

Photonique Expérimentale

Lasers

L1	LASER Nd:YAG pompé par diode laser	(S1.25)	page 1
L2	Diode LASER.....	(S1.29)	page 17
L3	Doublement de fréquence dans des cristaux non linéaires et effet Raman dans une fibre optique	(S1.21)	page 45
L4	Amplificateur et oscillateur laser à fibre ..	(S1.20)	page 55

Règles de fonctionnement du LEnsE

Absences

La présence des étudiant·e·s à toutes les séances de travaux pratiques prévues à l'emploi du temps est obligatoire et impérative. En cas de difficulté majeure, **si un membre d'un binôme est toutefois absent, l'autre doit venir à la séance et faire le TP**. Et, en Optique, chacun des membres du binôme rendra un compte-rendu individuel.

Absence excusée. Justificatif Le justificatif d'absence doit être déposé au secrétariat, les élèves concerné·e·s doivent aussi prévenir directement les responsables du LEnsE du motif de l'absence (à l'avance, si l'absence est prévisible).

Absence excusée. Rattrapage L'élève doit impérativement prendre contact avec les enseignant·e·s de TP pour étudier la possibilité de rattrapage (suivant la disponibilité des enseignant·e·s, du matériel et des salles). L'élève rattrape alors le TP et :

En optique, l'élève rédige un CR qui sera noté. S'il n'est pas possible de trouver une date de rattrapage suite à une impossibilité du service des TP, le TP ne sera ni rattrapé ni noté (la moyenne sera faite sur les notes restantes). Ce TP restera néanmoins au programme de l'examen et l'étudiant·e pourra être interrogé·e sur ce TP lors de l'examen de TP.

En ETI et ProTIS, la synthèse du thème concerné, rédigée par le binôme, devra contenir des résultats des deux séances individuelles (la séance normale et celle de rattrapage).

Si l'élève refuse la date de rattrapage proposée, il ou elle sera considéré·e comme absent·e non excusé·e.

Absence non excusée Toute absence non justifiée entraîne :

En optique, un zéro pour la séance et l'impossibilité de travailler sur ce TP avant la période de révision. En cas d'absences répétées, le responsable d'année interdira à l'étudiant·e de passer l'examen en fin d'année.

En ETI et ProTIS, un zéro pour la note de synthèse concernée.

Retards

Aucun retard n'est acceptable et en cas de retard important (ou de retards fréquents) d'un·e étudiant·e, celui-ci ou celle-ci se verra refuser l'accès au laboratoire. Les conséquences en seront identiques à celles d'une absence non excusée (voir plus haut).

Plagiats

Le plagiat est le fait de s'approprier un texte ou partie de texte, image, photo, données... réalisé par quelqu'un d'autre sans préciser qu'il ne s'agit pas de son travail personnel. On plagie quand on ne cite pas l'auteur des sources que l'on utilise. Exemples de plagiat :

- Copier textuellement un passage d'un livre ou d'une page Web sans le mettre entre guillemets et/ou sans en mentionner la source.
- Insérer dans un travail des images, des graphiques provenant de sources externes (hors énoncé du TP) sans en indiquer la provenance.
- Utiliser le travail d'un·e autre élève et le présenter comme le sien (et ce, même si cette personne a donné son accord !).
- Résumer l'idée originale d'un auteur en l'exprimant dans ses propres mots, mais en omettant d'en indiquer la source.
- Traduire partiellement ou totalement un texte sans en mentionner la provenance.

Tout binôme convaincu de plagiat dans un compte-rendu ou une synthèse de TP se verra attribuer la note de 0/20 à ce TP ou cette synthèse et encourt les sanctions disciplinaires prévues au règlement intérieur.

Respect du matériel et des locaux

Le LEnsE met à votre disposition une très grande quantité de matériel scientifique.

Ces matériels sont très fragiles, sensibles à la poussière, aux traces de doigts, aux rayures, etc. Merci d'en prendre le plus grand soin.

Il est donc formellement interdit d'apporter de la nourriture ou des boissons dans l'ensemble du service (couloirs compris). Merci de veiller aussi à laisser les locaux particulièrement propres (si vos chaussures sont sales, retirez-les et laissez-les à l'entrée !)

Pour toute demande d'accès en dehors des séances de TP, vous devez impérativement (et à l'avance) vous adresser au responsable technique du LEnsE, Thierry AVIGNON ou à Cédric LEJEUNE (bureau S1.18).

.

LASER Nd:YAG pompé par diode laser

2017-2018

Oral

Durant la séance, vous préparerez une présentation orale (5 min) résumant et commentant vos résultats pour les questions 4 à 8.

QUESTIONS PRELIMINAIRES (à faire avant la séance)

P1 Rappelez en quelques phrases les notions d'émission spontanée et de durée de vie du niveau haut d'une transition laser.

P2 Expliquez la notion de stabilité géométrique d'une cavité laser. Pour une cavité formée par un miroir plan et un miroir de rayon de courbure R , quelle est la condition de stabilité de la cavité ?

P3 Rappelez comment les pertes passives peuvent être évaluées à partir de la mesure des seuils d'oscillation laser ou des pentes d'efficacité pour deux coupleurs de sortie.

Introduction

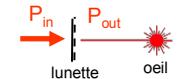
Grâce aux propriétés des diodes laser, les lasers solides pompés par diodes sont très compacts, possèdent une durée de vie qui dépasse 10.000 heures, consomment peu d'énergie électrique, tout en assurant des puissances de sortie élevées et un faisceau de sortie d'excellente qualité optique.

Nous allons au cours de cette séance de TP étudier un laser utilisant les ions néodyme insérés dans une matrice de YAG comme milieu actif. Le laser Nd:YAG pompé par diode laser est historiquement l'un des premiers lasers solides pompé par diode à avoir vu le jour. Il sert maintenant de base à de nombreux produits commerciaux.

Avertissements:

1. Sécurité Laser

TPs LASER PROTECTION OCULAIRE DE L'UTILISATEUR



transmission = 10^{-OD}
où OD : Densité Optique

ex.: lunettes type B
donnée lue sur la monture :
[750 nm ; 850 nm] : OD > 5
⇒ à 808 nm , transmission < 10^{-5}

Classe ≥ 3B :
danger de lésions rétinienne et brûlures
⇒ port des lunettes obligatoire
choisissez un « type » de lunette adapté
(lire sur la monture λ coupée et OD)

type	A	B	C
λ coupées (nm)	1064	1064	1064
		980	980
		808	808
	532		532
		355	355

LASER Nd:YAG pompé par diode PROTECTION OCULAIRE DE L'UTILISATEUR

diode laser de pompe (CW) ~500 mW @ 808 nm



Laser Nd:YAG* (CW ou pulsé) ~100 mW @ 1064 nm

classe 3B :

danger de lésions rétinienne et brûlures
⇒ port des lunettes obligatoire
Ici : lunettes « type » B ou C



- + précautions suivantes :
- ne regardez jamais le faisceau de face.
 - (= ne pas baisser la tête à hauteur du marbre)
 - tournez le dos au laser quand vous prenez des notes
 - retirez tout objet poli (bijou, montre)
 - ramenez à 0 le courant de la diode avant modification du schéma optique

(*doublé : <math><1 \text{ mW}</math> @ 532 nm)

La diode laser de pompage émet « en face avant » environ 500 mW. Vous aurez la surprise de constater qu'avec une telle puissance ce rayonnement à ~810 nm est

visible sur un écran en carton ! **Baisser au minimum le courant de pompage de la diode laser pour effectuer toute modification sur le banc.**

1. Utilisation de la diode laser

Le câble entre l'alimentation et la diode laser ne doit en aucun cas être débranché.

La température de la diode laser est asservie et vous pouvez afficher soit la valeur de consigne, soit la valeur réelle (qui devront être les mêmes si l'asservissement fonctionne bien). On peut alors passer en mode ON et monter progressivement le courant de pompage en vérifiant sa valeur à l'affichage.

Le courant de la diode laser peut être modulé. La tension de commande de modulation doit être réglée entre 0 et 4 V, avant d'être envoyée sur le boîtier d'alimentation (entrée coaxiale située derrière le boîtier d'alimentation).

2. Manipulation des éléments du laser

Tous les éléments et en particulier les miroirs sont fragiles : manipuler avec soin et précaution.

Ranger, avec soin, tous les éléments dans leur boîte, à la fin du TP.

3. Utilisation de la photodiode rapide et du mesureur de puissance

La photodiode rapide Motorola MRD510 utilisée dans ce TP est polarisée en inverse selon le schéma donné sur la figure ci-dessous. La résistance de charge, ajustable de 50 Ω à 1 M Ω , qui ferme le circuit, permet de changer la sensibilité du détecteur et sa bande passante (ou constante de temps).

Celle-ci sera donc ajustée en fonction du temps caractéristique du phénomène optique étudié.

Attention : l'alimentation est une pile de 9 V : **pensez à l'éteindre en partant!**

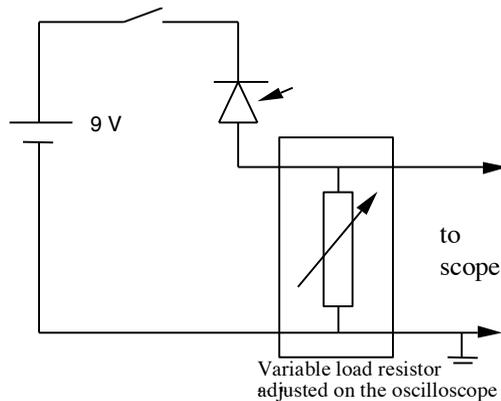


Schéma de câblage de la photodiode

Le mesureur de puissance (« wattmètre ») THORLABS permet de mesurer des puissances du μW au W et cela sur une gamme de longueur qui s'étend du visible jusqu'au proche infra-rouge. Le détecteur étant une photodiode au silicium, sa réponse dépend fortement de la longueur d'onde. **N'oubliez pas de régler la longueur d'onde de mesure à la valeur voulue.**

Il n'y a donc **pas de filtre optique accordable dans un tel appareil** : la mesure de puissance d'un faisceau polychromatique nécessite donc l'emploi de filtres externes à l'appareil pour se ramener au cas précédent (cf. l'emploi du filtre RG1000 dans la suite du texte).

On reportera les signaux observés à l'oscilloscope au choix en utilisant une feuille de papier comme en TP d'électronique ou encore en faisant une photo avec un téléphone.

Dans tous les cas, pour les courbes qui figureront dans le compte-rendu, on précisera par un titre le signal dont il s'agit et on renseignera les axes et échelles.

I. Caractéristiques du pompage

Il s'agit d'un pompage longitudinal, c'est-à-dire que le faisceau de la diode est colinéaire au faisceau de la cavité laser. Ce type de pompage est plus efficace que le pompage transverse (meilleure superposition des waists de pompe et de cavité) mais requiert aussi plus d'éléments optiques et de réglages.

I.1. Réglage de la collimation de la diode de pompage et préréglage de la cavité laser

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 1.

La figure 2 précise la géométrie d'émission de la diode laser Spectra Diode Labs (SDL) utilisée pour le Nd:YAG ainsi que les composants optiques de collimation, d'anamorphose et de focalisation du faisceau de la diode laser. Le rapport d'anamorphose est de 6. La fiche technique donnant les autres caractéristiques de la diode SDL est également reproduite.

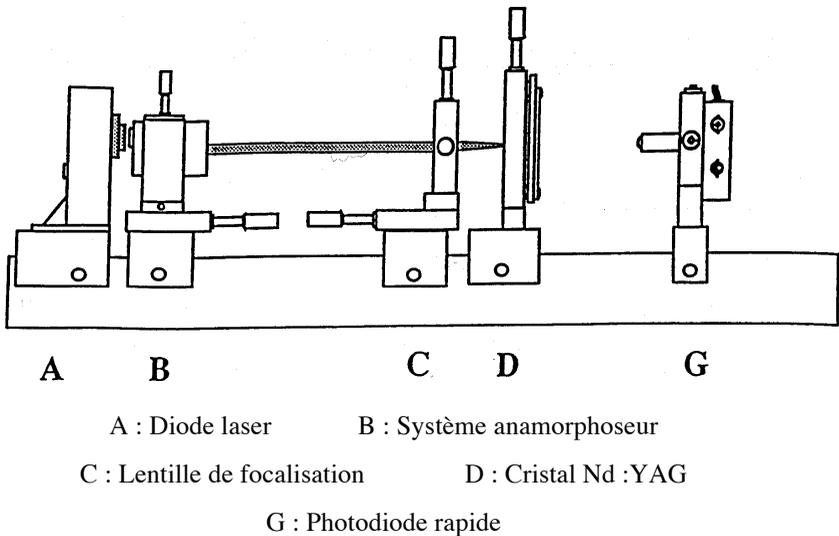


Fig. 1 : Montage pour les mesures d'absorption

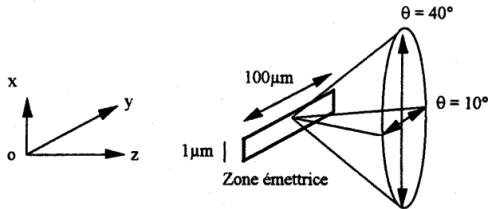


Fig. 2a. : diagramme d'émission de la diode laser SDL utilisée pour le pompage du Nd:YAG

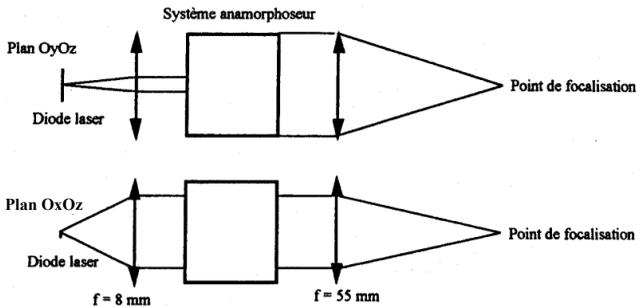


Fig. 2b. : schéma de l'optique de pompage pour le YAG

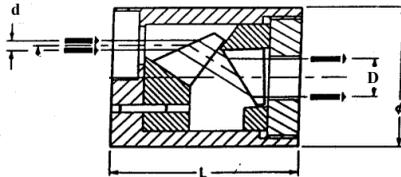


Fig 2c: détail du système anamorphoseur (anamorphose $D/d = 6$)

Allumer l'alimentation de la diode laser. Vérifier que le courant maximum est à 1.01 A. Passer en mode ON et monter progressivement le courant à sa valeur max. Vérifier que la LED de l'alimentation de la diode ne clignote pas. Sinon baisser légèrement le courant.

Régler d'abord la position de l'ensemble collimateur + anamorphoseur, en observant le rayonnement sur la cible, de façon à obtenir un faisceau bien **collimaté et parallèle** au banc du laser. Ce réglage doit être fait très soigneusement pour faciliter tous les réglages ultérieurs. En particulier, assurez-vous que votre faisceau collimaté tombe bien sur le détecteur photodiode sur toute la longueur du banc optique.

Réglage préliminaire des optiques :

Dans la suite du TP, nous utiliserons deux miroirs et un barreau de Nd :YAG. Afin de prérégler ces optiques de façon à ce que leurs faces soient perpendiculaires au faisceau de la diode de pompe, nous vous proposons de procéder de la façon suivante pour chacune des optiques l'une après l'autre. Positionner l'optique à régler sur le banc après l'ensemble collimateur + anamorphoseur de la diode et régler l'orientation de l'optique de telle sorte que la réflexion sur cette dernière soit colinéaire au faisceau incident de la diode (on pourra centrer cette réflexion sur le trou de sortie de l'ensemble collimateur + anamorphoseur).

Oter la dernière optique alignée du banc.

