

MASTER PHYSIQUE 1^{ère} année

LASER et PHOTONIQUE

Travaux Pratiques

4 manipulations :

- 1- Réalisation d'un laser Nd-YAG pompé par diode.
- 2- Réalisation d'un autocorrélateur optique pour la mesure d'une impulsion LASER.
- 3- Caractérisation d'un modulateur électro-optique - application aux télécommunications optiques.
- 4- Caractérisation du profil spatial d'un faisceau laser.

Déroulement des TP

Les comptes rendus de TP sont à rendre **à la fin de chaque séance**, cela vous permettra de ne pas passer trop temps à rédiger vos comptes rendus de TP, et de vous laisser ainsi plus de temps pour relire votre cours et préparer vos TD de l'U.E. " Laser et optique intégrée ". Par contre cela vous obligera à lire l'énoncé du TP et préparer le compte rendu avant le TP, c'est à dire rédiger à l'avance l'introduction et à répondre à l'avance aux questions " théoriques " ou préliminaires. La préparation d'un TP ne doit pas excéder 2 heures. Il est important de noter qu'un TP préparé est toujours beaucoup plus profitable et enrichissant pour l'étudiant. Cela vous permettra de ne pas perdre du temps précieux devant les bancs de mesures à lire le polycopié de TP ou à découvrir l'énoncé après les TP au moment de rédiger le compte rendu. La notation des TP se décompose de la façon suivante :

- 4 points environ pour l'introduction et la conclusion. L'introduction (10-15 lignes) doit décrire les objectifs importants du TP, ainsi que le contexte dans lequel il s'intègre (application, intérêt, ...). Cela peut vous amener à faire quelques recherches personnelles. La conclusion doit faire part de vos résultats importants et de ce que vous a apporté le TP.
- 4 points environ pour les questions théoriques ou préliminaires
- 4 points environ pour votre attitude lors de la séance de TP
- 4 points environ pour la qualité de vos mesures
- 4 points environ pour l'interprétation et la critique des résultats

Du fait de cette notation les étudiants d'un même binôme n'auront pas nécessairement la même note. Il est possible de rendre un compte rendu par binôme ou par étudiant selon votre souhait.

Les binômes seront définis à l'avance par ordre alphabétique à moins qu'ils soient déjà constitués. Chaque binôme fera 3 TP parmi 4. La répartition des TP entre les binômes se fera de la façon suivante :

Binôme	semaine 1	semaine 2	semaine 3
1	TP1	TP2	TP3
2	TP2	TP3	TP4
3	TP3	TP4	TP1
4	TP4	TP1	TP2

Les comptes rendus de TP non rendus en fin de séance seront sanctionnés par un zéro, sauf cas exceptionnel : panne de courant, matériel en panne. Les séances de TP sont de 4 heures et pas plus ! Il est donc essentiel que vous prépariez avant de venir, que vous arriviez à l'heure et que vous soyez efficaces pendant la séance. Il est important de joindre au compte rendu vos résultats sous de graphique avec les incertitudes, les barres d'erreur et les légendes qui permettent de bien mettre en valeurs vos mesures expérimentales.

N'oublier pas de lire les annexes qui vous sont donnés en fin de polycopier lors de la préparation du TP. Ils vous feront gagner du temps et vous permettront d'être plus performants en séance.

Annexe A : utilisation des ressources informatiques de la plate-forme optique

Annexe B : utilisation du système d'acquisition Caliens (barrette CCD)

Annexe C : utilisation du logiciel Kaleidagraph (traitement de données, graphes, ...)

Annexe D : utilisation de Synchronie (acquisition et traitement de données)

Annexe E : modélisation et traitement de donnée

Annexe F : polarisation et représentation de Jones

Annexe G : tableau à faire remplir par l'enseignant

Bon TP, et que ces séances soient les plus enrichissantes possible pour vous!

INFORMATIONS : CLASSES ET DANGERS DES LASERS :

Depuis son invention en 1960, le laser n'a cessé de se développer et de rencontrer de nouvelles applications (laboratoire, industrie, militaire, ...). En conséquence, le nombre d'accidents dus au rayonnement laser a aussi augmenté. Dans la plupart des accidents laser, c'est l'œil qui est atteint. Il existe 5 classes de laser définies par :

☞ **Classe 1** : lasers non dangereux pour l'œil quelles que soient les conditions d'observation.
☞ **Classe 2** : lasers émettant dans le visible et pour lesquels le réflexe palpébral (réflexe de clignement de l'œil égal à 250 ms) intervient pour protéger l'œil d'une exposition accidentelle au laser. Cette classe 2 prolonge la classe 1 et les lasers visibles de cette classe sont non dangereux pour l'œil, si celui-ci n'est pas maintenu dans le faisceau plus de 250 ms.



☞ **Classe 3A** : cette classe regroupe les lasers non dangereux pour l'œil nu, mais potentiellement dangereux si on les observe à travers une optique grossissante.

☞ **Classe 3B** : lasers dangereux pour l'œil nu (et encore plus si le laser passe par une optique grossissante), mais les réflexions diffuses (rayonnement diffusé par un obstacle situé sur le trajet du faisceau) du laser sont sans danger. La lésion cutanée est prévenue par une sensation de picotement ou d'échauffement.

☞ **Classe 4** : lasers les plus intenses qui sont très dangereux pour l'œil nu y compris en réflexion diffuse, ainsi que les lasers pouvant induire des dommages sur la peau.

Il est important que vous portiez les lunettes de protection lorsqu'un laser de classe 3 ou plus est allumé. Tout objet réfléchissant (montre, gourmette, bague, ...) doit être enlevé.

MANIPULATION N°1

LASER Nd-YAG POMPÉ PAR DIODE



TRES IMPORTANT :

LES PUISSANCES EMISES PAR LA DIODE LASER (>100mW à 850nm) ET PAR LE LASER Nd:YAG PEUVENT CAUSER DES DOMMAGES IRREMEDIABLES A L'OEIL. IL EST DONC IMPERATIF DE NE JAMAIS METTRE SES YEUX AU NIVEAU DES FAISCEAUX. LE LASER Nd:YAG EST D'AUTANT PLUS DANGEREUX QU'IL EST INVISIBLE (1064 nm).

Ce document a pour but de décrire le laser et de présenter la procédure de réglage. Il est fourni en complément de la notice complète en anglais à lire pendant la manipulation, vous y trouverez des informations très intéressantes pour votre compte rendu de TP.

L'expérience comprend le montage, l'optimisation et l'étude du fonctionnement d'un laser Nd:YAG pompé par diode, doublé en fréquence.

Ce laser, entièrement modulaire, comprend :

- 1) L'alimentation de la diode laser
- 2) Le banc laser, fixé sur un boîtier avec couvercle de protection, qui inclut les éléments suivants :
 - la diode laser de pompage émettant aux alentours de 800nm
 - une optique de collimation, de focale image : $f' = + 6\text{mm}$
 - une optique de focalisation, de focale image : $f' = 30\text{ mm}$
 - un barreau avec deux faces planes ; celle d'entrée est traitée T_{max} autour de 810 nm et R_{max} à 1064 et 532 nm; la face de sortie est traitée antireflet.
 - le miroir de sortie concave ($R = 100\text{ mm}$) traité R_{max} à 1064 nm
 - un porte-filtres
 - un mesureur de puissance (sonde photodiode Si)
 - un spectromètre fibré
 - un cristal non linéaire (KTP) pour le doublage de fréquence intracavité.

Chacun de ces éléments est monté sur un support qui est positionné sur le banc.

3) Une pochette contenant : 1 filtre RG1000 (transmet les radiations de $\lambda > 1000$ nm)
1 filtre BG 18 (transmet le vert)
1 carte de visualisation infrarouge

4) 3 paires de lunettes de protection

1 - DESCRIPTION DU LASER

1-1. La diode laser.

Elle émet principalement dans la gamme spectrale comprise entre 800 et 820 nm. La longueur d'onde varie avec la température de fonctionnement ($+ 0,25$ nm/°C) et avec le courant d'alimentation ($0,05$ nm/mA). La diode laser sert à pomper le barreau de Nd:YAG dans sa bande d'absorption autour de 808 nm. Le pompage à ces longueurs d'onde a pour avantages de minimiser l'échauffement du barreau et de fournir un très bon rendement optique (puissance émise / puissance de pompage) qui peut atteindre 50 %. La diode est alimentée par un boîtier qui permet de régler la température de fonctionnement, le courant d'alimentation et la fréquence de modulation.

RESPECTER LA PROCEDURE DE MISE EN ROUTE DE LA DIODE LASER

1-2. L'optique de pompage.

La diode émet un faisceau très divergent. C'est pourquoi on utilise d'abord un collimateur puis une lentille de focalisation qui concentre la puissance à l'intérieur du barreau. **Vérifier que les optiques sont propres et ne pas de mettre vos doigts dessus.**

1-3. Le laser Nd:YAG.

Le laser Nd:YAG comprend :

- un barreau avec deux faces planes ; celle d'entrée est traitée T_{\max} autour de 810 nm et R_{\max} à 1064 et 532 nm ; la face de sortie est traitée antireflet.
- un miroir de sortie concave ($R = 100$ mm) traité R_{\max} à 1064 nm.

1-4. Le porte-filtres.

Deux types de filtres sont utilisés avant le mesureur de puissance, suivant la gamme de longueurs d'onde à observer.

1-5. Le mesureur de puissance.

Il permet de mesurer les puissances des rayonnements visible et infrarouge. Il faut régler la longueur d'onde de travail sur le boîtier de mesure (ce qui permet de prendre en compte la courbe de sensibilité de la photodiode Si).

1-6. Le cristal doubleur de fréquence.

Placé à l'intérieur de la cavité, ce cristal non linéaire KTP (potassium titanyl phosphate) génère un faisceau à 532 nm.

Questions préliminaires

- Donner le rôle de chacun des ces éléments dans la réalisation du laser Nd :Yag.
- Pourquoi la température de la diode de pompage est un paramètre important pour effectuer un bon pompage ? Pourquoi doit-on modifier cette température à chaque fois que l'on modifie de façon significative la puissance de la diode ?
- Déterminer la zone de stabilité de la cavité. Expliquez votre réponse.

Attention la diode laser émet à 800 nm, longueur d'onde située en limite de la courbe de sensibilité de l'œil. Il est important que vous portiez les lunettes de protection lorsque la diode laser est allumée. Tout objet réfléchissant (montre, gourmette, bague, ...) doit être enlevé.

2 - PROCEDURE DE REGLAGE

IMPORTANT !

Avant d'allumer l'alimentation de la diode laser par le commutateur placé à l'arrière, s'assurer que le régulateur de courant est à sa position minimum. Prendre la même précaution avant de tourner la clef sur la position "ON" ou de commuter les boutons de stabilisation et de modulation.

Aucune surface optique ne doit être touchée, sinon on risque un dommage définitif, en particulier pour le cristal de KTP.

Avant de commencer à monter votre laser, identifiez chaque élément du montage.

- 1) Tournez la clef de l'alimentation sur la position "ON". Régler la température de la diode laser à 27°C et le courant à une valeur permettant de visualiser le faisceau sur un écran placé devant la photodiode de mesure. **Dès que le laser est en route vous devez porter les lunettes de protection et utiliser la carte de visualisation pour les réglages.**
- 2) Le collimateur est placé devant la diode laser. Les deux montures doivent être distantes de 2cm (**Ne pas toucher ce réglage**). Régler le faisceau de la diode laser à l'aide des vis XY de façon à ce qu'il soit parallèle au rail du banc optique et le plus horizontal possible. On utilisera pour cela la carte de visualisation d'alignement montée sur un support cylindrique.
- 3) Déterminez le courant seuil de la diode laser et **tracez sur un même graphique (1) les courbes P (I)** de la diode laser, pour une température de 27°C et pour une température de 18°C. Assurez-vous que le détecteur capte bien toute la lumière issue de la diode laser. Interprétation des résultats.
- 4) Placez la lentille de focalisation sur le rail de façon à avoir le plus petit point de focalisation, pour cela jouer sur la position de cette lentille. (Attention : à cet endroit, le faisceau est très intense et peut brûler !). Notez la position du point de focalisation. Ce point de focalisation correspond à la position à laquelle on placera le barreau YAG.
- 5) A l'aide du spectromètre fibré, mesure la longueur d'onde émise par la diode laser en fonction de la consigne de température (pas = 2,5°C).
- 6) Placez le barreau au point de focalisation, réglez la diode à un courant de 500 mA. Placez la tête du mesureur de puissance juste derrière le barreau. Noter la puissance reçue en fonction de la température,. **Tracez la courbe (2) de la puissance en fonction de longueur d'onde d'émission de la diode laser. Déterminez la température/longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption du Nd:YAG. On atteint ce maximum quand le faisceau de la diode transmis par le barreau est au minimum (on l'observe sur la carte de visualisation IR ou à l'aide de la photodiode). Notez cette température, et effectuez la même courbe (3) pour un courant de 700 mA.**
- 7) A l'aide d'un diaphragme placé au point de focalisation régler l'autocollimation du miroir d'entrée de la cavité, en agissant sur les vis XY du barreau.
- 8) A partir de la condition de stabilité de la cavité, déduire les positions possibles pour le miroir de sortie. Enlevez le barreau du banc optique et placez le miroir de sortie. A l'aide d'un diaphragme placé au point de focalisation. Régler l'autocollimation de ce miroir en agissant sur les vis XY de la monture du miroir.
- 9) Enlevez le diaphragme et remettre le barreau en le centrant sur le point de focalisation. Régler la diode à un courant de 500 mA, et la température à la valeur correspondant au

maximum d'absorption du Nd:YAG. Placez en sortie de la cavité le détecteur permettant de caractériser le laser Nd:YAG que vous êtes en train de réaliser. Placer devant le détecteur le filtre RG1000. Optimisez vos réglages afin d'avoir le maximum d'intensité :

- ❖ Barreau au point de focalisation : déplacez légèrement le barreau afin d'avoir un maximum sur le détecteur.
 - ❖ Autocollimation de la cavité : réglez les vis d'orientation des miroirs afin d'avoir un maximum sur le détecteur.
 - ❖ Si vous ne détectez pas de signal en sortie de cavité ou si vous avez une puissance inférieure à 1 mW après ces réglages, alors vérifiez la propreté des optiques. **Le nettoyage du barreau ne doit être fait que par l'enseignant. Le nettoyage des optiques se fait à l'éthanol pur et avec du papier optique.**
- **Donnez les paramètres qui vous paraissent les plus critiques pour le réglage de ce laser.**
 - **Dans le rapport, indiquez les positions des différents éléments du montage après optimisation ainsi que les conditions dans lesquelles les mesures ont été faites.**

Tableau à faire remplir par l'enseignant et à mettre dans le compte rendu.

