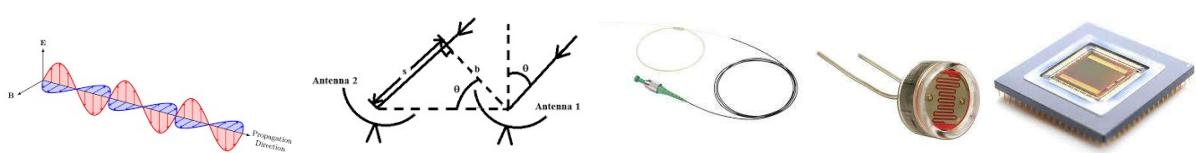


TAF OPE – UE A PCPO

Sensors' physics and wave propagation

Teaching staff : L. Dupont, B. Fracasso, K. Heggarty, C. Lahuec, V. Nourrit

Contact : Vincent.Nourrit@imt-atlantique.fr



The schedule for each group is given in the following table.

Students are in threes during the optics practical work: CCD, PTD, Interf, TP Fibre, and in pairs during the digital electronics (Elec Num) practical works.

	02-déc	03-déc	09-déc	09-déc	10-déc	10-déc	16-déc	16-déc
	14h-16h45	9h30-12h15	8h-10h45	14h-16h45	8h-10h45	14h00-16h30	8h-10h45	14h00-16h30
T1	CCD	Tr Perso	PTD	Elec Num	Interf	Elec Num	TP fibre	Elec Num
T2	CCD	Tr Perso	PTD	Elec Num	Interf	Elec Num	TP fibre	Elec Num
T3	PTD	Tr Perso	Interf	Elec Num	TP fibre	Elec Num	CCD	Elec Num
T4	PTD	Tr Perso	Interf	Elec Num	TP fibre	Elec Num	CCD	Elec Num
T5	Interf	Tr Perso	TP fibre	Elec Num	CCD	Elec Num	PTD	Elec Num
T6	Interf	Tr Perso	TP fibre	Elec Num	CCD	Elec Num	PTD	Elec Num
T7	TP fibre	Tr Perso	CCD	Elec Num	PTD	Elec Num	Interf	Elec Num
T8	TP fibre	Tr Perso	CCD	Elec Num	PTD	Elec Num	Interf	Elec Num
T9	Tr Perso	CCD	Elec Num	PTD	Elec Num	Interf	Elec Num	TP fibre
T10	Tr Perso	CCD	Elec Num	PTD	Elec Num	Interf	Elec Num	TP fibre
T11	Tr Perso	PTD	Elec Num	Interf	Elec Num	TP fibre	Elec Num	CCD
T12	Tr Perso	PTD	Elec Num	Interf	Elec Num	TP fibre	Elec Num	CCD
T13	Tr Perso	Interf	Elec Num	TP fibre	Elec Num	CCD	Elec Num	PTD
T14	Tr Perso	Interf	Elec Num	TP fibre	Elec Num	CCD	Elec Num	PTD
T15	Tr Perso	TP fibre	Elec Num	CCD	Elec Num	PTD	Elec Num	Interf
T16	Tr Perso	TP fibre	Elec Num	CCD	Elec Num	PTD	Elec Num	Interf

« CCD », « PTD » and « Interf » will take place in the "GOSC" laboratory - top of the stairs above amphitheatres 1 and 2 .

« TP fibre » will take place in the Optics department, room C3-130A.

- T1 COULOMB Théophile, DELCROIX Auriane, AMET Thomas.
- T2 TUELEAU Tom; FRANCO Mikael
- T3 VIMARE Samuel; KOOPMAN Raphaël; PÈRE Maxime
- T4 HUET Maxence; DEUKER Arthur; COURBET Alexis
- T5 DANIÉLOU Titouan; AULAIRE Mathis; BARRAQUÉ Alix
- T6 BONDUELLE Louis; BOUBERKANE Rayane; CAIL Mathéo
- T7 DJEMILA Lina; FELTIN Coline; FRESSE Melvin
- T8 GARCIA VALENCIA Daniela Rose; GONOT Pierre; HARTOUT Mayeul
- T9 HASHIM-FAROOQI Medjibe; HÉBRAUD Germain; HENRY Chloé
- T10 KERLAU Killian; LATERRADE Gabriel; LE DEVEDEC Maëlle
- T11 LEDUCQ Martin; LEFEVRE Joseph; LELUAN
- T12 MARIOTTE Luna; MARTIN DES PALLIÈRES Paul; MERLO-NIKPAY Soraya
- T13 MONCHAUX Judith; NOËL--SEYFFARTH Paul; PERBEN Anatole
- T14 PINSARD Achile; RAULET Anycia; ROUZIÈRES Léna
- T15 SOO Lianne; VIELLARD Jeanne; VUYLSTEKE Hugo
- T16 JABEUR Mola, JAROSZEK Tom

TP – Optical sensors (PTD)

INTRODUCTION :

Cette séance de travail doit vous permettre de choisir, mettre en œuvre et caractériser des capteurs optiques pour observer et mesurer des grandeurs photométriques et radiométriques.

La séance comporte deux parties (1h15 chacune) :

- Caractériser et appliquer un capteur à photorésistance. Choix des sources appropriées pour mettre en évidence les lois et principes d'optique. Utilisation d'un luxmètre comme référence de mesure.
- Caractériser et appliquer un capteur à photodiode. Choix des sources appropriées pour mettre en évidence les lois et principes d'optique. Utilisation d'un photomètre comme référence de mesure et d'un radio-goniomètre.

1. Références :

Bibliographie :

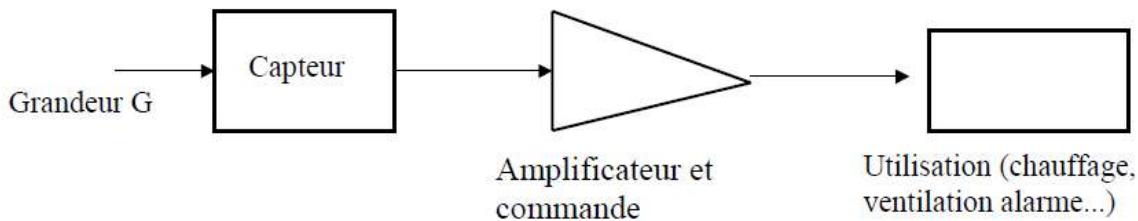
- [1]. Photométrie:
<https://leclairage.fr/th-photometrie/>
- [2]. Angle solide:
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optigeo/anglesolide.html>
- [3]. Optical Unit and Calculation (Nichia App Note) :
https://www.nichia.co.jp/specification/products/led/ApplicationNote_SE-AP00041-E.pdf
- [4]. Photométrie Institut d'optique :
<http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=1036&fileid=14408>
- [5]. Photométrie: ordres de grandeurs:
<http://www.edu.upmc.fr/physique/lp326/dossiers/phys-chap2.pdf>

Docs techniques composants :

- [A]. Photodiode A :
<https://www.vishay.com/docs/81643/temd5080.pdf>
- [B]. Photorésistance B : GL5539
voir Annexes
- [C]. DEL lambertienne :
<https://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampXPG.pdf>
- [D]. LED COB :
<https://www.amazon.fr/puissance-intégrée-Epistar-projecteur-jardin/dp/B07TQDR4CR>
- [E]. Photodiode grande surface :
<http://www.osiopptoelectronics.com/Libraries/Datasheets/Photoconductive-Photodiodes.sflb.ashx>

2. GENERALITES

Un capteur permet généralement de convertir une grandeur physique G (flux lumineux, température, ...) en une différence de potentiel électrique v . La détermination de la relation $v = f(G)$ est importante et fait l'objet de l'étude du capteur (il est souvent intéressant de savoir si elle est **linéaire ou non**). La tension délivrée par le capteur permet la commande d'un appareil d'utilisation en agissant sur un interrupteur commandé (relais, transistor en commutation...). La puissance délivrée par le capteur étant généralement faible, il est souvent nécessaire de l'amplifier. On comprend donc la structure de la chaîne électronique suivante :



Caractériser un capteur optique consiste à connaître (recherche de documentation) ou relever (mesure en situation):

- La réponse spectrale
 - Le courant d'obscurité
 - La sensibilité au flux lumineux
 - Le temps de réponse

Vous disposez de trois sources ayant des caractéristiques différentes :

- Une source (quasi) ponctuelle rayonnant dans un demi espace (proche de la loi de Lambert, modulable)
 - Une source Laser collimatée (ponctuelle et très faiblement divergente/convergente, à constater, modulable)
 - Une source étendue (constituée d'un tapis de 100 sources ponctuelles surmontées d'une couche photoluminescente quasi uniforme).

Le choix approprié de la source permet de vérifier facilement les lois d'optiques.

3. CAPTEURS OPTIQUES

a. Photorésistance

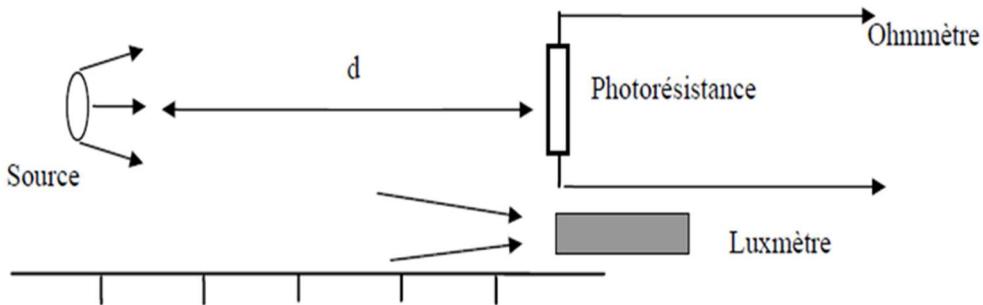
Étude du composant :

La résistance d'un semi-conducteur diminue lorsque celui-ci est éclairé. Le nombre des porteurs est augmenté proportionnellement au flux mais la complexité des phénomènes de conduction fait que la conductance Y n'est cependant pas proportionnelle au flux (elle croît moins vite que le flux $Y \approx \Phi^a$ avec $a < 1$)

Manipulation : Mesure de la résistance en fonction du flux et de la distance :

Approcher et éloigner une source lumineuse pour observer la variation de la caractéristique. Conclure...

On réalise le montage fig. 1 :



Le montage comprend une source, un luxmètre et une photorésistance placés à une distance d de la source.

Pour déterminer la relation entre la résistance R de la photorésistance et le flux lumineux ϕ , on utilise :

- Le luxmètre qui permet la mesure d'une grandeur proportionnelle à ϕ
- La photodiode installée à la même distance de la source que le luxmètre puis en l'éloignant (2, 3, 4, 10...)
- ⇒ Tracer $Y = 1/R$ en fonction du flux ϕ et en fonction de la distance d
- ⇒ Tracer $\log R = f(\log \phi)$ ou $f(\log(1/d))$ pour déterminer la relation entre R et ϕ (pente a).

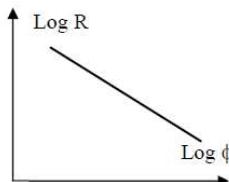


Figure 2

Application au détecteur de mouvement :

Le montage comporte deux photorésistances issues du même lot et deux résistances identiques câblées en pont de Wheatstone. Une source de tension polarise le pont et un voltmètre relève le déséquilibre de tension entre les branches. En théorie, si les deux photorésistances sont identiques et éclairées uniformément par un faisceau lumineux, le pont est à l'équilibre. Un déséquilibre traduit un déplacement relatif latéral du faisceau et du montage (mais aussi un déséquilibre entre les sensibilités des photo-résistances).

- Déplacez le faisceau ou le montage et évaluez la plage de fonctionnement et la sensibilité.
- Donnez des exemples de mise en œuvre, pour véhicules robotisés par exemple.

b. Photodiode

Étude du composant :

Les caractéristiques essentielles sont la surface du détecteur, sa sensibilité spectrale et sa plage dynamique de détection. On désire obtenir les diverses caractéristiques pour divers flux lumineux.

Vous disposez de trois sources ayant des caractéristiques différentes :

- Une source (quasi) ponctuelle rayonnant dans un demi espace (proche de la loi de Lambert)
- Une source Laser collimatée (ponctuelle et très faiblement divergente/convergente, à constater)
- Une source étendue (constituée de 100 sources ponctuelles surmontées d'une couche photo-luminescente quasi uniforme).

Le choix approprié de la source permet de vérifier facilement les lois d'optiques.

- Mesurer les flux comme pour la photorésistance à l'aide du photomètre en vérifiant la loi de conservation du flux ($\# S/d^2$, avec S la surface du détecteur et d sa distance avec la source).

- Mesurer I_ϕ (en mesurant la tension aux bornes de la résistance de conversion photo-courant > tension) et tracer $I_\phi = f(\phi)$.

Application à la Radio-goniométrie :

On dispose d'une source montée sur un mouvement circulaire et d'un détecteur de photo-courant à une distance assez grande. La mesure relative de la puissance du flux capté par rapport à la mesure dans l'axe (source et capteur alignés) fournit le diagramme de rayonnement spatial de la source. Vous choisirez la ou les sources qui se prêtent à cette caractérisation. Le demi-angle au sommet pour lequel le détecteur reçoit la moitié de puissance donne « l'ouverture » du faisceau.

Annexe 1:

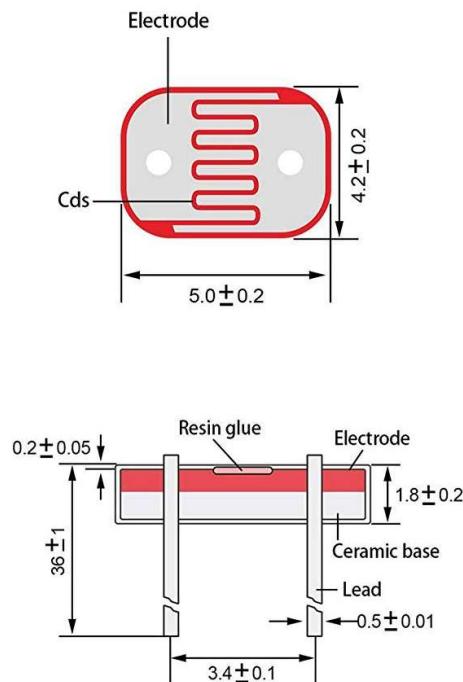
La photorésistance constituée de sulfure de cadmium : CdS présente une résistance variable avec l'éclairement reçu. Un serpentin de ces matériaux posé sur un support céramique présente une fenêtre permettant de recevoir un rayonnement. Autrement nommée : LDR (Light Dependant Resistor)

La résistance d'une plaque conductrice de surface A et de largeur L est : $R \sim \frac{L}{A}$

Dans une photorésistance, R dépend de l'éclairement reçu. Si la cellule est soumise à une d.d.p V, elle est traversée par un courant $I_p \sim \frac{A}{L}V$. Ainsi, pour avoir un courant I_p important, il faut avoir A grand et L petit. La forme en peigne permet d'accroître la surface tout en maintenant la largeur faible.

Caractéristiques :

Model	5539
Maximum voltage VDC	150
Maximum power consumption mw	100
Ambient temperature °C	-30°C- +70°C
Spectral peak nm	540
Bright resistance(10Lux) KΩ	50-100
Dark resistance MΩ	5
100 γ10	0.8
Performances and Features	Coated with epoxy Good reliability Small volume High sensitivity Quick response Good spectrum characteristic
Range of application	Camera auto metering Photoelectric control Indoor light control Alarm industrial control Light control switch Light control lights electronic toy



Modélisation:

La photorésistance est représentée par une résistance fixe R_0 en parallèle avec une résistance variable R_φ avec le flux énergétique φ . On établit $R_\varphi = b \varphi^a$, avec a dépendant en particulier du matériau, de la température et du spectre du rayonnement, ayant généralement des valeurs comprises entre 0,5 et 1 (0,8 pour cette LDR) et b un facteur d'homogénéité. Dans ces conditions, la résistance R de la photorésistance a pour expression : $R = \frac{R_\varphi R_0}{R_\varphi + R_0}$

TP INTERFEROMETRY

1. INTRODUCTION

Cette séance est dédiée à l'étude expérimentale du **modulateur de Mach-Zehnder (MZM)**. Quelques notions d'interférométrie, de biréfringence et de modulation seront illustrées pour comprendre le fonctionnement de ce dispositif.

