

Mesure de la Fonction de Transfert de Modulation d'un système optique

Par Transformée de Fourier de l'image d'une fente

Version 2015-2016

Préparation :

Vous devez répondre aux questions P0 à P10 avant la séance.

La Fonction de Transfert de modulation (FTM) d'un système optique est une spécification de plus en plus courante dans le monde de l'optique industrielle pour caractériser la résolution des optiques d'imagerie. La raison de cet engouement tient sans doute au fait que ces systèmes optiques sont en général associés à des capteurs matriciels (caméra vidéo, caméra infrarouge, photo numérique, etc.) pour lesquels on définit également une Fonction de Transfert de Modulation. Le produit de ces deux Fonctions de Transfert de Modulation, de l'optique et du capteur, permet d'obtenir la Fonction de Transfert de Modulation de l'ensemble du système d'imagerie.

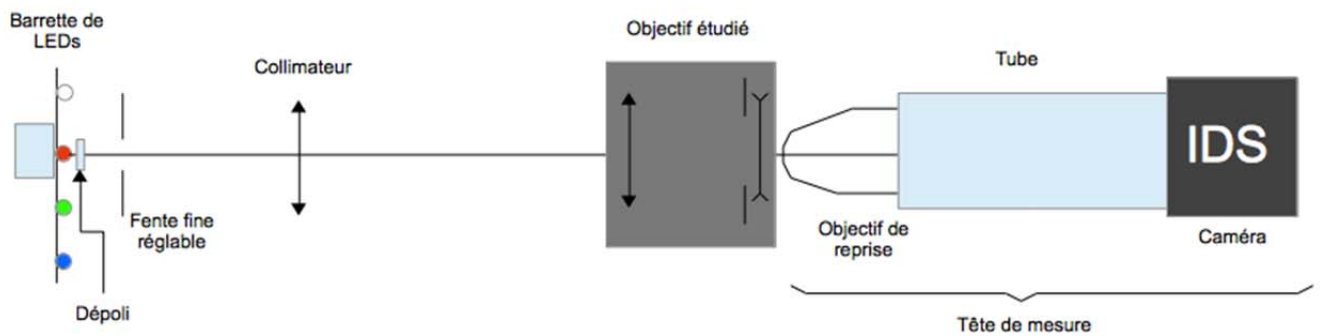
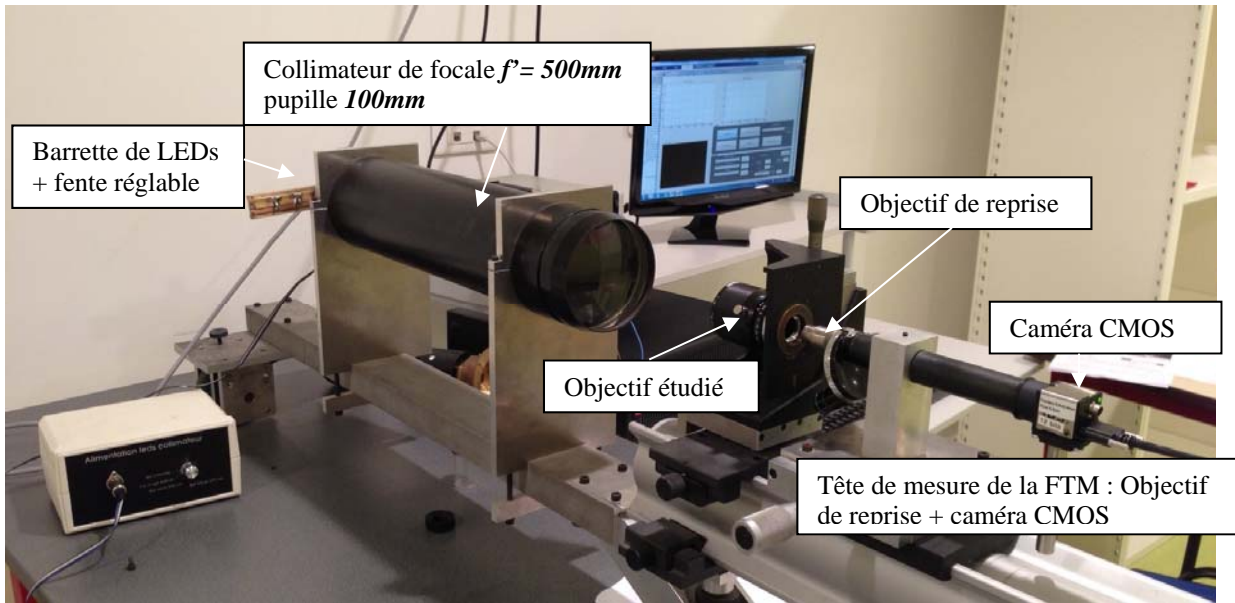
Il existe un grand nombre de techniques de mesure de la FTM. Vous avez déjà vu au cours des TP aberrations de 2^{ème} année (Zygo-Haso) des méthodes indirectes qui utilisent la mesure du front d'onde pour obtenir la réponse percussionnelle par calcul de la Transformée de Fourier de l'amplitude du champ dans la pupille, puis la FTM par une seconde Transformée de Fourier. Un des défauts de ce type de mesure est qu'il est délicat d'obtenir une FTM en éclairage polychromatique.

