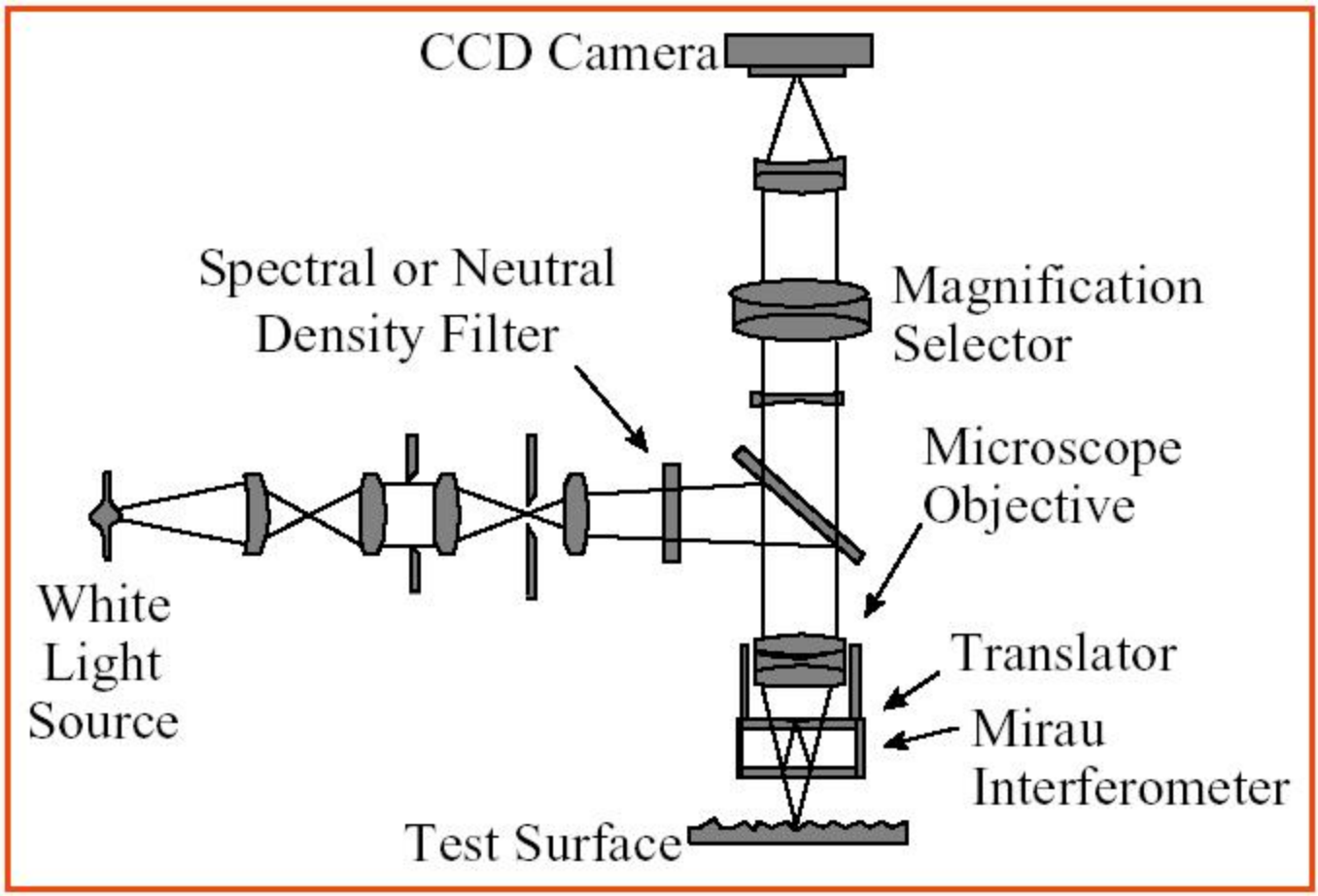
INTRODUCTION - PRINCIPES

1. Système optique de mesures .

Un système optique de mesures comporte une source de lumière, un ensemble de composants optiques (réfléchissants, réfractants, diffusants, diffractants, absorbants, polarisants ou dispersifs *), un ou plusieurs capteurs ainsi que des sous-systèmes mécaniques, électroniques et informatiques. Ces derniers assurent les liaisons et la compatibilité des différents éléments ainsi que l'acquisition et le traitement des mesures.

Voir le document ***microsc.pdf*** (p. 1 à 20) et http://cmi.epfl.ch/metrology/Wyko_NT1100-v03.htm



cadre 1 : Principe du microscope interférométrique.

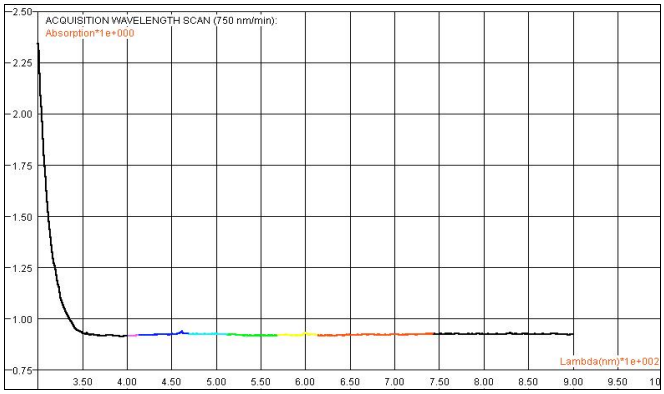
2. Le microscope interférométrique Veeco