Nom	Prénom	réglage du laser note sur 4

3 - MESURES ET COURBES

Une fois la cavité laser optimisée, réaliser les mesures suivantes avec le mesureur de puissance. Vérifier que la gamme puissance choisie est bien la bonne.

1) P (laser à 1064 nm) = f (I mA diode laser)

En réglant la température à 25°C, faire varier le courant de la diode laser depuis le seuil du laser Nd:YAG jusqu'à la valeur maximum. **Tracer la courbe 4. Comparer les courbes 1) et 4), commentaires.**

2) P (laser à 1064 nm) = f (T°C) = f ($\lambda_{\text{diode laser}}$)

Régler le courant de la diode laser à 500mA, soit une valeur environ 50 % au-dessus du seuil. Noter la puissance du faisceau laser 1064 nm en fonction de la température, variant par pas de 2,5°C. **Tracer la courbe 5. Effectuez la même mesure (courbe 6) pour un courant de 700 mA. Comparer les courbes 2) et 5) d'une part, 3) et 6) d'autre part. Commentaires.**

3) P (laser à 532 nm) = f (I mA diode laser)

Introduire le cristal doubleur de fréquence à l'intérieur de la cavité au plus près du barreau de Nd:YAG. Translater le cristal dans le plan perpendiculaire à l'axe de la cavité. Si le faisceau vert n'est pas obtenu, augmentez légèrement l'intensité de la diode laser, en n'oubliant pas d'ajuster la température afin d'avoir le maximum de gain. Lorsque le faisceau vert apparaît, optimiser la cavité et le cristal afin d'obtenir le maximum de puissance à 532nm (ou pour obtenir le seuil le plus bas pour ce laser Nd:YAG doublé). N'oubliez pas d'adapter votre détection (entre autre, remplacer le filtre RG1000 par le BG18). En réglant la température à 25°C, faire varier le courant de la diode laser depuis le seuil de laser Nd:YAG doublé jusqu'à la valeur maximum. **Tracer la courbe 7. Comparer les courbes 4) et 7) commentaires.**

-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-

REFERENCES

- A. YARIV, "Quantum Electronics", New-York, Wiley, 3ème édit., 1989.
- K. SHIMODA "Introduction to laser physics" Springer 1986.
- A.E. SIEGMAN, "Lasers" Oxford Press
- J.T. VERDEYEN, " Laser Electronics", Prentice-Hall International 1989
- L. TARASSOV, "Physique des processus dans les générateurs de rayonnement optique cohérent", MIR Moscou, 1981
- G. GRYNBERG, A. ASPECT et C. FABRE "Introduction aux lasers et à l'Optique Quantique Ellipses" 1997

MANIPULATION N°2

Réalisation d'un autocorrélateur optique pour la mesure d'une impulsion LASER



On rappelle que l'on ne regarde jamais un faisceau laser directement en plaçant son œil en face !!! Surtout, un laser impulsionnel !!

Il est important que vous portiez les lunettes de protection mises à votre disposition. Tout objet réfléchissant (montre, gourmette, bague, ...) doit être enlevé.

Caractérisation de la largeur d'impulsion d'un laser.

Un laser est principalement caractérisé par les paramètres suivants :

- Puissance de sortie
- Bande spectrale d'émission (position et largeur)
- Polarisation
- Profil spatial du spot laser
- Diamètre et divergence du spot laser

Dans le cas où il s'agit d'un laser impulsionnel, il est également caractérisé par la largeur l'impulsion temporelle, ainsi que le taux de répétition de cette dernière.

Dans ce TP, nous nous proposons d'essayer de mesurer ces deux derniers paramètres pour un laser impulsionnel polarisé linéairement, émettant un spot laser TEM00 à la longueur d'onde de 532 nm avec une puissance moyenne de sortie d'environ 10 mW. D'après les données constructeur, ce laser a une largeur d'impulsion comprise entre 0,5 ns et 1 ns, et une cadence de la dizaine de kHz.

Au cours de ce TP, vous allez essayer de mesurer cette largeur d'impulsion à partir de deux méthodes. La première est une mesure directe à l'aide d'une photodiode et d'un oscilloscope numérique. La seconde utilise un interféromètre de Michelson et la mesure de la fonction autocorrélation $\Gamma(\tau)$ temporelle de l'onde électromagnétique émise par le laser.

A) Questions préliminaires et théoriques .

1. Sachant que le laser a une durée d'impulsion comprise entre 0,5 et 1 ns, donnez approximativement les performances que devraient avoir l'oscilloscope et la photodiode.

2. Montrez qu'à la sortie de l'interféromètre de Michelson (fig.1) on a :

$$\left. \begin{aligned} I &= \langle EE^* \rangle = \langle E_1 E_1^* \rangle + \langle E_2 E_2^* \rangle + \langle E_1 E_2^* \rangle + \langle E_2 E_1^* \rangle \\ I &= I_0 + 2 \operatorname{Re} \langle E_1 E_2^* \rangle = I_0 + 2\Gamma(\tau) \cos(\varphi) \\ \varphi &\text{ représente le déphasage spatial entre } E_1 \text{ et } E_2 \\ &\text{ dans le plan de mesure (écran ou CCD).} \end{aligned} \right\} \langle \rangle \rightarrow \text{Valeur moyenne dans le temps.}$$

Avec $\Gamma(\tau)$ la fonction d'autocohérence, où τ est le retard temporel entre les deux bras de l'interféromètre de Michelson. On a:

$$\Gamma(\tau) = \lim_{T_m \rightarrow \infty} \frac{1}{T_m} \operatorname{Re} \left[\int_{-\frac{T_m}{2}}^{\frac{T_m}{2}} E_1^*(t) E_2(t - \tau) dt \right]$$

T_m est le temps de mesure et il est très grand (∞) par rapport à la période de l'onde optique.

3. Donnez l'expression du retard temporel τ en fonction de D_1 et D_2 (fig.1).

4. Montrez que si l'on considère que le champ émis par le laser a un profil temporel gaussien de la forme $E(t) = E_0 e^{\frac{-t^2}{\tau_p^2}} e^{j\omega t}$, alors $\Gamma(\tau)$ est également une fonction de forme gaussienne de variable τ et de mi-largeur σ à Γ_{\max}/e , tel que $\sigma = \sqrt{2}\tau_p$. On s'intéressera uniquement à la dépendance en τ .
5. Donnez la relation entre la puissance moyenne d'un laser et la puissance crête d'une impulsion. Calculez la densité spatiale de puissance crête pour une taille de faisceau laser homogène sur une surface circulaire de rayon 1mm. Comparer cette valeur à la densité de puissance du soleil au zénith qui est de $0,1\text{w}/\text{cm}^2$.

L'interféromètre de Michelson:

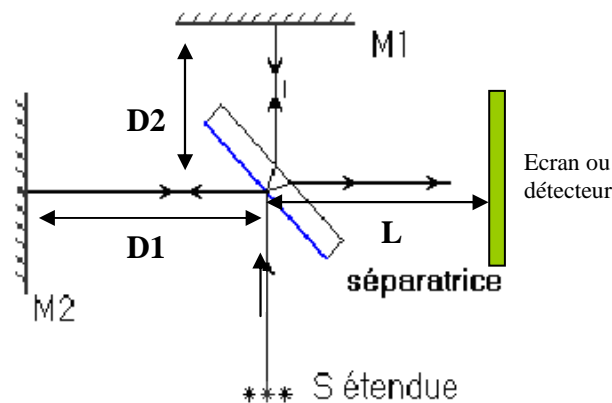


figure 1: interféromètre de Michelson

B) Mesure directe .

1. Mesurer cette durée d'impulsion et son taux de répétition à l'aide d'un oscilloscope et d'une photodiode.
2. Que pensez vous de vos valeurs mesurées par rapport à celles attendues. Donner une explication.

C) Mesure de la fonction d'autocorrélation.

1. Expliquez "avec les mains" (schéma) le principe de la mesure de la largeur d'impulsion de notre laser avec un interféromètre de Michelson.

La fonction d'autocohérence $\Gamma(\tau)$ n'est pas directement mesurable. Cependant, elle est contenue dans le terme d'interférence, et plus particulièrement dans le contraste C des franges d'interférences, qui est facilement accessible avec une camera CCD. En effet, on a :

$$C(\tau) = \frac{I_{\max}(\tau, \varphi = 2n\pi) - I_{\min}(\tau, \varphi = 2n\pi + \pi)}{I_{\max}(\tau, \varphi = 2n\pi) + I_{\min}(\tau, \varphi = 2n\pi + \pi)}$$

avec:
$$\begin{cases} I_{\max}(\tau, \varphi = 2n\pi) = 2I_0 + 2\Gamma(\tau) \\ I_{\min}(\tau, \varphi = 2n\pi + \pi) = 2I_0 - 2\Gamma(\tau) \end{cases} \text{ d'où: } C(\tau) = \frac{\Gamma(\tau)}{I_0} \text{ compris entre 1 et 0}$$

On en déduit alors que la fonction de contraste est directement proportionnelle à la fonction d'autocohérence. On va donc mesurer expérimentalement la fonction de contraste $C(\tau)$ en fonction du décalage temporel τ , puis ajuster cette fonction par une loi gaussienne afin d'en déduire la largeur σ de la fonction d'autocohérence, puis la durée d'impulsion τ_p du laser. Il est très important que la mesure du contraste soit réalisée toujours dans la même zone de la figure d'interférence autant que cela peut se faire, afin de ne pas avoir de variations de contraste dues à un déplacement du point de mesure sur la figure d'interférence.

D) Montage de l'autocorrélateur

L'autocorrélateur est constitué d'une dizaine d'éléments montés sur des gros pieds qu'on peut fixer sur les plaques :

- 1 laser rouge He-Ne Melles Griot (pas très dangereux, pour l'alignement)
- 1 laser vert Nanolase impulsif avec les lunettes de protection.
- 2 lames séparatrices 50%-50% en intensité, montées sur un plateau orientable (1 pour le Michelson, 1 pour aligner les lasers rouge et vert)
- 1 diaphragme.
- 2 miroirs orientables dans les plans horizontal et vertical
- 1 grand rail monté parallèlement au bras mobile
- quelques lentilles convergentes
- 1 PC avec logiciel CALIENS et une barrette CCD pour l'acquisition
- 1 roue de densités optiques.
- 1 écran blanc

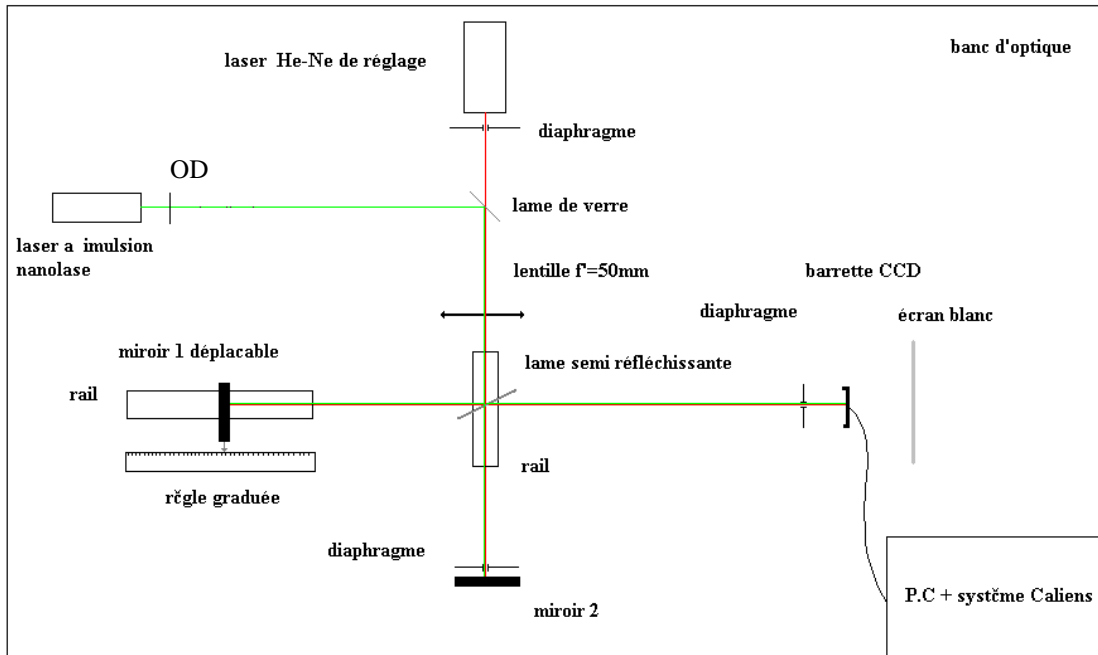


Figure 2: montage de l'autocorrélateur optique

1. Identifiez chacun de ces éléments optiques et expliquez leur rôle.

2. Montez l'autocorrélateur :

Dans un premier temps, on va aligner l'interféromètre. On utilisera pour cela une source laser continue (He-Ne). Puis, une fois l'interféromètre réglé, on fera coïncider le faisceau laser issu de la source impulsionnelle avec le faisceau de l'He-Ne.

