

TP fibre optique dopée erbium

— Laser, Matériaux, Milieux Biologiques —

Sécurité laser

ATTENTION : le faisceau du laser de pompe est puissant. Pour des raisons de sécurité et de sauvegarde de la santé des yeux, les extrémités des cordons sont fermées par un clapet, qui ne s'ouvre que lors de la connexion (prises E2000). Évidemment, **il ne faut jamais soulever manuellement le clapet d'un cordon lorsqu'il est connecté au montage.**

Malgré la présence de cette dernière sécurité, on gardera l'habitude de **ne jamais mettre une sortie de fibre face à l'œil.**

Précautions à prendre

Les connexions optiques entre les différents éléments contenus dans les boîtiers sont effectuées sur le panneau avant, avec des cordons gainés de fibre monomode. Bien que plus robustes que de la fibre nue, **ces cordons restent fragiles et doivent être manipulés avec précaution : merci de veiller à ne pas les plier et à ne pas faire de nœud ni de torsion ; les branchements et débranchements se feront en tenant le connecteur (et sans tirer sur les cordons eux-mêmes).**

En outre, on fera attention à maintenir les **diodes laser éteintes lors des branchements ou débranchements** des cordons de fibre. Les cordons seront ôtés du boîtier lorsqu'ils ne servent pas au montage en cours.

1 Introduction

1.1 Objectifs

Le but de ce TP est d'étudier, dans une première partie, les principales caractéristiques d'un amplificateur optique à fibre qui est maintenant utilisé couramment dans les systèmes de télécommunication, notamment dans les liaisons longues distances transocéaniques. Dans la seconde partie, nous étudierons l'oscillateur laser obtenu avec ce type de fibre.

1.2 Matériels

1.2.1 Boîtier "fibre dopée erbium"

Le kit d'enseignement comprend :

- PUMP MODULE : une diode de pompe dont l'intensité d'alimentation maximale est de 175 mA pour une puissance lumineuse maximale de 80 mW environ.
- DFB 1.55 : une diode laser DFB (Distributed Feedback) à 1550 nm. L'intensité d'alimentation maximale est de 30 mA pour une puissance lumineuse maximale de 2 mW environ.
- MUX : deux multiplexeurs permettant de mélanger ou séparer les deux faisceaux.
- ER⁺⁺⁺ FIBER : une fibre amplificatrice.
- ISOLATOR : un isolateur optique destiné à éviter les retours de lumière vers la diode à 1550 nm.
- COUPLER : un coupleur permettant de séparer un faisceau à 1550 nm en deux parties avec un couplage de 90% et 10%.
- ATTENUATORS : trois atténuateurs de 5 dB, 10 dB et 20 dB.
- INGAAS DET : cette photodiode est couplée à un amplificateur à gain variable.
- BRAGG : un miroir de Bragg à 1550 nm.
- MIRROR : un miroir métallique déposé sur un bout de fibre optique.

1.2.2 Analyseur de spectre optique

Conçu à partir d'un réseau de diffraction tournant, l'entrée du signal s'effectue par une fibre optique monomode et l'observation des spectres se fait à l'aide d'un oscilloscope. Le schéma du spectromètre est donné sur la figure 1. La photodiode fournit un signal électrique proportionnel à l'intensité lumineuse perçue. La rotation du réseau plan fait varier l'angle d'incidence du faisceau sur le réseau. Ceci se traduit par le défilement des différents ordres de diffraction du réseau devant le détecteur. L'observation d'un des ordres supérieurs permet d'analyser les composantes spectrales de la lumière incidente.

