

Travaux Pratiques d'Optique

Lasers

1	Découverte pratique des lasers (Lasers LEnsE)	1
2	Lasers visibles	3

Salles	Lasers LEnsE	Lasers visibles
	R1.26-R1.28	S1.21/25/29

lense.institutoptique.fr | Première année | Optique S6

Cycle Ingénieur - FISA - 1^{ère} année - Palaiseau
Semestre 6
Version du 3 janvier 2024
Année 2023-2024

TP 1

Découverte pratique des lasers (Lasers LEnsE)

Objectifs A l'issue de cette séance de TP, vous serez capable d'identifier la nature du milieu amplificateur (solide ou fibre) et la nature du régime de fonctionnement (temporel et fréquentiel) d'une source laser.

Présentation

Le Laboratoire d'Enseignement Expérimental dispose d'une dizaine de bancs différents conçus pour comprendre comment fonctionnent les sources lasers, comment les régler et les caractériser. Le but de cette séance est de visiter une partie de ces ressources, afin de vivre concrètement un premier contact avec les sources laser, dans un environnement dédié. Vous découvrirez :

- le matériel spécifique lié aux sources lasers : bancs, montures, outils de caractérisation incluant mesureurs de puissance, photodiodes, oscilloscopes rapides
- comment utiliser un laser en sécurité
- comment régler un laser
- comment accorder un laser
- comment faire fonctionner un laser en impulsions
- comment maîtriser l'alignement laser

Déroulement

Le déroulé de la séance évoluera en fonction de l'avancée du cours théorique. Séance type :

- découverte de l'effet laser : réglage et seuil d'oscillation : laser praséodyme
- alignement laser (sous groupe)
- passage en salle sécurisé (sous groupe) pour laser Ti :saphir accordable
- matériel spécifique (laser impulsionnel picoseconde)
- applications en fonction des disponibilités (faisceau laser collimaté, focalisé, optique non linéaire, laser induced breakdown spectroscopy)

TP 2

Lasers visibles

Sommaire

Mode d'emploi du texte du TP	3
Pré-requis	4
Sécurité laser	4
1 Le TP en un coup d'œil	5
2 Compétences à acquérir avec ce TP	6
3 Activités pédagogiques	6
3.1 Étude préliminaire : réglage d'un laser hélium-néon	6
3.2 Laser praséodyme	9

Mode d'emploi du texte du TP

Le texte présente l'esprit du TP et les activités proposées. Il donne des protocoles pour les réglages, en appui des explications qui seront données par les enseignant·es. Les actions à faire durant le TP sont notées par des flèches « \rightsquigarrow ». Elles correspondent à l'apprentissage des compétences « expérience » (savoir faire expérimental : réglage et utilisation des appareils de mesure).

Pour préparer le TP, lire le texte (hors paragraphes fléchés) et comprendre les schémas optiques. Vous pouvez répondre en avance aux questions **Q1, Q2, Q4, Q5, Q6**.

Pour le compte rendu, il est demandé de répondre aux questions notées **Q**. Celles-ci correspondent à l'apprentissage des compétences « mesure » (capacité à faire des mesures de qualité : bonne gamme d'incertitude, bonne gamme sur les échelles pour bien voir les phénomènes, graphes de qualité) et des compétences « physique » (compréhension des phénomènes physiques, maîtrise des ordres de grandeur).

Pré-requis

Lire le polycopié d'introduction sur les lasers¹.

Sécurité laser

Les lasers sont des sources de lumière dangereuses qui peuvent causer des dommages irréversibles surtout au niveau de la rétine. La sécurité laser consiste à évaluer les risques et à prendre des précautions pour éviter les accidents.

Inventaire des puissances

- Dans ce TP, la diode laser de pompage du laser praséodyme émet jusqu'à 1,6 W à 444 nm soit 1600 fois le seuil de dommage de l'oeil en vision directe. Par mesure de sécurité, son rayonnement n'est pas accessible avant son absorption dans le cristal laser. La puissance résiduelle après le cristal laser est de 100 mW.
- Le laser praséodyme peut émettre une puissance de 300 mW dans le spectre visible à puissance de pompe maximale.