I.2. Optimisation de l'absorption

Placer la lentille de focalisation sur le banc. Optimiser sa position transverse afin que le faisceau reste parallèle au banc du laser.

La longueur d'onde de la diode de pompage varie avec la température et le courant de pompage (voir TP diode laser).

On se placera dans l'ensemble du TP à une température fixe notée sur le boîtier de la diode.

En effet, la longueur d'onde d'émission de la diode change d'environ $0,3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. Nous considérerons que cette température est un optimum pour le pompage du Nd:YAG à 808 nm.

Q2. Tracer « rapidement ¹ » la caractéristique puissance de la diode laser de pompe juste après la lentille de focalisation² (veillez à ce que toute la tache lumineuse soit détectée) en fonction du courant d'alimentation, i.e. la caractéristique « $P_{\text{pompe utile}}(I)$ ».

Cette caractéristique vous servira durant toute la suite du TP puisque, à toute instant, la connaissance de I vous donnera celle de la puissance de pompe « utile », c'est-à-dire **disponible à l'entrée** du barreau de Nd :YAG.

Positionner le cristal de Nd:YAG au foyer de la lentille. Optimiser la position du barreau par rapport au point de focalisation de la pompe: le point rouge sur le cristal devient alors blanc brillant (effet non linéaire dû à la forte intensité).

¹ Faites cette mesure pour des courants d'alimentation de 0.3 A à 1 A par pas de 0.1 A.

² **On ne placera pas** le détecteur au point focal pour ne pas le saturer (ou risquer de l'endommager...).

Q3. Mesurer la puissance transmise par le barreau de Nd:YAG pour un courant de 1 A et en déduire l'absorption de la pompe. Estimer le taux de dopage du cristal à partir de votre mesure et des données du tableau ci-dessous.

Longueur du cristal	5 mm
Section efficace d'absorption à 808 nm	$7 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$
Densité volumique d'ions Nd³⁺ pour un cristal dopé 1%	$1,36 \cdot 10^{20} \text{ atomes/cm}^3$

Données sur le cristal laser

II. Caractéristiques du milieu amplificateur: mesure de la fluorescence

Il est possible, en modulant le courant d'alimentation de la diode laser par un signal carré, d'observer la fluorescence des ions néodyme (émission spontanée).

Baisser le courant de pompage au minimum.

Régler d'abord le générateur basse fréquence : celui-ci doit délivrer un signal carré positif de 4 V (max.), de fréquence inférieure à 500 Hz. **Faites vérifier votre réglage avant de poursuivre.** Appliquer ensuite ce signal sur l'entrée "Analog input" du boîtier d'alimentation de la diode laser.

Placer le filtre RG 1000 (caractéristiques données en annexe) entre la photodiode rapide et le barreau de YAG.

Oral : Vous préparerez une présentation orale (5 min) résumant vos résultats pour les questions 4 à 8.

Q4. Quel est le rôle de ce filtre?

Observer et relever le signal obtenu aux bornes de la résistance de charge de la photodiode à l'oscilloscope. Ajustez la valeur de la résistance de charge choisie en « optimisant » le signal observé.

Q5. Rappeler brièvement pourquoi et comment varient la sensibilité et la bande passante du détecteur avec la résistance de charge. Quelle est alors la constante de temps de ce système de détection? Décrivez comment, en pratique, vous choisissez la résistance de charge.

Remarque : pour justifier les ordres de grandeurs trouvés, la capacité totale à prendre en compte (photodiode + câble + oscilloscope) est de l'ordre de 250 pF.

Q6. Exploiter le signal obtenu aux bornes de la résistance de charge à l'oscilloscope : mesurer le temps caractéristique par l'une des méthodes classiques (pente à l'origine, $t_{10,90} = 2,3\tau$, etc.). Ce temps correspond à la durée de vie du niveau excité (${}^4F_{3/2}$). Comparer la valeur obtenue par rapport à la valeur théorique qui est donnée dans le tableau ci-après (« Laser properties of Nd :YVO4 vs Nd :YAG »). Evaluer l'incertitude sur la mesure effectuée.

Q7. Pourquoi le Nd:YAG est-il un excellent candidat pour fabriquer un laser ?

Q8. Enlevez le filtre RG 1000 et interprétez le signal observé.

III. Effet laser à 1.06 μ m

Après avoir baissé le courant de la diode laser, placer sur le banc le miroir de sortie de la cavité de réflectivité $R_{\max} = 99,95\%$ à 1064nm, longueur d'onde de l'émission laser. Il s'agit d'un miroir sphérique de rayon de courbure $R_c = 100$ mm. La face d'entrée du cristal de Nd:YAG est recouverte d'un traitement diélectrique réfléchissant (R_{\max}) à 1064 nm (placez-la dans le bon sens...).

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 3.

Positionner correctement les éléments de la cavité laser (choisir une longueur de cavité stable) et remonter le courant de pompage de la diode laser à 1 A.

Le rayonnement laser est invisible (1064 nm). Un petit carton Thorlabs (convertisseur infrarouge) placé sur le trajet du faisceau permet de le mettre en évidence : on observe une petite tache rouge.

Chercher à obtenir un mode TEM_{00} . Optimiser ensuite la puissance de sortie du laser en améliorant le réglage de la cavité. Pour cela, placer le filtre adéquat en sortie de cavité laser.

Q9. Mesurer la puissance de sortie du laser pour un courant de pompage de 0.3 A à 1 A par saut de 0.1 A. En utilisant les mesures faites au I.3, tracer la puissance du laser Nd:YAG en fonction de la puissance de pompe. On n'oubliera pas de prendre en compte la transmission du filtre RG1000.

Q10. Reproduire le même type de mesure avec le miroir $R = 97\%$. Déduire les pertes passives de la cavité à partir de ces deux mesures en comparant les seuils ou les pentes d'efficacité laser et en supposant que les pertes passives sont identiques.

Q11. Calculer et comparer les 5 rendements suivants, pour le laser avec le miroir $R=97\%$:

- Le rendement différentiel de pompage (pente au-delà du seuil de la puissance émise à 1.064 μ m en fonction de la puissance émise à 810 nm)
- Le rendement de pompage (puissance maximale émise à 1064 nm en fonction de la puissance utilisée à 808 nm)
- Le rendement global (puissance optique/puissance électrique) du laser infrarouge réalisé.
- Le rendement quantique (rapport entre le nombre de photons émis à 1064 nm sur le nombre de photon émis à 808nm)

- Le défaut quantique (1 - rapport entre l'énergie d'un photon à 1064 nm sur l'énergie d'un photon à 808 nm).

Expliciter l'intérêt de chacun de ces rendements.

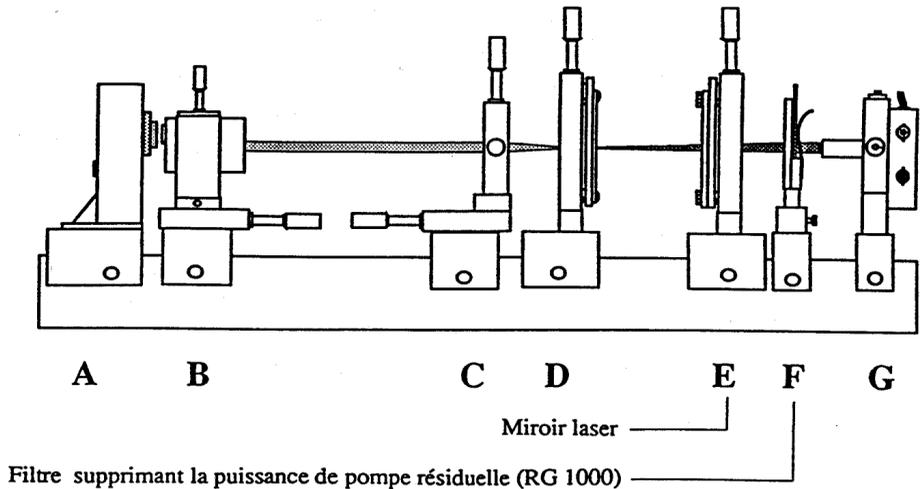


Fig 3 : Réglage du résonateur

laser crystal	Nd doped (atm%)	emission cross section σ (10^{-19}cm^2)	lifetime τ (10^{-6}s)
Nd:YVO ₄ (a-cut)	1.1	25	90
Nd:YVO ₄ (c-cut)	1.1	7	90
Nd:YAG	0.85	6	230

Tableau 1 : Laser properties of Nd :YVO4 vs Nd :YAG

[Koechner : Solid-state laser engineering, Springer, 2013.]

IV. Fonctionnement en mode déclenché (Q-switch)

Le cristal de LiF^{2-} est un absorbant saturable à 1064 nm: pour une densité de puissance optique suffisamment élevée, son absorption sature et sa transmission devient proche de 1. Il permet de réaliser un fonctionnement du laser en mode déclenché de manière passive.

Ce cristal est conservé dans une boîte noire car il se détériore lentement sous l'action des rayons UV. On le rangera donc rapidement dans sa boîte dès la manipulation terminée.

Après avoir baissé le courant dans la diode laser, placer dans la cavité le cristal de LiF^{2-} . Remonter le courant dans la diode laser et retrouver l'effet laser (il doit être visible avec le carton Thorlabs). Pour éviter les effets d'interférence entre les faces, le cristal de LiF^{2-} a été taillé sous la forme d'un dièdre d'angle faible dont l'arête est perpendiculaire aux deux trous de fixation de la monture (donc horizontal). C'est pourquoi lorsque vous le placez dans la cavité, l'effet laser a disparu.

Procédure de réglage : optimisation de la fluorescence à 1064 nm

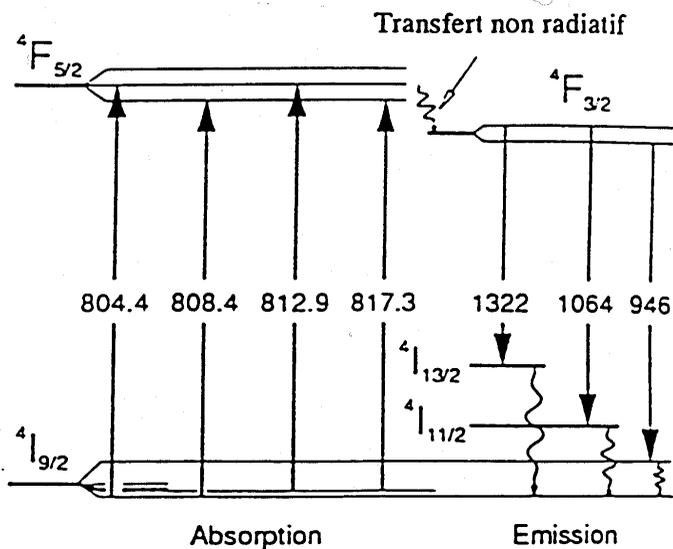
Optimiser le signal détecté (quelques μWatts) en jouant sur les vis de la monture du LiF^{2-} (essentiellement ceux réglant la rotation) et sur le miroir de sortie jusqu'à ré-obtenir l'effet laser.

Q12. Rappelez brièvement le principe de fonctionnement d'un laser déclenché. Quel est le principe de fonctionnement de l'absorbant saturable ? Comment permet-il la production d'impulsions laser ?

Q13. Observer et relever le signal à l'oscilloscope. Préciser la valeur de résistance de charge utilisée pour le détecteur. Optimiser les réglages de la cavité (Puissance moyenne, taux de répétition) en justifiant vos choix.

Q14. Déterminer l'énergie par impulsion et la puissance crête. Justifier l'intérêt des lasers impulsionnels par rapport au laser continu.

ANNEXE :



Niveaux d'énergie du Nd : YAG mis en jeu lors du pompage optique par diode laser (les chiffres sont en nm).

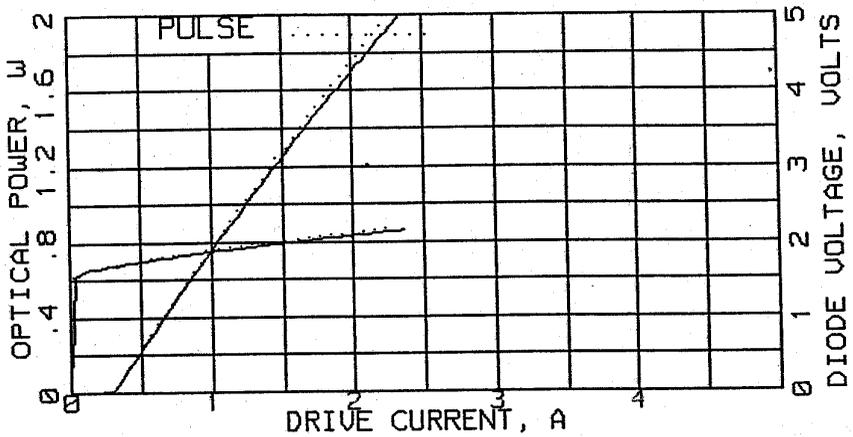
Longueur d'onde (nm)	532	808	1064
Transmission RG1000	10^{-5}	10^{-4}	0,65

Transmission du filtre coloré

DEVICE TYPE: SDL-2362-P1
 DATE: 16 JUNE 1998

SERIAL NUMBER:
 TIME: 10:27

PARAMETER	PULSED	CW	UNITS
THRESHOLD	.24	.22	A
DIFF. Q. E.	66	63	%
SLOPE EFF.	1.00	.96	W/A
V AT 1.5 A	2.0	2.0	VOLT:
RESISTANCE	.209	.209	OHMS
I AT 2.00 W	2.255	2.346	A
V AT 2.00 W	2.18	2.15	V
T'MISTOR RES	9.8		KOHMS
WAVELENGTH		811	nm
MONITOR GAIN:	1.9 mA/W		
TEST TEMP = 25 C	PULSE: WIDTH =	15 usec,	



Datasheet de la diode de pompe SDL

DIODE LASER

2017-2018

Oral

Durant la séance, vous préparerez une présentation orale (5 min) résumant et commentant vos résultats pour les questions 13 et 14.

QUESTIONS PRELIMINAIRES (à faire avant la séance)

P1 Expliquez en une phrase le phénomène de seuil laser.

P2 Dans une cavité laser, comparez le gain non saturé (« petit signal »), le gain saturé, et les pertes de la cavité pour trois cas différents : sous le seuil, précisément au seuil, au-dessus du seuil.

P3 Donnez les caractéristiques du spectre d'une source laser monomode longitudinal dont on module la puissance ou la fréquence (i.e. la longueur d'onde). Vous pourrez vous aider de l'annexe 1.

P4 Rappelez le principe de fonctionnement d'un analyseur de spectre Fabry-Perot (cf TP He-Ne 1A).

But du TP

L'objectif de cette séance de travaux pratiques est de mettre en évidence quelques propriétés particulières des diodes laser. Les manipulations seront centrées sur l'évolution des performances avec le courant d'alimentation et la température de la diode laser. Dans un deuxième temps, on analysera le spectre d'émission de la diode laser et son évolution en fonction du courant et de la température. Puis on étudiera son spectre lorsqu'on module le courant à haute fréquence. La diode laser étudiée est une diode continue, monomode transverse, émettant au voisinage de $\lambda = 794$ nm. Elle est alimentée en courant, et régulée en température.

A. Principe des lasers à semi-conducteurs

Les diodes laser sont des sources laser à base de matériaux semi-conducteurs. Plus précisément, le milieu amplificateur des diodes laser est une jonction PN polarisée en direct, c'est à dire alimentée par un courant direct de l'anode vers la cathode (voir figure 1). Les diodes laser sont réalisées en dopant une fine couche déposée sur un substrat cristallin. Les faces clivées du cristal semi-conducteur de part et d'autre de la jonction constituent les miroirs de la cavité laser. Sous l'effet d'un courant électrique, un processus d'émission de lumière se produit à l'interface entre les couches dopées respectivement P et N, par recombinaison des électrons de conduction porteurs majoritaires dans la couche N avec les trous de valence, majoritaires dans la zone P.

