
Instrumentation d'optique et Lasers

- PEREZ : Optique géométrique, matricielle et ondulatoire ;
- BRUHAT-MARECHAL : Optique géométrique ;
- FLEURY-MATHIEU : Images optiques ;
- BERTY, ESCAUT : Optique ;
- JOUANISSON : La lumière du laser : guide d'expériences ;
- SEXTANT : Optique expérimentale.

Livres d'optique des classes préparatoires, anciens programmes, par exemple :

- BERTIN-FAROUX ;
- DEVORE-ANNEQUIN ;
- MOUSSA-PONSONNET ;
- GRAY-GAGENT : Electricité, Optique, collection U p. 273 et suivantes.

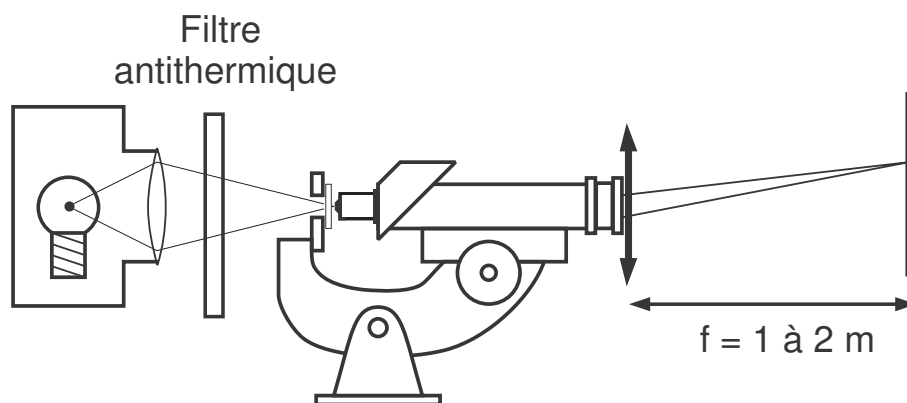
I) INSTRUMENTS D'OPTIQUE

1) Mesure du grossissement commercial d'un microscope réel

Rappels :

- Grossissement G : rapport de deux angles ;
- Grandissement g : rapport de deux longueurs.

Utiliser le microscope horizontal comme indiqué sur la figure et le placer sur un support réglable en hauteur. Placer une mire graduée en dixièmes de millimètre dans la platine porte-objet. Choisir l'objectif de grandissement 4 et l'oculaire de grossissement commercial 10. Pour éclairer l'objet, utiliser une lampe quartz-halogène avec un condenseur de courte focale et bien faire converger le faisceau sur l'objet. **Il est indispensable de placer entre le condenseur et l'objet un filtre antithermique pour éviter la destruction rapide de l'objet.** Placer juste après l'oculaire une lentille de grande focale (1 à 2 m) et un écran dans le plan focal de la lentille. Régler le microscope pour que l'image de la mire soit nette sur l'écran. Mesurer l'angle β sous lequel on voit une graduation de la mire à la sortie du microscope.



Le grossissement G du microscope est défini comme le rapport de cet angle β au plus grand angle α sous lequel on peut voir l'objet à l'œil nu. Conventionnellement le grossissement commercial G_c est déterminé en prenant le *punctum proximum* de l'œil standard égal à 25 cm. En déduire le grossissement commercial du microscope et vérifier qu'il est égal au produit du grandissement annoncé sur l'objectif par le grossissement commercial annoncé sur l'oculaire.

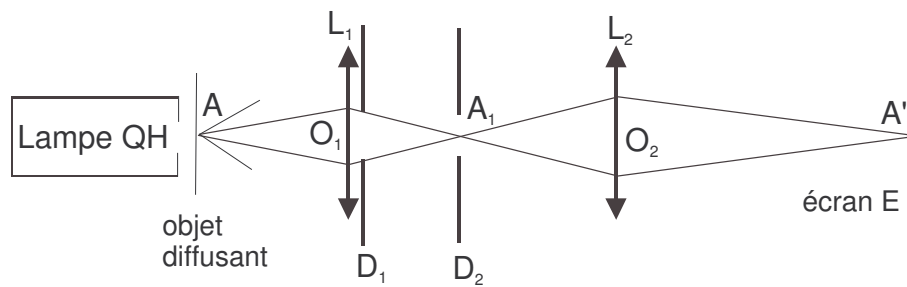
2) Diaphragmes de champ et d'ouverture

On s'intéresse ici aux limitations de la luminosité et du champ transversal dans un instrument d'optique.

a) Mise en évidence expérimentale des diaphragmes de champ et d'ouverture

Montage expérimental : Au moyen de deux lentilles et de deux diaphragmes, on modélise un instrument tel qu'un microscope ou une lunette astronomique.

L'objet, *qui doit être diffusant*, est un quadrillage tracé sur un papier calque, éclairé par une lampe quartz-halogène.



La lentille L_1 de distance focale environ 20 cm forme une image intermédiaire de l'objet. Pour réduire l'encombrement, placer L_1 de façon à ce que l'image intermédiaire ait à peu près la même taille que l'objet. La lentille L_2 (de distance focale voisine) forme l'image finale de l'objet sur un écran éloigné E.

Placer un diaphragme réglable D_1 contre la lentille L_1 et un diaphragme réglable D_2 dans le plan de l'image intermédiaire.

NB : Pour pouvoir étudier l'effet des diaphragmes D_1 et D_2 , il faut toujours s'assurer que ceux-ci sont assez fermés pour que les montures des lentilles ne diaphragment pas.

Manipulation : Sans modifier D_1 , réduire la taille de D_2 . Vérifier que la luminosité de l'image n'est pas affectée mais que la surface visible de l'objet est réduite : D_2 est appelé *diaphragme de champ*.

Faire ensuite varier D_1 à D_2 fixé. Cette fois le champ n'est pas modifié, mais la luminosité de l'image diminue lorsque le diamètre de D_1 diminue : D_1 est appelé *diaphragme d'ouverture*.

b) Pour aller plus loin : Notion de lucarne et de pupille (Facultatif)

Les systèmes optiques réels contiennent plusieurs diaphragmes, dont les montures des lentilles. Parmi eux, l'un joue le rôle de diaphragme de champ, un autre d'ouverture. Quand on modélise l'instrument on remplace ces diaphragmes réels par deux diaphragmes fictifs placés dans l'espace objet (ou dans l'espace image : on passe de l'espace objet à l'espace image par conjugaison à travers l'ensemble de l'instrument).

- la *lucarne d'entrée* est un diaphragme en général fictif de l'espace objet, qui est le conjugué du diaphragme de champ à travers toutes les lentilles qui le précèdent dans l'instrument. Par exemple, dans l'instrument du paragraphe précédent, la lucarne d'entrée est le conjugué de D_2 par rapport à L_1
- la *pupille d'entrée* est définie de la même façon à partir du diaphragme d'ouverture.