Une densité absorbante de protection, de valeur $D = 1,5$, est placée derrière le miroir de sortie. Elle est intégrée à la monture du miroir. Sa valeur est la même pour tout le spectre visible (et donc pour le rayonnement de pompe traversant le miroir et pour le rayonnement laser traversant le miroir). Le miroir de sortie est totalement transparent pour le rayonnement de pompe.

Q1 Donner la valeur de la puissance totale (laser + pompe) obtenue après la densité, derrière le miroir de sortie, à puissance de pompe maximale. On rappelle qu'une densité de valeur D a une transmission de 10^{-D} .

Inventaire des risques et précautions à prendre

- Les lasers de ce TP sont dans le domaine de la classe 2 (pas de danger du fait du réflexe de clignement des paupières) lorsque la puissance est inférieure à 1 mW et de la classe 3R (vision directe pouvant être dangereuse) pour les puissances supérieures.

1. http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/OPI_fr_M01_C01_web_1.html

- Les longueurs d'onde émises couvrant tout le domaine du visible, il est difficile de se protéger des rayonnements lasers émis avec des lunettes laser. Le choix du TP est de travailler sans lunettes en étant rigoureux sur les protocoles à suivre.
- Lors du changement de miroirs de sortie, le faisceau issu de la diode laser pourrait se propager dans la zone d'expérience avec une puissance de 100 mW (100 fois le seuil de danger pour l'oeil).

La diode de pompe doit donc être éteinte lors de ce changement.

- Le faisceau de sortie est potentiellement dangereux s'il se réfléchit sur un miroir ou s'il est regardé directement. Par mesure de sécurité, le rayonnement doit toujours être bloqué à la sortie du laser par un mesureur de puissance ou par un écran. Il est indispensable de retirer tout objet brillant (montre, bagues) avant de manipuler le laser et de fixer toutes les montures.
- Utiliser la puissance de pompe maximale uniquement lorsque l'expérience le nécessite et baisser cette puissance dès que possible. Celle-ci peut-être ajustée au moyen de la rotation d'un composant optique placé sur le trajet du faisceau (lame demi-onde).

1 Le TP en un coup d'œil

Le TP est centré sur le réglage de cavités laser avec deux lasers différents : un laser à gaz (hélium-néon), pompé par une décharge électrique et un laser solide (laser praséodyme), pompé par une diode laser. Le choix est fait de travailler sur des lasers visibles afin de bien comprendre les protocoles de réglage.

Les cavités laser étudiées sont des cavités linéaires à deux miroirs : concave-concave pour le laser hélium-néon et plan-concave pour le laser praséodyme. Le réglage des cavités est fait par autocollimation par rapport à un axe optique défini, la lumière utilisée étant l'émission spontanée émise par le milieu laser.

Le TP comporte une étude préliminaire d'alignement d'un laser hélium-néon. L'étude principale du TP concerne le laser praséodyme dont une vue globale est donnée sur la figure 2.1 avec ses différents blocs fonctionnels. Une fois l'effet laser obtenu, le but du TP est de tracer des courbes d'efficacité du laser praséodyme pour deux longueurs d'onde différentes de fonctionnement.