En fin de séance, vous comparerez vos mesures de FTM avec des mesures faites au Zygo.

Différentes mesures « directes » de FTM à partir de la répartition d'éclairement dans le plan image :

- La méthode de mesure de FTM la plus directe consiste à analyser la réponse percussionnelle (répartition d'éclairement dans la « tache image » d'un point objet) puis calculer la Transformée de Fourier de cette réponse percussionnelle. Cette méthode très simple à mettre en œuvre (si on dispose d'une source ponctuelle d'intensité suffisante) est utilisée dans le TP Speckle 3^{ème} année.
- Une première variante de cette méthode consiste à analyser toujours par Transformée de Fourier l'image d'une fente-objet très fine. On mesure ainsi FTM selon la direction perpendiculaire à la fente. C'est cette méthode que nous utiliserons ici.
- Une autre variante, très utilisée lorsque l'on ne dispose pas de capteur matriciel ou linéaire, utilise la méthode de Foucault. On analyse la chute du flux total reçu dans la « tache image » lorsqu'on coupe celle-ci par le couteau de Foucault (voir TP FTM IR 3^{ème} année).
- Le banc de mesure de FTM-ACOFAM analyse l'image d'une fente objet très fine par une mire sinusoïdale (il s'agit en quelque sorte d'une Transformée de Fourier « mécanique ») (voir TP FTM-ACOFAM de 3^{ème} année).

Description du banc de mesure :



Une fente source réglable est placée au foyer d'un collimateur dioptrique de focale **500 mm**. La fente source, de largeur réglable (250 microns par tour), est éclairée par des LEDs que l'on peut choisir pour fixer la longueur d'onde d'éclairage ou travailler en lumière blanche.

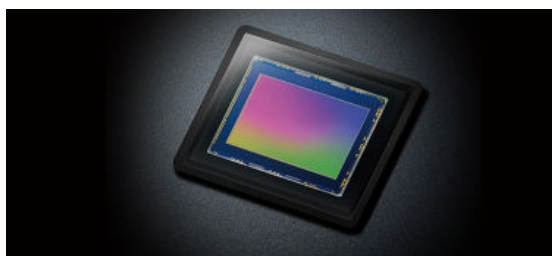
La tête d'analyse de l'image de la fente source est constituée d'un objectif de microscope de reprise et d'un tube sur lequel on peut placer, soit un oculaire, pour une observation visuelle, soit la caméra CMOS.

1- Préparation du TP

L'objectif qui sera étudié est un objectif **vidéo télécentrique de focale 55 mm et d'ouverture max $N = 2,8$**

Il sera utilisé dans une caméra numérique industrielle avec un grand capteur **SONY CMOS Exmor R (Back illuminated)**

Format 1" 13,2 x 8,8 mm avec 5 472 x 3 648 pixels



Capteur rétroéclairé Exmor R® CMOS 20,1 mégapixels (effectifs) de type 1.0

• Fonction de Transfert de Modulation

P0 : Comment calcule-t-on la FTM à partir de la tâche image (PSF) d'un point ?

P1 : Rappeler l'allure de la Fonction de Transfert de Modulation (FTM) pour un objectif de nombre d'ouverture N , limité par la diffraction, en éclairage quasi-monochromatique? Quelle est sa fréquence de coupure (pour $\lambda = 0.55\mu\text{m}$) ?

Quelle est l'allure de sa fonction de transfert de modulation en éclairage polychromatique (entre 400 nm et 800 nm) ? Quelle est sa fréquence de coupure ?

P2 : Quelle sera la dimension de la tache image obtenue avec l'objectif pour $N = 2,8$ si l'on suppose qu'il est limité par la diffraction (pour $\lambda = 0.55\mu\text{m}$) ? Comparer à la taille d'un pixel du capteur ?