La relation fondamentale des réseaux par réflexion s'écrit :

$$\sin \alpha + \sin \beta = m \left(\frac{\lambda}{a} \right) \quad (1)$$

où m est l'ordre de diffraction considéré, a le pas du réseau et λ la longueur d'onde. Dans le montage de la figure 1, les positions des fentes d'entrée et de sortie restent fixes et le réseau

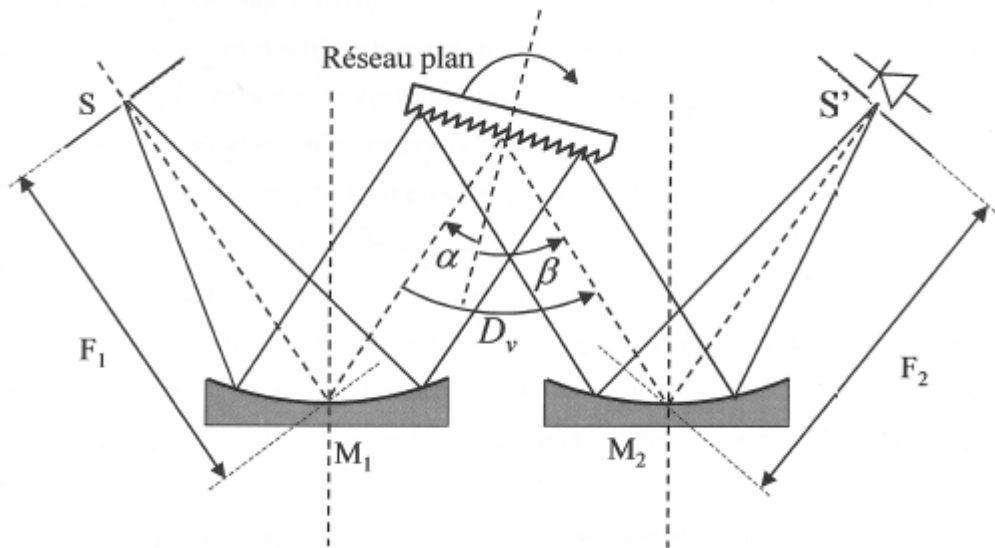


FIGURE 1 – Schéma du montage optique du spectromètre.

tourne autour du plan d'incidence. L'angle de déviation D_v est par conséquent constant et il est donné par :

$$D_v = \beta - \alpha \quad (2)$$

où la convention de signe pour la mesure des angles est positif pour le sens trigonométrique. Considérant les équations (1) et (2), on peut calculer α et β :

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{m \left(\frac{\lambda}{a} \right)}{2 \cos \left(\frac{D_v}{2} \right)} \right] - \frac{D_v}{2} \quad (3)$$

$$\beta = \arcsin \left[\frac{m \left(\frac{\lambda}{a} \right)}{2 \cos \left(\frac{D_v}{2} \right)} \right] + \frac{D_v}{2} \quad (4)$$

Dans le montage de la figure 1, on utilise un réseau holographique de 1200 traits/mm et la déviation du montage est de $D_v = 10,5^\circ$.

→ En utilisant la relation 3, représenter l'évolution de la longueur d'onde incidente sur le détecteur en fonction de l'angle d'incidence pour les ordres 1 et 2. Que peut-on en déduire ?

1.2.3 Photomètre

Cet analyseur de spectre optique n'étant pas calibré en énergie vous disposez également d'un appareil pouvant mesurer la puissance lumineuse émise par les différentes sources. Il s'agit d'un détecteur germanium dont la courbe typique de réponse est donnée à la figure 2.

De plus, sa gamme de puissance mesurable s'étend de -60 dBm à +10 dBm (la puissance en dBm est donnée par $P(\text{dBm}) = 10 \log \frac{P(\text{mW})}{1 \text{mW}}$). Par conséquent, il faudra être particulièrement vigilant lorsque la diode de pompe sera en fonctionnement pour éviter de détériorer l'appareil.

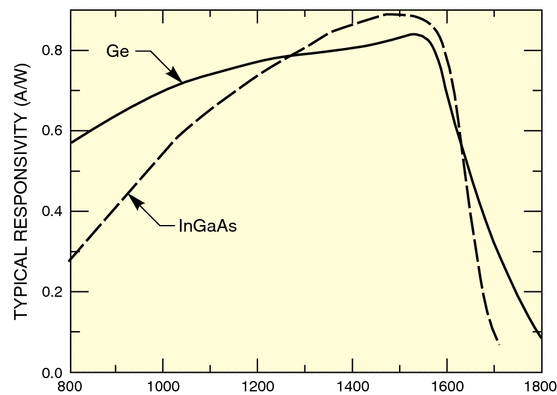


FIGURE 2 – Courbes de réponse typique de détecteurs InGaAS et Ge

2 Étude des composants individuels

2.1 Fibre dopée Erbium

L'élément central du TP est la fibre dopée erbium, elle mesure 20 m de longueur environ. C'est une fibre en silice monomode qui a été dopée avec de l'erbium à raison de 442 ppm en unité de poids.