- Assurez-vous que le faisceau laser issu de l'He-Ne est bien horizontal, en utilisant le diaphragme.
- Réaliser le montage de la figure 2 (laser à impulsion éteint et sans le dispositif d'acquisition Caliens) : à l'aide des deux miroirs montés et d'une lame séparatrice, réaliser un interféromètre de Michelson.
- Aligner l'interféromètre de façon obtenir la figure d'interférence la plus contrastée possible sur l'écran blanc.
- On prendra soin à égaler au mieux les longueurs des deux bras (1) et (2) de l'interféromètre On rappelle qu'un interféromètre de Michelson est réglé lorsque les deux miroirs M_1 et M_2 sont perpendiculaires entre eux. Cela se vérifie par l'observation d'une teinte plate en sortie du dispositif quand les bras (1) et (2) ont la même longueur. **Faites vérifier votre montage par l'enseignant.**
- Réglez l'atténuateur d'intensité (Densité Optique) devant le laser impulsionnel vert, de façon à avoir l'intensité la plus petite possible, tout en restant visible. **Utiliser les lunettes de protection qui sont mise à votre disposition.**

- Intercaler une lame séparatrice devant le laser He-Ne afin de superposer les faisceaux rouge et vert dans l'interféromètre. On fera attention à ce que les faisceaux soient bien superposés sur la lame séparatrice. Vérifiez la coïncidence des deux faisceaux dans tout le dispositif. **Attention cette étape du montage est la plus dangereuse pour vos yeux !**
- Ajustez vos réglages (orientation des deux miroirs M_1 et M_2 afin d'obtenir la figure d'interférence la plus contrastée possible sur l'écran blanc pour le laser vert. **Faites vérifier votre montage par l'enseignant. Vous devez observer la figure d'interférence suivante. Il faut qu'elle soit la plus contrastée possible.**
- Observez cette figure d'interférence avec le système d'acquisition Caliens. (Voir notice d'utilisation en annexe B du photocopié de TP)

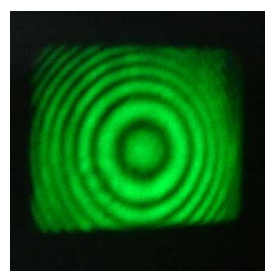
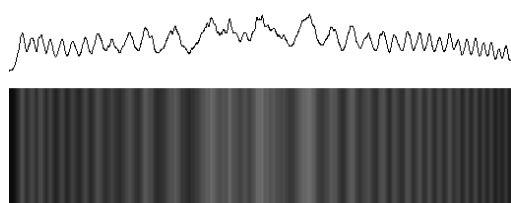


Tableau à faire remplir par l'enseignant et à mettre dans le compte rendu.

Nom	Prénom	réglage de l'autocorrélateur note sur 4

E) Mesures de la fonction d'autocorrélation

1. Déplacez le miroir monté sur la platine de translation le long du rail jusqu'à ce que vous n'observiez plus de figure d'interférence en sortie de l'interféromètre pour le laser vert. A l'aide d'un régllet, déduire l'ordre de grandeur de la largeur de l'impulsion du laser vert. On aura tout intérêt pendant cette manipulation à dérégler légèrement l'orthogonalité entre les deux miroirs afin d'observer des franges.
2. Afin de réaliser une mesure plus précise la largeur de l'impulsion du laser, régler les miroirs pour avoir des anneaux et mesurez le contraste $C(\tau)$ en fonction du déphasage temporel τ , c'est à dire en fonction de la position du miroir mobil sur le rail (voir fig.2). A l'aide du système d'acquisition Caliens (utilisez les curseurs). Attention : il est important pour réaliser de bonnes mesures que la barrette passe par l'ordre 0 de la figure d'interférence et d'avoir le maximum de signal sans saturer la barrette CCD (atténuer le signal si nécessaire, en plaçant un filtre devant le capteur afin de limiter la lumière parasite, qui peut fausser les mesures de contraste). Réaliser plusieurs fois cette courbe (au moins 3 fois). Ne pas oublier de joindre au compte rendu une figure d'interférence avec une mesure de contraste.

3. Afin d'estimer l'incertitude sur les mesures, réaliser plusieurs mesures de contraste pour une même position de miroir et faire pour un contraste fort et un contraste faible.
4. Tracer la variation du contraste $C(\tau)$ et ajuster par une loi gaussienne, utiliser Synchronie ou KaleidaGraph, sans oublier de tracer les barres d'erreur. En déduire τ_p . Une incertitude sur τ_p est demandée : rentrez les incertitudes sur le contraste dans Synchronie ou KaleidaGraph. Déterminer alors la largeur à mi-hauteur (définition constructeur) de l'impulsion du laser, comparer votre résultat aux données du constructeur.
5. Sachant que le laser a un surface d'éclairement de rayon de $60 \mu\text{m}$, calculez la puissance crête et la densité spatiale de puissance crête de ce laser pour une puissance moyenne de 5mW .

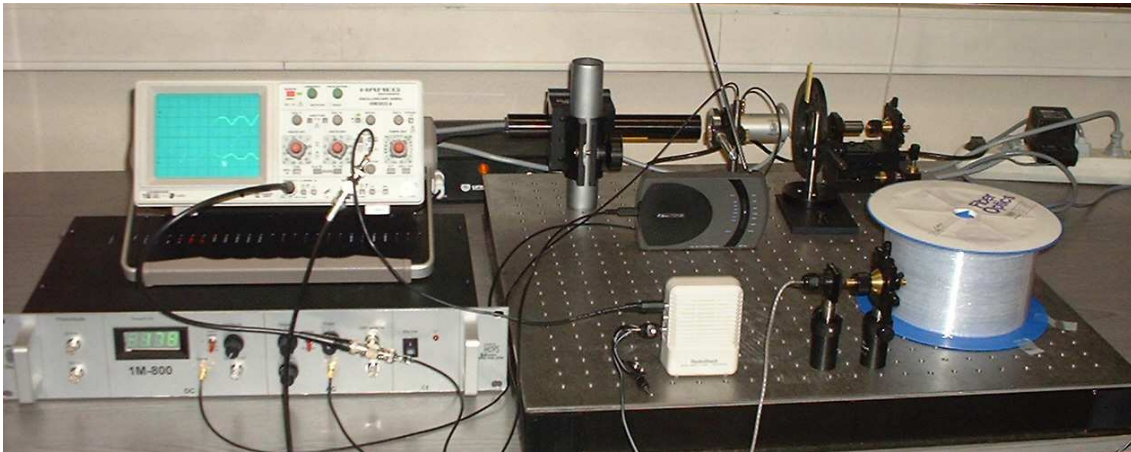
-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

REFERENCES

- A. YARIV, "Optique cohérente, Fondement et Application", Masson Paris 1997.
- B. Vous trouverez tout un cours sur l'interféromètre de Michelson sur le site : <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/enseignement/tp/michelson/michp.html>

MANIPULATION N°3

Caractérisation d'un modulateur électro-optique - application aux télécommunications.



1. INTRODUCTION

De nombreux systèmes optiques requièrent la possibilité de modifier ou de moduler temporellement l'amplitude, la phase, la direction ou la fréquence d'une onde lumineuse. Celle-ci peut par exemple être modulée en modifiant les propriétés optiques du milieu dans lequel elle se propage (modulation externe). Ce TP aborde le cas particulier où le milieu est modifié par un champ électrique via l'effet électro-optique (EO), dont l'importance est liée aux coefficients EO entrant en jeu. On peut alors moduler l'amplitude de l'intensité lumineuse I en mettant en jeu des phénomènes polarimétriques. En effet, l'électro-optique va permettre de faire tourner la polarisation d'une onde lumineuse (initialement polarisée rectilignement), et ainsi de moduler l'intensité lumineuse I transmise par un polariseur. Cette modulation est proportionnelle à l'amplitude du champ électrique appliqué au milieu électro-optique. On peut ainsi transformer une modulation électrique en une modulation optique et transmettre optiquement de l'information électrique (signal radio par exemple).

Dans le milieu électro-optique, les coefficients EO mis en jeu peuvent être mesurés à partir d'une technique expérimentale reposant sur un montage à une onde (on peut également le faire avec un montage interférométrique). Le but de ce TP est de mesurer ces coefficients EO puis de mettre en évidence la possibilité de transmettre optiquement de l'information en utilisant un modulateur EO.

Il est d'abord nécessaire de bien comprendre les méthodes de mesure. Pour cela, la théorie est entièrement décrite ici (**les parties 2 à 5 doivent impérativement être lues et comprises AVANT le TP**). Après avoir réalisé le montage expérimental, vous serez amenés à en étudier les caractéristiques (fonction de transfert, points de fonctionnement). Enfin, vous utiliserez trois méthodes différentes pour déterminer un même coefficient EO d'un cristal de Niobate de Lithium (LiNbO_3).

2. MATERIEL ASSOCIE AU TP

1 laser He-Ne polarisé	1 multimètre
1 modulateur électro-optique	1 oscilloscope
alimentation du modulateur	1 détecteur (photodiode)
1 polariseur	1 radio
1 lame quart d'onde	haut-parleurs
1 fibre optique + système d'injection	connectique BNC, SMC, Jack

3. MODULATEUR ELECTRO-OPTIQUE

Un cristal isotrope est un matériau dont l'indice de réfraction est le même dans toutes les directions de l'espace. En général, les cristaux sont anisotropes car les forces de liaisons atomiques sur les nuages électroniques sont différentes selon les directions de l'espace et il en résulte que les indices de réfraction varient également.

La biréfringence naturelle est la différence d'indice de réfraction. Elle s'écrit :

$$\Delta n_{ik} = n_k - n_i \quad (1)$$

avec n_k et n_i les indices de réfraction dans les directions k et i respectivement. C'est le cas d'un cristal de LiNbO_3 , qui est un cristal anisotrope uniaxe. Son indice de réfraction est alors décrit dans le repère optique du cristal par le tenseur suivant :

$$n^2 = \begin{bmatrix} n_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2 \end{bmatrix}$$

$n_x = n_y = n_o = 2,285$ et $n_z = n_e = 2,200$, ces indices sont appelés indices de réfraction principaux du cristal.

L'application d'un champ électrique au cristal de LiNbO_3 entraîne la réorientation des électrons, des molécules, ou des ions par modification de la polarisation électrique du milieu. Ce réarrangement macroscopique provoque la modification des indices de réfraction principaux du milieu.

Ce phénomène est appelé **effet électro-optique** et la biréfringence induite est donnée par :

$$\Delta n'_{jk} = -\frac{1}{2} n_k^3 r_\alpha E_p \quad (2)$$

avec r_α le coefficient électro-optique et E_p l'amplitude du champ électrique appliqué dans la direction p .

A température ambiante, les propriétés EO linéaire peuvent être décrites dans le repère optique (X, Y, Z) du cristal par le tenseur EO linéaire suivant :

$$r = \begin{bmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dans notre cas, **la propagation de la lumière se fait suivant l'axe Z et le champ électrique appliqué au cristal suivant l'axe Y** (fig1). Le coefficient mis en jeu est donc r_{22} . Dans ces conditions, l'indice de réfraction est décrit dans le repère optique du cristal par le tenseur n^2 donné précédemment avec:

$$n_x = n_o + \frac{1}{2} n_o^3 r_{22} E_{\text{appliqué}}$$

$$n_y = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{22} E_{\text{appliqué}}$$

$$n_z = n_e$$

Il y a 3 indices de réfraction principaux différents, le cristal devient donc biaxe. Il introduit alors un déphasage φ entre les composantes principales de la polarisation d'une onde lumineuse se propageant selon l'axe Z. On notera $L = 40$ mm la longueur du cristal (axe Z) et $d = 3$ mm sa largeur (axes X et Y).