Quelle largeur de fente objet doit-on choisir pour étudier l'objectif ouvert à 2,8 afin de ne pas avoir à effectuer de déconvolution ?

P3 : Pour quel champ maximum doit-on mesurer la FTM de cet objectif compte de la taille du capteur Sony ?

P4 : Quelle doit être approximativement la fréquence de coupure de la FTM de cet objectif pour ne pas limiter la résolution du système compte tenu du capteur CMOS utilisé dans la caméra ?

P5 : En ce qui concerne l'ouverture, quelles conditions doivent vérifier le collimateur et l'objectif de microscope de reprise pour pouvoir étudier l'objectif à pleine ouverture ?

P6 : Montrer que l'étude de l'image d'une fente objet fine permet de mesurer la FTM selon une seule direction. Laquelle ? Proposer une solution pratique pour obtenir la FTM à 2 dimensions du système optique.

• **Echantillonnage spatial de l'image de la fente par la CMOS :**

La caméra uEye de mesure est constitué d'un capteur de 1024x1280 pixels carré de côté 5.3 μm .

La FTM est définie et mesurée en fonction de la fréquence spatiale dans le plan image du système optique étudié (plan où se trouve l'image de la fente source).

Dans ce plan, la caméra CMOS effectue un échantillonnage spatial de la répartition de l'éclairement de l'image de la fente source dont le pas dépend du **grandissement de l'objectif de microscope de reprise et de la dimension du pixel de la caméra de mesure** (5.3 μm).

Il est très important de réaliser que c'est le grandissement de l'objectif de reprise qui permet de modifier la fréquence d'échantillonnage, donc la plage de mesure des fréquences spatiales.

P7 : Exprimer en fonction du grandissement de l'objectif de microscope de reprise, la période spatiale et la fréquence spatiale, F_e , de cet échantillonnage.

P8 : Calculer la fréquence spatiale, F_e , et la fréquence de Nyquist, $F_e/2$, de l'échantillonnage pour des grandissements de l'objectif de microscope de reprise allant de 10 à 40.

P9 : Pour un objectif idéal travaillant pour une conjugaison infini-foyer, limité par la diffraction, éclairé en lumière quasi-monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$, calculer la fréquence de coupure de sa FTM pour $N = 2,8 ; 4 ; 5,6 ; 8$.

P10 : En déduire les grandissements de l'objectif de reprise nécessaires pour ces ouvertures.

2- Observations visuelles

☞ Placer l'oculaire sur le tube du viseur muni de l'objectif de microscope de reprise x40.

☞ Observer l'image de la fente, pour différentes longueurs d'onde et pour différentes ouvertures.

Q1 : À pleine ouverture, en éclairage monochromatique et polychromatique, l'objectif vidéo présente-t-il des aberrations ? Décrire les aberrations éventuellement observées en éclairage monochromatique et polychromatique. À partir de quelle ouverture l'objectif vous paraît-il limité par la diffraction ?

Q2 : Evaluer la largeur de l'image de la fente pour $N = 2,8$ en lumière monochromatique et en lumière blanche. En déduire un ordre de grandeur de la largeur de la FTM de cet objectif pour cette ouverture.

3 - Mesure de la fonction de transfert de modulation :

☞ Remplacer l'oculaire par la caméra.

☞ Lancer Matlab, et tapez `>> CalculFTMLogiciel`

☞ Initialisez et cherchez la meilleure mise au point de la fente.

☞ Il est possible d'augmenter le temps d'intégration si le signal est trop faible (en éclairage monochromatique). Pour avoir un temps d'intégration élevé, il faut diminuer la cadence et l'horloge pixel de la caméra.

● **Mesure du grandissement de l'objectif de microscope de reprise**

Pour mesurer la FTM, il faut au préalable connaître et mesurer précisément le grandissement « réel » de l'objectif de microscope de reprise. Cette mesure du grandissement est possible directement sur le montage, en déplaçant latéralement la tête de mesure (l'objectif de microscope et la caméra) grâce à la platine *Microcontrôle* de mouvement transversal. On déplace ainsi latéralement de gauche à droite l'image de la fente sur le capteur de la caméra (voir mode d'emploi du logiciel « Mesure de la FTM »).

Q3 : Mesurer soigneusement par cette méthode le grandissement de l'objectif de reprise. Evaluer l'incertitude de mesure grâce à une étude de répétabilité. Pourquoi le grandissement mesuré diffère-t-il de celui indiqué sur l'objectif de microscope ?

