

# TP YAG pulsé

— Laser, Matériaux, Milieux Biologiques —

## Sécurité laser

**ATTENTION** : Le faisceau du laser utilisé au cours de ce TP est extrêmement dangereux. Il peut émettre une puissance continue de plus de 2 W à 10 Hz) et une puissance crête de 10 MW ce qui correspond à une énergie par impulsion de 200 mJ pour une largeur d'impulsion de moins de 20 ns. Il peut provoquer des accidents graves en cas d'exposition de l'œil directe ou même à de faibles réflexions. Rappel :

- La *vision directe du faisceau* ou des *réflexions spéculaires* de celui-ci provoque des **dommages irréversibles à la rétine à partir de quelques mW**.
- L'*exposition prolongée de la peau* à un faisceau de 30 mW peut aussi provoquer des lésions superficielles.

## Précautions à prendre

Les lunettes de protection doivent être impérativement portées dès que le laser est en marche :

- les lunettes « marron » qui absorbent l'infrarouge et le vert lorsque l'on réalise du doublage de fréquence avec passage dans l'amplificateur
  - les lunettes « vertes » qui absorbe que l'infrarouge le reste du temps.
1. *Éliminer toute cause de réflexion parasite*, même très brève, par des objets qui pourraient intercepter une partie du faisceau : **Enlever montres et bagues pendant la durée du TP.**
  2. **Ne pas approcher son œil du faisceau pour faire les alignements.**
  3. **Ne jamais insérer** un élément optique (lentille, filtre...) dans le montage expérimental **sans avoir au préalable positionné une mousse diffusante dans la cavité laser.**
  4. *Bien fixer tous les éléments optiques* insérés dans le faisceau.
  5. *Bloquer par des mousses diffusantes tous les faisceaux secondaires* créés par des éléments insérés dans le faisceau : lames séparatrices, lames de Brewster, éléments polariseurs...
  6. Lors de travail en équipe sur un même laser, *surveiller toujours les opérations effectuées par le coéquipier* lorsqu'il est amené à manipuler à proximité du faisceau laser.

# 1 Présentation du TP

Le laser noté 1 est le laser de la deuxième pièce (près de la fenêtre). Le laser noté 2 est le laser de la première pièce (près du bureau). Toutes les manipulations seront réalisées sur le laser 2.

## 1.1 Introduction

L'objectif de ce TP est l'étude des grandeurs caractéristiques d'un laser en impulsion, telles que l'énergie, la puissance moyenne, la puissance instantanée, la durée de l'impulsion. Cette étude sera menée pour deux types de fonctionnement :

- le fonctionnement en mode relaxé (l'impulsion est émise « naturellement » par le laser)
- le fonctionnement en mode déclenché (l'émission est commandée par une action externe).

Dans une seconde partie, on caractérisera l'amplification par simple passage dans un barreau de Nd :YAG, puis le doublage de fréquence par un cristal non linéaire de KDP.

Enfin, dans la dernière partie on illustrera l'interaction laser-matière en fonction de la durée de l'impulsion par quelques exemples.