L'erbium fait partie de la famille des "terres rares" (ou lanthanides) qui sont très souvent incorporées dans des matrices solides et utilisés comme milieu actif pour les lasers. Citons, outre l'erbium, le néodyme ou l'ytterbium. Ils ont la particularité de posséder de nombreuses transitions radiatives dans le visible et le proche infrarouge.

→ Quel est l'intérêt majeur de l'ion erbium pour les télécommunications par fibre optique ?

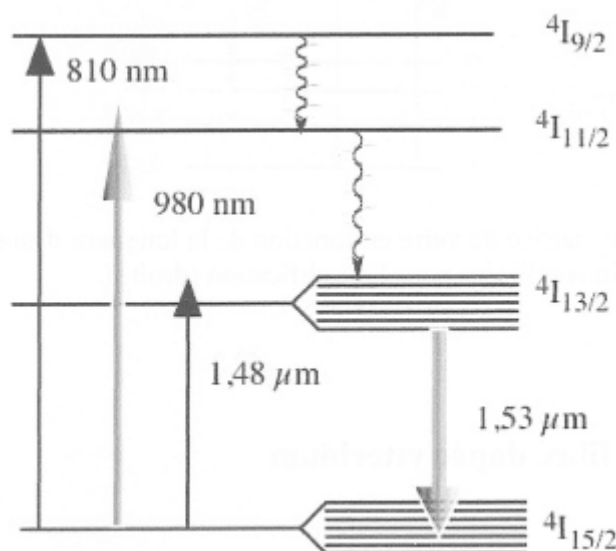


FIGURE 3 – Schéma des niveaux de l'ion erbium.

Notons que le niveau fondamental et le niveau excité ${}^4I_{13/2}$ sont constitués de multiples sous-niveaux du fait de l'interaction de l'ion avec le champ électrique local créé par les ions voisins (effet Stark). Les bandes d'absorption principales se situent autour de 810 nm (${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$), 980 nm (${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$) et 1,48 μm (${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$). La durée de vie du niveau métastable ${}^4I_{13/2}$, dans la silice, est de l'ordre de 10 ms. Les transitions ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ et ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ sont non radiatives et seront considérées comme rapide (la durée de vie de ces niveaux est bien inférieure à celle du niveau ${}^4I_{13/2}$). On peut ainsi avoir une inversion de population entre les niveaux ${}^4I_{13/2}$ et ${}^4I_{15/2}$ correspondant à une transition au voisinage de 1550 nm (1530 nm - 1600 nm).

2.2 Diode laser de pompe

Relier la sortie fibrée de la diode de pompe directement à l'analyseur de spectre optique.
 → Relever son spectre.

Le temps T écoulé entre deux impulsions du signal de synchronisation correspond à la rotation complète du réseau holographique (360°). Pour déterminer une longueur d'onde inconnue, on mesure l'écart entre l'ordre 0 et l'ordre 1, que nous notons ΔT . Cet écart temporel correspond à une différence d'angles d'incidence pour les deux ordres de $\Delta\alpha = \frac{\Delta T}{T} * 360^\circ$. En utilisant la relation (3) nous pouvons déduire la longueur d'onde correspondant à l'ordre 1 en fonction de $\Delta\alpha$:

$$\lambda_1 = 2a \cos\left(\frac{D_v}{2}\right) \sin(\Delta\alpha) \quad (5)$$

Laquelle des trois transitions de pompage indiquées sur la figure 3 va-t-on utiliser ?

La puissance lumineuse maximale de la diode de pompe est de 80 mW. On ne pourra donc pas tracer sa caractéristique complète.