Q4 : En déduire la fréquence d'échantillonnage et la fréquence de Nyquist dans le plan de l'image de la fente ?

● **Mesure de FTM de l'objectif étudié**

Les étapes du calcul par le logiciel sont les suivantes :

- Acquisition d'une image
- Affichage du profil de l'image de la fente obtenu par moyenne sur 8 lignes horizontales de pixels du capteur au milieu de l'image.
- Calcul du module et normalisation de la Transformée de Fourier Rapide
- Il est également possible de supprimer le fond continu en appuyant sur le bouton « Réduction Fond ». L'algorithme calcule la valeur moyenne du fond (on regarde là où il n'y a pas de signal sur le profil) et le soustrait au profil entier. Puis il remet à zéro tous les points qui sont hors de l'image de la fente.
- Il est possible aussi d'afficher la FTM idéale en lumière monochromatique et en lumière polychromatique.
- « Arrêt sur Image » permet simplement de figer l'image.

Q5 : Pourquoi est-il nécessaire de soustraire le fond continu pour calculer la FTM ?

Q6 : En utilisant le logiciel :
- décrire et expliquer l'influence d'une défocalisation sur la FTM correspondante ;
- décrire et expliquer l'influence de l'ouverture de l'objectif vidéo sur la FTM ;
- décrire et expliquer l'influence de la largeur de la fente réglable. Comment s'assurer que celle-ci n'intervient pas dans la mesure de FTM ?

Q7 : Doit-on tenir compte de la largeur de la fente source pour le calcul de la FTM du système optique étudié et de quelle façon ? Comment peut-on éviter d'en tenir compte ?

Q8 : Doit-on tenir compte de la fonction de transfert de modulation du capteur de la caméra de la tête de mesure ? Pourquoi ?

Q9 : Doit-on tenir compte de la FTM du collimateur et de l'objectif de reprise ? Pourquoi ?

☞ Vérifier bien la mise au point, le niveau de signal, la largeur de fente suffisamment fine pour chaque mesure.

☞ Mesurer soigneusement la FTM de l'objectif étudié au plan de meilleure mise au point, sur l'axe pour des ouvertures $N = 2,8 ; 4 ; 5,6 ; 8 ; 11 ; 16$ et **pour une fréquence spatiale égale à la fréquence de Nyquist ($f_c/2$) du capteur pour lequel cet objectif sera utilisé (SONY CMOS Exmor R 13.2x8.8 mm avec 5472x3648 pixels)** en éclairage monochromatique et en éclairage polychromatique. Tracez la FTM monochromatique et polychromatique en fonction du nombre d'ouverture de l'objectif étudié.

Q10 : Comparer la largeur de la FTM obtenue pour $N = 2,8$ avec l'évaluation visuelle de l'image de la fente effectuée à la question (Q2).

Q11 : En éclairage monochromatique, LED rouge dont la longueur d'onde est 630 nm, mesurer soigneusement les FTM pour $N = 2,8 ; 4 ; 5,6 ; 8$,

Reporter dans un tableau les valeurs des fréquences spatiales de FTM correspondant à 50%.

De même, en lumière blanche, mesurer soigneusement les FTM pour $N = 2,8 ; 4 ; 5,6 ; 8 ; 11 ; 16$ et comparer aux FTM idéales.

Reporter dans un tableau les valeurs des fréquences spatiales de FTM correspondant à 50% et tracer la fréquence spatiale correspondant à 50% de la FTM en fonction du nombre d'ouverture.

Commenter.

Q12 : Quel est l'angle de champ correspond au champ maximum du capteur Sony ? Etudiez la FTM au bord du champ.

4- Comparaison avec la FTM mesurée avec le ZYGO

Retirer l'objectif vidéo après avoir soigneusement repéré son orientation angulaire autour de l'axe du banc (vous n'avez mesuré la FTM que sur l'axe horizontal, vous ferez de même sur le ZYGO).

Régler l'objectif étudié sur le ZYGO dans la bonne position.

Q13 : Comparer la PSF et la FTM quasi-monochromatique mesurée à partir du défaut du front d'onde par le ZYGO pour les mêmes ouvertures, $N = 2,8$ et 4. Commenter

5- Conclusions

Q14 : Que pensez-vous de la qualité de cet objectif utilisé avec le capteur matriciel Sony proposé ? Quelles autres mesures seraient nécessaires pour répondre complètement cette question ?