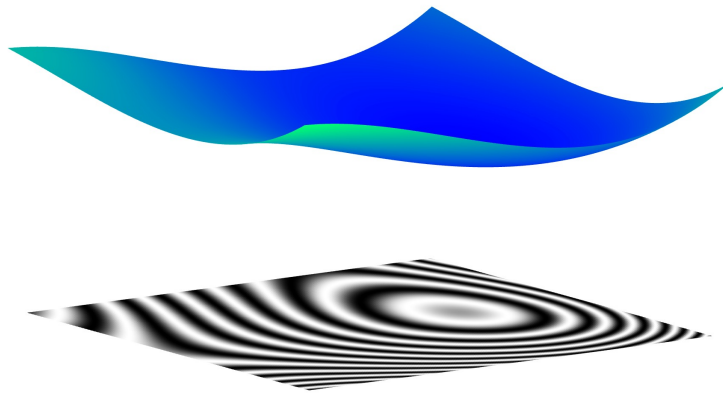


Contrôles Interférométriques

1A · S5 · 2026



Équipe Enseignante

Sébastien de Rossi (responsable)
Lucas Caron, Mal Landru, Elisa Mari
Marc Roulliy, Etienne Homassel



OBJECTIFS & LIVRABLES

Un **interféromètre de Fizeau** permet de visualiser les défauts de planéité d'une surface - ou le défaut d'épaisseur d'une lame - en analysant les interférences entre la lumière qu'elle réfléchit et celle d'un plan étalon de référence – ou, dans le cas d'une lame, en analysant les interférences entre la lumière réfléchi à ses deux faces. Il peut également être utilisé pour des système plus complexes, comme des objectifs d'imagerie tels que des télescopes.

Objectifs pédagogiques

Dans un interféromètre de Fizeau vous devez être capable de,

- Identifier ses composants
- Expliquer le trajet de la lumière de l'échantillon au capteur
- Aligner les composants pour obtenir des franges exploitables
- Mettre en œuvre et régler un interféromètre existant pour des mesures de défaut de planéité ou d'épaisseur
- Interpréter et analyser les interférogrammes obtenus
- Evaluer les performances des échantillons étudiés
- Expliquer les principes des traitements numériques utilisés

Livrables

Séance #1

- Ecrire le protocole d'alignement de l'interféromètre. Ce livrable n'est pas évalué mais pourrait vous servir pour l'examen de TP de fin d'année.

Séance #2

- Rédiger un rapport technique. Son évaluation par l'équipe enseignante fournira une note. Le rapport devra s'articuler autour des sections suivantes :
 - Problématique
 - Protocole appliqué
 - Mesures réalisées (éléments de preuve: interférogrammes)
 - Analyse des résultats
 - Conclusion sur les performances des composants étudiés
- Après réception du lien (courant novembre) compléter la fiche individuelle d'auto-évaluation des connaissances
 - ⚠ Fiche non remplie → pénalité sur la note du compte rendu !

AUTO-EVALUATION des connaissances

Cette auto-évaluation devra être réalisée via une page web après votre séance #2. Le lien vous sera envoyé début novembre.

	Je suis à l'aise	J'y arrive un peu	C'est compliqué	Je n'y arrive pas
Je sais expliquer le phénomène d'interférence. _____	☐	☐	☐	☐
Je connais les conditions pour observer les interférences. _____	☐	☐	☐	☐
Je sais expliciter chaque élément d'un interféromètre de Fizeau. _____	☐	☐	☐	☐
Je sais aligner les éléments d'un interféromètre de Fizeau sur banc. _____	☐	☐	☐	☐
Je sais mettre en place un interféromètre de Fizeau pour mesurer un défaut d'épaisseur dans une lame. _____	☐	☐	☐	☐
Je sais mettre en place un interféromètre de Fizeau pour mesurer un défaut de planéité. _____	☐	☐	☐	☐
Je sais mettre en place un interféromètre de type ZYGO (avec référence intégrée) pour mesurer un défaut d'épaisseur dans une lame. _____	☐	☐	☐	☐
Je sais mettre en place un interféromètre de type ZYGO (avec référence intégrée) pour mesurer un défaut de planéité. _____	☐	☐	☐	☐
Je sais analyser un interférogramme. _____	☐	☐	☐	☐
Je sais exprimer le défaut d'une surface optique en fraction de longueur d'onde. _____	☐	☐	☐	☐
J'ai compris le principe du traitement par Fourier _____	☐	☐	☐	☐
J'ai compris le principe du traitement par décalage de phase _____	☐	☐	☐	☐

L'interféromètre de Fizeau que vous allez réaliser est constitué d'une source laser, une lame séparatrice, une lentille doublet, un capteur et son objectif d'imagerie.