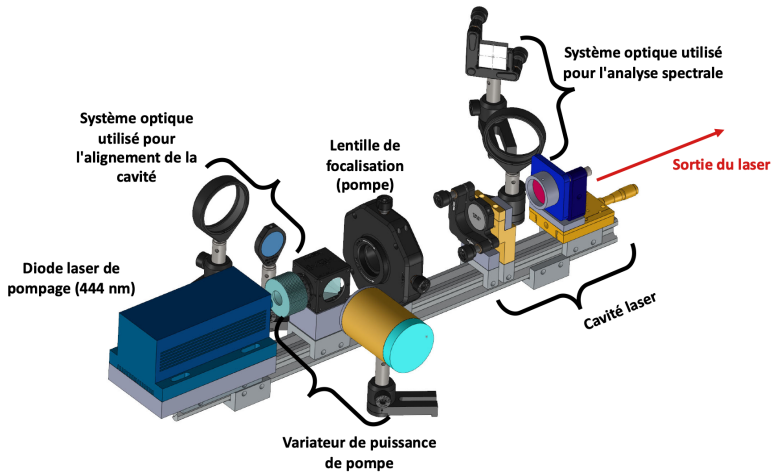


FIGURE 2.1 – Vue globale du laser praseodyme

2 Compétences à acquérir avec ce TP

Les compétences à acquérir dans ce TP sont les suivantes, selon 3 catégories :

- ◇ Compétences « Expérience » :
 - Aligner une cavité laser en utilisant des systèmes d'imagerie,
 - Optimiser les performances d'un laser.
 - Mettre en œuvre les notions de sécurité laser.
- ◇ Compétence « Mesure » :
 - Tracer une courbe d'efficacité du laser.
- ◇ Compétences « Physique » :
 - Comprendre les paramètres qui jouent sur la puissance de sortie d'un laser continu : seuil d'oscillation, transmission du miroir de sortie, orientation des miroirs,
 - Comprendre la sélection spectrale du laser par la condition sur le gain.

3 Activités pédagogiques

3.1 Étude préliminaire : réglage d'un laser hélium-néon

Le mélange gazeux Helium-Néon (He-Ne) est utilisé pour réaliser des lasers à différentes longueurs d'onde dans le visible et l'infrarouge : $3,39 \mu\text{m}$,

1, 52 μm , 0, 633 μm , 0, 612 μm , 0, 594 μm et 0, 543 μm . Une décharge électrique continue (quelques mA sous quelques kV) dans le mélange gazeux excite l'hélium vers des niveaux métastables. Par collisions, les atomes de néon peuvent alors être portés dans des niveaux excités dont l'énergie est voisine de celle des niveaux métastables de l'hélium. La figure 2.2 montre le schéma des niveaux d'énergie mis en jeu pour l'hélium et le néon. Il existe des lasers Helium-Néon émettant à chacune de ces longueurs d'onde. La raie rouge à 632, 8 nm est la plus utilisée.

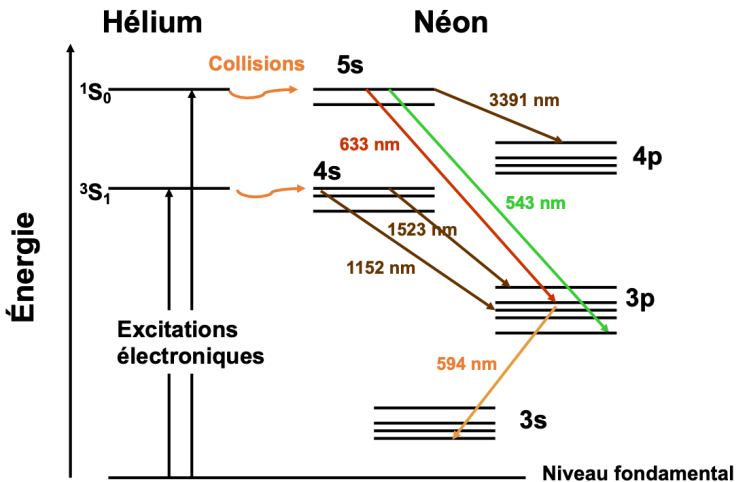


FIGURE 2.2 – Représentation schématique des niveaux d'énergie de l'hélium et du néon utilisés dans un laser hélium-néon

Dans le montage, le laser comporte un tube contenant le mélange gazeux He-Ne et les électrodes. Le tube est fermé à une extrémité par un miroir sphérique M1 de rayon de courbure 600 mm et de réflectivité proche de 100% à 633 nm (Voir Figure 2.3). L'autre extrémité du tube est fermée par une lame de verre à l'incidence de Brewster. Le deuxième miroir M2 est le miroir de sortie, il a un rayon de courbure de 700 mm ou 800 mm selon les montages. Le coefficient de réflexion de ce miroir est de l'ordre de 98% à 633 nm.