On peut aussi modéliser l'instrument par sa *lucarne de sortie* et sa *pupille de sortie*, qui sont respectivement les conjugués dans l'espace image du diaphragme de champ et du diaphragme d'ouverture à travers les lentilles de l'instrument qui les suivent. Dans les paragraphes suivants, on vérifie expérimentalement qu'on ne change pas le comportement de l'instrument en remplaçant les diaphragmes de champ et d'ouverture par les lucarnes et les pupilles d'entrée *ou* de sortie.

Recherche expérimentale des lucarnes et pupilles dans un cas simple : On détermine les lucarnes et pupilles de l'instrument étudié plus précédemment.

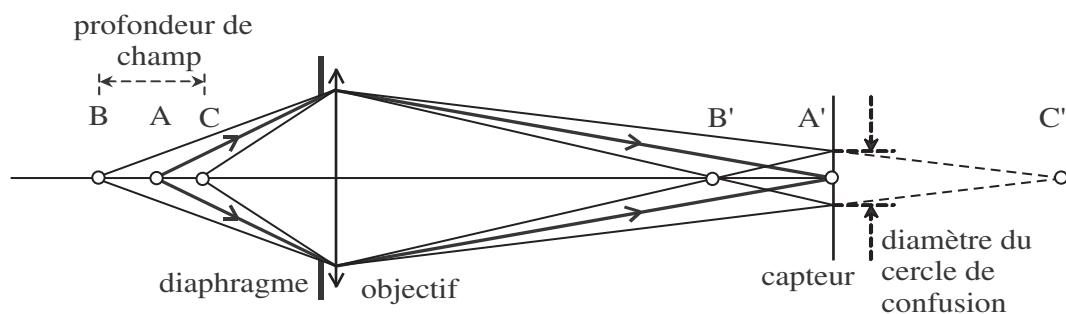
- Lucarne d'entrée : ôter le diaphragme de champ D_2 et le remplacer par son conjugué D'_2 dans l'espace objet. D_2 étant dans le plan de l'image intermédiaire, D'_2 se trouve contre l'objet et sa taille est celle de D_2 multipliée par O_1A/O_1A_1 . Vérifier que remplacer D_2 par D'_2 ne modifie rien sur l'écran et que D'_2 est maintenant le diaphragme de champ.
- Lucarne de sortie : procéder de même en recherchant le conjugué D''_2 de D_2 dans l'espace image. Vérifier que celui-ci se trouve sur l'écran et qu'il a aussi un rôle identique à celui de D_2 .
- Pupille d'entrée : le diaphragme d'ouverture D_1 est contre la lentille L_1 . Il est donc confondu avec son conjugué dans l'espace objet et c'est aussi la pupille d'entrée.
- Pupille de sortie : chercher l'image de D_1 à travers L_2 . Pour cela, mettre un petit objet dans le plan de D_1 et déplacer un écran E' dans l'espace image de façon à avoir une image nette de cet objet. Vérifier en déplaçant l'écran E' autour de cette position que la section du faisceau lumineux passe par un minimum au niveau de la pupille de sortie (cet effet est d'autant plus marqué que le diaphragme de champ D_2 est ouvert). Dans un instrument d'optique réel, par exemple un microscope, on place son œil au niveau de la pupille de sortie, car c'est là qu'il capte le plus de lumière. Pour cette raison, la pupille de sortie est aussi appelée *cercle oculaire*.

3) Influence de l'ouverture sur la profondeur de champ

Définition de la profondeur de champ : C'est la distance qui sépare deux points extrêmes de l'axe optique dont les images sont vues avec une « netteté suffisante » sur le capteur. C'est donc une notion assez qualitative.

En pratique, en photographie, on considère que la limite de netteté est atteinte lorsque l'image d'un point sur le capteur est une tache, appelée cercle de confusion, dont le diamètre est de l'ordre du 1/1000 de la taille de l'ensemble de l'image. Ce choix est un peu arbitraire, il est justifié par les faits suivants : la limite de résolution de l'œil est de quelques minutes d'angle ($\sim 0,001$ rad) et on est sensé observer les photos, après agrandissement, à une distance de l'ordre de la taille de la photo.

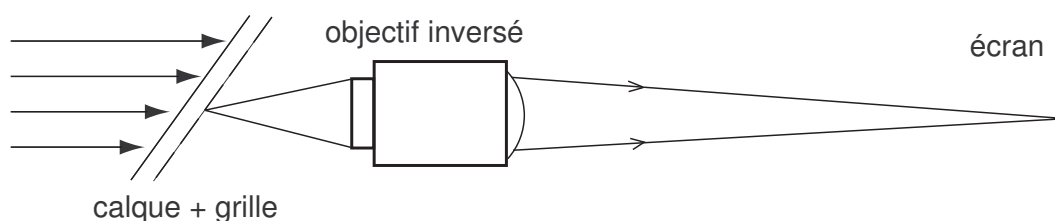
Influence de l'ouverture : On se limite au cas usuel où les aberrations de l'objectif et la diffraction jouent un rôle négligeable et où l'objectif peut être considéré comme une lentille simple accolée à un diaphragme. La profondeur de champ résulte alors d'un simple effet géométrique qui est illustré sur le schéma suivant :



La mise au point étant faite sur A, son image A' sur le capteur est ponctuelle. L'image sur le capteur d'un point de l'axe différent de A est une tache et les points pour lesquels cette

tache a un diamètre inférieur à celui du cercle de confusion sont les points du segment BC. La profondeur de champ est la distance BC. Il est facile de se rendre compte à l'aide du schéma qu'elle est d'autant plus grande que le diaphragme est petit. Cependant, contrairement à ce qu'on trouve dans certains ouvrages, il n'y a pas proportionnalité entre profondeur de champ et nombre d'ouverture N dans les conditions usuelles de la photographie (on rappelle que $N = f/d$ où f est la focale de l'objectif et d le diamètre de son diaphragme).

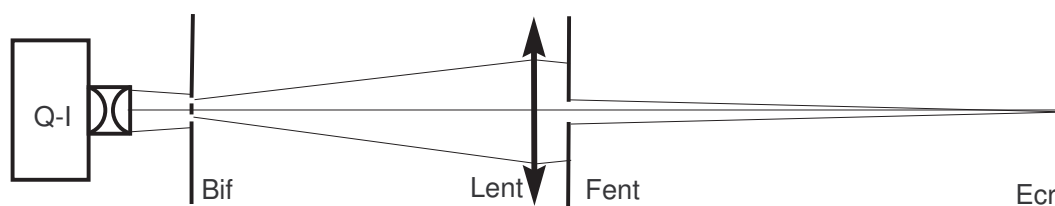
On propose ici une expérience qualitative montrant que la profondeur de champ augmente avec le nombre d'ouverture ¹. Réaliser le montage décrit ci-dessous. Attention, certains objectifs ont un picot, sur lequel il faut appuyer pour pouvoir jouer sur l'ouverture.



