

Filtrage en optique

GEORGES BOUDEBS

Table des matières

I. Présentation	3
II. Cours	4
1. Modulation spatiale de la lumière.....	4
1.1. <i>Le film photographique</i>	4
1.2. <i>Modulateurs spatiaux de lumière (SLM pour Spatial Light Modulators)</i>	10
2. Filtrage spatial et traitement optique de l'information.....	13
2.1. <i>Les expériences d'Abbe et Porter</i>	14
2.2. <i>Le microscope à contraste de phase (F. Zernike 1935)</i>	15
3. Convolution sans déplacement par voie optique en incohérent.....	17
4. Synthèse d'un filtre passe bande en incohérent.....	19
5. Traitement optique de l'information en éclairage cohérent.....	21
5.1. <i>Introduction</i>	21
5.2. <i>Architectures utilisées</i>	21
6. Le filtre de Vander Lugt (1963).....	23
6.1. <i>Introduction</i>	23
6.2. <i>Réalisation de la fonction de transfert</i>	23
6.3. <i>Traitement des données</i>	25
6.4. <i>Application à la reconnaissance des formes</i>	27
7. Corrélateur à transformée conjointe (Weaver et Goodman 1966).....	27
8. Multiplication matrice-vecteur.....	29
9. Photo floue.....	31
III. Etude de cas	33
1. Application à la reconnaissance des caractères.....	33
1.1. <i>Le filtre adapté</i>	33
1.2. <i>Exemple de problème de reconnaissance de caractères</i>	34
IV. Exercice	37
1. Test de connaissances.....	37
Solution des exercices	39
Bibliographie	42
Webographie	43
Crédit des ressources	44

I.Présentation

Module :

Interférences et Diffraction

Auteur(s) :

Georges BOUDEBS - Maître de Conférences HDR - Laboratoire de Photonique d'Angers (LPHIA | UPRES EA 4464)

Résumé :

Tout d'abord, nous passons en revue les systèmes utilisés pour moduler spatialement les ondes optiques ainsi qu'un exemple illustrant les techniques capables de modifier la transmission lumineuse en temps réel, par une commande optique ou électronique. Ensuite et dans la deuxième partie de ce grain, nous abordons le domaine général du traitement de l'information et plus particulièrement celui réalisé par un moyen optique. Diverses applications sont proposées: filtrage de Zernicke, convolution par voie optique, reconnaissance de formes, multiplication matrice-vecteur... De telles applications reposent sur l'aptitude des systèmes optiques à faire subir des transformations linéaires générales aux données d'entrée.

Mots-clés :

filtrage spatial, spectre de fréquences, plan de Fourier, convolution par voie optique

Pré-requis

Analyse de Fourier - Théorie des systèmes linéaires - Formation des images

Objectif(s) pédagogique(s) :

Montrer la richesse du signal optique modulé spatialement en amplitude ainsi qu'en phase. Donner les bases concernant le traitement optique du signal ainsi que comprendre les techniques utilisées dans ce domaine.

Plan du cours :

- Introduction
- Modulation spatiale de la lumière
- Filtrage spatial et traitement optique de l'information
- Convolution sans déplacement par voie optique en incohérent
- Synthèse d'un filtre passe bande en incohérent
- Traitement optique de l'information en éclairage cohérent
- Le filtre de vander lught (1963)
- Corrélateur à transformée conjointe (Weaver et Goodman 1966)
- Multiplication matrice-vecteur
- Photo floue
- Conclusion

Conception & production :

PRN - Le Mans Université

Licence :

Licence GNU¹

1 - <http://www.gnu.org/licenses/fdl.txt>

II.Cours

Il est clair que les outils des systèmes linéaires et l'analyse fréquentielle sont utiles dans la compréhension des systèmes optiques destinés à la formation des images. Cependant, l'étude devient beaucoup plus intéressante si elle peut être appliquée aux problèmes de synthèse. Synthétiser des systèmes optiques linéaires avec des propriétés spécifiques, nécessite la capacité de moduler spatialement la lumière. En particulier, une telle capacité est nécessaire ne serait-ce que pour présenter l'information (l'objet) à l'entrée d'un système optique. En outre, pour le traitement optique cohérent de l'information nous avons besoin de modifier et de manipuler l'amplitude complexe du champ lumineux transmis dans le plan focal d'un objectif. A l'aide d'une telle manipulation nous pouvons filtrer les données à l'entrée de diverses manières.

1. Modulation spatiale de la lumière

La première partie de ce chapitre concerne les méthodes traditionnelles (utilisées encore aujourd'hui) pour moduler spatialement les ondes optiques à savoir le **film photographique**. La deuxième partie est consacrée aux **systèmes optoélectroniques**, plus puissants dans le traitement optique de l'information. Ces systèmes sont appelés « SLM ». Ils sont capables de modifier la transmission lumineuse en temps réel, par une commande optique ou électronique.

1.1. Le film photographique

a) Introduction

Il joue dans le processus du traitement optique de l'information trois rôles essentiels. Il peut servir comme :

- Un milieu où les informations sont introduites dans le système optique
- Un filtre dans le plan des fréquences pour réaliser les atténuations nécessaires
- Un milieu pour enregistrer les informations à la sortie du système.

b) Processus d'enregistrement et caractérisation

La structure d'un film vierge est montrée dans la figure I-1.

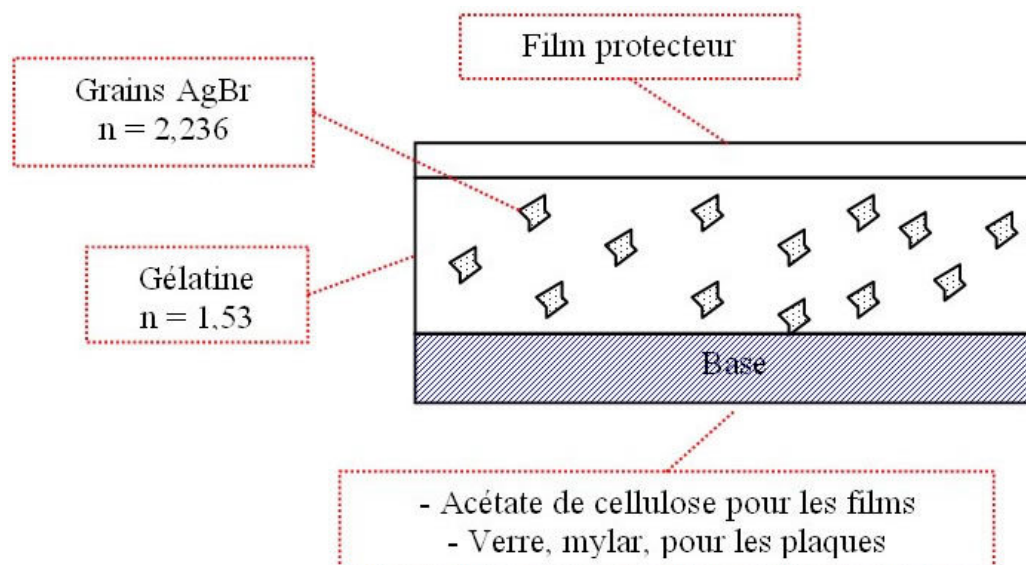


Figure I-1 : Structure d'un film photo ou d'une plaque holographique

Une quantité importante de grains d'halogénure d'argent est en suspension dans un support en gélatine. L'émulsion d'aspect mou est mise entre deux supports pour la protéger. Lorsque le film est exposé à la lumière, les grains qui ont absorbés des photons subissent un changement physico-chimique complexe (voir figure I-2).

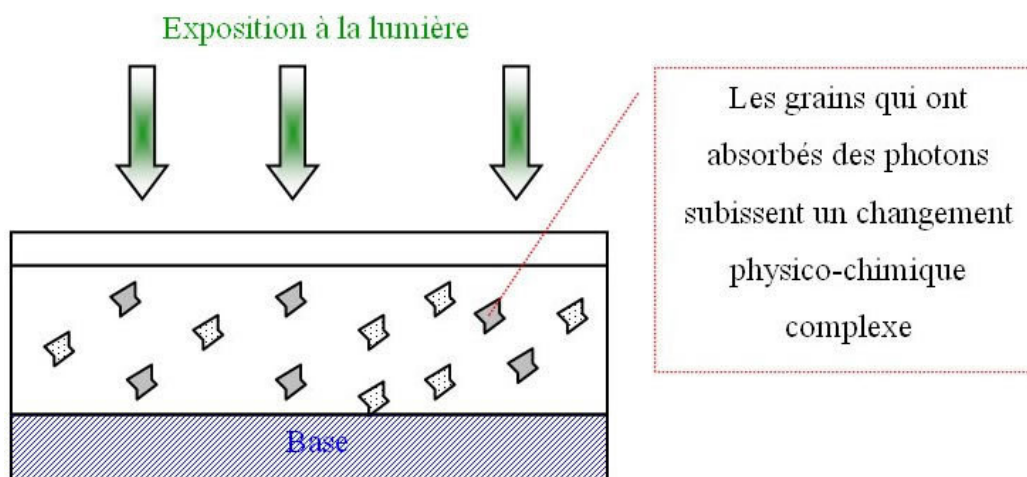


Figure I-2 : Processus d'exposition du film photo à la lumière

On parle d'une image latente enregistrée dans le film en attendant le développement et la fixation.

- Le développement : c'est un traitement chimique qui transforme le grain d'halogénure d'Ag en Ag métallique. Les grains n'ayant pas été irradiés ne se transforment pas.
- La fixation : c'est un traitement chimique qui élimine l'AgBr restant en préservant l'Ag métallique. L'Ag est fortement opaque dans les fréquences optiques. L'opacité du film développé dépendra donc de la densité des grains d'argent dans chaque région du cliché.
- L'exposition : est définie par $E(x, y) = I_e(x, y) \cdot T$. C'est l'énergie incidente par unité de surface : E est en J/m^2 , I_e est en W/m^2 , T est la durée d'exposition en s.
- La transmittance en intensité est définie par :

$$\tau(x, y) = \frac{I_{transmis}(x, y)}{I_{incident}(x, y)}$$

C'est une moyenne locale, grande devant la taille du grain, mais petite devant la structure fine des détails dans l'image

- La densité photographique est définie par :

$$D = \log_{10}(1/\tau) \Leftrightarrow \tau = 10^{-D}$$

Hurter et Driffield (1890) montrent que D est directement proportionnelle à la masse d'Ag par unité de surface.

- Courbe H-D : c'est le graphe de $D = f[\log_{10}(E)]$ (voir figure I-3)

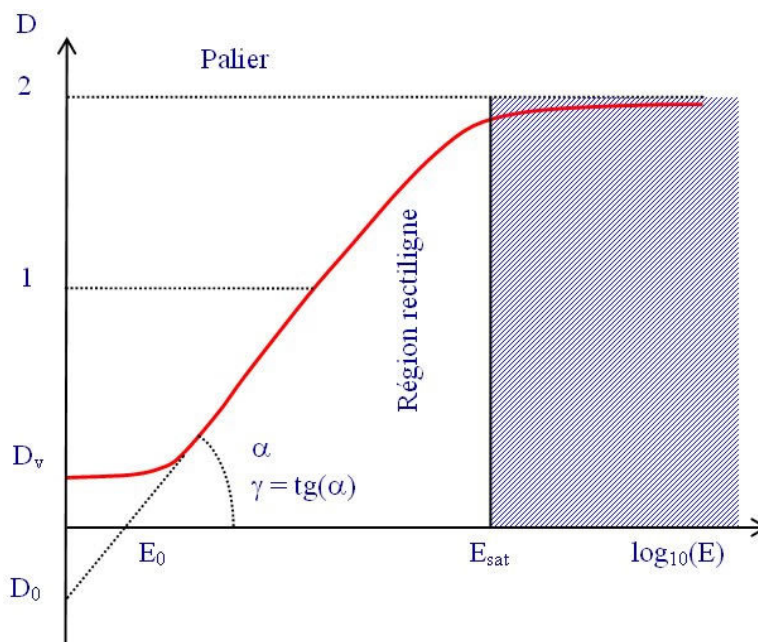


Figure I-3 : Courbe H-D typique d'un film photo

Quand $E < E_0 \rightarrow D = D_v$ (densité de voile). On utilise généralement la région linéaire où $D = \gamma \log_{10}(E) - D_0$.

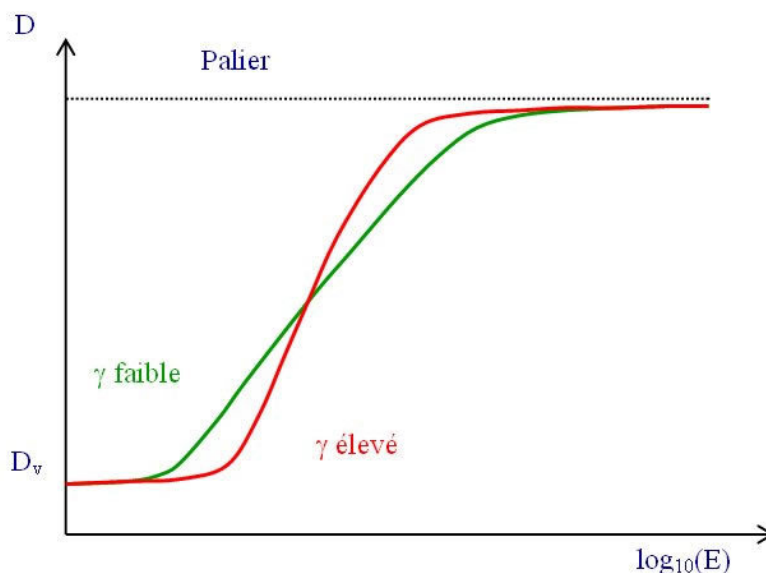


Figure I-4 : Comparaison des courbes H-D de deux négatifs à fort et à faible contraste

Le γ du film dépend de plusieurs paramètres : le type du film, le révélateur utilisé, le temps de développement ...

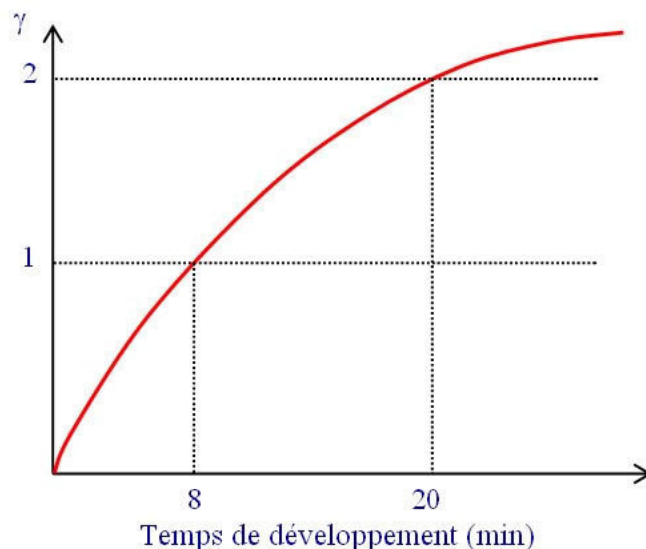


Figure I-5 : Le contraste du négatif γ en fonction du temps de développement

La figure I-5 montre l'évolution typique du γ d'un film négatif en fonction du temps de développement.

c) Le film utilisé en optique incohérente

Le film transforme une intensité $I_e(x, y)$ reçue pendant l'exposition en intensité transmise après le développement.

Si le film est utilisé dans sa partie linéaire, alors :

$$D = \gamma_n \log_{10}(E) - D_0 = \gamma_n \log_{10}(I_e.T) - D_0$$

I_e peut être relié à l'intensité transmise par l'intermédiaire de la fonction transmittance définie dans le paragraphe précédent :

$$D = \log_{10}\left(\frac{1}{\tau_n}\right) = \gamma_n \log_{10}(I_e.T) - D_0$$

$$\log_{10}(\tau_n) = D_0 - \gamma_n \log_{10}(I_e.T)$$

$$\tau_n = 10^{D_0} \cdot 10^{\log_{10}[(I_e.T)^{-\gamma_n}]}$$

$$\tau_n = 10^{D_0} \cdot (I_e.T)^{-\gamma_n} = K_n I_e^{-\gamma_n}$$

$$\tau_n = \frac{I_{tra}}{I_{inc}} = K_n \cdot (I_e)^{-\gamma_n}$$

γ_n et K_n étant deux constantes positives, on voit que l'intensité transmise par le film est non linéaire en fonction de I_e . Par exemple, si $\gamma_n = 1 \rightarrow I_t$ est proportionnelle à l'inverse de I_e .