Le modulateur de Mach-Zehnder est devenu un composant incontournable au vu de ses innombrables applications en télécommunications et en métrologie. Initialement conçu en 1891-1892 par Ludwig Zehnder [1] et Ludwig Mach [2], l'interféromètre éponyme permet de mesurer une **différence de phase** relative entre deux faisceaux optiques issus d'une même source de lumière. Cette différence de phase est provoquée par un changement des propriétés physiques du milieu dans lequel se propage l'onde optique (e.g. indice de réfraction). C'est ainsi que l'interféromètre de Mach-Zehnder est utilisé en métrologie, par exemple, pour effectuer des mesures de haute précision d'épaisseurs ou de profils, de changements de températures, d'indices de réfractions, ou de concentrations de composés chimiques [3]. Par ailleurs, en contrôlant précisément la différence de phase grâce à des techniques adaptées, il est possible de **moduler** l'amplitude et/ou la phase d'un signal lumineux incident pour transmettre un message, d'où la dénomination de modulateur Mach-Zehnder. Les progrès technologiques ont permis une **intégration** compacte de ce dispositif avec la réalisation de guides et de jonctions optiques évitant les problèmes traditionnels d'alignement des composants discrets.

Lors de cette séance, vous utiliserez successivement deux variantes de réalisation du modulateur Mach-Zehnder (MZM). Une variante consiste en la mise en œuvre d'un MZM en **espace libre** avec des composants optiques discrets. L'autre correspond à une version **intégrée** sous forme d'un composant compact et « fibré ». Dans ces deux cas, le MZM comprend une structure **interférométrique** à deux bras (ou chemins) avec la possibilité de créer un déphasage ou retard optique sur l'un des deux bras.

2. MODULATEUR EN ESPACE LIBRE

Le principe du modulateur de Mach-Zehnder que vous utiliserez en espace libre est illustré à la Figure 1. Le montage expérimental comprend une source laser (He-Ne) émettant à une longueur d'onde de 633 nm. Le faisceau issu de la source laser est séparé en deux faisceaux secondaires suivant deux chemins optiques en espace libre, au moyen d'une première lame séparatrice (S_1). Ces deux faisceaux secondaires sont ensuite

¹ Ludwig Zehnder, "Ein neuer Interferenzrefraktor", in *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. Nr. 11, 1891, s. 275–285 <https://archive.org/stream/zeitschriftfrin11gergoog#page/n289/mode/2up>

² Ludwig Mach, "Über einen Interferenzrefraktor", in *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. Nr. 12, 1892, s. 89–93 <https://archive.org/stream/zeitschriftfrin14gergoog#page/n105/mode/2up>

³ R. Reddy Bommareddi, "Applications of Optical Interferometer Techniques for Precision Measurements of Changes in Temperature, Growth and Refractive Index of Materials Technologies", May 5, 2014, 2, 54–75; ISSN 2227-7080, doi:10.3390/technologies2020054

recombinés au moyen de deux miroirs (M_1 , M_2) avant de traverser une deuxième lame séparatrice (S_2). Une **cellule à cristal liquide** pilotée par une tension électrique permet de créer un déphasage sur l'un des bras pour réaliser la fonction de modulation.

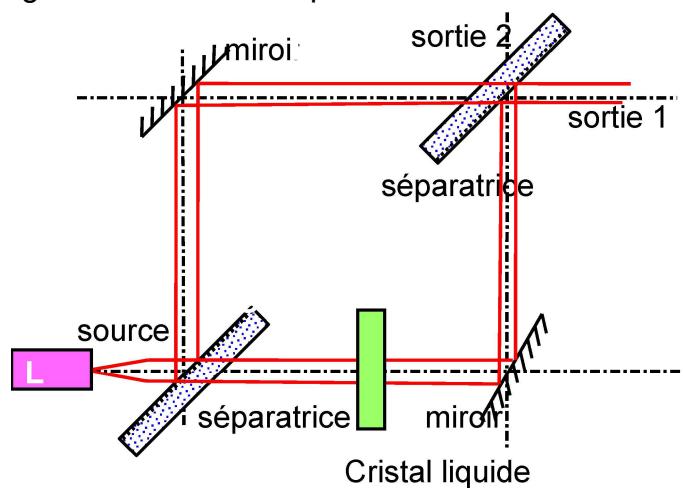


Figure 1. Montage expérimental du modulateur Mach-Zehnder en espace libre



Figure 2. Banc expérimental

Liste du matériel mis à votre disposition :

- une source laser (He-Ne) à 633 nm (L) et son alimentation électrique (A)
- un polariseur de lumière (P)
- deux lames séparatrices (S_1 , S_2)
- deux miroirs (M_1 , M_2)
- une cellule à cristal liquide (CL)
- un photo-détecteur (D) et son alimentation électrique
- une lentille (L)
- un écran en carton (E) et son support
- un instrument multifonction (« Analog Discovery ») qui agit comme oscilloscope et générateur de fonctions
- un bloc de calcite (C)

Instructions :

- Le laser, les miroirs et les lames séparatrices sont montées sur des supports fixés au banc expérimental. **Merci de ne pas démonter ces supports.**
- Pour votre sécurité, vous veillerez à éteindre la source laser lors de vos manipulations sur le banc optique pour éviter toute déviation par réflexion non contrôlée du faisceau laser.

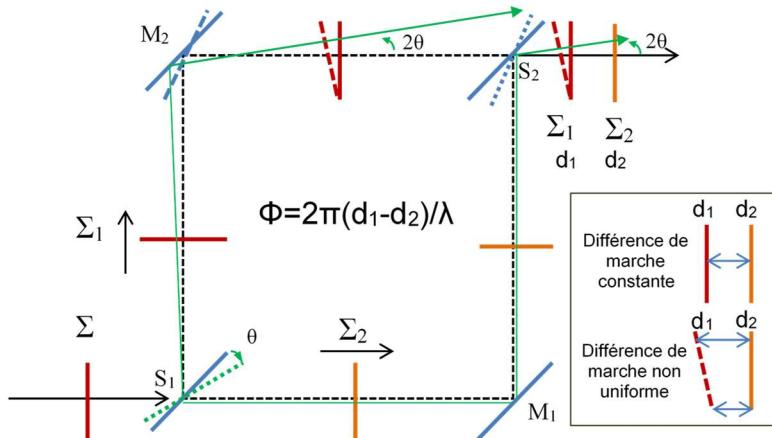
2.1 ALIGNEMENT ET INTERFERENCES

A la sortie de la deuxième lame séparatrice (S_2), les faisceaux issus des deux bras doivent être **parallèles** entre eux et avec une **différence de marche uniforme** sur toute la surface du faisceau. Dans ce cas, on dira que l'interféromètre est « aligné ». Dans le cadre d'un alignement parfait, une intensité uniforme dite « teinte plate » est observée.

- a) Régler l'interféromètre suivant les conseils de l'encadrant.
- b) Question : Comment expliquer la présence de deux tâches parasites ?



- c) Décrivez le **motif interférentiel** observé à l'écran. Vous utiliserez une lentille de courte focale en sortie de l'interféromètre pour visualiser plus facilement ce motif à l'écran. Votre réglage est-il stable ? Quels sont les facteurs d'instabilité de l'alignement de l'interféromètre ?
- d) Pourquoi observe-t-on un motif interférentiel si les faisceaux en sortie ne sont pas parfaitement parallèles ? Conseil: Vous exprimerez l'éclairement optique en sortie de l'interféromètre $I(\theta)$ en fonction de l'angle θ formé par les plans d'ondes de deux faisceaux non parallèles.



- e) A quel angle (θ) entre les deux faisceaux correspond un pas (p) interférentiel de 0,1mm ? Pour ce calcul, on utilisera la formule suivante :

$$p = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

où λ désigne la longueur d'onde de la lumière et θ l'angle formé entre les deux faisceaux.

2.2 AJOUT D'UNE DIFFERENCE DE MARCHE



Figure 3. Cellule à cristal liquide

Vous allez générer une différence de marche sur l'un des deux bras de l'interféromètre en utilisant la **cellule à cristal liquide** (CL) placée entre la lame S_1 et le miroir M_2 comme illustré à la Figure 1 et alimentée par un générateur de fonction.

La cellule permet de générer une différence de marche Δ ou déphasage optique $\varphi=2\pi.\Delta/\lambda$ en appliquant une tension électrique aux bornes des électrodes de la cellule, ce qui a pour effet de modifier la valeur de l'indice de réfraction vu par le faisceau.

Préparation : quelques rappels utiles

- Nature des cristaux liquides

Le cristal liquide utilisé est de type **nématique** dit en « π » ou parallèle, le terme « nématique » faisant référence à un état de la matière intermédiaire entre les phases solide cristalline et liquide. Ce type de cristal liquide est caractérisé en ce que ses molécules de forme allongée tendent à rester parallèles entre elles, selon une orientation définissant à π près l'axe optique du matériau.

Le cristal liquide nématique est un matériau **biréfringent** dont l'axe optique est défini comme étant parallèle à l'orientation des molécules de cristal liquide. On rappelle que **l'axe optique** d'un matériau biréfringent ne désigne pas la direction de propagation de la lumière à travers ce matériau (à ne pas confondre avec l'axe d'un instrument d'optique). Un matériau biréfringent est **anisotrope** : l'indice de réfraction dépend, non seulement de la direction de propagation mais également de la polarisation de la lumière. Ainsi, un faisceau de lumière non polarisée (tel qu'issu de la source laser) est décomposé en deux composantes de polarisation orthogonale qui se propagent à des vitesses différentes, et peuvent même suivre des trajets différents (Figure 4).

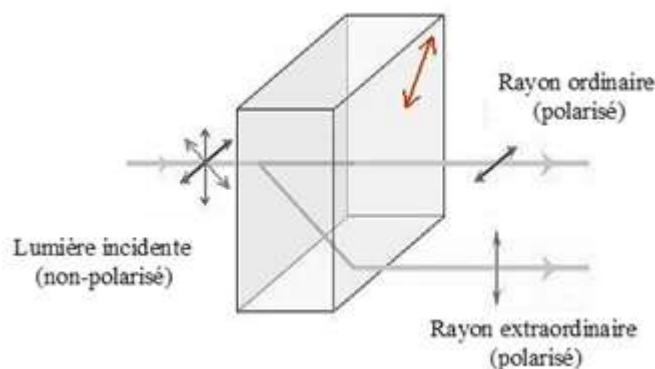


Figure 4. Illustration de la propagation optique à travers un matériau biréfringent

Ainsi, lorsque la lumière traverse un matériau biréfringent, l'indice de réfraction du matériau dépend de l'angle entre la direction de polarisation de la lumière et l'axe optique du matériau :

- **Cas 1** : si la direction de polarisation et l'axe optique sont parallèles, alors l'indice est dit « *extraordinaire* » : n_e
 - **Cas 2** : si la direction de polarisation et l'axe optique sont perpendiculaires, alors l'indice est dit « *ordinaire* » : n_o
 - dans les cas intermédiaires, l'indice varie continument entre n_e et n_o lorsque l'angle entre l'axe optique et la direction de la polarisation de la lumière augmente de 0 à 90°.
- a) *Illustration rapide de la propagation de la lumière à travers un matériau anisotrope (calcite CaCO_3 , $n_e=1.658$, $n_0=1.486$, $\Delta n=-0.172$). En sortie du laser, vous placerez un bloc de calcite. Qu'observez-vous en sortie du bloc de calcite ? Quel est l'effet du polariseur placé entre le laser et le bloc de calcite ?*
- Structure de la cellule

Les molécules de cristal liquide sont contenues entre deux plaques de verre recouvertes chacune d'une électrode transparente. Ces électrodes destinées à appliquer une tension électrique V_0 permettent d'appliquer un champ électrique perpendiculaire à la cellule. Les parois internes de la cellule sont recouvertes d'une fine couche de polyimide dans laquelle sont réalisées des micro-rayures pour imposer l'orientation des molécules à proximité des parois de la cellule.

Au repos, c'est-à-dire lorsqu'aucune tension électrique n'est appliquée aux bornes de la cellule à cristal liquide, toutes les molécules sont parallèles entre elles et à la direction des micro-rayures du polyimide. La lumière traverse la cellule.

- b) *Dessinez sur la Figure 5, les directions de polarisation de la lumière qui correspondent respectivement à l'indice n_e et à l'indice n_o lorsque la cellule est au repos (i.e. aucune tension électrique appliquée).*

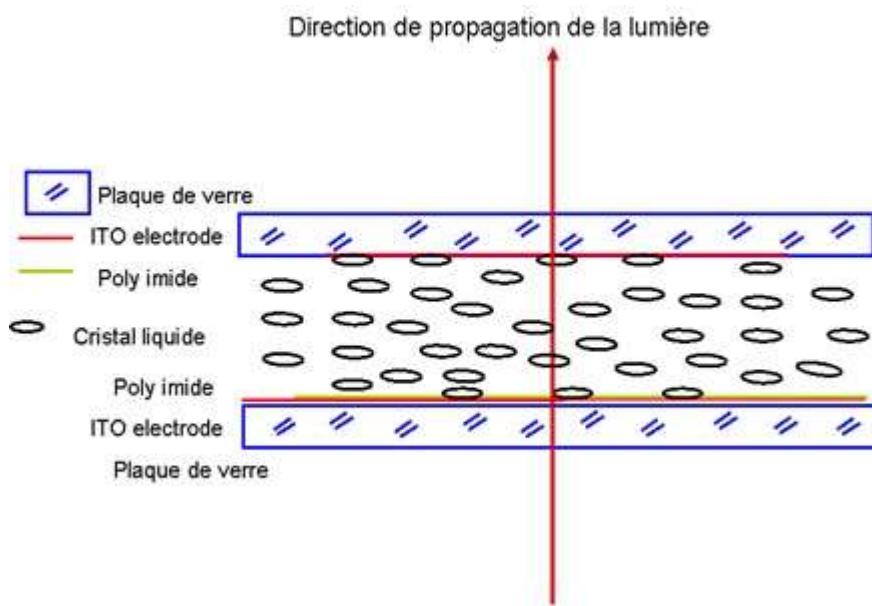
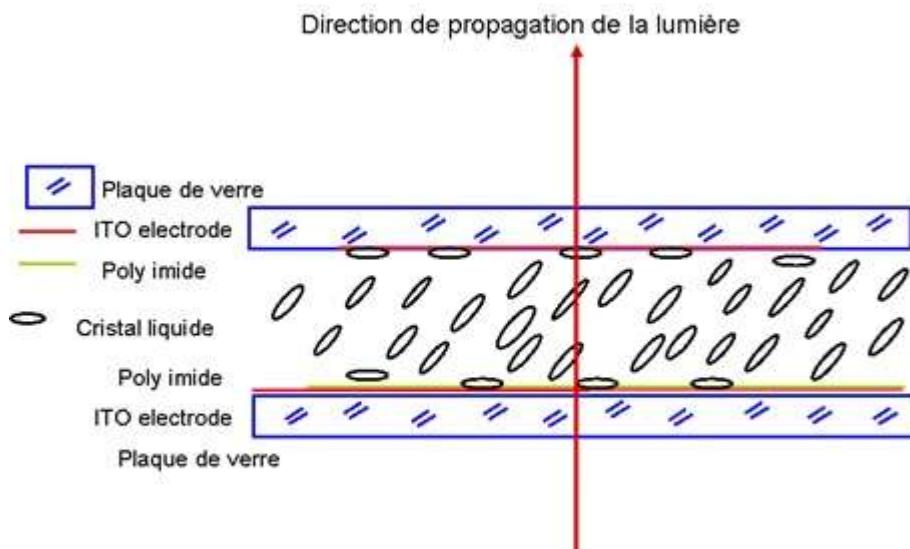