2.1 Description

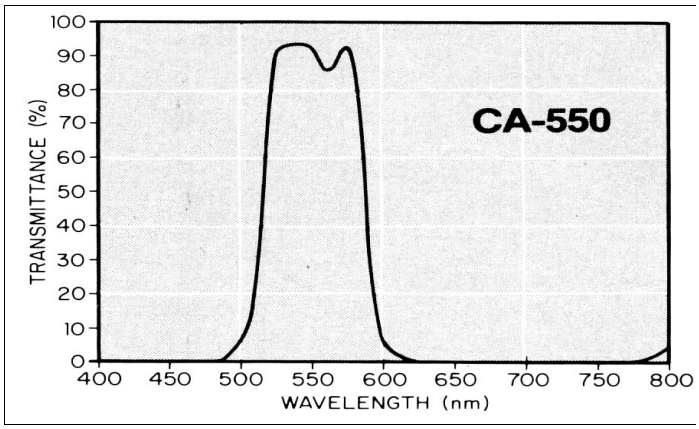
Observer le schéma du cadre 1. Suivre le parcours de la lumière depuis la source jusqu'au récepteur. Repérer les éléments : source, filtre passe bande, filtre de densité, objectif, caméra CCD énumérés dans le Tableau 1.

Associer à chacun de ces éléments la fonction spectrale qui le caractérise : $M(\lambda)$ ou $S(\lambda)$ ou $T(\lambda)$ ou $I(\lambda)$:

- Emitance $M(\lambda)$ (en $W.m^{-2}$) elle caractérise le spectre d'émission d'une source (cadre 4)
- Sensibilité spectrale $S(\lambda)$ (cadre 5)
- Transmittance $T(\lambda)$ (cadre 2)
- Fonction d'interférence $I(\lambda)$ (cadre 3)

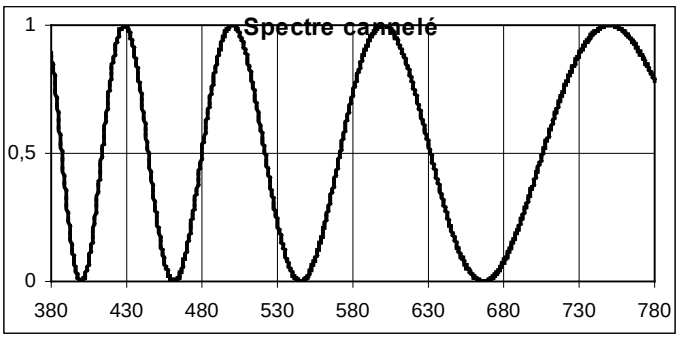


Filtre de densité : constructeur Ealing D.O = 0,9 (T = 8 %)

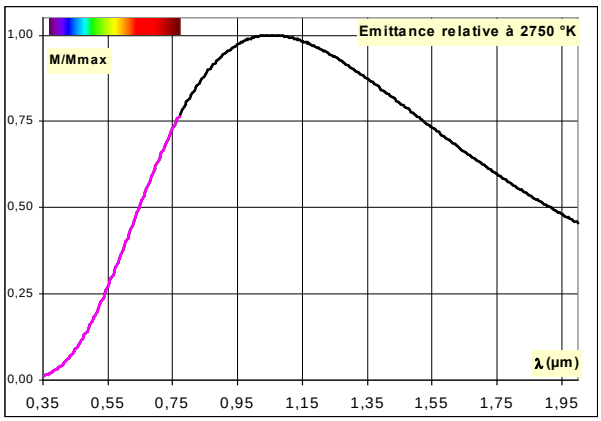


Transmittance d'un filtre coloré vert BP = 75 nm T ≈ 80%

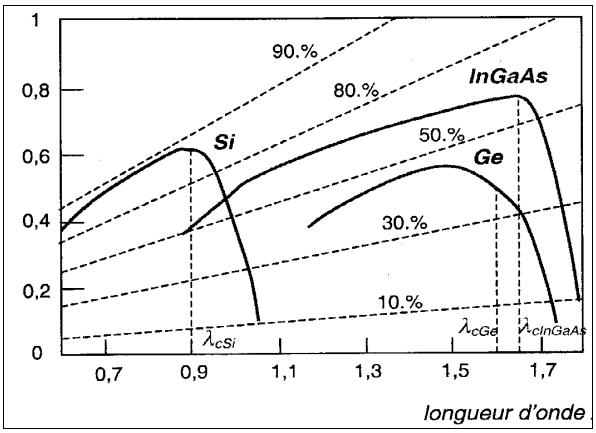
cadre 2 : Filtres.



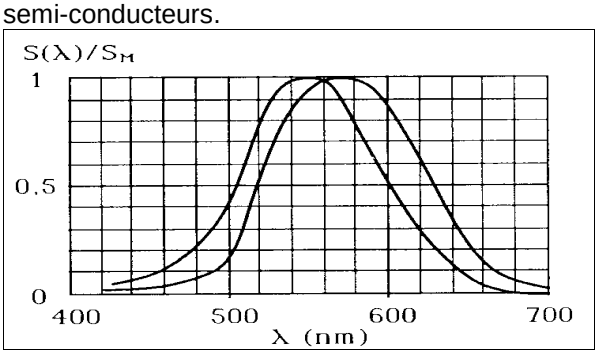
cadre 3 : fonction d'interférence I(λ) pour une différence de marche δ = 3 µm.



cadre 4 : émittance spectale du corps noir à 2750 °K. Celle d'un ruban de tungstène est très semblable.



Sensibilité spectrale absolue S(λ) en A/W de trois semi-conducteurs.



