signal optique (laser polarisé à 0 mA) en entrée de photodiode avant de déconnecter la sortie de la photodiode.

1 Interféromètre de Mach-Zehnder

L'interféromètre de Mach-Zehnder est présenté sur la figure 1. Le signal optique incident

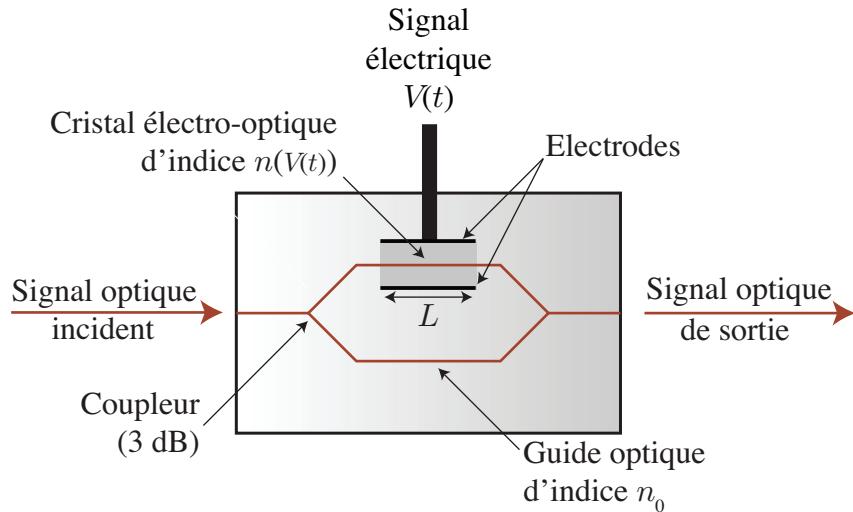


FIGURE 1 – Principe de l'interféromètre de Mach-Zehnder.

arrive par une fibre optique, il est couplé à un circuit en optique intégrée. Le signal extérieur est ainsi couplé à un guide d'onde réalisé sur le circuit optique, puis divisé en deux grâce à un coupleur dit en Y . L'un des signaux se propage dans un guide dont l'indice optique sera noté n_0 (en bas sur la figure), tandis que l'autre signal se propage à travers un cristal électro-optique de longueur L , généralement du Niobate de Lithium, dont l'indice optique n dépend de la tension V appliquée aux bornes du cristal. Ainsi, les deux signaux seront déphasés en fonction de la tension V appliquée, puis les deux signaux seront recombinés par un second coupleur en Y dans le guide de sortie, lui-même coupé in fine à la fibre optique en sortie d'interféromètre.



Question 1.1. Réponse d'un interféromètre à deux ondes

Rappelez l'expression générale de l'intensité optique I observée en sortie d'un interféromètre à deux ondes pour un déphasage $\Delta\phi$ entre les deux ondes, et tracez l'allure de $I(\Delta\phi)$.



Question 1.2. Déphasage

Déterminez la phase cumulée φ_1 sur une longueur L d'indice optique n_0 pour l'onde se propageant dans le guide sans cristal électro-optique. De même, déterminez la phase cumulée φ_2 sur une longueur L d'indice optique n pour l'onde se propageant dans le guide avec cristal électro-optique. Déduisez-en l'expression du déphasage $\Delta\phi$ et justifiez que vous pouvez obtenir une interférence constructive ou destructive en sortie selon la valeur de la tension appliquée aux bornes du cristal électro-optique.



Question 1.3. Transducteur électro-optique

En vous aidant de la fonction de transfert tracée précédemment, quel doit être le déphasage moyen à appliquer à l'interféromètre afin de convertir linéairement un signal électrique $V(t)$ en signal optique $I(t)$? Que se passe-t-il pour une grande profondeur de modulation?



Question 1.4. Résolution spectrale

Dans ce TP, vous utiliserez un analyseur de spectre optique de résolution minimale 0,03 nm. La relation entre fréquence et longueur d'onde n'étant pas linéaire, un faible écart en longueur d'onde $\Delta\lambda$ se traduit en écart en fréquence $\Delta\nu$ via la relation $\Delta\nu/\nu = -\Delta\lambda/\lambda$ où ν (λ) est la fréquence (longueur d'onde) moyenne, d'où $\Delta\nu = -c \Delta\lambda/\lambda^2$. En déduire la valeur en Hz de la plus petite résolution permise par l'analyseur de spectre optique.

