

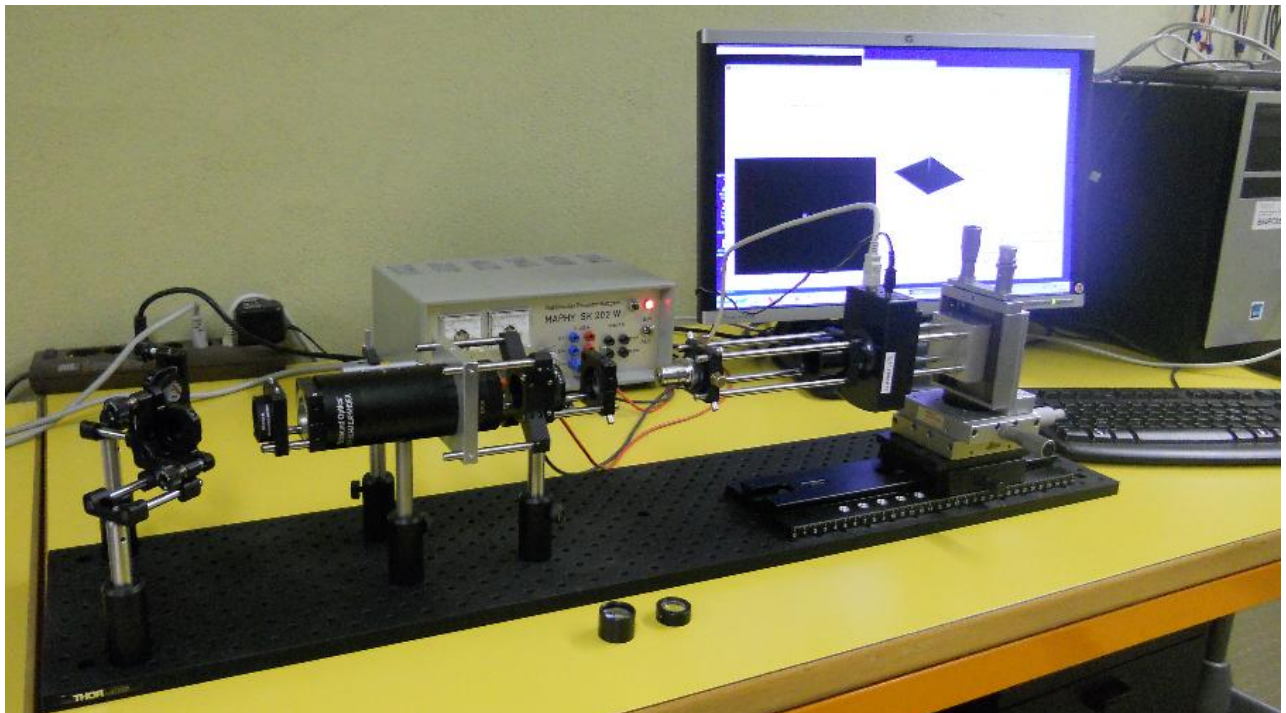
TRAVAIL PRATIQUE

Mesure de la fonction de transfert de modulation d'un système optique

1 But de l'expérience

L'objectif de ce travail pratique est de

1. reprendre les notions de PSF et MTF,
2. effectuer à l'aide d'un montage ad hoc des mesures de qualité optique de quelques lentilles et objectifs et comprendre les divers aspects qui en influencent le résultat.



2 Matériel et instrumentation

Un petit banc de mesure sur lequel on pourra monter quelques types de lentilles et objectifs, ce banc est composé de:

- Un laser à diode (632 nm) avec un filtre et un beam expander 10x.
- Un diaphragme pour limiter l'ouverture.
- Un objectif de microscope 10x
- Une caméra USB
- Logiciel développé sous Matlab
- Quelques lentilles et objectifs dont on caractérise la MTF

