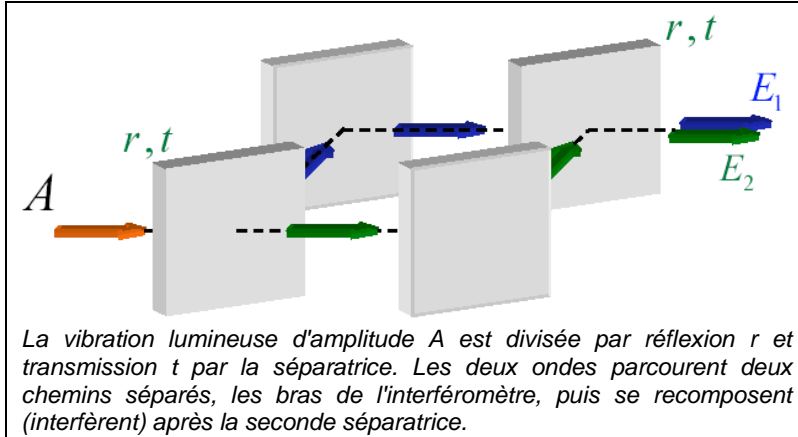


Marbre m7 - m8

INTRODUCTION – PRINCIPES

L'**interféromètre de Mach-Zehnder** est un des plus employé pour la mesure d'épaisseurs et de profils. On le rencontre sous différentes formes et différentes tailles suivant l'application à laquelle il est destiné (*cadre 1*).



cadre 2 : principe de l'interféromètre de Mach-Zehnder.

On se propose d'en étudier le principe, de réaliser un montage de laboratoire puis de le mettre en œuvre pour la mesure de **l'épaisseur de lames de verre** et la mesure de **profils d'objets transparents**. On étudiera alors ses performances en les comparant à celles des systèmes industriels.

Après un réglage minutieux des deux bras de l'interféromètre, on obtiendra des **franges annulaires** d'interférences.

Dans la première application, l'inclinaison d'une lame de verre, va modifier l'un des chemins optiques (**bras de mesure**) par rapport à l'autre (**bras de référence**); on verra défilier les anneaux. Le décompte des anneaux permettra ensuite de connaître l'épaisseur de la lame.

Dans une seconde application, on cherchera à obtenir une "**teinte plate**" garante de l'identité de forme des **surfaces d'ondes** de référence et de mesure. On placera alors dans le bras de mesure un objet d'étude (miroir, lentille, cavité, objets de phase présentant des défauts ...). Sa présence modifiera la surface d'onde du bras de mesure et fera apparaître des franges. L'étude de l'interférogramme renseignera sur les caractéristiques géométriques, optiques ou les défauts de l'objet.

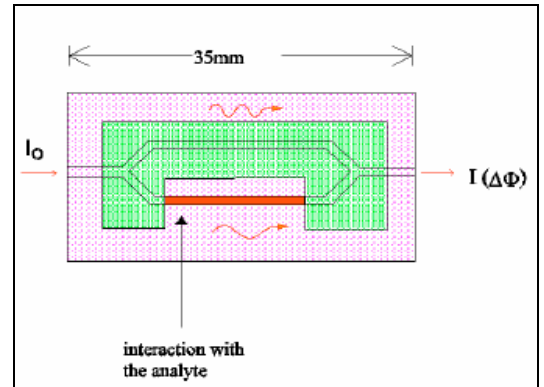
1. Interféromètre de Mach-Zehnder

La lentille L forme une source quasi ponctuelle S

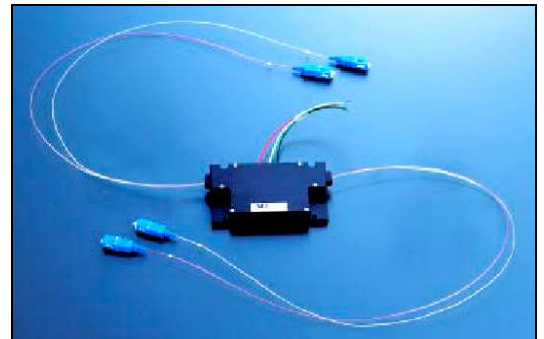
Compléter le schéma (*cadre 4*) en représentant S' l'image de S à travers CSp .

On appelle S_1 l'image de S à travers M et S_2 l'image de S' donnée par M' .

On appelle S'_2 l'image de S_2 donnée par Sp et S'_1 l'image de S_1 donnée par Sp .