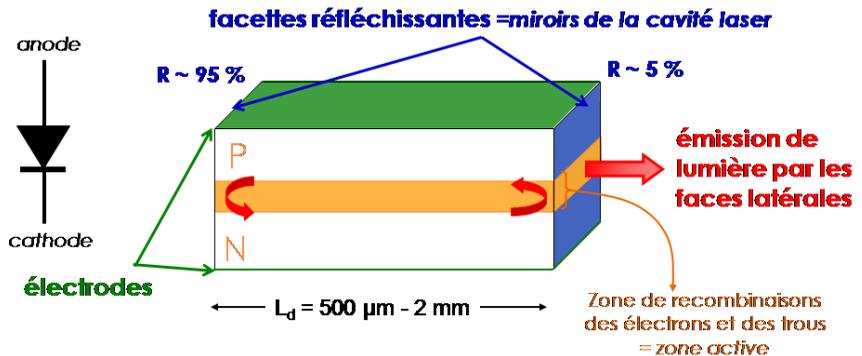


Figure 1 : Structure d'une diode laser

Les photons émis ont alors une énergie voisine de l'énergie de gap du matériau semi-conducteur de la jonction. Au-dessus du seuil, la puissance lumineuse émise par le laser est donc proportionnelle au courant d'alimentation.

Une particularité des diodes laser est la très large plage spectrale sur laquelle l'émission de lumière peut se produire, de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Ceci a pour conséquence une large accordabilité de la longueur d'onde d'émission, comme on le verra au cours de ce TP.

Plusieurs propriétés de la physique des semi-conducteurs expliquent cette large accordabilité des diodes laser :

1 - La courbe de gain, très large, est due à l'existence de bandes et non à des niveaux d'énergie discrets. Cette courbe de gain se déduit de la statistique de répartition des porteurs dans les bandes de valence et de conduction, dictée par la statistique de Fermi-Dirac. Dans ce cas, l'élargissement du gain est de type homogène.

2 - L'énergie de gap E_g du matériau semi-conducteur dépend de la température ; plus précisément, E_g diminue quand la température augmente. Autrement dit, une élévation de la température déplace la courbe de gain vers les grandes longueurs d'onde (voir figure 2).

3 - La température influence directement la longueur de la cavité et l'indice de réfraction effectif du milieu amplificateur. Ainsi, une élévation de la température, entraînant une dilatation de la longueur optique de la cavité, a pour conséquence un décalage de la longueur d'onde d'émission.

4 - La puissance électrique qui n'est pas convertie en puissance lumineuse (rendement de conversion électrique/optique de l'ordre de 50%) est convertie en chaleur. Ainsi, la circulation d'un courant électrique induit un échauffement de la diode, et donc une modification de la longueur d'onde d'émission.

On peut donc modifier la longueur d'émission en changeant soit directement la température, soit le courant d'alimentation.

Enfin, contrairement aux autres lasers (à gaz notamment), le gain d'une diode laser n'est pas imposé uniquement par les propriétés spectroscopiques du milieu amplificateur. Le gain dépend du courant d'alimentation et de la température. La figure 2 montre des courbes de gain correspondant à différents courants et températures. Comme dans tous lasers, l'effet laser se produit à condition que le gain non saturé dépasse les pertes. La figure 2 montre également que le seuil d'oscillation laser et la longueur d'onde d'émission augmentent avec la température.

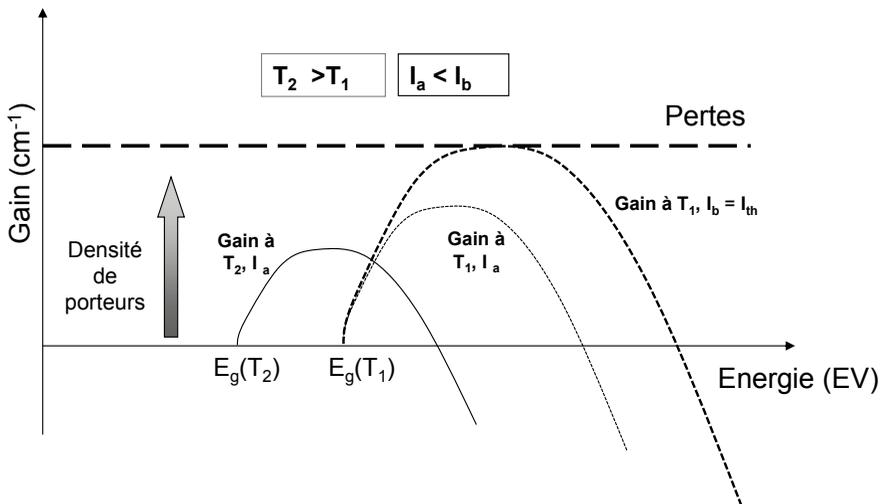


Figure 2 : Evolution de la courbe de gain d'une diode laser en fonction de l'énergie des photons selon les valeurs du courant de pompage et de la température.

Une autre propriété particulièrement intéressante des diodes laser est la possibilité de moduler à très haute fréquence le flux émis en modulant directement le courant de pompe. La bande passante de modulation des diodes laser est typiquement de quelques GHz, ce qui explique leur utilisation pour les télécommunications optiques haut débit (même si l'emploi de modulateurs externes devient nécessaire au-delà de 10 Gbit/s). Les diodes lasers sont également utilisées en spectroscopie ou pour stabiliser d'autres lasers.

Dans la deuxième partie de ce TP, on modulera à fréquence élevée le courant d'alimentation de la diode et on constatera que cette modulation du courant provoque une modulation du flux émis, mais aussi du spectre de la diode laser.



Figure 3 : Exemples de diodes laser « packagés » :
(gauche) monture TO,
(droite) monture C (C-mount).

B. Description du montage

1. Contrôle de la diode laser

Un driver de diode permet de piloter la diode laser. Il contient à la fois une **régulation de température** et un **générateur de courant**. La procédure de réglage du driver est affichée en dessous du boîtier.

- **Régulation de température :**

La diode laser est montée sur un bloc de cuivre régulé en température au moyen d'un élément Peltier : il s'agit d'un dispositif thermoélectrique à base de semiconducteur qui impose une différence de température ΔT entre ces deux faces en fonction du courant qui le traverse. En particulier, ce dispositif est à même de réchauffer ou de refroidir le support de la diode laser, selon le signe du courant qui le commande. Le courant maximal que supporte l'élément Peltier est de 2A.

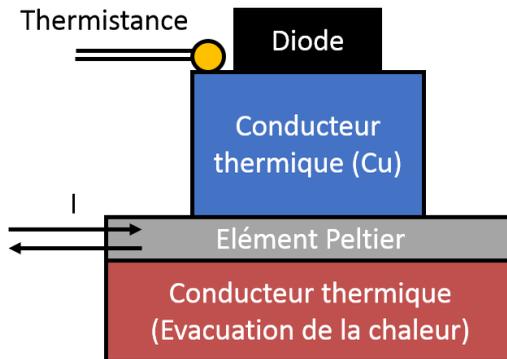


Figure 4 : Schéma de principe du montage de régulation en température de la diode laser

Une thermistance mesure la température du boîtier : c'est une résistance dont la valeur dépend de la température. Celle qui est utilisée dans ce montage voit sa résistance diminuer lorsque sa température augmente, et est proche de 10 k Ω à température ambiante. La courbe d'étalonnage de la thermistance est donnée en annexe.

Le contrôleur de température du driver réalise l'asservissement de la température de la diode en contrôlant le courant d'alimentation du Peltier pour compenser les fluctuations thermiques mesurées par la thermistance, et ainsi imposer une température constante

- Fixez la température de consigne (T_{set}) grâce au potentiomètre **ADJUST** de la régulation de température, par l'intermédiaire de la valeur de la résistance de consigne lue sur l'écran du contrôleur. Restez toujours dans la gamme de fonctionnement de la diode laser, soit 10°C - 50°C.
- Vérifiez que la température de la diode (T_{act}) est stationnaire avant d'alimenter celle-ci en courant.

- **Générateur de courant :**

Les diodes laser sont des composants simples d'utilisation, mais très fragiles d'un point de vue électrique. En particulier, elles supportent très mal les variations brutales de courant et le dépassement du courant maximal autorisé, même pendant un temps très court. La diode est alimentée par un générateur de courant stabilisé, protégé des parasites du secteur. Le courant d'alimentation maximal est limité à 150 mA. La connexion électrique étant faite à la cathode de la diode, le courant injecté est négatif, ce qui correspond bien à une alimentation en direct de la diode.

LE GÉNÉRATEUR DE COURANT DOIT TOUJOURS ETRE RAMENÉ A ZÉRO AVANT D'ETRE ALLUMÉ OU ETEINT : NE PAS ETEINDRE BRUTALEMENT LA DIODE À L'AIDE DU BOUTON DE L'ALIMENTATION OU DU TABLEAU ÉLECTRIQUE DE LA MANIP.

EN REVANCHE, A LA FIN DU TP, ON LAISSERA LE POTENTIOMETRE FIXANT LA TEMPERATURE A UNE VALEUR CORRESPONDANT A L'AMBIANTE (par ex. 10 kΩ pour 25°C).

- Augmenter progressivement le courant d'alimentation (I_{LD}) de la diode laser grâce au potentiomètre ADJUST.
- Vérifier qu'elle émet une lumière rouge avec une carte photosensible dans l'infra-rouge.

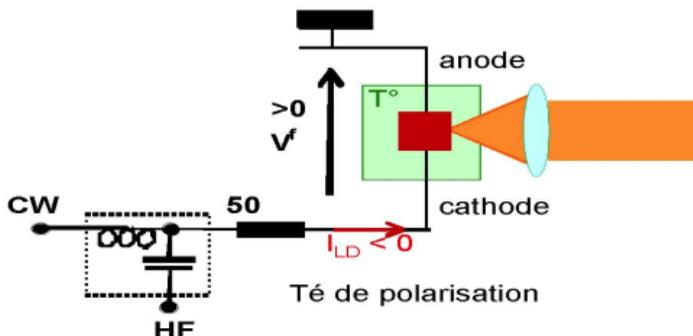


Figure 5 : Câblage électrique de la diode laser ;
alimentation courant continu + modulation HF

- **Générateur de fonctions**

La modulation haute fréquence du courant de la diode laser est réalisée par un « synthétiseur » (générateur de fonction sinusoïdale) délivrant un signal sinusoïdal

de fréquence variable dans la gamme 1 Hz - 1,2 GHz, et de puissance électrique comprise entre -127 dBm et + 13 dBm (soit $2 \cdot 10^{-13}$ mW et 20 mW). La modulation de la diode laser est effectuée au travers d'un Té de polarisation, qui superpose le signal modulé au courant d'alimentation continu, en isolant parfaitement l'un et l'autre. Le schéma de principe du câblage électrique de la diode est représenté en Figure 5. **La modulation de courant ne sera appliquée que dans la dernière partie (cf. § D) de cette manipulation.**

2. Le montage optique

La caractérisation de la diode laser se fera grâce à l'utilisation de plusieurs instruments :

- Un mesureur de puissance.
- Un analyseur de spectre **large bande – moyenne résolution** (basé sur un monochromateur à réseau mobile suivi d'une barrette CCD), appelé par la suite **OSA** (Optical Spectrum Analyser).
- Un analyseur de spectre **bande étroite– haute résolution** (un filtre accordable constitué d'un interféromètre Fabry-Perot confocal suivi d'une photodiode unique), appelé par la suite **analyseur Fabry-Perot**, sans confusion avec le précédent.
- Une photodiode rapide.

Les différents éléments sont décrits en détail à l'intérieur des paragraphes correspondant à leur utilisation, ainsi que les réglages et/ou les précautions associées à leur usage.

C. Caractérisation statique de la diode laser

ATTENTION ! LES DIODES LASER SONT DES COMPOSANTS FRAGILES, SENSIBLES EN PARTICULIER AUX DECHARGES ÉLECTROSTATIQUES. NE TOUCHEZ JAMAIS LA DIODE LORSQU'ELLE EST ALIMENTÉE, NE LA DEBRANCHEZ PAS DE SON ALIMENTATION DE COURANT.

NE REGARDEZ PAS LE FAISCEAU ISSU DE LA DIODE DIRECTEMENT À L'ŒIL

(~20 mW max. @ 795 nm).

Nous allons dans cette partie mesurer la puissance lumineuse émise par la diode en fonction de son courant d'alimentation, pour plusieurs températures de fonctionnement, et observer l'évolution du spectre d'émission.

- Augmenter progressivement le courant d'alimentation (I_{LD}) de la diode laser grâce au potentiomètre **ADJUST**.
- Vérifier que la diode émet un faisceau collimaté avec une carte photosensible dans l'infrarouge.

1. Caractéristique $P_{opt} = f(I)$

La puissance lumineuse émise par la diode laser est mesurée à l'aide d'un détecteur photovoltaïque étalonné à la longueur d'onde de la diode. La mesure s'effectue directement en Watts.

L'isolateur optique placé après la diode laser est un dispositif, aussi appelé diode optique, qui permet d'isoler la diode laser de toute lumière réfléchie (ou issue indépendamment) du montage aval qui pourrait perturber son comportement (contre-réaction ou « feed-back » optique). Vous remarquerez sur le côté du

dispositif la flèche qui indique le sens d'utilisation de l'isolateur. C'est un élément polarisant et ne transmet donc qu'une direction de polarisation.

Remarque : l'émission de la diode est polarisée linéairement suivant le plan de la jonction.

Placez le détecteur juste derrière l'ensemble {diode+isolateur}, dans le faisceau collimaté, en veillant à ce que la cellule détecte l'ensemble du faisceau.

Q1 Tracez (rapidement) les courbes de la puissance lumineuse émise P_{opt} en fonction du courant d'alimentation de la diode, pour plusieurs valeurs de la température (par exemple $T = 25^\circ$ et 40°C).

Q2 Déduisez de ces courbes une valeur du courant de seuil I_s à chaque température. Vous expliquerez de quelle façon vous définissez ce courant, et préciserez comment il varie avec la température. En vous aidant de la courbe d'évolution du gain donnée en figure 2, vous expliquerez cette variation.

Q3 Évaluez la pente de la caractéristique au-dessus du seuil à partir des mesures précédentes, c'est-à-dire l'efficacité optique/électrique (en mW/mA), aux températures fixées.

2. Spectre d'émission

Le spectre d'émission de la diode laser est analysé grâce à l'OSA.

- **Évolution du spectre de la diode avec le courant et la température :**

Ramenez la longueur d'onde centrale de l'OSA à ~ 795 nm. Alimentez la diode laser autour de $I = 75$ mA et à $T_0 = 25^\circ\text{C}$. Injectez à présent le faisceau issu de la diode laser dans la fibre d'entrée de l'OSA au moyen d'une lentille de focalisation.

Q4 En considérant une cavité laser de 0,5 mm de long et un indice de réfraction de 3,7 pour les semi-conducteurs constituant la diode laser, calculez son intervalle spectral libre (en nm). Comparez cette valeur à largeur de gain typique d'une diode laser (~ 10 nm). Commentez.

Q5 Observez le spectre d'émission de la diode laser. Assurez-vous d'obtenir un rapport signal sur bruit suffisant pour observer des pics d'émission parasites autour du pic laser (pour cela le paramètre Video Bandwidth peut-être adapté).

Donnez la longueur d'onde d'émission laser.

Combien y a-t-il de modes longitudinaux qui oscillent ? Le gain est-il homogène ou inhomogène ? Commentez.