3 Rappels de théorie

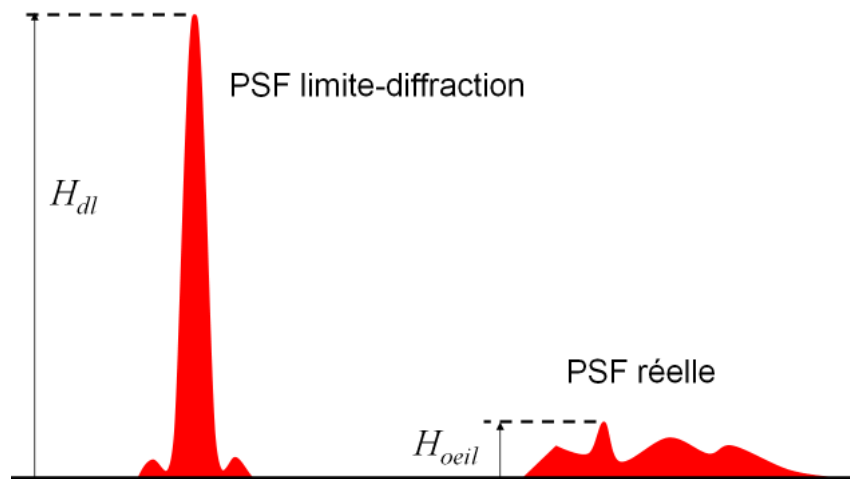
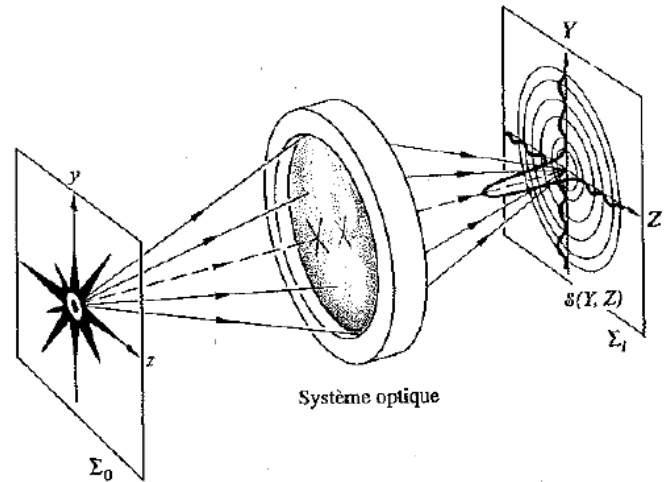
3.1 La fonction d'étalement du point (PSF)

La **fonction d'étalement du point** (*Point Spread Function* ou *PSF* en anglais) est une fonction mathématique décrivant la réponse d'un système d'imagerie à une **source ponctuelle**. La PSF est l'équivalent bidimensionnel de la réponse impulsionnelle utilisée en traitement du signal.

La PSF quantifie l'**étalement** du point lumineux dans l'image, considéré comme un défaut. Pour un système optique sans aberrations la PSF correspond au profil de diffraction de l'image – figure ci-contre.

Ainsi la PSF est aussi proportionnelle au carré de la transformée de Fourier de la fonction d'ouverture du système optique.

La nature de la PSF dépend généralement de l'appareil optique, et de fait intègre toutes les aberrations. En ce qui concerne l'observation du ciel, ce sont les perturbations atmosphériques (dont l'effet est appelé **seeing**) qui dominent sur les effets de diffraction. Ainsi en astronomie, la **largeur à mi-hauteur**¹ de la PSF d'une étoile permet de quantifier la valeur du **seeing**.



La PSF de l'œil humain (à droite) en comparaison à celle d'un système de même diamètre uniquement limité par la diffraction.

Le rapport $\frac{H_{réel}}{H_{dl}}$ est le **ratio de Strehl**.

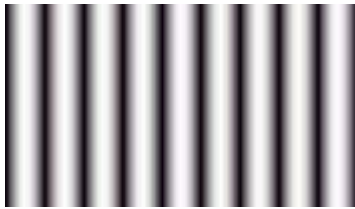
¹ En anglais *Full Width Half Maximum (FWHM)*. Pour quantifier la qualité d'un instrument astronomique, la largeur à mi-hauteur de l'image d'un objet ponctuel est rapportée sur le plan objet (le ciel à l'infini) et exprimé en angle, généralement en secondes d'arc (arcsec).