Pour obtenir une intensité transmise proportionnelle à l'intensité d'exposition il faut obtenir un cliché positif à partir du cliché négatif. Pour cela, on éclaire un second cliché à partir du cliché négatif obtenu initialement. Soit I_0 l'intensité incidente :

$$\tau_n = K_n \cdot (I_e)^{-\gamma_n} = \frac{I_t}{I_0}$$

$$I_t = I_0 \tau_n = I_{\text{exposition du positif}}$$

La transmittance en intensité du second cliché positif sera donc :

$$\tau_p = K'_n \cdot (I_{\text{exposition du positif}})^{-\gamma'_n} = K'_n \cdot (I_0 \tau_n)^{-\gamma'_n}$$

En remplaçant la transmittance du négatif par sa valeur dans cette dernière relation :

$$\tau_p = K'_n \cdot \{I_0 [K_n \cdot (I_e)^{-\gamma_n}]\}^{-\gamma'_n}$$

$$\tau_p = K'_n \cdot (I_0)^{-\gamma'_n} \cdot (K_n)^{-\gamma'_n} \cdot (I_e)^{\gamma_n \cdot \gamma'_n}$$

$$\tau_p = K_p \cdot I_e^{\gamma_p}$$

K_p et γ_p sont deux constantes positives. Ici γ_p est le gamma résultant. On voit que l'intensité transmise par le film est linéaire en fonction de I_e si $\gamma_p = 1$. Ceci est rendu possible en jouant sur le temps de développement. On peut choisir par exemple : $\gamma_n = 1/2$ et $\gamma_n = 2$.

d) Le film utilisé en optique cohérente

Il transforme l'intensité incidente durant l'exposition en amplitude complexe transmise après développement. Il peut aussi transformer l'amplitude complexe incidente pendant l'exposition en une amplitude complexe transmise après développement (en utilisant des méthodes interférométriques). Dans les deux cas le film est caractérisé par sa transmittance complexe :

$$t(x, y) = \sqrt{\tau(x, y)} e^{j\varphi(x, y)}$$

où $\varphi(x, y)$ traduit des variations de phases introduites par le cliché :

- soit par les variations aléatoires de l'épaisseur de la gélatine
- soit par les variations de l'épaisseur avec la densité d'Ag dans le cliché développé.

Il est possible d'éliminer les effets de ces variations d'épaisseur en utilisant une cuve à immersion remplie d'huile à indice convenable.

On peut de cette façon écrire la transmittance de la cuve et du film :

$$t_n(x, y) = \sqrt{\tau_n(x, y)} = \sqrt{K_n} \cdot (\sqrt{I_e})^{-\gamma_n} = K_n |U_e|^{-\gamma_n}$$

En réalisant un positif :

$$t_p(x, y) = \sqrt{\tau_p(x, y)} = \sqrt{K_p} \cdot (\sqrt{I_e})^{\gamma_p} = K_p |U_e|^{\gamma_p}$$

On désire dans de nombreux cas que le film transforme l'amplitude en le carré de son module, il suffit de prendre $\gamma_p = 2 = \gamma_n \gamma'_n = 2, 1$.

e) La fonction de transfert de modulation du film

Lorsque la période spatiale des variations de l'intensité lumineuse devient trop petite, il peut se faire qu'aucune variation correspondante de densité n'apparaisse dans le cliché final. Soit une variation sinusoïdale de l'intensité incidente (voir figure I-6) :

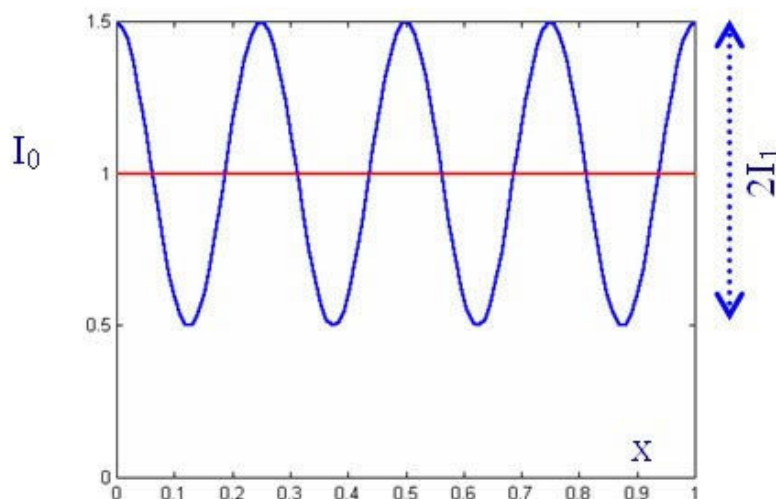


Figure I-6 : Profil spatial de l'intensité incidente sur le film

$$I(x) = I_0 + I_1 \cos(2\pi f x)$$

On définit le taux de modulation de cette intensité par : $M_i = \frac{I_1}{I_0}$.

On se reporte à la courbe H-D du film qui est connue pour en déduire la distribution sinusoidale de l'intensité effective lue dans le film (voir figure I-7) :

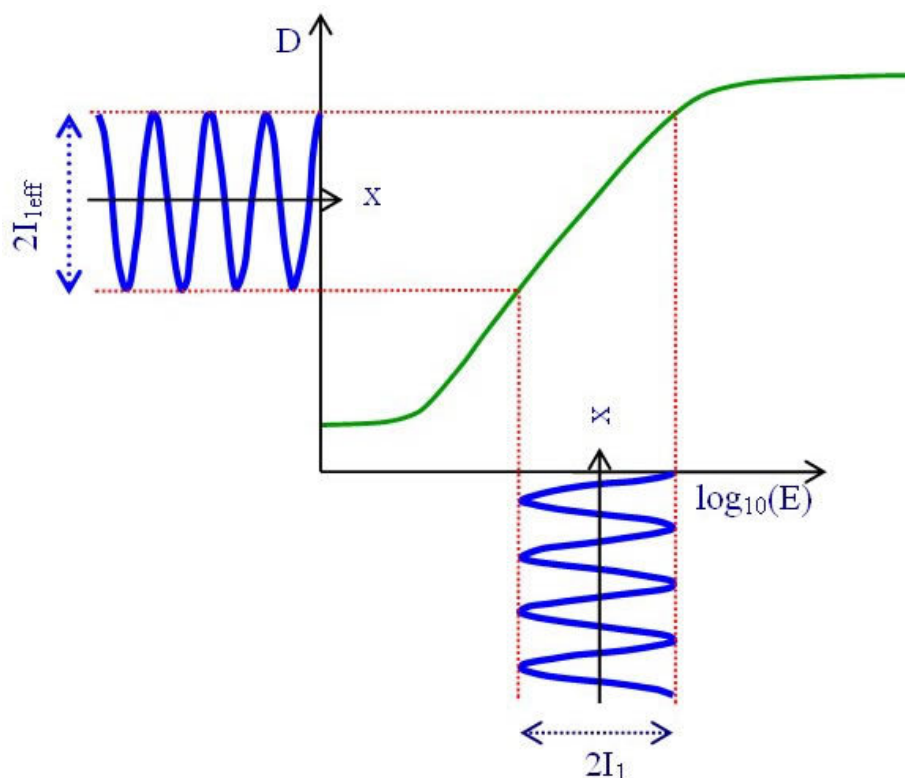


Figure I-7 : Profil spatial de l'intensité effectivement enregistrée sur le film

$$I_{eff}(x) = I_{0eff} + I_{1eff} \cos(2\pi f x)$$

On en déduit le taux de modulation effectivement enregistré :

$$M_{eff}(f) = \frac{I_{1eff}}{I_{0eff}}$$

On définit la fonction de transfert de modulation :

$$M(f) = \frac{M_{eff}(f)}{M_i(f)}$$

En faisant varier f (la fréquence spatiale de l'intensité incidente) on peut répéter cette opération pour déterminer la variation de la *FTM* du film en fonction de la fréquence. Typiquement nous avons une allure du type "passe-bas" comme la courbe le montre dans la figure I-8.

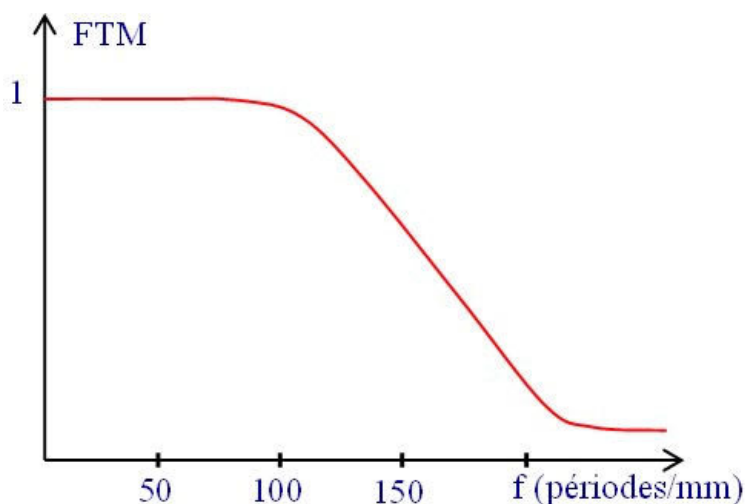


Figure I-8 : Fonction de transfert de modulation (FTM) typique d'un négatif

La fréquence de coupure est variable (entre 50 et 2500 mm^{-1} par exemple pour la plaque photo Kodak 649 F).

f) Blanchiment des clichés photos

Après le développement et la fixation du film on constate une faible variation d'épaisseur dans la gélatine aux endroits où subsiste l' Ag métallique. Le **processus du blanchiment** consiste à enlever l' Ag métallique par un traitement chimique pour garder en place cette variation d'épaisseur.

Un autre processus de blanchiment consiste à remplacer l' Ag métallique de la gélatine par un autre sel d' Ag transparent à la lumière mais présentant un indice plus grand que la gélatine environnante.

Le résultat est une structure de variation spatiale de l'indice constituant « **une image de phase pure** ». On peut atteindre avec cette technique des différences de phase jusqu'à 2π radians et une résolution allant jusqu'à 2500 mm^{-1} .

1.2. Modulateurs spatiaux de lumière (SLM pour Spatial Light Modulators)

L'inconvénient principal des clichés photos est le temps relativement long nécessaire au traitement chimique.

Il est préférable d'utiliser les propriétés électro-optiques de certains cristaux pour créer ou enregistrer en temps réel les données optiques qui interviennent dans le système destiné au traitement optique du signal.

Définition

On distingue deux catégories de SLM :

- SLM à adressage électriques, utilisés si l'information est collectée par des composants optoélectroniques (photo diodes, Caméra CCD, simulation numérique)
- SLM à adressage optiques, utilisés si l'information est sous forme optique (sortie d'un moniteur vidéo, sortie d'un système imageur quelconque).

Dans tous les cas, par définition la sortie (du composant SLM) est toujours optique. Pour des amples informations concernant ce sujet le lecteur pourra consulter la référence [[Spatial light modulator technology]]

a) Utilisations des SLM

A l'origine les modulateurs spatiaux de lumière ont été développés pour une utilisation dans des processeurs optiques tels que :

1. Convertir une image incohérente en image cohérente
2. Amplifier une faible image
3. Convertir les longueurs d'ondes (passer de l'I.R. dans le visible)
4. Modifier le filtre spatial utilisé dans le plan de Fourier (spectral)
5. ...

Mais c'est le développement de modulateurs pour des applications grands publics comme les vidéo-projecteurs qui a permis les travaux de recherches sur les processeurs optiques de reconnaissance de formes que l'on connaît aujourd'hui.

b) Propriétés des cristaux liquides

L'utilisation des cristaux liquides est répandue (affichage digital, écrans...). La tension appliquée aux électrodes provoque une variation dans l'intensité de la lumière transmise ou réfléchi par l'afficheur. Les cristaux liquides peuvent être vus comme composés de molécules ellipsoïdales. Ces molécules se regroupent entre elles de différentes façons formant 3 classes (ou phases) de cristaux liquides : les nématiques, les smectiques et les cholestériques.

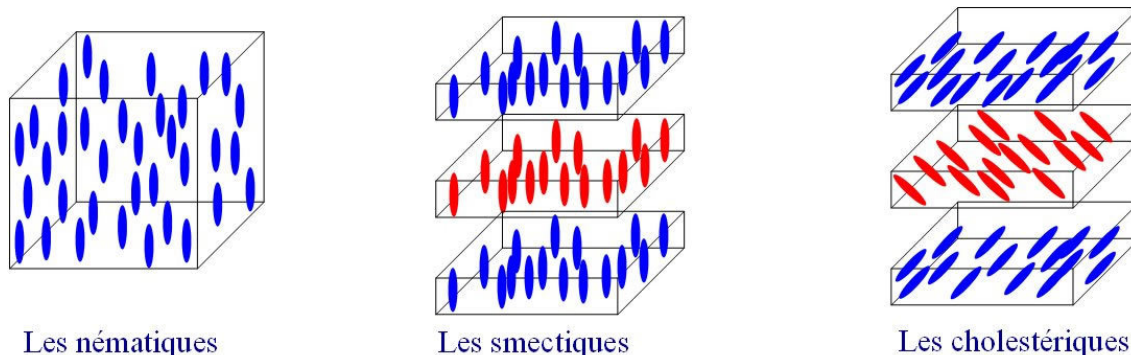


Figure I-9 : Arrangements moléculaires pour différents types de cristaux liquides. Quand il le faut, les couches ont été séparées pour plus de clarté.

Les SLM utilisent principalement les cristaux nématiques (NLC) et une classe spéciale des smectiques (C*) appelée les « Ferroelectric Liquid Crystal » (FLC).

Propriétés des NLC :

Il est possible d'imposer des conditions aux limites pour orienter les cristaux liquides nématiques en polarisant les surfaces des couches d'alignement dans une direction donnée. Les axes des molécules en contact avec la paroi ont tendance à s'aligner avec les petits scratches du polissage au niveau de la surface. Pour garder une continuité au niveau de l'alignement des axes on peut appliquer une torsion à la cellule comme le montre la figure I-10(a). En appliquant un champ électrique on induit un dipôle électrique dans chaque molécule. Le grand axe de la molécule (où le dipôle apparaît) s'aligne avec le champ électrique (figure I-10(b)).

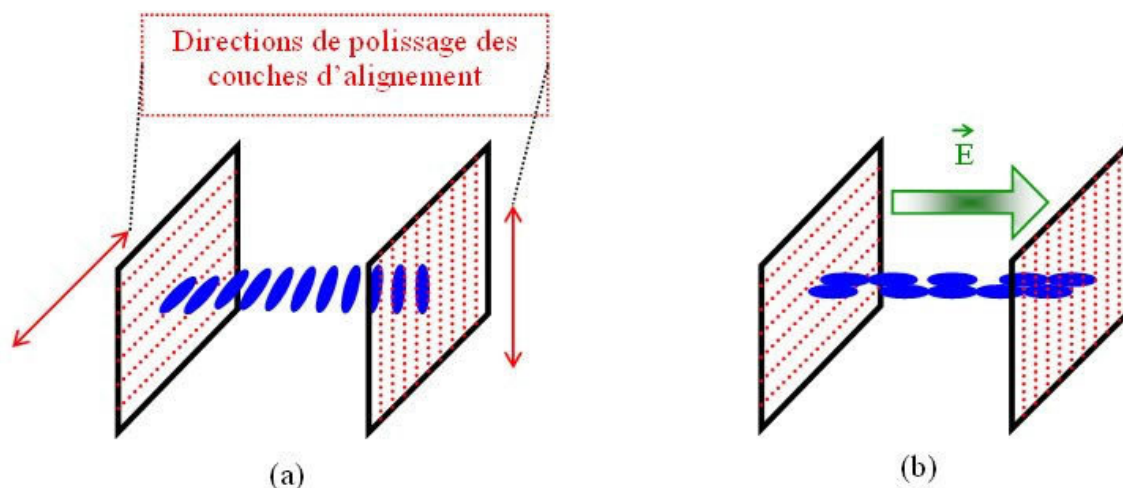


Figure I-10 : (a) Arrangements moléculaires dans une cellule à cristaux liquides lorsque les directions de polissages des couches d'alignement sont perpendiculaires. (b) Alignement des axes moléculaires avec le champ électrique.

Les propriétés optiques des NLC

- Les molécules sont allongées ce qui provoque une anisotropie induisant une biréfringence importante. La variation d'indice est élevée ce qui permettra d'avoir des épaisseurs au niveau des cellules relativement faibles $\Delta n = n_e - n_o = 0,2$ (n_e suivant l'axe de la molécule et n_o perpendiculaire à l'axe)
- Si les molécules sont disposées de façon hélicoïdale (figure I-10 (a)) nous avons un pouvoir rotatoire important.

En combinant ces deux propriétés on peut réaliser des modulations d'intensité de la lumière.

Exemple

Exemple de fonctionnement

En l'absence d'un champ électrique (figure I-11), la lumière polarisée à 45° des axes xOy rencontre l'axe de la molécule orienté à la verticale.