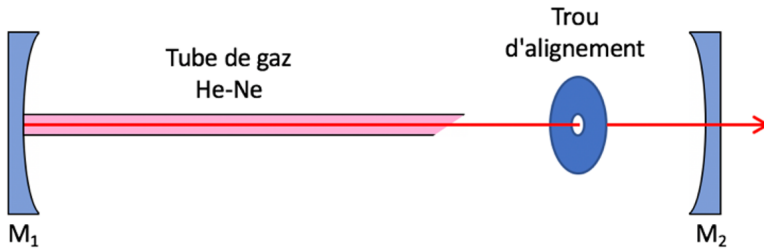


FIGURE 2.3 – schéma de la cavité laser

↪ Placer un trou d'alignement en sortie du tube de gaz, à centrer sur le point blanc brillant correspondant à la fluorescence réfléchi par le miroir M_1 .

↪ Grâce aux réglages de translation sa monture, centrer le miroir M_2 sur la fluorescence provenant du trou d'alignement.

↪ Puis, grâce aux vis de basculement de M_2 , régler son orientation de façon à centrer le faisceau réfléchi sur le trou (le point blanc est donc ramené dans le trou). On a ainsi réalisé l'autocollimation.

↪ Ajuster ensuite l'orientation de M_2 autour de ce réglage dit « géométrique » jusqu'à obtenir l'effet laser qui s'identifie facilement par un faisceau rouge très localisé dans l'espace.

Q2 Expliquer pourquoi l'émission spontanée du gaz He-Ne n'a pas la même couleur que l'émission laser.

Dans un laser, la distribution d'intensité dans le plan transverse à l'axe de propagation est fixée par la propagation dans la cavité. En général, le profil transverse est gaussien mais il est possible de sélectionner d'autres profils transverses.

↪ Placer des fils dans la cavité pour sélectionner des profils transverses différents.

Q3 Prendre des photos des profils obtenus en augmentant la taille du faisceau au moyen d'un objectif placé à la sortie du laser. Faire le lien entre l'orientation des fils et les profils enregistrés.

3.2 Laser praséodyme

Le milieu laser utilisé dans cette partie est un cristal de Pr: YLF ($\text{Pr}^{3+}:\text{YLiF}_4$) sous la forme d'un cube de section $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ et de longueur 5 mm . Le diagramme des niveaux d'énergie de l'ion Pr^{3+} dans la matrice cristalline de YLF est donné sur la figure 2.4. Le peuplement du « niveau du haut » (${}^3\text{P}_0$), utilisé pour faire des effets laser, est assurée par un « pompage optique », c'est à dire par absorption de lumière. Le pompage est effectué ici à une longueur d'onde de 444 nm . Le spectre d'émission à partir du niveau du haut (${}^3\text{P}_0$) est donné sur la figure 2.5. De nombreuses transitions laser sont possibles. La figure 2.4 repère les transitions principales.