3.2 La fonction de transfert de modulation (MTF)

Pour comprendre la **fonction de transfert de modulation** (*Modulation Transfer Function*, ou *MTF* en anglais) considérons une mire périodique en luminance.



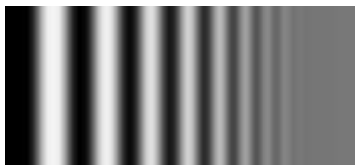
Considérons une mire dont les traits se resserreraient de plus en plus selon une loi mathématique donnée



Considérons un autre cas de mire dont les luminances varient de façon sinusoïdale entre deux valeurs extrêmes.



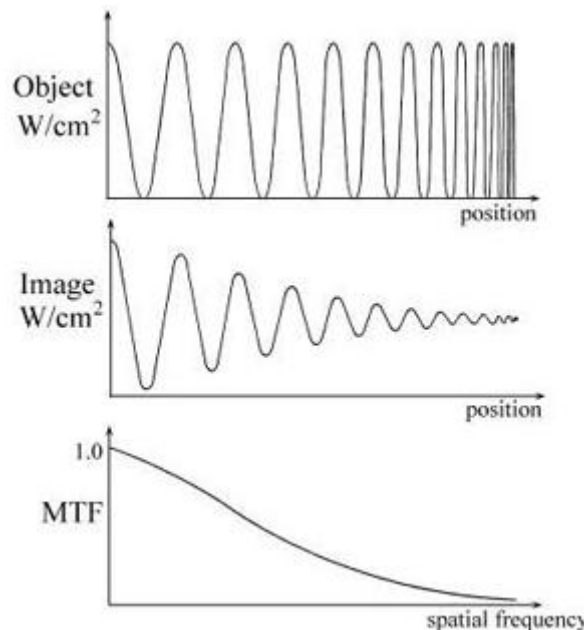
En combinant les deux, on crée un nouveau type de mire dont les traits de plus en plus serrés ne sont plus alternativement noirs et blancs, mais oscillent selon une loi sinusoïdale entre ce que nous appellerons arbitrairement le « noir pur » et le « blanc pur », en passant par toute la gamme des gris.



L'image d'une telle mire produite par un objectif à tester aura peu ou prou l'aspect montré ci-contre. Le contraste est presque inchangé pour les faibles fréquences spatiales mais il diminue au fur et à mesure que les lignes se resserrent jusqu'à donner finalement une plage presque uniforme où l'on ne peut plus distinguer aucun détail.

Les teintes n'oscillent plus entre le « noir pur » et le « blanc pur » mais entre deux gris de plus en plus proches au fur et à mesure que la fréquence spatiale augmente.

Tout ceci peut se mettre sous la forme de graphiques décrivant l'existence de l'objet et l'éclairement de l'image:



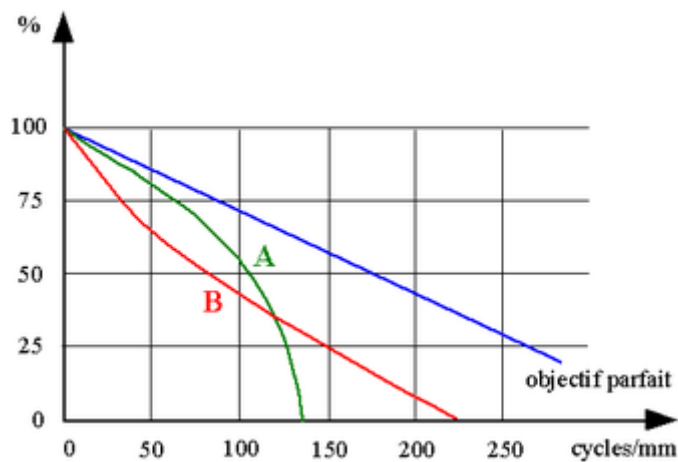
Le dernier graphique représente la **fonction de transfert de modulation**. La MTF est le rapport des amplitudes de luminosité image/objet en fonction de la fréquence spatiale.

Si on appelle A_0 l'amplitude constante des variations de densité de la mire et A l'amplitude variable des densités de l'image, le rapport A/A_0 , qui diminue progressivement lorsque les traits se resserrent, caractérise la dégradation progressive du contraste de l'image et permet d'évaluer l'aptitude éventuelle de l'objectif testé à fournir des images riches en détails visibles.