- La source de lumière est une diode laser de longueur d'onde 670 nm considérée comme ponctuelle.
- La source est placée au foyer d'une lentille doublet pour éclairer l'échantillon avec un faisceau parallèle.
- L'échantillon est placé dans l'autre plan focal de la lentille.
- Les rayons réfléchis repartent vers le doublet et sont défléchis à 90° par une lame séparatrice.
- Le capteur travaille en conjugaison infini-foyer pour imager les franges localisées à la surface de l'échantillon.

1. Comprendre le Fizeau (1h)

- Faites le tracé paraxial de l'interféromètre en faisant apparaître
 - Les rayons « éclairage »
 - Les rayons « imagerie »
- Déterminer le wedge factor pour la mesure d'épaisseur (voir fiche Savoir)
- Déterminer le wedge factor pour la mesure de planéité

2. Montage de l'interféromètre (2h)

- Identifier tous les composants et leur monture
- Monter et aligner l'interféromètre

3. Mesures par analyse visuelle (1h)

Notez bien le numéro de votre boîte d'échantillon.

- Estimer le défaut d'épaisseur des échantillons
 - Estimer les défauts de planéité des échantillons
- ⚠ les plans étalons sont fragiles. Prenez en soin !

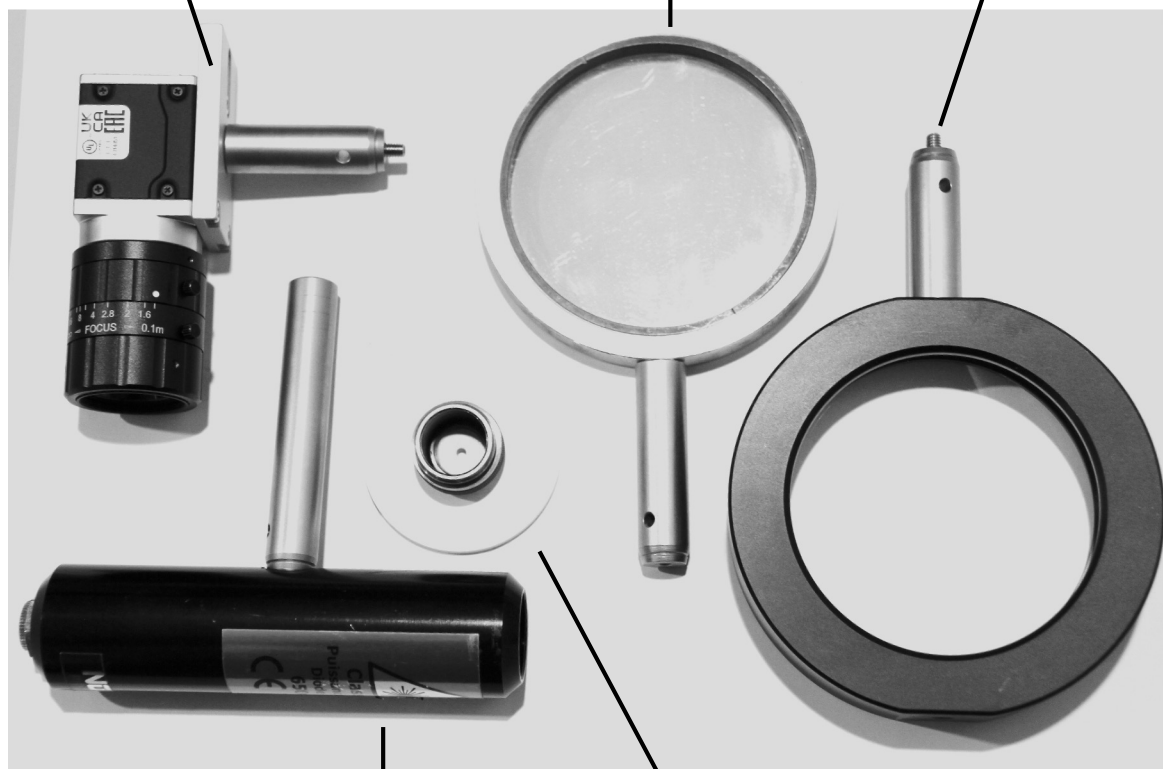
CONSEILS

prenez des photos, enregistrer les interférogrammes mesurés, notez vos résultats sur des supports fiables. Soyez rigoureux·se dans votre méthodologie expérimentale.

Capteur et son objectif

Lame séparatrice

Doublet



Source laser

Trou d'alignement

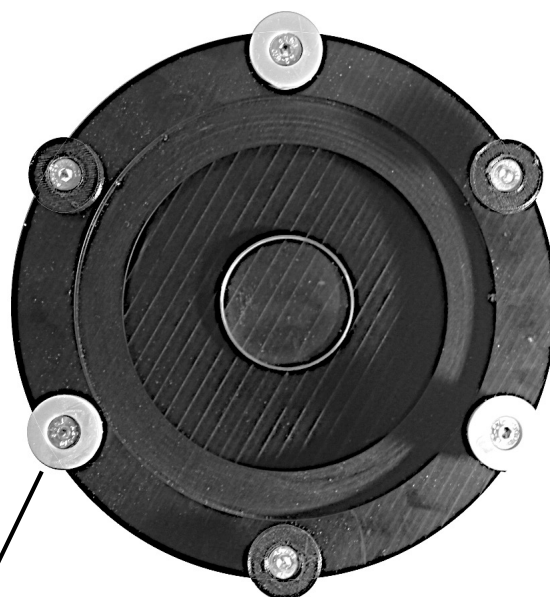
Objectif

Support échantillon



bague de mise au point

bague d'ouverture