→ Mesurer précisément le seuil de la diode laser sans dépasser la limite du photomètre (10 dBm soit 10 mW).

Une fois ces caractérisations faites, la fibre de couleur orange devra rester reliée à l'entrée 980 du premier multiplexeur et le courant rabaisé à sa valeur minimale à chaque débranchement de fibres.

2.3 Diode laser signal à 1550 nm

Relier la sortie fibrée de la diode signal directement à l'analyseur de spectre optique.

→ Relever son spectre. Le comparer à celui de la diode de pompe.

La puissance lumineuse maximale de la diode laser à 1550 nm est de 2 mW.

→ Tracer sa caractéristique (puissance d'émission en fonction du courant d'alimentation) et repérer son seuil.

2.4 Isolateur

C'est une diode optique qui ne laisse passer la lumière que dans un sens. Il fonctionne avec un rotateur de Faraday. On utilisera toujours l'isolateur pour protéger la diode signal d'une contre-réaction optique parasite. En effet, si on ne met pas cet isolateur, la lumière réfléchie

peut perturber le fonctionnement de la diode, voire la détruire si la contre-réaction est trop importante.

2.5 Multiplexeur ou WDM (Wavelength Division Multiplexer)

C'est un composant fibré passif qui permet de coupler 2 signaux de longueur d'onde différente et provenant de 2 fibres distinctes dans une même fibre. Il permet ainsi l'injection de la pompe et du signal dans la fibre dopée. Utilisé en sens inverse, il permet de séparer des signaux de longueur d'onde différentes. On l'appelle alors démultiplexeur.

2.6 Atténuateurs

Ces atténuateurs sont constitués de deux tronçons de fibre "mal soudé". Il s'agit une soudure où l'on a volontairement décaler transversalement les coeurs de deux fibres optiques identiques d'une quantité connue pour réaliser des atténuateurs calibrés.

2.7 Détecteur

C'est une photodiode InGaAs accessible par fibre optique utilisée pour la détection. Le signal électrique fourni est alors amplifié électroniquement (gain réglable) et la sortie BNC permet de relier un oscilloscope ou un voltmètre.

3 Amplificateur optique à fibre

3.1 Emission spontanée amplifiée (ESA)

L'amplificateur dopé erbium se comporte comme un système à 3 niveaux d'énergie. Cela entraîne que la fibre est absorbante en absence de pompage. Le pompage se fait par une extrémité de la fibre conduisant à un gain exponentiel décroissant le long de l'axe de la fibre (dans l'hypothèse où la pompe ne sature pas le milieu). Si la puissance pompe incidente est petite, une partie de la fibre sera absorbante. Ce tronçon est d'autant plus petit que la puissance pompe est grande. Le spectre recueilli en bout de fibre est le spectre d'ESA (Figure 4)

→ Réaliser le montage de la figure 5. Relever les spectres d'ESA P_+ et P_- pour une même puissance de pompage et expliquer qualitativement la différence entre les 2.

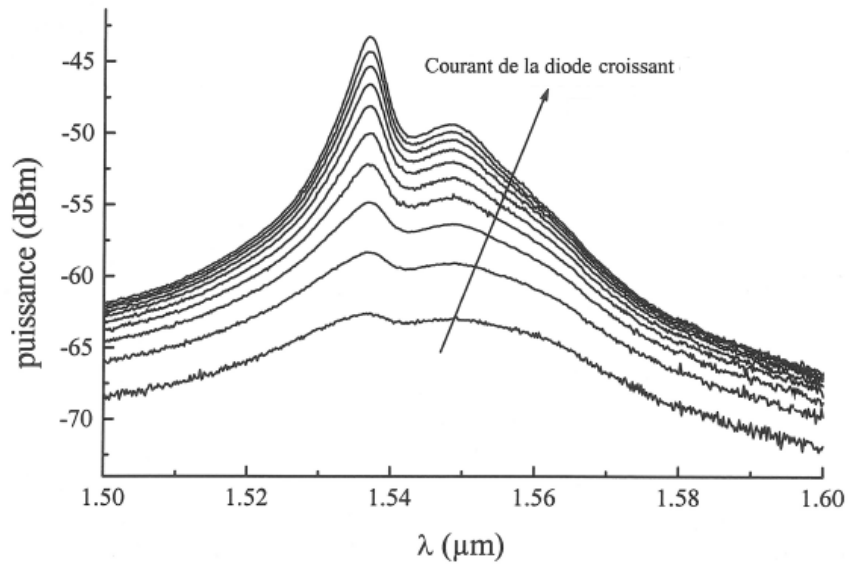


FIGURE 4 – Spectres d’ESA en fonction du courant d’alimentation de la diode de pompage.