Q6 Interpréter le changement global du spectre d'émission laser en dessous et au-dessus du seuil, et donnez l'origine des pics parasites. En déduire l'intervalle spectral libre expérimental de la cavité laser puis sa longueur. Comparez avec la question 4.

Q7 Expliquez l'origine des variations (linéaires) de la longueur d'onde d'émission λ avec la température et le courant de la diode.

Q8 Mesurez l'évolution de la courbe $\lambda(I)$, au-dessus du seuil. La variation de la longueur d'onde est-elle linéaire et régulière ? Repérez la position des éventuels sauts de modes. Quelle est leur origine ?

Q9 Mesurez le coefficient de variation $\left(\frac{d\lambda}{dI}\right)_{I_0}$ (sur une plage linéaire !)

autour de $I = 75 \text{ mA}$ (en pm/mA).

Placez-vous à un courant d'alimentation $I_0 = 75 \text{ mA}$, et faites à présent varier la température de la diode laser dans la gamme $10^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ dans le sens croissant uniquement.

Q10 Observez les sauts de modes et donnez leur nombre (pas besoin de tracer la courbe $\lambda(T)$). Quelle est la plage de longueur d'onde couverte ?

Q11 Mesurez le coefficient de variation $\left(\frac{d\lambda}{dT}\right)_{I_0}$ (sur une plage linéaire !)

autour

de

$T = 25^\circ\text{C}$ (en $\text{nm}/^\circ\text{C}$), $\pm 2^\circ\text{C}$ suffisent par pas de 1°C .

Q12 Concluez quant à la manière la plus efficace d'ajuster **précisément** et sur une **grande plage** la longueur d'onde d'une telle diode laser.

D. Modulation rapide d'une diode laser

En modulant le courant injecté dans la diode, la densité de porteurs excités dans le semiconducteur est modifiée. La modulation est alors transmise à la puissance laser émise. La dynamique des porteurs étant très rapide (le temps de vie typique des porteurs est de l'ordre de la nanoseconde) les bandes passantes de modulation atteignables sont de quelques GHz. Ces très grandes bandes passantes et la simplicité de mise en œuvre, ont été à l'origine de l'intérêt des diodes lasers dans le domaine des télécommunications optiques. Jusqu'à des débits de 2,5 Gbits/s, l'information transmise est obtenue par la modulation directe de la diode

laser, et ce n'est qu'assez récemment, avec l'apparition des standards de modulation à 10 Gb/s, voire 40 Gb/s, que des solutions alternatives ont été mises en place par modulation de puissance externe.

Le courant modulé, généré par un synthétiseur (cf § suivant), est injecté par l'intermédiaire du Té de polarisation (cf. Figure 5). Une photodiode rapide en silicium (bande passante = 1,5 GHz sur 50 Ω), de type PIN, permet de visualiser directement la modulation d'intensité de la lumière émise par la diode laser, dans la bande passante de l'oscilloscope (mettre la voie de l'oscilloscope en 50 Ω).

1. Modulation du courant d'alimentation de la diode

La modulation étant directement appliquée sur la cathode de la diode laser, il est essentiel de veiller à ce que le courant d'alimentation global (continu + modulé) reste négatif pour ne pas risquer de détruire la diode par un courant positif (polarisation inverse) trop important.

- **Générateur de fréquence (« synthétiseur »)**

Le générateur de fréquence délivre une modulation sinusoïdale, de fréquence très précise. Les différents réglages du signal de modulation (ici, fréquence et puissance) se font grâce au bouton à droite de l'écran, après avoir sélectionné respectivement **FREQUENCE** ou **AMPLITUDE**. La puissance délivrée par le générateur est mesurée en dBm :

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log P_{mW}$$

La résistance de sortie du générateur est de 50Ω ; dans le souci d'adapter les impédances, la diode laser est montée en série avec une résistance de 50Ω ¹. L'amplitude Δi de la modulation de courant appliquée à la diode est donc reliée à la puissance délivrée par le générateur par ² :

$$\Delta i = \sqrt{2} \times \sqrt{\frac{P_{(W)}}{50 \Omega}}$$

Ainsi, une modulation sinusoïdale de puissance 13 dBm (20 mW) correspond à une modulation de courant de ± 28 mA (amplitude pic) au travers de 50Ω .

ATTENTION : N'APPLIQUEZ LA MODULATION QUE LORSQUE LA DIODE EST ALIMENTÉE EN CONTINU ; VÉRIFIEZ AU PRÉALABLE QUE LA SOMME DES CONTRIBUTIONS DES COURANTS CONTINUS ET MODULÉS APPLIQUÉS A LA DIODE LASER RESTE SUPÉRIEURE AU SEUIL DE L'ÉMISSION LASER.

Mesure sur la photodiode rapide :

Appliquez à la diode laser (préalablement alimentée en direct par un courant continu) une modulation de forte amplitude (+10 dBm environ), à la fréquence $F_m = 250$ MHz. Observez à l'oscilloscope le signal détecté par la photodiode rapide.

¹ Le câble utilisé a aussi une impédance de 50Ω , et toutes les connexions sont adaptées à une modulation HF.

² Le facteur $\sqrt{2}$ découle du fait que l'on exprime ici l'amplitude de la modulation, et non sa valeur efficace.

Q13 Observez-vous une modulation de puissance optique ? Comparez le taux de modulation avec celui attendu pour une même modulation de courant à basse fréquence en utilisant vos mesures précédentes.

Nous avons montré dans la partie précédente la modification de la longueur d'onde émise avec le courant injecté via la mesure du coefficient $d\lambda/dI$.

Q14 Comment se traduit la modulation d'amplitude sur le spectre (voir annexe 1) ? Peut-on observer ces effets en utilisant l'OSA ? Justifiez.

2. Analyse du spectre de la diode modulée avec un analyseur Fabry-Perot.

Pour étudier le spectre nous utiliserons dans cette partie un analyseur Fabry-Perot confocal (de la marque Melles-Griot) dont les propriétés sont les suivantes :

- intervalle spectral libre (ISL) : $\Delta\nu_{FP}=ISL = 2 \text{ GHz}$.
- finesse théorique : $F_{théo} = 256$.

La distance entre les miroirs est modulée par l'intermédiaire d'une cale piézoélectrique. Le Fabry-Perot intègre une photodiode Silicium à l'arrière du miroir de sortie, ainsi qu'une lentille de focalisation à l'entrée (cf. TP He-Ne 1A).

Le montage expérimental est le suivant :

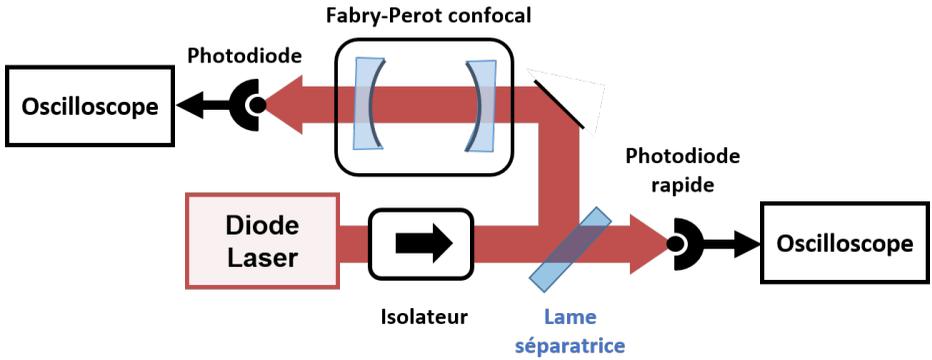


Figure 6 : Montage expérimental pour l'étude des effets de la modulation du courant de la diode

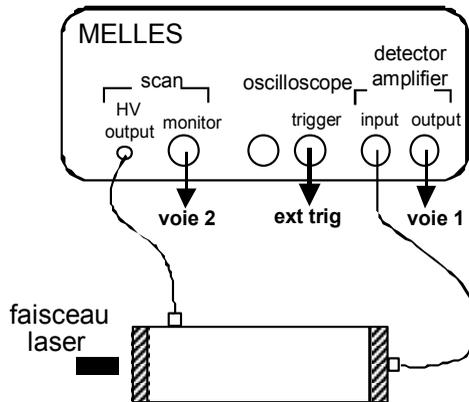


Figure 7 : connexions du Fabry-Perot

L'alimentation haute tension du Fabry-Perot intègre un amplificateur pour le signal issu de la photodiode de détection, dont vous pouvez ajuster le gain et éventuellement ajouter une tension de décalage (offset).

Q15 Justifiez le choix de l'analyseur Fabry-Perot pour visualiser les bandes latérales de modulation par rapport à l'analyseur de spectre à réseaux de la partie précédente. Calculez sa résolution **théorique** $\delta\nu_{théo}$. Convertissez en $\delta\lambda_{théo}$ (en nm).

Q16 Concluez quant aux avantages et inconvénients de l'emploi de ces 2 types d'analyseurs de spectres.

- Connectez le Fabry-Perot selon le schéma de la figure 7 ; observez à l'oscilloscope le signal de modulation triangulaire appliqué à la cale piézoélectrique (scan/monitor).
- Choisissez un point de fonctionnement stable de la diode laser, pour laquelle l'émission est monomode (par ex. T=25 °C et I=75 mA).
- Ajustez les réglages d'injection du faisceau laser dans le Fabry-Perot à l'aide des miroirs de renvoi pour observer à l'écran un pic étroit et unique par intervalle spectral libre.

Mesure sur le Fabry-Perot :

Observez le spectre laser mesuré par le Fabry-Perot en faisant varier la puissance de modulation, toujours à une fréquence de modulation de 250 MHz.

Q17 Mesurez l'écart entre le pic principal et les bandes latérales qui apparaissent lorsque le courant est modulé.

Q18 Au vu du spectre obtenu (nombre, taille et espacement des pics), est-on dans le cas d'une modulation de puissance ou de fréquence ?

Q19 Conclure quant à la nature optique globale de la modulation induite par la modulation du courant de la diode laser. Commentez l'origine physique de la modulation par rapport à ce que vous avez observé en continu. Est-ce un avantage ou inconvénient pour les télécommunications optiques ?

Q20 (bonus) Pour quelle valeur de courant de modulation pouvez-vous éteindre le pic principal ? En vous servant de l'annexe 1, déterminez alors la valeur de l'indice de modulation de fréquence, m . Calculez le coefficient $\Delta\nu/\Delta I$ puis $\Delta\lambda/\Delta I$ en pm/mA. Comparez avec le résultat de la question 8. Commentez sur l'origine physique du phénomène.

Annexe 1 : Modulation de courant sur une diode laser

En l'absence de modulation de courant, la lumière issue de la diode laser utilisée en T.P. a un spectre monochromatique et une puissance lumineuse constante. La modulation du courant électrique de la diode entraîne une modulation de puissance et de fréquence de la lumière émise.

Pour des fréquences inférieures aux GHz, on s'attend à ce que l'efficacité optique/électrique (en mW/mA) et le coefficient de variation de fréquence (en nm/mA) soient sensiblement les mêmes qu'en continu (cf. résultats de la partie D.).

Etude d'une modulation de puissance

Soit une modulation de puissance du type $P(t) = P_0 [1 + M \cdot \cos(2\pi F_m t)]$, où P_0 est la puissance sans modulation et $P(t)$ la puissance modulée. Le paramètre M est appelé indice de modulation de puissance.

Le signal reçu par une photodiode sera donc modulé à la fréquence F_m . Le signal à la sortie du Fabry-Perot retranscrit lui le spectre de la lumière et dépend donc du champ électrique lumineux instantané. Pour un indice de modulation M faible, le champ électrique de la lumière peut s'écrire :

$$E_L(t) = A \cdot \left[1 + \frac{M}{2} \cdot \cos(2\pi F_m t) \right] \cdot \cos(2\pi \nu_L t + \phi_L)$$

Donc :

$$\begin{aligned} E_L(t) &= A \cos(2\pi \nu_L t + \phi_L) \\ &+ M \frac{A}{4} \cos(2\pi(\nu_L - F_m)t + \phi_L) \\ &+ M \frac{A}{4} \cos(2\pi(\nu_L + F_m)t + \phi_L) \end{aligned}$$

L'expression ci-dessus met en évidence le fait que l'onde laser modulée en puissance se décompose, au premier ordre, en trois fréquences optiques : la porteuse à ν_L , et deux bandes latérales de même amplitude à $\nu_L - F_m$ et $\nu_L + F_m$. Les puissances associées à chaque pic du spectre sont proportionnelles à $A^2/2$ pour le pic central, et $M^2 A^2/32$ pour les bandes latérales. On remarque en particulier que l'intensité du pic central ne dépend pas de la modulation.

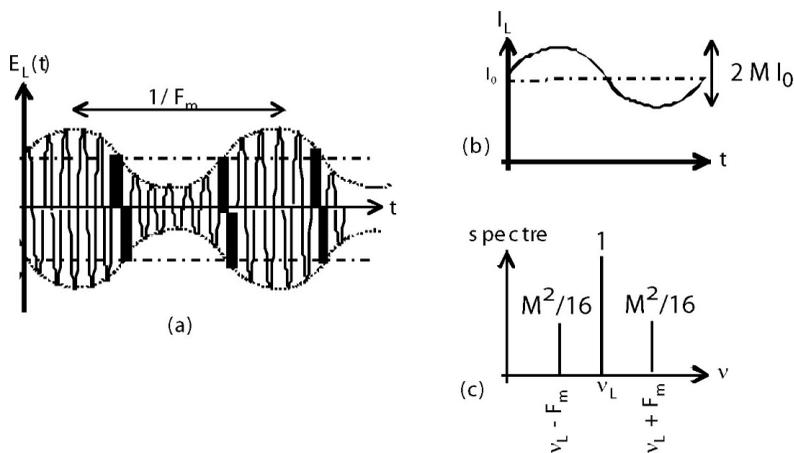


Figure 1: (a) champ électrique de l'onde laser, modulé en puissance
 (b) signal mesurée par une photodiode, faisant apparaître une modulation d'intensité
 (c) spectre de l'onde laser associé

Etude d'une modulation de fréquence

Considérons à présent une pure modulation de fréquence, que l'on choisira sinusoïdale à la fréquence F_m : $v(t) = v_L + \Delta v \cdot \cos(2\pi F_m t)$.

Le terme de phase du champ électrique est alors :

$$2\pi \cdot \int_0^t v(t') \cdot dt' = 2\pi \cdot (v_L t + \frac{\Delta v}{2\pi F_m} \sin(2\pi F_m t))$$

L'expression du champ électrique modulé en fréquence est donc :

$$E_L(t) = A \cdot \cos \left[2\pi v_L t + \frac{\Delta v}{F_m} \cdot \sin(2\pi F_m t) + \phi_L \right]$$

On note $m = \Delta v / F_m$ l'indice de modulation de fréquence.

La décomposition du champ modulé en termes sinusoïdaux élémentaires fait appel aux séries de Fourier. On trouve :

$$\begin{aligned} E_L(t) = & A \cdot J_0(m) \cdot \cos(2\pi v_L t + \varphi_L) \\ & - A \cdot J_1(m) \cdot \cos(2\pi(v_L - F_m)t + \varphi_L) + A \cdot J_1(m) \cdot \cos(2\pi(v_L + F_m)t + \varphi_L) \\ & + A \cdot J_2(m) \cdot \cos(2\pi(v_L - 2F_m)t + \varphi_L) + A \cdot J_2(m) \cdot \cos(2\pi(v_L + 2F_m)t + \varphi_L) \\ & - A \cdot J_3(m) \cdot \cos(2\pi(v_L - 3F_m)t + \varphi_L) + A \cdot J_3(m) \cdot \cos(2\pi(v_L + 3F_m)t + \varphi_L) \\ & \dots \end{aligned}$$

La modulation de fréquence d'un oscillateur se caractérise donc spectralement par l'existence de bandes latérales aux harmoniques de la fréquence de modulation.