réglage des deux plateaux par rapport au bâti

réglage du plateau du haut par rapport au plateau du base

Utilisation d'un Fizeau d'atelier (2h)

- Prendre en main l'instrument et l'interface de traitement numérique
- Mesurer le défaut d'épaisseur des échantillons « lame »
- Mesurer les défauts de planéité des 3 échantillons (lames et miroir)

Vos mesures sont définies par une amplitude, un signe et une précision.

Utilisation d'un Fizeau commercial, le ZYGO (2h)

- Prendre en main l'instrument et l'interface de traitement numérique
- Mettre en place un montage pour déterminer le défaut de planéité
- Déterminer le wedge factor pour la mesure de planéité
- Mesurer les défauts de planéité des 3 échantillons (lames et miroir)
- Pour l'échantillon « miroir » vous vous attacherez à comprendre la perte de contraste et vous ferez en sorte de l'améliorer.
- Mettre en place un montage pour déterminer le défaut d'épaisseur
- Déterminer le wedge factor pour la mesure d'épaisseur
- Mesurer le défaut d'épaisseur des échantillons « lame »

Vos mesures sont définies par une amplitude, un signe et une précision.



Le plan étalon du ZYGO est d'excellente qualité (meilleur que $\lambda/20$ PV) et son coût est de plusieurs milliers d'euros. Il est évidemment extrêmement fragile. Prenez-en le plus grand soin c'est-à-dire, ne le touchez sous aucun prétexte !

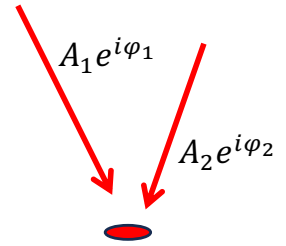
Placez toujours les autres supports suffisamment loin de l'instrument pour ne prendre aucun risque !

Remplacez toujours le cache de protection après utilisation.