La sensibilité spectrale relative de l'œil dépend de l'observateur. Le maximum de sensibilité S_m est voisin de 550 nm.

cadre 5 :Sensibilité spectrale

Rq. : d'autres illustrations se trouvent dans le dossier technique DTLP_5

ELEMENTS	SOURCE BLANCHE	FILTRE DE DENSITE	FILTRE PASSE BANDE	OBJECTIF INTERFERO-METRIQUE	CAMERA CCD
FONCTION					
Dénomination emplacement sur NT1100					

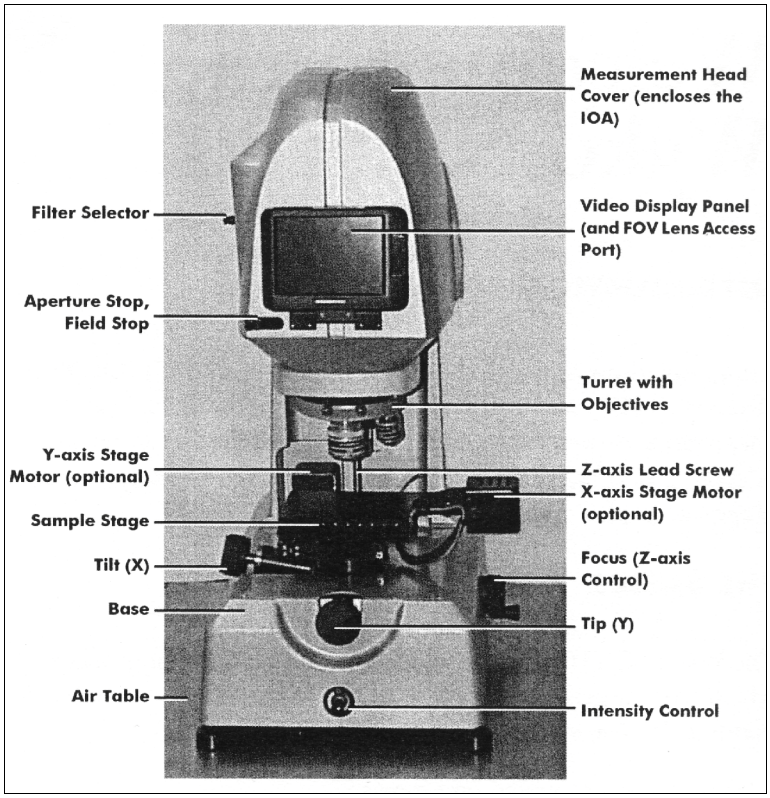
Tableau 1 : fonctions et éléments associés.

Ouvrir le document "**Wyko NT1100 operator's guide**" pages 5 et suivantes.

Compléter le Tableau 1 en précisant la dénomination de l'emplacement de chacun des éléments cités ou de leur élément de contrôle.

L'IOA intègre aussi une FOV. Qu'est-ce qu'une FOV ? Quelle est son rôle ?

De combien d'objectifs dispose la tourelle ? Précisez le type et le grossissement de chacun (cadre 8).



cadre 6 : WYCO NT1100.

2.2 Techniques de mesures.

2.2.1 PSI

L'objectif interférométrique permet la projection de franges rectilignes sur le profil à étudier. Vue de la caméra, la déformation des franges observée permet de retrouver l'altitude de chaque point.

En général on utilise un filtre passe-bande :

- PSI High Mag : BP = 40 nm autour de λ = 605 nm
- PSI Low Mag : BP = 10 nm autour de λ = 630 nm.

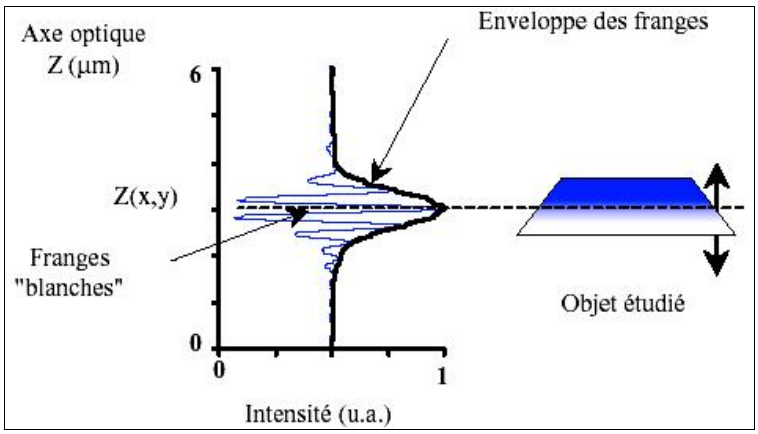
La méthode PSI (phase shifting interferometry) s'apparente au Moiré par projection de franges avec décalage de phase (voir TP 2LP_Moiré). La procédure est décrite page 15 à 18 du guide de l'opérateur. On l'utilise pour la mesure de surfaces lisses (rugosité < λ/4)