Or les fonctions de Bessel ne sont pas monotones. Par exemple, $J_0(2.4) = 0$: la porteuse à v_L s'éteint pour un indice de modulation $m = 2.4$. De même, on peut annuler les diverses bandes latérales selon la valeur de l'indice de modulation.

Une photodiode n'est évidemment pas capable de voir la modulation de fréquence de la diode laser, car l'amplitude de la modulation de fréquence reste typiquement inférieure à 10 GHz, et donc la fréquence instantanée est toujours proche de 40 THz. Le signal détecté est donc, dans le cas d'une pure modulation de

fréquence, constant. Par contre, l'analyse spectrale au Fabry-Perot fait apparaître des bandes latérales, en nombre d'autant plus important que l'indice de modulation est grand.

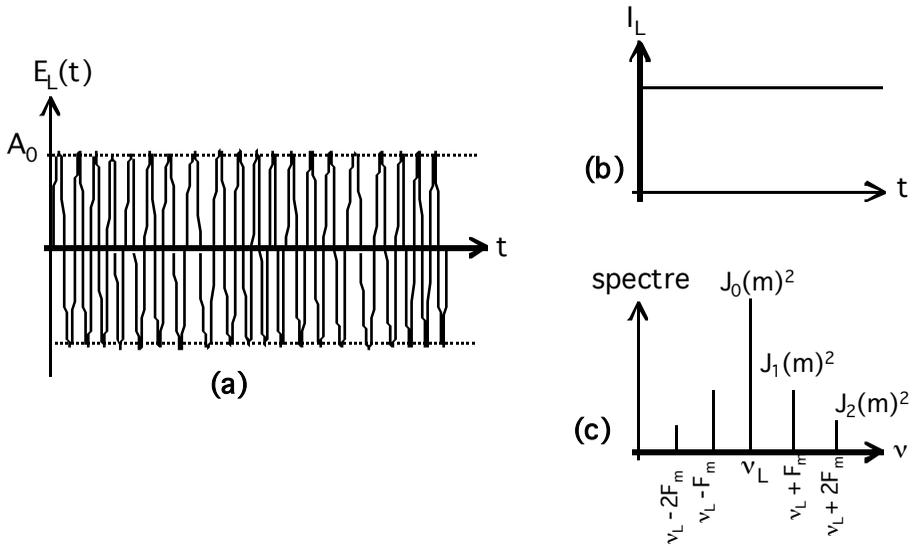


Figure 2: (a) champ laser modulé en fréquence
 (b) intensité laser correspondant, détectée par une photodiode
 (c) spectre de l'onde laser, mesuré par un analyseur Fabry-Perot

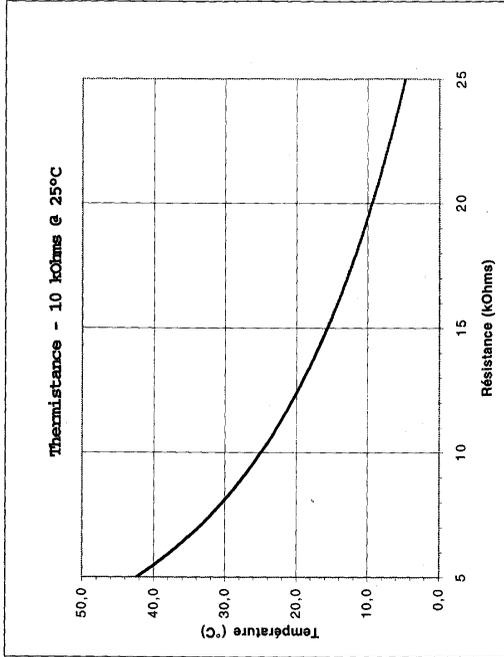
Enfin, remarquons que les bandes latérales à $\pm F_m$ sont en opposition de phase pour la modulation de fréquence, ce qui n'est pas le cas pour une modulation de puissance. L'analyse au Fabry-Perot, en mesurant l'intensité de chaque raie du spectre, ne permet pas d'accéder directement à cette information. Toutefois, lorsqu'on se trouve dans une situation où une modulation de fréquence se

superpose à une modulation d'amplitude, les hauteurs de chacune de ces bandes latérales à $\pm F_m$ ne sont plus égales, du fait de ce déphasage.

Annexe 2 : Thermistance

R (kOhms)	T (°C)	R (kOhms)	T (°C)
5	42,4	15	15,7
5,2	41,4	15,2	15,4
5,4	40,4	15,4	15,1
5,6	39,4	15,6	14,8
5,8	38,5	15,8	14,5
6	37,6	16	14,3
6,2	36,8	16,2	14,0
6,4	36,0	16,4	13,7
6,6	35,2	16,6	13,5
6,8	34,4	16,8	13,2
7	33,7	17	12,9
7,2	33,0	17,2	12,7
7,4	32,3	17,4	12,4
7,6	31,7	17,6	12,2
7,8	31,0	17,8	11,9
8	30,4	18	11,7
8,2	29,8	18,2	11,4
8,4	29,2	18,4	11,2
8,6	28,6	18,6	11,0
8,8	28,1	18,8	10,8
9	27,6	19	10,6
9,2	27,0	19,2	10,3
9,4	26,5	19,4	10,1
9,6	26,0	19,6	9,9
9,8	25,5	19,8	9,6
10	25,0	20	9,4
10,2	24,5	20,2	9,2
10,4	24,1	20,4	9,0
10,6	23,6	20,6	8,8
10,8	23,2	20,8	8,6
11	22,8	21	8,4
11,2	22,3	21,2	8,2
11,4	21,9	21,4	8,0
11,6	21,5	21,6	7,8
11,8	21,1	21,8	7,6
12	20,7	22	7,4
12,2	20,4	22,2	7,2
12,4	20,0	22,4	7,0
12,6	19,6	22,6	6,8
12,8	19,3	22,8	6,7
13	18,9	23	6,5
13,2	18,6	23,2	6,3
13,4	18,2	23,4	6,1
13,6	17,9	23,6	5,9
13,8	17,6	23,8	5,8
14	17,2	24	5,6
14,2	16,9	24,2	5,4
14,4	16,6	24,4	5,3
14,6	16,3	24,6	5,1
14,8	16,0	24,8	4,9
		25	4,8

R (kOhms)	T (°C)
5	42,4
5,2	41,4
5,4	40,4
5,6	39,4
5,8	38,5
6	37,6
6,2	36,8
6,4	36,0
6,6	35,2
6,8	34,4
7	33,7
7,2	33,0
7,4	32,3
7,6	31,7
7,8	31,0
8	30,4
8,2	29,8
8,4	29,2
8,6	28,6
8,8	28,1
9	27,6
9,2	27,0
9,4	26,5
9,6	26,0
9,8	25,5
10	25,0
10,2	24,5
10,4	24,1
10,6	23,6
10,8	23,2
11	22,8
11,2	22,3
11,4	21,9
11,6	21,5
11,8	21,1
12	20,7
12,2	20,4
12,4	20,0
12,6	19,6
12,8	19,3
13	18,9
13,2	18,6
13,4	18,2
13,6	17,9
13,8	17,6
14	17,2
14,2	16,9
14,4	16,6
14,6	16,3
14,8	16,0



$$T(°C) = \frac{1}{\frac{1}{B} \ln \frac{R_{0k}}{R_{0k(RSC)}} + \frac{1}{298,15}}$$

avec $B = 3750K$

- 273,15

Annexe 3 : Caractéristiques de la diode laser

MITSUBISHI LASER DIODES ML6XX10 SERIES

FOR OPTICAL INFORMATION SYSTEMS

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Conditions	Ratings	Unit
Po	Light output power	CW	35	mW
		Pulse (Note 1)	45	
V _{RL}	Reverse voltage (laser diode)	-	2	V
V _{RD}	Reverse voltage (Photodiode)	-	30	V
I _{FD}	Forward current (Photodiode)	-	10	mA
T _C	Case temperature	-	-40~+60	°C
T _{stg}	Storage temperature	-	-55~+100	°C

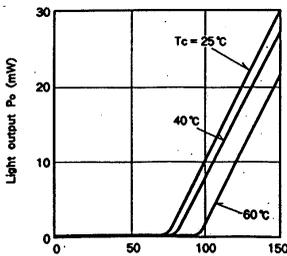
Note 1 : Duty less than 50%, pulse width less than 1 μ s.

ELECTRICAL/OPTICAL CHARACTERISTICS (T_C = 25°C)

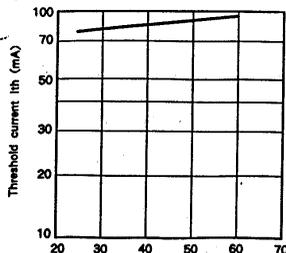
Symbol	Parameter	Test conditions	Limits			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
I _{th}	Threshold current	CW	-	70	85	mA
I _{OP}	Operating current	CW, P _o = 30mW	-	140	160	mA
η	Slope efficiency	CW, P _o = 30mW	-	0.4	-	mW/mA
V _{OP}	Operating voltage	CW, P _o = 30mW	-	2.0	2.5	V
λ_P	Peak wavelength	CW, P _o = 30mW	770	785	800	nm
$\theta_{//}$	Beam divergence angle (parallel)	CW, P _o = 30mW	9	10.5	13	deg.
θ_{\perp}	Beam divergence angle (perpendicular)	CW, P _o = 30mW	24	26.5	28	deg.
I _m	Monitoring output current	CW, P _o = 30mW, V _{RD} = 1V, R _L = 10 Ω	1.0	3.0	6.0	mA
I _m (Note 2)	Monitoring output current (Photodiode)	(Note 3)	0.6	2.7	4.0	mA
I ₀	Dark current (Photodiode)	V _{RD} = 10V	-	-	0.5	μ A
C _t	Total capacitance (Photodiode)	V _{RD} = 0V, f = 1MHz	-	7	-	pF

Note 2 : Applicable to ML64110R.

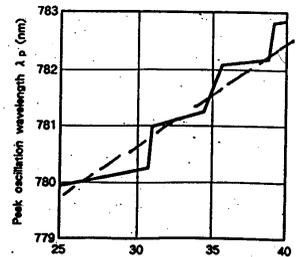
3 : R_L = the load resistance of photodiode.



Forward current I_f (mA)



Case temperature T_C (°C)



Case temperature T_C (°C)

Doublement de fréquence dans des cristaux non linéaires et effet Raman dans une fibre optique

2017-2018

Oral

Durant la séance, vous préparerez une présentation orale (5 min) résumant et commentant vos résultats pour les questions 1 et 2.

QUESTIONS PRELIMINAIRES (à préparer avant la séance)

- P1. À l'aide du descriptif du montage expérimental, identifier la fonction de la lame demi-onde n°1 ainsi que celle du cube séparateur de polarisation. Quel est le rôle de ce couple d'optique ? Quel est le rôle de la lame demi-onde n°2 ?
- P2. Dans le cadre de la génération d'impulsions par un laser déclenché comme celui utilisé lors de ce TP, quel est l'impact selon vous de la taille de la cavité laser sur la durée des impulsions émises ?

Le but de ce TP est l'étude de deux effets non linéaires. Il donne des points de repère sur le doublement de fréquence dans des cristaux non linéaires. Il consiste également à mettre en évidence la conversion Raman dans une fibre optique classique utilisée pour les télécommunications.

Pour le compte-rendu, répondez aux questions posées, vos réponses pourront être agrémentées de schémas. En revanche, il est inutile de reproduire le schéma expérimental et/ou le protocole s'ils n'apportent aucune information supplémentaire.

I Étude du doublement de fréquence

Le montage général pour cette étude est décrit sur la figure 1

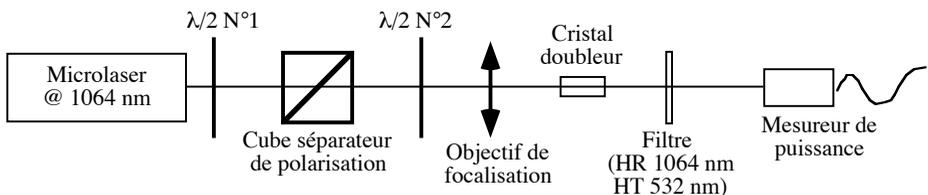


Figure 1 : montage expérimental pour l'étude du doublement de fréquence.

Il consiste à utiliser un laser de forte puissance crête afin d'avoir un rendement de conversion acceptable vers le faisceau doublé en fréquence. Le faisceau infrarouge à 1064 nm polarisé linéairement, issu d'un laser déclenché, est

focalisé dans le cristal doubleur de fréquence au moyen d'un objectif. Afin de faire varier la puissance incidente sur le cristal, une lame demi-onde et un cube séparateur de polarisation sont placés sur le trajet du faisceau. Une deuxième lame demi-onde est également insérée entre la sortie du cube et l'objectif de focalisation afin de pouvoir facilement ajuster la direction de polarisation de l'onde fondamentale. La mesure de la puissance sur le faisceau doublé est faite derrière un filtre réfléchissant le faisceau à 1064 nm (et transmettant le faisceau vert).

I.1 Étude de la source

La source est un laser déclenché passivement par un absorbant saturable placé à l'intérieur de la cavité. Elle émet des impulsions d'une durée de **620 ps** à 1064 nm. Le laser est décrit sur la figure 2. L'absorbant saturable est un cristal de $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ épitaxié sur un cristal laser de $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$. La longueur de la cavité est inférieure à 1 mm (typiquement de l'ordre de 800 μm).

Le faisceau infrarouge issu du microlaser est polarisé linéairement, néanmoins sa direction de polarisation peut éventuellement tourner durant le TP (échauffement) ce qui a pour conséquence de faire varier la puissance infrarouge après le cube séparateur de polarisation.

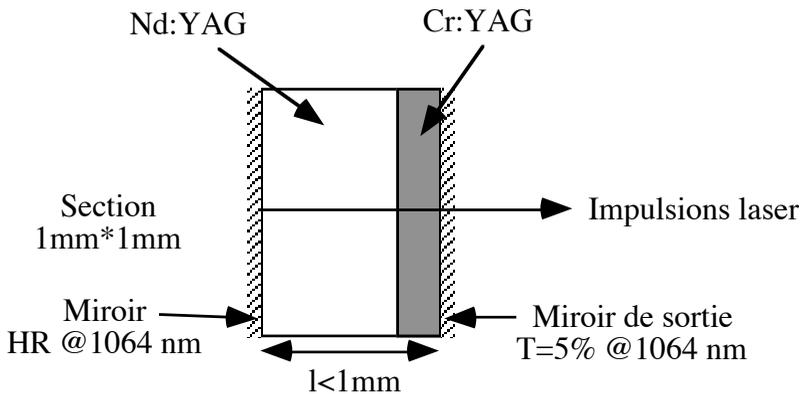


Figure 2 : Schéma du microlaser.

Oral

Vous préparerez une présentation orale (5 min) résumant vos résultats pour les questions 1 et 2 concernant votre caractérisation de la source laser et les avantages que celle-ci présente pour l'apparition d'effets non linéaires.

Question 1 : A l'aide de la photodiode rapide, mesurer la cadence de répétition des impulsions. La durée des impulsions mesurée correspond-elle à la durée annoncée dans le protocole ? Mesurer également la puissance moyenne émise à l'aide du mesureur de puissance. En déduire la puissance crête des impulsions (en supposant que la forme de l'impulsion est rectangulaire).