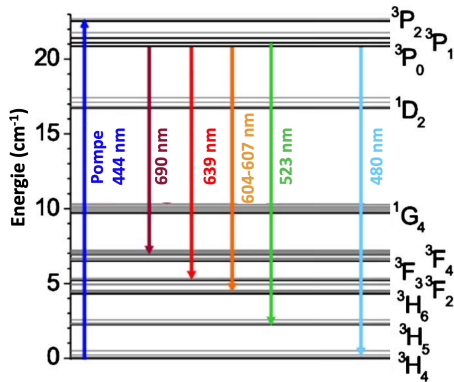


FIGURE 2.4 – Principaux niveaux d'énergie de l'ion Pr^{3+} dans la matrice de YLF (à gauche) [ref Appl.Opt. 49, 20 (2010) p3864]

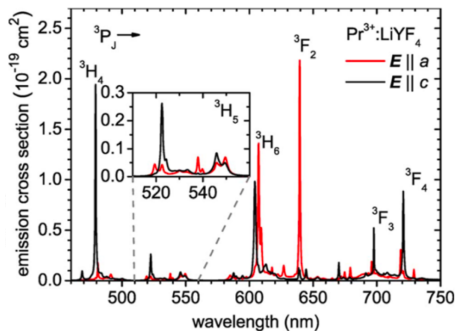


FIGURE 2.5 – Spectre d'émission avec un pompage à 444 nm [ref Opt.Lett 36 6 2011 p 1002.]

Le montage expérimental complet est donné sur la figure 2.6. Une diode laser bleue collimatée (lentille de collimation non représentée) est focalisée au moyen d'une lentille L ($f = 70 \text{ mm}$) dans le cristal laser sur un diamètre de l'ordre de $100 \mu\text{m}$. La cavité est formée par deux miroirs M_1 et M_2 . Le miroir M_1 est plan. Il est dit « dichroïque » : transparent pour le bleu et très réfléchissant pour la longueur d'onde laser. Le miroir concave M_2 est le miroir de sortie, partiellement réfléchissant pour la longueur d'onde laser (coefficient de réflexion $R = 95\%$). Son rayon de courbure vaut $R_c = 100 \text{ mm}$. La cavité est formée ces deux miroirs M_1 et M_2 est dite « plan-concave ».

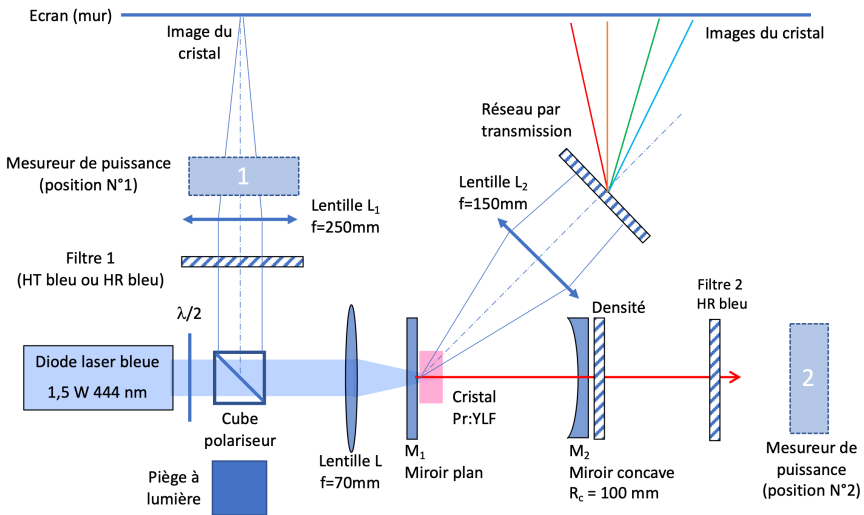


FIGURE 2.6 – Schéma optique du laser « praséodyme » Pr: YLF (légende : HT = hautement transparent, HR = hautement réfléchissant)

Sur le trajet du faisceau de pompe, une lame demi-onde et un cube séparateur de polarisation assurent la variation de la puissance de pompe incidente afin de faire les alignements à faible puissance de pompe et afin de faire des mesures sur les caractéristiques du laser (seuil, courbe d'efficacité). Cette méthode de variation de la puissance de pompe permet de ne pas changer le courant d'alimentation de la diode laser, ce qui aurait pour conséquence de modifier son spectre de quelques nm en fonction de la valeur du courant. En effet, la diode a été sélectionnée pour que sa longueur d'onde soit au maximum du pic d'absorption du praséodyme dans le bleu (444 nm) pour le courant nominal. La largeur spectrale de la bande d'absorption du praséodyme vers 444 nm étant de quelques nm, une variation de longueur d'onde de la diode laser pourrait faire varier fortement l'absorption du cristal.