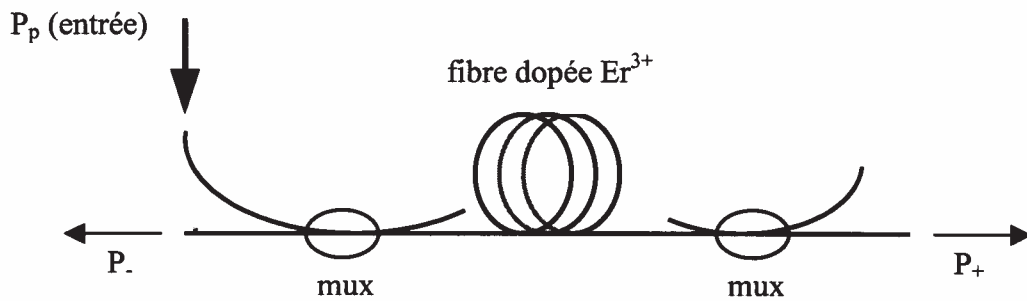


FIGURE 5 – Montage ESA

3.2 Mesure du gain

3.2.1 Montages

On utilise les deux montages suivants appelés co- et contra-propagatif. Les mesures doivent être réalisées dans les deux configurations.

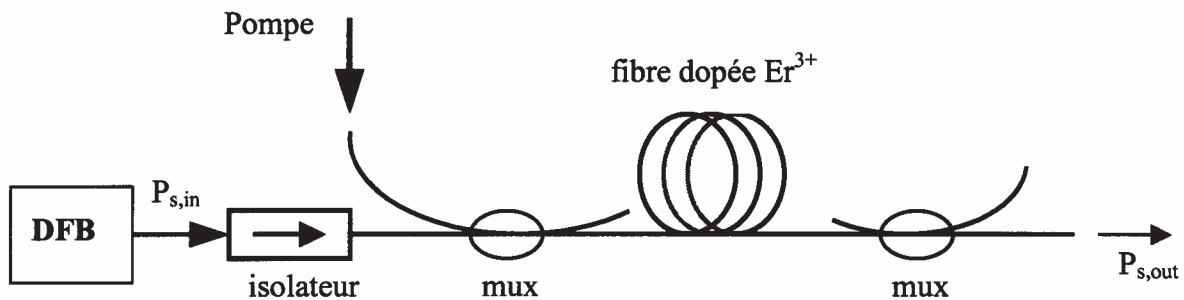


FIGURE 6 – Montage co-propagatif.

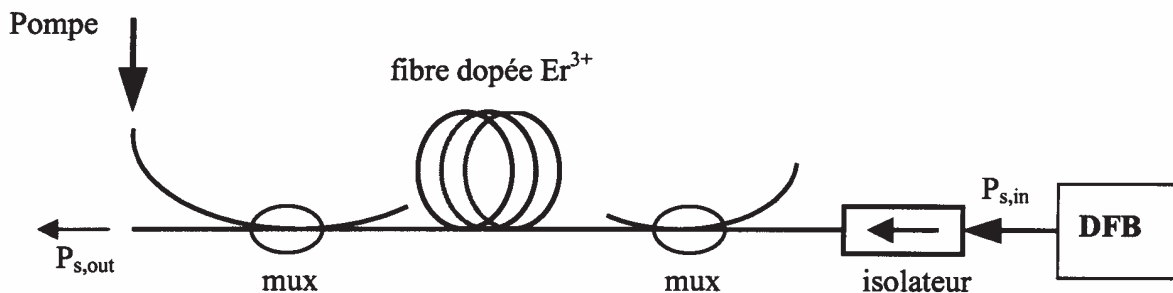


FIGURE 7 – Montage contra-propagatif.