L'objet est une grille contrastée de pas environ 1 mm accolée à un calque. L'incliner fortement autour d'un axe parallèle aux traits et former l'image nette de son centre sur l'écran éloigné. Pour minimiser les aberrations, utiliser l'objectif dans le sens inverse du sens usuel car contrairement au cas de la photographie, l'objet est ici plus proche de l'objectif que l'image. Comme dans le paragraphe précédent, l'usage du calque est obligatoire car chaque point de la grille doit éclairer tout l'objectif pour que l'effet du diaphragme soit celui qui est attendu. Vérifier que le nombre de traits vus nets sur l'écran est une fonction croissante du nombre d'ouverture.

4) Influence de la diffraction sur le pouvoir séparateur

Elle va intervenir d'autant plus que l'ouverture du système optique sera plus étroite. Dans les instruments d'optique usuels, elle se manifeste assez peu. Pour la rendre visible, on va ici diaphragmer énormément une lentille.



Mise en évidence et mesure : L'objet est une bifente d'Young (Bif sur le schéma), et une fente réglable étalonnée (Fent).

¹Cette expérience illustre la profondeur de champ en microscopie : l'objet est petit et proche, l'image se forme à grande distance. C'est pour une raison technique que l'on remplace le microscope par un téléobjectif : les objectifs de microscope n'ont pas de diaphragme.

Projeter la bifente sur l'écran (Ecr) à grande distance. Faire converger le faisceau lumineux au voisinage de la lentille (Lent). Placer la fente juste après la lentille. Observer les variations d'aspect de l'image sur l'écran et mesurer la largeur minimale de la fente à partir de laquelle les images sont vues séparées sur l'écran.

Pour rendre l'expérience plus visible, on peut incliner fortement l'écran, ce qui est sans inconvénient car la profondeur de champ est très grande (la fente diaphragme beaucoup). Faire une mesure quantitative (critère de Rayleigh) en ajoutant un filtre orange ordinaire (FiltOrO ayant $\lambda \simeq 600$ nm).

Note 1 : Cette expérience peut être analysée quantitativement avec une barrette CCD ou une Webcam. Ajouter un filtre anti-thermique.

Note 2 : Une expérience analogue peut être réalisée en remplaçant la bifente par une raie spectrale double traversant un élément dispersif : prisme à vision directe (doublet du sodium) ou réseau (doublet du mercure); cf. poly Spectroscopie.

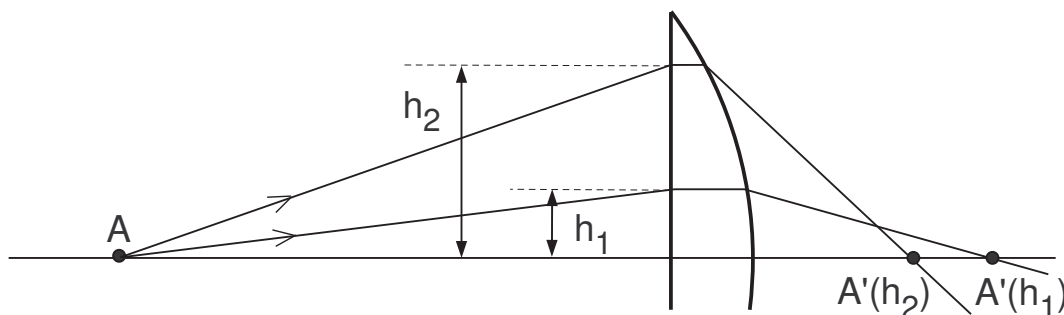
5) Aberrations des lentilles sphériques

Il existe deux catégories d'aberrations dans le comportement des lentilles sphériques :

- les aberrations géométriques qui résultent des écarts à l'optique de Gauss. On n'évoquera ici que l'aberration sphérique qui est la plus simple à interpréter ;
- l'aberration chromatique qui provient de la variation de l'indice des verres avec la longueur d'onde (dispersion).

L'aberration sphérique : Hors des conditions de Gauss, une lentille sphérique n'est pas stigmatique. Dans le cas d'un point sur l'axe, ce défaut résulte uniquement de l'aberration sphérique alors que pour un point hors de l'axe, d'autres aberrations interviennent également.

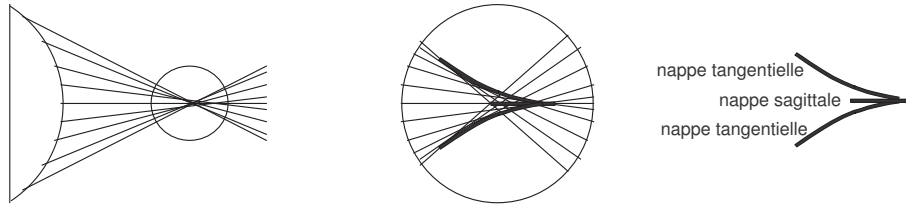
On peut comprendre l'aberration sphérique à l'aide de la figure ci-dessous.



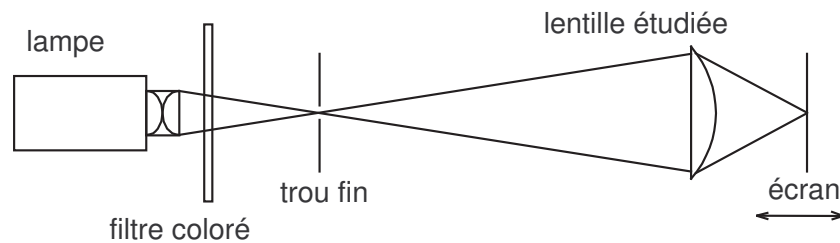
Caustiques : Un rayon issu de A qui atteint la lentille à une distance h de l'axe optique, rencontre cet axe en un point $A'(h)$. Plus h est grand, plus $A'(h)$ est situé près de la lentille : il n'y a donc pas stigmatisme.

La figure ci-dessus possède la symétrie de révolution autour de l'axe optique : tous les rayons incidents situés à la distance h_1 de l'axe optique passent par le point $A'(h_1)$ qui est donc très lumineux et l'ensemble de ces points correspondants aux diverses valeurs de h forme la *nappe sagittale*. Cette nappe est un segment de droite dont l'extrémité la plus éloignée de la lentille est l'image de Gauss du point A.

À l'aide de la figure suivante, on comprend que les points de la surface latérale sont aussi des points d'accumulation de lumière. Cette deuxième nappe qui est l'enveloppe des rayons émergents est appelée *nappe tangentielle*.