Interférence de 2 ondes cohérentes

Eclairement total en 1 point donné

$$\mathcal{E}_{total} = |A_1 e^{i\varphi_1} + A_2 e^{i\varphi_2}|^2 = (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2) \left\{ 1 + \underbrace{\frac{2\sqrt{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2}}{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}}_{\text{contraste}} \times \cos(\Delta\varphi) \right\}$$



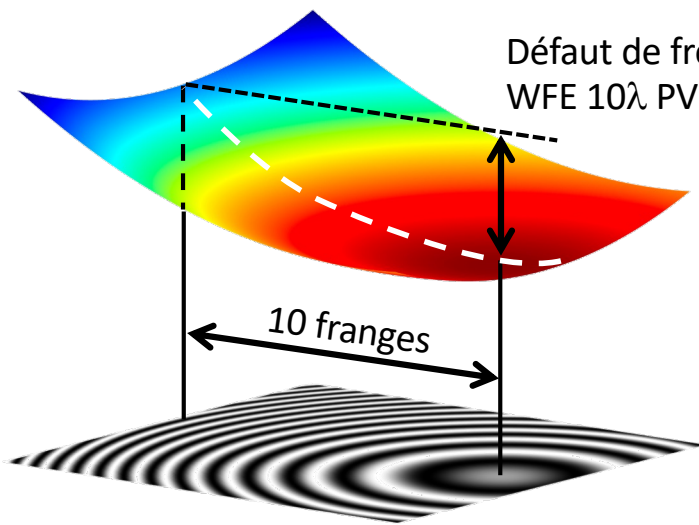
Déphasage $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \times ddm$ $ddm = \text{différence de marche}$

Franges brillantes = ondes en phase $\Delta\varphi = 0 \ (2\pi)$

Franges sombres = ondes en opposition $\Delta\varphi = \pi \ (2\pi)$



interfrange $\leftrightarrow \Delta\varphi = 2\pi \leftrightarrow ddm = \lambda$
d'une frange à l'autre, le ddm a changé de λ

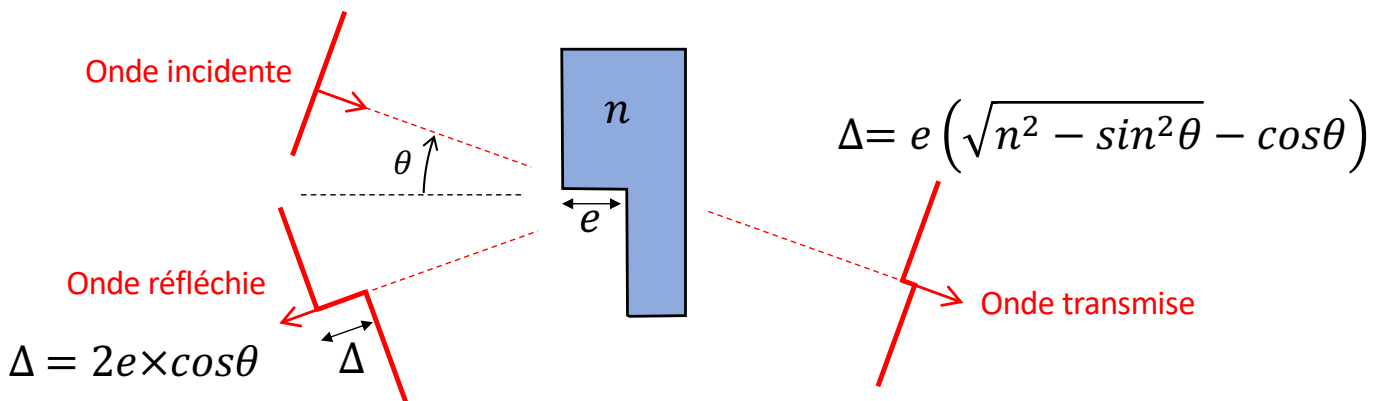


Le **rapport frange longueur d'onde** ou **wedge factor** définit le facteur de proportionnalité entre un interfrange sur l'interférogramme et un écart δe sur la surface.

Exemple

En régime de coin d'air, en réflexion et en incidence normale, ce rapport vaut 1/2.