2.2.2 VSI

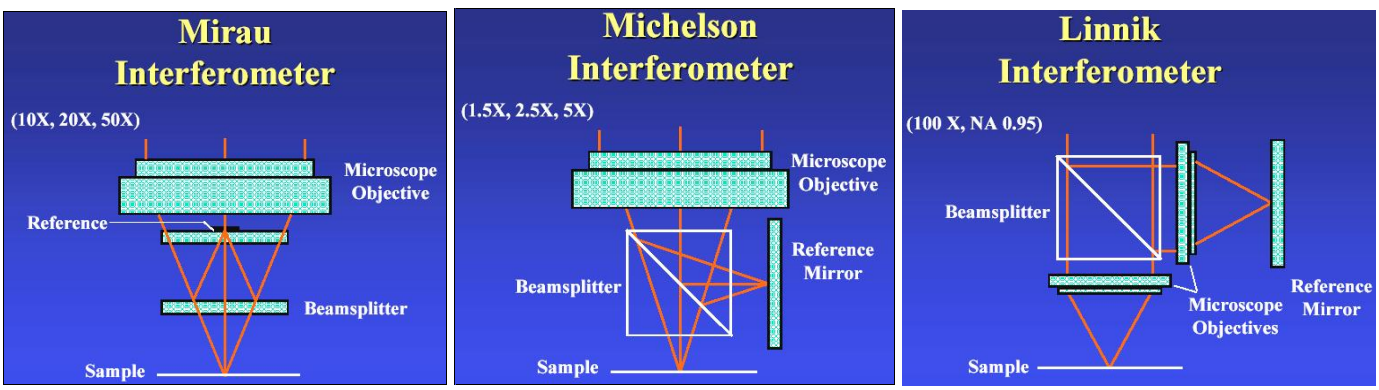
La méthode VSI (vertical scanning interferometry) utilise la détection de l'enveloppe des franges d'interférence.

En lumière peu cohérente (pas de filtre passe bande - "franges en lumière blanche") les franges n'apparaissent que lorsque la longueur du bras de mesure est voisine de celle du bras de référence (cadre 8).

Le meilleur contraste est obtenu quand les longueurs sont égales ("contact optique" ou "ordre zéro") : cadre 7 et cadre 9.



cadre 7 : profil typique des franges en lumière blanche et recherche de l'altitude Z(x,y) par recherche du maximum de l'enveloppe : sonde cohérence.

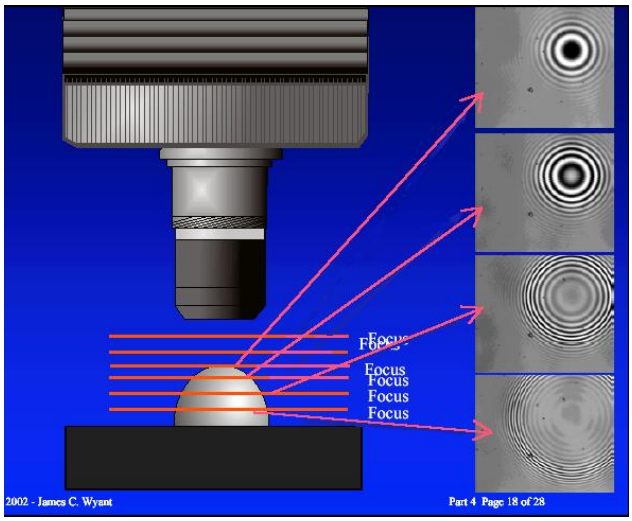


cadre 8 : trois types d'objectifs interférométriques, notez les grossissements, la position du miroir de référence, le séparateur de faisceaux.

La procédure est décrite pages 19 à 23 du guide de l'opérateur.

En s'aidant du document "**Technical reference manual**" pages 1-1 à 1-6, répondre aux questions :

A quoi sert le transducteur piézo-électrique PZT en mode PSI ? sur quoi agit-il ?
Qu'est-ce que le système LVDT utilisé en mode VSI ?
Quel filtre est utilisé en mode PSI ? en mode VSI ?



cadre 9 : les franges apparaissent là où il y a contact optique.

3. Etude Excel

Ouvrir le fichier ***microInterf.xls***. Faire des clics successifs sur le bouton rouge en suivant les indications fournies.

Faire différents essais, en choisissant ou non un filtre, en changeant la longueur d'onde centrale du filtre ainsi que sa bande passante, en prenant comme détecteur l'œil ou le silicium.

Pour chaque longueur d'onde, la réponse spectrale du système est $R(\lambda,\delta) = M(\lambda)*T(\lambda)*I(\lambda,\delta)*S(\lambda)$. La réponse observé intègre donc les réponses spectrales de toutes les longueurs d'onde passantes; elle forme le signal : $R(\delta) = \Sigma R(\lambda)\Delta\lambda$.

Le signal $R(\delta)$ correspond à l'aire située sous la courbe de réponse, il dépend de la différence de marche δ (à cause la fonction d'interférence).

Choisir le capteur Si et un filtre de longueur d'onde centrale 910 nm (maximum de sensibilité).

Evaluer la différence de marche δ_{limite} appelée longueur de cohérence l permettant encore un signal suffisant (franges encore perceptible, U/Umax>10%) lorsqu'on choisit une bande passante de 20, 50 puis 100nm puis pas de filtre ($\Delta\lambda$ largeur à mi-hauteur de la courbe de sensibilité du silicium).
Compléter le tableau :

λ = 0,91 µm	Pas de filtre	Filtre passe-bande		
BP : $\Delta\lambda$ (µm)	≈ 0,30	0,025	0,050	0,10
δ_{limite} évalué (µm)				
$\ell = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$ calculé (µm)				

Tableau 2

Expliquer le terme "**sonde de cohérence**" utilisé pour décrire la méthode VSI (ou CPM = "Coherence probe microscopy".

4. Etude de principe sur l'interféromètre Sopra

L'interféromètre de Michelson Sopra (

Cadre 10) a été modifié. Il comporte un miroir concave dont on veut déterminer le profil et un miroir à déplacement piézoélectrique (alimentation 0 à 100 V) piloté par le logiciel WebcamVSI_PSI.

Les miroirs sont préréglés pour une différence de marche $\delta \approx 0$ entre les miroirs (contact optique).