3.1. Déterminez le déphasage φ engendré par le cristal de LiNbO_3 , en fonction de n_o , r_{22} ,

L , d , λ et V la tension appliquée. On exprimera le résultat sous la forme : $\varphi = \frac{r_{22}}{A} V$.

Donnez l'expression de A et calculez sa valeur numérique.

3.2. Déterminer l'expression de V_π , tension permettant d'avoir un déphasage de π .

Ce modulateur électro-optique associé à une lame quart d'onde va se comporter comme une lame demi-onde pilotée électriquement. En d'autres termes, il va nous permettre de faire tourner une polarisation rectiligne d'un angle proportionnel à la tension appliquée au cristal de LiNbO_3 . Le dispositif utilisé pour cela est le suivant :

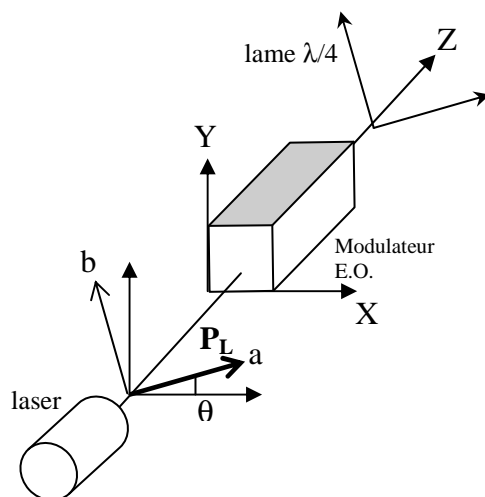


Figure 1.

P_L : polarisation en sortie du laser ; elle fait un angle θ avec l'axe X associé au repère optique du cristal (X, Y).

Les axes de la lame $\lambda/4$ (lignes neutres) sont alignés sur les axes (a, b) associés à la polarisation P_L en sortie du laser.

Dans le formalisme de Jones et dans le repère (a, b) associé à la polarisation en sortie du laser, on a (voir Annexe F) :

$$P_L = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Modulateur} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\frac{\varphi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\varphi}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$\text{lame } \frac{\lambda}{4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$$

3.3. Calculez la polarisation en sortie de ce système.

3.4. En déduire que pour $\theta = 45^\circ$ la polarisation transmise par l'ensemble du système reste rectiligne mais a tourné de $\frac{\varphi}{2}$ par rapport à la polarisation initiale P_L .

Pour moduler l'intensité lumineuse, on ajoute à ce dispositif un polariseur P qui fait un angle β avec la polarisation P_L en sortie du laser, c'est à dire avec l'axe a du système. On a donc le dispositif suivant :

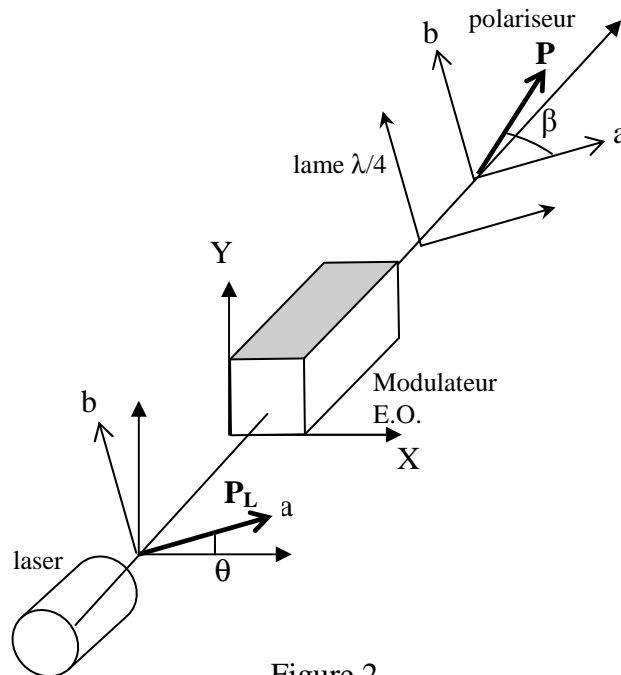


Figure 2

3.5. A partir de la loi de Malus, montrez que la fonction de transfert du système est :

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\varphi - 2\beta)] \quad (\text{pour } \theta = 45^\circ)$$

Cette fonction de transfert est représentée ci-dessous en fonction de la variable $\varphi_{(V)} - 2\beta$, qu'on peut faire varier soit en tournant le polariseur (angle β), soit en variant la tension V appliquée au cristal de LiNbO_3 :

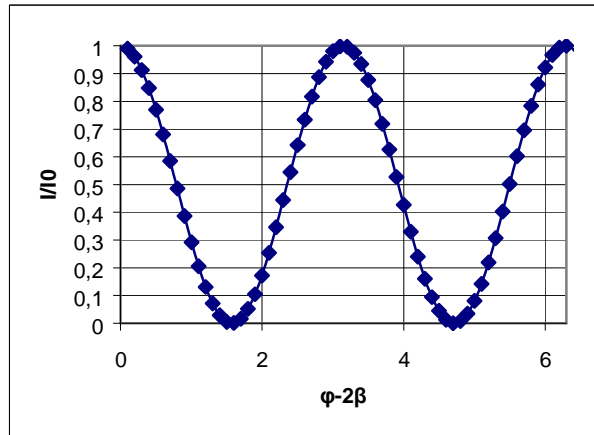


Figure 3

Dans la pratique, la tension V appliquée au cristal peut être constituée d'une composante continue V_{dc} et d'une composante alternative V_{ac} (modulation), soit :

$$V = V_{dc} + V_{ac}(t) = V_{dc} + V_m \sin(\omega_m t)$$

Dans ce cas, le déphasage engendré par le modulateur EO est égal à : $\varphi = \varphi_{dc} + \varphi_m \sin(\omega_m t)$

L'intensité transmise par le système est donc : $I = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\varphi_{dc} - 2\beta + \varphi_m \sin(\omega_m t))]$

Transmission en sortie du montage

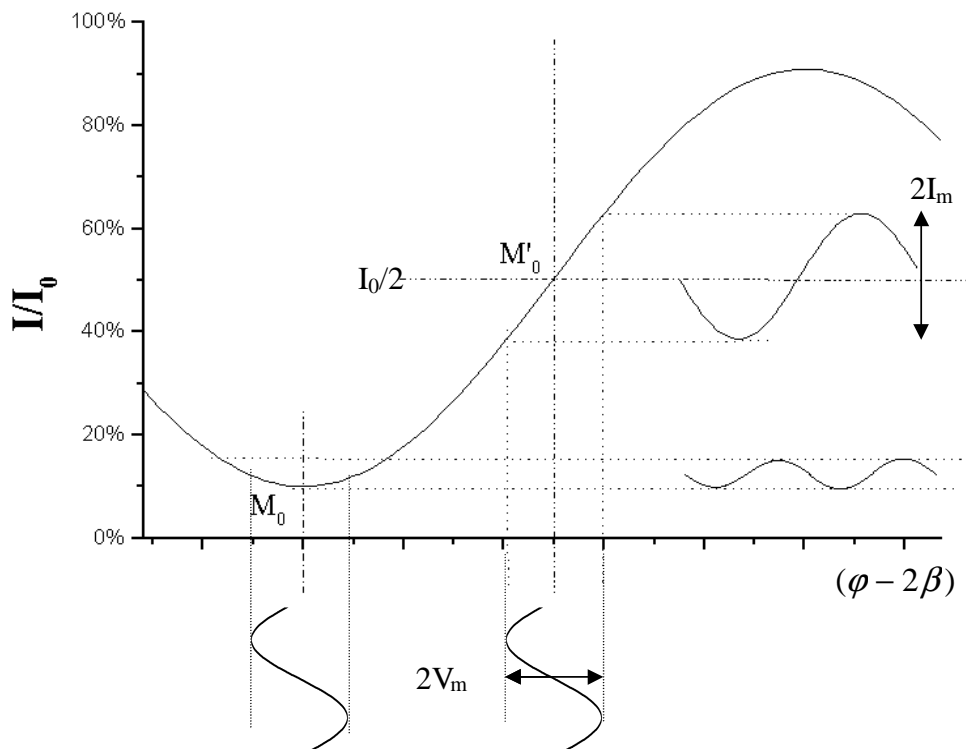


Figure 4

Dans le cas pratique, on n'a pas un contraste de 100% car souvent la propagation ne se fait strictement selon l'axe Z du repère optique du cristal ce qui se traduit par des contributions dans la matrice n^2 et dans le déphasage.

4. Méthodes de détermination du coefficient r_{22}

4.1. Détermination à partir de la mesure de V_π

Le passage du point de fonctionnement M_0 à M'_0 se fait en jouant soit sur β , soit sur V_{dc} . D'après l'expression de l'intensité transmise, on remarque que pour passer d'un maximum à un minimum d'intensité transmise, on doit faire varier φ_{dc} de π , c'est à dire faire varier la tension V_{dc} de V_π . Or la tension V_π dépend du coefficient r_{22} (cf. 3.2), on a donc ainsi une méthode simple permettant de déterminer ce paramètre.

4.2. Détermination à partir du taux de modulation m

D'après la figure 4, en jouant sur le terme $(\varphi-2\beta)$ on peut se placer au point de fonctionnement M'_0 où la fonction de transfert du système est linéaire. En M'_0 , la pente dI/dV peut être reliée à r_{22} ainsi :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{d\varphi} \times \frac{d\varphi}{dV} = -\frac{I_0}{2} \sin(\varphi - 2\beta) \times \frac{r_{22}}{A} \quad \text{or, en } M'_0 : \sin(\varphi - 2\beta) = -1 \quad \text{cf figure 2}$$

$$\text{On a donc } \left. \frac{dI}{dV} \right|_{M'_0} = \pm \frac{I_0}{2} \frac{r_{22}}{A}$$

On appelle taux de modulation m le rapport entre la modulation optique et la modulation électrique :

$$m = \frac{1}{I_0} \frac{dI}{dV} = \frac{I_m / I_0}{V_m} \quad (\text{avec les notations de la figure 4})$$

$$\text{On en déduit : } r_{22} = 2A \times m \text{ (en } M'_0)$$

Connaissant les caractéristiques opto-géométriques du cristal (A), il suffit donc de mesurer le coefficient de modulation m en M'_0 pour obtenir le coefficient EO r_{22} .

4.3. Détermination par compensation

Puisque la fonction de transfert du système ne dépend que de la variable $\varphi-2\beta$, on peut rester en un point de fonctionnement donné (par exemple M_0) à toute valeur de V en ajustant l'angle β du polariseur. Montrer qu'on peut ainsi compenser une variation ΔV par une variation $\Delta\beta = r_{22} \Delta V / (2A)$. En mesurant $\Delta\beta$ en fonction de ΔV , on peut donc déduire une troisième mesure de r_{22} .

5. Réglages du montage optique

5.1. Injection dans la fibre optique.

En l'absence du modulateur électro-optique, de la lame quart d'onde et du polariseur, positionnez le laser de façon à ce que le maximum de lumière rentre dans l'objectif de microscope. Puis régler la position (x, y, z) de l'entrée de la fibre optique afin d'injecter un maximum de lumière dans celle-ci (pour cela, optimiser le tilt latéral et le tilt en angle). Pour

avoir une bonne injection, l'entrée de la fibre doit être très proche de l'objectif de microscope. Vous devez donc également essayer d'optimiser la translation en z, **cependant faites attention à ne pas toucher l'objectif de microscope avec la fibre**. Ce réglage en z doit se faire très finement et à chaque déplacement il faut à nouveau optimiser le tilt latéral et le tilt en angle. Pour mesurer la puissance de sortie, un détecteur est placé en bout de fibre et la mesure se fait sur un oscilloscope.

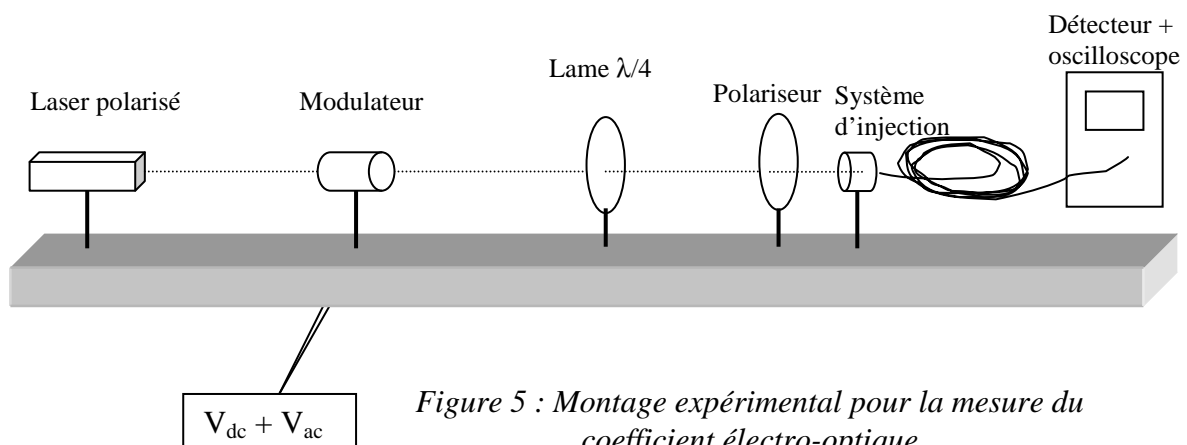
5.2. Mesure de l'ouverture numérique de la fibre

Sachant que l'ouverture numérique d'une fibre optique est : $n_0 \sin(\alpha)$ où α est le demi-angle du cône d'acceptance pour lequel il y a propagation dans la fibre optique et donc le demi-angle du cône de lumière en sortie de fibre, déterminez l'ouverture numérique de la fibre à la longueur d'onde de travail.