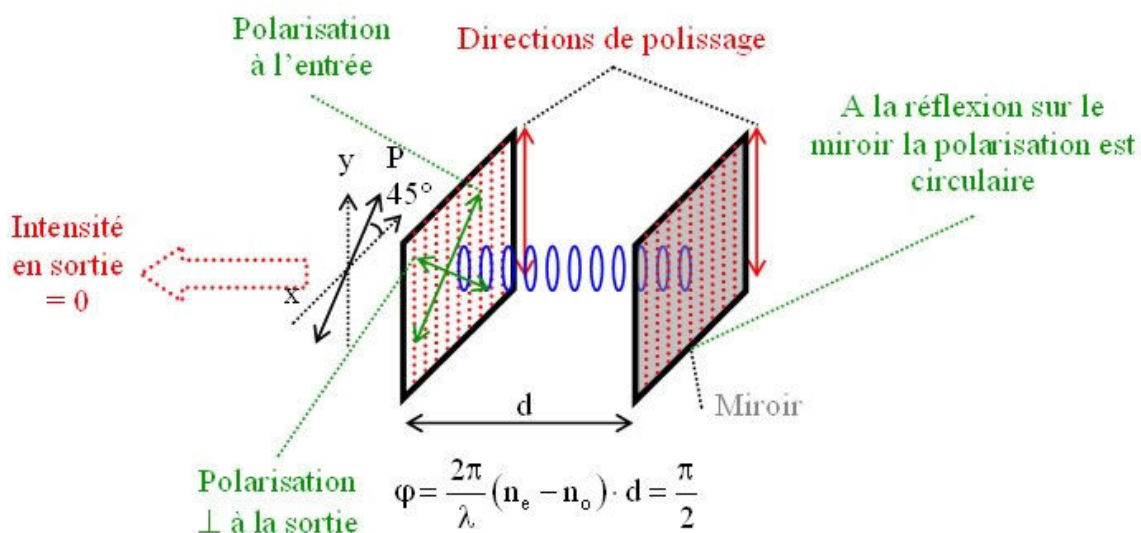


Figure I-11 : En l'absence de champ électrique l'intensité de la lumière réfléchi par la cellule est nulle.

Elle voit donc le grand ainsi que le petit axe de la molécule. Les composantes du champ lumineux suivant x et y subissent un déphasage différent (suivant n_e et n_o). Au niveau du miroir au fond de la cellule la lumière sera polarisée circulairement si on s'arrange pour que le

déphasage φ soit égale à $\pi/2$. Ceci est réalisé en choisissant d une épaisseur de cellule convenable. Après l'aller-retour (réflexion sur le miroir) la lumière sera polarisée rectilignement et orientée à 90° de la lumière incidente. Elle rencontre le polariseur P placé à l'entrée en position croisée. L'intensité sera minimale à la sortie de la cellule.

En revanche et en présence d'un champ électrique suffisant, les molécules seront alignées avec le champ électrique appliqué. Les composantes sur x et sur y de la lumière rencontrent cette fois-ci le petit axe de la molécule (voir figure I-12). Il n'y aura pas de déphasage entre les composantes du champ lumineux. La lumière est polarisée rectilignement en se réfléchissant sur le miroir et reste parallèle à elle-même en arrivant sur le polariseur P après l'aller-retour. L'intensité lumineuse en sortie est maximale.

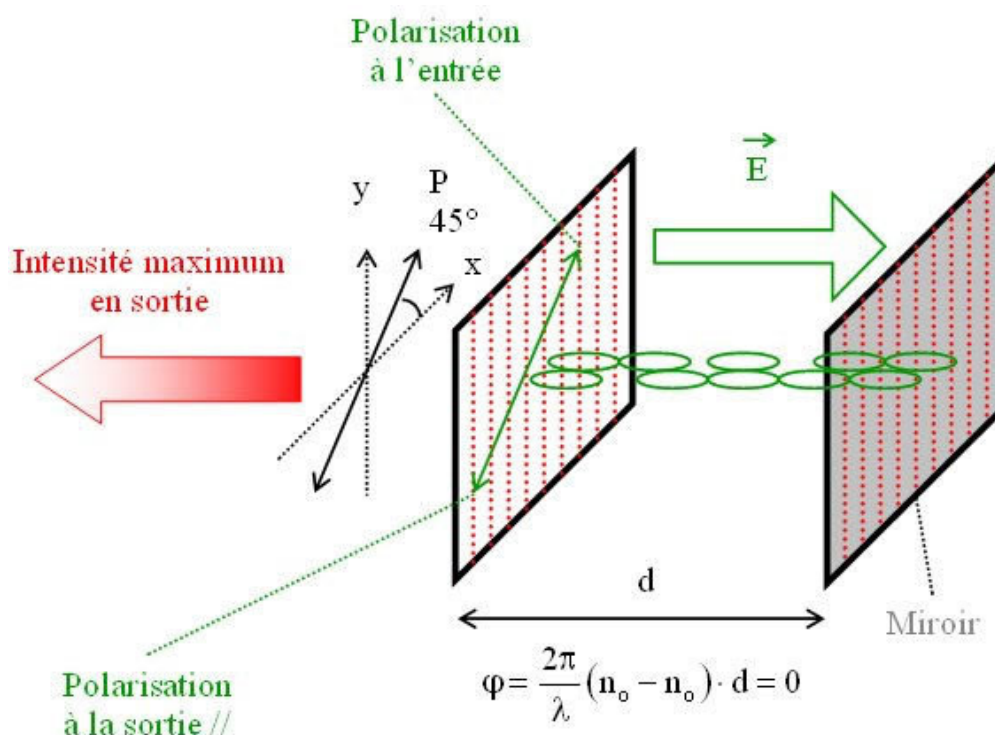


Figure I-12 : En présence d'un champ électrique suffisant l'intensité de la lumière réfléchiée par la cellule est maximale.

Si le champ électrique n'est pas suffisant pour faire aligner toutes les molécules dans la cellule il en résulte une réflexion partielle.

Caractéristiques techniques typiques

- Tension à appliquer : 5–10 V
- épaisseur des cellules : 1 – 10 μm
- Temps de réponse d'alignement des molécules : 50 – 100 μs
- Temps de réponse de relaxation des molécules : 20 ms

Le nombre de pixels ou de cellules dans un SLM (typiquement 600×800 , appelée communément et à tort résolution) peut varier dépendant de l'application envisagée.

Remarque

Il faut noter que bien que des modulateurs spatiaux de lumière aient été développés pour une utilisation dans des processeurs optiques, c'est le développement de modulateurs pour des applications comme les vidéo projecteurs qui a permis les travaux de recherches très nombreux sur les processeurs optiques de reconnaissance de formes au cours des 15 dernières années.

2. Filtrage spatial et traitement optique de l'information

Il existe des applications importantes qui ne sont pas du domaine de la formation des images proprement dit, mais qui relèvent davantage du domaine général du **traitement de l'information**. De telles applications reposent sur l'aptitude des systèmes optiques à faire subir des transformations linéaires générales aux données d'entrée. Dans certains cas, le traitement simultané d'un très grand nombre de données peut, du fait de ce nombre, multiplier l'efficacité de l'observateur humain. Une transformation linéaire peut en effet jouer un rôle crucial dans la réduction d'une grande quantité de données renseignant sur certains points particuliers de l'information qui intéressent l'observateur. On trouve un exemple de ce type d'application dans l'étude de la reconnaissance des caractères. Dans d'autres cas, un ensemble de données peut apparaître sous une forme qu'un observateur humain ne peut pas utiliser directement, alors qu'une transformation linéaire de ces données peut les rendre utilisables.

Nous n'exposerons que quelques principes généraux en choisissant des exemples pour les illustrer. Nous omettrons donc inévitablement un certain nombre de techniques intéressantes et très utiles; le lecteur intéressé pourra consulter les références [[Optical Processing of Information]], [[Optical and Electro-optical Information Processing]] pour avoir une vue plus complète du sujet. On se limite ici à quelques principes généraux, largement utilisés.

Pour plus de détails, on peut consulter par exemple les livres [[Introduction to Fourier Optics]], [[Optical signal processing]], [[Optical informations processing-Fundamentals]], [[Optical signal Processing]]

2.1. Les expériences d'Abbe et Porter

On peut voir dans la figure II-1 le montage utilisé par Abbe (1893) et Porter (1906) pour réaliser leurs expériences.

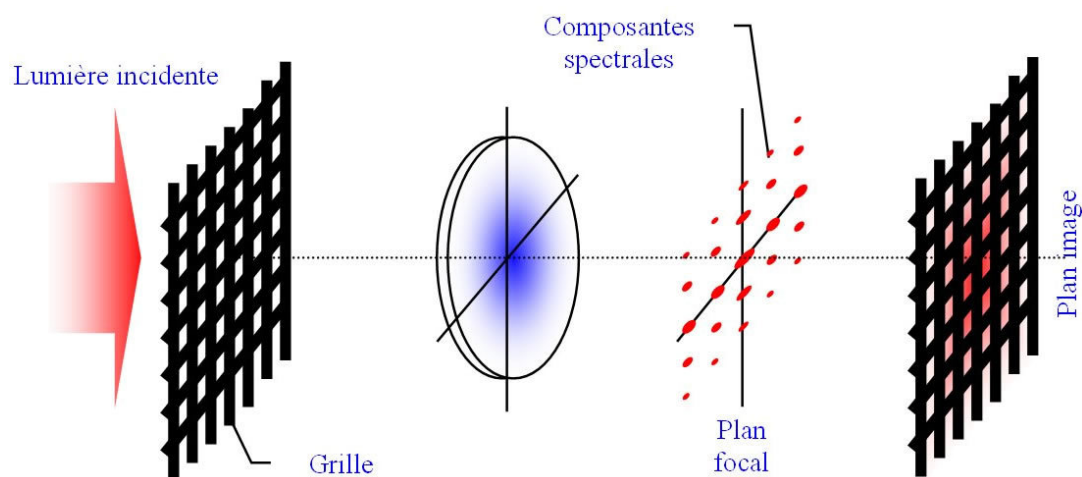


Figure II-1 : Schéma simplifié représentant les expériences d'Abbe et Porter. Image de la grille et composantes spectrales dans le plan focal

Une grille est placée dans le plan objet d'une lentille convergente. Dans le plan focal on retrouve le spectre de la grille (voir le grain « formation des images », partie: « propriétés des lentilles relatives à la transformation de Fourier »). Les composantes spectrales se propagent du plan focal vers le plan image, interfèrent entre elles, pour former une image qui est une réplique atténuée de l'objet. Nous allons négliger la fonction de transfert optique. En plaçant divers obstacles (diaphragmes, fentes, écrans) dans le plan focal, il est possible de modifier le spectre (donc l'image) de différentes façons.

En mettant une fente à l'horizontale (figure II-2), l'image ne contient que la structure verticale de la grille.

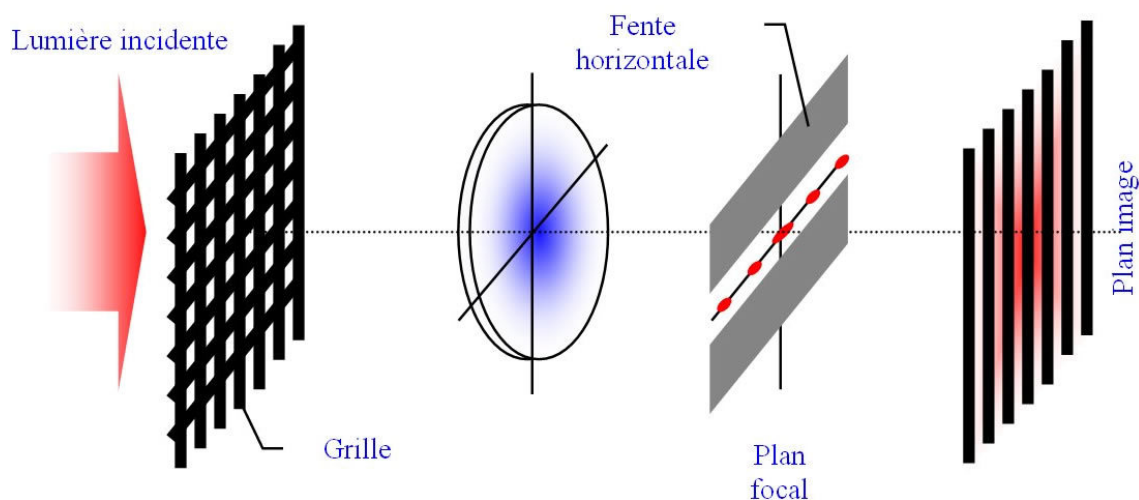


Figure II-2 : Aspect de l'image avec une fente placée à l'horizontale

En retournant la fente à la verticale (figure II-3), l'image ne contient que la structure horizontale de la grille.

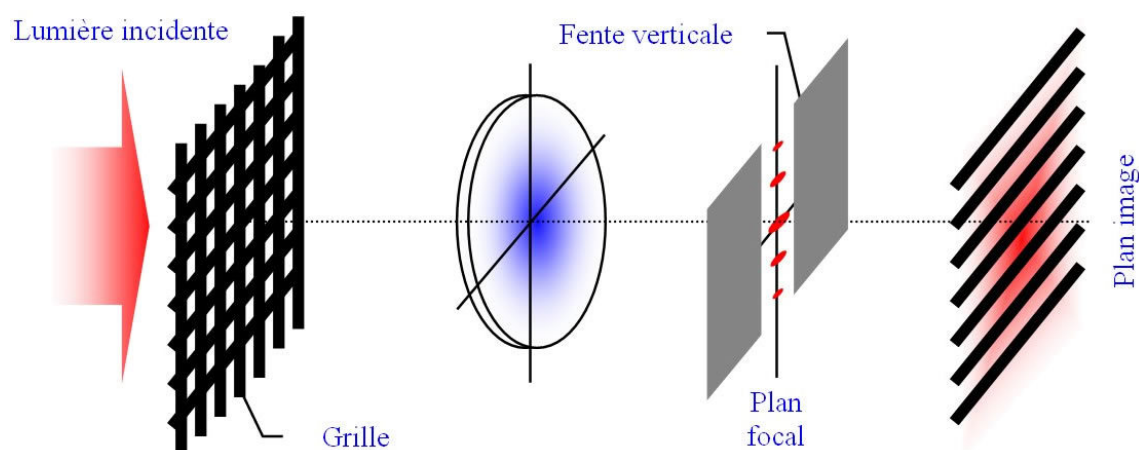


Figure II-3 : Aspect de l'image avec une fente retournée à la verticale

2.2. Le microscope à contraste de phase (F. Zernike 1935)

Soit un objet transparent (bactérie). Lorsque la lumière traverse l'objet il y a un effet de variation de phase ($\varphi(x,y)$). Cet effet n'est pas visible à la sortie d'un microscope classique.

Supposons une pupille d'entrée du système imageur infinie. Soit une onde incidente, plane et monochromatique $U_i = 1$, alors l'onde transmise s'écrit $U_t = \exp[j\varphi(x,y)]$ dont l'intensité est $I_t = |\exp[j\varphi(x,y)]|^2$. L'intensité transmise est donc monotone et toujours constante. Il n'y a pas de variations spatiales de l'intensité à la sortie donc l'objet est invisible.

Le contraste de phase repose sur le filtrage spatial.

C'est une technique qui a l'avantage de relier linéairement la variation de phase introduite par l'objet à l'intensité observée. L'hypothèse nécessaire à cette linéarité est : $\varphi(x,y) \ll 1$.

La transmittance de l'objet s'écrit : $t(x,y) = e^{j\varphi(x,y)} \approx 1 + j\varphi(x,y)$

L'onde après la traversée de l'objet possède un fond continu (le 1) qui sera focalisé au centre dans le plan focal de l'objectif. C'est le terme en rouge foncée représentant $\delta(u,v)$ sur la figure II-4. Les composants spectrales de $\varphi(x,y)$ dont le spectre $\tilde{\Phi}$, sont beaucoup moins intenses (en

rouge clair sur la figure). $\tilde{\Phi}$ est diffracté loin du centre à cause des hautes fréquences spatiales contenues dans l'objet (la bactérie possédant un indice différent du milieu dans lequel elle baigne, elle est aussi relativement de plus petite dimension que le champ éclairé).