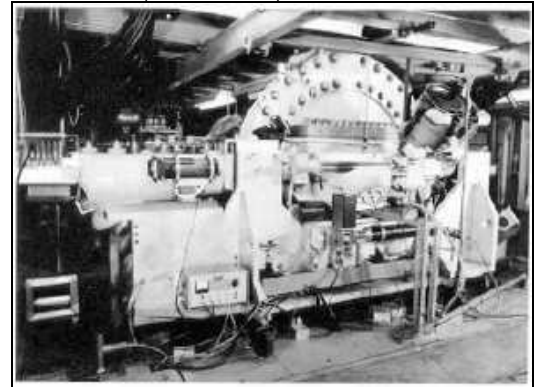
Mach-Zehnder en optique intégrée pour la détection d'hydrocarbures dans l'air.



Mach-Zehnder à fibres optiques.

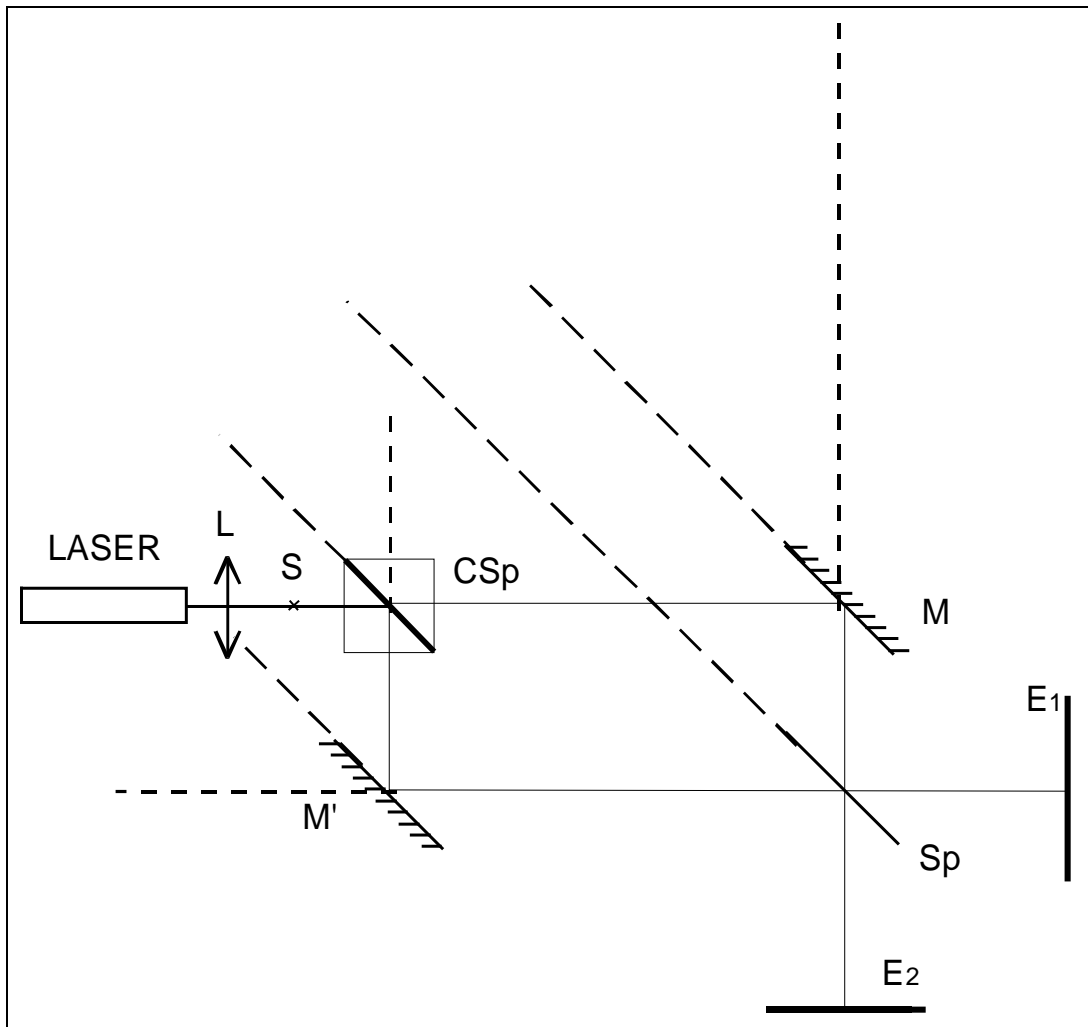


l Interféromètre de Mac-Zehnder pour le contrôle de microlentilles (Zeiss - Odem).



Mach-Zehnder pour le contrôle des plasmas.

cadre 1 : Exemples d'interféromètre de Mach-Zehnder de 35 mm à 3,5 m.



cadre 4 : Interféromètre de Mach-Zehnder. **Schéma à compléter**

En E_1 , on observe un système d'interférences à deux ondes. Quelles en sont les sources images responsables ?

Quelle forme de franges observe-t-on lorsque ces deux sources sont rigoureusement alignées le long de $M'Sp$?

Quelle forme de franges observe-t-on lorsqu'elles sont décalées perpendiculairement à l'axe $M'Sp$?