5.3. Réalisation du montage optique du modulateur d'amplitude

- Toujours en l'absence du modulateur électro-optique, positionnez le polariseur de manière à obtenir un minimum d'intensité transmise. L'axe de polarisation du polariseur est alors croisé avec la direction de polarisation initiale P_L du laser ($\beta = 90^\circ$). On détermine ainsi la direction P_L .
- Introduisez la lame quart d'onde avant le polariseur et tournez-la de façon à obtenir un minimum d'intensité. Les lignes neutres de la lame quart d'onde sont alors parallèles aux directions de polarisation initiale P_L du laser et du polariseur.
- Introduisez le modulateur EO entre le laser et la lame quart d'onde. Orientez-le soigneusement de manière à ce que le faisceau traverse bien tout le cristal contenu dans la cellule.
- Orientez-le de façon à ce que ses axes neutres fassent un angle de 45° avec la polarisation initiale P_L du laser. Ce réglage est très important pour le bon fonctionnement de la suite du TP.

Le montage final sera le suivant, il est identique à celui de la figure 2 :



- **Demander à l'enseignant de vérifier le montage**

5.4. Reprendre le schéma précédent en y ajoutant clairement les directions relatives des différents axes (du cristal EO, de la lame quart d'onde, du polariseur) ainsi que le type de polarisation (rectiligne, elliptique, dans quelle direction) à chaque étape intermédiaire.

6. CARACTERISTIQUES DU MONTAGE

6.1. Modulation d'amplitude en fonction de β

- ➊ Pour une tension continue nulle sur le cristal, relevez la valeur du signal mesuré au voltmètre (proportionnel à l'intensité lumineuse transmise I), en fonction de l'angle β du polariseur, variant de -90° à $+90^\circ$ (prendre plus de points près des extréma).
- ➋ Tracez la courbe $I = f(\beta)$. Commentez. Quelle loi avez vous tracé?

6.2. Modulation d'amplitude en fonction de V_{cd}

Allumer l'amplificateur de tension du modulateur EO. Placez-vous au point de fonctionnement M_0 à l'aide de l'analyseur.

- ➊ Relevez la valeur de la tension aux bornes du détecteur en fonction de la tension continue appliquée au modulateur variant de -400 à $+400$ volts.
- ➋ Tracez la courbe $I = f(V_{dc})$. Commentez.

6.3. Caractéristique de l'intensité optique transmise pour une tension EO sinusoïdale :

Nous venons de voir que par rotation du polariseur (β) ou par application d'une tension continue, nous pouvons nous déplacer sur la fonction de transfert du système, c'est à dire faire varier le terme $\varphi_{(V)} - 2\beta$. Nous allons maintenant étudier les différents points de fonctionnement de celle-ci.

- Ramenez la tension continue à zéro.
- Mettez en route le **GBF interne à l'amplificateur de tension**, réglez sa fréquence à 1 kHz et visualisez ce signal de modulation en reliant la sortie **1%** à l'oscilloscope.
- A l'aide de la courbe $I = f(\beta)$ obtenue précédemment, placez vous aux différents point de fonctionnement M_0 et M'_0 .

Quelles sont les caractéristiques (fréquence, phase) des courbes obtenues sur l'oscilloscope ? Interpréter à partir de la fonction de transfert du dispositif optique. En déduire le meilleur point de fonctionnement pour moduler la lumière en vue de faire une transmission optique.

7. MESURES DU COEFFICIENT r_{22}

7.1. Mesure à partir du taux de modulation

Réglez la tension continue à 0 V. Placez-vous au point M'_0 en tournant le polariseur. Vous devez observer un signal modulé de même fréquence que la tension V_{AC} .

Relevez I_m/I_0 et V_m . En déduire la valeur de r_{22} .

7.2. Détermination de V_π

Toujours à 0 V, placez-vous au point M_0 en utilisant le polariseur. Vous devez alors observer le signal modulé à fréquence double.

- ❶ Appliquez alors une tension continue V_{dc} , à l'aide de l'alimentation haute tension, de manière à atteindre un autre extremum et déduisez-en la valeur de V_π .
- ❷ En déduire la valeur du coefficient r_{22} .

7.3. Détermination par compensation en M_0

Revenez au point M_0 à 0 V.

Faites varier la tension continue jusqu'à 400 V, et pour plusieurs valeurs de V_{dc} recherchez l'angle de compensation β permettant de rester au point de fonctionnement M_0 . Tracez β en fonction de V_{dc} . A partir d'une régression linéaire, en déduire la valeur de r_{22} .

7.4. Interprétation de vos résultats

Comparez les valeurs de r_{22} obtenues par les 3 différentes méthodes. Conclusion

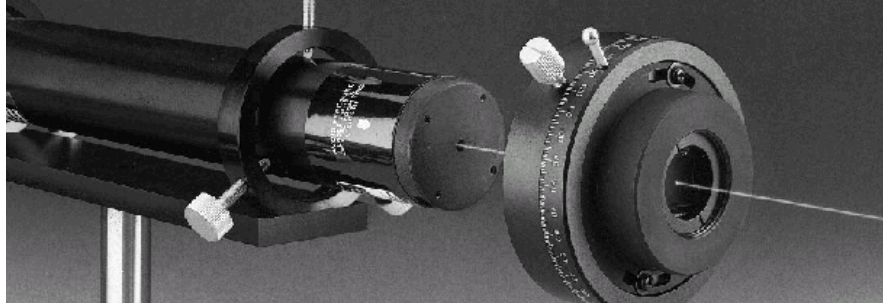
8. Transmission par fibre optique

Maintenant, on vous propose de réaliser une télécommunication audio par fibre optique. Pour cela, au lieu de moduler la lumière en entrée de la fibre par une simple sinusoïde, nous allons la moduler par un signal audio (sortie de radio).

1. Vérifiez que vous êtes bien au point de fonctionnement M'_0 afin d'avoir un taux de modulation du signal lumineux maximum, et également afin d'avoir un minimum de distorsion du signal (zone linéaire).
2. Allumez la radio et connectez sa sortie sur la borne « GBF externe » de l'alimentation de l'EO, sur laquelle vous aurez basculé en « modulation externe ».
3. Connectez la photodiode à la borne « entrée » et le haut parleur à la borne « sortie » (partie gauche de l'alimentation de l'EO), vous devez entendre de la musique !
4. Vérifiez que lorsque vous coupez le signal optique vous n'avez de plus de transmission audio.
5. Changez de point de fonctionnement. Quelle est la répercussion sur la qualité du signal transmis par la fibre optique ?

MANIPULATION N°4

Caractérisation d'un faisceau laser



Un laser est principalement caractérisé par les paramètres suivants :

- Puissance de sortie
- Bande spectrale d'émission (position et largeur)
- Polarisation
- Profil du spot laser
- Diamètre et divergence du spot laser

Nous vous proposons dans ce TP de caractériser ces deux derniers paramètres pour un laser He-Ne. Nous allons pour cela utiliser les propriétés de divergence d'un faisceau gaussien.

1. Rappels sur les faisceaux gaussiens:

1.1. Propagation d'un faisceau gaussien.

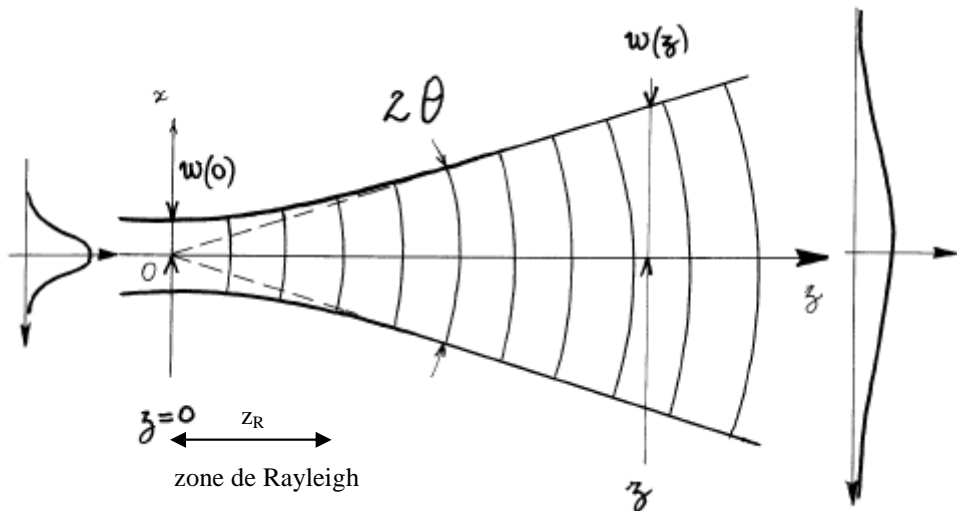
D'après les données du constructeur, le laser utilisé dans ce TP émet un faisceau continu de profil spatial gaussien. En effet, dans le cadre de l'approximation paraxiale (champ lentement variable selon l'axe de propagation : $\frac{\partial^2}{\partial z^2} \ll k \frac{\partial}{\partial z}$ (avec k le vecteur d'onde), l'équation d'onde admet des solutions de forme gaussienne. On peut alors représenter l'**amplitude** du champ électrique par la fonction :

$$E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \quad \text{avec } r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\text{et } w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}$$

où $w(z)$ est le rayon à 1/e de l'amplitude du champ électrique du faisceau laser à la côte z . On constate que le faisceau laser s'élargit au cours de la propagation. La valeur $w_0 = w(z=0)$ représente la valeur minimale du rayon $w(z)$. On l'appelle **rayon de pincement** ou « **waist** ».

Le champ électrique évolue donc de la façon suivante:



évolution d'un faisceau gaussien au cours de la propagation

Au cours de cette propagation, on peut distinguer deux régimes, selon que z est plus grand ou plus petit que z_R , où z_R est ce que l'on appelle la **longueur de Rayleigh**. z_R est telle que:

$$w(z_R) = \sqrt{2}w_0$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

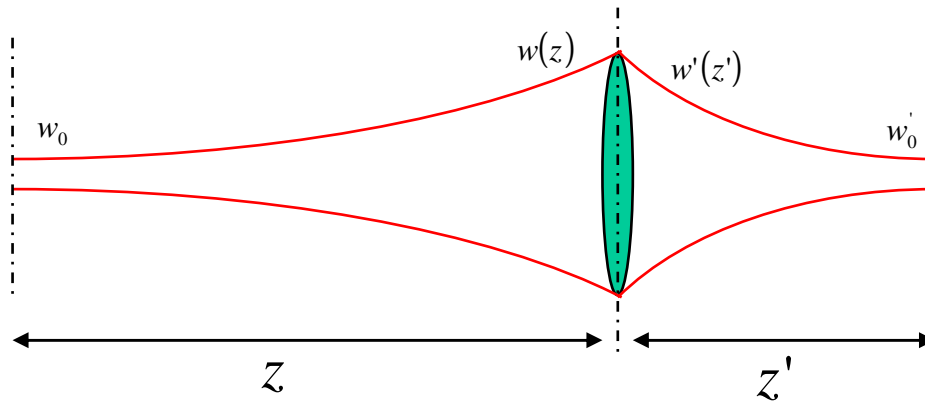
- ❖ Si $|z| \ll z_R$ alors $w(z) \approx w_0$, pas ou peu de divergence du faisceau
- ❖ Si $z \approx z_R$ alors $w(z)$ présente un "coude", zone de transition
- ❖ Si $|z| \gg z_R$ alors la variation de la largeur $w(z)$ du faisceau est quasi linéaire

1.2. Transformation d'un faisceau gaussien par une lentille.

Lorsqu'un faisceau gaussien passe à travers une lentille, son waist, sa divergence et sa longueur de Rayleigh sont modifiés. Cette modification dépend de la focale image f de la lentille, du waist w_0 initial du faisceau gaussien et de la distance z entre la position de ce waist w_0 et la lentille. On note respectivement w_0' et z' le nouveau waist et sa position. Ils sont donnés par :

$$w_0' = \frac{w_0 f}{\sqrt{(z-f)^2 + (z_R)^2}} = \frac{w_0 f}{\sqrt{(z-f)^2 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda}\right)^2}}$$

$$\frac{z'}{f} = 1 + \frac{\frac{z}{f} - 1}{\left(\frac{z}{f} - 1\right)^2 + \left(\frac{z_R}{f}\right)^2}$$



Bibliographie : Cours sur les faisceaux laser. Livre "Les laser" Dunod.