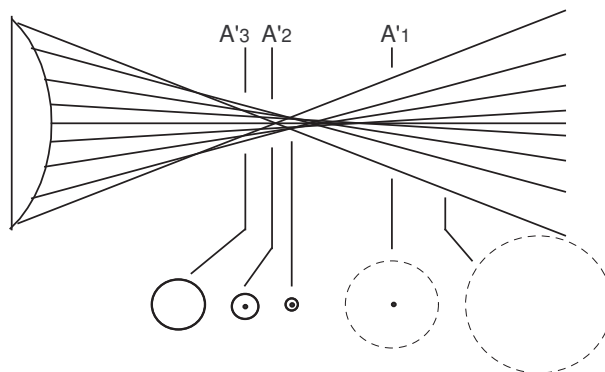
Pour n'étudier que l'aberration sphérique, on propose de réaliser l'expérience en prenant un objet ponctuel situé sur l'axe et une lentille L plan-convexe *non corrigée des aberrations* ("lentille simple") de courte distance focale et grand diamètre (nombre d'ouverture ≤ 3). Réaliser le montage décrit suivant :



Le trou doit être très petit (≈ 1 mm). Pour faire apparaître au maximum l'aberration sphérique, la lentille doit être éclairée sur toute sa surface et son sens d'utilisation doit être choisi de façon à violer la « règle des 4 P ».

Le filtre coloré sert à éliminer l'aberration chromatique. En déplaçant l'écran, faire apparaître les nappes sagittale et tangentielle.

Les phénomènes observés peuvent être interprétés à l'aide de la figure suivante : en A_3 , on observe une tache lumineuse circulaire dont le bord est très lumineux (coupe de la nappe tangentielle). De A'_3 à A'_2 , la seule modification observée est une diminution du rayon de la tache lumineuse. En A'_2 , il apparaît en plus un point lumineux au centre de la tache (coupe de la nappe sagittale). Après A'_1 , on n'observe plus ni la nappe sagittale, ni la nappe tangentielle. Par contre, on observe une tache peu lumineuse dont le diamètre s'accroît rapidement lorsqu'on s'éloigne de A'_1 .



Rechercher la position de l'écran pour laquelle l'image obtenue a la plus petite taille (cercle de moindre diffusion).

Placer un diaphragme réglable contre la lentille et vérifier que l'aberration sphérique (notamment la taille du cercle de moindre diffusion) décroît très rapidement lorsqu'on diminue la taille du diaphragme.

En absence de diaphragme, retourner la lentille et vérifier que les aberrations sont moins grandes lorsque l'on respecte la règle des 4 P.

L'aberration chromatique : Pour la mettre en évidence, utiliser une *lentille simple non corrigée* (voir la remarque en fin de ce paragraphe) de distance focale environ 20 cm. Former l'image d'une fine grille *diffusante*² éclairée par une lampe quartz-halogène. Faire la mise au point sur un petit écran mobile situé à plus d'un mètre de la lentille. Éventuellement diaphragmer légèrement la lentille pour minimiser les aberrations géométriques tout en gardant une faible profondeur de champ.

Placer un filtre interférentiel rouge près de la grille et repérer avec soin la position de l'image la plus nette. Procéder de la même façon avec un filtre bleu.

On propose ici une exploitation quantitative : soit p la distance constante trou-lentille et p' la distance lentille-écran. À partir de la relation de conjugaison :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

et de la formule :

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

où n est l'indice du verre et R_1 et R_2 sont les rayons de courbure algébriques des deux faces de la lentille, on montre qu'une petite variation Δn de l'indice entraîne en première approximation une variation de la distance lentille-image qui vaut :

$$\Delta p' \approx -\frac{p'^2}{f} \frac{\Delta n}{n - 1}$$

On voit sur cette formule qu'une valeur élevée de p' facilite l'observation du phénomène. En déduire une valeur approchée du pouvoir dispersif du verre de la lentille dont on rappelle qu'il est défini par :

$$K = \frac{(n_F - n_C)}{(n_D - 1)}$$

où n_C , n_D et n_F sont les indices pour les radiations C ($\lambda = 656$ nm), D ($\lambda = 589$ nm) et F ($\lambda = 486$ nm). Les valeurs usuelles de K sont $K \approx 1/60$ pour les verres peu dispersifs (crowns) et $1/50 < K < 1/30$ pour les verres très dispersifs (flints).

²Les auteurs du Sextant proposent de faire l'expérience avec un très petit trou. En effet, si on éclaire toute la lentille, on observe des aberrations géométriques. Pour s'en affranchir, on est tenté d'éclairer localement le centre, mais alors, la profondeur de champ devient trop grande. Ce choix d'éclairement par un trou n'est donc pas optimal. Le diffuseur permet lui d'éviter ces problèmes.

Remarque : On corrige l'aberration chromatique en accolant deux lentilles (d'où le nom de *doublet achromatique*), l'une très convergente mais peu dispersive et l'autre peu divergente mais très dispersive. On corrige, par la même occasion, l'aberration sphérique et la coma. **Les lentilles usuelles de la collection sont des doublets achromatiques.** Pourquoi les lentilles en quartz ne sont-elles pas corrigées de l'aberration chromatique ? Quel est leur usage ?

II) LASERS

Bibliographie : Didier Dangoisse *et al.* : Les lasers.

On va illustrer certaines propriétés des lasers à l'aide soit d'un laser hélium-néon, soit d'une diode laser rouge.

Pour les expériences utilisant un laser hélium-néon, choisir un laser POLARISÉ (type Melles-Griot 05LHR121) et allumé depuis plus d'une demi-heure, afin d'avoir un laser stable en intensité³. Ne pas l'éteindre tant que vous en avez encore besoin : utiliser le cache intégré.

1) Modes du laser (He-Ne)

La cavité du laser définit des « modes » caractérisés par une structure transverse et un ordre longitudinal p . Dans un laser hélium-néon, la cavité est un Fabry-Perot sphérique, où le mode transverse fondamental est un faisceau gaussien (mode TEM₀₀).

En première approximation, $p \approx 2L/\lambda$ est le nombre de longueurs d'onde dans un aller-retour dans la cavité de longueur L . Nous ne disposons pas d'« analyseur de modes » permettant de résoudre les modes longitudinaux, séparés de $\Delta\nu/\Delta p = c/2\pi L \equiv ISL$ « Intervalle Spectral Libre »⁴.

a) Faisceau gaussien

Il s'agit de montrer que l'intensité du faisceau laser, dans un plan orthogonal à la direction de propagation, est fonction gaussienne de la distance à l'axe :

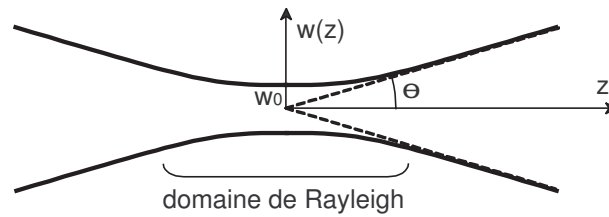
$$I(r) = I_0 e^{-2r^2/w(z)^2} \quad \text{avec} \quad w(z) = \sqrt{w_0^2 + \Theta^2(z - z_0)^2}$$