3.2.2 Mesure de gain faible signal

Choisir un courant proche du seuil pour la diode signal et mesurer l'intensité en sortie de la fibre (à la longueur d'onde d'émission de la diode signal grâce au multiplexeur) en fonction du courant dans la diode de pompe en débutant aux alentours du seuil.

→ Que faut-il encore mesurer pour pouvoir en déduire le gain de la fibre. Tracer alors la courbe donnant le gain en dB de la fibre en fonction du courant de pompe. Commentez.

3.2.3 Saturation de gain

On fixe la puissance de pompage.

—> Tracer l'évolution du gain en fonction de la puissance d'entrée du signal en montage co- et contra-propagatif. Le mode opératoire est identique au précédent sauf qu'ici on fixe P_p et on relève le gain en faisant varier la puissance du signal en entrée.

4 Laser à fibre

Le matériel utilisé est identique à la partie précédente, avec en plus :

- Un miroir doré : il est constitué d'une fine couche d'or déposée à l'extrémité d'une fibre optique.
- Un réseau de Bragg : il s'agit d'une fibre optique sur laquelle a été gravée un réseau d'indice (par photoinscription UV). Il agit comme un miroir très sélectif.
- Un coupleur 90-10 qui permet de prélever 90% de l'énergie sur un bras du coupleur et 10% sur l'autre bras aux longueurs d'ondes proches de 1550 nm.

4.1 Source superfluorescente à fibre (SSF)

Nous avons déjà constaté qu'une fibre optique dopée erbium pompée par exemple, à 980 nm à travers un multiplexeur, à un niveau suffisamment élevé, se comporte comme une SSF émettant un signal par ses deux extrémités. Les propriétés spectrales de ce signal sont celles du spectre d'émission spontanée amplifiée, c'est à dire une bande d'environ 60 nm autour de 1,55 μm .

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.1 , l'ion erbium dans la fibre se comporte comme un système à 3 niveaux, il existe donc une longueur de fibre maximale à ne pas dépasser pour éviter le phénomène de réabsorption du signal à partir du niveau fondamental.

Le montage précédent présente cependant un inconvénient car la puissance maximale délivrée par la source est répartie entre ses deux sorties. Pour y palier, il est possible d'utiliser un miroir Rmax ($R \approx 100\%$) large bande (réfléchissant tout le spectre de la source) ajouté à l'une des extrémités. Ce miroir permet de renvoyer la totalité du signal émis à un bout de la fibre dans la fibre elle-même, de l'amplifier lors de sa propagation et de récupérer ainsi un maximum de puissance à l'autre extrémité de la fibre. Ce montage est appelé double passage.

—> Réaliser ce type de montage en plaçant le miroir à l'extrémité P_- (cf figure 5) et comparer les spectres.

4.2 Réseau de Bragg

L'approche la plus simple pour comprendre le fonctionnement d'un réseau de Bragg consiste à considérer la diffraction sur le réseau comme une réflexion sur des plans semi-réfléchissants distant de Λ . C'est ce qu'illustre la figure 8.

Le déphasage entre deux ondes réfléchies par deux plans successifs est :

$$\Delta\phi = \frac{4\pi n\Lambda}{\lambda} \quad (6)$$

Si $\Delta\phi = 2\pi$, ces deux ondes s'additionnent en phase, il y a interférences constructives. Cela a lieu pour la longueur d'onde particulière $\lambda_B = 2n\Lambda$, appelée longueur d'onde de Bragg. A cette longueur d'onde, toutes les ondes réfléchies sur chacun des plans sont en phase. Le coefficient