2. Méthodes de mesure

Pour vérifier expérimentalement les différentes lois présentées dans le paragraphe précédent, il faut mesurer le profil du faisceau laser dans le plan transverse à l'axe de propagation, en différents points de l'espace. Pour cela, on peut utiliser différentes méthodes selon le matériel dont on dispose. Voici les 3 méthodes les plus courantes, au cours de ce TP, vous utiliserez 2 méthodes différentes :

La première méthode est la plus simple, il s'agit d'une acquisition d'image totalement informatisée. Vous utiliserez une barrette CCD constituée de 2048 pixels de 14 μm de large, qui permet d'accéder au profil d'intensité du faisceau dans une direction de l'espace.

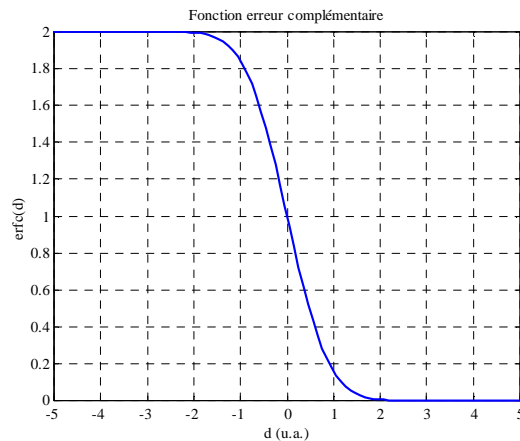
La seconde méthode consiste à déplacer transversalement à l'axe de propagation un diaphragme calibré situé devant une photodiode. Ce déplacement est réalisé à l'aide d'une platine micrométrique dans le plan où l'on souhaite réaliser la mesure. Le diaphragme calibré joue le rôle de pixel, on aura donc autant de pixels que de points de mesure.

La troisième méthode est la "méthode du couteau", qui consiste à déplacer transversalement à l'axe de propagation une lame de rasoir située devant une photodiode. Ce déplacement est réalisé à l'aide d'une platine micrométrique dans le plan où l'on souhaite réaliser la mesure. Au fur et mesure du déplacement (d) de la lame de rasoir, le faisceau sera de plus en plus écarté. La puissance $P(d)$ mesurée par la photodiode représente la primitive du profil local d'intensité du faisceau, ce qui peut s'écrire, pour un faisceau gaussien :

$$P(d) = E_0^2 \frac{w_0^2}{w(z)^2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \int_d^\infty e^{-\frac{2x^2}{w^2}} dx$$

soit encore: $P(d) = K * \text{erfc}\left(\frac{\sqrt{2}d}{w(z)}\right)$ avec $K = E_0^2 \frac{w_0^2}{w(z)^2} \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ où erfc est la fonction erreur complémentaire.

Cette fonction est présentée sur le graphe suivant :



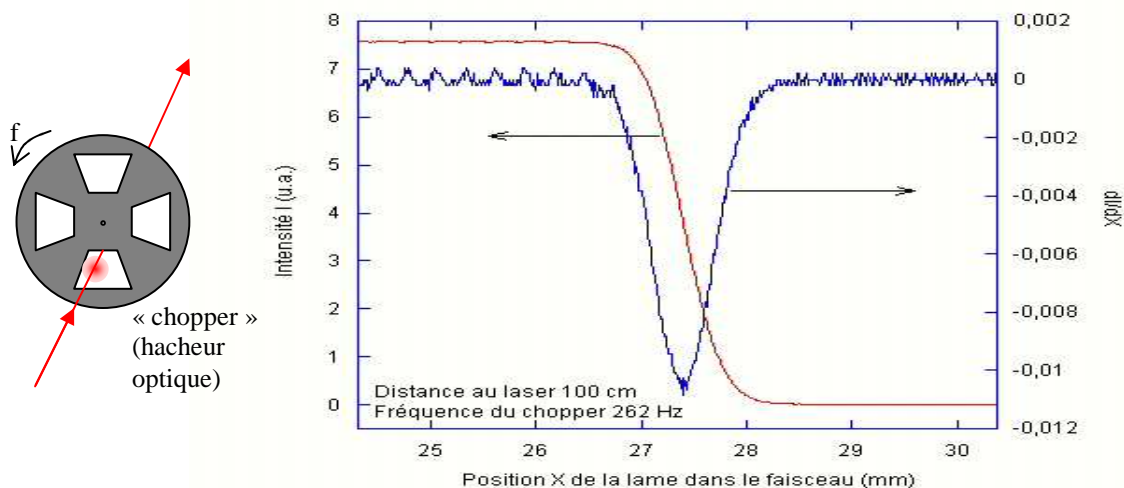
Fonction erreur complémentaire

A partir du profil d'intensité $P(d)$, il est possible de déterminer $w(z)$ soit en effectuant un ajustement numérique de $P(d)$ avec une fonction erreur complémentaire, soit en effectuant un ajustement numérique de la dérivée dP/dd par une gaussienne :

$$\frac{d}{dX} \operatorname{erf}(\sqrt{2X}) = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp(-2X^2)$$

Il est important de noter que cette méthode peut être utilisée pour des profils non Gaussien, dans ce cas on doit obligatoirement passer par la dérivée de $P(d)$ qui donne directement le profil du faisceau à analyser.

Dans la pratique, afin d'automatiser la mesure, on utilise pour écranter le faisceau laser non pas une lame de rasoir montée sur une platine micrométrique mais un chopper tournant à une fréquence F (voir figure). On mesure alors la réponse temporelle de la photodiode placée derrière le chopper, à chaque valeur du temps t correspond une position x du couteau. Cette réponse $P(t)$ permet d'obtenir après changement de variable $t \rightarrow d$ la fonction $P(d)$ recherchée, de laquelle on déduit le profil du faisceau soit par comparaison à la fonction erfc , soit en dérivant.



3. Matériel

Vous disposez pour ce TP du matériel suivant :

- ❖ Une source laser HeNe
- ❖ Un banc d'optique
- ❖ Une barrette CCD avec différents filtres et polariseurs
- ❖ Un PC avec les logiciels Caliens, Kaleidagraph, Synchronie + carte d'acquisition Sysam
- ❖ Un chopper
- ❖ Une lentille $f = 200$ mm
- ❖ Photodiode

4. Questions préliminaires (à préparer avant le TP)

4.1. Montrez que lorsqu'on est loin de la zone de Rayleigh, la largeur du faisceau gaussien w varie linéairement avec la distance parcourue z . Exprimez la divergence θ du faisceau en fonction de w_0 et λ . Commentez cette dernière expression, origine physique et conséquence pratique..

4.2. Montrez que si le champ électromagnétique a pour expression:

$$E(r, z) = A \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right)$$

alors la demi largeur à $\frac{A}{e}$ est égale à w . Qu'en est-il pour l'intensité ?

4.3. A partir des lois de transformation des faisceaux gaussiens à travers une lentille, calculez la taille et la position du waist image d'un faisceau laser de 0,48 mm de diamètre situé à 100 cm avant la lentille de 200 mm de focale image.

4.4. Pour la mesure de $w(z)$ avec le chopper, donnez la relation entre les variables t, d, f et r avec f la fréquence de rotation du chopper.

5. Détermination du diamètre et de la divergence du spot laser

5.1. Mesurez à l'aide de la barrette CCD et du logiciel Caliens (voir annexe B), le profil d'intensité lumineuse dans la direction horizontale puis verticale, à 1 mètre de la sortie du laser (notez précisément la cote à laquelle vous faites ces mesures car vous en aurez besoin pour **la question 7.2**, et préciser la cote du laser qu'on ne déplacera pas). Utilisez le logiciel Caliens pour ajuster le profil mesuré par une gaussienne : une fois l'acquisition réalisée, cliquez sur « interférence », puis sur « simulation », une fonction gaussienne est alors affichée, c'est à vous d'en ajuster les 3 paramètres à la main à l'aide de 3 curseurs. Enlever le filtre numérique dans Caliens. Il s'agit d'un ajustement visuel et non pas numérique, cependant cette méthode donne des résultats corrects. Estimer l'incertitude sur cette estimation de $w(z)$ **Assurez vous que ce que vous mesurez sur la caméra est bien le faisceau direct de la sortie du laser et pas un faisceau parasite dû par exemple à une réflexion parasite**. Joignez une impression de votre graphique (avec le résultat de la modélisation) à votre compe-rendu.

5.2. Mesurez à l'aide de la barrette CCD et du logiciel Caliens le paramètre $w(z)$ pour 5 cotes de z différentes (entre 70 cm et 190 cm avec un pas de 30 cm), dans une seule direction. Tracez $w(z)$ et ajustez par une régression linéaire et discutez le χ^2 . Déterminer à partir ces résultats la divergence du faisceau laser et la position, en déduire la valeur du waist. Donnez une incertitude sur ces paramètres.

5.3. Les données constructeur sont données en salle de TP. Comparez vos valeurs à ces données. Commentez.

6. Lois de transformation à travers une lentille

- 6.1. Placez la lentille à 100 cm de la sortie du laser. Mesurez $w(z)$ après la lentille, avant et après le rayon de pincement. Tracez $w(z)$ en prenant 2 avant et 5 après la zone de pincement. Ajustez la partie linéaire de la courbe par une régression linéaire. En déduire les paramètres du laser après la lentille : divergence θ' , waist w' et position de ce dernier z' (repérée par rapport à la lentille).
- 6.2. Comparez vos valeurs à celles que vous avez calculées dans la question 4.3. Commentez (prenez en compte les intervalles d'incertitude).
- 6.3. En déduire la densité de puissance au point focal de la lentille.

7. Autres méthodes

- 7.1. Dans le cas où l'on a pas de CCD on peut remplacer la CDD par une translation et un diaphragme calibré (quelques dizaine de μm). Cependant cette méthode est très longue c'est pourquoi vous ne la ferez pas en TP. Quel sont les avantages et inconvénients de cette méthode par rapport à la précédente ?
- 7.2. Il existe une autre méthode plus rapide ne nécessitant pas de CCD, c'est la méthode du couteau. Remplacer la CDD par le chopper, puis connecter la photodiode à la carte d'acquisition numérique Sysam, pilotée par le logiciel Synchronie (annexe D). Réalisez une acquisition avec Synchronie (attention à bien choisir les paramètres d'acquisition), puis traitez les données par la méthode de votre choix de façon à déterminer $w(z)$. Quel sont les avantages et inconvénients de cette méthode par rapport à la précédente ?

Utilisation de Synchronie pour traiter un profil d'intensité capté par Caliens (voir annexe D) :

Si vous avez pris soin depuis le logiciel Caliens d'exporter votre fichier sous format Synchronie, il s'ouvrira automatiquement sur Synchronie (courbe tracée). Il ne vous reste plus alors qu'à modéliser (outil – modélisation – entrer la formule de la gaussienne).

ANNEXES

Les documents suivants sont à lire avant et/ou pendant les TP.

Ils vous feront gagner du temps et vous permettront d'être plus performants en séance.

Annexe A : utilisation des ressources informatiques de la plate-forme optique

Annexe B : utilisation du système d'acquisition Caliens (barrette CCD)

Annexe C : utilisation du logiciel Kaleidagraph (traitement de données, graphes, ...)

Annexe D : utilisation de Synchronie (acquisition et traitement de données)

Annexe E : modélisation et traitement de donnée

Annexe F : polarisation et représentation de Jones

Annexe G : tableau à faire remplir par l'enseignant

Annexe A : Utilisation des ressources informatiques de la plate-forme optique

Lors de ces TP, nous vous demandons de vous familiariser avec l'usage de l'outil informatique, pour acquérir des données, les traiter ou les présenter.

Tous les PC des salles de TP sont sur le réseau E (Enseignement). Ils sont nommés *DescartesX* ($X = n^{\circ}$ du PC). Pour travailler sur ces PC, vous devez utiliser votre login personnel et votre mot de passe, qui vous sont donnés lors de votre inscription.

Vous avez aussi accès à internet mais n'en abusez pas ! En dehors des heures de TP, vous pouvez accéder sur demande à ces PC.

- Impression :

Vous disposez d'une imprimante laser dans la salle de TP C114 : **PHY-DESCARTES2**.

En cas de problème sur cette imprimante, vous pouvez utiliser PHY-DESCARTES en salle C117.

Pour installer l'imprimante : allez dans le menu « démarrer » - paramètres » - « imprimantes », cliquez sur « ajout d'imprimante » - « suivant », tapez le nom de l'imprimante (\\STYX\PHY-DESCARTES2) ou cherchez son nom dans la liste (PHY-DESCARTES2 est sur E\STYX).

- Sauvegarde des données :

Vous devez sauvegarder vos données **uniquement dans votre espace Perso** sur le serveur Sarado (accessible depuis le poste de travail), et non sur le disque dur du PC. Ainsi, vous évitez de polluer les disques durs des PC et vos données pourront être consultées (par vous uniquement) sur n'importe quelle machine connectée au réseau E. Un fichier mis sur le disque dur peut être effacé à tout moment par n'importe qui !

Quand vous avez terminé, n'oubliez pas de fermer votre session de travail (menu « Démarrer »). Inutile d'éteindre le PC en fin de séance.