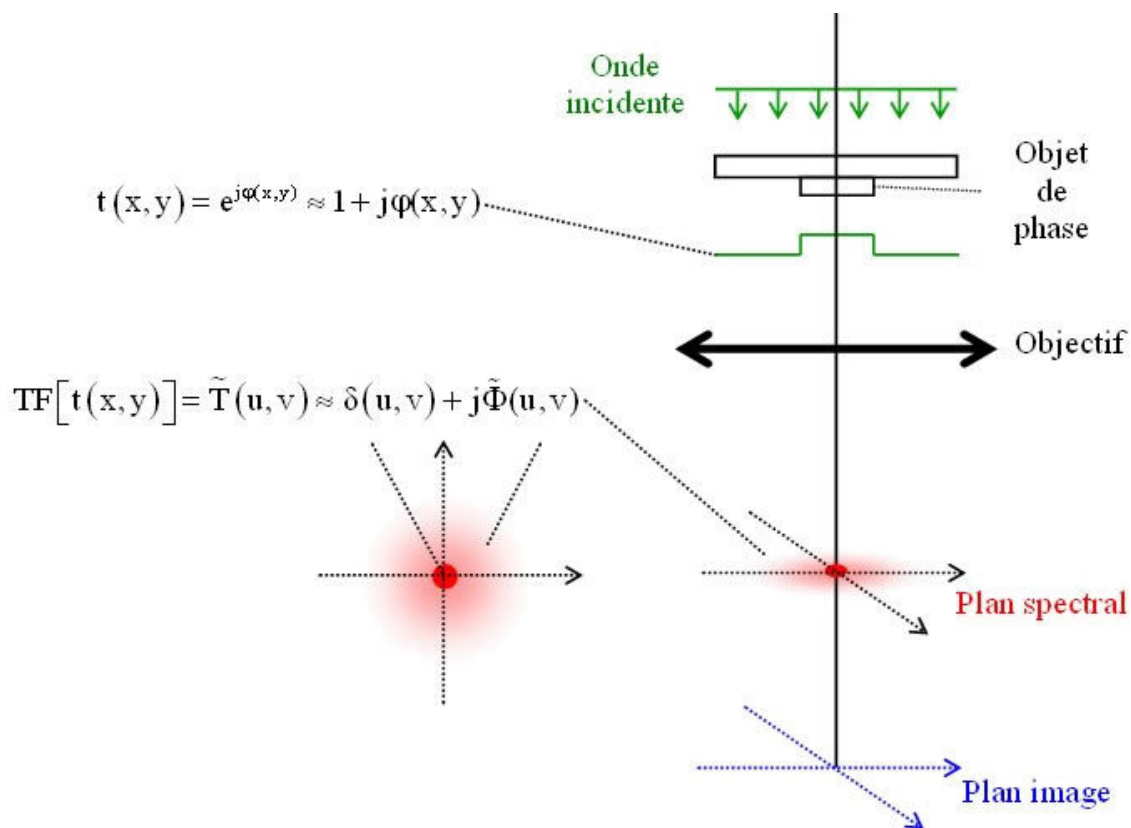


Figure II-4 : Schéma simplifié d'un microscope

Le filtrage spatial consiste à faire déphaser le fond continu (le δ dans le spectre) de $+\pi/2$ ou $-\pi/2$ par rapport à l'onde diffractée. Pour cela on dépose au centre d'une lame mince un diélectrique transparent (figure II-5).

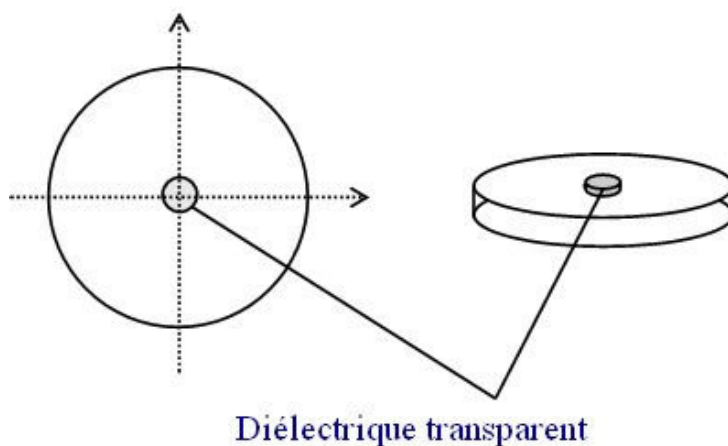


Figure II-5 : Dispositif servant au filtrage spatial avec un déphasage central induit par un diélectrique

Son épaisseur et son indice sont calculés pour produire un retard de phase de $+\pi/2$. Le spectre après la traversée de ce dispositif devient :

$$\tilde{T}(u, v) \approx j\delta(u, v) + j\tilde{\Phi}(u, v)$$

qui revient à multiplier le $\delta(u, v)$ par $j = \exp(j\pi/2)$.

L'intensité transmise (en négligeant φ^2) devient alors (voir figure II-6) :

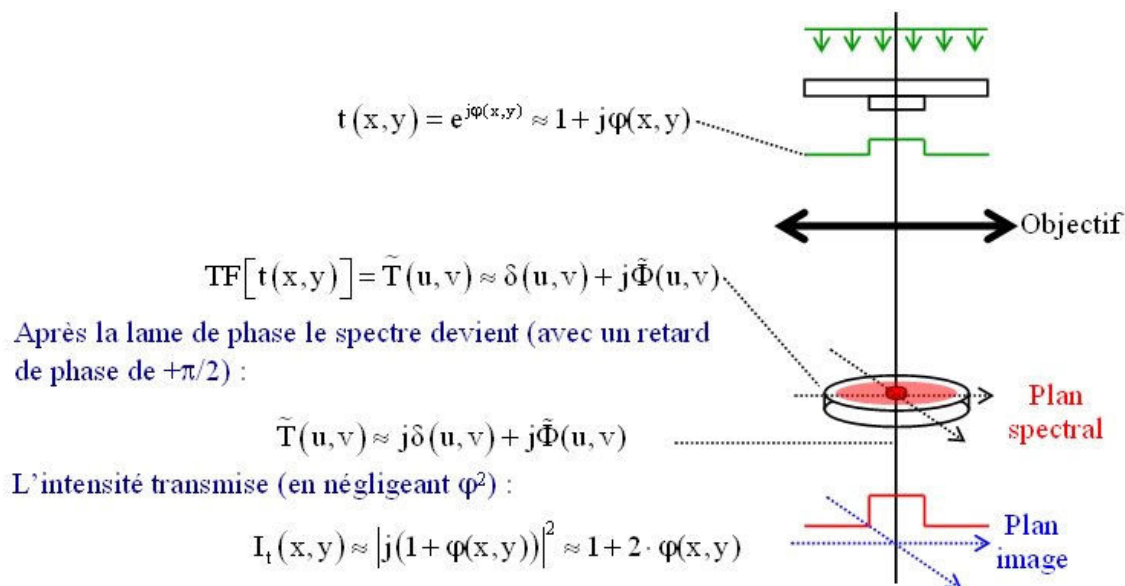
$$I_t(x, y) \approx |j(1 + \varphi(x, y))|^2 \approx 1 + 2 \cdot \varphi(x, y)$$


Figure II-6 : Schéma simplifié d'un microscope à contraste de phase avec son dispositif de filtrage

Si le retard de phase est de $+3\pi/2$ (on multiplie par $-j = \exp(j3\pi/2)$) :

$$I_t(x, y) \approx |j(-1 + \varphi(x, y))|^2 \approx 1 - 2 \cdot \varphi(x, y)$$

Ici on parle de contraste de phase négatif alors que pour le cas précédent le contraste de phase est positif.

Remarque

Il est possible d'améliorer le contraste de l'image en rendant la lame de phase partiellement absorbante pour diminuer l'intensité du fond continu.

3. Convolution sans déplacement par voie optique en incohérent

Plaçons deux transparences τ_1 et τ_2 respectivement contre les lentilles L_1 et L_2 comme indiquée sur la figure II-7.

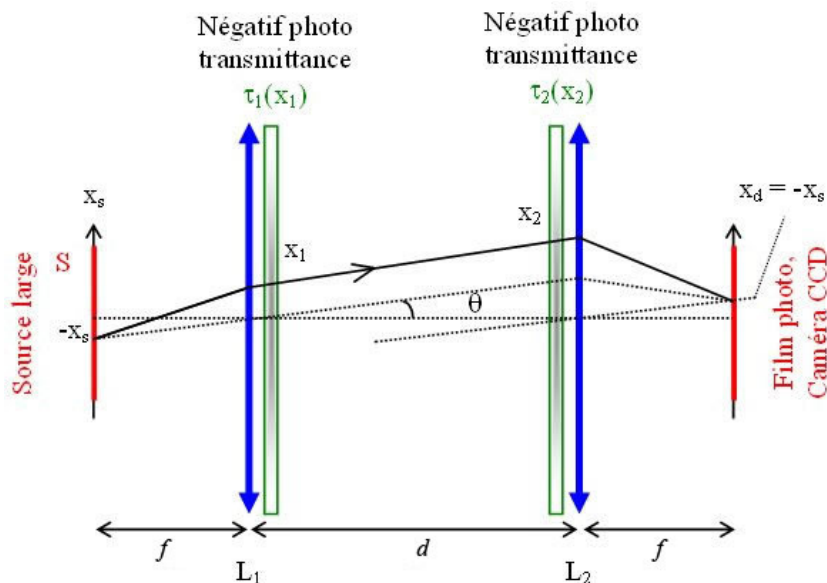


Figure II-7 : Convolution optique en éclairage incohérent. Trajet d'un rayon issu de la source large

Soit un rayon provenant de S une source large situé à $-x_s$, il émerge de L_1 en x_1 . La transmittance correspondante est $\tau_1(x_1)$. Il arrive sur L_2 en x_2 pour converger en x_d dans le plan du détecteur. $x_d = -x_s$ car les deux lentilles ont la même focale. L'intensité en ce point est :

$$I(x_s) = \tau_1(x_1) \tau_2(x_2)$$

$$\text{or } \operatorname{tg}(\theta) = \frac{x_s}{f} \Rightarrow x_2 = x_1 + \frac{d}{f}x_s \text{ donc}$$

$$I(x_s) = \tau_1(x_1) \tau_2\left(x_1 + \frac{d}{f}x_s\right)$$

$$\text{Soit } x = x_1 + \frac{d}{f}x_s \Rightarrow x_1 = x - \frac{d}{f}x_s \text{ donc}$$

Si on considère l'ondelette sphérique issue du même point source en $-x_s$, les rayons correspondant viennent tous se focaliser au même point $-x_d$ du détecteur qui fera la somme de toutes les intensités correspondant aux différents rayons (différents x) (voir figure II-8).

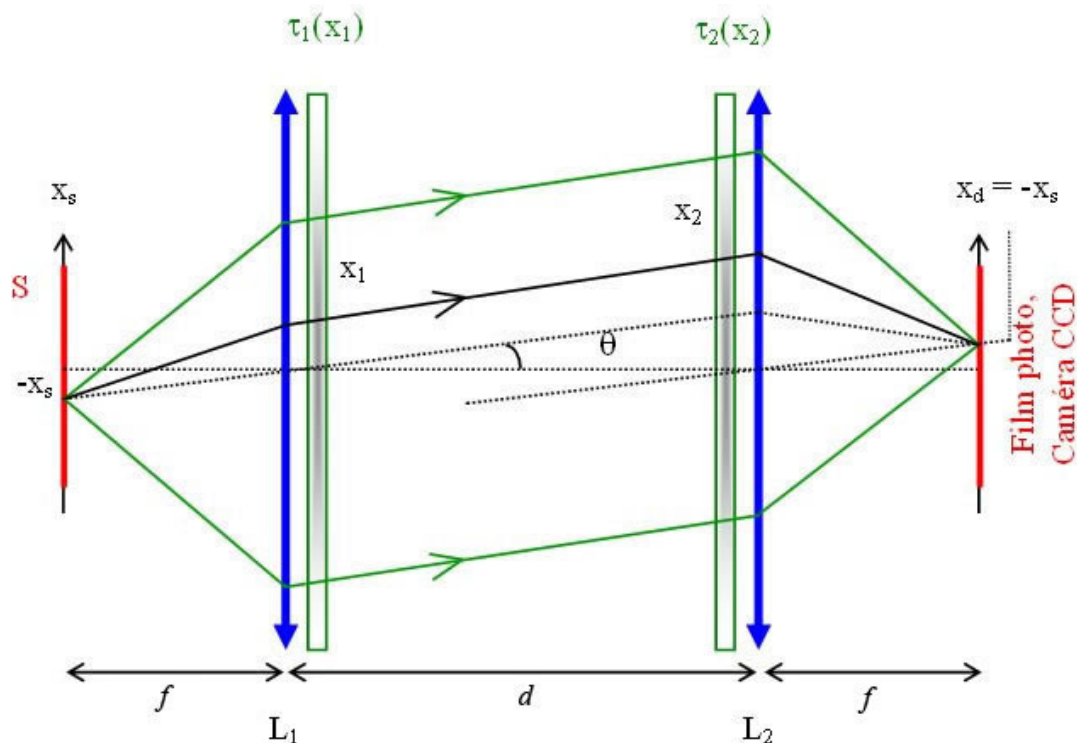


Figure II-8 : Trajet du faisceau optique issu d'un point source dans le dispositif de la figure II-7

$$I(x_s) = \int \tau_1 \left(x - \frac{d}{f} x_s \right) \tau_2(x) dx$$

La généralisation sur deux dimensions est immédiate :

$$I(x_s, y_s) = K \iint \tau_1 \left(x - \frac{d}{f} x_s, y - \frac{d}{f} y_s \right) \tau_2(x, y) dx dy$$

Remarque

Nous avons réalisé l'opération convolution bidimensionnelle par voie optique. Cette opération est relativement longue à faire encore aujourd'hui par voie numérique. La rapidité de l'exécution de cette opération est surtout liée au parallélisme inhérent aux méthodes optiques qui effectuent le traitement sur tous les points du plan (x, y) en même temps. Il suffit d'un seul top horloge du détecteur matriciel pour voir l'image de la convolution $(\tau_1 * \tau_2)$.

4. Synthèse d'un filtre passe bande en incohérent

Le spectre fréquentiel de l'intensité image s'écrit en incohérent (voir grain « Formation des images », partie: « Analyse fréquentielle des systèmes optiques formant des images »):

$$TF(I_i) = (\tilde{H} \otimes \tilde{H}) \cdot (G_g \otimes G_g)$$

\tilde{G}_g est le spectre de l'objet, \tilde{H} est la fonction de transfert cohérente avec :

$$\tilde{H}(u, v) = P(\lambda d_i u, \lambda d_i v)$$

Soient une pupille P_1 ayant la forme des fentes d'Young et \tilde{H}_1 la FTM du système comme indiquée sur la figure II-9.

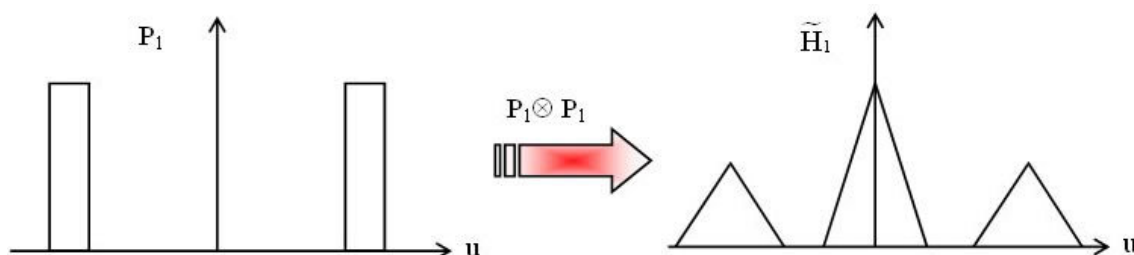


Figure II-9 : Fonction pupillaire et fonction de transfert correspondante d'un système imageur en incohérent

Supposons que l'on place une lame de phase de 180° ($e^{j\pi} = -1$) sur l'une des fentes ($e^{j\pi} = -1$), la *FTM* du système devient suite à l'autocorrélation composée d'un triangle central positif et de deux triangles latéraux négatifs comme indiqué sur la figure II-10.

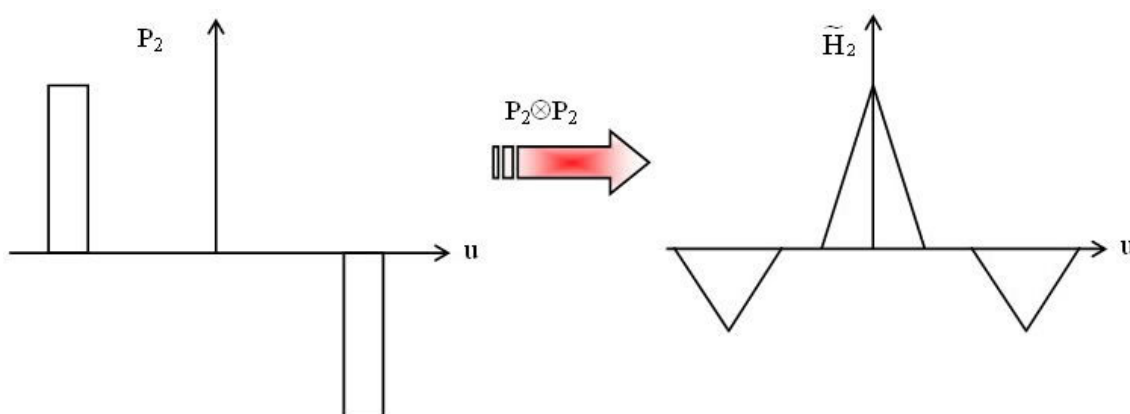


Figure II-10 : Fonction pupillaire lorsque l'on place une lame de phase de 180° sur l'une des fentes et la *FTM* correspondante

La soustraction de l'image obtenue par \tilde{H}_1 de l'image obtenue par \tilde{H}_2 donne :

$$\begin{aligned} TF(I_{i1}) - TF(I_{i2}) &= (P_1 \otimes P_1) \cdot (\tilde{G}_g \otimes \tilde{G}_g) - (P_2 \otimes P_2) \cdot (\tilde{G}_g \otimes \tilde{G}_g) \\ &= (\tilde{H}_1 - \tilde{H}_2) \cdot (\tilde{G}_g \otimes \tilde{G}_g) \\ &= \tilde{H}_{eff} \cdot (\tilde{G}_g \otimes \tilde{G}_g) \end{aligned}$$

On voit que pour cette *FTM* effective, (voir figure II-11) le fond continu et les basses fréquences spatiales ont disparu.