## 1.2 Description du laser

### 1.2.1 Le milieu amplificateur

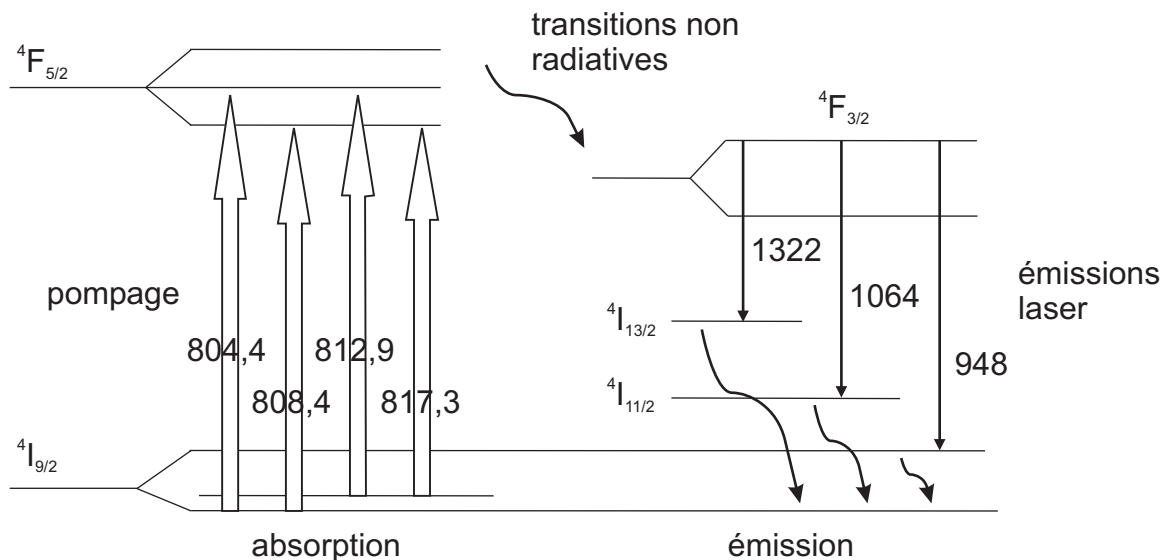


FIG. 1 – Niveaux d'énergie de l'ion  $\text{Nd}^{3+}$  dans un cristal de YAG qui interviennent lors d'un pompage optique par une diode laser autour d'une longueur d'onde de 805 nm. Les longueurs d'onde sont exprimées en nm sur le schéma.

Dans le laser à Nd :YAG le milieu amplificateur est solide. La matrice est un cristal de YAG (acronyme d'*Yttrium - Aluminium Garnet*, en français : *grenat d'yttrium et d'aluminium*)

dopé en ions néodyme  $\text{Nd}^{3+}$  qui sont le siège des transitions de pompage optique et d'émission stimulée; ils forment le milieu amplificateur. Les niveaux d'énergie de l'ion  $\text{Nd}^{3+}$  impliqués dans l'effet laser sont représentés sur la figure (1). Le milieu amplificateur est ici pompé par lampe flash. Ce type de pompage n'est pas sélectif en longueur d'onde (contrairement au cas du pompage par diode laser).

La longueur d'onde d'émission est fixée à 1064 nm par les coefficients de réflexion des miroirs de la cavité.

### 1.2.2 La cavité laser

La cavité laser est une cavité linéaire formée par deux miroirs hautement réfléchissants à 1064 nm. L'un est plan ( $M_1$  sur la figure (2)), l'autre a un rayon de courbure égal à 5 m ( $M_2$  sur la figure (2)). La longueur de la cavité est de l'ordre de 1 m. Le faisceau de sortie est obtenu en rendant légèrement elliptique la polarisation du faisceau intracavité à l'aide d'une lame quart d'onde. De cette façon, une fraction du faisceau est réfléchi par le polariseur de Glan et peut ainsi sortir de la cavité. La lame quart d'onde est réglée de façon à réaliser un compromis entre la puissance intracavité et la puissance de sortie.

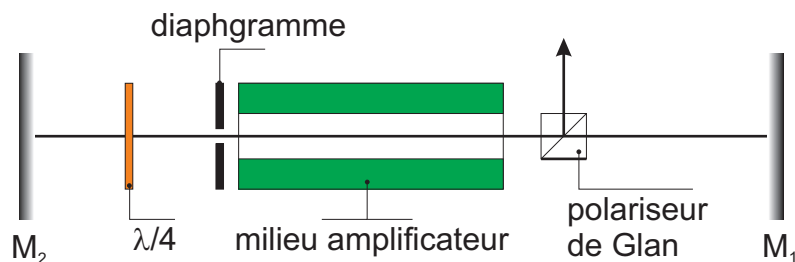


FIG. 2 – Schéma de la cavité laser vu du dessus.

Analysons l'évolution de la polarisation de l'onde au passage des différents éléments présents dans la cavité, en considérant le faisceau émis par le milieu amplificateur et se propageant vers le polariseur de Glan. Avant le polariseur, le faisceau n'est pas polarisé. Le polariseur de Glan transmet la polarisation horizontale et réfléchit la polarisation verticale. L'onde intracavité est alors polarisée horizontalement. C'est toujours le cas après réflexion sur le miroir  $M_1$  et transmission par le polariseur et par le milieu amplificateur. Le passage de la lame quart d'onde rend cette polarisation légèrement elliptique. Cette ellipticité augmente à la seconde traversée de la lame après réflexion sur  $M_2$ . Quand l'onde polarisée elliptiquement arrive sur le cube, elle se décompose en une partie polarisée verticalement et une partie polarisée horizontalement, et donc en une polarisation réfléchi qui constitue le faisceau de sortie et une polarisation transmise qui constitue le faisceau intracavité.