Rq Un rappel théorique sur l'interférométrie à deux ondes est disponible dans le dossier 8LP_Mach_doc : **Interférences à 2 ondes.pdf**.

2. Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre

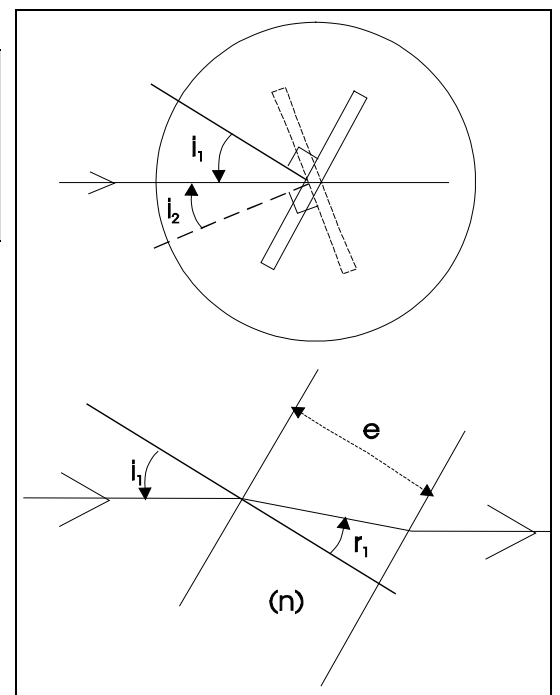
2.1 Méthode

La différence de chemin optique entre les deux bras est la différence de marche.

Repérer sur l'écran E_1 ou E_2 une frange nommée N^1 . Lorsque la lame tourne, nous observons le défilement de la frange N^1 à la frange N^N ; soit $(N - 1)$ interfranges.

Lorsque $(N - 1)$ interfranges ont défilé, la différence de marche a varié de δ_1 à δ_2 .

La variation est $\delta = \delta_2 - \delta_1$.



cadre 3 : la lame tourne, l'incidence passe de i_1 à i_2 .

$$\delta = (N - 1) \lambda \quad (1)$$

La variation de chemin optique sera obtenue en mettant la lame en rotation. Le rayon incident devra passer de part et d'autre de la normale à la lame.

Entre ces deux positions angulaires de la lame, le faisceau passe de l'incidence i_1 à l'incidence i_2 (voir *cadre 3*).

La variation de différence de marche est alors donnée par :

$$\delta = e[n(\cos r_2 + \cos r_1 - 2) - (\cos i_2 + \cos i_1 - 2)] \quad (2)$$

avec :

$$r_1 = \text{Arc sin}\left(\frac{\sin i_1}{n}\right) \quad (3) \quad r_2 = \text{Arc sin}\left(\frac{\sin i_2}{n}\right) \quad (4)$$

Nous utiliserons des lames de verre d'indice $n = 1,5$ d'épaisseur e à déterminer.

Nous compterons le nombre d'interfranges (ou fraction de d'interfrange) ayant défilé entre deux positions angulaires déterminées i_1 et i_2 .

La source est un laser He-Ne ($\lambda = 0,633 \mu\text{m}$).

Récapituler les grandeurs données, les grandeurs choisies, les grandeurs mesurées.

Quelles sont les inconnues que comporte le système d'équations (1), (2), (3) et (4)?

Le système est-il résoluble ?

2.2 Résultats attendus

Calculer le nombre d'interfranges qui doivent défiler lorsqu'une lame d'épaisseur $150 \mu\text{m}$ passe de l'incidence 20° à -25° .

3. Mesure de déformations de surfaces d'onde

3.1 Méthode

Une surface d'onde est un ensemble continu de points qui vibrent en phase. Deux surfaces d'onde distantes de λ sont en phase (*cadre 5a*).

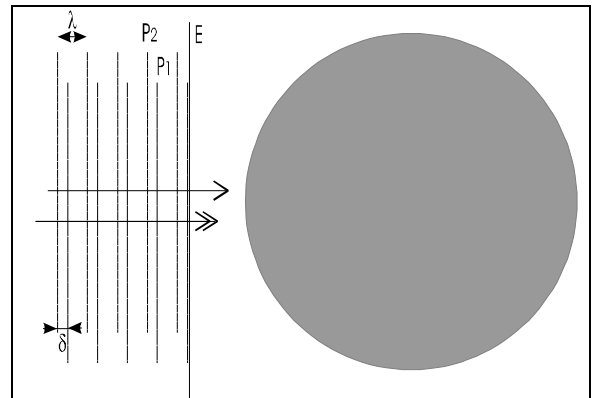
L'interférence de deux ondes en tout point d'un écran fait apparaître des franges. Une frange est formée de l'ensemble des points de l'écran où les ondes ont la même différence de marche.