2 Étude quasi-statique

Vous allez ici injecter le modulateur d'amplitude par un signal monochromatique issu d'un laser télécoms standard émettant autour de 1550 nm, afin de pouvoir le caractériser.

Attention à la sensibilité à la polarisation optique! L'entrée du modulateur est sensible à la polarisation optique incidente (orientation du champ électrique dans la fibre optique), ainsi les fibres optiques entre le laser et le modulateur ne doivent pas être déplacées au cours des mesures, sinon tout changement de courbure amène à un changement de polarisation, et ainsi à un changement de puissance transmise par le modulateur.



Manipulation

Vous allez réaliser le schéma expérimental présenté Fig 2. La sortie du laser est normalement déjà connectée à l'entrée du modulateur d'amplitude, si non effectuez cette connexion. Connectez la fibre optique de sortie du modulateur à la photodiode PDA10D2. Le signal de la photodiode sera observé à l'oscilloscope avec une charge 50 Ω en parallèle afin de conserver une bande passante suffisante à la détection. Assurez-vous que l'alimentation de la photodiode est allumée, ainsi que la photodiode.

Polarisez maintenant le laser à 50 mA afin qu'il émette une puissance optique de l'ordre de quelques mW. N'oubliez pas que vous devrez ramener la polarisation du laser à 0 mA si vous devez déconnecter/connecter la sortie de la photodiode.

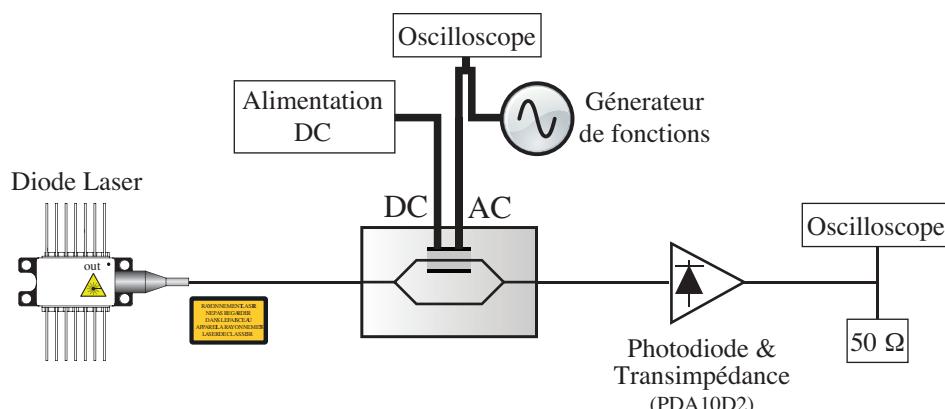


FIGURE 2 – Schéma expérimental pour la caractérisation du Mach-Zehnder.



2.1 Fonction de transfert

Afin d'évaluer la fonction de transfert quasi-statique du modulateur d'amplitude, vous allez varier le déphasage entre les deux voies du Mach-Zehnder en appliquant une tension DC au modulateur de -5 V à $+5\text{ V}$ sur l'entrée DC (et non AC!) à l'aide de l'alimentation Tenma que vous piloterez sous Matlab. Pour changer la polarité, ramenez la tension à 0 V puis inversez les fiches bananes. Pour ce modulateur, la tension V_π est typiquement de $2,7\text{ V}$ pour de basses fréquences de modulation, cette grandeur correspond à la variation de tension qui induit un déphasage additionnel de π rad. **La tension DC appliquée ne doit pas excéder $\pm 5\text{ V}$ pour ne pas endommager le modulateur d'amplitude!!**



Question 2.1. Réponse du modulateur à une tension de commande

À l'oscilloscope, mesurez le signal détecté par la photodiode en fonction de la tension DC appliquée. Vous tracerez l'allure de la fonction de transfert mesurée et, bien entendu, vous analyserez vos résultats notamment en les comparant à la théorie. À ce stade vous ne mesurez pas rigoureusement la fonction de transfert car l'ordonnée n'est pas le rapport de la puissance optique en sortie sur celle en entrée, mais la tension mesurée à l'oscilloscope en sortie de photodiode, cependant à un facteur près vous retrouvez l'allure de la fonction de transfert.