Alimentée la source blanche (10 ou 12 V) et lancer le logiciel. Dans "Déphaseur", vérifier la connexion de l'alimentation piézo et transmettre 0V.

"Carte d'imagerie" puis "Acquisition permanente" permet d'obtenir l'image de la caméra.

Dans "Quick Cam", "Plus d'info", "Paramètre pilot" vérifier l'option noir et blanc et ajuster les réglages de gain, lumière et vitesse d'obturation en mode non automatique.

L'image doit présenter des franges annulaires bien contrastées (Cadre 11 (a)).

Rq : le système a été étalonné en observant une règle gradué avec la caméra : 1 mm correspond à 43 pixels.

Appelez un professeur pour affiner avec lui les réglages

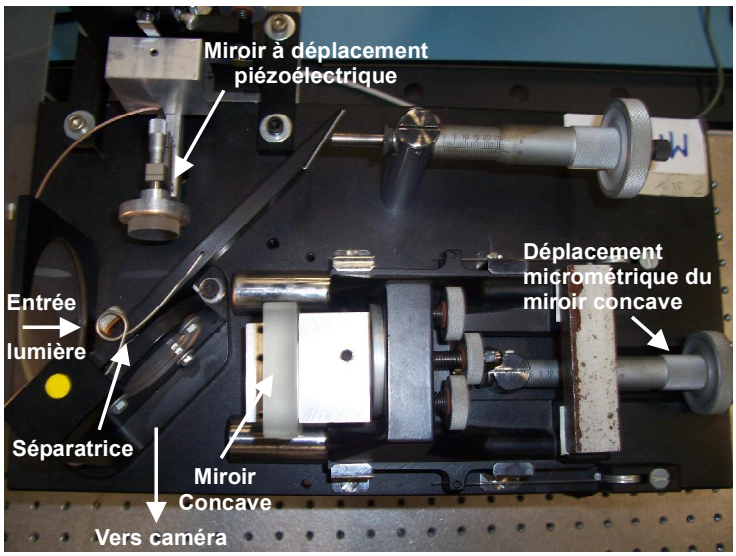
4.1 Le mode VSI

Assurer vous que les franges sont à peine visibles au fond du miroir concave lorsque Upiézo = 0 V.

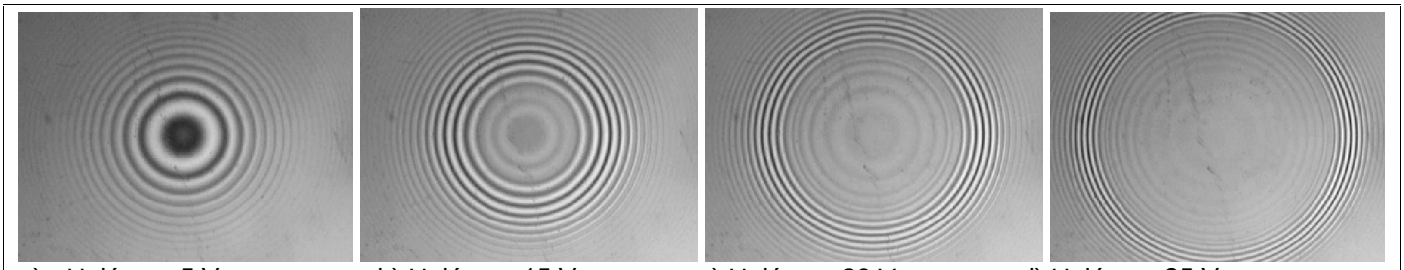
Lancer l'acquisition en mode VSI. Demander une longueur d'analyse (scan) de 10 µm avec un pas de 150 nm par exemple.

Le contact optique balaye la surface du miroir dans tout le champ d'observation de la caméra.

Pour chaque pixel le logiciel enregistre la position du miroir qui donne le niveau de gris le plus bas (frange la plus sombre).



Cadre 10 : interféromètre Sopra



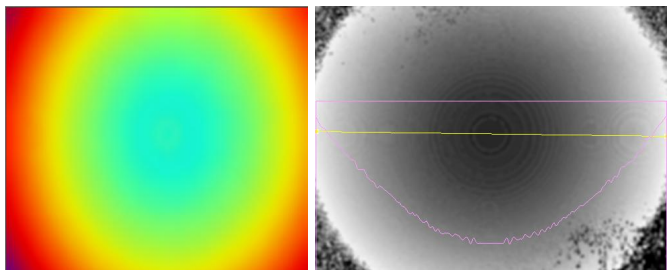
a) Upiézo = 5 V b) Upiézo = 15 V c) Upiézo = 20 V d) Upiézo = 25 V

Cadre 11 : Contact optique pour différente position du miroir.

Enregistrer l'image du profil du miroir (SopraVSI.jpg)

Noter la hauteur z de la flèche entre un point du centre et un point éloigné ainsi que la distance x entre ces points. (utilisez l'outil "visualisation altitude" sur l'image du profil ou/et l'outil "convertir en N&B" pour accéder à z)

En déduire le rayon de courbure du miroir par $R = \frac{x^2}{2z}$ (Calibrage en xy : 1 mm pour 43 pixels)



Cadre 12 : profil en couleur et N&B par VSI

4.2 Le mode PSI

Transmettre au déphaseur une tension nulle

Agir avec doigté sur la vis micrométrique agissant sur la translation du miroir concave jusqu'à avoir des franges comme en Cadre 11 (b ou c).

Placer un filtre interférentiel rouge (BP = 10nm, λ = 635 nm) devant l'objectif permettant des franges nettes sur une grande surface du miroir. Il faudra réajuster le gain de la caméra ainsi que la luminance.