Q4 A quoi sert le piège à lumière montré sur la figure 2.6 ?

Deux systèmes optiques différents sont utilisés pour faire l'image du cristal sur le mur situé à proximité du montage.

Le premier système est utilisé pour l'alignement de la cavité. Il utilise la lumière réfléchiée par le cube séparateur de polarisation. Une lentille L_1 , utilisée en combinaison avec la lentille L , fait l'image du cristal sur le mur. Des filtres réfléchissants (appelé « filtres 1 ») avec des transmissions différentes sont utilisés selon les besoins.

Q5 Expliquer pourquoi l'image du cristal par la lentille L_1 se trouve au foyer de cette lentille.

Le deuxième système optique est utilisé pour l'analyse spectrale de la lumière émise par le cristal laser. Il fait l'image du cristal hors de l'axe de la cavité laser. La lumière utilisée est donc très majoritairement de l'émission spontanée. Un réseau par transmission permet de faire une décomposition spectrale de la lumière émise.

Q6 Estimez la distance entre l'écran (mur) et la lentille L_2 . En déduire la valeur de la distance entre le cristal laser et la lentille L_2 .

Réglages géométriques

Lentille L_1

↪ Faire la mise au point de la lentille L_1 pour avoir une image nette du cristal sur le mur.

Vous pourrez observer que l'image du cristal sur le mur est constituée :

- d'un point lumineux très intense : il s'agit de la zone de focalisation du faisceau de pompe qui émet une forte lumière par émission spontanée,
- ainsi que d'une zone diffuse autour de ce point : il s'agit de l'émission spontanée diffusée par la monture du cristal, éclairant l'intérieur du cristal.

↪ Observer l'effet de deux « filtres 1 » différents (HR bleu et HT bleu) sur la couleur de l'image du cristal.

Q7 Commenter les différences.

Lentille L2

~> Faire la mise au point de la lentille L2 pour avoir une image nette du cristal sur le mur sans réseau puis placer le réseau de diffraction dans le faisceau et l'orienter le réseau pour que le spectre soit le plus net possible sur le mur.

Q8 Prenez une photo du spectre obtenu et identifier sur la photo les différentes raies du laser, compte-tenu de la figure 2.4.

Miroir M2

Pour réaliser l'effet laser, l'axe optique de la cavité doit être parallèle et confondu avec l'axe optique du faisceau de pompe, afin d'assurer un bon recouvrement entre le faisceau de pompe et le faisceau de la cavité laser. Cet axe optique a été réglé au préalable par l'alignement du faisceau de pompe sur le banc optique et par l'alignement du miroir M1, réglé par autocollimation sur le faisceau de pompe (ce réglage n'est pas accessible).

Dans le TP, le réglage à faire consiste à aligner le miroir M2 sur l'axe optique de la cavité. Pour cela, on utilise les propriétés d'optique géométrique d'un miroir concave.

~> Faire une autocollimation en plaçant le centre de courbure du miroir sur le cristal laser.

Ceci permet de voir apparaître un nouveau point lumineux (image de retour de l'émission spontanée) au niveau du cristal laser. Si le miroir est fortement désaligné, cette image de retour apparaît sur la monture en cuivre du cristal. Si le miroir est déjà bien réglé sur l'axe optique, cette image apparaît sur le mur, après la lentille L1.

~> Ajuster l'orientation du miroir M2 pour superposer l'image de retour avec l'image directe en regardant sur le mur.

~> Rapprocher le miroir M2 du cristal de 1 cm environ (ceci pour garantir que la cavité plan-concave est stable).