Question 2.2. Fonction de transfert

En supposant des pertes de 3 dB dans le modulateur (pour une interférence constructive en sortie), tracez la fonction de transfert du modulateur en fonction de la tension DC appliquée. Pour affiner votre résultat, vous pourrez supprimer la composante continue mesurée en sortie du trans-impédance sans signal optique incident, que vous pourrez mesurer en ramenant la polarisation du laser à 0 mA .

3 Étude dynamique

3.1 Modulation d'amplitude sinusoïdale

Vous allez maintenant observer la réponse dynamique du modulateur. Pour ce faire, à l'aide du générateur de fonctions, vous allez injecter un signal sinusoïdal sur l'entrée AC (et non DC!) du modulateur. **La tension AC appliquée ne doit pas excéder 10 V_{cc} pour ne pas endommager le modulateur d'amplitude!!**



Question 3.1. Autour de la quadrature

Placez votre modulateur en quadrature, en ajustant la polarisation DC du modulateur, afin d'assurer un fonctionnement linéaire. Appliquez une faible modulation d'amplitude en entrée AC du modulateur, à une fréquence de 440 Hz environ (fréquence acoustique associée au La en musique), et observez le signal en sortie de photodiode à l'oscilloscope. Effectuez une acquisition de ce signal à l'aide de la fonction *eea* sous Matlab. Observez-vous le signal attendu ?

Question 3.2. Non linéarité

En conservant la quadrature, augmentez maintenant l'amplitude du signal sinusoïdal en entrée AC du modulateur, sans dépasser 10 V_{cc} afin de ne pas endommager le modulateur, et observez le signal en sortie de photodiode à l'oscilloscope. Effectuez une acquisition de ce signal. Comment expliquez-vous ce que vous observez ? Qu'en déduisez-vous quant à l'amplitude du signal de modulation à appliquer afin de transmettre un signal le plus fidèlement possible ?

Question 3.3. Transposition

Polarisez maintenant votre modulateur autour d'un minimum de transmission en ajustant la valeur DC appliquée. Observez le signal en sortie de photodiode et comparez sa fréquence à celle du signal AC appliqué. Effectuez une acquisition de ce signal. Comment expliquez-vous ce que vous observez ? Sachant qu'en musique, changer d'une octave correspond à une multiplication de la fréquence acoustique par un facteur 2x, comment serait perçu votre signal audio transmis par le modulateur, en comparaison avec le signal audio initial ?

Question 3.4. Transmission optique d'un signal audio monochromatique

Ramenez maintenant la polarisation du laser à 0 mA, puis connectez la sortie de la photodiode, via l'oscilloscope, à une enceinte. Ajustez la polarisation DC et l'amplitude AC appliqués au modulateur de sorte qu'il fonctionne dans un régime linéaire. Polarisez de nouveau le laser à 50 mA, vous devriez entendre le signal acoustique attendu. En ajustant le point de fonctionnement via la tension DC, vous devriez pouvoir entendre la même note à l'octave supérieure.

3.2 Transmission d'un signal audio

Manipulation

Vous savez désormais comment polariser votre modulateur pour transmettre un signal avec fidélité. Vous réaliserez par la suite le schéma expérimental présenté Fig. 3.