Le rayon $w(z)$ correspond à un niveau $1/e^2$ en intensité (soit $1/e$ en champ électrique) et w_0 , valeur minimale de w , est le « waist » ou « rayon focal » du faisceau. La relation qui lie l'angle de divergence Θ à w_0 s'écrit $\Theta = \lambda/(\pi w_0)$. La figure suivante présente (dans le cas $z_0 = 0$) une coupe longitudinale du faisceau laser (la courbe correspond aux points en $1/e^2$ en intensité). On voit que pour mesurer la divergence Θ du faisceau laser il faut se placer suffisamment loin du waist, sensiblement au delà du domaine de Rayleigh dont la demi-largeur vaut d'après la formule $w(z)$ ci-dessus :

$$z_R = \frac{w_0}{\Theta} \approx \frac{0,5 \text{ mm}}{1 \text{ mrad}} \approx 0,5 \text{ m}$$

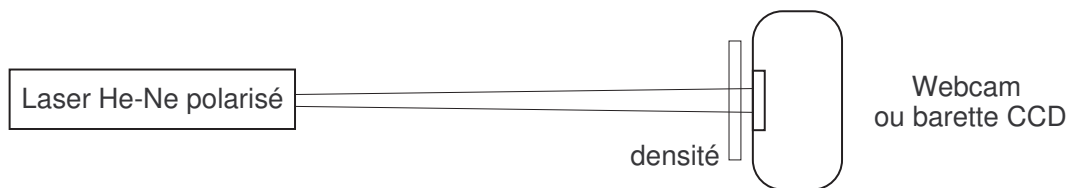
³Un laser non-polarisé émet un mélange de deux polarisations perpendiculaires dont le poids relatif dérive au cours du temps. Cf. Sextant p. 213

⁴Le Fabry-Perot confocal utilisé par l'expérience « Spectroscopie laser du rubidium » (cf poly Spectroscopie) remplit cette fonction pour la diode à 780 nm.



b) Montage expérimental

Cette étude sera faite avec IGOR en utilisant le montage suivant :



La densité ($D \approx 4$) est indispensable pour ne pas saturer le détecteur. On peut ajouter un polariseur pour régler finement l'intensité mais il risque d'introduire des interférences parasites à cause des réflexions sur les interfaces.

- Si on utilise la barrette CCD Hamamatsu, récupérer le signal vidéo sur l'oscilloscope HP54600, et faire la conversion secondes \Leftrightarrow mètres en utilisant la base de temps et la taille des pixels.
- Si on utilise la Webcam, ôter son objectif, faire une capture d'image avec une résolution appropriée, et convertir les pixels en mètres avec le paramètre correspondant. Cette méthode, plus démonstrative, passe par l'utilisation de la fonction « **Image Line Profiles** » disponible dans le menu *Image*, chargé automatiquement lorsqu'on appelle la fonction **capture d'image**. Dans les deux cas, un ajustement du profil avec une gaussienne donne accès à $w(z)$ au point de mesure (attention à la définition choisie par IGOR, sa largeur caractéristique correspond à une intensité divisée par e au lieu de e^2 ! ⁵⁾)

Pour l'utilisation de la Webcam voir l'annexe en fin de poly.

Étude quantitative :

- Faire une première mesure de $w(z)$ au plus près de la sortie du laser ; on a $w(z) \simeq w_0$.
- Mesurer ensuite $w(z)$ en deux points hors du domaine de Rayleigh donc à plus de 1 m de la sortie du laser.
- En déduire la divergence θ du faisceau et vérifier qu'elle est compatible avec la relation donnée ci-dessus.
- Comparer aux valeurs fournies par le constructeur du laser, qui donne le diamètre $D = 2w_0$ et la divergence $\alpha = 2\theta$.

2) Cohérence temporelle (He-Ne)

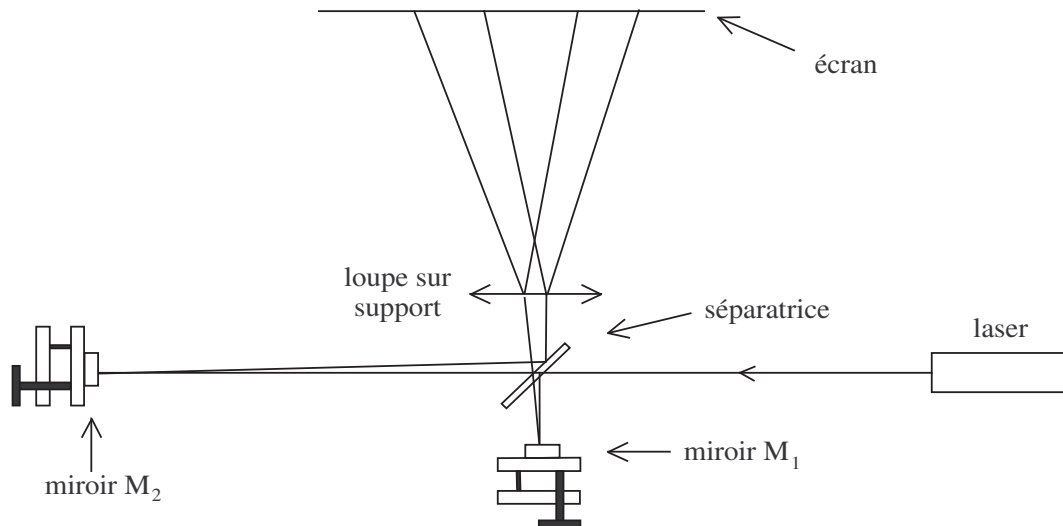
On veut montrer la grande longueur de cohérence temporelle d'un laser. On fabrique pour cela un Michelson qui permet d'obtenir de grandes différences de marche. Utiliser des supports

⁵⁾Si on choisit une intensité divisée par e on ne trouve pas le bon angle de divergence.

de miroirs très courts pour minimiser l'influence des vibrations :

- soit le « Michelson de poche »,
- soit les éléments de la boîte « caractérisation d'un piézo-électrique ».

a) Montage



- Placer le miroir M_1 près de la séparatrice et régler son orientation pour qu'une partie du spot revienne juste au dessus de la sortie du laser (ne pas le faire revenir directement dans le laser, car le couplage entre les faisceaux "aller" et "retour" dans le tube peut induire des franges parasites, des instabilités.).
- Placer le miroir M_2 de façon à introduire une différence de marche de l'ordre de 1 m. Pour le réglage de l'orientation, procéder comme pour M_1 .