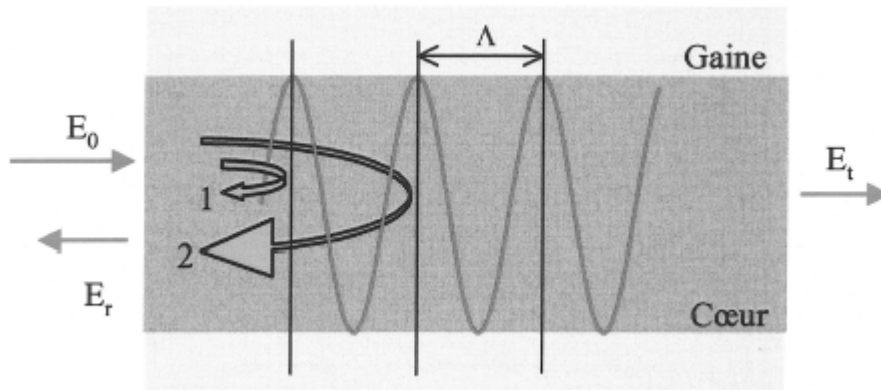


FIGURE 8 – Réflexion des ondes sur des plans semi-réfléchissants

R du réseau est maximum. Lorsque λ est légèrement différent de λ_B , les interférences ne sont plus complètement constructives et R diminue.

Pour caractériser la transmission du réseau, on va l'éclairer sur une gamme de longueur d'onde, pour cela on utilise la source superfluorescente précédente.

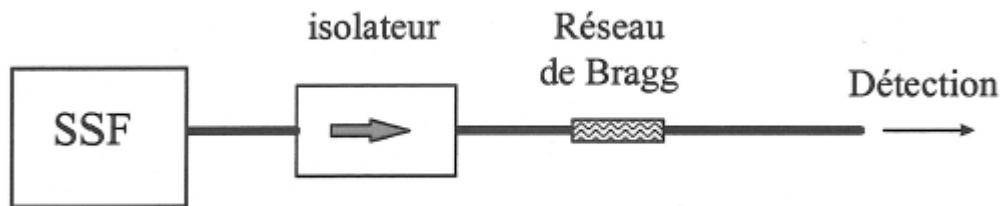


FIGURE 9 – Caractérisation du miroir de Bragg

→ Observer le spectre à la sortie du montage. En déduire la longueur d'onde de Bragg (λ_B) et le coefficient de réflexion du réseau.

4.3 Cavité linéaire

Réaliser la cavité linéaire de la figure (10).

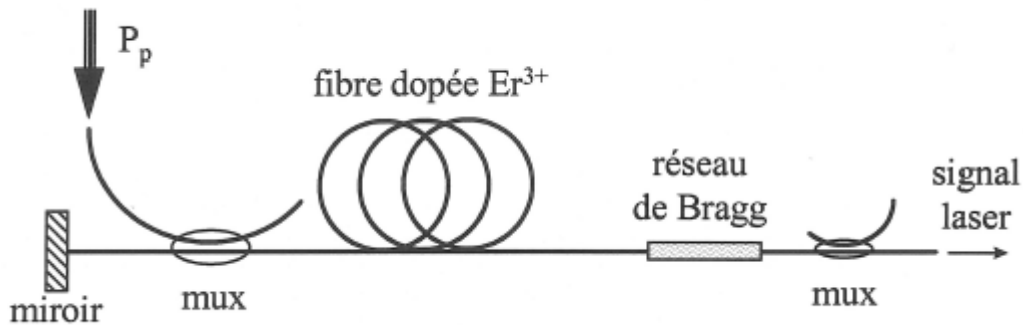


FIGURE 10 – Montage du laser en cavité linéaire

→ Observer son spectre, quelle est la longueur d'onde d'émission ?

4.3.1 Étude statique

→ Mesurer la puissance de sortie en fonction de la puissance de pompage. Tracer la puissance de sortie en fonction du taux de pompage défini par $r = P_p/P_p^{\text{seuil}}$.

4.3.2 Étude du régime transitoire

On module la diode de pompe avec un signal carré à environ 100 Hz. Relier la sortie du laser à la photodiode du boîtier.

→ Quel phénomène peut-on observer ? Expliquer l'origine de son apparition.

4.4 Cavité en anneau

→ Proposer un montage pour une cavité en anneau et tracer la caractéristique du laser ainsi obtenu. Quelle est sa longueur d'onde d'émission ?