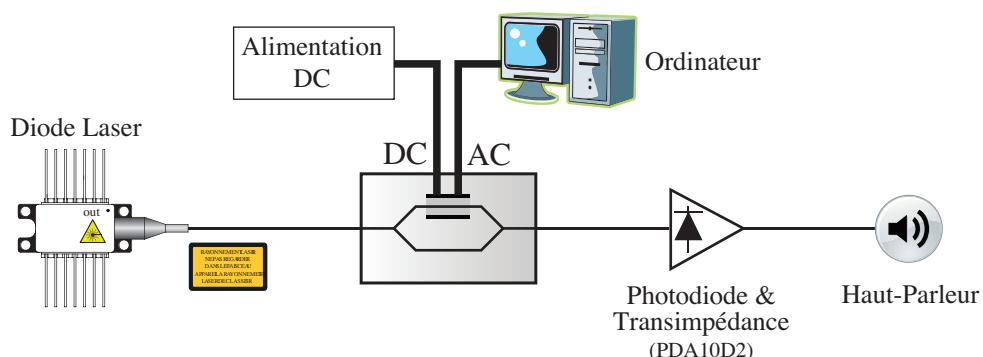


FIGURE 3 – Transmission par un signal optique d'un signal audio à l'aide d'un Mach-Zehnder.

Question 3.5. Signal audio

Vous utiliserez la sortie son de l'ordinateur afin de récupérer un signal acoustique sous forme électrique, en naviguant sur un site permettant d'écouter de la musique ([FIP radio](#) par exemple). Observez dans un premier temps ce signal sur l'oscilloscope afin de vous assurer que son amplitude crête-crête ne dépasse pas 10 V_{cc} (ajustez le volume si nécessaire) puis effectuez une acquisition, vous commenterez succinctement la forme de ce signal.

Question 3.6. Modulation d'amplitude optique par un signal audio

Baissez maintenant le son au minimum, injectez ce signal sur le modulateur afin de le transposer en optique, puis remontez le son à son précédent niveau. À l'aide d'une acquisition à l'oscilloscope, montrez que vous pouvez bien retrouver le signal acoustique en sortie de photodiode. À l'aide de l'enceinte, vous devriez entendre le signal audio, après transmission par voie optique.

Question 3.7. Fidélité du signal transmis

Décrire ce que vous entendez si vous augmentez le volume de sortie de l'ordinateur, ou si vous changez le point de fonctionnement DC du modulateur, et expliquez pourquoi la fidélité du signal est dégradé.

3.3 Caractérisation dynamique à très hautes fréquences

La fréquence de coupure du modulateur est de 20 GHz, il est ainsi possible de transmettre des signaux haut-débits à plusieurs Gbps. Nous allons ainsi utiliser ici un synthétiseur radiofréquences (RF) Vaunix émettant dans la bande 5–10 GHz afin de transmettre un signal monochromatique à haute-fréquences. La bande passante de la photodiode utilisée n'étant que de 25 MHz, nous ne pourrons pas l'utiliser pour observer le signal transmis, nous utiliserons l'analyseur de spectre optique en sortie de modulateur.

Manipulation

Dans un premier temps, vous allez réaliser le schéma expérimental présenté Fig. 4.

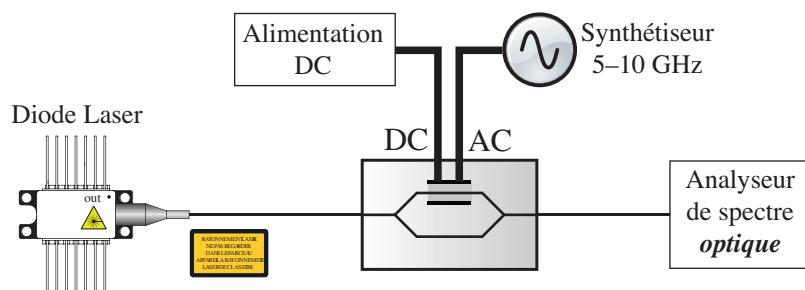


FIGURE 4 – Transmission par un signal optique d'un signal RF à l'aide d'un Mach-Zehnder.



Question 3.8. Intervalle spectral libre

Sans appliquer de modulation hyperfréquence pour l'instant, observez le spectre optique du laser en sortie du modulateur. En utilisant une extension spectrale (*span*) de 10 nm et une résolution adaptée, vous devriez observer les modes de résonance de la cavité laser. Effectuez une acquisition de ce spectre optique à l'aide de la fonction "eea" sous Matlab. Supposons un indice optique n de 3,5 dans le semi-conducteur, déduire la longueur L du laser à l'aide de l'expression de l'intervalle spectral libre (ISL), nous rappelons ici son expression : $ISL = c/(2nL)$.