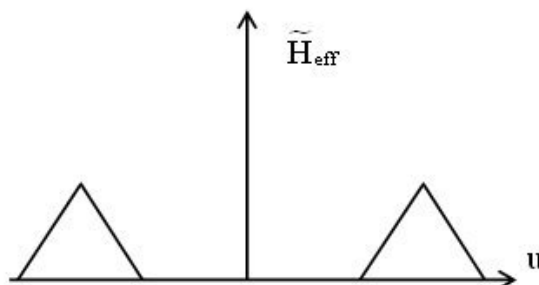


Figure II-11 : la *FTM* effective correspondant à la soustraction des spectres des images obtenues avec les *FTM* montrées dans les figures II-9 et II-10

Cette *FTM* est une fonction de transfert passe bande. L'image obtenue ne contient que les fréquences spatiales les plus hautes, les applications possibles concernent la détection des contours.

La soustraction en optique incohérente par voie optique est impossible à faire (les intensités sont positives et s'ajoutent toujours). Il est par contre possible de transformer les images incohérentes en images cohérentes à l'aide d'un SLM et faire l'interférence de ces deux images en rajoutant un déphasage de π à I_2 . Le résultat est une intensité représentant l'amplitude au carré de la différence. La synthèse d'autres *FTM* est possible pour plus de détails consultez la bibliographie [[Optical informations processing-Fundamentals]] .

5. Traitement optique de l'information en éclairage cohérent

5.1. Introduction

En éclairage cohérent les opérations de filtrage sont réalisées en manipulant directement l'amplitude complexe du spectre dans le plan de Fourier d'une lentille.

5.2. Architectures utilisées

Les systèmes cohérents, linéaires en amplitude complexe, sont capables de réaliser les opérations de la forme :

$$I(x, y) = K \left| \iint g(u, v) h(x-u, y-v) du dv \right|^2$$

Plusieurs configurations peuvent être utilisées pour réaliser ce type d'opérations.

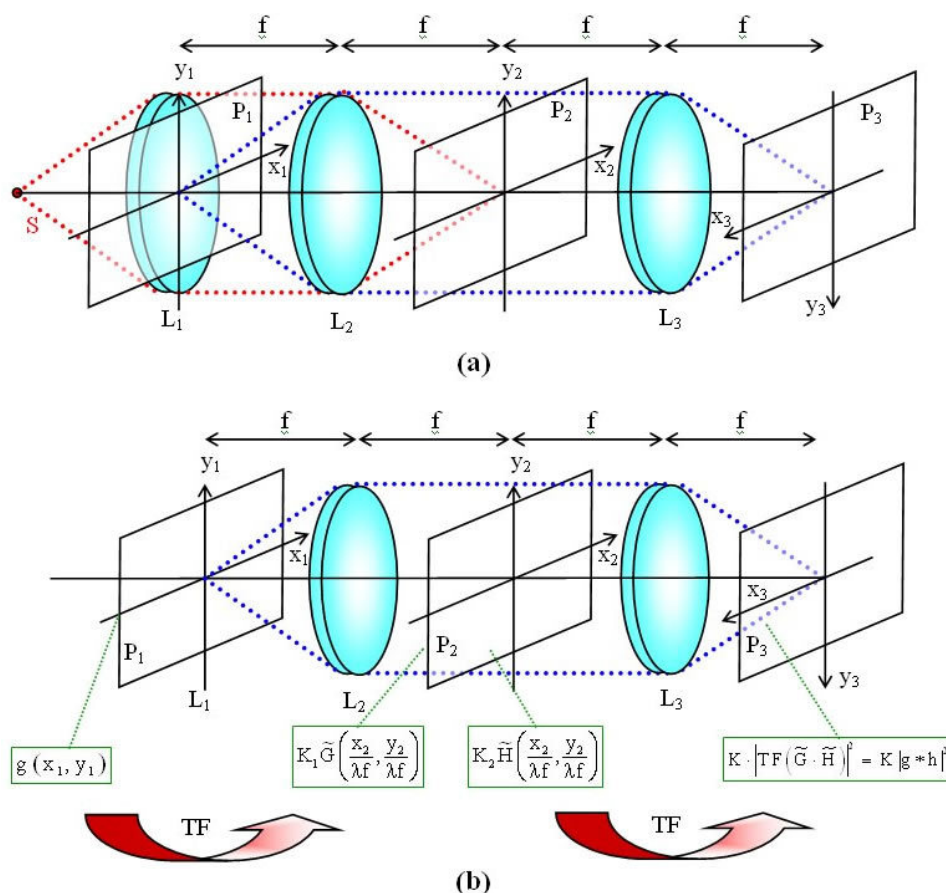


Figure II-12ab : (a) « Système 4-f » : architecture pour le traitement optique de l'information en cohérent. (b) La même figure qu'en (a) avec les grandeurs à l'entrée, dans le plan de Fourier et dans le plan de l'image

Dans la figure II-12(a) on peut voir l'architecture de filtrage la plus directe, nommée « système 4-f », car il y a 4 longueurs f séparant l'objet de l'image. La lentille L_1 sert à collimater le faisceau pour obtenir une onde plane à l'entrée du système (faisceau en rouge). L'objet à traiter est placé contre L_1 dans P_1 . Son image se trouve dans P_3 . A remarquer que le plan spectral (le plan de Fourier) est le plan contenant l'image de la source (faisceau en rouge).

Considérons une transparence à l'entrée comme illustrée sur figure II-12(b) (ayant une transmittance en amplitude $g(x_1, y_1)$). Ce plan est le plan focal objet de L_2 . Dans le plan focal image de cette lentille nous avons \tilde{G} le spectre de g . Soit \tilde{H} la fonction de transfert que l'on désire appliquer, on place dans P_2 un filtre de transmittance :

$$t_f(x_2, y_2) = K_2 \cdot \tilde{H}\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right)$$

Le champ après P_2 est donc $\tilde{G} \cdot \tilde{H}$. La lentille L_3 réalise la TF du spectre modifié dans le plan P_3 . C'est dans ce plan qu'on obtient l'image filtrée (traitée). A noter qu'on inverse les coordonnées dans le plan P_3 pour tenir compte du fait que l'image est inversée: $TF(TF(g(x_1))) = g(-x_1)$.

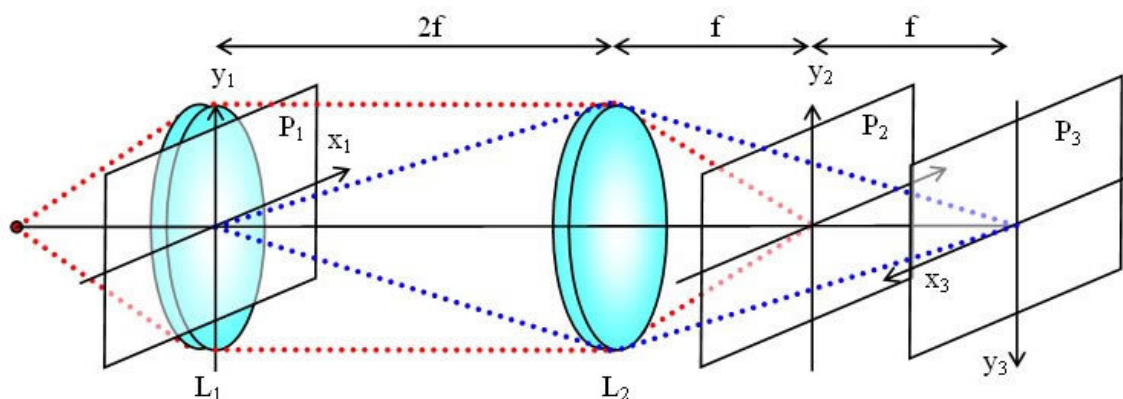


Figure II-13 : Deuxième architecture pour le traitement optique de l'information en cohérent

Dans cette deuxième architecture (voir figure II-13) nous avons la même longueur mais une lentille en moins. L_2 effectue à la fois la TF dans P_2 et l'image dans P_3 . A noter qu'ici le spectre est associé au facteur de phase quadratique $\exp(-jk(x_2^2 + y_2^2)/2f)$ puisque l'entrée n'est pas dans le plan focal objet (voire grain « formation des images », partie: « propriétés des lentilles relatives à la transformation de Fourier »).

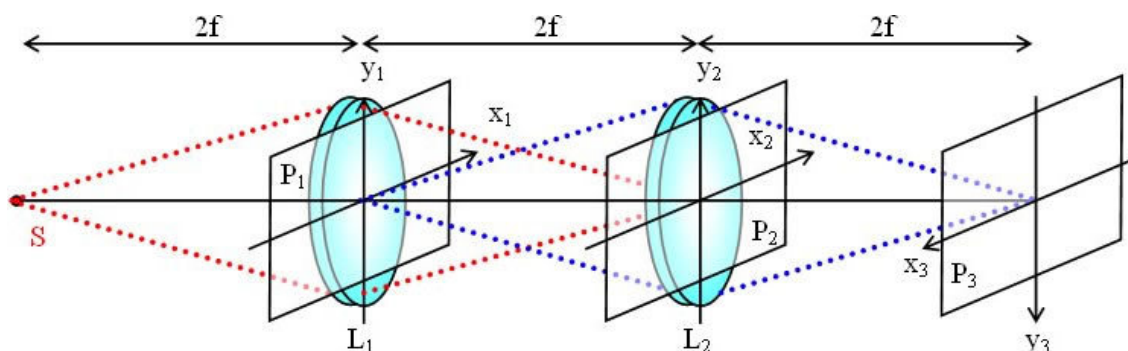


Figure II-14 : Troisième architecture pour le traitement optique de l'information en cohérent

Dans cette troisième et dernière architecture (voir figure II-14), on utilise toujours deux lentilles mais elle nécessite une longueur f supplémentaire ($6f$ au total). L_1 collecte la lumière et réalise la TF dans le plan P_2 (image de la source). Dans ce plan on place le filtre contre L_2 qui donne une image de P_1 dans P_3 . Dans cette configuration le terme de phase quadratique n'apparaît pas dans P_2 . En effet le calcul exact démontre que ce terme disparaît car l'onde qui éclaire P_1 est sphérique et contient le même terme de phase quadratique mais de signe contraire.

6. Le filtre de Vander Lugt (1963)

6.1. Introduction

Les filtres ainsi réalisés ont la propriété remarquable de permettre le contrôle efficace à la fois de l'amplitude et de la phase d'une fonction de transfert bien qu'ils ne soient formés que de figures purement absorbantes.

6.2. Réalisation de la fonction de transfert

Le **masque fréquentiel** (ou le **filtre de Vander Lugt**) est réalisé à l'aide d'un système interférométrique que l'on peut voir dans la figure II-15.

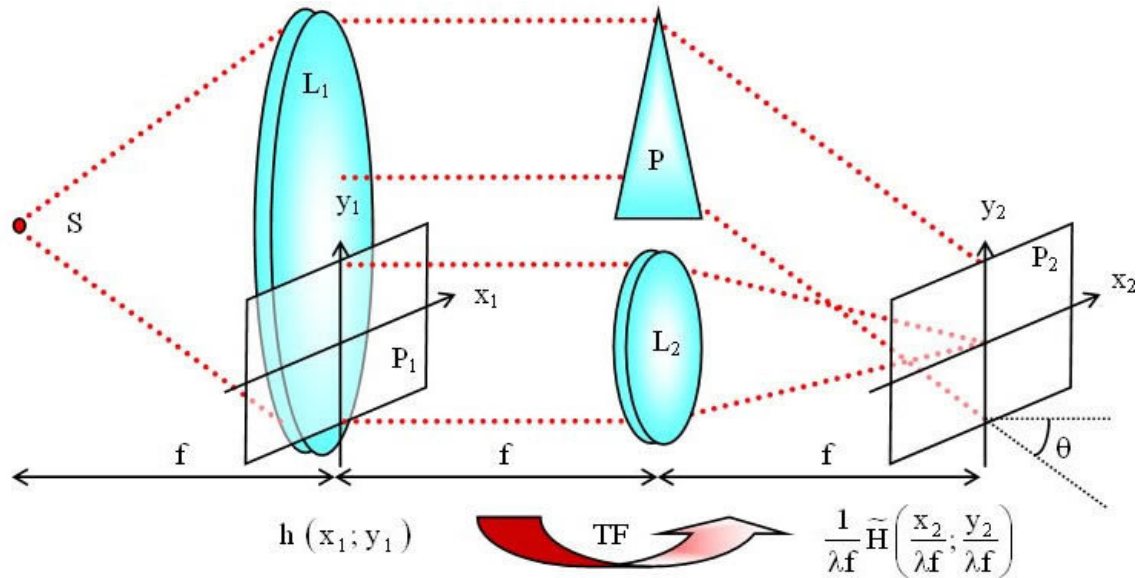


Figure II-15 : Réalisation du filtre de Vander Lugt par une méthode interférométrique

L'information codant la phase se trouve dans le terme d'interférence. L_1 sert de collimateur. Une partie de cette lumière tombe sur le plan P_1 dans lequel se trouve une transmittance en amplitude égale à la réponse impulsionnelle désirée h . La lentille L_2 réalise la TF de h sur le film placé dans P_2 . L'autre partie de la lumière traverse le prisme P et arrive sur P_2 sous incidence θ .

L'intensité incidente totale au niveau du film est déterminée par l'interférence de deux distributions d'amplitude (provenant de L_2 et de P). L'onde plane inclinée est représentée par son amplitude complexe dans le plan P_2 .

$$U_r(x_2, y_2) = r_0 e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_2} = r_0 e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (-\sin\theta \cdot \vec{j}_2 + \cos\theta \cdot \vec{k}_2) \cdot (x_2 \cdot \vec{i}_2 + y_2 \cdot \vec{j}_2)}$$

$$U_r(x_2, y_2) = r_0 e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta \cdot y_2}, \quad \text{en posant } \frac{\sin\theta}{\lambda} = \alpha \Rightarrow$$

$$U_r(x_2, y_2) = r_0 e^{-j2\pi\alpha \cdot y_2}$$

La distribution de l'intensité s'écrit donc :

$$I(x_2, y_2) = \left| r_0 e^{-j2\pi\alpha \cdot y_2} + \frac{1}{\lambda f} \tilde{H}\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \right|^2$$

$$I(x_2, y_2) = r_0^2 + \frac{1}{(\lambda f)^2} \left| \tilde{H}\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \right|^2 + \frac{r_0}{\lambda f} \tilde{H}\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \exp(j2\pi\alpha y_2) + \frac{r_0}{\lambda f} \tilde{H}^*\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \exp(-j2\pi\alpha y_2)$$

\tilde{H} étant complexe, on peut poser dans le cas général :

$$\tilde{H}\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) = A\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \exp\left[j\varphi\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right)\right]$$

Ce qui donne pour l'intensité :

$$I(x_2, y_2) = r_0^2 + \frac{A^2}{(\lambda f)^2} + \frac{2r_0}{\lambda f} A\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \cos\left(2\pi\alpha y_2 - \varphi\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right)\right)$$

Cette forme montre comment le procédé interférométrique permet d'enregistrer une fonction complexe sur un détecteur sensible à l'intensité. L'information relative à l'amplitude et à la phase est enregistrée sous forme d'une modulation d'amplitude et de phase d'une onde porteuse de haute fréquence qui est introduite par l'onde de « référence » inclinée provenant du prisme. Pour réaliser le filtre, on développe le film de telle sorte que sa transmittance en amplitude soit proportionnelle à l'intensité d'exposition : $t(x_2, y_2) \propto I(x_2, y_2)$

Dans le terme d'interférence (c.à.d. dans t) nous avons l'information requise pour réaliser le filtre de réponse impulsionnelle égale à h

Le problème qui reste est de montrer comment et sous quelles conditions on peut extraire cette information des autres termes présent dans I .

6.3. Traitement des données

Introduisons le masque \tilde{H} qu'on vient de réaliser dans le montage 4-f (dans le plan P2) (voir la figure II-16).

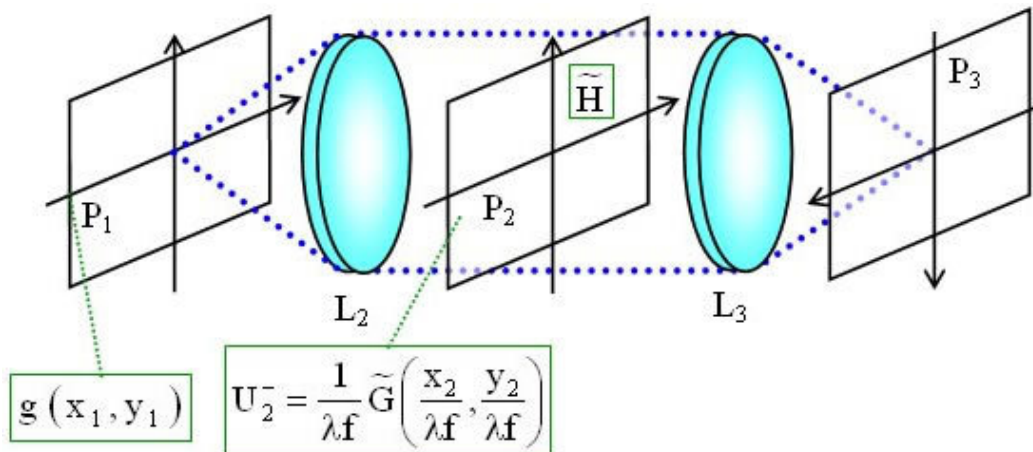


Figure II-16 : Traitement des données dans le système 4-f

Soit g la fonction d'entrée que l'on souhaite filtrer.