Réajusté la position de la caméra grâce aux vis micrométriques de son support (l'introduction du filtre augmente le chemin optique, il faut donc refaire la mise au point).

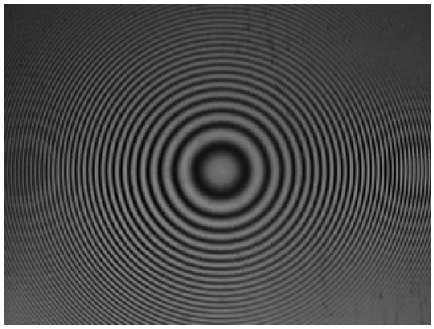
Lancer l'acquisition en PSI. Le logiciel enregistre 4 images déphasées de $\pi/2$ grâce aux déplacements successifs du piézo.

On obtient l'image phasée (pliée). Un masque puis la démodulation fournit le profil en niveaux de gris.

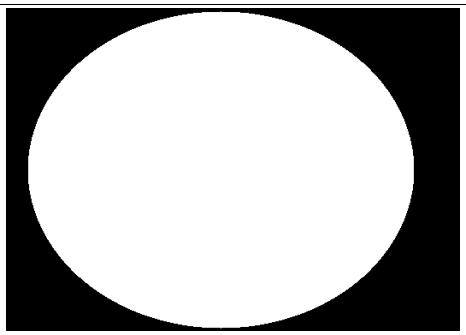
Pour calibrer l'image : en xy 43 pixels pour 1 mm. En z le calibrage s'opère comme pour l'interférométrie de speckle : entrer la valeur 635 nm de la longueur d'onde centrale du filtre et vérifier la valeur M (nombre de sauts de phase dans l'image phasée)

Quel est le rôle du filtre interférentiel ?
Enregistrer l'image du profil (SopraPSI.jpg).
Comme précédemment mesurer le rayon de courbure R du miroir.

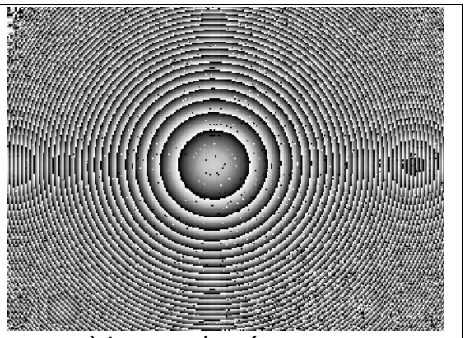
Montrer vos acquisitions à un professeur.



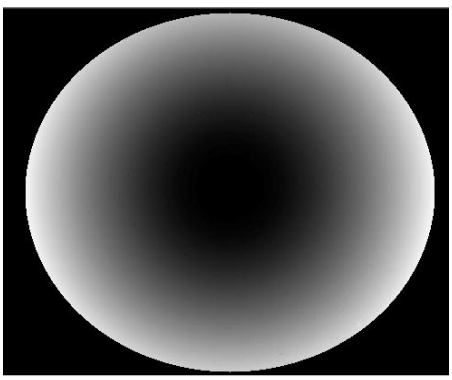
a) Franges en PSI



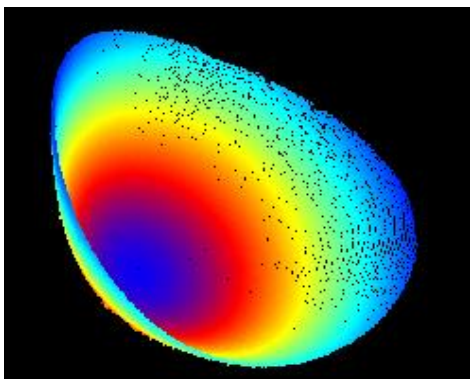
b) Masque



c) Image phasée



d)Image démodulée



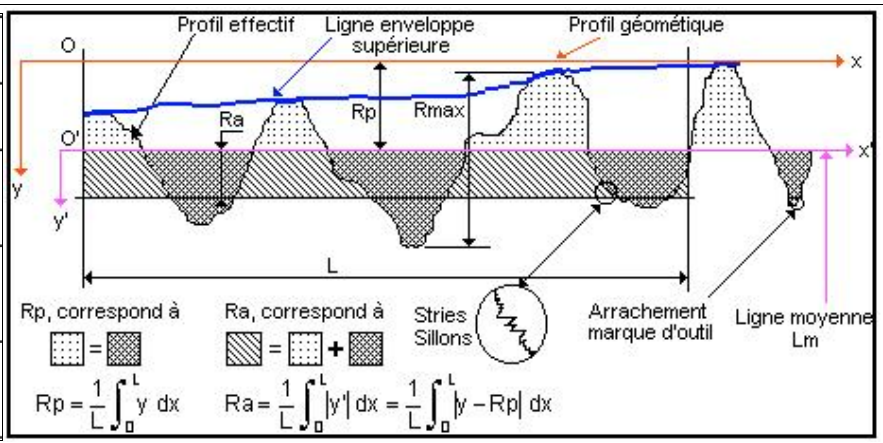
e) Profil 3D du miroir

cadre 13 : Etapes du mode PSI

MISE EN ŒUVRE

1. Mesure de profils et d'états de surfaces

Types de défauts	Désignation
Profil géomètrique	défauts de forme et de position
	ondulation périodique
	strie - sillon, rugosité périodique
	arrachement, fentes, marques d'outil, piqûres, etc.