Question 3.9. Transmission d'un signal RF à 10 GHz

Connectez le synthétiseur Vaunix sur l'entrée AC du modulateur. Ce synthétiseur se pilote directement du PC à l'aide du logiciel Vaunix Lab Brick (accessible dans le répertoire Hyperfrq sur le bureau). Vous choisissez dans un premier temps une fréquence de 10 GHz. Avant de mettre le synthétiseur en fonctionnement ("On"), vous choisissez une puissance de sortie de -10 dBm, puis une fois "On" vous monterez la puissance tous les dB jusqu'à la puissance souhaitée. Notez que la puissance maximale permise en sortie du synthétiseur est inférieure à celle supportée par le modulateur. Observez le spectre optique en sortie de modulateur à l'analyseur de spectre optique avec un span de 1 nm et une résolution adaptée. Vous effectuerez l'acquisition de ce spectre et commenterez sa forme compte-tenu des compétences en traitement du signal que vous avez acquises au premier semestre.

Question 3.10. Transmission d'un signal hyperfréquence à 5 GHz

Comment expliquez-vous ce que vous observez à l'analyseur de spectre optique pour une fréquence de 5 GHz ? Pour répondre à cette question, utilisez la valeur de la résolution de l'analyseur de spectre optique calculée lors de votre préparation.

3.4 Spectre électrique

Manipulation

Vous pouvez désormais éteindre le synthétiseur RF, et utiliser de nouveau le générateur de fonction tel que présenté Fig. 5. Pensez à régler son amplitude au minimum avant de le connecter au modulateur. Afin de s'assurer que le signal DC en sortie de photodiode ne soit pas trop important afin de ne pas endommager l'analyseur de spectre électrique utilisé ici pour la mesure, nous utiliserons désormais la photodiode non amplifiée FGA01. Connectez cette photodiode à l'analyseur de spectre électrique, puis la sortie du modulateur optique à cette photodiode.

Question 3.12. Battement optique

Vous appliquerez une modulation sinusoïdale à 5 MHz. Compte-tenu du spectre optique en sortie de modulateur, quel spectre électrique attendez-vous en sortie de photodiode ? Vous effectuerez une acquisition du spectre électrique observé.

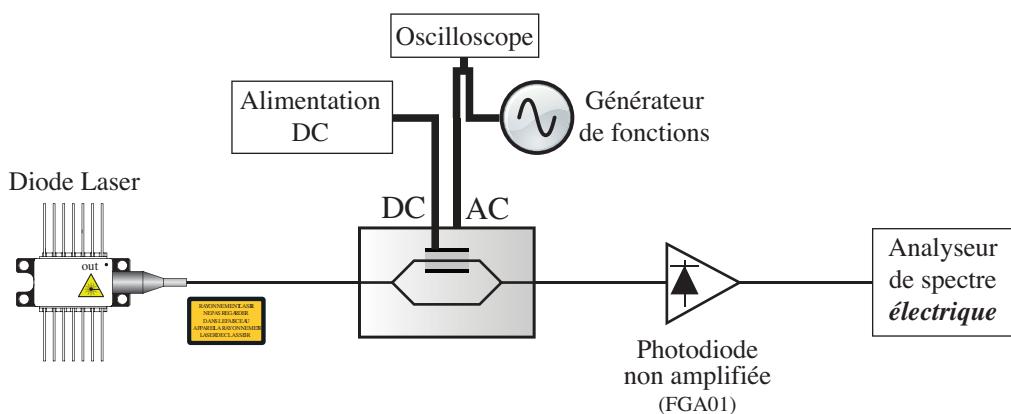


FIGURE 5 – Observation du signal transmis par le Mach-Zehnder à l'analyseur de spectre électrique.