Annexe B : Notice de d'utilisation du système d'acquisition Caliens (barrette CCD)

A lire absolument AVANT toute utilisation

Le capteur *Caliens* est une barrette CCD linéaire comprenant 2048 pixels de 14 µm de large, interfacée à un ordinateur (même genre de capteur que ceux des appareils photos numériques, sauf qu'ici on n'a qu'une **ligne de pixels**).

Pour tout renseignement concernant le principe de fonctionnement du capteur ou les fonctions du logiciel, consultez la notice constructeur. Cette annexe résume le minimum à savoir.

Démarrage : Mettez l'interrupteur de la caméra « ON », vérifiez que le câble USB est bien branché au PC, allumez le logiciel d'acquisition (*Caliens*) et cliquez sur « temps réel ». Pour vérifier que le capteur fonctionne correctement, retirez les filtres éventuellement vissés sur sa tête, envoyez de la lumière et passez la main devant pour voir s'il réagit.

Atténuation du faisceau : Ce capteur étant très sensible, on doit souvent atténuer l'intensité du faisceau afin **d'éviter la saturation** (elle ne pose pas de dommages à la caméra mais empêche de voir le signal) voire même **la sursaturation** (défaut caractéristique des capteurs CCD, qui se manifeste par l'apparition d'un signal aberrant lorsque la luminosité est trop forte : au-delà de la saturation, qui montre un signal plafonnant à une valeur maximale, un signal apparaît, mais qui n'est pas correct : **attention piège !**). Pour cela, on dispose d'un jeu de **5 filtres** : deux polariseurs que l'on croisera plus ou moins pour obtenir une atténuation variable (un seul suffit si la source est déjà polarisée) et 3 filtres neutres (atténuation 10^{-D}) : deux de densité $D = 0,9$ et un de densité $D = 3$ (noté «BW»). **Ne mettez pas les doigts sur les filtres !** On commencera toujours par chercher le filtrage optimum permettant de travailler juste en dessous du niveau de saturation du capteur (ceci pour une meilleure précision). Pour ce réglage, ne pas mettre l'affichage en échelle auto, sinon vous ne vous rendez pas compte de l'amplitude du signal mesuré.

La sensibilité $S = 0, 1, \dots$ se règle depuis le logiciel et correspond à une certaine durée d'intégration du signal (en ms = $10 + 2,5 \times S$). En général, on travaille sur $S = 0$ car le faisceau est intense.

Précision : le signal est codé en numérique sur 8 bits soit $2^8 = 256$ niveaux. Vous avez intérêt à utiliser toute la dynamique en travaillant si possible juste en dessous du niveau de saturation (le bruit numérique est alors $\approx 1/256 \approx 0,4 \%$ alors que si par exemple vous travaillez avec un niveau de signal 10 fois plus faible que la saturation, le bruit numérique sera de $1/25 \approx 4 \%$). De même, la précision sur la position est au mieux de 14 µm (taille d'un pixel), vous avez donc intérêt à étaler le signal sur toute la largeur de la barrette si possible.

Éliminez toute lumière parasite. Si nécessaire, placez le cylindre en PVC devant le capteur, bien dans l'axe du faisceau lumineux, pour éliminer la lumière parasite venant des côtés.

Soignez l'alignement (parallélisme et hauteur) de l'image à enregistrer avec la caméra (retirez les filtres pour observer la position du faisceau par rapport au capteur, qui est très fin : 200 µm en hauteur).

Mesures : une fois que le signal vous paraît correct, cliquez sur l'icône « acquisition » et sortez du mode « temps réel ». Vous avez alors une « photo » du signal, sur laquelle vous pouvez faire des mesures (zoom, curseurs, modélisation : onglet « interférences », ...).

Pour exporter les données vers un logiciel de traitement plus complet (*Kaleidagraph*, ...), utilisez la fonction « exporter ». Un fichier .TXT est créé, contenant les valeurs de l'intensité pour les 2048 pixels de la caméra. Les fichiers « Synchronie » sont lisibles directement par le logiciel *Synchronie*. Il est aussi possible d'exporter un graphique sous la forme d'un fichier BMP (non compressé, donc à convertir en JPEG à l'aide d'un logiciel de traitement d'images type *PhotoEditor* ou *Photofiltre*, pour limiter la taille du fichier).

En fin de TP, pensez à remettre les 5 filtres sur la tête du capteur.

Annexe C : utilisation du logiciel Kaleidagraph (traitement de données, graphes, ...)

Charger un fichier :

File>Import>Text

Les premières lignes du fichier apparaissent dans une fenêtre qui s'ouvre

Sélectionner le nombre de lignes à sauter dans le fichier (lignes de texte de commentaires)

Sélectionner le format des délimiteurs entre données (espace, tab, virgule...).

Si les nombres sont sous forme décimale « européenne » du genre 126,675 il faut commencer par aller dans « Data »> « Column format » et sélectionner la forme 1 234,56. Attention au nombre de digits. J'ai constaté que dans le cas d'un grand nombre de digits (>9), les derniers digits du nombre lu sont différents du nombre dans le fichier (et ceci même en sélectionnant « double » pour le type dans column format) !!!

Donner un nom à chaque colonne (par exemple : « angle(°) », « lambda (nm) », ...) : aller dans « Data – Column Format » ou double-cliquer sur une des cellules de la 1^{ère} ligne du tableau (notées par défaut A, B, C, ...).

Réaliser des opérations mathématiques sur les colonnes : utiliser la fenêtre « Formula Entry » (si elle n'apparaît pas, aller dans « Windows – Formula Entry »). Les différentes colonnes sont notées c0, c1, c2, ... Entrer la formule (par exemple, $c2 = c0 + 3 * c1$) puis cliquer sur « Run ». Si par la suite, vous modifiez une des valeurs du tableau, il faudra relancer le calcul pour en tenir compte.

Pour lisser un fichier de données :

Sélectionner la fenêtre du fichier de données. Clic droit « append columns ». Puis « Macro »>Smooth, et sélectionner la colonne à lisser, la colonne dans laquelle le résultat va être stocké, le nombre de points suivant lequel le lissage va s'effectuer.

Pour dériver un fichier de données :

cf ci-dessus, avec « Macro »> »Derivative ».

Tracer un graphique : Aller dans le menu « Gallery – Linear – Scatter » et sélectionner la (ou les) variable(s) X et la (ou les) variable(s) Y. Un graphique apparaît. Les paramètres peuvent être modifiés dans le menu « Plot » ou en double-cliquant directement sur l'élément que l'on veut modifier (par exemple, pour changer l'échelle, double-cliquer sur l'un des deux axes). Si vous modifiez les données du tableau, vous pouvez mettre à jour le graphique en cliquant sur le symbole en haut à droite du data. Si vous voulez ajouter ou retirer une variable sur le graphique, vous devez le retracer : aller dans le menu « Gallery », modifier les variables si nécessaire, cliquer sur « Plot » pour créer un nouveau graphique ou sur « Replot » pour modifier le graphique existant.

Masquer : Si certains points expérimentaux vous semblent aberrants, vous pouvez les ignorer momentanément en les masquant (menu *Functions – Mask* ou *Unmask*).

Ajouter des barres d'erreur : Pour ajouter des barres d'erreur sur le graphique, aller dans le menu « Plot – Error Bars » et indiquer la valeur de l'erreur associée à la variable X et/ou Y. Cela peut être une valeur relative fixe (*% of value*), une valeur absolue fixe (*fixed value*) ou

une valeur variable suivant le point expérimental, qui doit alors être préalablement indiquée dans l'une des colonnes du tableau (sélectionner *Data Column*).

Faire une modélisation : Une fois le graphique tracé, vous pouvez modéliser les données expérimentales par une fonction de votre choix : aller dans le menu « *Curve Fit* » et sélectionner l'une des fonctions prédéfinies (*Linear, Polynomial, ...*) ou aller dans le menu « *General – Fit 1* » pour définir une nouvelle fonction. Sélectionner la variable à modéliser, puis cliquer sur « *Define* ». Taper l'expression de la fonction modèle, en notant M0 la variable et m1, m2, ... les paramètres de la modélisation (par exemple, $m1 \cdot \exp(-M0^2/m2^2)$ pour une gaussienne). Si la modélisation échoue, réessayer en donnant une première estimation des paramètres (syntaxe : $m1 \cdot \exp(-M0^2/m2^2)$; m1 = 2 ; m2 = 4). S'il indique « *singular coefficient matrix* », recommencez avec des paramètres de départ légèrement différents. Pour valider un modèle et obtenir l'incertitude sur les paramètres de la modélisation, voir l'annexe suivante.

Sauvegarder les données : Vous pouvez sauvegarder indépendamment les tableaux (*File - Save Data As*) et les graphiques (*File – Save Graph As*). Si vous avez uniquement sauvegardé le graphique, vous pouvez retrouver le tableau de données correspondant en cliquant sur le petit tableau symbolisé dans le coin en haut à droite de la fenêtre graphique. Pensez à faire une sauvegarde régulièrement.

Annexe D : utilisation de Synchronie (acquisition et traitement de données)

Acquisition d'un signal :

Synchronie permet l'acquisition d'une tension $V(t)$ sur l'une de des entrées de la carte d'acquisition Sysam (EA0 par défaut). Cette tension est échantillonnée dans le temps: N points sont acquis avec une fréquence d'échantillonnage choisie par l'utilisateur. Commencez par régler les paramètres d'acquisition en fonction du signal attendu (menu « paramètres »).

La courbe $V(t)$ est automatiquement tracée en appuyant sur F10. Pour modifier le graphique, cliquez sur ce que vous voulez changer ou aller dans le menu « paramètres ». Vous disposez de différents outils de mesure (curseurs, ...).

Traitement d'un signal :

Synchronie peut traiter soit un signal acquis avec la carte Sysam, soit une série de données entrées à la main dans son tableur ou importées d'un autre logiciel.

Le menu « outil » permet de réaliser un certain nombre d'opérations sur la courbe tracée : lissage, modélisation, dérivée, FFT, ...

Un tableur (cliquez que l'onglet en bas de la fenêtre) permet de visualiser les données.

Une feuille de calcul (cliquez que l'onglet en bas de la fenêtre) permet de réaliser diverses opérations mathématiques sur les données. Dans ce mode, vous pouvez par un simple copier / coller échanger des données avec un autre logiciel (exemple Kaleidagraph)

Annexe E : modélisation et traitement de données expérimentales

Le problème :

On dispose d'un relevé de n valeurs expérimentales (x_i, y_i) et leurs incertitudes $(\Delta x_i, \Delta y_i)$
(les erreurs systématiques ne sont pas traitées ici).

On cherche à faire 2 choses :

1 – valider un modèle.

On veut répondre à la question suivante : la loi de variation $y(x)$ observée expérimentalement peut-elle, compte tenu des incertitudes, se représenter par la fonction modèle f ?

2 – trouver les k coefficients de la fonction modèle f et leur incertitude.

Par exemple, si $f(x) = ax + b$, on veut trouver les coefficients (a, b) et leur incertitude $(\Delta a, \Delta b)$.

La réponse à ces questions dépend bien sûr de la dispersion des points expérimentaux autour de la fonction modèle, mais aussi de la valeur des incertitudes de mesure : si on réalise une mesure très précise, il sera plus difficile de trouver une fonction modèle représentant correctement les points expérimentaux, mais une fois la fonction trouvée, l'incertitude sur ses paramètres sera faible.

Si les incertitudes expérimentales sont connues, les logiciels de traitement de données (*Synchronie*, *Kaleidagraph*, ...) utilisent en général la méthode du « χ^2 » qui consiste à chercher les k coefficients (a, b, \dots) de la fonction f choisie qui minimisent la quantité :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - f(x_i))^2}{\sigma_i^2}$$

où σ_i est l'écartype liée à l'incertitude sur le point (x_i, y_i) . On voit qu'il s'agit d'une somme pondérée : plus un point expérimental est précis, plus son influence est importante.

La minimisation de cette fonction par le logiciel conduit à l'affichage des résultats suivants :

- paramètres optimum de la fonction f : $a \pm \Delta a, b \pm \Delta b, \dots$
- validation du choix de la fonction f : χ^2 ou $C_m = \chi^2 / (n-k)$

C_m est appelé critère d'optimisation de la modélisation. On peut considérer que le choix de la fonction modèle f est correct si :

$\chi^2 \approx n-k$, ou $C_m \approx 1$ (l'erreur sur χ^2 est $\Delta\chi^2 = \sqrt{2(n-k)}$)

Une valeur trop importante du χ^2 signifie que le modèle n'est pas valide. Une valeur trop faible signifie que les incertitudes ont été surévaluées.

Remarque : Les logiciels donnent aussi souvent le coefficient de régression linéaire R ou l'écart quadratique moyen E (moyenne du carré des écarts entre les points expérimentaux et la fonction f). Ces deux coefficients ne dépendent que de la dispersion des points expérimentaux autour de f , pas de leur précision. Ils ne permettent donc pas de valider le modèle ni d'obtenir la précision sur les coefficients de la fonction f .

- Utilisation du logiciel Synchronie :

Si on utilise une fonction prédéfinie, ou si on ne précise pas les incertitudes Δx et Δy , le logiciel affiche seulement les valeurs des coefficients a, b, \dots et l'écart quadratique E .