Le tracé de la courbe qui représente sa fonction de transfert de modulation renseigne bien mieux sur le comportement d'un système optique que la simple mesure du pouvoir séparateur. Ce dernier correspond au point le plus bas, celui où les informations disparaissent, mais n'indique rien de ce qui peut se passer auparavant.

Il se trouve que la MTF est l'**amplitude de la transformée de Fourier de la PSF**.

Notons qu'on définit aussi une fonction de transfert de phase (*Phase Transfer Function, PFT*), moins fréquemment utilisée, qui est la phase de la transformée de Fourier de la PSF.



La MTF est un des principaux critères utilisés pour caractériser un objectif, et en général un système optique.

Un objectif « parfait » fournit des images dont la qualité baisse graduellement en raison de la diffraction. La courbe A est celle d'un objectif capable de restituer un contraste élevé malgré un pouvoir séparateur moyen. La courbe B caractérise au contraire un objectif dont le pouvoir séparateur est très bon mais qui donnera cependant à l'usage des images beaucoup plus « molles » que le premier ...

La fréquence spatiale pour laquelle la MTF devient zéro est appelée fréquence de coupure de l'optique (ξ_{cutoff}). C'est la fréquence au-delà de laquelle aucune information n'est transmise dans l'espace image. Pour une ouverture circulaire ou carrée on a

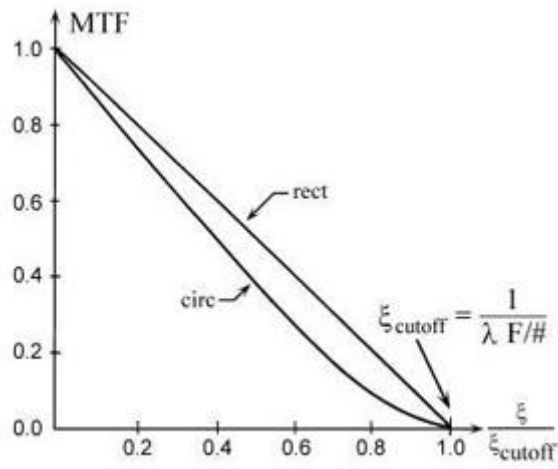
$$\xi_{cutoff} = \frac{1}{\lambda \cdot F/\#}$$

$F/\#$ est le nombre d'ouverture du système optique :

$$F/\# = \frac{f}{D}$$

Pour un système « parfait », c.à.d. limité par la diffraction la MTF ne dépend que de la focale et de l'ouverture (diaphragme) et est calculée par l'expression:

$$MTF\left(\frac{\xi}{\xi_{cutoff}}\right) = \frac{2}{\pi} \cdot \left[a \cos\left(\frac{\xi}{\xi_{cutoff}}\right) - \left(\frac{\xi}{\xi_{cutoff}}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{\xi_{cutoff}}\right)^2} \right] \quad (1)$$



Courbes universelles de la MTF pour systèmes avec ouverture circulaire ou carrée.

4 Procédure de travail

4.1 Préparation

1. Examiner le montage de mesure.
2. Comprendre le principe général: la PSF de la lentille à mesurer est re-imaginée agrandie 10 fois par l'objectif de microscope sur le CCD de la camera. Le logiciel va ensuite calculer la MTF par transformée de Fourier.
3. Comprendre la fonction de chaque élément du banc et des divers réglages.
4. Réaliser un schéma optique et un croquis avec les principales dimensions.