Annexes : Fibres optiques

Entretien des fibres optiques

- Avant toute connection, vous devez nettoyer l'extrémité de la fibre optique avec un papier optique légèrement imbibé d'alcool, puis sécher les vapeurs d'alcool à l'aide d'un coup sec et puissant d'air sec. Vous devez toujours protéger un connecteur de la poussière, notamment à l'aide de bouchons.
- Prenez soin des fibres optiques, évitez toute courbure de rayon inférieur à quelques cm, évitez toute pression sur la fibre optique même gainée.
- Prenez soin des connecteurs optiques : maintenez le connecteur par les parties métalliques autant que possible (ne tirez surtout pas sur la fibre optique).

Différents types de connecteurs

Un cordon (ou "jarretière") de fibre optique est un morceau de fibre optique généralement assez court (< 10 m) placé dans une protection en kevlar entourée d'une gaine en plastique, et avec un connecteur à chaque bout :



Il existe de nombreux types de connecteurs pour les fibres optiques, les plus rencontrés sont représentés ci-dessous :

E-2000™



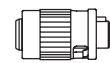
SC



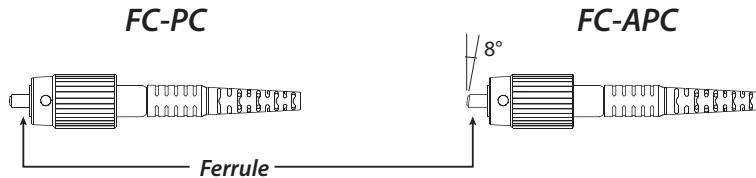
FC



ST™



Parmi ces connecteurs, il en est un qui est plus utilisé que les autres, c'est le connecteur de type FC. Il existe en deux variantes, FC-PC (pour "Physical Contact") et FC-APC (pour "Angled Physical Contact") :



La différence entre ces deux types de connecteurs est que dans la version "PC", la fibre est coupée exactement à 90° par rapport à l'axe de propagation de la lumière, alors que dans la version "APC" la fibre est coupée avec un angle de 8° par rapport à la normale.



Au niveau de la fibre, ceci a la conséquence suivante : à l'interface entre le bout de la fibre et l'air, la réflexion de Fresnel fait qu'une petite partie de la lumière repart d'où elle vient. Comme la différence d'indice entre le cœur et la gaine est faible, seuls les rayons d'angles faibles sont guidés par la fibre. Avec cet angle de 8° , l'angle d'incidence à la frontière cœur-gaine est plus grand et les rayons ont une plus grande chance de ne pas revenir d'où ils sont partis. Ainsi, le coefficient de réflexion apparent est plus faible pour un connecteur FC-APC que pour un connecteur FC-PC. Les connecteurs APC sont généralement faciles à reconnaître car ils sont moulés dans du plastique vert.

Attention : ne connectez jamais un connecteur FC-PC avec un connecteur FC-APC ! Les pertes sont énormes, vous abîmeriez la ferrule des 2 fibres, et créeriez de surcroît une cavité Fabry-Perot donc une transmission dépendant de la longueur d'onde.

Pilotage des instruments sous Matlab

L'utilisation de la fonction `eea` sous Matlab vous permet d'interagir avec différents appareils. Vous pouvez lancer cette fonction de la barre des raccourcis ou en tapant directement `eea` dans la fenêtre de commande Matlab. Vous pourrez ainsi piloter les instruments suivants :

- Oscilloscope Tektronix (acquisition des traces),
- Analyseur de spectre optique (acquisition des traces),
- Analyseur de spectre électrique (acquisition des traces),
- Moteur Phidget pour gyroscope à fibre optique (rotation du gyroscope),
- Alimentation stabilisée Tenma,
- Détection synchrone.

Nous rappelons que, une fois la trace sauvegardée dans un fichier `sauvegarde.dat`, il est possible de tracer la courbe sous Matlab tel qu'indiqué ci-après :

- Récupérer les données à l'aide de la fonction `M=importdata('sauvegarde.dat')` ; en s'assurant que le fichier est dans le répertoire de travail de Matlab.
- Récupérer la première et la deuxième colonne de la matrice : `x=M(:,1)` ; et `y=M(:,2)` ; .
- Tracer la courbe à l'aide de la fonction `plot(x,y)` sans oublier ensuite de nommer les axes et de préciser les unités à l'aide des fonctions `xlabel('Titre x, unité')` et `ylabel('Titre y, unité')`.