Ex. *cadre 5b*, les intersections des surfaces d'ondes planes forment des franges rectilignes; *cadre 5c*, les intersections des surfaces d'onde plane et des surfaces d'onde sphériques forment des franges circulaires.

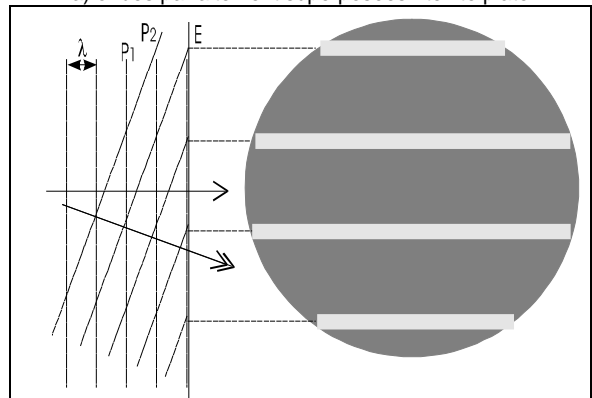
Au cours de leur trajet, les surfaces d'onde peuvent être déformées. Les franges qu'elles forment avec une onde de référence en sont affectées.

L'étude de ces déformations renseigne sur leurs causes (indice, épaisseur, forme d'un objet de phase).

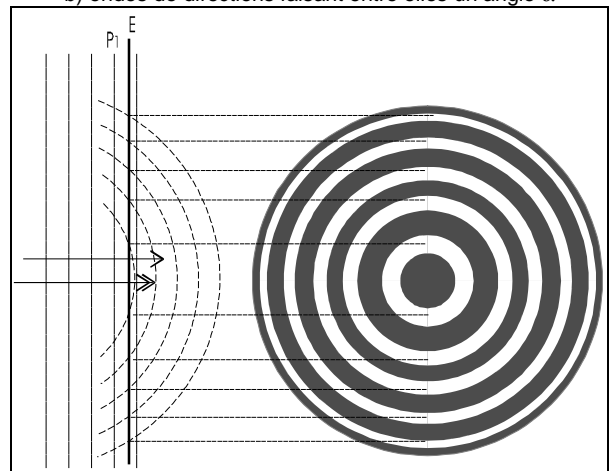
Ex : *cadre 6* : Les franges rectilignes formées par deux faisceaux inclinés sont déformées par la présence d'un défaut d'épaisseur d'une lame de verre placée sur le trajet d'un des faisceaux.



a) ondes parfaitement superposées : teinte plate

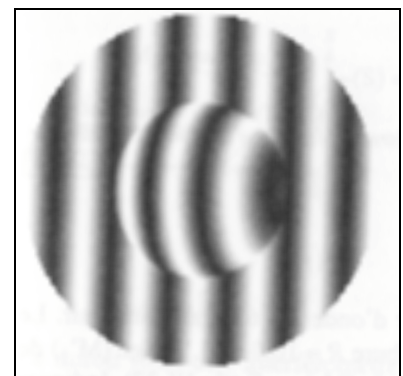


b) ondes de directions faisant entre elles un angle α



c) Interférences entre une onde plane et une onde sphérique

cadre 5 : interférences entre deux ondes observées sur un écran.



cadre 6 : Déformation des franges.

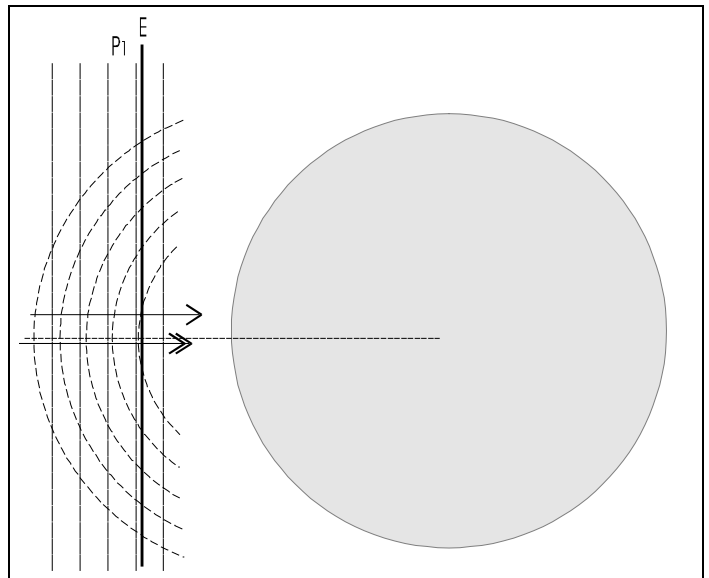
3.2 Exemples

- 1) Ondes planes parallèles : l'onde plane P_1 est en avance de δ sur P_2 . En tout point de l'écran E la différence de marche δ est la même, l'éclairement, d'intensité $I = \frac{I_{\max}}{2} \left(1 + \cos\left(2\pi \frac{\delta}{\lambda}\right) \right)$, l'est donc aussi. On observe une teinte plate *cadre 5a*.
- 2) Si les directions des ondes font entre elles un angle α , il apparaît des franges d'interfrange i constant ($i \approx \lambda/\alpha$ si α petit) *cadre 5b*.
- 3) Avec une onde plane et une onde sphérique divergente, on observe des franges concentriques de rayons croissants à partir du centre (*cadre 5c*).
- 4) Lire le document : **Interprétation of interferograms.pdf** de Zygo Corporation ainsi que **Optical testing.pdf** de J.C. Wyants.