R_a = écart moyen arithmétique
R_p = profondeur d'aplanissement = distance du point le plus haut à Lm
R_{max} = R_t = profondeur totale = distance du point le plus haut au point le plus bas

cadre 14 : rappels de définitions

Les procédures sont résumées dans "**operator's guide**" qu'il faudra consulter tant qu'on a pas une bonne maîtrise de l'appareil. Pour approfondir, ou pour plus de détails, il faudra consulter "**setup guide**".

Il est bon aussi, avant toute mesure de revoir les principales définitions des coefficients de rugosité : voir DTLP_4 cadres 1 et 2.

2. Mesures par PSI

2.1 Miroir

Utiliser l'objectif de Michelson, la FOV X1, le filtre "High mag"

Ouvrir *Vision32*.

Descendre avec précaution l'objectif jusqu'au voisinage de la surface du miroir (quelques mm)

Régler l'intensité (operator's guide" p.13)

Remonter l'objectif jusqu'à focalisation sur la surface. On doit voir apparaître les franges.

Ajuster le tip et le tilt.

Renseigner les conditions de la mesure (cadre 15).

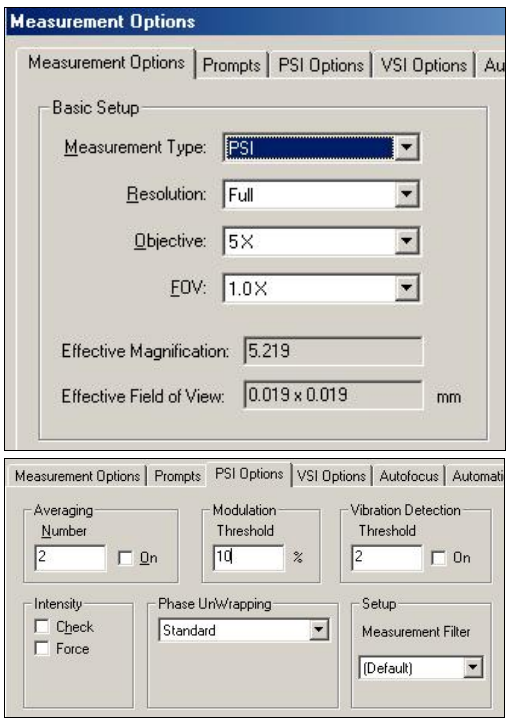
Lancer la mesure (New Measurement).

Attention *: la focalisation avec recherche des franges doit se faire impérativement en remontant l'objectif à partir du voisinage de la surface* ***jamais en le descendant*** *(risque de détérioration en cas de contact avec la surface.*

Montrez votre résultat

Enregistrer votre acquisition : Miroir_PSI_X5_FOV1.opd

Même travail avec l'objectif X20. : Miroir_PSI_X20_FOV1.opd



cadre 15 : options de mesure en PSI

2.2 Lentille

Utiliser une lentille plan convexe (f = 80mm).

Placer la FOV X0.5 pour acquérir un champ plus grand.

Enregistrer : Lent_PSI_X20_FOV0,5.opd

3. Mesure par VSI

3.1 Calibration

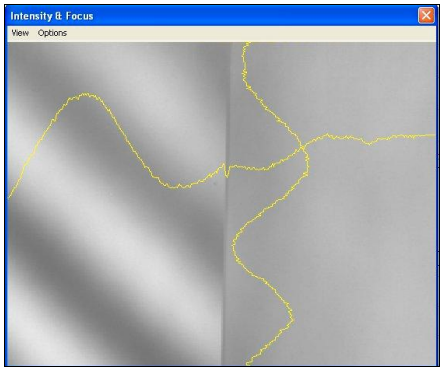
L'appareil doit être régulièrement contrôlé à l'aide d'un étalon : une « marche » de 10,02 µm.

Suivre la procédure pages 19-20.

Après avoir visualisé les franges et réglé l'intensité et la planéité du plateau, faire apparaître les franges sur la face supérieure de l'étalon (Cadre 16).

Renseigner les conditions de la mesure (cadre 18) : l'objectif remonte de 10 µm puis redescend de 10 + 25 µm. Lancer la mesure (New Measurement).

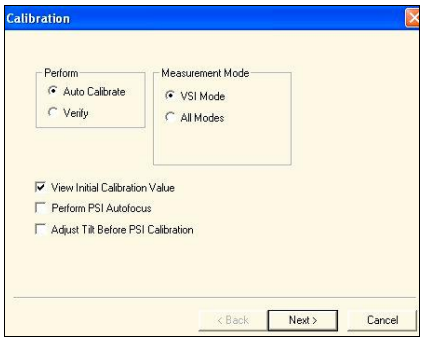
Enregistrer : Etalon_VSI_X5_FOV1.opd (cadre 19).



Cadre 16 : L'étalon de calibration.

Recommencer la mesure, cette fois on passera par la procédure « calibration ». Voir dans l'index de l'aide « calibrate VSI ».

Renseigner correctement la valeur de l'étalon :10,02 µm. Utiliser le mode « verify ». Si le résultat n'est pas conforme, recommencer mais cette fois en mode « autocalibration ».



Cadre 17 : calibration

Montrez votre résultat

3.2 Echantillon de rugosité

Les réglages et la procédure procèdent comme précédemment. Les franges apparaîtront successivement sur les points d'altitudes décroissantes lorsqu'ils seront au contact optique.

- Vérifier l'étalon de rugosité : R_a = 0,76 µm; R_t = 2,6 µm.