Défaut du front d'onde sur un défaut de surface



Critère de bonne qualité d'une optique (limitée par la diffraction)

Critère sur la valeur Pic à Vallée (critère de Rayleigh)

$$\Delta_{PV} < \frac{\lambda}{4}$$

Critère sur l'écart type (critère de Maréchal)

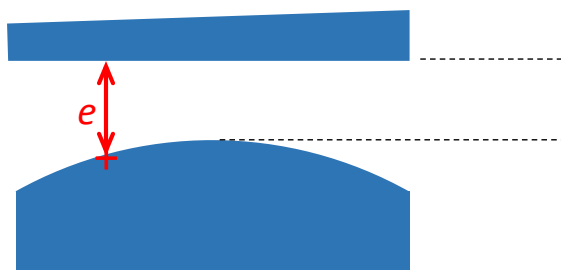
$$\Delta_{RMS} < \frac{\lambda}{14}$$

- Pour une distribution normale (gaussienne) des défauts : $PV \sim 5$ à 6 RMS

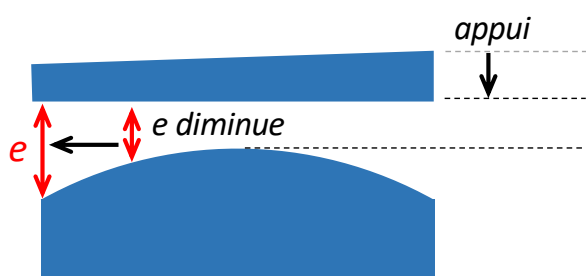
- Une optique grand public sera à 1λ ; une optique de très bonne qualité sera meilleure que $\lambda/10 \text{ PV}$.

SAVOIR détermination du signe du défaut

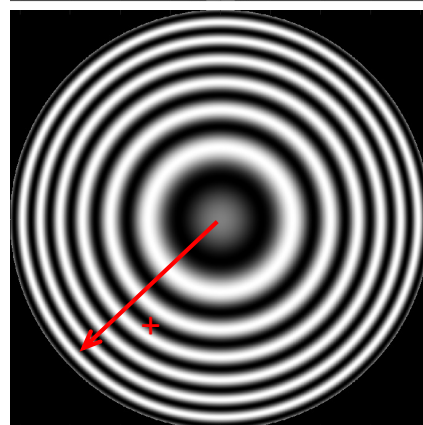
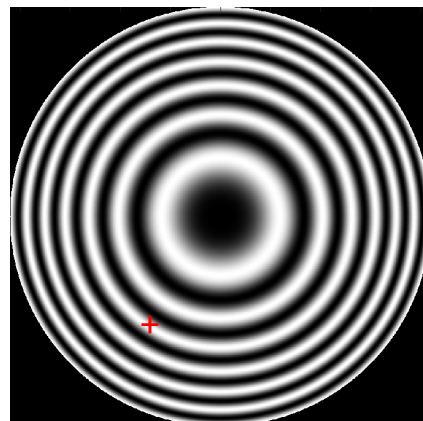
lors d'une mesure d'un défaut de planéité