Pour obtenir la valeur des incertitudes sur les coefficients Δa , Δb , ... ainsi que le critère d'optimisation C_m , il faut choisir une fonction utilisateur (sélectionner : *autre fonction*) et entrer les valeurs des incertitudes Δx et Δy (identiques pour tous les points).

Le logiciel réclame alors une estimation des paramètres a , b , ... pour l'aider dans sa modélisation. Si les estimations de ces paramètres ne sont pas assez précises, il est possible que la modélisation échoue. Seuls les paramètres *actifs* sont affinés. Si, alors que tous les paramètres sont *actifs*, la modélisation échoue, recommencer en rendant *actifs* les paramètres un par un.

- Utilisation du logiciel Kaleidagraph :

Ici encore, si on utilise une fonction prédéfinie (ex. : *Curve fit – Linear*), le logiciel affiche seulement les valeurs des coefficients a , b , ... et R . Si on veut obtenir les incertitudes Δa , Δb , ... et le χ^2 , il faut définir soi-même la fonction modèle (passer par : *Curve fit – General – Fit 1 – Define ...*).

Pour préciser l'incertitude σ_i attachée à chaque point de mesure, sélectionner *Weight Data*. Le logiciel demande alors de préciser quelle est la colonne contenant les valeurs de σ_i (attention : si *Weight Data* n'est pas sélectionné, le calcul est fait avec une valeur constante arbitraire $\sigma_i = 1$). Si l'incertitude sur x est négligeable, on prend $\sigma_i = \Delta y_i$, qui peut dépendre du point i considéré.

Attention : l'affichage des barres d'erreur sur un graphique (*Plot – Error bars ...*) est indépendante de la modélisation.

- Utilisation du logiciel Excel :

Excel n'affiche que les coefficients a , b , ... et le coefficient de régression linéaire R : il ne traite pas les incertitudes.

Exemple :

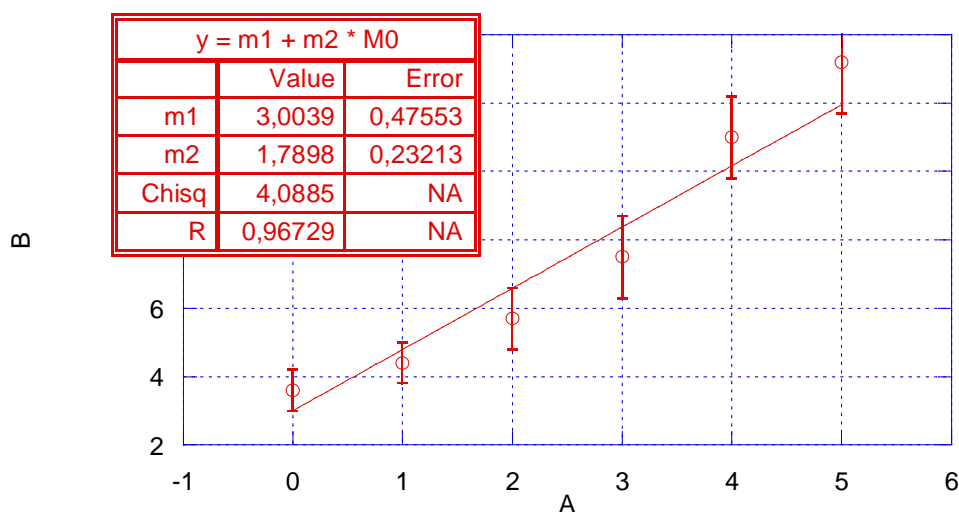
Les quatre courbes suivantes ont été tracées sur *Kaleidagraph*, avec $n = 6$ points de mesure, identiques dans tous les cas. Les barres d'erreur tracées correspondent aux poids σ_i utilisés pour la modélisation : elles sont trois fois plus faibles dans les cas 2 et 3 que dans le cas 1 et 4.

Cas 1 : Grandes barres d'erreur, modélisation par une droite.

On trouve $\chi^2 = 4,0885$ au lieu de la valeur idéale $6 - 2 = 4$ (avec une erreur $\approx 2,8$).

La modélisation est donc bonne. Par contre, on voit que les coefficients de la droite sont donnés avec une précision assez médiocre (par exemple, la pente est donnée avec une précision de 13 %).

1 - incertitudes importantes, fit linéaire



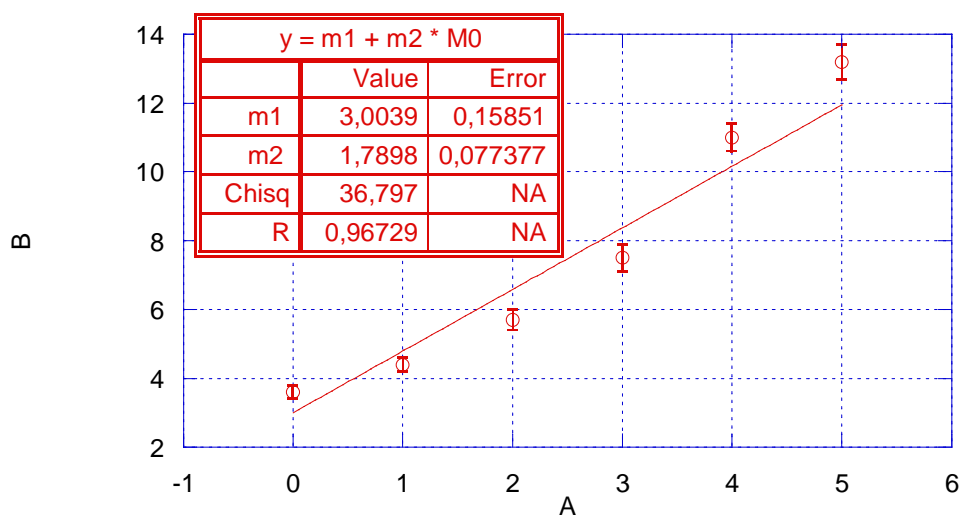
Cas 2 : Faibles barres d'erreur, modélisation par une droite.

On trouve $\chi^2 = 36,797$ au lieu de la valeur idéale $6 - 2 = 4$ (avec une erreur $\approx 2,8$).

La modélisation est donc maintenant mauvaise (une mesure précise est plus difficile à modéliser), bien que les coefficients de la droite soient donnés avec une assez bonne précision (par exemple, la pente est maintenant donnée avec une précision de 4 %). On voit dans cet exemple que pour valider un modèle, il ne faut pas se fier à la précision des coefficients de la modélisation : seule la valeur du χ^2 (ou du C_m) peut valider le choix de la fonction modèle.

Remarquez aussi que le coefficient de régression R est le même dans les cas 1 et 2 (il est indépendant des incertitudes) : ce coefficient ne peut pas non plus renseigner sur la validité de la modélisation.

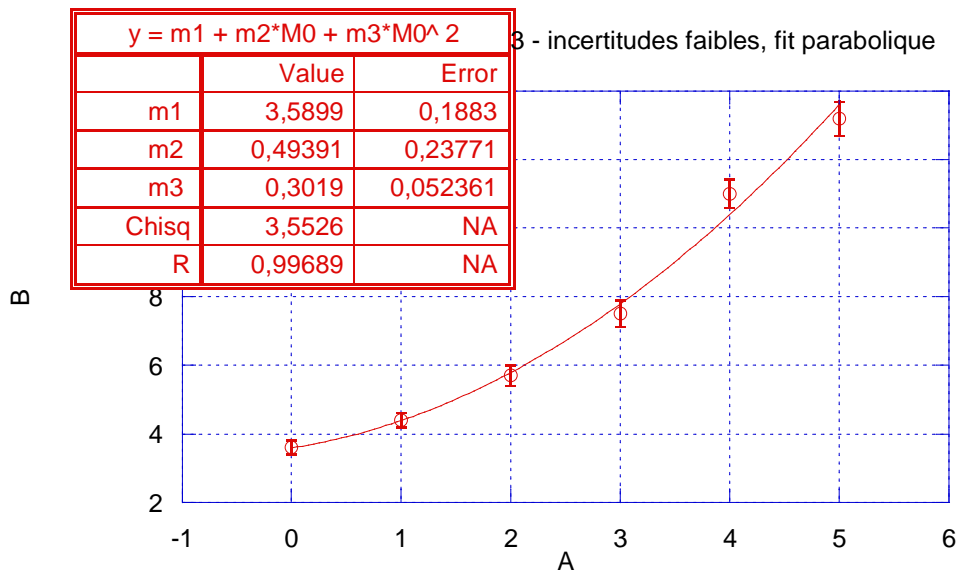
2 - incertitudes faibles, fit linéaire



Cas 3 : Faibles barres d'erreur, modélisation par une parabole.

On trouve $\chi^2 = 3,5526$ au lieu de la valeur idéale $6 - 3 = 3$ (avec une erreur $\approx 2,4$).

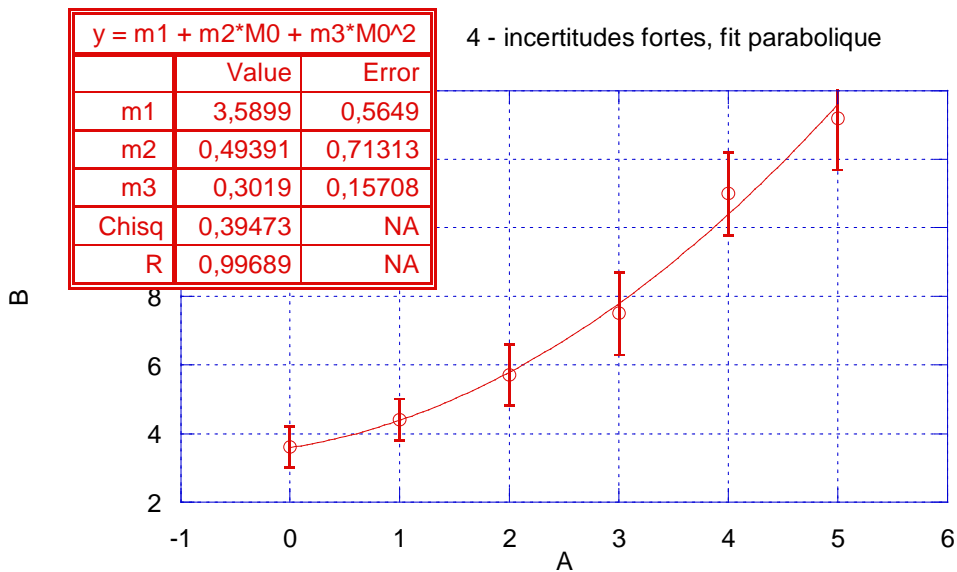
La modélisation par une parabole est donc bonne : on peut dire que les résultats expérimentaux sont bien représentés par une loi parabolique, compte tenu des incertitudes expérimentales (dans le cas 1, les incertitudes étant plus importantes, une loi linéaire suffisait).



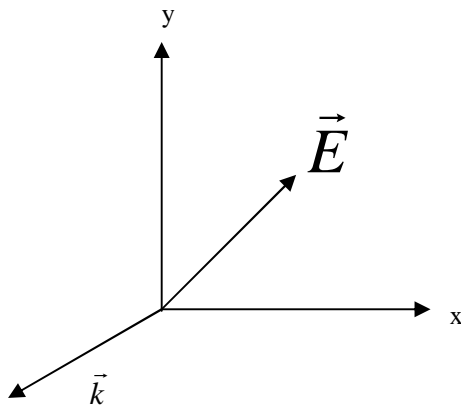
Cas 4 : Grandes barres d'erreur, modélisation par une parabole.

On trouve $\chi^2 = 0,39473$ au lieu de la valeur idéale $6 - 3 = 3$ (avec une erreur $\approx 2,4$).

Ici, la valeur du χ^2 est plutôt faible, ce qui signifie que la modélisation est valide mais peu sensible : la parabole convient, mais pas mieux que la droite ! D'ailleurs, on peut noter que l'incertitude sur les paramètres de la modélisation est très grande.



Annexe F : Polarisation et représentation de Jones



$$\vec{E} = \begin{pmatrix} A_x \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r}) \\ A_y \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Le champ peut être écrit dans la représentation de Jones par le vecteur suivant:

$$\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \begin{pmatrix} A_x \\ A_y e^{i\varphi} \end{pmatrix}$$

Dans le formalisme de Jones les éléments polarisants sont décrits par des matrices et s'écrivent:

$$\text{Polariseur selon x: } \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Polariseur selon y: } \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Élément biréfringent entraînant un déphasage φ

$$\begin{pmatrix} e^{i\frac{\varphi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\varphi}{2}} \end{pmatrix}$$

Pour connaître l'expression J' de la matrice de Jones d'un élément J dont les axes font un angle θ avec le champ électrique incident, on applique alors les matrices de rotation :

$$J' = R(-\theta)JR(\theta)$$

Avec

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

Annexe G : Tableau à faire remplir par l'enseignant

Tableau à faire remplir par l'enseignant et à mettre dans le compte rendu.

Nom	Prénom	TP :

Nom	Prénom	TP :

Nom	Prénom	TP :

Nom	Prénom	TP :