## 1.3 Mise en route

### 1.3.1 Mise en route de la circulation d'eau

Le barreau de Nd :YAG est refroidi par un circuit d'eau fermé (« circuit interne »), qui est lui-même maintenu à température constante par un circuit externe. La vanne du circuit

externe, commune aux deux lasers et notée « général », se trouve à côté du local tampon dans la première salle. La vanne du laser 2 est juste à côté. Celle du laser 1 est derrière l'alimentation correspondante.

### 1.3.2 Mise en route de l'alimentation du laser

Mettre en position ON les disjoncteurs de l'armoire électrique, notés laser 1 et laser 2. Pour le laser 2, il faut juste brancher la prise 220 V et mettre le groupe de refroidissement (CG) en marche avec l'interrupteur. Pour le laser 1, il faut appuyer sur l'interrupteur général en bas de l'alimentation et mettre le groupe de refroidissement en marche avec l'interrupteur.

L'alimentation du laser comporte un tiroir de commande (CU) qui fixe le mode de tir et un tiroir de puissance (PU) par barreau de Nd :YAG (un pour l'oscillateur, un autre pour l'amplificateur en simple passage).

### 1.3.3 Mise en route de l'étage oscillateur

Tourner la clé du tiroir CU (Command Unit) de l'alimentation. Mettre l'interrupteur du premier tiroir PU (Power Unit) sur ON et attendre le « clic » du relais. Il existe 6 modes de fonctionnement de l'unité de commande :

- manuel (1 seul tir) : bouton charge + bouton tir
- semi automatique (1 seul tir) : bouton charge puis tir automatique
- automatique : tir automatique à différentes fréquences
  - A = 1 Hz
  - B = 5 Hz
  - C = 10 Hz
- Externe : on peut utiliser une horloge externe pour commander le tir.

Au cours du TP, on utilisera toujours l'horloge interne et les modes de fonctionnement semi automatique et automatique à 10 Hz (fonctionnement normal). Il existe une horloge interne dans le bloc d'alimentation fournissant des impulsions de 0 – 24 V en 150  $\mu$ s. Elle déclenche l'électro-optique, l'oscillateur, l'amplificateur et l'oscilloscope. On donne en annexe la chronologie temporelle qui régit un tel tir laser.

### 1.3.4 Mise en route de l'étage amplificateur

C'est le deuxième tiroir PU (Power Unit). Appuyer sur ON et attendre le « clic » du relai. Dans les premières étapes du TP (jusqu'à la caractérisation de l'impulsion en mode déclenché), on n'utilisera que l'étage oscillateur.

## 2 Étude des différents modes de fonctionnement

### 2.1 Montage expérimental

Le montage expérimental est représenté sur la figure (3). Après réflexion sur le polariseur de Glan, le faisceau de sortie, polarisé verticalement, est réfléchi par un miroir  $R_{\max}$  à 1064 nm ( $M_3$  sur la figure (3)). Une petite partie du faisceaux traverse  $M_3$  et est envoyée sur une photodiode

rapide afin de mesurer la forme des impulsions. **Attention à la saturation de la photodiode, on placera des densités neutres pour atténuer le faisceau.**

La réflexion sur un second miroir ( $M_4$  sur la figure (3)) permet de mesurer sa puissance à l'aide d'un calorimètre. **Attention au temps de réponse du calorimètre.**