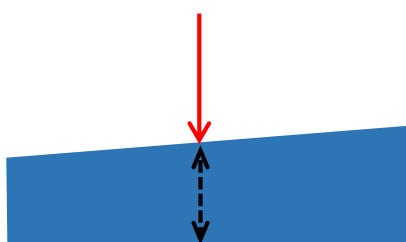
L'éclairement en 1 point dépend de e



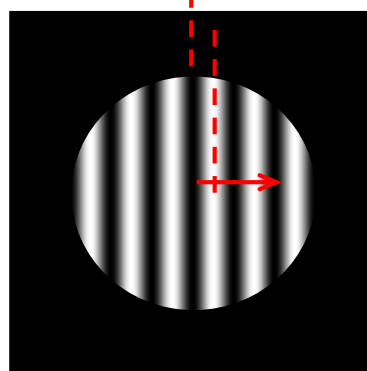
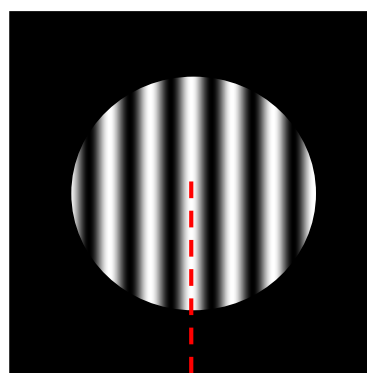
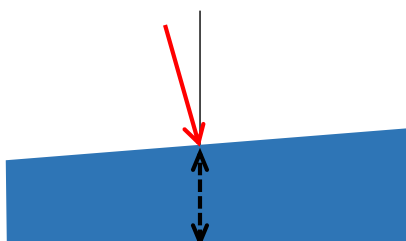
La frange associée va se déplacer vers une épaisseur e équivalente. Ici la frange glisse vers l'extérieur. La face est donc convexe.



lors d'une mesure d'un défaut d'épaisseur



En augmentant l'angle d'inclinaison des rayons incidents les franges vont se déplacer vers les épaisseurs les plus grandes.



SAVOIR démodulation par porteuse spatiale

Un interférogramme « en teinte plate » et sa transformée de Fourier

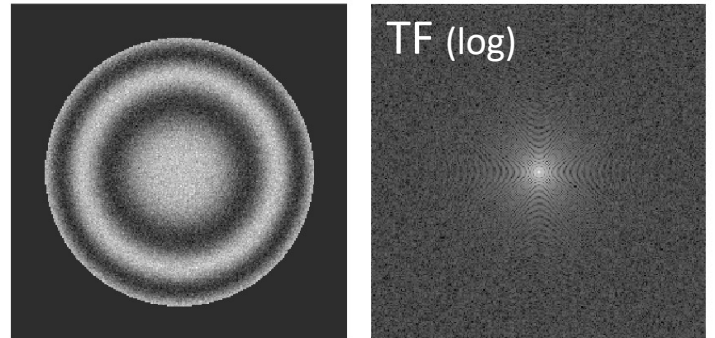
$$\mathcal{E}_T = 2\bar{\mathcal{E}}\{1 + C \times \cos(\Delta\varphi)\}$$

$$\mathcal{E}_T = a(x, y) + c(x, y) + c^*(x, y)$$

$$\widetilde{\mathcal{E}}_T = \tilde{a}(f_x, f_y) + \tilde{c}(f_x, f_y) + \tilde{c}^*(f_x, f_y)$$

avec $c(x, y) = b(x, y)e^{i\Delta\varphi}$

L'information est noyée dans le lobe central
La phase ne peut pas être obtenue.

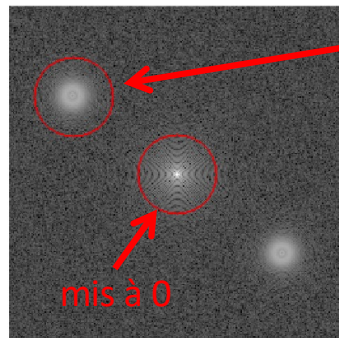
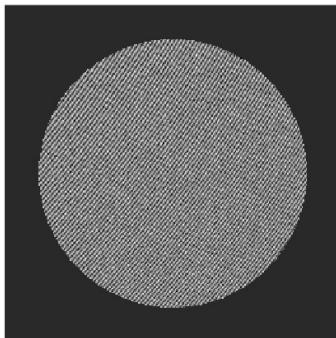


Un interférogramme « incliné » et sa transformée de Fourier

$$\mathcal{E}_T = 2\bar{\mathcal{E}}\{1 + C \times \cos(\Delta\varphi + 2\pi ux + +2\pi vy)\}$$

$$\mathcal{E}_T = a(x, y) + c(x, y)e^{2i\pi(ux+vy)} + c^*(x, y)e^{-2i\pi(ux+vy)}$$

$$\widetilde{\mathcal{E}}_T = \tilde{a}(f_x, f_y) + \tilde{c}(f_x + u, f_y + v) + \tilde{c}^*(f_x - u, f_y - v)$$



L'information est décalée du lobe central
et peut être isolée du bruit basse fréquence