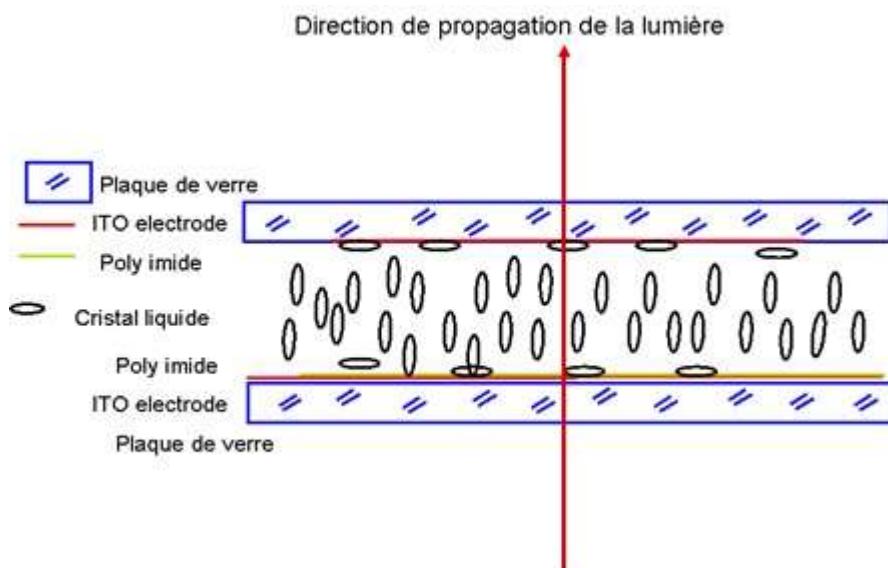
Figure 5. Structure schématique d'une cellule à cristal liquide nématique au repos

Sous l'effet d'une tension appliquée entre ces deux électrodes, les molécules tendent à s'aligner suivant la direction du champ électrique. Les molécules vont donc pivoter par rapport à leur position initiale pour laquelle aucun champ n'était appliqué. Plus le champ électrique est élevé, plus les molécules pivotent.

- a) Sur les schémas de Figure 6, tracez l'axe optique du matériau et indiquez l'indice de réfraction pour chacune des polarisations.



(a) Orientation des molécules sous l'application d'un champ E1



(b) Orientation des molécules sous l'application d'un champ E2

Figure 6. Cellule à cristal liquide nématique sous l'influence d'un champ électrique

c) Quelle doit être la polarisation incidente pour que la phase de l'onde varie quand on applique une tension au cristal liquide ?

- Parallèle aux molécules au repos (extraordinaire)
- Perpendiculaire aux molécules au repos (ordinaire)
- A 45° de l'axe des molécules au repos

(Considérez l'orientation des molécules sans tension appliquée)

L'épaisseur de cristal liquide est de 8 µm et la biréfringence vaut $n_e - n_o = 0,17$.

d) Dans ce cas, quel déphasage et quelle différence de marche maximum peut-on réaliser si la longueur d'onde de la lumière utilisée est $\lambda = 633 \text{ nm}$?

2.3 EFFET DE LA MODULATION

Vous allez visualiser l'effet d'une différence de marche sur les motifs d'interférence en utilisant la cellule à cristal liquide. Pour changer la valeur de l'indice de réfraction de la cellule, l'orientation des molécules doit être modifiée en appliquant une tension électrique qui doit être **alternative** afin de ne pas endommager la cellule. Vous appliquerez donc une tension de **forme carrée** aux bornes de la cellule au moyen du générateur de fonction ($f=500 \text{ Hz}$). L'orientation des molécules définie à π près ne dépend que de la valeur efficace de cette tension.

Attention :

- N'utilisez aucune tension d'*offset* car l'application d'une tension continue fait subir une électrolyse au cristal liquide qui finit par se détériorer.
- La tension maximale à ne pas dépasser est de +/- 10V avec une fréquence comprise entre 100 et 1000 Hz.

- Pour ouvrir une session sur l'ordinateur : TP/eluopt
- Lancer le logiciel Waveform et charger le profil qui se trouve sur le bureau.

Vous allez exploiter la fonction « modulation » du générateur de fonction pour faire varier **automatiquement** et continument la valeur de la tension jusqu'à U_{\max} . Pour cela, vous modulerez en amplitude (« AM (int) ») la tension carrée par un signal de rampe en activant le mode balayage (« sweep on »).

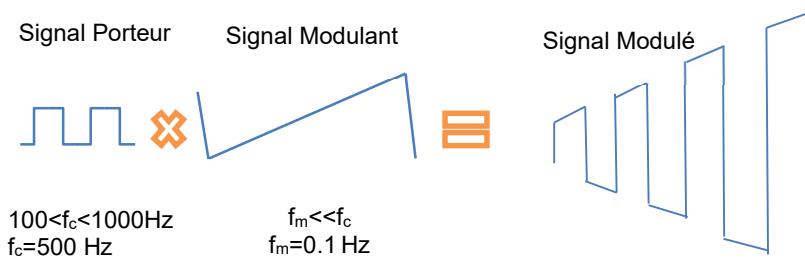


Figure 7. Principe de génération du signal modulé

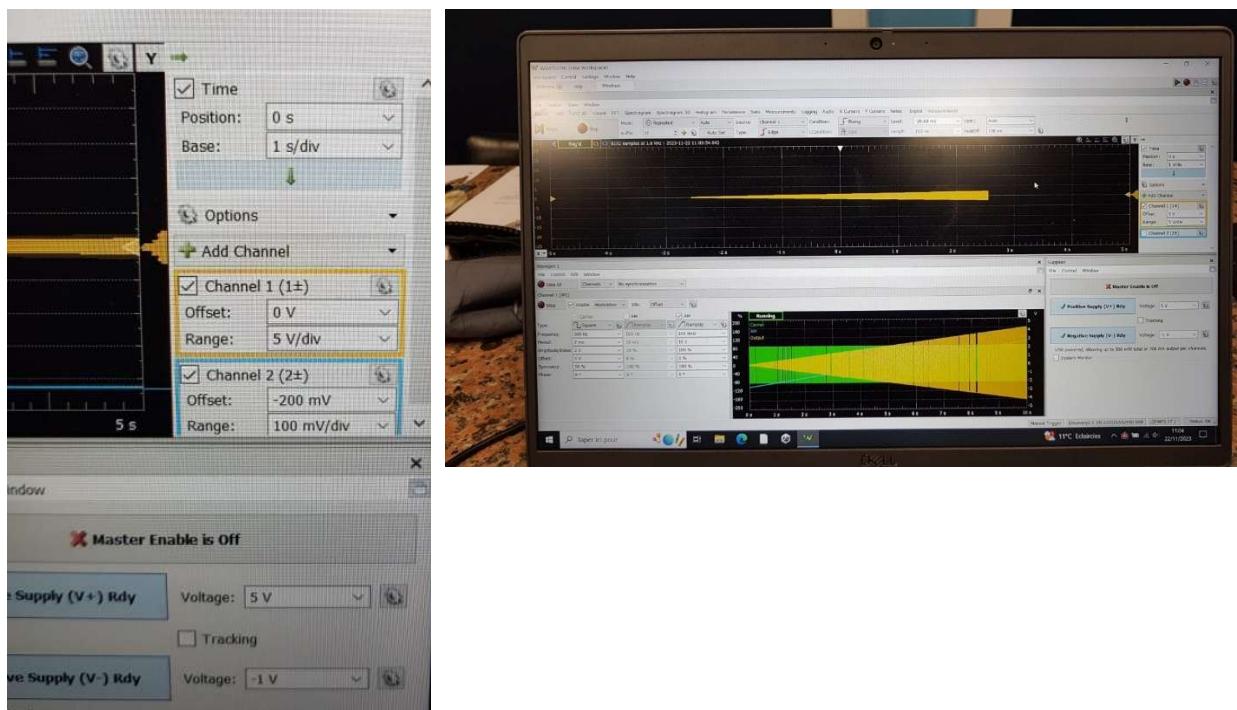


Figure 8. A gauche : réglage de l'AD. A droite : dans la fenêtre du bas : signal porteur (en vert) et signal modulant (jaune) ; dans la fenêtre du haut : signal modulé.

- a) Quel est l'effet de la différence de marche sur les motifs d'interférence ? Faites l'observation simultanément sur l'écran et à l'oscilloscope.

Afin de réaliser une **modulation d'amplitude** du flux lumineux en sortie du modulateur Mach-Zehnder, la condition d'alignement parfait doit être réalisée en supprimant les franges d'interférence ($\theta=0$), lorsque la cellule est à l'état de repos (i.e. aucune tension appliquée). Pour atteindre cette condition, vous agirez finement sur l'orientation des lames séparatrice à l'aide des vis micrométriques prévues à cet effet.

- b) En appliquant le signal carré modulé par une rampe de tension, qu'observez-vous à l'écran en sortie du modulateur Mach-Zehnder ?

Visualisez simultanément avec l'Analog Discovery la tension en sortie du photo-détecteur sur la **voie 1** et la tension appliquée aux bornes sur la cellule sur la **voie 2**.

- c) Quelles sont les tensions qui donnent des maxima de lumière et des minima de lumière pour chacune des deux sorties du modulateur Mach-Zehnder ? A l'aide des marqueurs de l'oscilloscope, vous réaliserez plusieurs fois la mesure que vous reporterez dans le tableau ci-dessous.

Sortie 1		Sortie 2	
Minima	Maxima	Minima	Maxima

Le signal en sortie du photo-détecteur (trace bleue Fig.9) varie de manière sinusoïdale en présentant des minima et maxima de réception comme indiqué ci-dessous.

- d) Si on observe un maximum sur l'une des sorties, qu'obtient-on pour l'autre sortie ? Est-il nécessaire de faire la mesure sur les deux sorties ?
- e) Que peut-on faire pour améliorer la stabilité du système ?

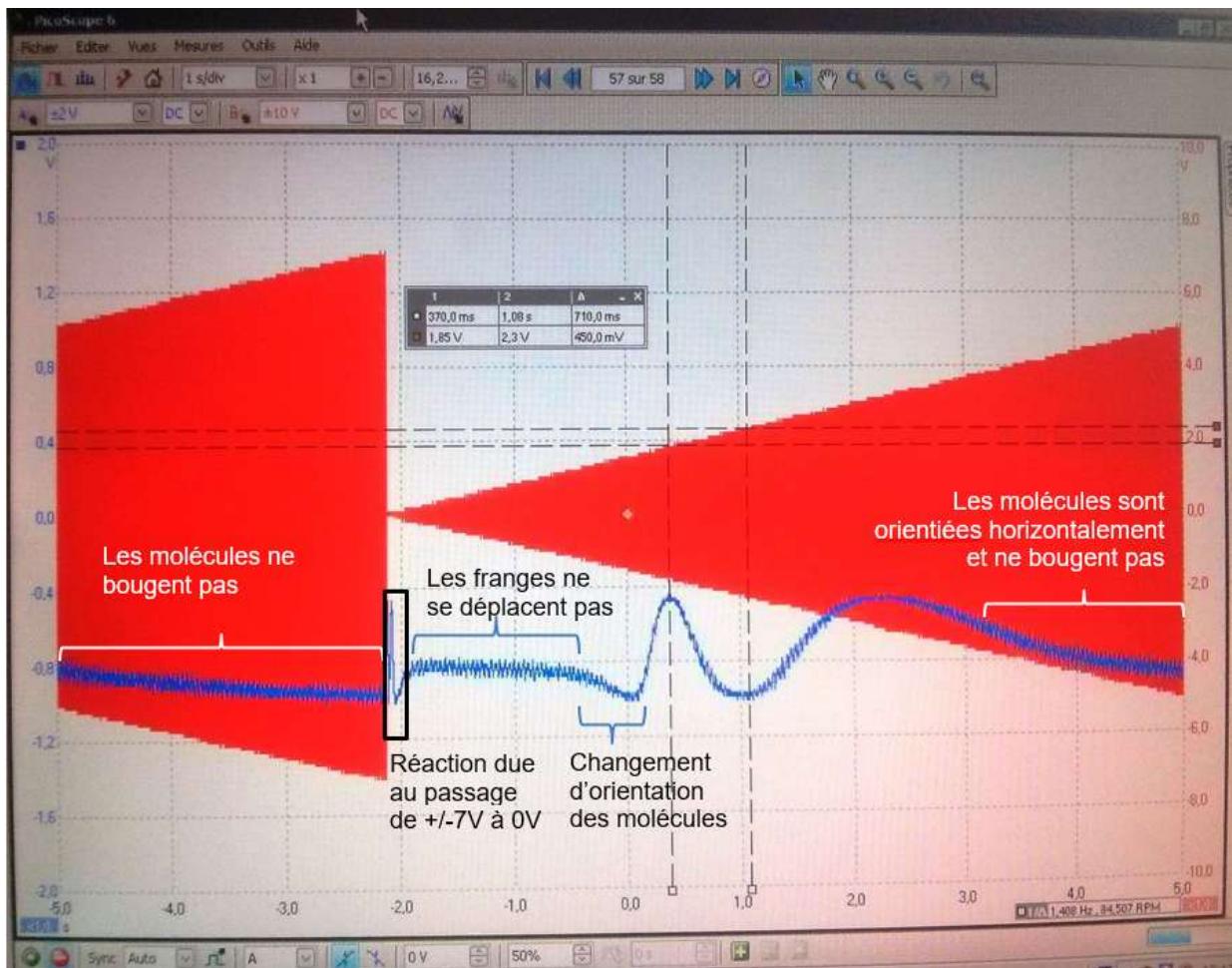


Figure 9.

3. MODULATEUR INTEGRÉ

3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le modulateur Mach-Zehnder intégré comprend deux guides ou bras optiques reliés au moyen de deux coupleurs en Y comme illustré sur la Figure . Ces deux coupleurs jouent le même rôle que les deux lames séparatrices utilisées dans le précédent montage en espace libre. L'un des deux bras du modulateur est équipé de deux électrodes aux bornes desquelles une tension électrique V_0 est appliquée pour modifier l'indice de réfraction du guide selon l'effet Pockels. Cette variation d'indice (Δn) évolue linéairement en fonction de la tension (V_0) ou champ appliqué E_{app} selon la relation suivante : $\Delta n = n_0^3 r_{33} \cdot E_{app} = n_0^3 r_{33} \cdot V_0/d$ (où d désigne la distance de séparation des électrodes). Les modulateurs Mach-Zehnder sont généralement fabriqués en Niobate de Lithium ($LiNbO_3$) car il s'agit d'un matériau anisotrope présentant des forts coefficients électro-optiques (r_{33}).