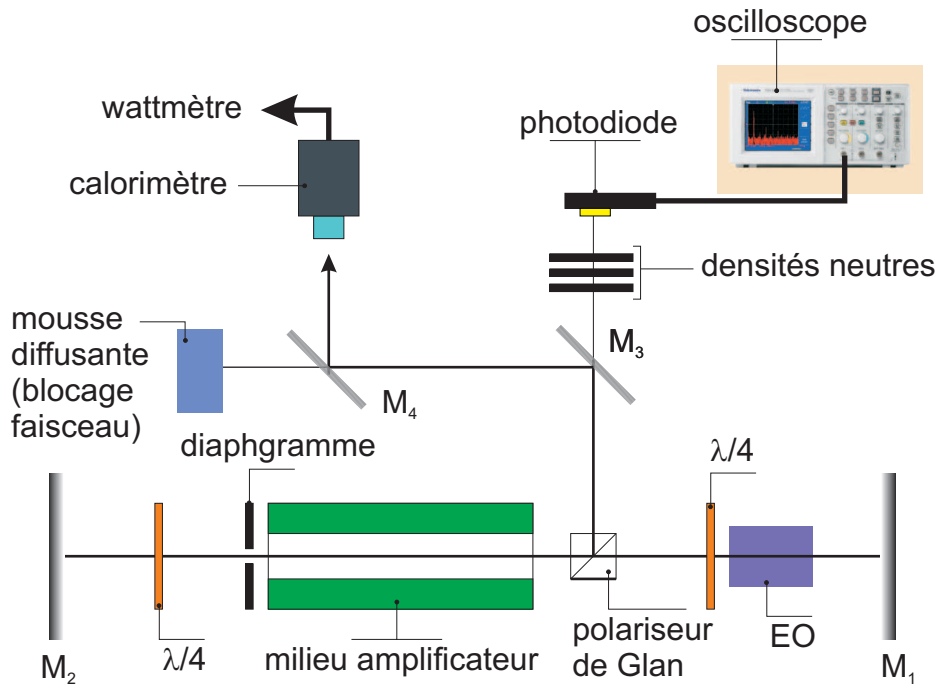


FIG. 3 – Mesures de puissance et largeur d'impulsion en fonctionnement relaxé.

## 2.2 Fonctionnement relaxé

Pour être en mode relaxé, s'assurer que le boîtier de contrôle de l'électro-optique EO est sur la position EXT afin de le rendre inactif. La lame  $\lambda/4$  proche de l'EO doit être positionné selon ses axes neutres ou alors retirée du montage.

### 2.2.1 Mesure de la puissance

*Placer le miroir  $M_4$  dans la rainure prévue à cet effet avant l'amplificateur. Choisir une fréquence de tir de 10 Hz. Si nécessaire, optimiser la puissance de sortie reçue par le calorimètre placé après le miroir  $M_4$ . Pour cela, jouer sur la position du diaphragme et l'orientation des miroirs de la cavité en tir à 10 Hz. Attention à la constante de temps du calorimètre.*

*Noter la valeur de la puissance moyenne optimisée et en déduire l'énergie par impulsion.*

### 2.2.2 Observation des impulsions en mode relaxé

Pour observer le signal délivré par la photodiode sur l'oscilloscope, fixer l'impédance d'entrée de l'oscilloscope sur  $50 \Omega$  et choisir une base de temps de l'ordre de  $30 \mu\text{s}/\text{div}$ .

Mesurer la largeur à mi-hauteur de chaque impulsion et de leur enveloppe. Comment peut-on interpréter les différents pics que l'on observe ? En déduire la puissance instantanée (crête) du laser.

Mesurer le temps d'arrivée du premier pulse et le temps entre deux pulse. À quelle(s) grandeur(s) sont reliés ces temps ? Diminuer légèrement la tension des lampes flash et observer comment évolue ce temps.

## 2.3 Fonctionnement déclenché

On va à présent contrôler l'instant où la cavité laser peut osciller en jouant sur la polarisation de l'onde intracavité. L'alimentation de l'EO est mise en marche périodiquement à la fréquence du signal d'horloge de l'alimentation du laser. Tant que l'EO n'est pas alimenté, la polarisation de l'onde intracavité est telle qu'elle ne peut pas reboucler sur elle-même (voir figure (4)). Le laser ne peut donc pas osciller mais le pompage du milieu amplificateur est assuré et de l'énergie est stockée dans la cavité. Dès que l'EO est alimenté, le laser peut émettre et l'énergie préalablement stockée dans la cavité est libérée d'un seul coup sous la forme d'une impulsion plus courte, et donc de puissance crête plus importante qu'en mode relaxé.

### 2.3.1 Obtention de l'effet laser

Placer une  $\lambda/4$  dans la cavité (voir figure (4)) et la tourner dans son plan pour ramener à zéro l'impulsion relaxée (il peut être nécessaire de retoucher l'orientation du polariseur de Glan pour mesurer vraiment zéro). Vérifier en tournant la  $\lambda/4$  de part et d'autre du zéro que l'on retrouve bien le signal.

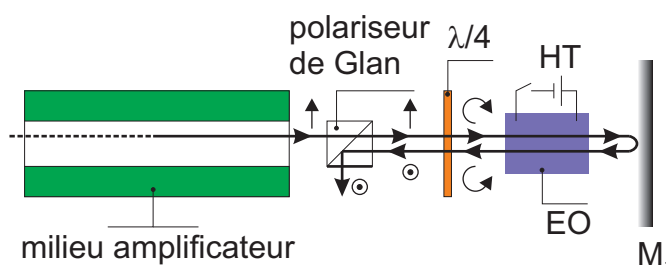


FIG. 4 – Élimination de l'impulsion relaxée lorsque l'EO est éteint.