On peut détecter les interférences de deux façons :

- **Méthode visuelle** : Placer la loupe à la sortie de la séparatrice. Observer sur l'écran les deux faisceaux étalés et retoucher l'orientation d'un des miroirs pour que ces deux faisceaux aient une région commune. Si vous n'observez pas de franges, cela peut être dû à une antioïncidence entre les différents modes longitudinaux du laser, déplacer M_1 d'environ 10 cm et reprendre le réglage.
- **Avec une photodiode** : Pour cette méthode, il faut utiliser les éléments « caractérisation d'un piézo-électrique », en élargissant le faisceau à l'aide du télescope afocal placé avant le Michelson. Après le même réglage que ci-dessus, placer une photodiode autonome sur le faisceau de sortie et balayer lentement le piézo à l'aide d'un rampe de tension générée par un GBF et l'ampli HT. Optimiser ensuite le contraste des "franges".

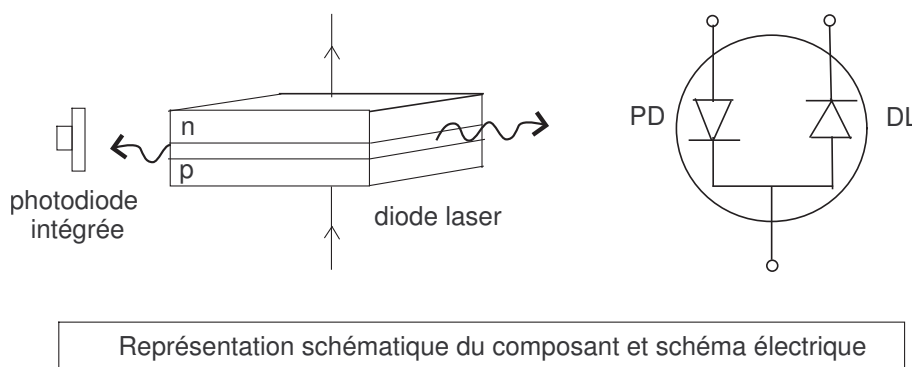
Le fait d'observer des franges (avec une visibilité acceptable) prouve que la longueur de cohérence L_c n'est pas plus petite que la différence de marche des deux faisceaux. Il est tentant de vouloir mesurer L_c mais dans la pratique, cette longueur vaut des centaines de mètres⁶.

⁶Le laser utilisé ici est multimodes, il est donc caractérisé par plusieurs longueurs de cohérence : (i) celle qui correspond au battement entre raies : $L_c \simeq$ distance entre les miroirs du laser, (ii) celle qui correspond à la largeur d'une raie : $L_c \simeq 100$ m.

3) Mise œuvre de la diode Diode-Laser

Les informations données ici sont extraites d'une notice d'emploi qu'il est conseillée de consulter.

La diode-laser **Hitachi HL6312G**, monomode, émet en continu dans le rouge, à 635 nm environ, une puissance nominale de 5 mW. Le matériau utilisé est AlGaInP dans une structure à puits quantiques multiples. Une photodiode est intégrée au boîtier, afin de mesurer la puissance lumineuse émise par la diode-laser (voir figure ci-dessous). La température de la diode et le courant d'alimentation (qui influent "fortement" sur la longueur d'onde d'émission) sont réglés par deux boîtiers indépendants.



a) Installation

- À l'aide des deux cordons à prises sub-D, relier le montage à diode-laser aux boîtiers d'alimentation et de régulation de température.
- Brancher les boîtiers sur le secteur, et les mettre sous tension (boutons POWER rouge).

b) Régulation de la température

La température est régulée à l'aide d'un module à effet Peltier, une thermistance étant utilisée comme sonde de température.

- Placer le commutateur d'affichage du boîtier de régulation sur la lecture de la thermistance (position « $100\ \mu\text{A} - k\Omega$ »). La valeur affichée est la résistance *actuelle* de la thermistance, en $k\Omega$.
- En maintenant enfoncé le bouton DISPLAY SET, tourner le potentiomètre multitours jusqu'à atteindre la valeur de la résistance de consigne; la courbe d'étalonnage de la thermistance est dans la notice. La valeur typique est $R_T = 10\ k\Omega$, ($T \approx 25^\circ\text{C}$).
- Activer la régulation de température à l'aide du bouton ON situé immédiatement à gauche du potentiomètre (ne pas s'alarmer du bref 'bip' ni de la LED rouge transitoirement allumée).

Notes :

- Un changement ultérieur de la température de consigne s'effectue *sans* action sur le bouton ON : il suffit d'agir sur le bouton DISPLAY SET et le potentiomètre multitours.

- En cas d’erreur, le bouton ON doit être pressé *deux fois* pour réactiver la régulation.
- Pour l’arrêt, appuyer sur ON, puis sur POWER.

c) Alimentation de la diode

- Activer le boîtier d’alimentation de la diode-laser en tournant la clé dans le sens des aiguilles d’une montre.
- Placer le commutateur d’affichage sur la lecture du courant injecté dans la diode-laser (position « LD I – mA »).
- Mettre le courant injecté à sa valeur de consigne minimale, en menant le potentiomètre multitours en butée dans le sens trigonométrique.
- Appuyer sur le bouton ON situé immédiatement à gauche du potentiomètre.
- Régler le courant dans la diode-laser avec le potentiomètre multitours. Sa valeur est affichée, en mA.
- La lecture du courant de photodiode, en μA , s’effectue en plaçant le commutateur d’affichage sur la position « PD I (2000 μA) – μA » ; l’étalonnage typique de la photodiode est fourni dans la notice.
- On peut lire la tension aux bornes de la diode-laser en plaçant le commutateur d’affichage sur la position « Vf – VOLTS ».

Notes :

- En cas d’erreur, le bouton ON doit être pressé *deux fois* pour réactiver l’injection du courant.
- Pour l’arrêt, ramener le courant à zéro avec le potentiomètre, appuyer sur ON, puis sur POWER.
- On peut *moduler* le courant en branchant un GBF sur la prise BNC située en face arrière. La bande passante est de l’ordre de 200 kHz, et le gain de 4 mA/V. Cette modulation influe à la fois sur l’amplitude et sur la fréquence. Elle peut être utilisée pour le montage « Télécommunications »

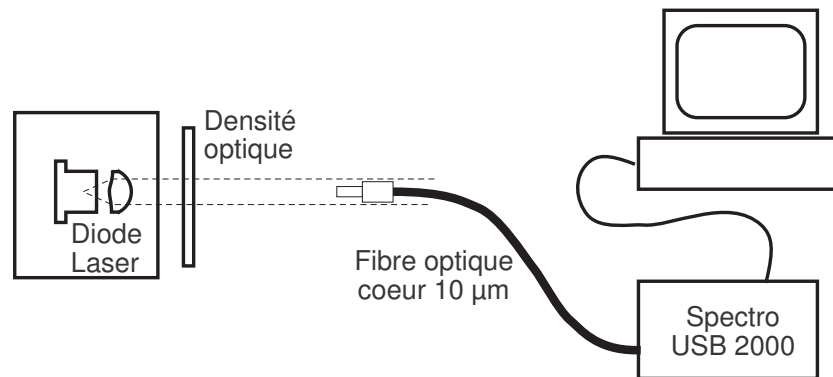
4) Gain de la Diode-Laser

L’effet laser ne peut se manifester qu’en présence de gain optique, donc dans une plage spectrale relativement étroite dépendant du milieu amplificateur. Pour un laser à gaz, cette plage est très étroite (largeur Doppler ≈ 1 GHz). Dans une diode laser elle est beaucoup plus importante, ce qui permet une certaine accordabilité via le courant. Elle dépend en outre de la température.

a) Influence du courant d’injection

Réaliser le montage décrit sur la figure, en choisissant impérativement la fibre de plus faible cœur.