Filtrage lobe secondaire

$$\widetilde{\mathcal{E}}_T|_{\text{filtré}} = \tilde{c}(f_x + u, f_y + v)$$

*Recentrage du lobe (démodulation)
puis TF inverse*

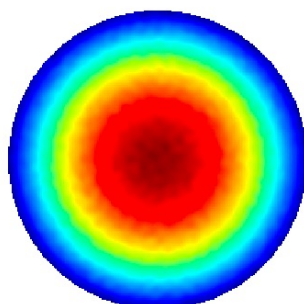
$$TF^{-1}\left(\widetilde{\mathcal{E}}_T|_{\text{filtré}}\right) = c(x, y)$$

← *Phase modulo 2π*

$$\Delta\varphi = \text{atan}\left[\frac{\text{Im}(c)}{\text{Re}(c)}\right]$$

*Déroutement de la phase
Suppression tilt résiduel*

Calcul PV/RMS ←



← *Détermination défaut de surface
mais indétermination du signe*

$$\text{Défaut} = \frac{1}{2} \times \frac{\lambda}{2\pi} \times \frac{1}{\Delta\varphi}$$

wedge factor

Un interférogramme : $\mathcal{E}_T = 2\bar{\mathcal{E}}(x, y)\{1 + C(x, y) \times \cos(\Delta\varphi(x, y))\}$
 = une équation à 3 inconnues
 éclairement moyen, contraste, déphasage

Solution pour lever l'ambiguïté

=

enregistrement de minimum 3 interférogrammes différents.

Le déphasage supplémentaire est obtenu en déplaçant très précisément le plan de référence de l'interféromètre à l'aide d'une cale piezo-électrique

Un cristal piezo-électrique s'allonge lorsqu'on lui applique une petite tension.
 Des déplacements micrométriques voire nanométriques sont possibles.

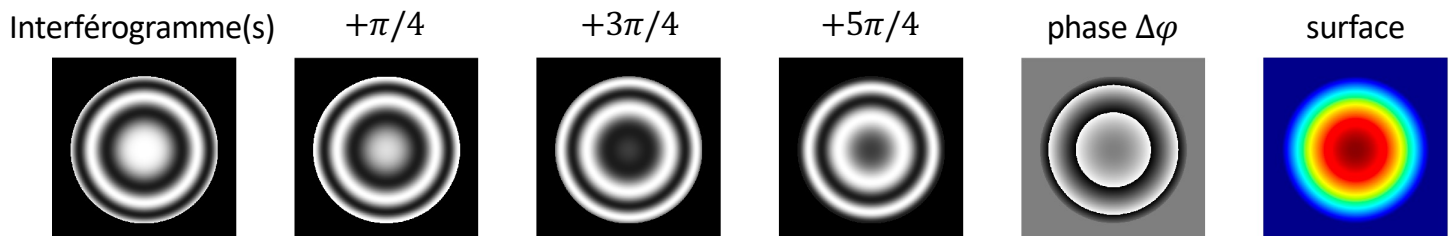
phase connue ajoutée

Interférogramme n°1 $\mathcal{E}_{T1} = 2\bar{\mathcal{E}}(x, y)\{1 + C(x, y) \times \cos(\Delta\varphi(x, y) + \varphi_1)\}$

Interférogramme n°2 $\mathcal{E}_{T2} = 2\bar{\mathcal{E}}(x, y)\{1 + C(x, y) \times \cos(\Delta\varphi(x, y) + \varphi_2)\}$

Interférogramme n°3 $\mathcal{E}_{T3} = 2\bar{\mathcal{E}}(x, y)\{1 + C(x, y) \times \cos(\Delta\varphi(x, y) + \varphi_3)\}$

Exemple : $\varphi_1 = \frac{\pi}{4}$; $\varphi_2 = \frac{3\pi}{4}$; $\varphi_3 = \frac{5\pi}{4}$ $\rightarrow \Delta\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\mathcal{E}_{T3} - \mathcal{E}_{T2}}{\mathcal{E}_{T1} - \mathcal{E}_{T2}}\right)$



Important

Le défaut de surface mesurée est déterminé avec le bon signe.

Remarque

Dans l'interféromètre commercial ZYGO, un algorithme à 5 images est utilisé.