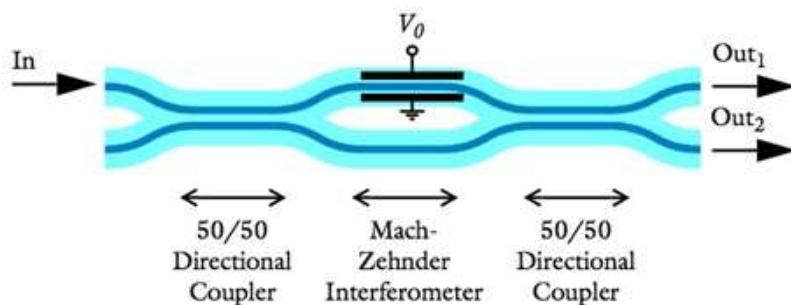


Figure 10. Structure schématique d'un modulateur Mach-Zehnder fibré



Figure 11. Modulateur Mach-Zehnder intégré

3.2 MONTAGE EXPERIMENTAL

Liste du matériel mis à votre disposition :

- ordinateur portable : ouvrir une session sur l'ordinateur : TP/eluopt2
 - lancer le logiciel Waveform et charger le profil qui se trouve sur le bureau
- un boîtier multifonction « Analog Discovery » qui servira d'oscilloscope numérique et de générateur de fonction.
- une source laser fibrée dont la longueur d'onde d'émission est 1,3 µm (Laser Philips CQF, $\lambda=1304.2$ nm, T=20.10°C)
- un modulateur Mach-Zehnder fibré (réf. SCC Opto-Electronics Lab, Intensity Modulator T.MZ1. 3-5 2-53-20-842),
- un photo-détecteur (D),
- boucles de Lefèvre [4] (communément appelée oreilles de Mickey),
- un bloc de calcite (C).

⁴ C.H. Lefèvre, « Fiber Optic Polarization Controller », US4389090

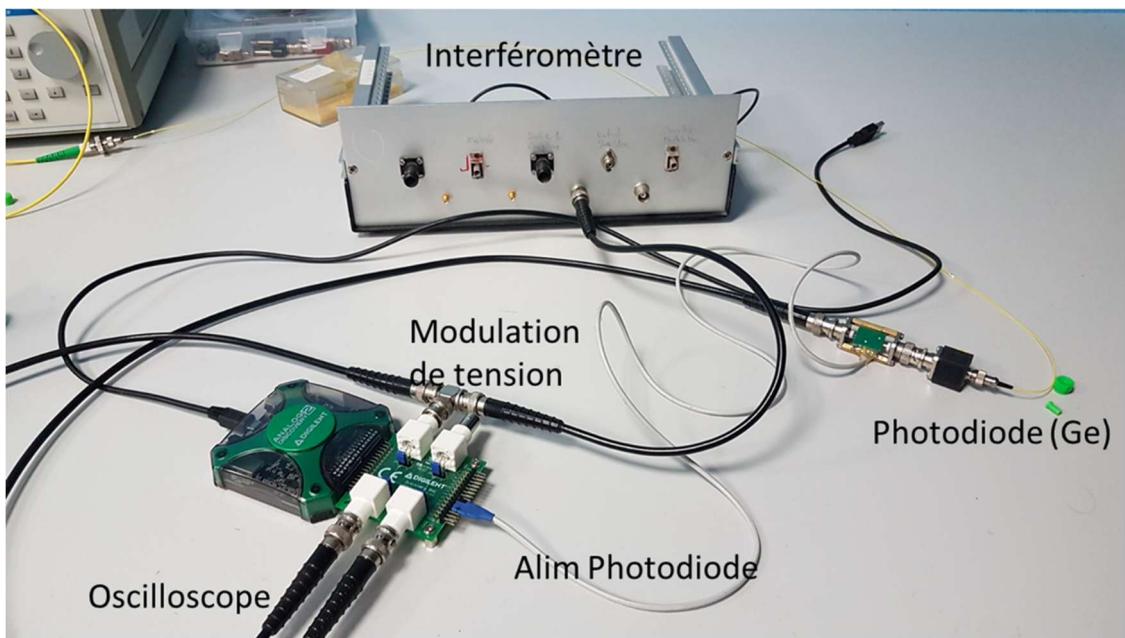
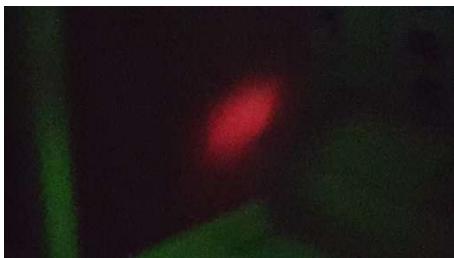


Figure 8. Montage expérimental

3.3 ETAT DE POLARISATION DE LA LUMIERE

La lumière issue de la source optique est polarisée. Dès que l'on courbe une fibre optique, elle devient biréfringente et pourra alors modifier l'état de polarisation de la lumière qu'on lui injecte. Pour observer ces effets, réaliser le montage présenté figure 11.

- Vérifiez à l'aide d'un bloc de calcite que la lumière est polarisée. ($P=2\text{mW}$, vous devez observer 2 spots sur la carte IR qui « tournent » si vous tournez le bloc de calcite)



- La polarisation est-elle modifiée, en tournant les boucles ? En déplaçant les fibres posées sur la table ?



Figure 9. Montage utilisé pour injecter la lumière issue du modulateur sur le photo-détecteur

3.4 FONCTIONNEMENT STATIQUE

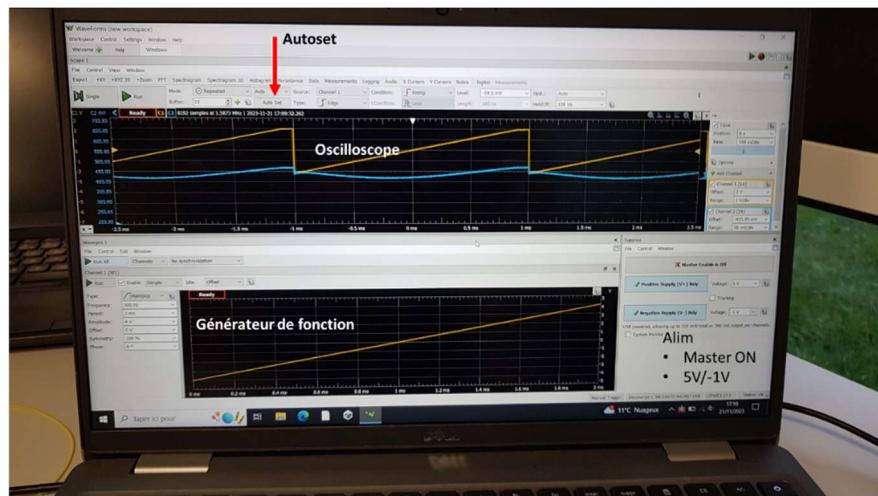
- Pour ouvrir une session sur l'ordinateur : TP/eluopt
- Lancer le logiciel Waveform et charger le profil qui se trouve sur le bureau.

Pour caractériser le comportement statique du MZM, on étudie l'effet d'une tension de polarisation sur l'intensité lumineuse en sortie du MZM après avoir branché le modulateur entre la source laser et le collimateur selon le schéma de la Figure 8. Plutôt que de faire varier manuellement cette tension, on applique une rampe de tension (par exemple entre -6 et +6V) sur le guide du MZM en utilisant le générateur de fonction. Bien que le MZM soit conçu pour répondre jusqu'à 20 GHz, vous travaillez à basse fréquence (e.g. f=500 Hz) pour ne pas excéder la bande passante du photo-détecteur.

Attention

- La tension appliquée au MZM ne doit pas dépasser 10V afin d'éviter toute détérioration du composant.

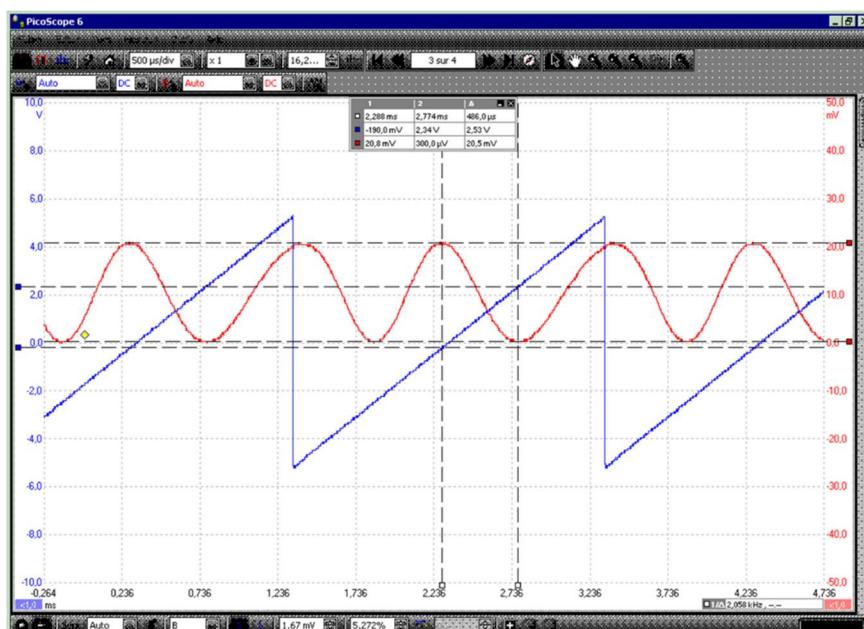
Visualiserez simultanément le signal appliqué au modulateur et le flux lumineux en sortie du photo-détecteur au moyen de l'oscilloscope branché à l'ordinateur.



- b) Comment varie le flux lumineux en sortie en fonction de la tension appliquée ?
- c) Doit-t-on contrôler la polarisation de la lumière incidente ? oui non
- d) Trouvez une position des boucles qui laissent passer un minimum de lumière puis une position qui laisse passer un maximum de lumière.
- e) Mesurez les tensions (V) qui laissent passer la lumière et celles qui la coupent.

V	Max ou Min ?

- f) La différence de tension entre un minimum et le plus proche maximum est appelée « tension π » ou $V\pi$. Pourquoi ? Quelle est la valeur de $V\pi$?



3.5 FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE ET MODULATION

Vous allez maintenant moduler l'amplitude de la porteuse optique issue de la source laser en fonction d'un signal alternatif binaire (0,1,0,1, etc), de manière à transmettre un maximum de lumière en présence d'un bit « 1 » et aucune lumière en présence d'un bit « 0 ». Cette modulation « On-Off Keying » (OOK) est à la base des communications optiques numériques. MZM en niobate de lithium commercialement disponibles peuvent moduler en amplitude à des débits supérieurs à 40 Gbits/s.

- g) A partir des valeurs de tension de polarisation déterminées à l'étape j), générez un signal optique en forme de créneau, de manière à transmettre un « 0 » en l'absence de lumière et un « 1 » avec un maximum de lumière.
- h) Inversez la phase du créneau en appliquant un signal d'offset correspondant à l'ajout d'une phase de π .
- i) Fournissez un signal sinusoïdal.
- j) *Dans chacun des cas, quelle est la forme du signal électrique que vous avez dû appliquer ?*
- k) *Comment devrait varier la tension V_{π} en fonction de la longueur d'onde ?*

TP – Electronic light capture array device (CMOS/CCD camera)

1 INTRODUCTION

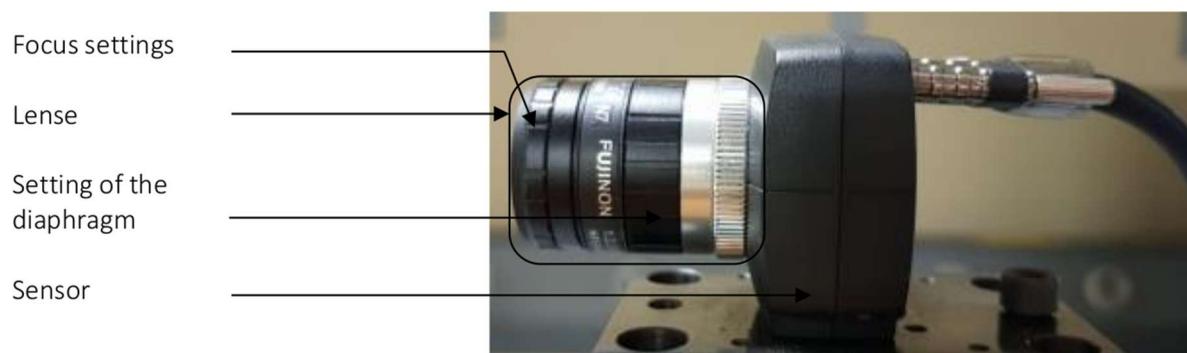
The aim of this practical class is to understand and gain practical experience in the operation of an electronic array light capture device (here based on CMOS technology) and how to use such devices as machine vision system. Aspects to be studied include

- exposure time
- framerate
- gain
- Region Of Interest (ROI)
- binning
- image contrast
- sensor pixel size, digital resolution, optical resolution,
- aperture, field of view, depth of field ...

REPORT

As you advance in the practical class, save the results (mainly captured images) to the PC hard disk (create a specific folder for your group to save your work) so that you can compile your report which will be evaluated at the end of the module.

2 USING THE CAMERA AND CONTROL SOFTWARE



Start the USB camera (launch the uEyeDemo software on the computer) and then click on the arrow button in the top right of the interface to start the camera, a live camera image should appear on the PC screen. You may need to adjust the lens focus and diaphragm (f#) to obtain a correctly focused and exposed image.

- By searching through the software tabs and menus, learn how to:
 - Capture an image
 - Choose the size (magnification) of the **displayed** image. “i:j” means j displayed pixels for i captured pixels

1. Save an image to the hard disk in the desired format (.png is the best option as it uses lossless compression, .bmp is uncompressed so gives large files, .jpg uses lossy compression)
 - Evaluate and optimise the captured image contrast and resolution by observing the captured images with the GIMP imaging software (right click on the image saved in your folder, then click on “open with another application” and choose GIMP)
 - In GIMP : use zoom (or Ctrl + scroll wheel). Place the cursor on an area can be easily assessed. Use “pointeur” in the “Fenêtres” tab, then “fenêtres ancrables”, in order to measure the contrast between a light grey area and a black area.
- b) Using the Parameters menu (spanner symbol) of the interface, experiment with the camera exposure time, gain and framerate, in particular capturing images with fixed (manual) camera gain and different exposure times.
- Explain the differences you observe in the captured images for each parameter you vary.
 - Explain any link you notice between exposure time and framerate
- c) In the Parameters menu, define and use ROI of different sizes and positions in the field of view. Note, quantify and explain the relationships between ROI and framerate
- d) Vary scene illumination and/or lens aperture (#f) so that higher gain settings are required. What happens to image contrast and noise as the level of gain increases.
- e) Experiment with “binning” ... the grouping together of pixels on the capture device. What is the effect of “binning” on framerate, image resolution, noise level ?
- f) Identify fundamental limitations on:
- Framerate
 - Image contrast
 - Noise level
 - Image resolution

3 SENSOR QUALITY

Using the same lens and aperture (f#) settings and for the same object at the same distance, compare the two different available sensors in terms of:

- resolution,
- framerate,
- sensitivity.

Explain and illustrate your observations.

4 CHOICE OF CAMERA LENS: MAGNIFICATION / FOV

A) By observing the test pattern from different working distances verify and quantify the system magnification and field of view (FOV) and determine the mathematical relation between the FOV, the lens focal length and sensor size. At this stage, the simple lensmakers formula $1/u + 1/v = 1/f$ (where f is the lens focal length, u is the object to lens distance and v the lens to image (sensor) distance) is sufficiently accurate.

B) Estimate the resolution of the camera (in the object plane, in the detector plane). Note the “resolution” can be expressed in different ways:

- Digital resolution : the number and size of pixels on the capture device ... and in the image plane
- Optical resolution : the capacity of the optical system (lens) to “resolve” (transmit visibly with sufficient contrast) object resolution into the image plane (on the capture device)

C) Propose a technique to evaluate optical resolution quantitatively

5 APERTURE AND F#

With a given lens and a given working distance, focus on the test chart and vary the lens aperture ($f\#$) observing (and quantifying when possible):

- the effect on image luminosity – (initially fix the camera gain and exposure time, then investigate exposure time adjustments required to maintain captures image luminosity)
- the effect on depth of field
- effect on optical resolution (estimate resolution by observation of small features in the test chart and if possible quantification of their contrast)

TP – Fibre-optical thermometer

(characterization of an optical Bragg grating filter)

1. INTRODUCTION

Ce travail expérimental va nous permettre de caractériser un filtre optique à réseau de Bragg sous deux aspects. Vous ferez une des deux séances suivantes :

- **TP fibre 1** (2h30) : caractérisation expérimentale – capteur de température
- **TP fibre 2** (2h30) : simulation logicielle d'un réseau de Bragg (logiciel VPI)

Dans la suite, on considérera principalement des réseaux de Bragg intégrés dans une fibre optique, dénotés FBG.