Régler la lentille de collimation pour obtenir un faisceau bien parallèle. Insérer sur le faisceau une densité importante ($D = 3$ ou 4) et éclairer la fibre. Régler le courant d’injection à une valeur assez élevée (supérieure au seuil d’émission laser), et choisir un temps d’intégration



court. Optimiser l'alignement du faisceau dans la fibre. Mesurer précisément la longueur d'onde et estimer la largeur à mi-hauteur.

Diminuer fortement le courant (inférieur au seuil d'émission laser), retirer la densité, et adapter le temps d'intégration. Mesurer la nouvelle largeur à mi-hauteur.

b) Influence de la température (facultatif)

En opérant avec un courant d'injection supérieur au seuil, estimer la variation de longueur d'onde d'émission lorsque la température passe de 15°C à 40°C.

Notes :

- cet effet justifie l'emploi de la régulation de température ;
- le sens de variation dépend du type de diode-laser, il y a compétition entre des effets contradictoires.

III) ANNEXE sur la mise en œuvre d'une Webcam

Caractéristiques des Webcam :

- taille d'un pixel : 5,60 μm ;
- 640 x 480 pixels soit 3,58 x 2,69 mm ;
- objectif $f \approx 5 \text{ mm}$;
- champ $\approx 40^\circ \times 30^\circ$.

Choix du logiciel :

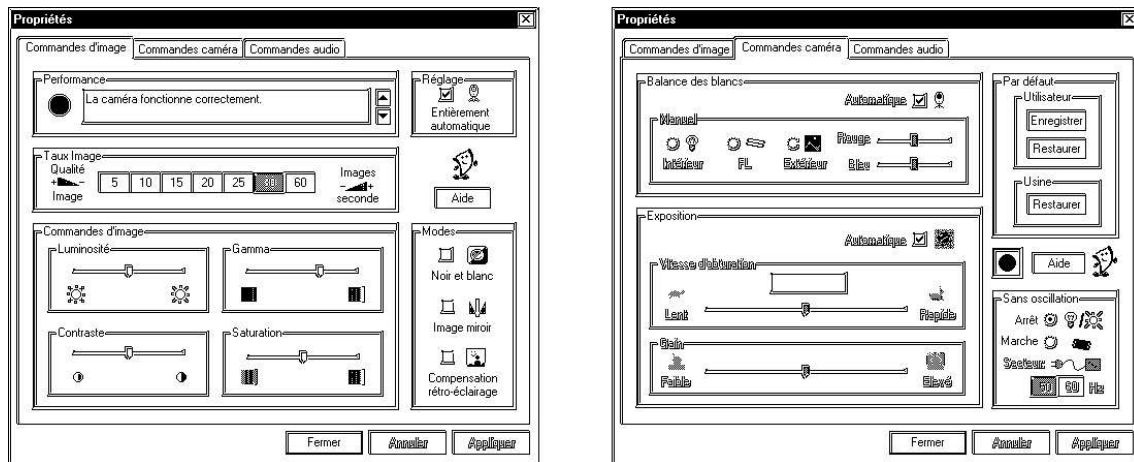
- Pour une utilisation VIDÉO (étude d'une chute en mécanique exploitée avec Synchronie, visualisation directe d'une expérience sur écran, ...), le logiciel Philips VRecord est le plus simple d'emploi ;
- Pour enregistrer une IMAGE FIXE (exploitable dans IGOR) utiliser le logiciel AMCap : Still Capture, déclencher par Snap (voir l'aide en ligne).

Mise en œuvre : Relier la Webcam à l'ordinateur par sa connexion USB. Ouvrir le logiciel. Les noms donnés ici correspondent au logiciel Philips VRecord.

Si nécessaire préciser dans le menu Fichier le lieu et le nom d'enregistrement de la vidéo.

Dans le menu Options-Format vidéo, choisir 640 x 480 pixels.

Dans le menu Options-Propriétés vidéo, la fenêtre Propriétés s'ouvre (voir figure) (l'onglet audio ne sert pas ici).



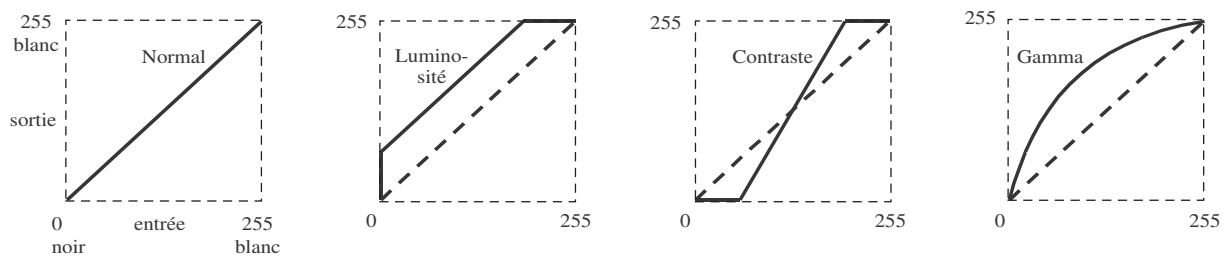
Avant chaque utilisation cliquer sur Usine-Restaure (onglet 2 : Commande caméra)

Dans ce cas la Webcam est en mode Réglage-Entièrement automatique. Ce mode est très simple d'emploi car la Webcam s'adapte automatiquement à la luminosité du sujet, mais il convient rarement à un usage scientifique.

La **mise au point** (réglage de distance) est manuelle : visser ou dévisser l'objectif.

1) Mode Réglage-Entièrement automatique (onglet 1 : Commandes d'image)

Il autorise les réglages de Luminosité, Contraste, Gamma et Saturation. La figure indique le rôle de trois de ces fonctions quand on pousse les curseurs vers la droite :



- on voit sur la 1ère courbe que le signal lumineux de chaque pixel est codé sous 8 bits : il va du noir (0) au blanc (255) ce qui fait $2^8 = 256$ valeurs (zéro inclus) ; en réalité ce codage intervient pour chacune des trois couleurs RVB. En simplifiant on peut dire que le signal d'entrée est directement issu du capteur et le signal de sortie est celui que l'on observe sur l'écran et qui est enregistré.
- la Luminosité et le Contraste sont des opérations linéaires mais qui peuvent introduire un écrêtage.
- le Gamma permet d'éclaircir ou d'assombrir l'image sans introduire d'écrêtage mais c'est une opération non linéaire donc déconseillée lorsqu'il s'agit d'étudier quantitativement la répartition spatiale d'intensité.