Ce réglage revient à placer les lignes neutres de la  $\lambda/4$  à  $45^\circ$  des directions verticale et horizontale. En effet, la polarisation incidente sur la  $\lambda/4$  est horizontale. Si les lignes neutres de la lame sont à  $45^\circ$  de l'horizontale, la polarisation émergente est circulaire. Après réflexion sur le miroir, l'ellipticité change de sens et la polarisation après le second passage dans la lame devient verticale (le double passage à travers la lame quart d'onde équivaut au passage d'une lame demi onde avec une rotation de la polarisation de  $90^\circ$ ). La polarisation incidente sur le polariseur de Glan étant verticale, elle est réfléchiée et l'onde ne peut pas reboucler dans la cavité.

Rebrancher l'EO et choisir une fréquence de tir de 10 Hz. Écouter le « claquement » de l'impulsion déclenchée sur le papier graphité. Observer l'impulsion déclenchée qui apparaît juste

après le déclenchement de l'électro-optique. Optimiser le signal en jouant sur la lame  $\lambda/4$  et sur l'orientation des miroirs de la cavité.

### 2.3.2 Détermination des grandeurs caractéristiques

Représenter la forme du pic obtenu.

Mesurer la largeur à mi-hauteur de l'impulsion. En déduire la puissance instantanée. Comparer au résultat obtenu en mode relaxé.

Mesurer le temps d'arrivée de l'impulsion après le déclenchement de l'EO.

Dans la suite du TP, sauf mention explicite, on travaillera en mode déclenché uniquement.

### 2.3.3 Évolution avec le taux de pompage

Diminuer le taux de pompage en jouant sur la tension des lampes flash et observer comment évolue la forme du pic déclenché.

Ne jamais dépasser la tension de 1,7 kV.

## 3 Amplification du laser

### 3.1 Réglages

L'alignement du faisceau se fait l'amplificateur éteint.

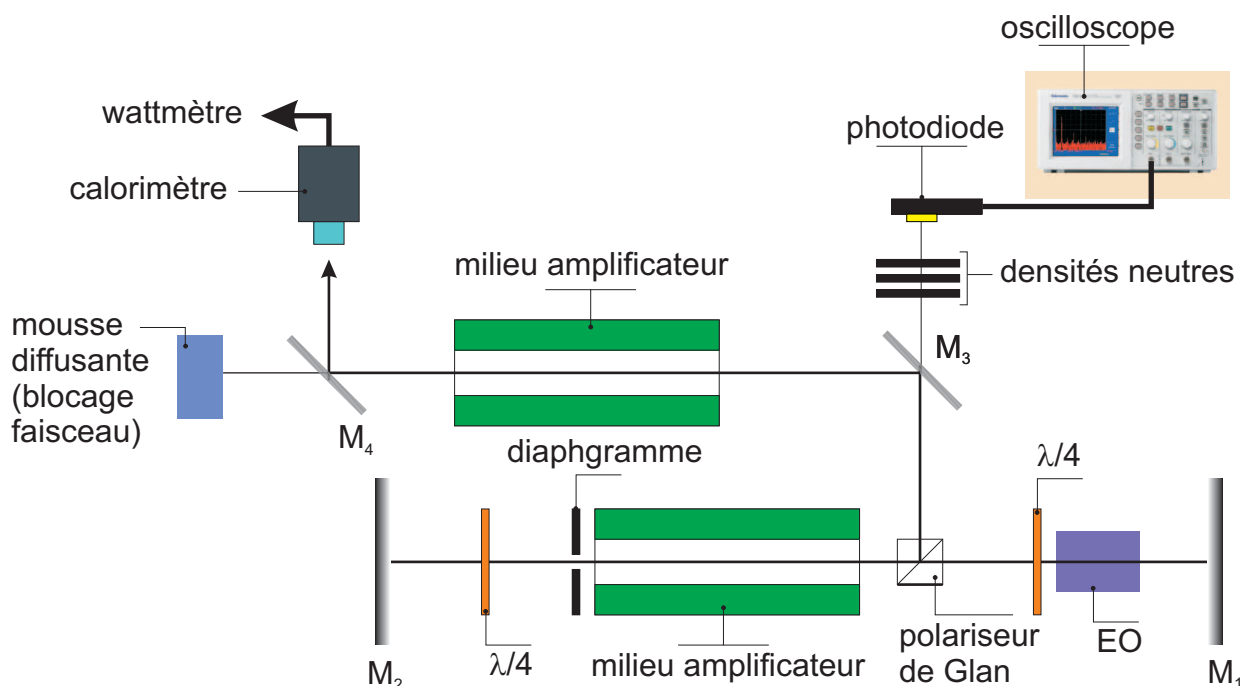


FIG. 5 – Amplification du faisceau laser.