SOMMAIRE

▪ Séance 1 : caractérisation expérimentale d'un FBG	page 24
▪ Séance 2 : simulation logicielle d'un FBG	page 37
▪ Annexe 1 : éléments de théorie des réseaux de Bragg	page 29
▪ Annexe 2 : documentation technique sur un filtre de Bragg commercial	page 35

Glossaire :

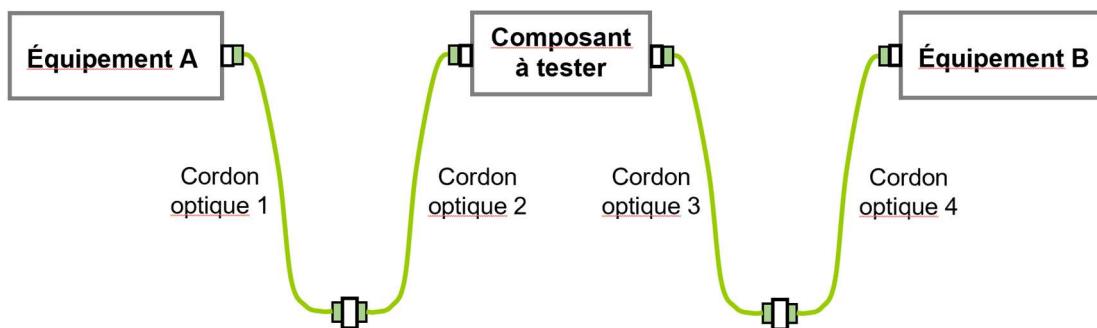
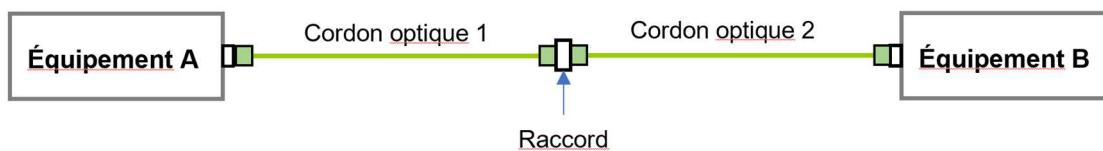
- FBG : Fiber Bragg Grating
- OSA : Optical Spectrum Analyser
- WDM : Wavelength Division Multiplexing

Séance 1 (2h30) : caractérisation expérimentale d'un FBG

I) A LIRE : Précautions de travail avec les fibres monomodes

D'une façon générale un cordon optique est connecté sur l'appareil de mesure (attention au type de connecteur PC ou APC, qui ne sont pas compatibles). Il est préférable de ne pas déconnecter ce cordon, ceci permet de ne pas détériorer le connecteur à l'intérieur de l'équipement.

Les cordons nécessaires suivant les types de connecteurs côté équipements et côté composants sont ensuite insérés. On raccorde deux cordons optiques entre eux au moyen d'un raccord métallique. Les deux principaux types de branchements rencontrés sont illustrés sur la figure ci-dessous.



Important : chaque connexion optique apporte en moyenne des pertes en puissance de 0,2 dB

!!! ATTENTION !!! Consignes de sécurité !!!

- Désactiver la sortie des sources (Tunics, source blanche, laser fixe ou accordable, laser de pompe...) avant de déconnecter une fibre : les intensités émises peuvent représenter un danger pour l'œil si on regarde directement à la sortie d'une fibre.
- N'activer la sortie d'une source que lorsque tous les connecteurs du circuit sont fermés.
- Ne pas déconnecter la fibre directement à la sortie d'une source mais à l'autre bout du cordon jarretière (pour protéger le connecteur de la source).
- Nettoyer les connecteurs avant chaque connexion.
- Ne jamais laisser un connecteur ouvert à l'air libre longtemps : mettre un bouchon de protection.

II) Caractéristiques théoriques d'un réseau de Bragg

On considère un réseau de Bragg inscrit dans le cœur d'une fibre optique monomode, d'axe z comme schématisé sur la figure 1. Dans cette configuration, la direction de propagation de la lumière est perpendiculaire aux couches du réseau, de telle sorte que $\theta_i = \theta_d = 0$. La variation de l'indice de réfraction du cœur de la fibre optique selon z est donnée par la relation :

$$n(z) = n_m + n_1 \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (1)$$

avec Λ la longueur d'onde spatiale du réseau (i.e. son « pas »), n_m l'indice moyen du réseau et n_1 l'amplitude de la variation d'indice du réseau. Cette configuration a déjà été rencontrée en TD dans l'UE PCPO.

Outre les trois variables introduites dans la relation (1), les paramètres du réseau influant sur ses caractéristiques de filtrage optique sont sa **longueur totale L** et son **coefficients de couplage κ** , défini dans l'annexe 1. Cette annexe présente les équations de filtrage d'un réseau de Bragg (fonction de transfert), obtenues à partir de la théorie des ondes couplées. Vous devrez donc la parcourir en début de séance, pour identifier les relations entre les paramètres du réseau et ses caractéristiques de filtrage optique.

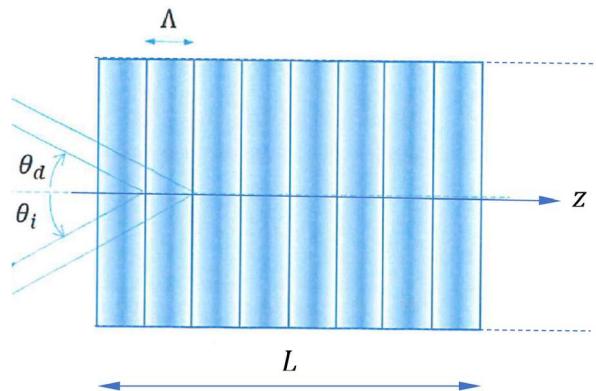


Figure 1 : schéma d'un réseau de Bragg

- ▶ **Question 1.** En lisant l'annexe 1, calculer le pas d'un réseau correspondant à un filtre centré sur $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, sachant que l'indice (moyen) à cette longueur d'onde de la silice constituant le cœur de la fibre est de 1,45.
- ▶ **Question 2.** Calculer la **réflectivité** des réseaux décrits dans le tableau 1 (à $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$).
- ▶ **Question 3.** Déterminer la **bande-passante** des filtres à partir de l'approximation utilisée pour les filtres ayant une faible réflectivité (allure "quasi-triangulaire" du lobe principal, annexe 1).
- ▶ **Question 4.** Commentaires sur les influences relatives de L et κ ?

Caractéristiques réseaux de Bragg				Caractéristique filtres	
Longueur L (mm)	Amplitude modulation d'indice : n_1	Coefficient de couplage $\kappa = \pi n_1 / \lambda$ (cm^{-1})	Produit κL	Réflectivité maximale $R_{\max} = \text{th}^2(\kappa L)$	B.P. approx. (nm)
5	$2,47 \cdot 10^{-5}$	0,5	0,25		
10	$2,47 \cdot 10^{-5}$	0,5	0,5		
5	$4,94 \cdot 10^{-5}$	1	0,5		
10	$4,94 \cdot 10^{-5}$	1	1		

Tableau 1 : principales caractéristiques liées au filtrage d'un réseau de Bragg

III) Réseau de Bragg fibré (FBG, Fiber Bragg Grating)

Conformément au schéma de la figure 2, le FBG va constituer un filtre à deux entrées. La bande optique extraite est disponible d'un côté de la fibre (en réflexion), alors que le spectre transmis par un réseau de l'autre côté comportera un « trou ». Le composant physique (figure 3) comporte des connecteurs pour le relier à la source lumineuse et aux détecteurs.

Pour mesurer les caractéristiques de filtrage du FBG, on pourra utiliser une source dite « blanche », c'est-à-dire émettant toutes les longueurs d'onde avec une puissance uniforme dans un intervalle $\Delta\lambda$, de l'ordre de 40 nm autour de la longueur d'onde 1550 nm. Autrement dit, sa densité spectrale de puissance moyenne (d.s.p.) est constante sur toute la bande de mesure.

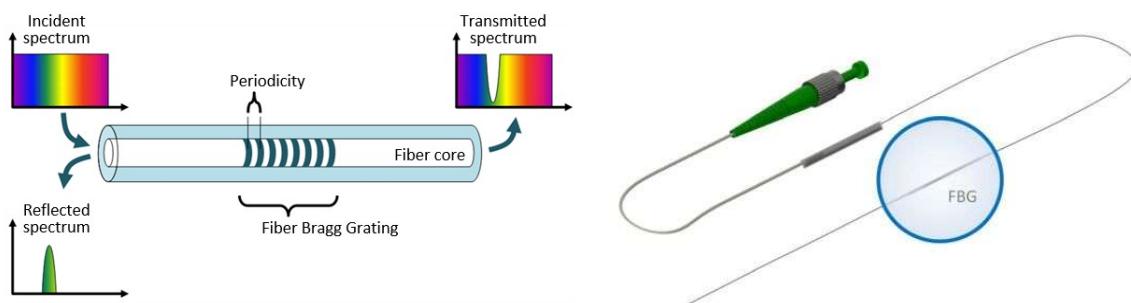


Figure 2 : filtrage en longueur d'onde d'un réseau de Bragg

Figure 3 : réseau de Bragg fibré avec son connecteur (FC/APC)

Un composant très utile pour la mesure de la fonction de transfert du FBG est le circulateur optique. Il s'agit d'un composant à trois ports de telle manière à ce que chaque faisceau entrant ressorte par le port suivant (figure 4). Avec le coupleur et l'isolateur, il s'agit d'un des dispositifs fibrés les plus utilisés dans le domaine des télécommunications optiques (figure 5). Ce composant est l'équivalent optique des circulateurs électriques ou radiofréquences que l'on retrouve dans tous les smartphones.

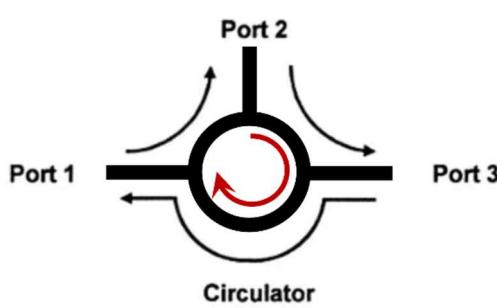


Figure 4 : schéma d'un circulateur optique

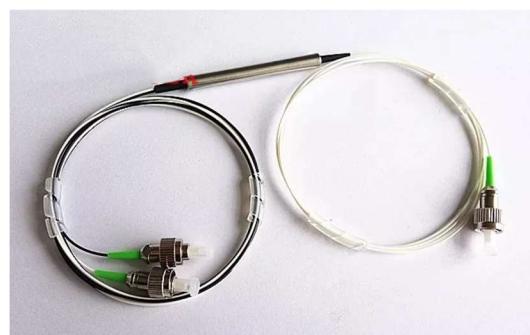


Figure 5 : circulateur optique fibré et connecté

► **Question 5.** En vous aidant d'un schéma, expliquer comment **mesurer la fonction de transfert en longueur d'onde d'un FBG⁵**, à l'aide d'un montage utilisant les éléments suivants :

- Une source blanche (dans la bande de longueur d'ondes 1530-1560 nm)
- Un circulateur optique à trois ports (repérés 1, 2 et 3).
- Un analyseur de spectre optique (OSA, Optical Spectrum Analyser) à entrée « fibrée »

Ce schéma servira de base au montage permettant d'effectuer les mesures demandées par la suite.

⁵ ou de tout autre composant de filtrage optique fonctionnant en réflexion

IV) Premier montage de caractérisation d'un FBG (à $T_0 = 20^\circ\text{C}$)

a) Caractérisation d'une source « blanche » dans la bande « telecom » (1550nm)

La source blanche est de marque JDS et porte la référence BBS1550.

L'analyseur de spectre optique est de marque ANRITSU et porte la référence MS9710B. Sa résolution spectrale maximale est de 0,07 nm.

► **Question 6.** Branchez la source blanche sur l'OSA et mesurez son spectre, dont vous prendrez une photographie (à l'aide de votre smartphone) et l'intégrerez dans votre rapport.

En utilisant des marqueurs horizontaux et verticaux, estimer la largeur de la bande (en nm) et l'uniformité de la densité spectrale de puissance.

b) Caractérisation du circulateur optique

Avant de les utiliser, vous devez repérer les ports des circulateurs optiques (1,2,3). Pour ce faire, vous allez utiliser la source blanche et un puissance-mètre optique.

► **Question 7.** Régler la puissance en sortie de l'atténuateur optique placé après la source blanche à 0 dBm (ATTENTION : vous ne débrancherez JAMAIS l'atténuateur de la source)

Brancher ensuite le circulateur optique à la source et placer le puissance-mètre sur un autre port du circulateur, puis mesurer la puissance optique (en dBm).

Répéter l'opération pour **identifier les ports du circulateur**, conformément à la figure 4. Faire un schéma de repérage des ports.

Mesurer et noter les **pertes d'insertion** (en dB) entre les différents ports du circulateur.

c) Mesure de la courbe de filtrage du FBG en réflexion, à température ambiante.

► **Question 8.** Mesurer la courbe de filtrage du réseau de Bragg en **réflexion**. Vous prendrez une photographie (à l'aide de votre smartphone) et l'intégrerez dans votre rapport. Veillez à bien choisir une échelle horizontale et verticale permettant d'afficher au mieux le spectre mesuré. A l'aide de marqueurs horizontaux et verticaux, estimez :

- La longueur d'onde centrale λ_B de la bande filtrée
- La largeur de bande filtrée $\delta\lambda$ (à -3dB)
- La longueur physique du FBG inscrit dans la fibre, sachant que l'indice de la silice à 1550 nm est d'environ 1,45.
- Les **pertes d'insertion** en puissance (en dB) lors de la réflexion sur le FBG. On intégrera les pertes du circulateur et on notera qu'un connecteur optique introduit des pertes de 0,2 dB.

d) Mesure de la courbe de filtrage du FBG en transmission

N.B. La question 9 est optionnelle : si vous êtes pressés par le temps, passez directement à la question 10.

► **Question 9 (optionnelle).** Mesurer la courbe de filtrage du réseau de Bragg en **transmission**.

Vous prendrez une photographie (à l'aide de votre smartphone) et l'intégrerez dans votre rapport. Veillez à bien choisir une échelle horizontale et verticale permettant d'afficher au mieux le spectre mesuré. A l'aide de marqueurs horizontaux et verticaux, estimez :

- La longueur d'onde centrale λ_B de la bande filtrée
- La largeur spectrale de bande filtrée $\delta\lambda$ (à -3dB)
- Les **pertes d'insertion** (en dB) à la traversée du FBG.

V) Mesure de la réponse spectrale d'un FBG en fonction de la température

On dispose d'un FBG inséré dans un système de contrôle de sa température (système Peltier). La longueur centrale du filtre est proche de 1550 nm et la graduation 3,5 du boîtier correspond à une température d'environ 20°C au niveau du FBG.

► **Question 10.** Il est nécessaire de calibrer la température imposée au FBG en fonction du courant injecté dans la régulation. Pour ce faire, varier la graduation entre 0,5 et 8,5, par palier de 1, et enregistrer la température obtenue à chaque itération. Lorsqu'on modifie le courant de commande de la régulation, une trentaine de secondes sont nécessaires pour stabiliser la température, qui est actualisée par l'afficheur du thermomètre toutes les 15 secondes.