Attention de régler la longueur d'onde sur le mesureur de puissance. Ne pas utiliser le mesureur avec des faisceaux focalisés (la densité qui se trouve devant le détecteur peut avoir son absorption saturée par des faisceaux de forte intensité).

Question 2 : Quel est l'intérêt de cette source laser pour une expérience de doublage de fréquence ? Pourquoi focalise-t-on le faisceau dans le cristal doubleur ?

I.2 Influence de la longueur des cristaux (BBO) sur le doublement de fréquence

Dans cette partie, on utilise différents cristaux de BBO (β -BaB₂O₄) taillés pour l'accord de phase par biréfringence de type I entre les ondes fondamentale à 1064 nm et doublée à 532 nm : il s'agit de lames à faces parallèles. La direction d'accord de phase est perpendiculaire aux faces de la lame. Pour le BBO, l'indice ordinaire est plus grand que l'indice extraordinaire à une longueur d'onde donnée.

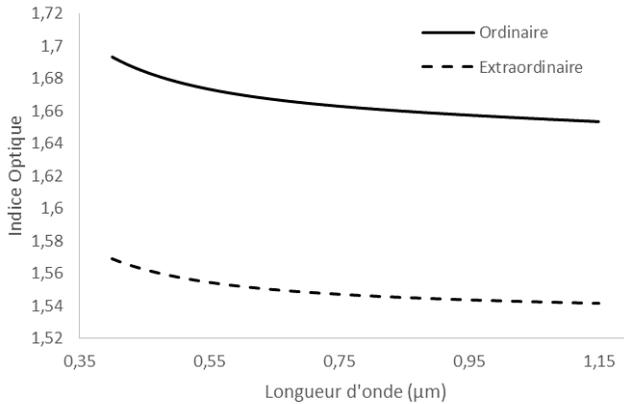


Figure 3 : Indices optiques du BBO en fonction de la longueur d'onde

Question 3 : Quelles sont les polarisations des ondes à 1064 nm et 532 nm (c'est à dire, ordinaire ou extraordinaire) lorsque l'accord de phase est réalisé ? Faire un schéma des surfaces des indices pour montrer la direction d'accord de phase.

Commencer l'expérience avec le cristal de BBO de 0,5 mm de longueur.

La première lame demi-onde est réglée pour avoir une puissance maximale à 1064 nm au niveau du cristal. L'objectif de focalisation a une distance focale de l'ordre de 55 mm. Dès que le faisceau infrarouge est focalisé dans le cristal de BBO, vous devez voir apparaître un faisceau vert en sortie. Faites une optimisation en regardant le faisceau vert (sans collimation) sur un carton blanc et en jouant sur les différents réglages (focalisation, ajustement de la polarisation à 1064 nm, ajustement de l'orientation du cristal). Le carton blanc utilisé pour l'observation peut être placé derrière le filtre environ 20 cm après le cristal.

Question 4 : En jouant sur l'orientation du cristal non linéaire, vous devez voir défiler des franges sur le faisceau vert. Quelle est leur origine (expliquer avec un schéma)?

Pour chaque cristal de BBO (0,5 mm ; 4 mm et 7 mm), optimiser l'efficacité de conversion, mesurer la puissance maximum dans le vert à l'aide du mesureur de puissance et observer l'allure du faisceau en sortie. La mesure de puissance est délicate car le faisceau vert et le faisceau infrarouge sont quasiment colinéaires en sortie du cristal. Malgré le filtre (fig.1), il reste un peu d'infrarouge arrivant sur le détecteur. Ce résidu a une puissance du même ordre de grandeur que celle du faisceau vert à mesurer. Il faut donc faire une mesure par différence. L'infrarouge résiduel correspond au fond que vous pouvez mesurer en tournant la lame demi-onde pour annuler le signal dans le vert.

Question 5 : Pour chaque cristal, donner le rendement de conversion (défini par le rapport entre la puissance à 532 nm et la puissance incidente à 1064 nm). Noter également, pour chaque cristal, l'allure du faisceau vert en sortie.

Question 6 : Estimer les rendements théoriques attendus pour une source laser de même puissance moyenne émettant en régime continu. Commenter.

	BBO	KTP
d_{eff} (pm/V)	2,0	3,6
Acceptance angulaire (mrad.cm)	0,6	10
Walk-off (mrad)	56	4

Quelques propriétés des cristaux non-linéaires utilisés utiles pour l'analyse des résultats

Question 7 : Analyser et commenter les résultats obtenus : la variation de rendement en fonction de la longueur est-elle conforme à la théorie ? Donner des explications.

Question 8 : Calculer la divergence du faisceau laser à 1064 nm au niveau du cristal non linéaire en supposant un faisceau de waist $500 \mu\text{m}$ et de facteur de qualité du faisceau $M^2 = 5$.

Question 9 : Commenter l'allure du faisceau vert en sortie pour les différents cristaux. Quelle est l'origine de ces différences ?

I.3 Effet de la polarisation de l'onde fondamentale

Question 10 : Quelle est la loi de variation de la puissance convertie dans le vert en fonction de l'angle de rotation de la polarisation en entrée du cristal (à 1064 nm) pour un cristal en accord de phase de type I et pour un cristal en accord de phase de type II ?

Question 11 : Avec le cristal de BBO de 7 mm, mesurer la puissance convertie dans le vert en fonction de l'angle repéré sur la monture de la lame demi-onde N°2, puis tracer la puissance de sortie dans le vert en fonction de l'angle de polarisation de l'onde fondamentale (l'angle 0 est à votre choix). Utiliser le résultat de la question précédente pour tracer la courbe théorique sur le même graphique que votre courbe expérimentale.

Question 12 : Effectuer le même type de mesures et tracer les mêmes courbes avec le cristal de KTP (KTiOPO_4) 7 mm. Après optimisation, la puissance max à 532 nm devrait être supérieure à 2 mW.

Question 13 : A l'aide de ces deux courbes, retrouver quel type d'accord de phase est utilisé pour le BBO et le KTP.

I.4 Effet de la puissance à la longueur d'onde fondamentale

Pour cette partie, on utilise uniquement le cristal de KTP.

Question 14 : Optimiser la puissance de sortie dans le vert puis tracer la puissance dans le vert en fonction de la puissance à 1064 nm (en faisant tourner la première

lame demi-onde). Soigner la partie de la courbe à faible puissance. Commenter l'allure de la courbe pour une faible puissance et pour une forte puissance à 1064 nm. Tracer une courbe d'ajustement pour la partie de la courbe à faible puissance.

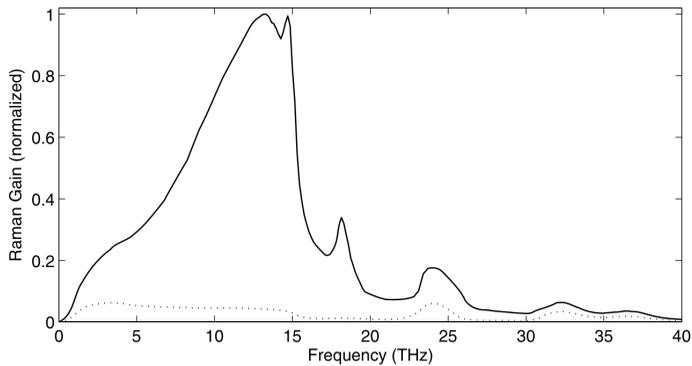
Question 15 : Comparer les efficacités de doublage obtenues avec le KTP et le BBO 7 mm ainsi que l'allure des faisceaux. Commenter en vous appuyant sur les propriétés des cristaux données plus tôt.

II Conversion Raman dans une fibre en silice

L'effet Raman est dû au couplage entre une onde optique et un mode de vibration d'une molécule donnée, correspondant à une fréquence ν_{mol} . Un faisceau lumineux de fréquence ν et de puissance suffisamment élevée va créer deux nouveaux signaux optiques de fréquence $\nu - \nu_{\text{mol}}$ (appelée signal Stokes) et de fréquence $\nu + \nu_{\text{mol}}$ (appelé signal anti-Stokes).

La conversion Raman est utilisée dans de nombreuses applications : la diffusion Raman spontanée permet d'identifier des molécules, chaque type de liaison chimique correspondant à une fréquence de vibration bien déterminée (spectroscopie Raman). La diffusion Raman stimulée permet de créer des amplificateurs de lumière ou des oscillateurs lasers Raman. La conversion Raman peut aussi être un effet indésirable comme dans le cas où l'on cherche à transporter des signaux optiques de forte puissance crête dans une fibre optique. Le but de l'expérience est d'observer cet effet, non linéaire par nature, dans une fibre optique de ligne.

Pour une fibre en silice, constituée de molécules de SiO_2 , le mode de vibration correspond à une fréquence de 13,2 THz (440 cm^{-1}). Contrairement aux gaz pour lesquels le décalage Raman (ν_{mol}) est parfaitement défini, la silice fondue présente une large gamme de fréquences ν_{mol} centrées autour de 13,2 THz (Fig.3).



*Figure 4 Spectre de gain Raman normalise pour la silice (fused silica)
[G.P Agrawal, Nonlinear Fiber optics, Academic Press, San Diego, CA, 2001]*

La fibre utilisée ici a une longueur de 50 m et un cœur de rayon égal à $3,3 \mu\text{m}$. Le montage général pour cette étude est décrit sur la figure 4. Le cristal doubleur est le KTP précédemment réglé. On aura pris soin d'enlever la première lame demi-onde et le cube séparateur de polarisation pour maximiser la puissance incidente à 1064 nm. Un objectif sert à collimater le faisceau vert après le KTP. Un deuxième objectif le focalise dans le cœur de la fibre optique. En sortie de fibre, un objectif recollimate le faisceau et un réseau disperse les rayons pour observer les différents ordres Raman.

Le réglage se fait en deux temps. Il faut d'abord régler de façon précise la collimation du faisceau. Pour cela, regarder la taille du faisceau à plusieurs mètres. Il faut ensuite injecter le faisceau dans la fibre : il faut régler le point de focalisation du faisceau au niveau du cœur, sur la face d'entrée de la fibre. Pour savoir où se situe le point de focalisation, commencer par injecter le faisceau dans la fibre de telle sorte qu'un peu de lumière verte soit visible en sortie de la fibre. Choisissez un sens de déplacement de l'objectif de focalisation parallèlement à l'axe optique. Une fois l'objectif déplacé, réglez à nouveau l'injection dans la fibre. S'il y a plus de lumière en sortie, vous êtes en train de rapprocher le point de focalisation de la face d'entrée de la fibre (c'est le bon sens !). Sinon, vous êtes en train d'éloigner ce point de la face d'entrée.

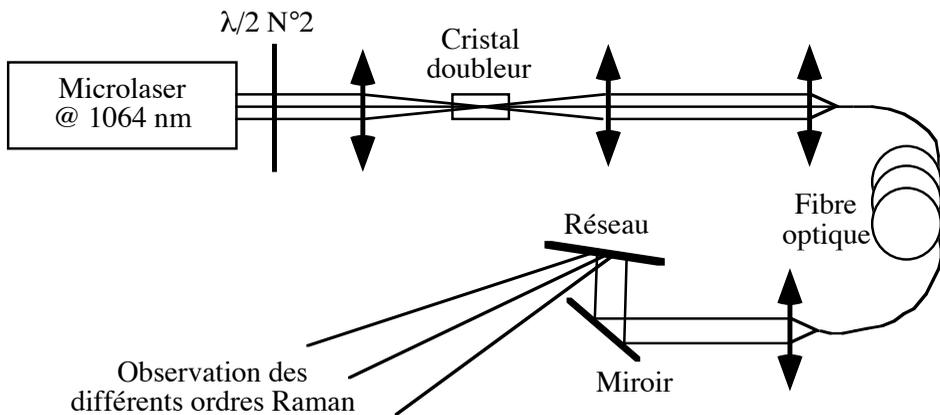


Figure 5 : Montage expérimental pour l'observation de la conversion Raman dans la fibre optique.

Lorsque le réglage est effectué, vous devez observer différentes couleurs, du vert au rouge correspondant à la conversion en cascade des signaux Stokes. Vous pouvez observer cet effet de conversion en cascade en changeant la puissance à 532 nm injectée dans la fibre (il suffit de tourner la lame demi-onde N°2).

Question 16 : Calculer la longueur d'onde théorique des signaux Stokes pour les 6 premiers ordres. Vos observations expérimentales vous semblent-elles cohérentes avec vos prévisions théoriques ?

Amplificateur et oscillateur laser à fibre

2017-2018

Oral

Durant la séance, vous préparerez une présentation orale (5 min) résumant et commentant vos résultats pour les questions 12 et 13. Vous réaliserez un résumé des résultats obtenus dans la partie « Laser à fibre », notamment sur les spectres d'émission laser observés dans le cas de la cavité en anneau et de la cavité linéaire.

QUESTIONS PRELIMINAIRES (à faire avant la séance)

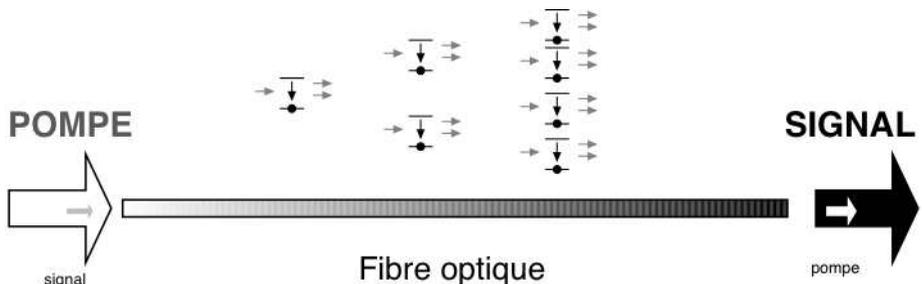
P1 Définissez en quelques phrases les phénomènes physiques d'émission spontanée et d'émission stimulée.

P2 Donnez l'expression du gain optique d'un milieu en fonction de sa section efficace d'émission, de sa densité d'inversion de population, et de sa longueur.

P3 Rappelez les notions d'élargissement homogène ou inhomogène d'un spectre de gain laser ainsi que les origines physiques de ces deux types d'élargissement.

1. Introduction

Le principe général d'un amplificateur optique repose sur le phénomène de l'émission stimulée. Le signal lumineux à amplifier se propage dans un guide qui présente du gain. Ce gain est obtenu dans le cas de l'amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA pour Erbium-Doped Fiber Amplifier) en créant une inversion de population des ions Erbium qui ont été implantés dans le guide. Ces ions doivent au minimum posséder une transition radiative autour de la longueur d'onde du signal à amplifier, dans cette première partie le signal est autour de 1550 nm. L'inversion de population est réalisée par pompage optique via une source laser externe. L'augmentation de l'intensité du signal au cours de sa propagation dans le guide résulte d'un transfert d'énergie de l'onde pompe vers l'onde signal via un processus d'émission stimulée.



Rappelons que les photons ainsi émis ont la même phase, polarisation et vecteur d'onde que les photons incidents. Par contre, il n'en va pas de même des photons émis de manière spontanée qui n'ont aucune relation de phase avec les photons "signal". Ils engendreront un bruit d'intensité en sortie d'amplificateur. Il est à noter que l'intensité de ce bruit croît avec la longueur du guide : **le signal provenant de l'émission spontanée subit lui aussi une amplification. On parle alors du processus d'émission spontanée amplifiée (ASE, pour « Amplified Spontaneous Emission »)**. Le bruit de type ASE est un facteur essentiel qui limite les performances des amplificateurs optiques.