Placer le miroir amovible  $M_4$  et le calorimètre après l'amplificateur. En tir semi automatique, régler l'orientation du miroir  $M_3$  pour passer dans l'amplificateur, puis positionné le calorimètre.

### 3.2 Facteur d'amplification

En tir à 10 Hz, mesurer la puissance moyenne l'amplificateur éteint. Allumer le PU de l'amplificateur (**le laser ne doit pas être en tir automatique lorsque l'on allume le PU**). Mesurer alors la puissance moyenne. En déduire le facteur d'amplification.

Répéter ces mesures pour divers taux de pompage.

## 4 Doublage de fréquence

### 4.1 Réglage et accord de phase

Tous les réglages se font l'amplificateur éteint.

Retirer le miroir  $M_4$ . Placer le cristal doubleur de KDP, le miroir dichroïque permettant de récupérer le faisceau vert seul et l'envoyer sur un calorimètre.

Si nécessaire, optimiser la position du cristal doubleur par rapport au faisceau à 1064 nm en tir semi automatique (pour cela, dévisser la bride fixant le cristal sur le banc optique et translater le cristal perpendiculairement à la direction de propagation).

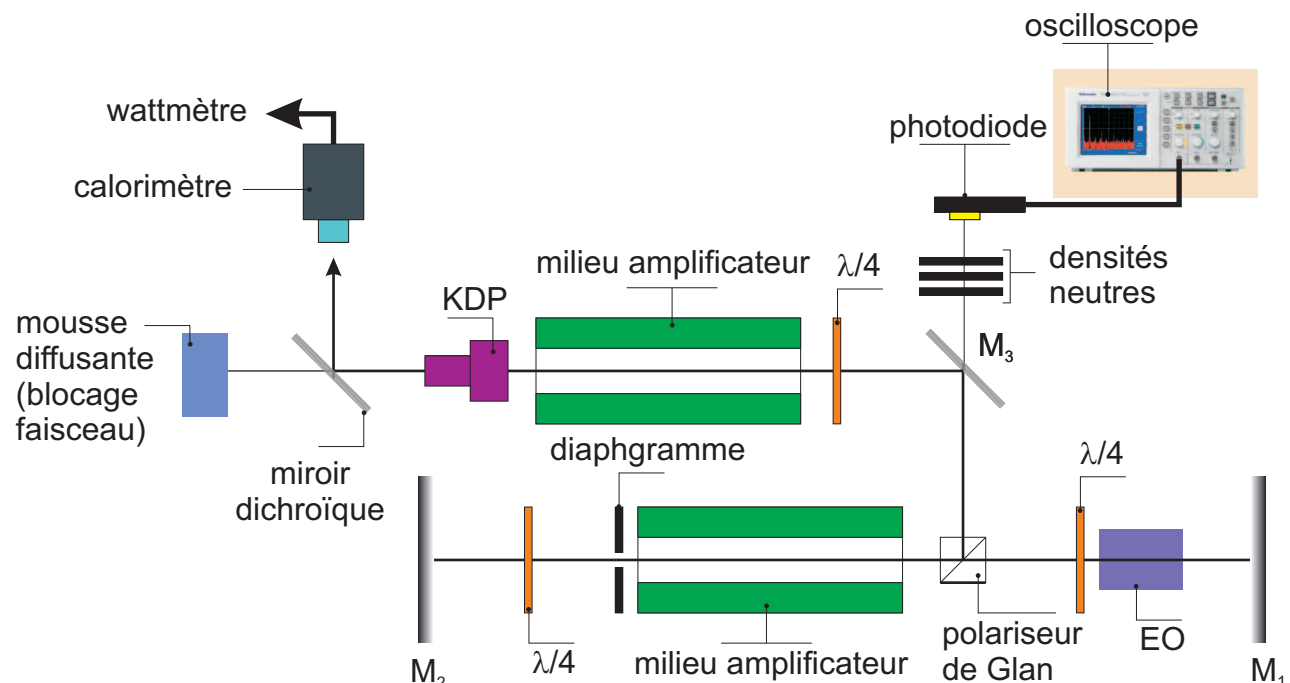


FIG. 6 – Amplification du faisceau laser.