En utilisant un logiciel de votre choix (programme Python, Tableur...), tracer la courbe expérimentale de calibration, donnant la température mesurée en fonction de la graduation affichée.

► **Question 11.** Connectez le FBG au système de mesure de la réponse spectrale. Vous ferez varier la température T entre 10 et 40°C, par palier de 5°C, et mesurerez à chaque fois :

- 1) La longueur d'onde centrale λ_B de la bande filtrée (longueur d'onde de Bragg) en réflexion
- 2) La largeur spectrale $\delta\lambda$ à -3 dB de la bande filtrée en réflexion
- 3) Le coefficient de réflexion maximal R_{max} , selon une définition précise que vous indiquerez

► **Question 12.** A l'aide des données mesurées et enregistrées à la question précédente, tracer les courbes suivantes, pour $15^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}$:

- $\lambda_B = \lambda_B(T)$
- $\delta\lambda = \delta\lambda(T)$
- $R_{max} = R_{max}(T)$

► **Question 13.** En pratique, on écrira la variation de la longueur d'onde de Bragg sous la forme $\Delta\lambda_B(T) = \xi\lambda_B\Delta T$, où ξ est un coefficient intégrant la variation d'indice et la dilatation du matériau en fonction de température.

- Quelle est l'unité de ξ ?
- Déterminer ξ d'après les mesures précédentes

Annexe 1 : théorie des filtres à réseau de Bragg

A-I. Introduction :

Le principe des filtres à réseau de phase épais repose sur la théorie des ondes couplées dans une structure périodique. Une telle structure est aussi appelée hologramme de volume ou simplement réseau épais (par opposition au réseau mince utilisé pour la diffraction). On montre, à partir des équations de Maxwell, qu'une variation périodique de l'indice du matériau dans la direction de propagation entraîne la réflexion partielle ou totale de cette onde. Si de plus la structure est guidante, les choses sont plus complexes puisqu'il faut étudier le couplage de modes et non plus d'ondes planes. Néanmoins, pour certaines structures simples, monomodes et utilisant un matériau non biréfringent, la première théorie est satisfaisante en première approximation. Dans tous les cas, la perturbation est supposée suffisamment faible pour que les ondes se propagent sans affecter la nature des modes ou des ondes et en particulier leurs vecteurs d'onde. Dans le cas d'un guide d'ondes, les modes de propagation de la structure non perturbée sont ainsi conservés et la perturbation agit seulement sur les amplitudes des ondes (matériau massif) ou des modes (guide d'ondes).

On a coutume de séparer deux cas de figure, suivant que le vecteur d'onde est proche ou éloigné du vecteur d'onde du réseau (figure 1). Pour un guide bidimensionnel (fibre optique, guide rectangulaire, guide carré), seule la configuration (b) présente un intérêt à condition cependant que le vecteur d'onde soit normal ou quasi normal au franges du réseau.

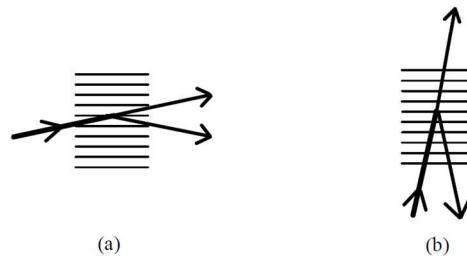


Figure 1 : Réseaux épais en transmission (a) et en réflexion (b).

Les réseaux en réflexion (b) ont des réponses spectrales plus sélectives que celles des réseaux en transmission (a). Les réflecteurs sont des miroirs distribués où chaque variation d'indice au niveau du pas du réseau contribue à la réflexion globale. Pour un réseau donné, la réflexion est maximale lorsque toutes les réflexions élémentaires sont en phase ou encore lorsque l'on se trouve dans les conditions dites de Bragg.

Dans les guides, la perturbation périodique peut être réalisée par gravure sur la surface. Ces réseaux sont surtout utilisés dans les diodes lasers DFB (*Distributed Feed-Back*) qui sont aujourd'hui les lasers les plus répandus pour les télécommunications à hauts débits et longues distances car ils présentent des caractéristiques spectrales remarquables avec une largeur de raie de quelques MHz. Les diodes lasers DBR (*Distributed Bragg Reflector*) sont accordables de façon discontinue pour les dispositifs à deux sections. L'adjonction d'une section de phase les rend continûment accordables sur plus de 15 nm pour les

meilleurs composants. Les principales différences de structure entre les lasers DFB et les lasers DBR sont présentées sur la figure 2.

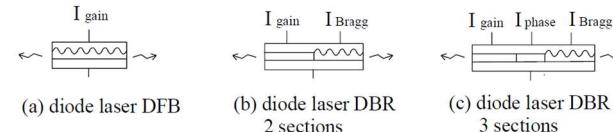


Figure 2 : Diodes laser DFB et DBR

A-II. Théorie des ondes couplées :

A-II.1. Incidence de Bragg :

Soit une onde plane progressant dans un milieu à variations d'indice périodiques de pas Λ , le vecteur d'onde de cette onde formant un angle θ avec le vecteur d'onde du réseau d'indice. Si des réflexions élémentaires se font, elles voyagent symétriquement par rapport à ce même vecteur d'onde (figure 3). Les différentes ondelettes ne se retrouvent en phase que si le trajet $2 \Lambda \cos \theta$ est égal à un nombre entier m de longueurs d'onde dans le matériau ($\frac{\lambda}{n}$). Un signal est donc réfléchi si sa longueur d'onde est telle que :

$$\lambda = \frac{2 n \Lambda \cos \theta}{m} \quad (1)$$

Cette relation est appelée condition de Bragg. On supposera par la suite que cette condition est remplie ou presque remplie et avec $m = 1$.

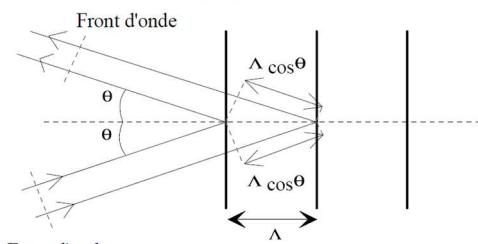


Figure 3 : Représentation géométrique de la condition de Bragg.

A-II.2. Représentation des vecteurs d'ondes :

L'approche ci-dessus permettait d'annoncer certaines relations entre la longueur d'onde des faisceaux lumineux et le pas du réseau mais cela est insuffisant pour quantifier les échanges d'énergie entre les ondes couplées. Une approche électromagnétique va nous permettre de le faire. Mais auparavant revenons sur les relations entre vecteurs d'onde dans le milieu périodique qui nous intéressent. Rappelons que le vecteur d'onde d'une onde plane monochromatique s'écrit $\vec{k} = \frac{2 \pi n}{\lambda} \vec{u}_p$ où λ est la longueur d'onde dans le vide, n

l'indice du milieu et \vec{u}_p le vecteur unitaire dans la direction de propagation. De la même façon, on peut définir le vecteur d'onde \vec{K} d'un réseau par $\vec{K} = \frac{2\pi}{\Lambda} \vec{u}_r$ où \vec{u}_r est le vecteur unitaire orienté perpendiculairement aux plans d'indice.

Dans l'hypothèse d'un accord de phase entre une onde lumineuse et un réseau d'indice (cas (a) de la figure 4), les interférences produites par les ondes représentées par leurs vecteurs d'onde \vec{p} (onde incidente) et $\vec{p} - \vec{K}$ (onde réfléchie) sont telles que le pas de ces interférences est identique à celui du réseau. On peut alors écrire $\Lambda = \frac{\lambda}{2 n \cos \theta}$ et on retrouve la relation de Bragg (1). Ceci permet de relier les vecteurs d'onde par la relation $\rho_z = \frac{K}{2} = \rho \cos \theta$ où ρ_z est la projection de \vec{p} sur l'axe Oz portant le vecteur \vec{K} .

La représentation géométrique des vecteurs d'ondes permet de visualiser le cas d'une légère désynchronisation entre ondes et réseau par rapport à l'accord de Bragg en ajoutant le vecteur δ (figure 4b).

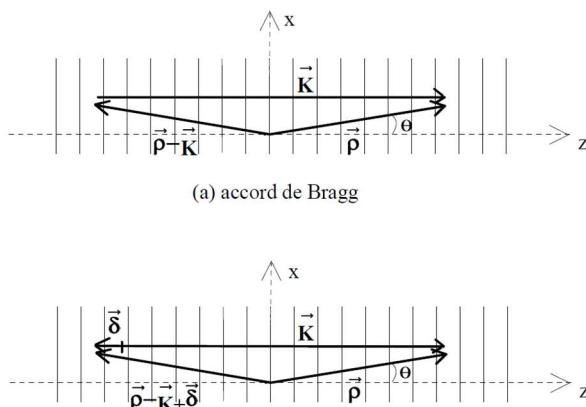


Figure 4 : Représentation des vecteurs d'ondes.

Le vecteur d'onde du réseau est $\vec{K} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ K \end{pmatrix}$ et le vecteur désynchronisation: $\vec{\delta} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta \end{pmatrix}$

La propagation a lieu dans le plan d'incidence xOz .

Vecteur position : $\vec{X} \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ z \end{pmatrix}$; Vecteur d'onde de l'onde incidente: $\vec{p} \begin{pmatrix} \rho_x \\ 0 \\ \rho_z \end{pmatrix}$

On suppose que la variation d'indice est sinusoïdale de période Λ et suivant z seulement:

$$n(z) = n_m + n_1 \cos \frac{\vec{K} \cdot \vec{X}}{\Lambda} = n_m + n_1 \cos \frac{2\pi}{\Lambda} z \quad (2)$$

avec n_m : indice moyen et n_1 : amplitude de la modulation d'indice

A-II.3. Equation de propagation et expression des champs :

Le champ électromagnétique est la somme des champs des 2 ondes planes couplées de vecteurs d'onde \vec{p} et $\vec{p} - \vec{K}$. Ce champ total s'écrit, en supposant que les pertes sont négligeables :

$$\vec{E} = [A(z) e^{j(\vec{p} \cdot \vec{X})} + B(z) e^{j(\vec{p} - \vec{K} \cdot \vec{X})}] e^{j\omega t} \quad (3)$$

On suppose que les vecteurs \vec{A} et \vec{B} sont parallèles à l'axe Oy (polarisation des ondes perpendiculaire au plan d'incidence xOz) et que la perturbation n'affecte pas les vecteurs d'ondes mais seulement les amplitudes des ondes. Le champ électromagnétique se propageant dans un milieu faiblement perturbé satisfait à l'équation de propagation :

$$\Delta E - \epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r(z) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

Le problème étant invariant suivant Oy, l'équation de propagation s'écrit :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k^2 E = 0 \quad (5)$$

$$\text{avec } k^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r(z) = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r(z) = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 n^2(z) = k_0^2 n^2(z) \quad (6)$$

$$n^2(z) = (n_m + n_1 \cos \frac{\vec{K} \cdot \vec{X}}{\Lambda})^2 \approx n_m^2 + 2 n_m n_1 \cos \frac{\vec{K} \cdot \vec{X}}{\Lambda} \quad (7)$$

(on peut négliger le terme $n_1^2 \cos^2 \frac{\vec{K} \cdot \vec{X}}{\Lambda}$ car n_1 est typiquement inférieur à 10^{-2})

$$\text{d'où } k^2 = k_0^2 n^2(z) \approx k_0^2 n_m^2 + k_0^2 n_m n_1 (e^{j\vec{K} \cdot \vec{X}} + e^{-j\vec{K} \cdot \vec{X}}) \quad (8)$$

l'équation de propagation (5) devient :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k_0^2 n_m^2 E + k_0^2 n_m n_1 (e^{j\vec{K} \cdot \vec{X}} + e^{-j\vec{K} \cdot \vec{X}}) E = 0 \quad (9)$$

Il faut à présent utiliser la relation (3) dans l'équation (9). Au cours du développement on utilisera les résultats suivants :

$$\rho_z = \rho \cos \theta = k_0 n_m \cos \theta \quad (10)$$

$$\vec{p} \cdot \vec{X} = \rho_x x + \rho_z z \quad \text{et} \quad \rho_x^2 + \rho_z^2 = k_0^2 n_m^2 \quad (11)$$

$$(\vec{p} - \vec{K} + \vec{\delta}) \cdot \vec{X} = \rho_x x + (\rho_z - K + \delta) z \quad \text{et} \quad \rho_x^2 + (\rho_z - K + \delta)^2 = k_0^2 n_m^2 \quad (12)$$

$$\text{Identiquement on a } -K + \delta = -2 \rho_z \quad (13)$$

$$\text{On peut exprimer } \delta \text{ en fonction de l'écart par rapport à la longueur d'onde de Bragg } \lambda_B = 2\pi n_m \cos \theta : \quad (14)$$

$$\delta = K - 2 \rho_z = K - 2 k_0 n_m \cos \theta = 2\pi \left(\frac{1}{\Lambda} - \frac{2 n_m \cos \theta}{\lambda} \right) \quad (15)$$

$$\text{soit } \delta = 4 \pi n_m \cos \theta \left(\frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda} \right) = \frac{4 \pi n_m \cos \theta}{c} (f_B - f) \quad (16)$$

$$\text{ou encore } \delta = 4 \pi n_m \cos \theta \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\lambda \lambda_B} \right) \approx 4 \pi n_m \cos \theta \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\lambda^2} \right) \quad (17)$$

(3) et (9) donnent :

$$\begin{aligned} & -p_x^2 A(z) e^{-j\beta \frac{x}{\lambda}} - p_x^2 B(z) e^{-j(\beta - \frac{k}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}} + A''(z) e^{-j\beta \frac{x}{\lambda}} - p_z^2 A(z) e^{-j\beta \frac{x}{\lambda}} - 2j p_z A'(z) e^{-j\beta \frac{x}{\lambda}} \\ & + B''(z) e^{-j(\beta - \frac{k}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}} - (\rho_z - K + \delta)^2 B(z) e^{-j(\beta - \frac{k}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}} - 2j (\rho_z - K + \delta)^2 B'(z) e^{-j(\beta - \frac{k}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}} \\ & + k_0^2 n_m^2 (A(z) e^{j\beta \frac{x}{\lambda}} + B(z) e^{-j(\beta - \frac{k}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}}) \\ & + k_0^2 n_m n_1 (A(z) e^{j\beta \frac{x}{\lambda}} e^{-j(\beta - \frac{k}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}} + A(z) e^{-j(\beta + \frac{k}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}} + B(z) e^{j(\beta - 2\frac{k}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}} + B(z) e^{j\delta \frac{x}{\lambda}} e^{j\beta \frac{x}{\lambda}}) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$A(z)$ et $B(z)$ représentent les amplitudes des ondes couplées suivant z . Les termes en $e^{-j(\beta + \frac{k}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}}$ et en $e^{-j(\beta - 2\frac{k}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}}$ représentent des ordres supérieurs de diffraction que l'on négligera. Sachant que la perturbation est faible, le couplage s'effectue lentement selon z , on peut alors considérer que les dérivées secondes sont également négligeables.