L'amplitude U_2 du champ transmis par le masque \tilde{H} s'écrit ($U_2 = t_2 \cdot \tilde{G}$):

$$U_2(x_2, y_2) \propto \frac{r_0^2}{\lambda f} \tilde{G} + \frac{1}{(\lambda f)^3} \tilde{G} \cdot |\tilde{H}|^2 + \frac{r_0}{(\lambda f)^2} \tilde{G} \cdot \tilde{H} \exp(j2\pi\alpha y_2) + \frac{r_0}{(\lambda f)^2} \tilde{G} \cdot \tilde{H}^* \exp(-j2\pi\alpha y_2)$$

L_3 réalise la TF de U_2 dans P_3 et sachant que $TF[\exp(j2\pi au)] = \delta(x+a, v)$, l'amplitude du champ s'écrit :

$$U_3(x_3, y_3) \propto r_0^2 g(x_3, y_3) + \frac{1}{(\lambda f)^2} \{h(x_3, y_3) * h^*(-x_3, -y_3) * g(x_3, y_3)\} \\ + \frac{r_0}{\lambda f} \{h(x_3, y_3) * g(x_3, y_3) * \delta(x_3, y_3 + \alpha \lambda f)\} + \frac{r_0}{\lambda f} \{h^*(-x_3, -y_3) * g(x_3, y_3) * \delta(x_3, y_3 - \alpha \lambda f)\}$$

Remarque

L_2 divise l'amplitude du spectre par λf et réduit les coordonnées par λf suivant chaque axe. L_3 divise toujours l'amplitude du spectre par λf mais remet cette fois-ci les coordonnées à la même échelle. Le théorème de similitude nous dit qu'il faut multiplier par $(\lambda f)^2$. Au total, le résultat revient à multiplier par λf .

Sachant que δ est l'élément neutre du produit de convolution avec lequel on effectue une translation suivant y_3 le troisième et quatrième terme deviennent:

$$U_3(x_3, y_3) \propto r_0^2 g(x_3, y_3) + \frac{1}{(\lambda f)^2} \{h(x_3, y_3) * h^*(-x_3, -y_3) * g(x_3, y_3)\} \\ + \frac{r_0}{\lambda f} \underbrace{\{h(x_3, y_3) * g(x_3, y_3) * \delta(x_3, y_3 + \alpha \lambda f)\}}_{\iint h(x_3 - u, y_3 + \alpha \lambda f - v) g(u, v) du dv} + \frac{r_0}{\lambda f} \underbrace{\{h^*(-x_3, -y_3) * g(x_3, y_3) * \delta(x_3, y_3 - \alpha \lambda f)\}}_{\iint h^*(u - x_3, v - y_3 + \alpha \lambda f) g(u, v) du dv}$$

Ce terme donne le produit de convolution de
h par g centré au point de coordonnées
(0, $-\lambda \alpha f$)

Ce terme donne le produit d'intercorrélation
de h par g centré au point de coordonnées
(0, $\lambda \alpha f$)

Les deux premiers termes centrés à l'origine n'ont pas d'intérêt particulier pour le filtrage. Dans P_3 on observe trois régions où l'amplitude est différente de 0. Ces régions ne se recouvrent pas si $\lambda f \alpha$ est suffisamment grand devant l'étendue spatiale de h et de g (voir figure II-17).

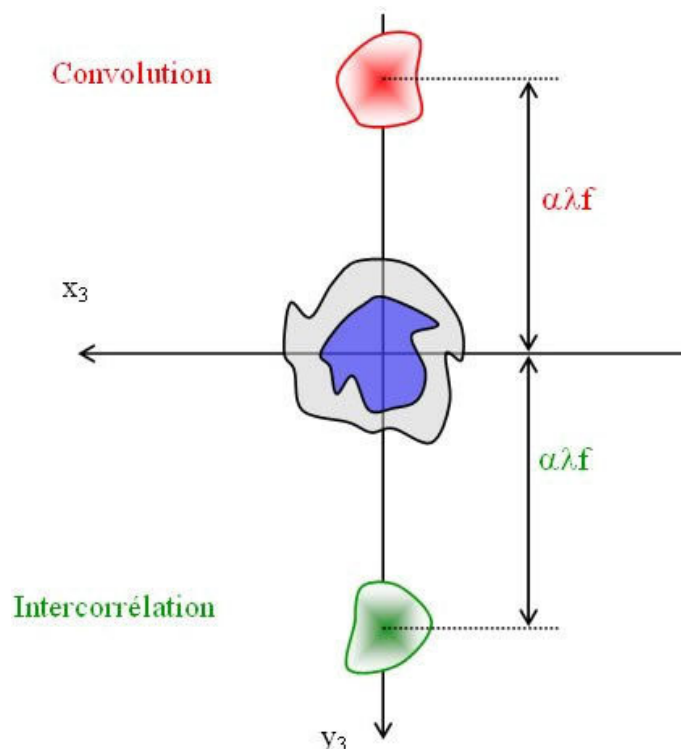


Figure II-17 : Position des différents termes à la sortie du processeur optique

Ici l'avantage principal de ce filtre est de réaliser une fonction de transfert à valeurs complexes avec un filtre absorbant. La transmittance de phase dans le plan de Fourier est plus simple à réaliser techniquement (pas de contrôle de dimension, d'épaisseur ou d'indice).

6.4. Application à la reconnaissance des formes

Il s'agit de reconnaître l'emplacement d'une lettre (le P) présentée à l'entrée d'un système 4-f parmi différentes lettres (trois dans cet exemple).

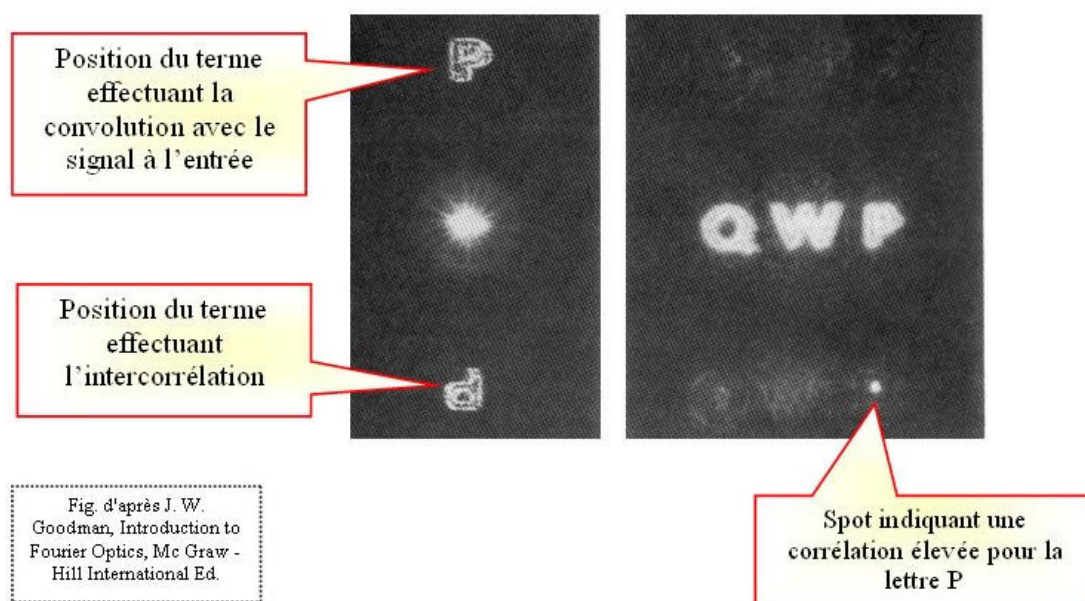


Figure II-18 : Reconnaissance optique du caractère P

On peut voir dans la figure II-18 l'image de la réponse impulsionnelle d'un filtre de Vander Lugt (à gauche) qui sera introduit dans le plan de filtrage. La réponse de ce filtre aux lettres Q ,

W et P (image de droite) à la sortie du système. A noter la présence du spot intense en dessous de P (au niveau du terme d'intercorrélacion) indiquant un degré de ressemblance élevé entre cette lettre et le filtre choisi.

Il faut noter que l'inconvénient principal d'une telle méthode de reconnaissance utilisant la transformation de Fourier est sa grande sensibilité à la rotation et au changement d'échelle. D'autres transformées (telle que celle de Mellin) offre une sensibilité moindre au grandissement [[Practical holography]].

7. Corrélateur à transformée conjointe (Weaver et Goodman 1966)

(En anglais The joint transform correlator). Comme pour le filtre de Vander Lugt, on réalise à l'aide de cette méthode des corrélacions et des convolutions. La différence vient du fait que la réponse impulsionnelle souhaitée et les données à filtrer sont présentes simultanément pendant l'enregistrement (voir figure II-19).

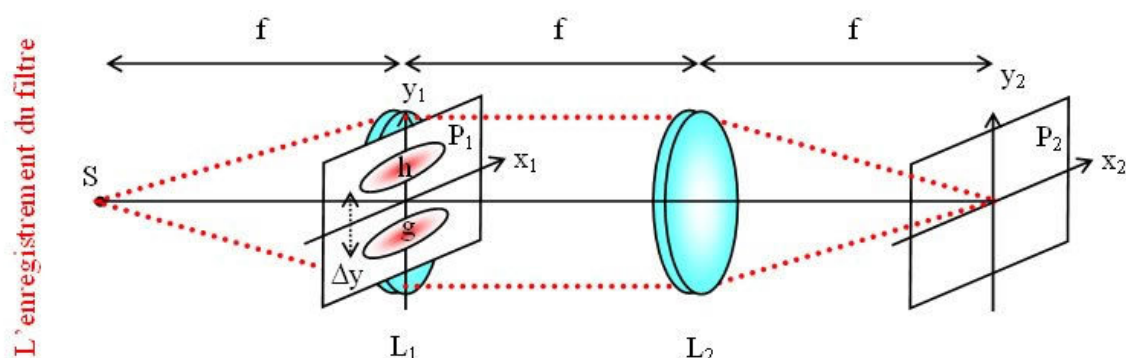


Figure II-19 : Corrélateur avec une transformée jointe

L_1 envoie une onde plane qui éclaire deux transparencies : h pour la réponse impulsionnelle désirée et g pour les données d'entrée à filtrer. On note Δy la distance entre les centres de h et de g . Le signal composite présent à l'entrée s'écrit :

$$U_1(x_1, y_1) = h\left(x_1, y_1 - \frac{\Delta y}{2}\right) + g\left(x_1, y_1 + \frac{\Delta y}{2}\right)$$

Dans P_2 on réalise la TF du signal précédent. L'amplitude du champ s'écrit :

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{1}{\lambda f} \tilde{H}\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) e^{-j \frac{\pi y_2 \Delta y}{\lambda f}} + \frac{1}{\lambda f} \tilde{G}\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) e^{+j \frac{\pi y_2 \Delta y}{\lambda f}}$$

Le SLM ou le film servant à l'enregistrement est sensible à :

$$I(x_2, y_2) = \frac{1}{(\lambda f)^2} \left\{ |\tilde{H}|^2 + |\tilde{G}|^2 + \tilde{H} \tilde{G}^* \cdot e^{-j \frac{2\pi y_2 \Delta y}{\lambda f}} + \tilde{G} \tilde{H}^* \cdot e^{j \frac{2\pi y_2 \Delta y}{\lambda f}} \right\}$$

Dans le cas où c'est un film, le négatif résultant est supposé avoir une transmittance en amplitude proportionnelle à I l'intensité d'exposition.

Le film est ensuite placé dans le plan P_2 du montage de la figure II-20 où L_2 effectue la TF dans P_3 .

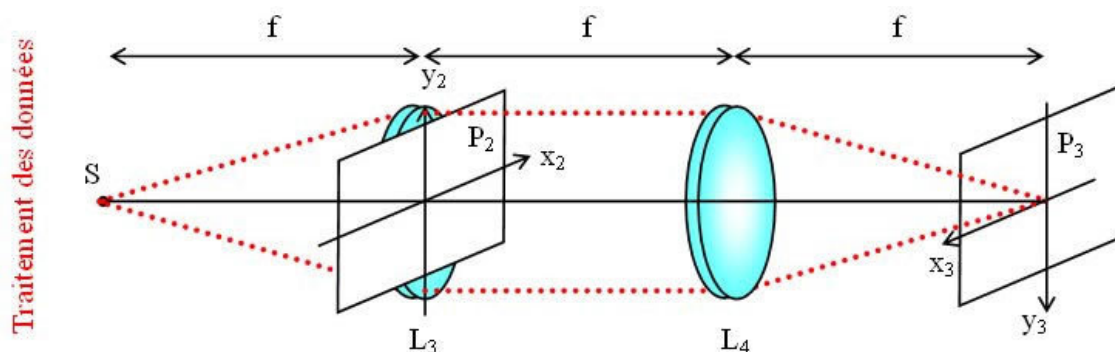


Figure II-20 : Montage servant au traitement des données enregistrées avec le corrélateur de la figure II-19

L'amplitude du champ dans ce plan s'écrit :

$$U(x_3; y_3) = \frac{1}{(\lambda f)} [h(x_3; y_3) * h^*(-x_3; -y_3) + g(x_3; y_3) * g^*(-x_3; -y_3) \\ + h(x_3; y_3) * g^*(-x_3; -y_3) * \delta(x_3; y_3 - \Delta y) + h^*(-x_3; -y_3) * g(x_3; y_3) * \delta(x_3; y_3 + \Delta y)] \\ \iint h(u, v) g^*(u - x_3, v - y_3 + \Delta y) du dv \quad \iint h^*(u - x_3, v - y_3 - \Delta y) g(u, v) du dv$$

Ces deux derniers termes représentent le produit d'intercorrélacion de h par g centré aux points de coordonnées $(0, \pm\Delta y)$. L'un de ces termes peut être vu comme l'image de l'autre à travers un miroir placé sur l'axe optique.

L'avantage de ce système est qu'il n'est pas nécessaire d'aligner le filtre dans le plan de Fourier comparé à la méthode de Vander Lugt.

Un autre avantage non négligeable est de pouvoir utiliser cette dernière approche en temps réel en plaçant un SLM dans le plan P_1 , un matériau photoréfractif dans P_2 et une caméra CCD dans P_3 .

8. Multiplication matrice-vecteur

Soit l'opération suivante à effectuer :

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ g_m \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & h_{1n} \\ h_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & h_{2n} \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ h_{m1} & \cdot & \cdot & \cdot & h_{mn} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ s_n \end{bmatrix}$$

Un processeur incohérent entièrement parallèle de multiplication matrice-vecteur est illustré dans la figure II-21.

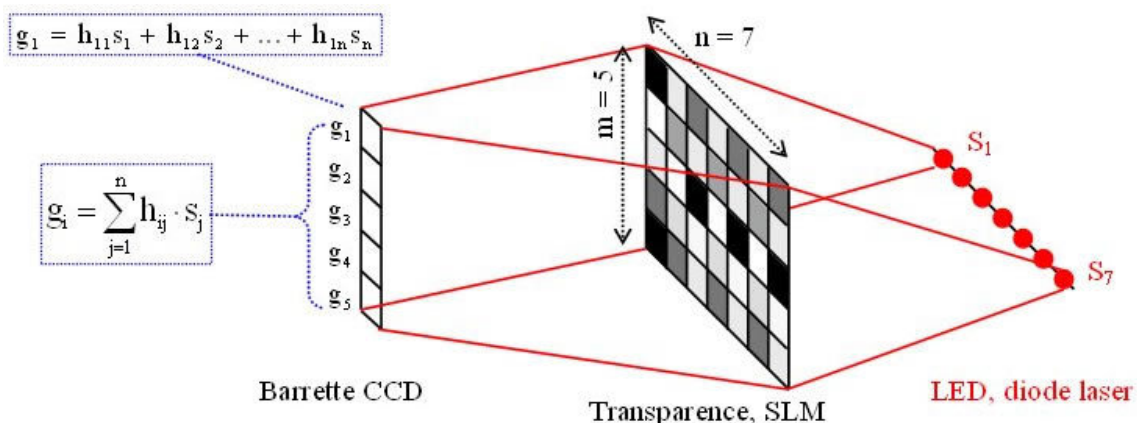


Figure II-21 : Multiplicateur matrice-vecteur

Dans cette figure on omet temporairement les détails des éléments optiques utilisés. L'intensité de la source S_i est proportionnelle aux éléments des vecteurs s_i . Alors que la transmittance de la cellule h_{ij} dans le SLM est proportionnelle à l'élément h_{ij} de la matrice. Le $i^{\text{ème}}$ élément de la barrette CCD en sortie reçoit une intensité lumineuse proportionnelle au signal :

$$g_i = \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot s_j$$

Ce qui représente le résultat de la multiplication.

Pour que les faisceaux puissent se répandre verticalement et se focaliser horizontalement suivant des nappes on utilise une combinaison de lentilles sphériques et cylindriques accolées de même focales (voir figure II-22).