- enfin la Saturation (sous-entendu "des couleurs") rend les couleurs plus vives, elle ne change ni la luminosité ni le contraste ni le gamma.

Ces fonctions agissent en tant que post-opérations, elles n'améliorent pas le fichier si la Webcam est mal réglée : par exemple si l'image contient une zone claire saturée, pousser le curseur Luminosité vers la gauche ne fera pas disparaître la saturation. Il est conseillé de ne les utiliser qu'en mode Réglage-Entièrement automatique, et de les laisser dans leur réglage par défaut autrement.

Sur l'onglet 1 on voit aussi :

- **Noir et blanc** : donne un fichier RVB totalement désaturé en couleurs, obtenu par combinaison des informations des 3 couleurs RVB. Son usage est déconseillé pour les études quantitatives car il est difficile de repérer la présence d'un écrêtage sur une des couleurs.
- **Image miroir** : symétrie gauche-droite.
- **Compensation rétro-éclairage** : réduit les effets de contre-jour.

Enfin sur l'onglet 2 on voit :

- **Sans oscillation** : en présence d'une lampe fluorescente ou d'une lampe spectrale dont le flux varie fortement à 100 Hz, on constate que parfois l'image a une intensité qui varie aléatoirement dans le temps, cocher cette fonction élimine cet effet (la vitesse d'exposition se synchronise sur le secteur).

2) Passage au mode Réglage manuel

Initialiser avec **Usine-Restaure** afin d'avoir une relation entrée sortie linéaire⁷.

Dans l'onglet 1 décocher Réglage-Entièrement automatique.

Réglage Balance des blancs : En réglage automatique le logiciel ajuste les couleurs de façon à ce que, en moyenne, la couleur d'ensemble de l'image se rapproche du gris. C'est efficace pour les photos usuelles (hormis les couchers de soleil) mais inadapté aux photos monochromes telles que les raies du sodium ou un faisceau laser. Choisir le mode **manuel-Extérieur** qui est le mode prédéfini qui modifie le moins les couleurs objectives ("extérieur" veut dire "lumière du jour").

Réglage Exposition : On peut choisir la **vitesse d'obturation**⁸ de 1/25 sec à 1/10000 sec et le **gain**. Plus le gain est élevé, plus le signal est bruité mais les gains faibles produisent un écrêtage des zones sombres de l'image. Il est donc préférable de maintenir un **gain relativement élevé** (voir plus loin pour la mise en œuvre).

⁷En mode de réglage non automatique les fonctions suivantes ne sont plus accessibles : contraste ; compensation de rétro éclairage ; sans oscillation.

⁸Il s'agit plus précisément d'un temps d'exposition, il influence la luminosité, pas le nombre d'images par seconde.

3) Réglage de la fréquence d'images (images par seconde)

Ce paramètre sert lors de l'observation et de l'enregistrement vidéo. Son réglage n'est pas très simple car on peut agir à plusieurs niveaux qui ont des priorités différentes. En pratique en laissant dans le menu Options-Propriétés Video (onglet 1), le mode Réglage entièrement automatique on aura une fréquence imposée par la luminosité du sujet, convenant à la plupart des cas. Mais parfois (phénomène très rapide ou lent, perte d'images, etc.) il est nécessaire d'imposer le réglage.

Dans Philips VRecord

- Dans le menu Capture, décocher "Utiliser la fréquence image".
- Dans le menu Options-Format Video choisir 640x480 et choisir la fréquence d'images (se limiter à des multiples de 5).
- Dans le menu Options-Propriétés Video (onglet 1), décocher "Réglage entièrement automatique" et choisir la même fréquence d'images.

Dans AMCap

- Dans le menu Options-Video Capture Pin choisir la fréquence d'images.
- Dans le menu Options-Video Capture Filter, décocher "Réglage entièrement automatique" et choisir la même fréquence d'images.

4) Réglages audio

Lors de l'enregistrement d'un fichier vidéo, vérifier que dans le menu Capture la capture audio est désélectionnée, sinon cela peut provoquer des bugs dans IGOR.

5) Exemple de mise en œuvre

En mécanique (chute libre, etc...)

- dans le menu Options-Propriétés vidéo passer en réglage-**Exposition** de façon à pouvoir ajuster la **durée d'obturation** sur une valeur suffisamment courte pour que l'image de l'objet en mouvement ne soit pas trop floue, compenser en augmentant le gain.
- régler le nombre d'images par seconde. S'il y a des images perdues, fermer les logiciels inutilisés puis réduire ce nombre (on peut aussi tenter de réduire le format : 320x240.)
- les fonctions de déclenchement vidéo se trouvent dans le menu Capture.
- l'exploitation peut se faire dans Synchronie (conseillé) ou Igor.

En optique (observation des raies spectrales, etc...)

- Mettre la Webcam près de l'écran blanc mat (à 20 cm environ), légèrement en oblique vers le haut pour qu'elle n'arrête pas le faisceau et faire la mise au point sur du papier millimétré en Réglage-Entièrement automatique. Les couleurs des raies sont faussées et, surtout si elles n'occupent qu'une faible partie du champ, le réglage automatique provoque un fort écrêtage.
- Passer en **mode manuel**.
- Régler la balance des blancs sur **Extérieur**.

- Régler la vitesse sur 1/10000 sec et **réglér le gain de façon à rendre légèrement lumineuses les zones les plus sombres** (sinon il y aura un écrêtage dans ces zones, tant pis pour le bruit !) Ajuster alors la vitesse pour avoir un signal convenable. Si à cause de lumière parasite les zones sombres s'éclaircissent excessivement, réduire un peu le gain puis jouer sur la vitesse, etc.
- Dans le cas où on veut faire une étude **quantitative de la fonction** (par exemple en utilisant **Line-Profile** dans Igor) il faut être sûr de ne pas écrêter : partir d'une saturation visible et diminuer la durée d'exposition jusqu'à ce que visiblement les zones les plus claires s'assombrissent.
- Dans certains cas on enverra directement le faisceau sur le capteur de la Webcam après avoir dévissé l'objectif. Il faudra en général interposer un filtre gris contre la caméra. Exemple d'expérience : étude du faisceau gaussien issu d'un laser He-Ne, il faut typiquement une densité 4 (si par erreur le faisceau laser arrive directement sur le capteur, pas de panique, cela ne le détruit pas, il y a juste une saturation réversible qui envahit toute l'image).
- Enfin dans le cas où la source est une lampe à incandescence (diffraction par une fente, interférences, etc.), il faut ajouter un **FILTRE ANTI-THERMIQUE** car le capteur de la Webcam est plus sensible à l'infrarouge qu'au visible et donc en absence de filtre la caméra enregistrerait un signal très différent de ce que vous observez.