Pour que l'égalité soit toujours vérifiée, il faut que les 2 termes exponentiels $e^{-j\beta \frac{x}{\lambda}}$ et $e^{-j(\beta - \frac{k}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda}) \frac{x}{\lambda}}$ soient nuls simultanément. En prenant en compte (10) à (13), on obtient les deux équations différentielles couplées suivantes :

$$A'(z) = -j \kappa e^{j\delta z} B(z) \quad (19)$$

$$B'(z) = j \kappa e^{j\delta z} A(z) \quad (20)$$

$$\text{avec } \kappa = \frac{k_0 n_1}{2 \cos \theta} = \frac{\pi n_1}{\lambda \cos \theta} \quad (21)$$

κ est appelé coefficient de couplage et s'exprime généralement en cm^{-1} .

$$\text{Dans le cas des ondes contra-directionnelles, on a } \theta = 0 \text{ et par conséquent } \kappa = \frac{\pi n_1}{\lambda}.$$

A-II.4. Solutions des équations différentielles couplées :

Pour résoudre les équations (19) et (20) il suffit de passer le terme exponentiel à gauche de l'expression (19) puis de dériver par rapport à z . On tient compte de (20) pour obtenir une équation différentielle du second ordre qui permet d'éliminer $B(z)$ et donc de déterminer $A(z)$.

$$A''(z) + j \delta A'(z) - \kappa^2 A(z) = 0 \quad (22)$$

$$\text{La solution est du type } A(z) = e^{-\frac{\delta z}{2}} (C_1 e^{sz} + C_2 e^{-sz}) \quad (23)$$

$$\text{avec } s^2 = \kappa^2 - \left(\frac{\delta}{2} \right)^2 \quad (24)$$

On utilise ce résultat dans (19) pour obtenir $B(z)$:

$$B(z) = \frac{e^{-\frac{\delta z}{2}}}{\kappa} \left(\left(\frac{\delta}{2} + js \right) C_1 e^{sz} + \left(\frac{\delta}{2} - js \right) C_2 e^{-sz} \right) \quad (25)$$

Les constantes sont données par les conditions aux limites. En général l'onde réfléchie est nulle à l'extrémité de la structure périodique de longueur L et augmente jusqu'à $z = 0$, on a donc $B(L) = 0$.

Les solutions sont finalement :

$$A(z) = A(0) e^{j\frac{\delta}{2}z} \frac{s \operatorname{ch} s(L-z) - j \frac{\delta}{2} \operatorname{sh} s(L-z)}{s \operatorname{ch} sL - j \frac{\delta}{2} \operatorname{sh} sL} \quad (26)$$

$$B(z) = A(0) e^{j\frac{\delta}{2}z} \frac{-j \kappa \operatorname{sh} s(L-z)}{s \operatorname{ch} sL - j \frac{\delta}{2} \operatorname{sh} sL} \quad (27)$$

$$\text{Le coefficient de réflexion en amplitude est } r = \frac{B(0)}{A(0)} = \frac{-j \kappa \operatorname{sh} sL}{s \operatorname{ch} sL - j \frac{\delta}{2} \operatorname{sh} sL} \quad (28)$$

$$\text{Le coefficient de réflexion en puissance est } R = |r|^2 = \frac{\kappa^2 \operatorname{sh}^2 sL}{s^2 \operatorname{ch}^2 sL + \left(\frac{\delta}{2} \right)^2 \operatorname{sh}^2 sL} \quad (29)$$

Pour κ et L donnés, R est maximal à l'accord de Bragg ($\delta = 0$ et donc $s = \kappa$).

$$\text{On a alors } R_{\max} = \operatorname{th}^2 \kappa L \quad (30)$$

On remarque sur la figure 5 que le coefficient de réflexion dépasse 90% pour $\kappa L = 2$.

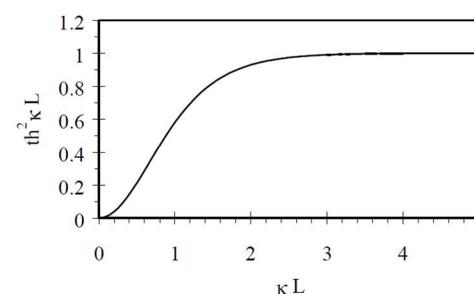


Figure 5 : Réflectivité maximale d'un réflecteur de Bragg en fonction du produit κL .

A-II.5. Représentation des ondes incidente et réfléchie :

Les expressions des puissances des ondes étant particulièrement simples à l'accord de Bragg, ce cas est retenu pour l'illustration du phénomène de couplage d'ondes contra-propagatives. On a ainsi, $\delta = 0$ et donc $s = \kappa$, d'où :

$$|A(z)|^2 = |A(0)|^2 \frac{\text{ch}^2 \kappa(L-z)}{\text{ch}^2 \kappa L} \quad (31)$$

$$\text{et } |B(z)|^2 = |A(0)|^2 \frac{\text{sh}^2 \kappa(L-z)}{\text{ch}^2 \kappa L} \quad (32)$$

$$\text{On constate que } |A(z)|^2 - |B(z)|^2 = \frac{|A(0)|^2}{\text{ch}^2 \kappa L} = \text{constante} \quad (33)$$

L'écart est donc constant entre les puissances des ondes suivant z.

$$\text{On a aussi } |A(L)|^2 + |B(0)|^2 = |A(0)|^2 \quad (34)$$

ce qui représente la conservation de l'énergie.

La figure 6 donne un exemple de couplage sur $L = 10 \text{ mm}$ lorsque $\kappa = 2 \text{ cm}^{-1}$, soit $\kappa L = 2$, et avec la puissance de l'onde incidente A normalisée.

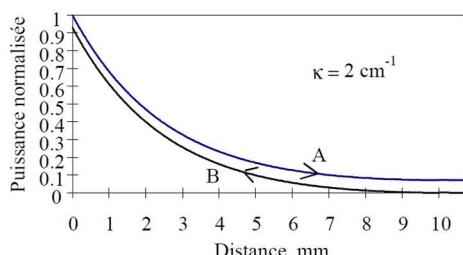


Figure 6 : Puissances normalisées des ondes incidente et réfléchie à l'accord de Bragg ($\delta = 0$) pour $L = 10 \text{ mm}$ et $\kappa = 2 \text{ cm}^{-1}$.

L'onde A a une puissance unité en $z=0$ et décroît suivant $z > 0$ car elle cède de l'énergie à l'onde B qui se propage dans l'autre direction. L'onde B prend naissance en $z = L$ et parvient en $z = 0$ avec plus de 90 % de la puissance de A pour l'exemple choisi. On constate que l'écart entre les puissances est constant sur toute la longueur conformément à (33).

A-III. Réponse spectrale :

Si l'on s'écarte de l'accord de Bragg par une variation de la longueur d'onde λ , la réflectivité R est affectée comme le laisse prévoir la relation (29). La réponse spectrale est donc obtenue en faisant varier λ dans l'expression de R par l'intermédiaire de δ . Si on s'intéresse également à la phase $\text{Arg}(r)$ de l'onde réfléchie par rapport à l'onde incidente on utilisera l'expression (28) rappelée ci-dessous :

$$r = \frac{-j \kappa \text{sh } sL}{s \text{ch } sL - j \frac{\delta}{2} \text{sh } sL}$$

On prendra par la suite $\cos \theta = 0$, la désynchronisation δ s'écrit alors:

$$\delta = 4 \pi n_m \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\lambda \lambda_B} \right) = \frac{4 \pi n_m}{c} (f_B - f) \quad (35)$$

Pour analyser la réflectivité et la phase de manière générale, on peut les représenter en fonction de δL à κL donné (figure 7). L'évolution de la phase avec la fréquence de l'onde donne une information sur la dispersion (si la phase est non linéaire en fonction de la fréquence il y a dispersion).

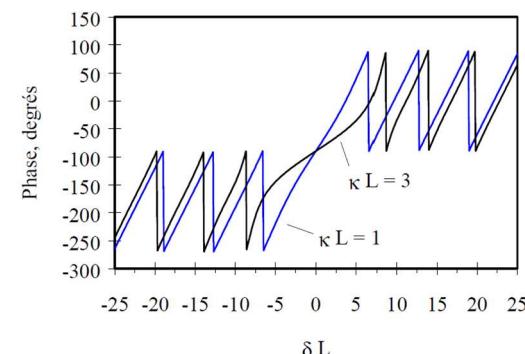
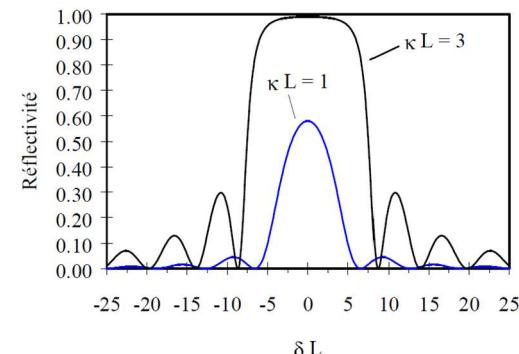


Figure 7 : Réflectivité et phase d'un filtre de Bragg en fonction du produit δL et pour deux valeurs de κL .

On s'aperçoit immédiatement que le produit κL est déterminant pour les caractéristiques spectrales. La réflectivité maximale avoisine 60% pour $\kappa L = 1$ tandis qu'elle approche 100% lorsque $\kappa L = 3$. Dans ce second cas, on note également que le lobe principal présente des flancs plus raides, la contrepartie étant des lobes latéraux de plus forts niveaux. La largeur du lobe principal évoluant avec κL , la position des lobes latéraux s'en trouve aussi affectée. La discussion sur la dispersion est moins évidente d'après les courbes présentées car une plus grande précision est nécessaire et il faut calculer en chaque point la dérivée par rapport à la longueur d'onde (ou par rapport à la fréquence). On constaterait alors, par exemple, que pour $\kappa L = 1$ la phase n'est pas linéaire autour de l'accord de Bragg. En fonction des applications et en particulier dans le cas des transmissions à haut débit, l'étude de la dispersion doit donc être prise en compte.

Revenons sur la réflectivité et ses caractéristiques spectrales. Le lobe principal a une valeur maximale $R_{\max} = \text{th}^2 \kappa L$ et les annulations de la réflectivité R ont lieu pour :

$$\delta L = 2\sqrt{m^2 \pi^2 + \kappa^2 L^2} \quad (36)$$

avec m entier > 1 .

Ceci correspond à :

$$\Delta f = \frac{c}{2\pi n_m L} \sqrt{m^2 \pi^2 + \kappa^2 L^2} \quad (37)$$

$$\text{ou } \Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi n_m L} \sqrt{m^2 \pi^2 + \kappa^2 L^2} \quad (38)$$

Si κL est faible, l'allure du filtre est quasi-triangulaire, on peut alors estimer la largeur à mi-hauteur du filtre (Bande passante à -3dB ou FWHM: *Full-Width at Half Maximum*), celle-ci est donnée par :

$$\text{FWHM}_\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2 n_m L} \quad (39)$$

$$\text{Le niveau des lobes latéraux est donné par } R_{\text{lobe}} = \frac{\kappa^2 L^2}{(m + \frac{1}{2})^2 \pi^2 + \kappa^2 L^2} \quad (\text{m impair}) \quad (40)$$

Si $\kappa L = \frac{\pi}{2} \approx 1.57$, le lobe principal atteint $R_{\max} = 0.84$ et le premier lobe latéral se situe à

$R_{\text{lobe}} = 0.1$. La réjection n'est pas bonne puisqu'elle est ici de 9.4 dB alors qu'un filtre acceptable pour des applications de télécommunications telles que le multiplexage en longueur d'onde devrait présenter une réjection d'au moins 20 dB.

A-IV. Réseaux non uniformes :

La réjection des filtres à réseau de phase peut être améliorée par l'utilisation de réseaux non uniformes. En effet, si les caractéristiques d'un réseau varient sur sa longueur, le filtre résultant est la combinaison de plusieurs filtres élémentaires. On peut ainsi définir des réponses plus plates dans la bande tout en ayant des lobes latéraux réduits.

Pour un réseau de Bragg inscrit dans une fibre optique, les ondes sont contradiirectionnelles avec $\theta = 0$ et l'indice de réfraction moyen n_m est l'indice effectif n_{eff} du mode de propagation. Les champs s'écrivent alors :

$$E_A(z) = A(z) e^{j\beta z} \quad (41)$$

$$\text{et } E_B(z) = B(z) e^{+j\beta z} \quad (42)$$

$$\text{avec la constante de propagation } \beta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} \quad (43)$$

L'étude consiste à décomposer le réseau en réseaux élémentaires présentant chacun des caractéristiques uniformes, différentes des autres sections (figure 8). La méthode la plus facilement exploitable est une méthode matricielle. Chaque matrice décrit un réseau élémentaire, il suffit alors de faire le produit de toutes les matrices. Il faut veiller à assurer le raccordement des phases des ondes aux interfaces des sections.

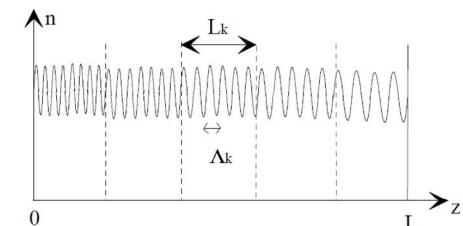


Figure 8 : Exemple de réseau non uniforme (κ constant, Λ non constant).

La matrice élémentaire est donnée par :

$$\begin{pmatrix} E_A(z) \\ E_B(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\text{ch } sL_k - j \frac{\delta_k}{2s} \text{sh } sL_k \right) e^{j\beta_{B_k} L_k} & j \frac{\kappa}{s} \text{sh } sL_k e^{-j(\beta_{B_k} L_k + \Phi_k)} \\ -j \frac{\kappa}{s} \text{sh } sL_k e^{+j(\beta_{B_k} L_k + \Phi_k)} & \left(\text{ch } sL_k + j \frac{\delta_k}{2s} \text{sh } sL_k \right) e^{-j\beta_{B_k} L_k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_A(z+L_k) \\ E_B(z+L_k) \end{pmatrix} \quad (44)$$

avec $\beta_{B_k} = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_{B_k}}$ et Φ_k phase du réseau à l'entrée de la section k.

$$\text{La matrice globale est } M = \prod_{k=1}^N M_k \quad (45)$$

$$\text{Relation de phase du réseau } \Phi_k = \Phi_{k-1} + \frac{2\pi L_{k-1}}{\Lambda_{k-1}} \quad (46)$$

avec $\Phi_1 = 0$.

Pour le réseau global, on a comme précédemment $B(L) = 0$ et donc $E_B(L) = 0$

$$\text{On obtient ainsi la réponse spectrale en réflexion : } R(\lambda) = \left| \frac{E_B(0)}{E_A(0)} \right|^2 = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2 \quad (47)$$

$$\text{On a également la réponse spectrale en transmission } T(\lambda) = \left| \frac{E_A(L)}{E_A(0)} \right|^2 = \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 \quad (48)$$

La figure 9 représente la réponse spectrale calculée d'un filtre à réseau non uniforme comptant 25 sections.

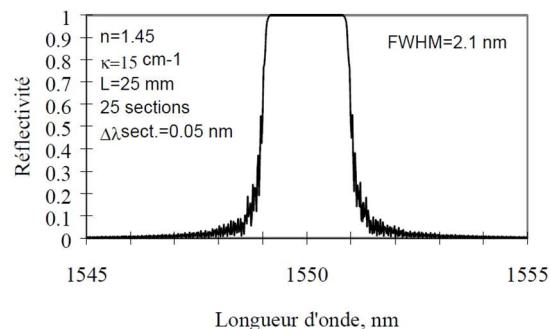


Figure 9 : Réponse spectrale calculée d'un filtre à réseau non uniforme comportant 25 sections de longueur 1 mm chacune. La longueur d'onde de Bragg varie de 0,05 nm entre 2 sections consécutives, le coefficient de couplage κ étant constant. Les caractéristiques sont: longueur d'onde centrale de 1550 nm, largeur à mi-hauteur de 2,1 nm, et réflectivité de 100% (pertes non prises en compte).

Les réseaux non uniformes permettent aussi d'obtenir des caractéristiques de phase particulières permettant de compenser la dispersion des liaisons hauts débits / longues distances sur fibres standard. Ainsi, récemment une transmission à 10 Gbit/s sur une distance de 400 km a été réalisée sur ce type de fibre en insérant un compensateur de dispersion d'une longueur de 10 cm.