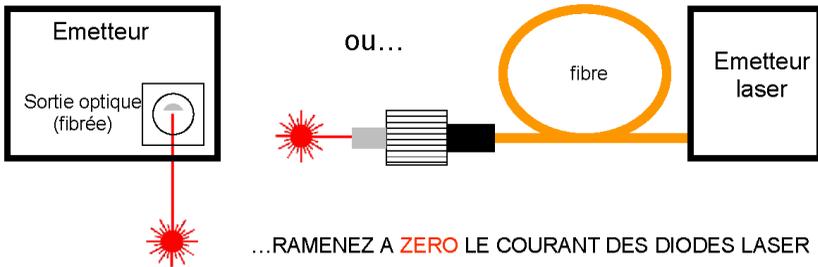
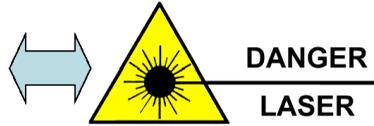
L'amplificateur à fibre dopée erbium est probablement l'amplificateur optique le plus répandu, notamment dans les réseaux de télécommunications par fibre optique. En effet, le gain de l'ion erbium s'étend sur une bande large de plusieurs dizaines de nm autour de 1550 nm, longueur d'onde à laquelle les pertes des fibres optiques sont minimales.

Ce TP propose d'étudier:

- dans une première partie, les caractéristiques principales d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium « en kit », fonctionnant à 1550 nm.
- dans une seconde partie, l'étude de deux lasers à fibre dopée à l'erbium.

PROTECTION OCULAIRE DE L'UTILISATEUR

2 types de lasers fibrés (continus)
60 mW @ 980 nm
10 mW @ 1550 nm



PROTECTION DES FIBRES

Cordon de protection renforcé **mais...**

- ne pas « nouer »



- ne pas écraser



Extrémités des connecteurs en **fibre silice polie nue** :

- à manipuler avec soin lors des (dé)connexions

- à protéger par un capuchon après déconnection



2. Etude de l'amplificateur optique à fibre dopée erbium en « kit »

Le T.P. consiste d'abord à caractériser un amplificateur à fibre EDFA « en kit » qui a été fabriqué par la société IDIL : il vous permettra d'assembler les éléments constitutifs de base après avoir étudié séparément :

- les spectres d'émission spontanée et d'émission spontanée amplifiée.
- les gains de l'amplificateur en fonction des puissances de pompe et signal injectées (mise en évidence des phénomènes de saturation).

2.1. Description du matériel mis à votre disposition

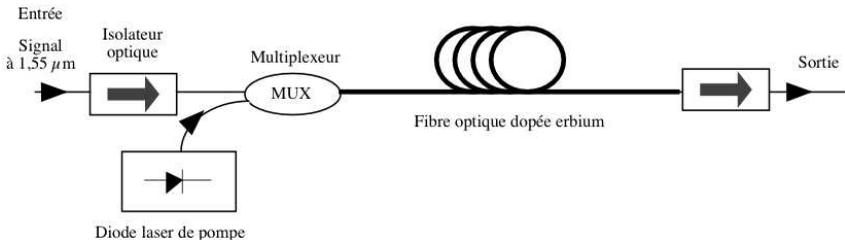
Le matériel mis à votre disposition, listé ci-dessous, va vous permettre de réaliser l'ensemble des mesures demandées :

- l'EDFA « en kit » IDIL se présentant sous la forme de modules que vous devrez interconnecter en utilisant les cordons (ou « jarretières ») optiques mises à votre disposition.
- un analyseur de spectre optique : cet appareil n'est rien d'autre qu'un monochromateur à réseau mobile qui comporte une interface utilisateur conviviale. Il permet d'acquérir des spectres entre 600 et 1750 nm, avec une résolution ultime de 0,07 nm et surtout une grande dynamique de détection (~80 dB).
- un atténuateur optique variable étalonné.
- une source accordable de 1500 nm à 1600 nm (marque Photonetics « TUNICS »).

2.2. Réalisation et caractérisation de l'EDFA « en kit »

La structure typique EDFA est la suivante : l'amplificateur utilise comme milieu à gain une fibre optique dans laquelle ont été implantés des ions erbium. L'onde pompe (fournie par une diode laser à 980 nm incluse dans le kit), et l'onde signal (issue de la source accordable « TUNICS » extérieure) se propagent simultanément dans la fibre dopée. Le signal pompe maintient une inversion de population sur toute la longueur de la fibre, permettant ainsi l'amplification de l'onde signal.

La figure ci-dessous présente le schéma d'un module EDFA dans une configuration où le pompage est co-directif.



Fibre dopée Erbium

Les caractéristiques de la fibre dopée utilisée dans l'amplificateur que vous devez caractériser sont :

- diamètre de coeur $2a = 2,9 \mu\text{m}$.
- longueur d'onde coupure $\lambda_c = 900 \text{ nm}$.
- concentration en ions erbium: de l'ordre de 400 ppm.
- longueur = 20 m.

Vous trouverez en annexe une présentation succincte des propriétés spectroscopiques de cet ion.

Module de pompage

Le second avantage de l'ion erbium, hormis des transitions autour de 1,55 μm, sont les bandes d'absorption autour de 980 nm et 1,48 μm permettant l'utilisation de diodes laser de pompe. Pour être couplé efficacement dans cette fibre, le faisceau de pompe doit être monomode transverse. Les caractéristiques de la diode de pompage utilisée dans notre montage sont :

- puissance maximum $P_{\text{pompe}} \approx 60 \text{ mW}$,
- longueur d'onde $\lambda_p = 980 \text{ nm}$.

Multiplexeur (symbole « MUX » dans le schéma de l'amplificateur)

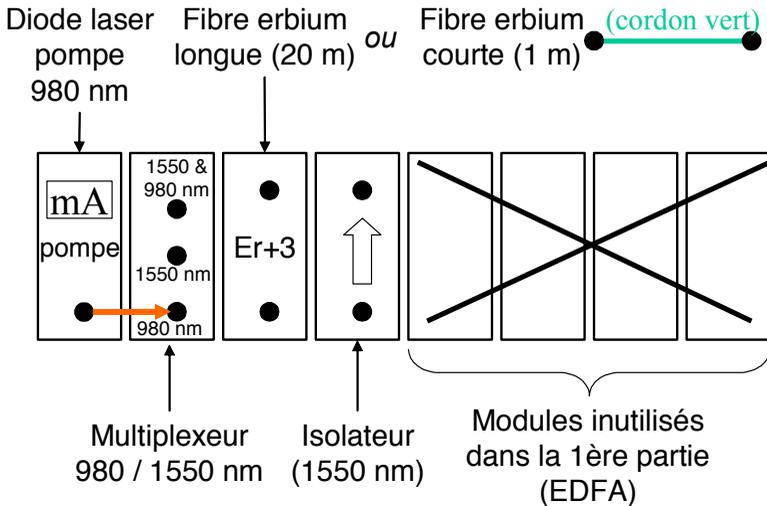
Le multiplexeur (ou « combineur ») est un élément passif, fibré qui permet de coupler deux signaux de longueurs d'onde différentes et provenant de deux fibres distinctes dans une même fibre optique. Utilisé en sens inverse, sa dénomination devient démultiplexeur (« DEMUX »), il permet de séparer des signaux de longueurs d'onde différentes et de les injecter dans des fibres distinctes.

Source : diode laser « signal »

En pratique, plutôt que la diode laser de type DFB (Distributed FeedBack) fournie dans le « kit » amplificateur, on utilisera avantageusement la source « TUNICS » accordable de 1500 nm à 1600 nm.

Ci-dessous le schéma du « kit « ampl'educ » » IDIL.

Kit "ampl'educ" (IDIL)



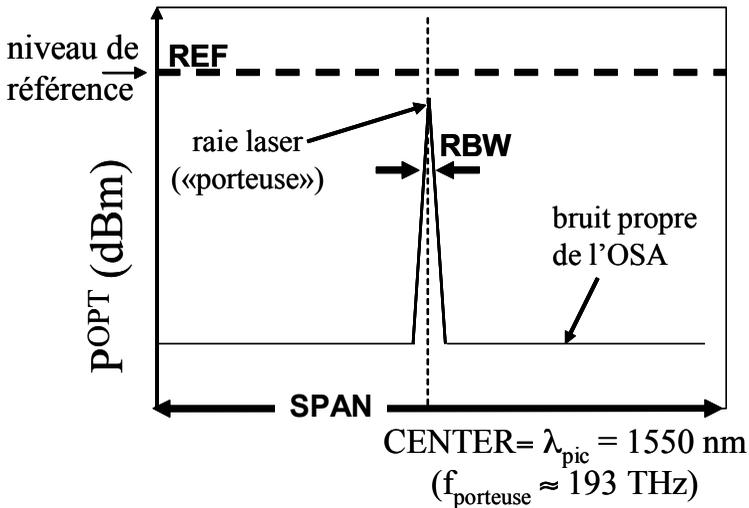
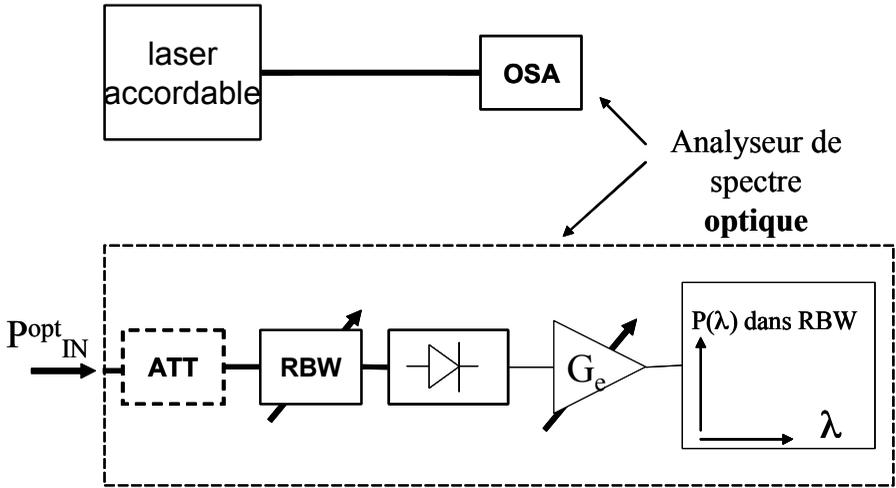
Les éléments fibrés sont dans les modules du kit

Seuls sont représentés les connecteurs d'entrée ou de sortie

*La pompe doit IMPERATIVEMENT rester reliée à l'entrée [980 nm] du MUX
(ne pas déconnecter le cordon orange)*

2.3. Expérience préliminaire : mesures de spectres optiques

L'expérience préliminaire consiste à prendre connaissance du fonctionnement de l'analyseur de spectre optique (OSA). On relie le laser, dont on fixe la longueur d'onde à 1550 nm à l'entrée de l'OSA, selon le schéma ci-dessous.



Le schéma de principe est également rappelé ci-dessus : il consiste en un filtre optique accordable de largeur RBW (pour « Resolution BandWidth ») qui balaye une plage spectrale (l'excursion ou « SPAN ») de manière périodique. Le filtre est suivi d'un photodétecteur de grande sensibilité suivi d'un amplificateur électrique de grande dynamique.

L'atténuateur optique représenté en pointillé n'est utilisé que lorsque la puissance optique d'entrée dépasse la puissance maximale autorisée (10 dBm, i.e. 10 mW).

La courbe affichée à l'écran de l'OSA représente **la puissance dans la bande RBW en fonction de λ** , que l'on peut noter $P(\lambda)_{RBW}$. La RBW est donc la largeur à

mi-hauteur du pic affiché par l'OSA lorsqu'on lui présente un signal optique quasi-monochromatique de type laser accordable (ces lasers, ici à cavité externe, ont une largeur de raie de ≈ 100 kHz soit environ 1 fm à 1550 nm¹).

En plus des valeurs de RBW et de SPAN, un ajustement essentiel pour bien réaliser les mesures est le choix du niveau de référence (REF ou Ref Level). Il représente la puissance à 2 divisions à partir du bord supérieur de l'écran (symbole REF à gauche de l'écran). L'ajuster revient à traduire verticalement la courbe mesurée.

Un dernier paramètre vous sera utile pour améliorer la qualité des spectres affichés : VBW (« Video BandWidth ») : Cette quantité est inversement proportionnelle au temps d'intégration du détecteur. Sa valeur est fixée par défaut par les autres paramètres mais vous pouvez la forcer vers le bas, au détriment de la vitesse de balayage.

Connectez directement la sortie du laser accordable à l'OSA pour observer le pic laser et le fond dû à l'émission spontanée amplifiée. La sensibilité de l'analyseur se règle dans le menu « Sensitivity » et est particulièrement importante lorsqu'il s'agit de visualiser des puissances faibles.

Mesurez le spectre de ce signal laser sur l'OSA pour :

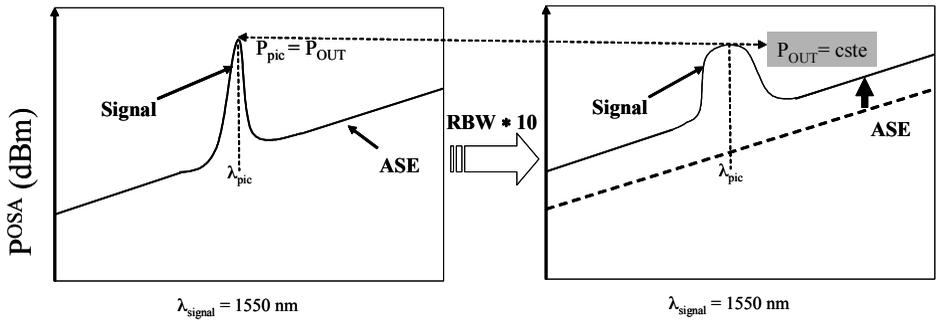
- un CENTER de 1550 nm.
- un SPAN de 50 nm puis, une fois le spectre observé et centré sur la fenêtre, mettre 5 nm.
- un RBW de 0,1 nm.
- un REF de 0 dBm.

Ces 4 valeurs courantes s'affichent à gauche et en bas de l'écran.

Utilisez la fonction marqueur de pic (PEAK SEARCH) et poursuite (TMkr → Center, pour « Track Marker to Center ») pour pointer et suivre au centre de l'écran le maximum du pic.

Q1. Changez la RBW d'un facteur 10 (par exemple de 0,1 nm à 1 nm). Relevez les amplitudes du pic et de l'ASE dans les deux configurations à l'aide des curseurs (Menu 'Marker').

¹ A 1550 nm, une largeur spectrale de 1 nm correspond à 125 GHz, ou encore 0,8 nm correspondent à 100 GHz.



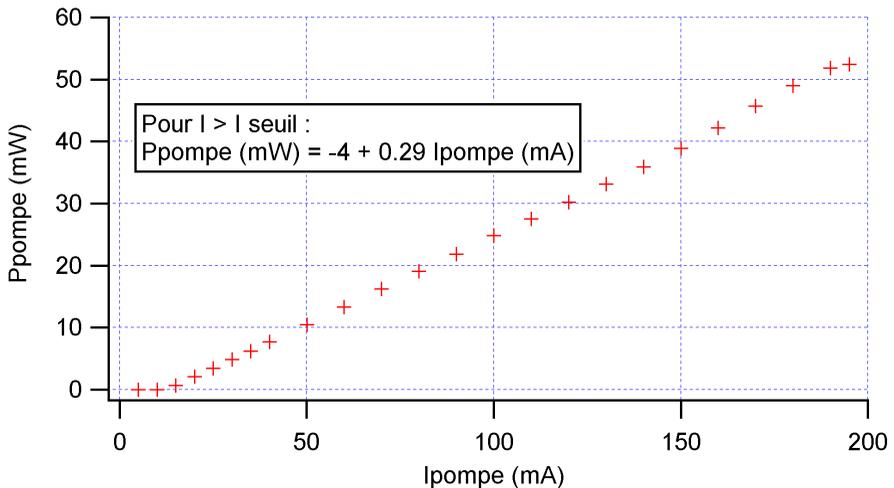
Comment évolue la largeur du pic ? Pourquoi ? Que constatez-vous sur l'évolution des niveaux respectifs du pic laser et du fond qui correspond à l'émission spontanée amplifiée du laser à semiconducteur ? Expliquer clairement ce point très important.