Représenter sur le schéma du *cadre 7* la forme des franges que l'on peut attendre de l'interférence d'une onde plane et d'une onde sphérique convergente. La direction du centre de courbure est sur l'axe perpendiculaire au centre de l'écran.

En vous aidant du document Zygo, comment peut-on différencier le cas précédent de celui du *cadre 5c* ?

Comment sera l'interférogramme si la direction du centre de courbure est très en dessous de l'axe passant au centre de l'écran ?



cadre 7 : schéma à compléter : interférogramme d'une onde plane et d'une onde sphérique.

MISE EN ŒUVRE

1. 1^{er} Montage.

1.1 Description

Voir *cadre 8*.

Définition des éléments :

CSp : cube séparateur	Sp : séparatrice 50/50
M; M' : miroirs	E ₁ ; E ₂ : écrans
PI : platine de rotation	L : Lentille f = 16 ou 20 mm

1.2 Réglages

Demander conseils au professeur avant de réaliser le montage du *cadre 8*. Soigner l'alignement et s'assurer que Csp-M-Sp-M' forme un rectangle (Csp-M ≈ 25 à 30 cm ; M-Sp ≈ 10 à 15 cm).

Placer la table de rotation sur Csp-M (Csp-M'-Sp sera le bras de référence).

Ne pas mettre la lentille pour l'instant. Le laser est à environ 50 cm de CSp.

En sortie, vers les écrans E₁ ou/et E₂, les deux faisceaux sont rigoureusement parallèles (et si possible confondus).

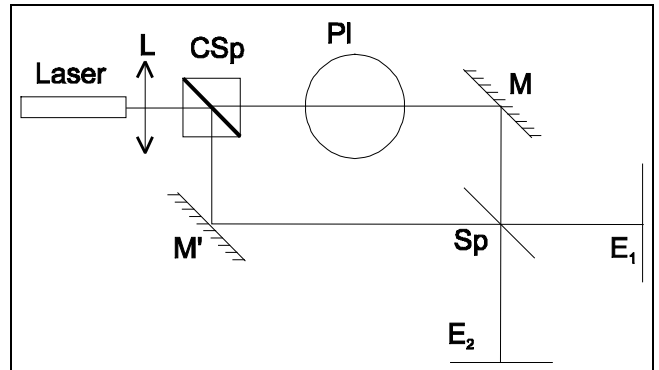
Placer une lentille objectif (f ≈ 16 mm) entre Sp et E₁ pour élargir le faisceau. On doit observer des franges.

Si ces franges sont trop serrées, reprendre les réglages depuis le début.

1.3 Franges annulaires

Placer la lentille objectif sur le faisceau incident juste devant le cube séparateur CSp.

Affiner les réglages pour observer des anneaux bien centrés sur l'écran E₁ ou E₂.



cadre 8 : schéma du montage.

Montrer le montage à un professeur

1.4 Mesure de l'angle d'un prisme

Introduire la lame prismatique, maintenue par un support à déplacement micrométrique, sur le bras CSp-M-Sp (bras de mesure). Il s'agit en fait d'un biprisme formé d'une lame à faces parallèles accolée à un prisme de petit angle A.

Déplacer la lame perpendiculairement à l'arête du prisme sur une longueur L de quelques mm. La variation d'épaisseur de verre est alors $\Delta e \approx L.A$ (A est en radians).

Compter le nombre N d'interfranges qui défilent.

Démontrer que l'angle du prisme est alors donné par :

$$A = \frac{N\lambda}{(n-1)L}$$

En déduire la valeur de A (avec un intervalle de confiance de 95%).

Conclusion : Exprimer A en degrés décimaux.

Lame prismatique		n = 1,52 λ = 0,633 μm	
L (mm)	3
N			
A (mrad)			

Tableau 1 : mesure de l'angle d'un prisme

1.5 Mesure de l'épaisseur d'une lame à faces parallèles.

- Introduire, dans le bras de mesure, la lame couvre - objet sur son support, sur l'axe de rotation de la platine, faces normales au faisceau incident.
- Refaire si nécessaire les réglages sur les miroirs M et M' pour faire réapparaître les anneaux.