Annexe 2 : documentation technique sur des filtres à réseau de Bragg commerciaux

Northern Photonics

Developmental Product Information¹
Release 1 01/96

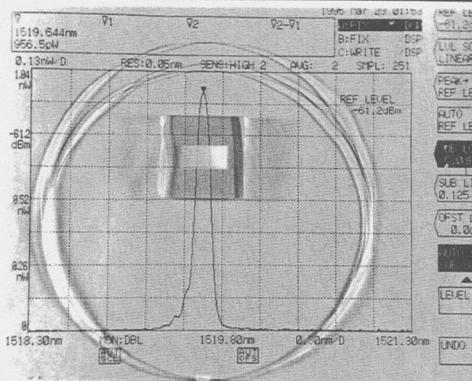
Standard Fiber Bragg Gratings in the Telecommunication range of 1550nm

A full range of very precise fiber gratings are available from Northern Photonics. Fiber Bragg gratings in the telecommunication range of 1550 - 1560nm are now available, off the shelf, in standard configuration. These gratings are ideally suited for WDM and other high volume applications.

Our gratings are fabricated in a fully licensed, state-of-the-art production facility. EBeam generated Phase Masks are used to ensure precision and repeatability.

All fiber Bragg gratings are fully tested to assure highest quality standards and are guaranteed to meet or exceed the specifications. Continuous product development, commitment to quality and total customer satisfaction has made Northern Photonics the world leader in fiber Bragg grating technology.

As a volume manufacturer we can meet all your present and future needs, from prototype development to full product manufacturing.



SPECIFICATIONS

Parameter	Specification	Tolerance
Center Wavelength	1550 - 1560nm in 1nm increments	+/- 0.2nm
FWHM Bandwidth	0.25nm	+/- 0.05nm
Reflectivity	95%	+/- 3%
Grating length	10mm	n/a
Polarization dependence ¹	< 0.2dB	Typical
Insertion loss ¹	< 0.1dB	Typical
Temperature coefficient of the center wavelength	13pm / °C	+/- 2pm / °C
Fiber Type	Monomode Telecom	n/a
Fiber length	1m	+/- 0.02m

¹ These parameters are measured only on statistical samples.

Northern Photonics
2270 Saint Francois Road
Dorval, PQ, H9P 1K2, CANADA
Tel.: (514) 421 6766 • Fax.: (514) 421 0560

Séance 2 (2h30) : simulation logicielle d'un réseau de Bragg

Ce TP va nous permettre de simuler un réseau de Bragg fibré (FBG) via l'outil logiciel VPI Transmission Maker (<http://www.vpiphotonics.com/>)

1) Réseaux de Bragg : introduction

Le sujet a déjà été abordé en cours et en TD de l'UE PCPO. On rappelle les principaux éléments en page 3 de cet énoncé, et une étude théorique approfondie est fournie en annexe 1 (pages 7 à 12). Vous êtes invité à passer quelques minutes à lire ce passage avant d'aborder la suite de la séance.

2) Lancement du simulateur

Le logiciel est installé sur les machines (Windows) de la salle C03-108 du département d'Optique. Une fois connecté sur l'un des postes sous votre compte Campus, lancer le logiciel **VPI Design Suite 11.4**.

Si demandé, choisissez le produit « VPITransmissionMaker Optical Systems ».

Construction et visualisation d'une source « blanche » dans la bande « telecom » (1550nm)

Après démarrage du logiciel, créez un fichier de simulation en double-cliquant sur l'icône « New », dans le bandeau supérieur. Attention : ne pas sélectionner « New Galaxy » !

Nommez et enregistrez le fichier dans votre espace de stockage (il possèdera une extension .vtmu).

Double-cliquez sur l'arrière-plan de la fenêtre de simulation pour faire apparaître l'éditeur de paramètres. Réglez la simulation de manière à générer une fenêtre temporelle correspondant à 32 symboles binaires (bits 0 ou 1) au débit $D = 5 \text{ Gbit/s}$. Réglez le nombre d'échantillons par symbole à 32 et le paramètre "InBandNoiseBins" à ON. Ne modifiez pas les autres paramètres.

► **Question 1.** A partir des réglages précédents des paramètres de la simulation, remplir les valeurs numériques du tableau 1.

N.B. : on rappelle que pour la représentation fréquentielle d'un signal numérique, la *résolution temporelle* est égale à l'inverse de la *bande-passante* de simulation et la *résolution fréquentielle* est égale à l'inverse de la *durée* de la simulation.

Paramètre	notation	valeur	unité
Durée de la simulation	Δt	... ? ...	ns
Bande-passante de la simulation	Δf	...	GHz
Résolution temporelle	δt	...	ns
Résolution fréquentielle	δf	...	MHz
Nombre d'échantillons de la simulation	N	...	Sans unité

Tableau 1

- a) Insérez (par « glisser-déposer ») une source optique blanche (bruit gaussien) centrée sur la longueur d'onde $\lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}$, et de densité spectrale de puissance moyenne $N_0 =$

$10^{-15} W/Hz$. Le composant correspondant se nomme « NoiseWhiteGaussOpt ». Vous pourrez rechercher ce module au moyen de la fonction « Quick Find » du panneau latéral des ressources de VPI TM (à activer à partir de l'onglet « Tools », en cas de besoin). Insérez également un analyseur de signal « SignalAnalyzer » que vous connecterez à la source au moyen d'un lien optique.

- b) Lancez la simulation (bouton vert « run ») et visualisez le spectre optique émis par la source. Vous réglerez dans le panneau de contrôle du visualiseur (« control panel ») la résolution de l'analyseur de spectre à 1,25 GHz, avec un filtre gaussien. Ce paramètre correspond à la fonction d'appareil de l'analyseur. Pour plus de commodité, réglez les unités de l'axe des abscisses en nm (et non en GHz, valeur par défaut) dans l'onglet « View/Analyzer Manager ».

► **Question 2.** En inspectant le signal émis par la source et son spectre optique, mesurez les paramètres suivants et comparez-les aux données calculées dans le tableau 1 :

- durée de la simulation Δt
- Résolution temporelle de la simulation δt (zoomez sur la courbe et utilisez les marqueurs verticaux)
- bande-passante fréquentielle de la simulation Δf
- Résolution fréquentielle de la simulation δf (zoomez sur la courbe et utilisez les marqueurs verticaux)

► **Question 3.** comparez les valeurs mesurées à la question 2 avec les résultats théoriques obtenus à la question 1.

3) Visualisation de la fonction de transfert d'un réseau de Bragg (méthode 1)

On veut maintenant mesurer la fonction de transfert d'un filtre de Bragg au moyen de la source blanche introduite précédemment. Pour ce faire, on va introduire un circulateur optique, permettant de séparer les ports d'écriture et de lecture des signaux du filtre de Bragg. Construisez le montage représenté sur la figure 1, après avoir créé un nouveau fichier de simulation (bien sauvegarder votre précédent fichier !).

Le modèle de filtre de Bragg étant bidirectionnel, il comporte 4 ports (2 entrées et 2 sorties). Il en est de même pour le circulateur optique.

- c) Vous pouvez rechercher les différents composants à l'aide de la fonction « Quick Find » du panneau des ressources. Les terminateurs (« Groud » et « Null source ») sont accessibles dans le panneau « Macros ». N'oubliez pas de configurer les composants du montage avec les paramètres indiqués sur la figure 1. En cas de doute, vous pouvez accéder à la documentation d'un composant à l'aide d'un « clic droit + Help ». Notez bien que l'analyseur observant la sortie du réseau de Bragg en transmission (SignalAnalyzer_vtms3) doit être désactivé dans son panneau de contrôle. Il apparaît alors en gris.

Attention : les paramètres généraux de la simulation (« double clic » sur le fond de la fenêtre) sont identiques à ceux de la partie 3.

Lancez la simulation et répétez les réglages de la visualisation des courbes indiqués au paragraphe 3.b)

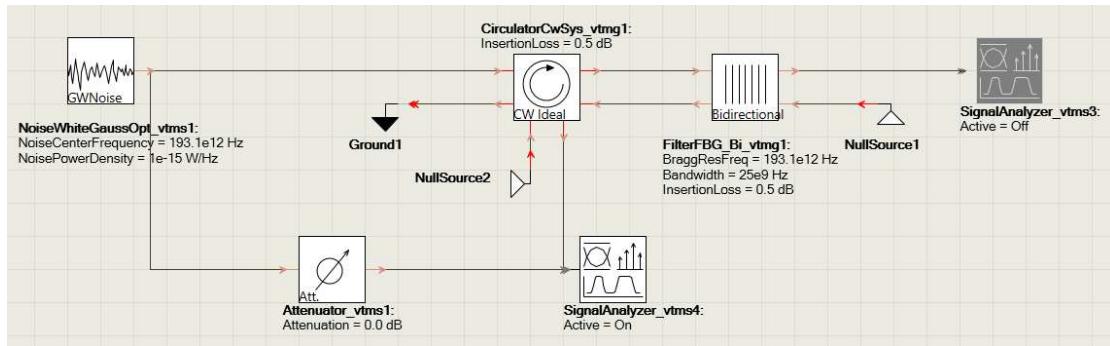


Figure 1. Visualisation de la fonction de transfert d'un réseau de Bragg

- ▶ **Question 4.** Sur l'analyseur de la voie en réflexion (SignalAnalyzer_vtms4), mesurez successivement :
 - La longueur d'onde de Bragg λ_B de la bande filtrée, et la fréquence optique ν_B correspondante, en THz
 - La largeur spectrale de bande filtrée $\delta\lambda$ (à -3dB) en nm, et la valeur $\delta\nu$ correspondante, en GHz
 - Les **pertes d'insertion** (en dB) à la réflexion par le filtre de Bragg.

- ▶ **Question 5.** Sur la deuxième courbe affichée par l'analyseur, on peut noter les fluctuations de puissance de la source optique. Proposer une méthode pour afficher la « vraie » fonction de transfert du réseau de Bragg en réflexion, débarrassée des fluctuations de la puissance d'entrée.
Pour ce faire, vous devez :
 - 1) afficher les données de la courbe sous forme d'un fichier texte (menu «analysis», puis «Text view», «select all» et «copy»).
 - 2) Coller ces données et les afficher à l'aide d'un logiciel externe (Python, tableur Excel ...).

ATTENTION : le fichier est assez volumineux ... plusieurs milliers de lignes !

- ▶ **Question 6.** Répéter les opérations précédentes pour visualiser la fonction de transfert du réseau de Bragg en transmission et calculer les 3 paramètres caractéristiques comme demandé à la question 4.

4) Visualisation de la fonction de transfert d'un réseau de Bragg (méthode 2)

On propose ici une autre méthode pour tracer la fonction de transfert du filtre de Bragg. Elle utilise une source laser monochromatique (LaserCW) dont on fait varier continument la fréquence (ou la longueur d'onde). Pour l'occasion, on utilisera un modèle de filtre de Bragg fibré permettant de représenter plus finement le composant, car il intègre ses principaux paramètres physiques (période spatiale, longueur, amplitude de l'indice, apodisation ...). Le balayage en fréquence de la source se fera en utilisant la fonction « sweep » de VPI TM.

Ouvrez un nouveau fichier (nommez-le) et construire le montage représenté sur la figure 2. De nouveaux composants apparaissent, mais vous pouvez toujours les rechercher au moyen de « Quick find » et visualiser leurs caractéristiques grâce à un « click droit » suivi de « Help ».

IMPORTANT : créez un nouveau paramètre nommé « BalayageFréquence » (variable globale de la simulation) en double cliquant sur le fond de la fenêtre, et en choisissant « New parameter » dans le bandeau de commandes du panneau de simulation. Réglez par défaut ce paramètre à 193.1 THz.

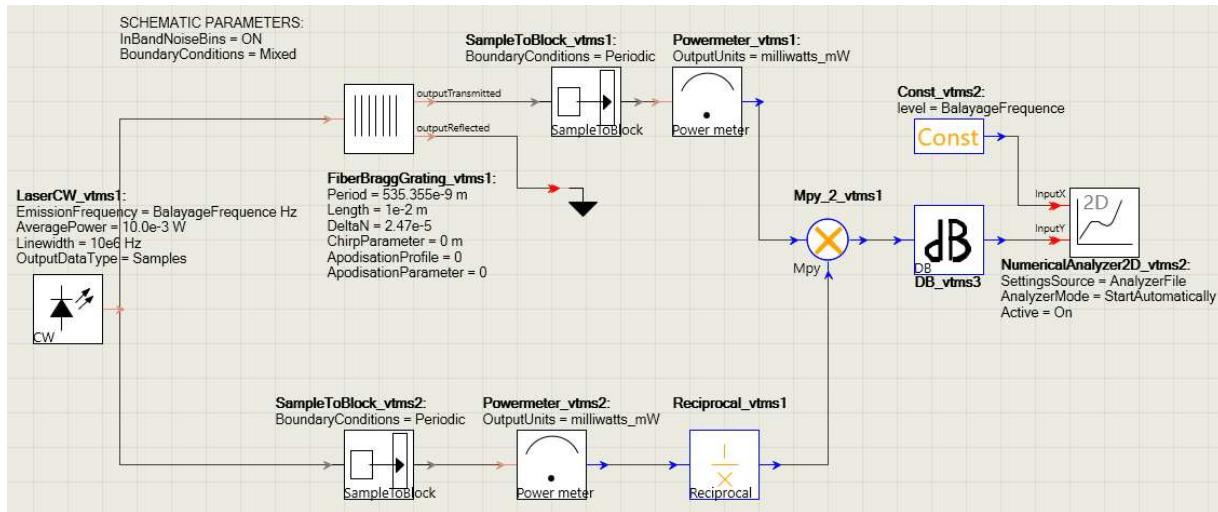


Figure 2. Visualisation de la fonction de transfert d'un réseau de Bragg

Réglez la simulation de manière à générer une fenêtre temporelle correspondant à 128 symboles binaires au débit $D = 10 \text{ Gbit/s}$. Réglez le nombre d'échantillons par symbole à 16, la bande-passante de la simulation (SampleRateDefault) à 320 GHz, le paramètre InBandNoiseBins à « ON », et BoundaryConditions à « Mixed ». Ne modifiez pas les autres paramètres.

Pour le module Const qui alimente l'axe des abscisses de la courbe 2D, mettez « BalayageFrequence » dans la variable Level.

Cliquez sur l'icone du Laser et entrez la valeur « BalayageFrequence » pour le paramètre « EmissionFrequency ». Réglez le paramètre OutputDataType à « Samples » et la fréquence et la largeur de raie du laser aux valeurs indiquées sur la figure 2.

Faites ensuite un click droit sur la valeur du paramètre BalayageFrequence (193.1 THz) de la fenêtre globale de simulation et choisissez « Create Sweep Control ». A l'ouverture de la fenêtre de paramétrage du balayage en fréquence, entrer les paramètres suivants :

- Control mode : continuous
- Data type : float
- Upper Limit : 193,46 THz
- Lower Limit : 193,36 THz
- Division type : number of points
- Division value : 500

Cliquer ensuite sur “OK” et lancer la simulation à l'aide de la flèche verte sur la fenêtre de contrôle.

- ▶ **Question 7.** Une fois la courbe de réponse du filtre de Bragg obtenue (en transmission), mesurer ses trois paramètres caractéristiques, comme demandé à la question 4.
- ▶ **Question 8.** En utilisant la procédure précédente, retracer la courbe de réponse du filtre de Bragg en réflexion, et mesurer ses trois paramètres caractéristiques, comme demandé à la question précédente.
- ▶ **Question 9.** Quelles sont vos conclusions concernant les deux méthodes utilisées pour évaluer la courbe de réponse d'un FBG ?