Une lame  $\lambda/4$ , placée avant l'amplificateur, transforme la polarisation rectiligne verticale en sortie du laser en une polarisation circulaire. On peut alors, en jouant sur l'orientation du



cristal doubleur, réaliser l'accord de phase. Pour réaliser ce réglage, on dispose de deux vis placées côte à côte, la rouge correspond au réglage grossier, l'autre au réglage fin.

*Optimiser l'orientation du cristal doubleur en mesurant la puissance moyenne à 532 nm.*

## 4.2 Rendement du doublage

**Attention : quand on réalise le doublage avec l'amplificateur allumé, les étudiants doivent porter les lunettes marrons.**

*Mesurer les puissances moyennes de vert ( $P_{532}$ ), en tir à 10 Hz, sans et avec amplification. Déterminer et comparer les rapports  $P_{532}/P_{1064}$  dans les deux cas. Comment varie la puissance à la fréquence double en fonction de la puissance à la fréquence fondamentale ?*

*En changeant le taux de pompage, tracer la courbe donnant la puissance moyenne de vert en fonction de la puissance moyenne à 1064 nm.*

## 4.3 Doublage avec d'autres matériaux

*Vérifier qu'un matériau non centro-symétrique permet aussi de faire du doublage.*

Utiliser pour cela les cristaux fournis dans la boîte de pétri.

# 5 Interaction laser-matière

Placée après l'amplificateur, une lentille de distance focale 10 cm focalise le faisceau initialement parallèle dans son plan focal image. On place en ce point différents matériaux afin d'observer l'action du laser.

## 5.1 Observation d'un plasma dans l'air

*Ne rien placer dans le plan focal image de la lentille. Placer un bloc de mousse diffusante après le point focal pour arrêter le faisceau. Faire fonctionner le laser avec amplificateur à 10 Hz.*

On entend le laser claquer dans l'air. Un plasma se crée au point focal où l'air est ionisé.

*Utiliser le prisme à vision directe pour observer le spectre d'émission du plasma.*

## 5.2 Comparaison des modes relaxé et déclenché

On travaillera dans cette partie sans l'amplificateur.

*Placer dans le plan focal de la lentille divers matériaux (carton, métaux de différentes épaisseurs, allumette). Pour chaque type de matériaux, effectuer plusieurs tirs laser à 10 Hz en modes relaxé et déclenché.*

Pour fonctionner en mode relaxé, basculer l'alimentation de l'EO en position externe (EXT) et mettre la  $\lambda/4$  selon ses axes neutres en ayant pris soin de noter sa position pour revenir facilement en mode déclenché.

*À chaque série de tirs, noter la position de l'impact du laser sur le matériau. Observer les impacts à la loupe binoculaire.*