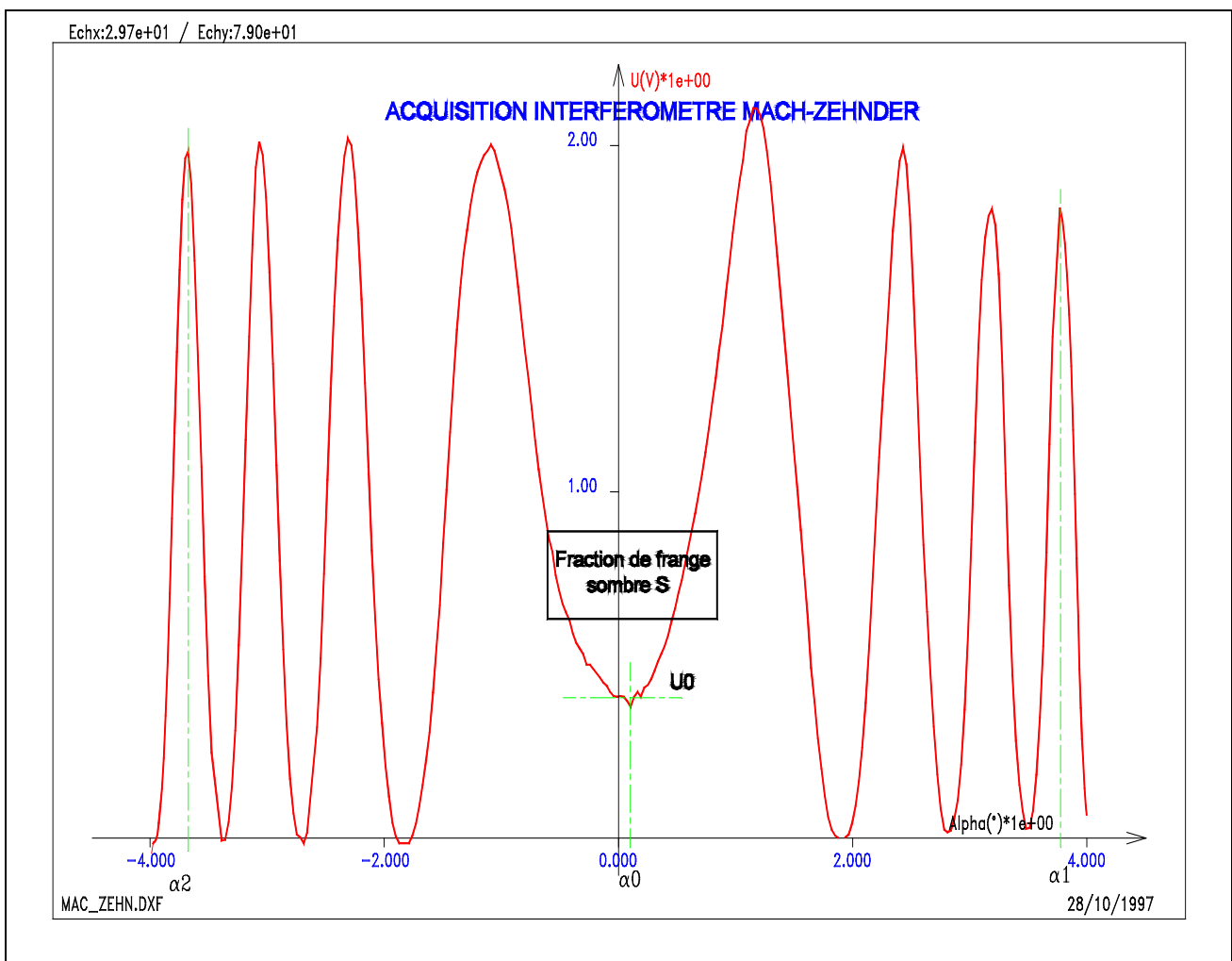
Remarque :

Il peut être utile (pour garder un bon contraste des franges et maintenir une différence de marche faible), de placer une lame semblable, en position fixe, dans le bras de référence.

- Placer le capteur et régler l'amplification pour que la tension ne dépasse pas 5 V. Utiliser si nécessaire des **filtres de densité** ou éloigner le capteur.
- Relier la sortie de l'amplificateur à l'entrée analogique **voie 0** de la carte d'acquisition.
- Ouvrir le logiciel **Mach** disponible dans l'environnement Windows de votre micro-ordinateur.
- A l'aide de la commande **Motorisation / Déplacement manuel**, faire tourner la lame dans un sens puis dans l'autre (α_+ , α_-) en passant par l'incidence normale. On voit les anneaux "rentre" ou "sortir".
- Rechercher l'incidence normale. Spécifier cette position comme position origine en cliquant sur **Définition origine**.
- Sélectionner la commande **Mesures / Indice/Epais. lame**.
- Définir les paramètres suivants (donnés à titre indicatifs) :
 - Demi-angle d'analyse : 20°
 - Vitesse d'analyse : $30 \text{ }^\circ/\text{min}$
 - Long. d'onde du laser : 632.8 nm .
- Cliquer sur **Acquisition spectre**. Le logiciel assurera une rotation de $i_1 = \alpha$ à $i_2 = -\alpha$ de part et d'autre de la position origine choisie. Simultanément, il gère l'acquisition des tensions.