2.4. Caractéristique de la diode laser de pompe

⚠ **Ne jamais déconnecter la jarretière orange** qui relie la diode laser de pompe au multiplexeur.

Gardez à l'esprit que la puissance maximale (~60 mW à 980 nm) se trouve éventuellement disponible sur une traversée de panneau d'un module ou sur un connecteur de sortie d'une jarretière.

On vous donne ci-dessous et affichée sur le dessus du kit la caractéristique P(I) de la diode laser de pompe "puissance optique (mW) - courant d'injection (mA)" (ainsi qu'un spectre optique d'émission typique) : **vous n'avez donc qu'à ajuster via le potentiomètre le courant dans la diode de pompe pour connaître la puissance disponible à l'entrée de la fibre dopée.**



Observer le spectre de la diode de pompe directement en sortie du multiplexeur (MUX) pour un courant de pompe de 30 mA (**afin de ne pas dépasser la puissance d'entrée maximale de 10 mW que peut supporter l'OSA**).

Q2. Comparer qualitativement le spectre émis par la diode laser de pompe vers 980 nm à celui émis par la diode laser « signal » vers 1550 nm.

2.5. Courbe de fluorescence de la fibre dopée Er³⁺

On peut se convaincre que l'ion erbium possède bien des transitions radiatives autour de 1,55 µm. Pour cela, nous allons mesurer un spectre de fluorescence de la fibre dopée courte (fibre verte de 1 m) en présence de pompe. Connectez la sortie du MUX (1550 & 980 nm) sur l'une des extrémités de la fibre dopée courte, et l'autre extrémité à l'analyseur de spectre (vous aurez besoin d'une fibre d'adaptation E2000-FC/APC).

Affichez le spectre en échelle linéaire ('Level scale' -> 'Linear level'), puis utilisez le bouton Peak->Ref level pour ajuster le niveau de référence.

Q3. Mesurer le spectre de fluorescence entre 1500 et 1600 nm pour un courant de pompe de 50 mA (assurez-vous sur la caractéristique que, pour cette valeur, la puissance de pompe ne dépasse pas les 10 mW de puissance admissible par le photodétecteur de l'OSA).

Commentaires. Expliquer pourquoi, dans cette expérience, nous devons utiliser une fibre "courte". Suggérez une méthode de mesure du spectre de fluorescence plus rigoureuse.

2.6. Spectre d'émission spontanée amplifiée (ESA)

Q4. Refaire la mesure précédente mais en utilisant la fibre dopée Erbium montée dans le kit IDIL. En conservant la même puissance de pompe que précédemment, comparer le spectre obtenu avec le précédent (mémorisez la première courbe sur la trace A, gardez les mêmes échelles et passez sur la trace B ; superposez ensuite A mémorisée et B active).

Cette fibre mesure environ 20 m : de ce fait, l'atténuation du faisceau pompe est suffisante pour l'utiliser à pleine puissance (200 mA).

Q5. Relever les spectres entre 1500 et 1600 nm pour diverses puissances de pompe. Observez la variation du spectre de fluorescence en fonction de la puissance de pompe. Interprétez ces variations à l'aide des données spectroscopiques de l'erbium en annexe.

2.7. Mesure du gain

Dans cette partie, l'objectif est d'évaluer l'amplification du signal émis à 1550 nm par la diode laser accordable par l'amplificateur fibré pompé par la diode émettant à la longueur d'onde de 980 nm. Les différentes mesures de gain seront effectuées à l'aide de l'analyseur de spectre optique en utilisant l'outil 'Peak search' ou les curseurs (menu 'Marker').

En notant la puissance « signal » d'entrée de l'amplificateur P_{IN} et la puissance de sortie P_{OUT} , le gain est défini par :

$$G = \frac{P_{OUT} - P_{ASE}}{P_{IN}} \approx \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad \text{soit } G_{[dB]} \approx P_{OUT[dBm]} - P_{IN[dBm]} \text{ si } P_{OUT} \gg P_{ASE}.$$

1^{ère} remarque IMPORTANTE : vous pouvez vous économiser de nombreuses connections-déconnections en ne mesurant qu'une unique fois la puissance signal en sortie de l'atténuateur optique pour une valeur donnée de l'atténuation (par ex. minimale 0 dB). Il vous suffira modifier le niveau d'atténuation pour faire varier la puissance injectée dans l'amplificateur : $P_{IN} = P_{IN(0dB)} - \text{atténuation}_{dB}$. Par ailleurs, le zéro (i.e. la position 0 dB) de l'atténuateur ne correspond pas a priori à une transmission de 100% (en raison de l'usure des connecteurs d'entrée/sortie).

2^{ème} remarque IMPORTANTE : on peut décider de mesurer la puissance signal (à 1550 nm) d'entrée P_{IN} dans l'EDFA en entrée ou en sortie de multiplexeur. Il est plus logique de le faire en entrée, car le multiplexeur fait partie de l'EDFA. Le gain tiendra alors compte de la perte d'insertion du multiplexeur pour la longueur d'onde signal.

2.7.1 *Mesure du gain en fonction de P_{in}*

Q6. Pour la puissance de pompe maximale, tracez l'évolution du gain de l'amplificateur (en dB) en fonction de la puissance du signal d'entrée P_{IN} (en dBm) pour une puissance d'entrée comprise entre -45 dBm et 0 dBm. Interprétez le phénomène de saturation observé.

Q7. Mesurez le niveau de l'ASE (précisez la longueur d'onde choisie pour la mesure) en fonction de la puissance d'entrée P_{IN} . Expliquez clairement l'évolution observée. Que cela implique-t-il sur l'élargissement du gain dans la fibre ?

Ajustez la puissance de signal d'entrée à $P_{IN} = -20$ dBm.

2.7.2 *Mesure du gain en fonction de P_P*

Q8. Pour la puissance du signal d'entrée $P_{IN} = -20$ dBm, tracer l'évolution du gain de l'amplificateur (en dB) en fonction de la puissance de pompe injectée (en W). Interpréter le phénomène de saturation observé.

2.7.3 *Etude des effets de cavité parasite*

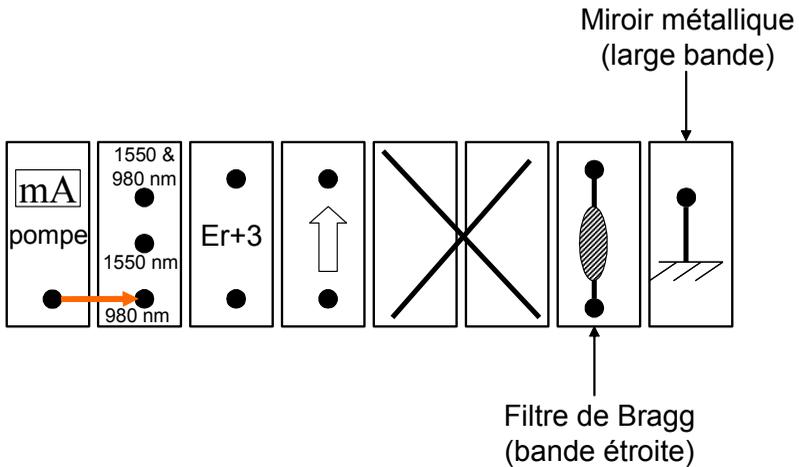
Q9. En supposant une réflexion parasite de type air/silice ($R \sim 4\%$) à chaque extrémités de la fibre dopée erbium, calculez le gain nécessaire pour obtenir un effet laser dans la cavité ainsi formée par la fibre. Commentez la valeur obtenue.

Q10. Quel est l'inconvénient de cet effet laser parasite sur les performances de l'amplificateur ?

Proposez une ou plusieurs solutions pour contrer cet effet (vous pourrez vous aider en cherchant les caractéristiques des connecteurs FC/PC ou FC/APC).

3. Lasers à fibre

3.1. *Expérience préliminaire : mesure de la transmission du filtre de Bragg*

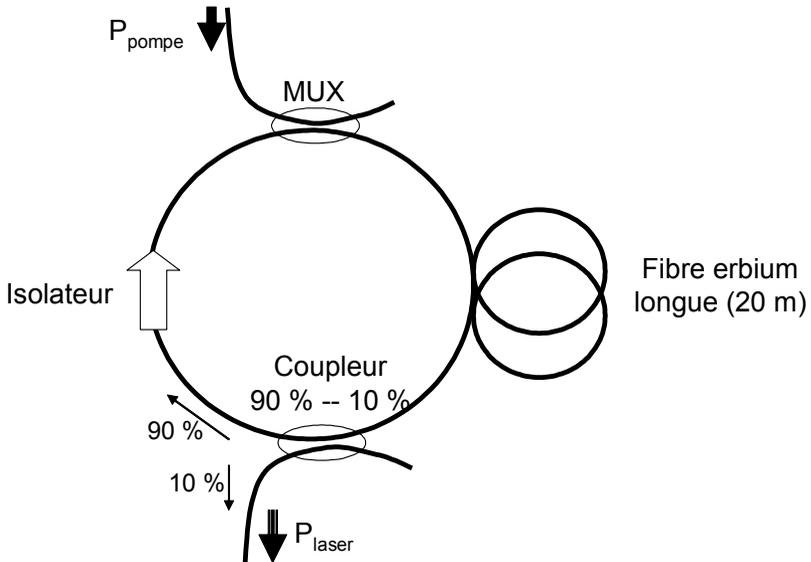


Pour caractériser la transmission du filtre de Bragg (équivalent à un miroir de bande étroite), utilisez la source large que constitue l'émission spontanée amplifiée de la fibre dopée :

Vous pouvez utiliser le mode TRACE de l'OSA afin de sauvegarder puis superposer les courbes.

Q11. Déterminer la longueur d'onde centrale et bande passante du filtre.

3.2. Réalisation d'une cavité en anneau

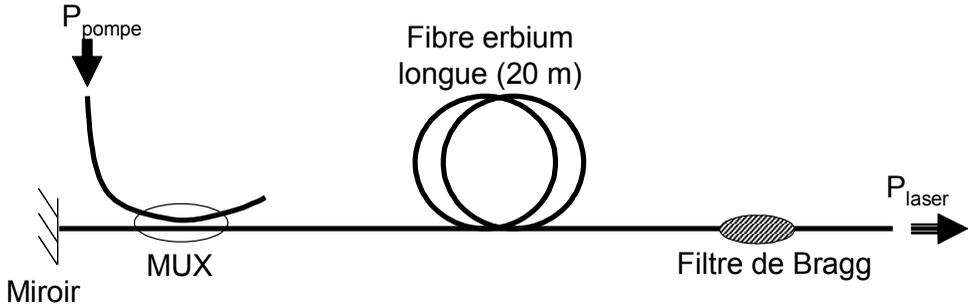


Réalisez le montage de la cavité en anneau (cf schéma précédent). La présence de l'isolateur dans la cavité n'est pas obligatoire.

Q12. Observez le spectre d'émission du laser et son évolution avec la puissance de pompe. Par quoi est imposée la longueur d'onde d'émission du laser ?

3.3. Réalisation d'une cavité linéaire

Réalisez le montage suivant.



Q13. Pour un point de fonctionnement donné, enregistrez un spectre à grande puis petite échelle horizontale (e.g. SPAN =50 nm et RBW=1 nm puis SPAN =5 nm et RBW=0,1 nm). Interprétez la longueur d'onde du laser obtenu et comparez la avec celle obtenue pour la cavité en anneau

Q14. A partir des observations sur les 2 montages, proposez un schéma de cavité laser permettant d'avoir une accordabilité de la longueur d'onde d'émission laser.

Annexe : Propriétés spectroscopiques de l'ion erbium

L'erbium fait partie de la famille des terres-rares (ou Lanthanides) qui sont très souvent incorporées dans des matrices solides et utilisées comme milieu actif pour les lasers. Citons quelques terres-rares, outre l'erbium : néodyme, praséodyme, ytterbium, thulium, holmium ... Les terres-rares ont la particularité de posséder de nombreuses transitions radiatives dans le visible et le proche infrarouge. L'intérêt majeur de l'ion erbium réside dans l'existence de transitions radiatives autour de 1,55 μm , comme le montre le schéma des niveaux d'énergie (dans la silice) de la figure ci-dessous.

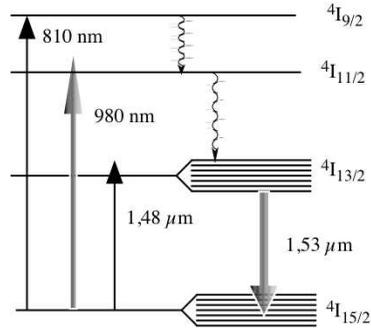
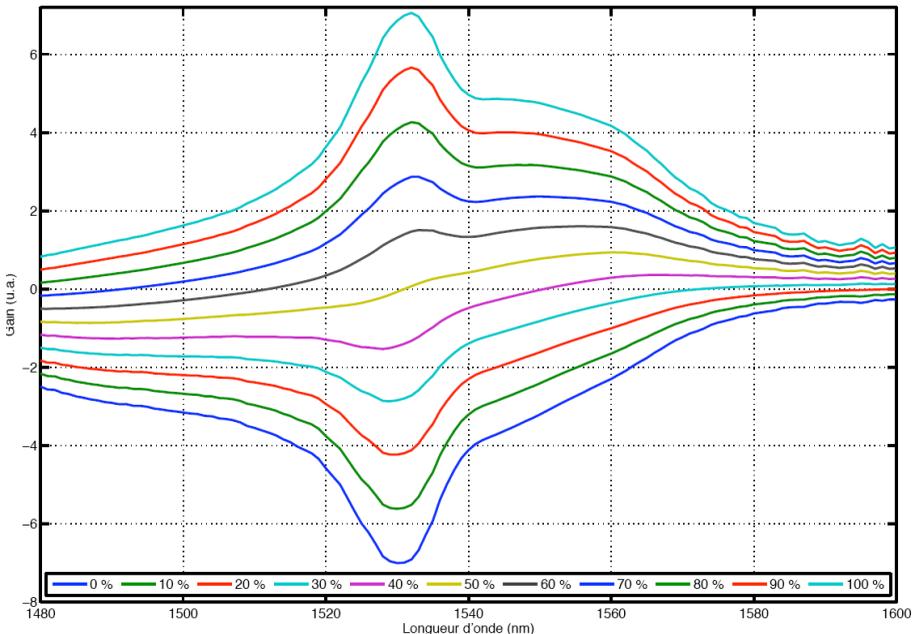


Schéma des niveaux de l'ion erbium



Gain linéique petit signal en fonction de la longueur d'onde pour différentes inversions de population

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 transition autour de 1,55 μm a lieu entre les niveaux ${}^4I_{13/2}$ et ${}^4I_{15/2}$. Le niveau ${}^4I_{13/2}$ est constitué en réalité de multiples sous-niveaux. Le pompage à 1,48 μm est rendu possible par une section efficace d'absorption supérieure à celle d'émission. La durée de vie du niveau métastable ${}^4I_{13/2}$, dans la silice, est de l'ordre de 10 ms. La section efficace d'émission à 1,53 μm (longueur d'onde centrale du spectre d'émission) est de $8,1 \cdot 10^{-21} \text{cm}^2$. La section efficace d'absorption à 980 nm est de $2,4 \cdot 10^{-21} \text{cm}^2$. 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 ${}^4I_{13/2}$).