4.2 Mesures

- Aligner et bien centrer (par rapport à l'ouverture du diaphragme) le faisceau laser avec les deux miroirs réglables.
- Régler le diaphragme pour un diamètre connu : ex. 3 ou 4 mm. Monter chaque lentille à mesurer et positionner l'objectif de microscope de manière appropriée pour que la PSF se forme sur son plan objet. Bien aligner l'ouverture du diaphragme (éventuellement réajuster l'alignement du laser), l'axe de la lentille à mesurer avec l'objectif de microscope afin de minimiser des aberrations telles que la coma.
- Trouver avec l'objectif de manière empirique le point où la PSF est la plus petite. Régler la puissance du laser et, dans le logiciel, le gain et le temps d'exposition de la caméra pour avoir une image non-saturée de la PSF.
- Enregistrer (*capture*) l'image de la PSF. Effectuer la mesure de MTF et enregistrer les graphiques. Calculer en parallèle la MTF théorique.
- Effectuer quelques mesures en variant l'ouverture du diaphragme. Montrer et évaluer la variation de MTF.
- Effectuez ensuite la même mesure avec quelques petites variations de la position dans l'axe (+/- quelques dixièmes de mm). Le but étant d'estimer la **profondeur de focalisation**, c.à.d. l'écart autour de la distance focale à l'intérieur duquel la qualité de l'image ne varie presque pas.

4. Distribution du travail

Ce TP sera généralement réalisé en équipe de 2 ou 3 personnes. Chaque groupe est évidemment libre de s'organiser: toutefois on suggère que :

- au moins une personne se dédie déjà durant la manip aux calculs par Excel ou Matlab de support et compréhension des résultats trouvés ;
- au moins une personne vérifie que toute la procédure est entièrement et bien suivie et prene des notes, des mesures et des croquis exhaustifs durant la manip ;
- au moins une personne soigne particulièrement le montage et les mesures, prene des photos, etc..

Le rapport peut être rédigé en se partageant le travail mais il devra être revu et corrigé avant livraison par tous les membres.

Il est en tout cas primordial que **tous les membres de l'équipe maîtrisent tous les aspects**, à la fois pratiques et théoriques, de ce travail pratique.

ANNEXE

Logiciel de mesure de MTF

Le logiciel se trouve dans le répertoire *Matlab_camera_V2.5*.
Sous Matlab lancez ensuite *LUM_GUI_V2.m*

Le contrôle de la caméra s'effectue par l'intermédiaire de l'interface graphique. Les différents boutons gèrent la caméra par l'appel du fichier « LuDispatcher » d'extension dll qui adresse les fichiers m-files Matlab récupérés sur le site du fabricant Lumenera. L'interface graphique se présente sous la forme suivante :

N.B. Une grande image de l'interface est disponible en **annexe**.

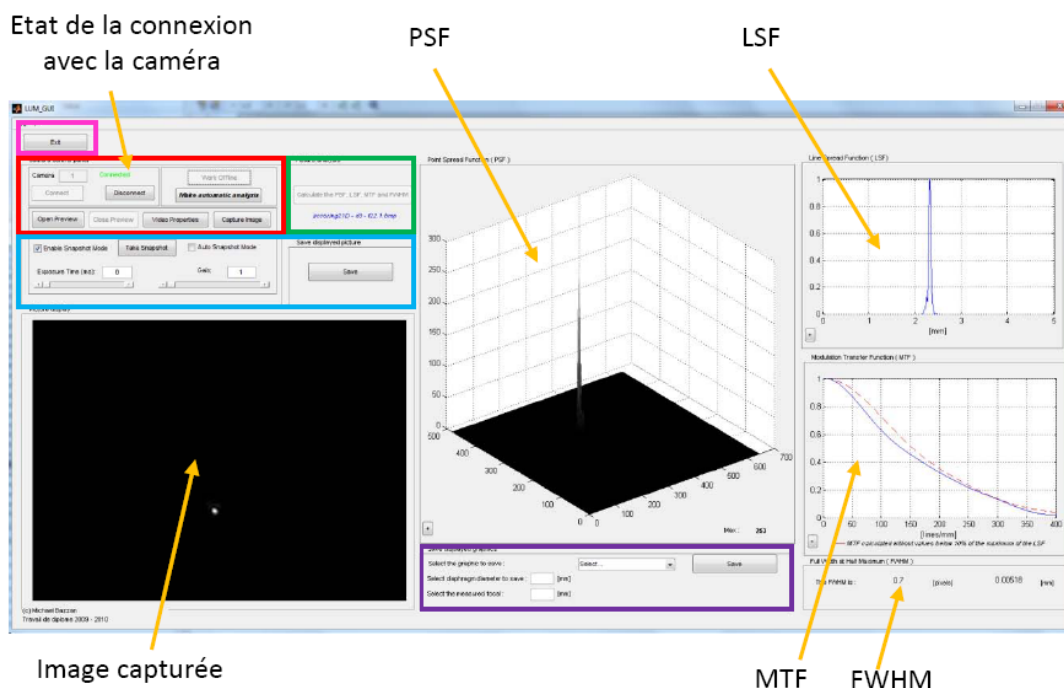


Figure 6-2 : Interface graphique Matlab

Les cadres en couleurs correspondent aux fonctions possibles, à savoir :