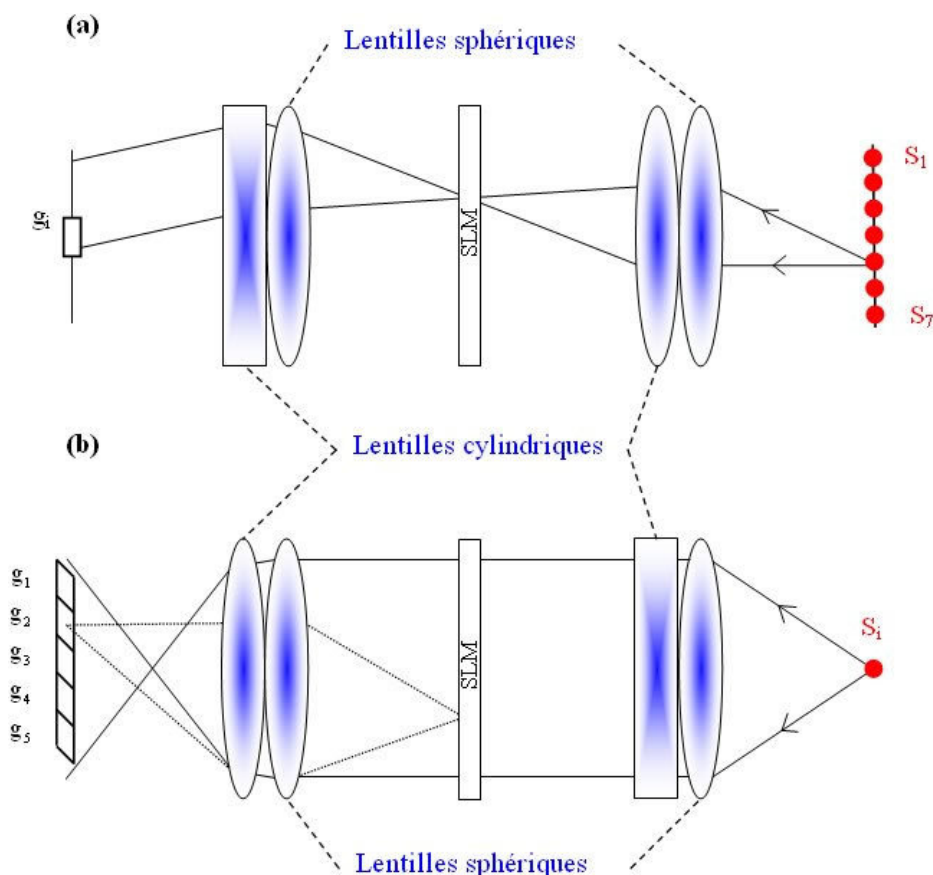


Figure II-22 : Eléments optiques formants le multiplicateur matrice-vecteur. Les rectangles représentent les lentilles cylindriques dans la direction où la lumière ne converge pas

Cette combinaison possède une focale de $f/2$ dans la direction où la lentille cylindrique fait converger les rayons, et une focale de f dans la direction où la lentille cylindrique n'a aucune action. Ainsi on peut voir dans la figure II-22(a) que pour une nappe horizontale les sources sont imagées dans le plan contenant le SLM. Ensuite le faisceau est collimaté puisque la deuxième lentille cylindrique, tournée de 90° par rapport à la première, n'a aucune puissance convergente dans cette direction la focale équivalente de la deuxième paire de lentilles est de f . La vue de côté montrée dans la figure II-22(b) montre comment d'abord le faisceau est collimaté suivant une nappe verticale et ensuite à l'aide de la deuxième paire de lentilles on fait l'image de chaque colonne du SLM dans la barrette.

Remarque

- Ici le calcul se fait en parallèle. En un cycle horloge on envoie les données et on récupère le produit $1 \text{ cycle} \approx 10 \text{ ns}$ ce qui explique la rapidité du calcul.

9. Photo floue

Si une photo est floue à cause d'un « bougé » ou lorsqu'elle est prise à partir d'un avion de vitesse V (ou d'un satellite), il est possible d'effectuer un filtrage inverse pour la rendre plus nette.

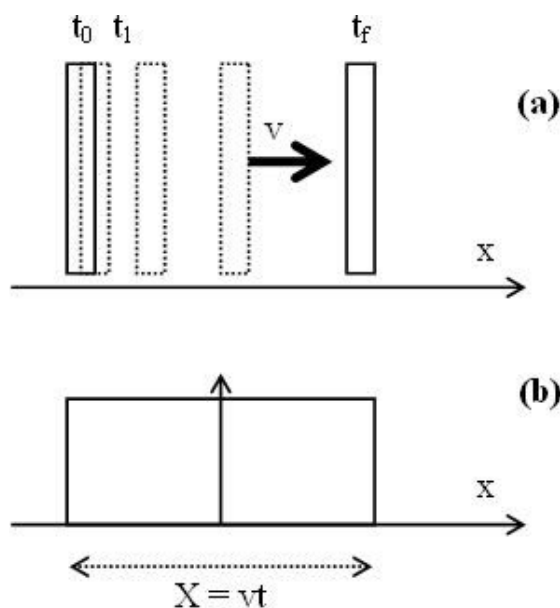


Figure II-23 : (a) Position de la pupille d'entrée pendant le temps d'exposition $t = t_f - t_0$. (b) Pupille d'entrée équivalente

En négligeant la fonction de transfert optique, l'image est donnée par (voir figure II-23) :

$$I = O * \text{rect}\left(\frac{x}{X}\right)$$

où X représente la largeur équivalente d'une fonction rectangle définie par le produit entre la vitesse et le temps d'exposition $t = t_p - t_0$.

En effectuant la TF , il vient :

$$TF(I) \propto TF(O) \cdot \text{sinc}(X \cdot u)$$

$$TF(O) \propto \frac{TF(I)}{\text{sinc}(X \cdot u)}$$

$$O \propto TF^{-1}\left\{\frac{TF(I)}{\text{sinc}(X \cdot u)}\right\}$$

Cette opération est appelée **filtrage inverse** ou **déconvolution**. Le même procédé peut être utilisé lorsqu'il y a un défaut de mise au point. Néanmoins une difficulté existe au niveau des zéros présents dans la fonction sinus cardinal. L'objet ainsi déconvolué à l'aide du lobe central ne contient pas les hautes fréquences spatiales. La résolution spatiale se trouve amoindrie.

* *
*

En conclusion, même si les processeurs optiques pour le traitement d'images ont atteint une certaine maturité et un point culminant en termes d'activité de recherche, ils n'ont pas connu

l'essor industriel espéré, la compétition avec les processeurs numériques étant très rude. Cependant, ces travaux sur le traitement optique ont permis de multiples retombées positives pour le développement d'algorithmes et de nouvelles méthodes d'imagerie [[Tome1_Chapitre05.pdf]].

Dans le futur, il s'agira de déterminer les applications susceptibles de bénéficier d'un apport de l'optique et de proposer de nouvelles architectures sûrement hybrides associant un traitement optique avec un traitement électronique. Les applications potentielles concernent le secteur biomédical, la défense, l'accès aux données multimédia et la sécurité pour n'en citer que quelques-unes.

III. Etude de cas

1. Application à la reconnaissance des caractères

La reconnaissance des caractères constitue une application particulière du traitement optique. Comme nous le verrons, cette application constitue un excellent exemple de cas où les opérations de traitement ont des réponses impulsionnelles simples, mais pas nécessairement des fonctions de transfert simples. La technique de synthèse de Vander Lugt est donc particulièrement bien adaptée à cette application.

1.1. Le filtre adapté

Le concept de filtre adapté joue un rôle important dans les problèmes de reconnaissance des caractères.

Définition

Par définition, un filtre linéaire spatialement invariant est dit adapté au signal particulier $s(x, y)$ si sa réponse impulsionnelle $h(x, y)$ est donnée par :

$$h(x, y) = s^*(-x, -y)$$

Si on applique un signal d'entrée $g(x, y)$ à un filtre adapté à $s(x, y)$, on trouve un signal de sortie $v(x, y)$ de la forme :

$$\begin{aligned} v(x, y) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x-\alpha, y-\beta) g(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s^*(\alpha-x, \beta-y) g(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \end{aligned}$$

où l'on reconnaît le produit d'intercorrélation des fonctions g et s .

Historiquement, la notion de filtre adapté est d'abord apparue dans le domaine de la détection des signaux; si on a à détecter un signal de forme connue, noyé dans un bruit «blanc», l'utilisation d'un filtre adapté permet de réaliser une opération linéaire qui rend maximal le rapport de la puissance instantanée du signal (à un instant donné) à la puissance moyenne du bruit. Cependant, dans l'application présente, les caractères seront supposés ne pas contenir de bruit, et l'utilisation d'un mode particulier de filtrage se justifie différemment.

L'interprétation optique donnée par la figure EC1 permet de mieux comprendre le mécanisme du filtrage adapté.

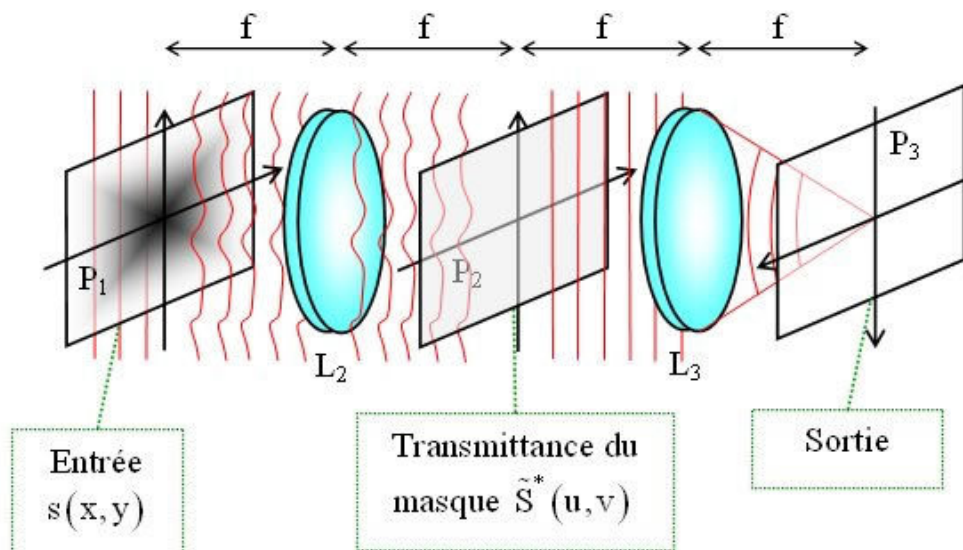


Figure EC-1 : Interprétation optique du filtrage adapté

Supposons que l'on ait à réaliser un filtre adapté au signal d'entrée $s(x,y)$ au moyen d'un masque fréquentiel disposé dans le plan spectral d'un système classique de traitement cohérent. La transformation de Fourier de la réponse impulsionnelle (Eq. (1)) montre que la fonction de transfert nécessaire est :

$$\tilde{H}(u,v) = \tilde{S}^*(u,v)$$

Où $\tilde{H}(u,v) = TF[h(x,y)]$ et $\tilde{S}(u,v) = TF[s(x,y)]$. Le masque fréquentiel doit donc avoir une transmittance en amplitude proportionnelle à \tilde{S}^* .

Considérons à présent la nature particulière de l'amplitude de l'onde transmise par le masque lorsqu'on applique le signal s (auquel le filtre est adapté) à l'entrée du système. Ce masque reçoit une amplitude complexe proportionnelle à \tilde{S} et transmet une distribution proportionnelle à $\tilde{S}\tilde{S}^*$. Cette dernière quantité est réelle, ce qui implique que le masque fréquentiel compense exactement la courbure de l'onde incidente \tilde{S} . L'amplitude complexe transmise représente donc une onde plane que la dernière lentille du système transforme en une tache brillante dans le plan de sortie du système. Lorsqu'on applique un signal d'entrée autre que $s(x,y)$, la courbure de l'onde n'est pas, en général, compensée par le masque fréquentiel et la lumière transmise n'est plus concentrée en une tache brillante par la dernière lentille. On conçoit alors qu'on puisse détecter la présence du signal s en mesurant l'intensité lumineuse dans le plan focal de la dernière lentille du système. (Si le signal d'entrée s n'est pas centré à l'origine, la tache brillante dans le plan de sortie se déplace d'une distance égale à la distance du centre du signal s à l'axe).

1.2. Exemple de problème de reconnaissance de caractères.

Considérons le problème particulier suivant : le signal d'entrée g du système de traitement est constitué par l'un quelconque de N caractères possibles s_1, s_2, \dots, s_N et on se propose de déterminer lequel de ces caractères constitue effectivement le signal g . Comme nous allons le montrer, le processus d'identification peut être réalisé en appliquant le signal d'entrée à une série de N filtres, chacun d'eux étant adapté à l'un des caractères pouvant constituer le signal d'entrée (voir figure EC2).

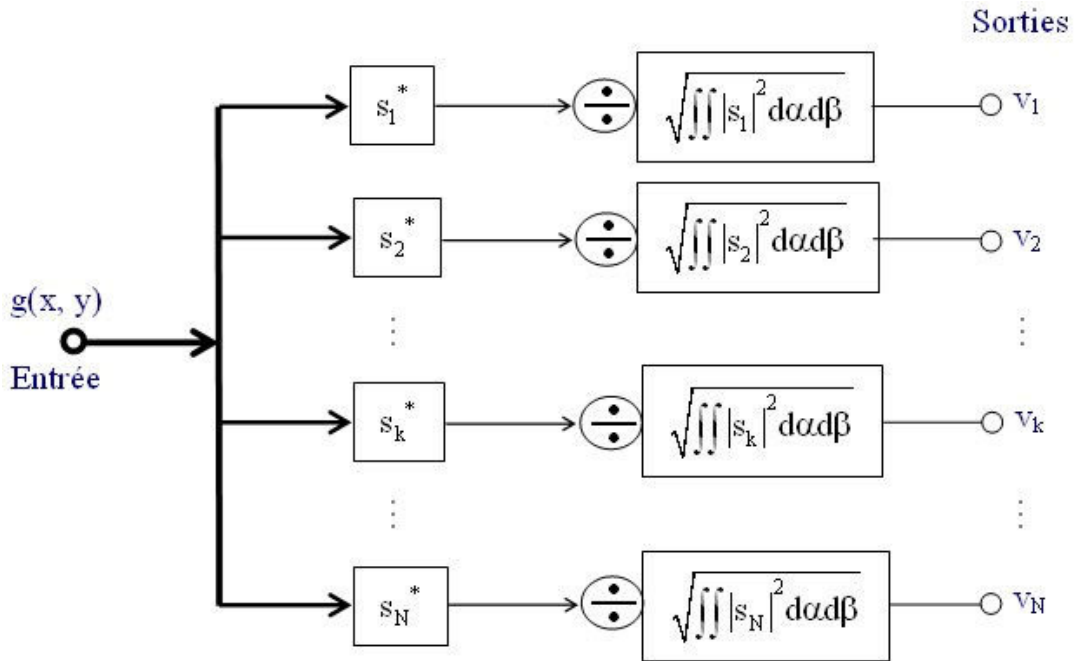


Figure EC-2 : Schéma-bloc d'un système de reconnaissance de caractère

La figure EC2 représente un schéma-bloc d'un dispositif de reconnaissance. Le signal d'entrée est appliqué simultanément (ou successivement) aux N filtres adaptés de fonctions de transfert $\tilde{S}_1^*, \tilde{S}_2^* \dots \tilde{S}_N^*$. La réponse à chacun des filtres est normalisée par la racine carrée de l'énergie totale correspondant au caractère auquel il est adapté. Cette normalisation, qui peut être réalisée par voie électronique après détection des signaux sortant des filtres, tient compte du fait que les divers caractères servant de signal d'entrée ne laissent généralement pas passer la même énergie. Enfin, on compare les carrés des modules des signaux de sortie $|v_1|^2, |v_2|^2, \dots |v_N|^2$ en chacun des points où on pense trouver les maxima des signaux de sortie (on suppose ainsi que le caractère auquel ils sont adaptés est présent dans chaque cas). Nous allons montrer maintenant que, si le caractère particulier s_k est effectivement présent dans le signal d'entrée, c'est-à-dire si $g(x, y) = s_k(x, y)$ la valeur $|v_k|^2$ correspondante est la plus élevée des N réponses.

En effet, notons d'abord que, d'après l'Eq. (2), le maximum du signal de sortie v_k du filtre adapté qui convient est donné par:

$$|v_k|^2 = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_k|^2 d\alpha d\beta \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_k|^2 d\alpha d\beta} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_k|^2 d\alpha d\beta$$

D'autre part, la réponse $|v_n|^2$ avec $n \neq k$, d'un filtre adapté à un caractère différent de s_k est donnée par:

$$|v_n|^2 = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s_k s_n^* d\alpha d\beta \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_n|^2 d\alpha d\beta}$$

En utilisant l'inégalité de Schwarz, nous pouvons écrire:

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s_k s_n^* d\alpha d\beta \right|^2 \leq \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_k|^2 d\alpha d\beta \right] \cdot \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_n|^2 d\alpha d\beta \right]$$

On en déduit aisément:

$$|v_n|^2 \leq \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_k|^2 d\alpha d\beta = |v_k|^2$$

l'égalité étant réalisée si et seulement si:

$$s_n(x, y) = \kappa \cdot s_k(x, y)$$

Ce résultat montre donc que le filtre adapté fournit un moyen de reconnaître, parmi un lot de caractères possibles, lequel est réellement présenté au système.