↪ Réajuster si besoin l'orientation de M_2 , en centrant la tache de retour (qui est maintenant plus large) sur le point lumineux (image directe) sur le mur.

↪ Observer la lumière sortant du miroir de sortie, après le filtre 2 « HR bleu ». Si l'effet laser n'est pas obtenu, il est possible de voir deux points d'émission spontanée proches de l'axe optique, concentrés par des effets d'allers et retours dans la cavité. Régler l'orientation de M_2 pour superposer ces taches. Ceci doit permettre d'obtenir l'effet laser, lorsque la puissance de pompe est maximale.

Etude de l'effet laser

Observation de l'effet laser

↪ Pour la puissance de pompe maximale, optimiser l'orientation du miroir M_2 pour obtenir la plus grande puissance de sortie.

Q9 Une fois l'effet laser obtenu, prendre une photo qui montre que la lumière laser dans la cavité est beaucoup plus intense que la lumière en sortie. Expliquer pourquoi.

↪ Observer le spectre sur le mur. En ajustant le réglage du réseau, il est possible de voir la superposition de la raie laser avec les raies d'émission spontanée.

Q10 Donner la valeur de la longueur d'onde du laser obtenu, en vous aidant de la figure 3 et du spectre observé.

Q11 Prendre des photos qui montrent que l'émission spontanée est modifiée par l'existence de l'effet laser. Expliquer pourquoi.

Courbe d'efficacité

↪ Mettre en place le mesureur de puissance laser après le filtre 2 « HR bleu », en position 2 (Figure 2.6). Ce mesureur utilise un détecteur au silicium qui donne un photo-courant : un photon absorbé par le silicium donne un photo-électron.

Q12 Expliquer pourquoi il est nécessaire de spécifier la longueur d'onde sur le cadran du détecteur pour faire une mesure correcte de la puissance de sortie

En plaçant le mesureur de puissance en position 1 (Figure 2.6), il est possible de retrouver la puissance de pompe incidente sur le cristal de P_r : YLF. En effet, le miroir M_1 n'est pas totalement transparent dans le bleu, il possède une réflexion résiduelle de l'ordre du % qui est captée en partie par le mesureur dans la position 1.

Cette puissance permet d'avoir une mesure indirecte de la puissance de pompe incidente sur le cristal, sachant que des mesures préliminaires ont donné une puissance de pompe incidente sur le cristal de 1,4 W pour la valeur maximale de la pompe (1,6 W). Cette mesure est faite au moyen d'un voltmètre.

Q13 On fait varier la puissance de pompe incidente sur M_1 . Donner votre protocole pour déduire la valeur de la puissance de pompe incidente sur M_1 à partir des mesures de tensions faites au voltmètre.

Q14 Quel filtre 1 choisir pour faire une bonne mesure de la puissance de pompe ?

Q15 En utilisant les mesureurs de puissance placés aux points 1 et 2 (Figure 2.6), tracer la courbe d'efficacité du laser : puissance de sortie en fonction de la puissance de pompe incidente.

Note : la puissance de sortie à prendre en compte est celle qui est juste avant la densité de protection (densité $D = 1,5$).

Influence de la longueur de la cavité

~> Régler le miroir M_2 pour différentes longueurs de cavité (distance M_1-M_2).

Q16 Rapporter vos observations sur la divergence du faisceau en fonction de la longueur de la cavité.

Changement de miroir de sortie

Sur le montage, un deuxième miroir de sortie M_2 est disponible pour faire fonctionner le laser à une longueur d'onde différente. Son rayon de courbure est $R_c = 100$ mm.

~> Régler la cavité laser avec ce nouveau miroir de sortie.

Q17 Tracer la courbe d'efficacité du laser (puissance de sortie en fonction de la puissance de pompe incidente) sur le même graphe que pour la question **Q15**.

Q18 Commenter les différences entre les deux courbes d'efficacité obtenues.