- **Contrôle de la caméra :**
Depuis cette zone, il est possible d'activer la caméra. Une fenêtre de vue en direct est accessible ainsi que les réglages s'y rapportant. Le bouton capture permet d'afficher l'image actuelle de la vue en direct de la caméra dans l'interface. Snapshot permet de prendre une photo et de l'afficher. Work offline autorise l'utilisateur d'ouvrir une image se trouvant sur le disque dur afin d'en afficher ses graphiques correspondants. L'analyse automatique gère automatiquement la prise de la photo (en optimisant le gain et l'exposition) ainsi que son analyse et affiche le tout.
- **Enregistrement et réglages capture :**
Ici, il est possible d'ouvrir une boîte de dialogue afin d'enregistrer l'image qui est capturée.

Le temps d'exposition ainsi que le gain peuvent être réglés, sous snapshot, afin de capturer la meilleure image possible.

Un mode automatique permet de prendre automatiquement une image étant juste à la limite de la saturation. Le gain ainsi que l'exposition γ sont réglés automatiquement.

■ Analyse de l'image :

Cette section lance les calculs de la PSF, LSF, MTF et la FWHM. Les différents graphiques sont ensuite affichés.

Le nom de l'image est affiché dans cette zone ainsi qu'un message d'alerte en cas de saturation de l'image à analyser.

■ Enregistrement des graphiques :

Il est possible, dans cette partie, d'enregistrer le graphique choisi grâce au menu déroulant.

Un mode allplot est accessible. Il crée une page contenant l'image à analyser ainsi que la PSF, la LSF et la MTF. Le diamètre d'ouverture du diaphragme ainsi que la distance focale mesurée peuvent être inscrits et ainsi ils figureront sur la page créée par le mode allplot. Voici un exemple :

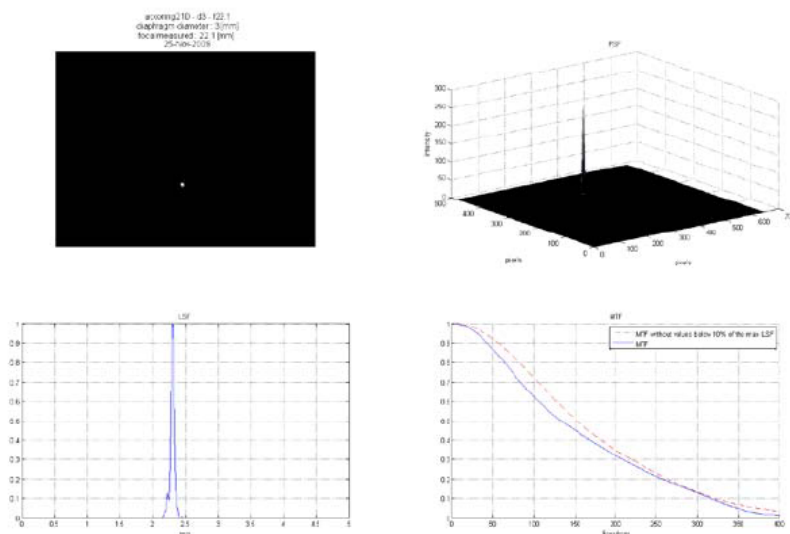


Figure 6-3 : mode allplot

Il est également visible que chaque graphique est équipé d'un bouton zoom « + » en bas à gauche. Ceci permet d'agrandir le graphique dans une nouvelle fenêtre.

■ Quitter :

Le programme se ferme et toutes les informations non sauvegardées sont perdues.