IV.Exercice

1. Test de connaissances

Filtrage et traitement optique du signal

Répondre aux questions suivantes

Question 1

[Solution n°1 p 40]

La méthode d'observation des objets de phase dite du «champ sombre» consiste à placer un petit écran opaque dans le plan focal image de la lentille formant l'image de l'objet, pour arrêter la lumière non diffractée. En supposant que les variations de phase de l'objet sont toujours très inférieures à 1 rad , déterminer l'intensité de l'image observée en fonction des variations de phase de l'objet.

Question 2

[Solution n°2 p 40]

Trouver une expression donnant l'intensité de l'image dans un microscope à contraste de phase quand la lame de phase correspondant au filtre de Zernicke est aussi partiellement absorbante avec une transmittance en intensité égale à α (pour simplifier le problème on prendra une pupille du système imageur infinie).

Question 3

[Solution n°3 p 41]

On utilise la méthode de Vander Lugt pour réaliser un filtre fréquentiel. Comme l'indique la figure TC1, on place le cliché «signal» de transmittance en amplitude $s(x,y)$ contre une lentille convergente (au lieu de le placer dans son plan focal objet) et la plaque photographique enregistre l'intensité lumineuse dans le plan focal image.

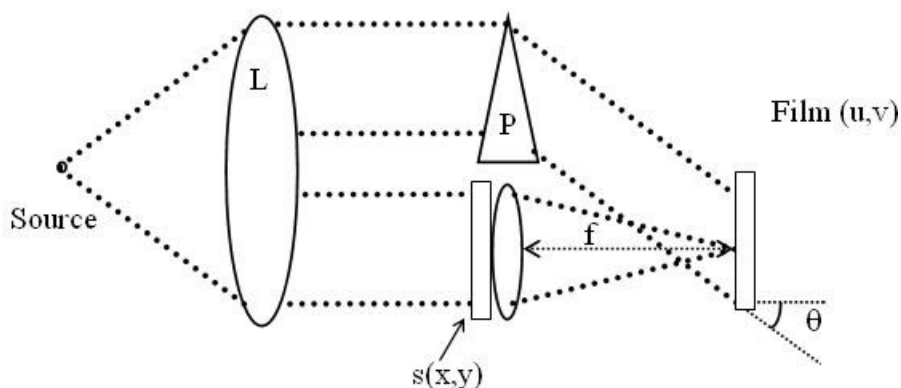


Figure TC-1 : Réalisation d'un filtre suivant la méthode de Vander Lugt.

On fait en sorte que la transmittance en amplitude du cliché développé soit proportionnelle à l'intensité d'exposition et on place ce cliché dans le système de la figure TC2.

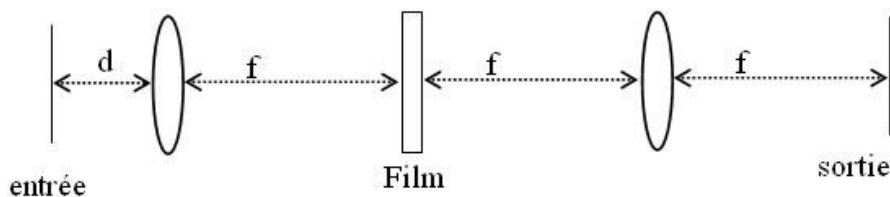


Figure TC2 : Traitement des données : l'objet est placé à une distance d de la première lentille

En examinant dans chaque cas la partie du plan de sortie qui convienne, quelle doit être la distance d entre le plan d'entrée et la première lentille pour réaliser :

- a) un filtre de réponse impulsionnelle $s(x, y)$?
- b) un filtre de réponse impulsionnelle $s * (-x, -y)$?

Solution des exercices

>Solution n°1 (exercice p. 38)

La transmittance de l'objet de phase s'écrit :

$$t(x, y) = e^{j\varphi(x, y)} \approx 1 + j\varphi(x, y)$$

dans le plan focal de la lentille, l'amplitude du champ est proportionnelle à :

$$TF[t(x, y)] = \tilde{T}(u, v) \approx \delta(u, v) + j\tilde{\Phi}(u, v)$$

en arrêtant la lumière non diffractée à l'aide d'un écran opaque, le champ devient :

$$T(u, v) \approx j\tilde{\Phi}(u, v)$$

L'intensité dans le plan image s'écrit alors :

$$I_i(x, y) \approx |j\varphi(x, y)|^2 \approx \varphi(x, y)^2$$

>Solution n°2 (exercice p. 38)

Le contraste de phase repose sur le filtrage spatial.

L'hypothèse nécessaire est que l'objet de phase présente un déphasage faible : soit $\varphi(x, y) \ll 1 \text{ rad}$. Dans ces conditions

$$t(x, y) = e^{j\varphi(x, y)} \approx 1 + j\varphi(x, y)$$

Dans le plan spectral :

$$TF[t(x, y)] = \tilde{T}(u, v) \approx \delta(u, v) + j\tilde{\Phi}(u, v)$$

Après la lame de phase le spectre devient (avec un retard de phase de $+\pi/2$ et une transmittance en intensité égale à α)

$$\tilde{T}(f_x, f_y) \approx j\sqrt{\alpha}\delta(u, v) + j\tilde{\Phi}(u, v)$$

En faisant la TF pour passer dans le plan de l'image, l'intensité transmise (en négligeant φ^2) :

$$I_t(x, y) \approx |j(\sqrt{\alpha} + \varphi(x, y))|^2 \approx \alpha + 2\sqrt{\alpha}\cdot\varphi(x, y)$$

>Solution n°3 (exercice p. 38)

L'onde focalisé par la lentille s'écrit (objet placé contre la lentille : présence de la courbure de phase quadratique devant le spectre de s) :

$$U_f(u, v) = \frac{e^{j\frac{k}{2f}[u^2+v^2]}}{j\lambda f} \int_{-\infty}^{+\infty} \int s(x, y) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda f}[xu, yv]} dx dy$$

$$U_f(u, v) = \frac{e^{j\frac{k}{2f}[u^2+v^2]}}{j\lambda f} \tilde{S}\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right)$$

L'onde qui provient du prisme (onde plane incliné à θ) s'écrit :

$$U_r(u, v) = r_0 e^{-j2\pi\alpha v} ; \text{ avec } \frac{\sin\theta}{\lambda} = \alpha$$

L'intensité enregistrée par le film sera donc (interférence des ondes précédentes) :

$$I(u, v) = \left| r_0 e^{-j2\pi\alpha v} + \frac{e^{j\frac{k}{2f}[u^2+v^2]}}{j\lambda f} \tilde{S}\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right) \right|^2$$

Après développement la transmittance du négatif s'écrit :

$$t(u, v) = t_1(u, v) + t_2(u, v) + t_3(u, v) + t_4(u, v)$$

avec

$$t_1(u, v) + t_2(u, v) = r_0^2 + \frac{1}{(\lambda f)^2} \left| \tilde{S}\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right) \right|^2$$

$$t_3(u, v) = + \frac{r_0}{j\lambda f} e^{j\frac{k}{2f}[u^2+v^2]} \tilde{S}\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right) \exp(j2\pi\alpha v)$$

$$t_4(u, v) = - \frac{r_0}{j\lambda f} e^{-j\frac{k}{2f}[u^2+v^2]} \tilde{S}^*\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right) \exp(-j2\pi\alpha v)$$

Pour voir la réponse impulsionnelle à la sortie il faut placer un point source à l'entrée $\delta(x, y)$.

Dans le plan juste avant le film (cliché développé) l'amplitude du champ s'écrit (objet placé à une distance d devant la lentille) :

$$\begin{aligned} U_f(u, v) &= \frac{1}{j \lambda f} \cdot TF(\delta) \cdot e^{j \frac{k}{2f}(u^2+v^2)(1-\frac{d}{f})} \\ &= \frac{1}{j \lambda f} \cdot e^{j \frac{k}{2f}(u^2+v^2)(1-\frac{d}{f})} \end{aligned}$$

a) Après passage dans le film de transmittance en amplitude proportionnelle à $I(u, v)$, l'amplitude du champ juste après le film dû à t_3 s'écrit :

$$U_{f3} = \left[\frac{1}{j \lambda f} \cdot e^{j \frac{k}{2f}(u^2+v^2)(1-\frac{d}{f})} \right] \left[\frac{r_0}{j \lambda f} e^{j \frac{k}{2f}[u^2+v^2]} \tilde{S}\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right) \exp(j 2 \pi \alpha v) \right]$$

en regroupant les arguments des exponentielles représentant la courbure de phase quadratique :

$$U_{f3} = - \left[\frac{r_0}{(\lambda f)^2} \cdot e^{j \frac{k}{2f}(u^2+v^2)(1-\frac{d}{f}+1)} \right] \left[\tilde{S}\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right) \exp(j 2 \pi \alpha v) \right]$$

$$U_{f3} = - \left[\frac{r_0}{(\lambda f)^2} \cdot e^{j \frac{k}{2f}(u^2+v^2)(2-\frac{d}{f})} \right] \left[\tilde{S}\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right) \exp(j 2 \pi \alpha v) \right]$$

Dans le plan de sortie on va trouver la TF de ce terme. En mettant $d = 2f$ on annule le terme de phase quadratique et on retrouve $s(x, y)$ translaté sur $y(TF[\exp(j 2 \pi \alpha v)] = \delta(x, y + \alpha))$

b) En suivant la même démarche l'amplitude du champ dû à t_4 s'écrit :

$$U_{f4} = \left[\frac{1}{j \lambda f} \cdot e^{j \frac{k}{2f}(u^2+v^2)(1-\frac{d}{f})} \right] \left[-\frac{r_0}{j \lambda f} \cdot e^{-j \frac{k}{2f}[u^2+v^2]} \tilde{S}^*\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right) \exp(-j 2 \pi \alpha v) \right]$$

$$U_{f4} = \left[\frac{r_0}{(\lambda f)^2} \cdot e^{-j \frac{k}{2f}(u^2+v^2)\frac{d}{f}} \right] \tilde{S}^*\left(\frac{u}{\lambda f}; \frac{v}{\lambda f}\right) \exp(-j 2 \pi \alpha v)$$

En mettant cette fois-ci $d = 0$, on retrouve $s^*(-x, -y)$ translaté cette fois dans l'autre sens par rapport à la question précédente.

Bibliographie

[Introduction to Fourier Optics] GOODMAN J. W., *Introduction to Fourier Optics*, Mc Graw-Hill International Editions, -, 1996.

[Optical and Electro-optical Information Processing] TIPPETT J. T., TIPPETT AL., *Optical and Electro-optical Information Processing*, The M.I.T. Press., Cambridge, Mass., 1965.

[Optical informations processing-Fundamentals] LEE S. H., *Optical informations processing-Fundamentals*, Springer-Verlag, Berlin, 1981.

[OpticalProcessing of Information] POLLACK D. K, KOESTER C., TIPPETT (EDS.) J. T., *OpticalProcessing of Information*, Spartan Books, Inc, Baltimore Md, 1963.

[Optical signal processing] VANDER LUGT A. B., *Optical signal processing*, 1992, N.Y, John Wiley and Sons.

[Optical signal Processing] HORNER J., *Optical signal Processing*, Orlando, Fl, Orlando, Fl, 1988.

[Practical holography] SAXBY G., *Practical holography*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1988.

[Spatial light modulator technology] DEKKER MARCEL, *Spatial light modulator technology*, U. Efron Editor, NY, 1994.

Webographie

[Tome1_Chapitre05.pdf] *Tome1_Chapitre05.pdf*, www.recherche.gouv.fr/rapport/optique/Tome1_Chapitre05.pdf
(consultation 01 Janvier 2007).

Crédit des ressources

Figure I-1 : Structure d'un film photo ou d'une plaque holographique *p. 5*

G Boudebs

Figure I-2 : Processus d'exposition du film photo à la lumière *p. 5*

G Boudebs

Figure I-3 : Courbe H-D typique d'un film photo *p. 6*

G Boudebs

Figure I-4 : Comparaison des courbes H-D de deux négatifs à fort et à faible contraste *p. 6*

G Boudebs

Figure I-5 : Le contraste du négatif γ en fonction du temps de développement *p. 7*

G Boudebs

Figure I-6 : Profil spatial de l'intensité incidente sur le film *p. 8*

G Boudebs

Figure I-7 : Profil spatial de l'intensité effectivement enregistrée sur le film *p. 9*

G Boudebs

Figure I-8 : Fonction de transfert de modulation (FTM) typique d'un négatif *p. 10*

G Boudebs

Figure I-9 : Arrangements moléculaires pour différents types de cristaux liquides. Quand il le faut, les couches ont été séparées pour plus de clarté. *p. 11*

G Boudebs

Figure I-10 : (a) Arrangements moléculaires dans une cellule à cristaux liquides lorsque les directions de polissages des couches d'alignement sont perpendiculaires. (b) Alignement des axes moléculaires avec le champ électrique. *p. 12*

G Boudebs

Figure I-11 : En l'absence de champ électrique l'intensité de la lumière réfléchiée par la cellule est nulle. *p. 12*

G Boudebs

Figure I-12 : En présence d'un champ électrique suffisant l'intensité de la lumière réfléchiée par la cellule est maximale. *p. 13*

G Boudebs

Figure II-1 : Schéma simplifié représentant les expériences d'Abbe et Porter. Image de la grille et composantes spectrales dans le plan focal *p. 14*

G Boudebs

Figure II-2 : Aspect de l'image avec une fente placée à l'horizontale *p. 15*

G Boudebs

Figure II-3 : Aspect de l'image avec une fente retournée à la verticale *p. 15*

G Boudebs

Figure II-4 : Schéma simplifié d'un microscope *p. 16*

G Boudebs

Figure II-5 : Dispositif servant au filtrage spatial avec un déphasage central induit par un diélectrique *p. 16*

G Boudebs

Figure II-6 : Schéma simplifié d'un microscope à contraste de phase avec son dispositif de filtrage *p. 17*

G Boudebs

Figure II-7 : Convolution optique en éclairage incohérent. Trajet d'un rayon issu de la source large *p. 18*

G Boudebs

Figure II-8 : Trajet du faisceau optique issu d'un point source dans le dispositif de la figure II-7 *p. 19*

G Boudebs

Figure II-9 : Fonction pupillaire et fonction de transfert correspondante d'un système imageur en incohérent *p. 20*

G Boudebs

Figure II-10 : Fonction pupillaire lorsque l'on place une lame de phase de 180° sur l'une des fentes et la FTM correspondante *p. 20*

G Boudebs

Figure II-11 : la FTM effective correspondant à la soustraction des spectres des images obtenues avec les FTM montrées dans les figures II-9 et II-10 *p. 20*

G Boudebs

Figure II-12ab : (a) « Système 4-f » : architecture pour le traitement optique de l'information en cohérent. (b) La même figure qu'en (a) avec les grandeurs à l'entrée, dans le plan de Fourier et dans le plan de l'image *p. 22*

G Boudebs

Figure II-13 : Deuxième architecture pour le traitement optique de l'information en cohérent *p. 23*

G Boudebs

Figure II-14 : Troisième architecture pour le traitement optique de l'information en cohérent *p. 23*

G Boudebs

Figure II-15 : Réalisation du filtre de Vander Lugt par une méthode interférométrique *p. 24*

G Boudebs

Figure II-16 : Traitement des données dans le système 4-f *p. 25*

G Boudebs

Figure II-17 : Position des différents termes à la sortie du processeur optique *p. 27*

G Boudebs

Figure II-18 : Reconnaissance optique du caractère P *p. 27*

G Boudebs

Figure II-19 : Corrélateur avec une transformée jointe *p. 28*

G Boudebs

Figure II-20 : Montage servant au traitement des données enregistrées avec le corrélateur de la figure II-19 *p. 29*

G Boudebs

Figure II-21 : Multiplicateur matrice-vecteur *p. 30*

G Boudebs

Figure II-22 : Éléments optiques formants le multiplicateur matrice-vecteur. Les rectangles représentent les lentilles cylindriques dans la direction où la lumière ne converge pas *p. 31*

G Boudebs

Figure II-23 : (a) Position de la pupille d'entrée pendant le temps d'exposition $t = t_f - t_0$. (b) Pupille d'entrée équivalente *p. 32*

G Boudebs

Figure EC-1 : Interprétation optique du filtrage adapté *p. 35*

G Boudebs

Figure EC-2 : Schéma-bloc d'un système de reconnaissance de caractère *p. 36*

G Boudebs

Figure TC-1 : Réalisation d'un filtre suivant la méthode de Vander Lugt. *p. 38*

G Boudebs

Figure TC2 : Traitement des données : l'objet est placé à une distance d de la première lentille *p.* 38

G Boudebs