En fin d'acquisition, cliquer sur **Quitter** pour visualiser le graphe $U = f(\alpha)$. Assurez-vous qu'il est compatible avec un traitement correct des données (nombres de franges : de 5 à 50 environ; contraste des franges maximum; niveau du signal suffisant, absence de bruit etc...).

- Refaire éventuellement une autre acquisition en optimisant les paramètres **Demi-angle d'analyse et Vitesse d'analyse**.
- Sauvegarder votre acquisition sous **Noms_mach.mac**. Faire une sortie imprimante (orientation paysage). Déterminer sur votre sortie imprimante la valeur des paramètres suivants : Nb. de franges, α_0 , α_1 , α_2 , U_0 ,



cadre 9 : Détermination des caractéristiques α_1 , α_2 , α_0 , U_0 et type S ou C (8mach_1.dwg)

fraction de frange claire ou sombre au centre. On pourra s'aider de la commande **Options / Coord. souris**. Voir cadre 9.

- Sous **Mesures / Indice/Epais. Lame**, analyser les franges de votre acquisition en cliquant sur le bouton **Sur le graphe**.
- Comparer les caractéristiques calculées par le logiciel (Nb. franges, α_0 , α_1 , α_2 , U_0 , ...) à celle de votre sortie imprimante.
- Modifier éventuellement les valeurs calculées par le logiciel. Pour se faire, cliquer sur le bouton **Détails**, et renseigner les zones de texte (Nb. franges, α_0 , α_1 , α_2 , U_0 , ...). On peut digitaliser les points du graphe correspondant à l'aide de la souris.
- Indiquer l'indice n de la lame (en principe $n \approx 1,5$).
- Cliquer sur le bouton **Calcul épaisseur**. Noter cette valeur de l'épaisseur pour votre 1^{ère} acquisition.
- Faire 6 ou 7 autres essais et placer vos résultats dans un tableau (voir **Tableau 2**).

Refaire une mesure avec une lame épaisse (d'environ 3 mm) **Tableau 3**.

Lame couvre-objet		$n = 1,52 \quad \lambda = 0,633 \mu\text{m}$	
Essai N°	1	2	...
Epaisseur (mm)			

Tableau 2 : épaisseur d'une lame couvre-objet

Lame épaisse		$n = 1,52 \quad \lambda = 0,633 \mu\text{m}$	
Essai N°	1	2	...
Epaisseur (mm)			

Tableau 3 : épaisseur d'une lame à faces parallèles

En déduire la valeur de e (avec un intervalle de confiance de 95%) dans chaque cas.

Conclusion : Exprimer e en mm.

2. 2^{ème} montage

Remplacer la lentille L par un extenseur de faisceaux X20 (09 LBX 005 de Melles-Griot ou associer une lentille de focale 10mm avec une lentille 200 mm).

Affiner vos réglages pour obtenir des anneaux bien centrés et de plus en plus gros sur l'écran, puis pour obtenir une teinte plate.

Montrer le montage à un professeur

2.1 Mesure de l'inclinaison d'une surface d'onde.

Placer le biprisme sur l'un des bras. On doit garder une teinte plate dans la partie formée de la lame à faces parallèles.

Utiliser le logiciel **Visu_Mach**.

Observer la partie prismatique avec la caméra CCD munie d'un objectif en agrandissant fortement. On doit observer des franges rectilignes.

Mesurer l'interfrange i (en pixels). Remplacer la lame prismatique par un réticule gradué afin d'avoir une échelle de longueur (1 mm = x pixels) et i en mm. Calculer l'inclinaison α du faisceau par $\alpha = \frac{\lambda}{i}$.

Remarque : on pourra vérifier l'étalonnage des pixels de la caméra en visualisant une lame portant un repère millimétré.

Inclinaison d'une surface d'onde		1 pixel = μm	
Essai N°	1	2	...
i (px)			
i (μm)			
α			

Tableau 4 : Inclinaison d'une surface d'onde

Compléter le tableau de résultats.

Calculer l'inclinaison α .

Comparer à la valeur attendue donnée par la formule de "déviations par un prisme de petit angle": $\alpha = (n - 1)A$ (on prendra $n = 1,52$ et $A = 1,0^\circ$).