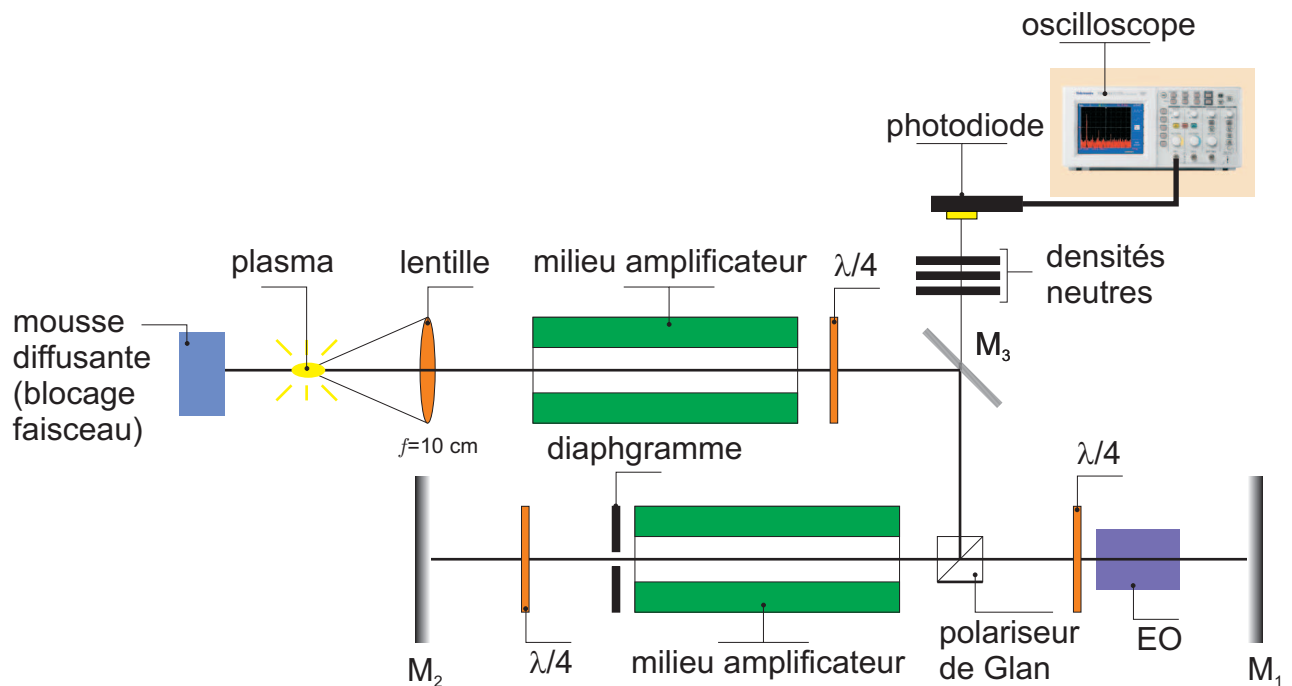


FIG. 7 – Amplification du faisceau laser.

En mode relaxé, l'impulsion est longue (de l'ordre de la dizaine de  $\mu\text{s}$ ). L'action du laser dans ce cas est purement thermique et l'échauffement transmis au matériau a le temps de diffuser (l'allumette s'allume, le carton brûle et les bords des trous réalisés dans le métal sont détériorés). En mode déclenché, l'impulsion est courte (de l'ordre de la dizaine de  $\text{ns}$ ). La chaleur a moins le temps de diffuser dans le matériau. L'effet principal est photomécanique (ablation) : le laser produit un plasma qui crée une onde de choc dans le matériau. Cette onde de choc vaporise la matière au point d'impact (on perce l'allumette, on troue le carton et le métal plus nettement).

## 6 Annexe : Chronologie d'un tir laser

On reproduit ci-dessous la chronologie temporelle d'un tir laser.

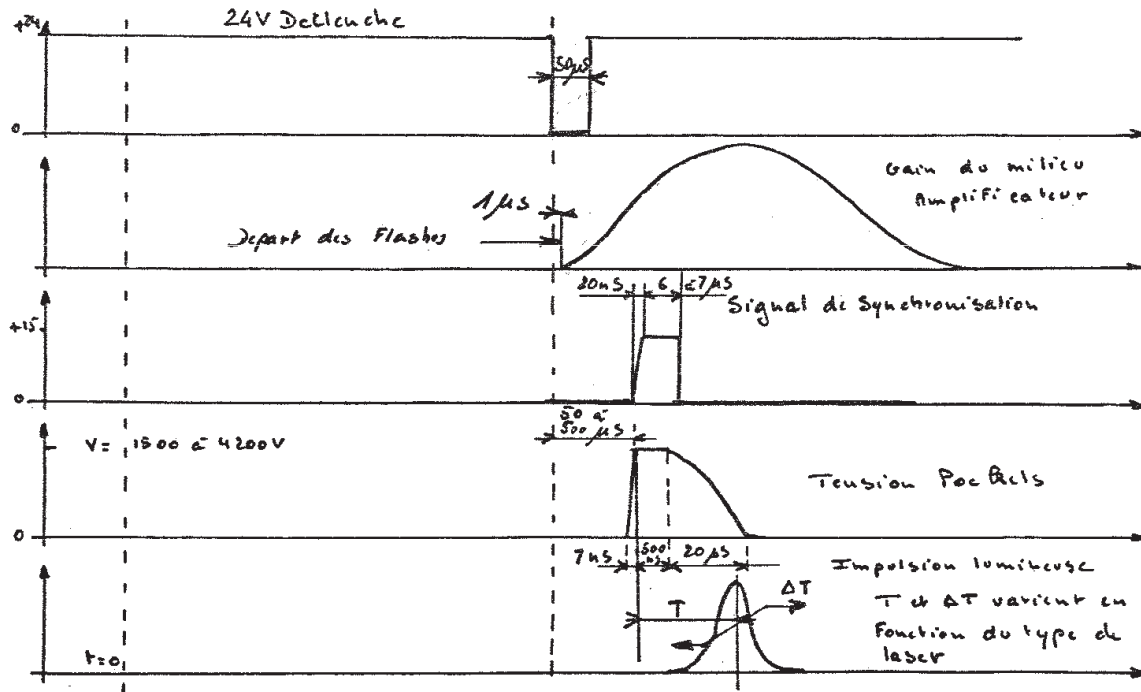


FIG. 8 – Chronologie temporelle d'un tir laser.