2.2 Mesure du rayon de courbure d'une surface sphérique et cylindrique.

Remplacer le biprisme par une lentille plan-convexe (ou plan concave). On s'intéresse au rayon de courbure de la face convexe.

On doit observer des franges annulaires.

Noms_spherique.jpg.

Mesurer le diamètre d , en pixels, des anneaux. Etalonner les pixels de la caméra en utilisant le repère millimétré.

Compléter le tableau de résultats.

Observer de même les franges formées avec une lentille cylindrique. Enregistrer l'image **Noms_Cylindre.jpg**.

Représenter d^2 en fonction du numéro N de l'anneau. Tracer la DMC. Relever la pente α , son intervalle de confiance à 95% et le coefficient de corrélation.

Calculer pour la longueur d'onde du laser et $n = 1,5$ le rayon de courbure R :

$$R = \frac{\alpha(n-1)}{2\lambda} \text{ avec } \Delta R \approx \frac{(n-1)\Delta\alpha}{2\lambda}$$

Expliquez comment on peut obtenir le rayon de courbure de la face cylindrique.

Rayon de courbure d'une surface d'onde	1 pixel = mm		
Anneau N°	1	2	...
d (px)			
d(mm)			
d ² (mm ²)			

Tableau 5 : Rayon de courbure.

2.3 Observation et mesure d'un défaut d'épaisseur.

Remplacer la lame de Newton par une lame de PMMA portant la trace de l'impact d'un faisceau laser excimer. Ce dernier a creusé une cavité dont on veut étudier le profil.

Utiliser le logiciel **Visu_Mach** pour visualiser l'image puis tracer le profil de la cavité.

Visualiser l'image du réticule gradué pour étalonner les pixels.

Fournir alors le graphe du profil calibré.

Montrer votre montage et l'image du défaut.

Faire une sortie imprimante du profil calibré.

APPLICATIONS - PERFORMANCES

1. Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre

Quelle précision peut-on attendre du système ?

Peut-on envisager l'emploi de ce système pour des lames d'épaisseur plus faible que la lame couvre - objet ou plus épaisse que la lame de 3 mm ? Evaluer le domaine d'utilisation du système.

2. Mesure de déformations de surfaces d'onde

Sur le schéma du cadre 6, la lame de verre, d'indice $n = 1,5$, présente un défaut d'épaisseur Δe . L'image a été obtenue en mettant en œuvre l'interféromètre de Mach-Zehnder et un laser He-Ne ($\lambda = 0,633 \mu\text{m}$). Les faisceaux faisaient entre eux un petit angle comme dans l'exemple cadre 5b.

Après avoir évalué le décalage maximum des franges par rapport à l'interfrange, montrer qu'on peut estimer Δe à environ $0,6 \mu\text{m}$.

3. Etude de documents.

Lire le document ODEM - **Optical Design and Measurement Technology.MHTML**.

Quelles sont les particularités de l'interféromètre utilisé (bras de référence, éléments du bras de mesure, source ...) ? Pour quelles applications a-t-il été développé ? Quel est, à votre avis, le rôle du miroir à déplacement piézoélectrique utilisé dans le bras de mesure ?

LISTE DU MATERIEL et DES LOGICIELS

Type matériel	Nbre	Où?	Où?	Remarques
Lame couvre-objet	1	M3		épaisseur 150 μ m environ
Lame à faces parallèles épaisse.	1			épaisseur 3 mm environ
Lame biprismatique	1	A7	E1	
Lentille à étudier (plan convexe ou plan concave)	1	A10		f = 150 mm par exemple
Lentille cylindrique	1	A10		
Lame de PPMA avec impact laser	1			2 impacts de 0,8 mm diamètre + 1 impact de 8 mm de diamètre environ.
Platine de rotation polytec	1	A7		
Filtre interférentielle	1	A7		BP 10 nm; λ = 635 nm. Surface fragile !
Filtre spatial	1			
Expanseur de faisceaux X20	1	M3		09 LBX 005 de Melles-Griot
Lentille (f= 200 mm)				Grande ouverture.
Lentilles (f=10; 16; 20 mm)	1	A9	E3	
Lame à réticule gradué				
Miroirs	2			Surface fragile ! Ne pas essuyer.
Séparatrice 50/50	1	A10		Surface fragile ! Ne pas essuyer. Epaisseur 3 mm.
Éléments mécaniques de liaison (noix, blocs magnétiques, ...)		A7		
Laser He-Ne Melles Griot	1	M3		10 mW; 632.8 nm; type LHR
Camera CCD	1	A7		
Objectif 100 mm	1	A7	E3	
Micro-ordinateur	1	M3		
Carte d'imagerie Matrox Meteor II	1			Dans le micro ordinateur
Imprimante	1			
Logiciels				
Visu_Im_Meteor				
Logiciel Mach				
Logiciel Visu_Mach				
Excel				

cadre 10 : liste du matériel