  Enregistrer : Rugetalon_VSI_X20_FOV1.opd

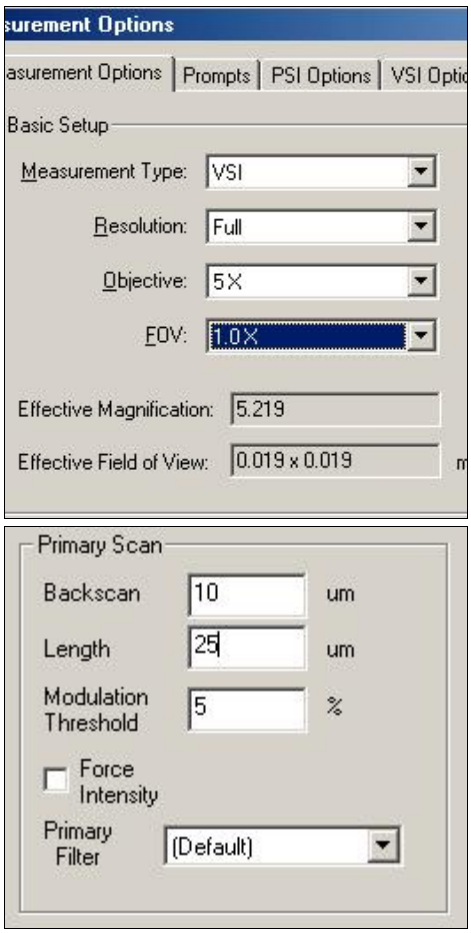
- Choisir l'échantillon C de classe N2.

  Enregistrer : CN2_VSI_X?_FOV?.opd

3.3 Autre exemple

Choisir un autre exemple de mesure en VSI (pièce de monnaie, lame de mica clivée, surfaces métalliques, tissus, papier etc… sur lequel on fera des mesures de profil.*

Enregistrer : Exemple_VSI_X ?_FOV ?.opd



cadre 18 : options de mesure en VSI

PERFORMANCES DU SYSTEME

1. Rugosité

1.1 Avantages et inconvénients des coefficients R

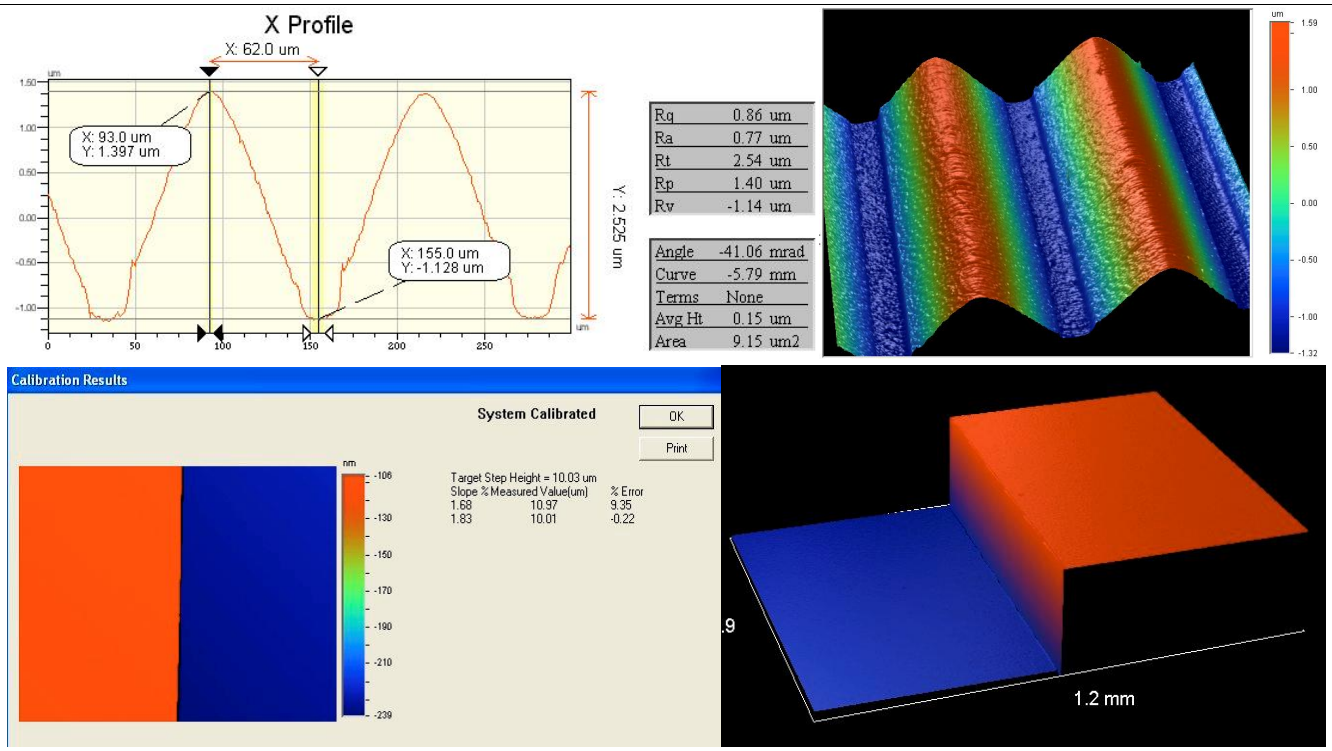
Lire dans "tehnical reference manual" comment sont définis les principaux paramètres permettant l'étude de la topographie d'une surface. On s'aidera aussi de : "*Etats de surfaces "* (document sur site)

Résumer dans un tableau les avantages et inconvénients des coefficients de rugosité :

Paramètres	Avantages	Inconvénients
R_a		
R_q		
R_t		

Tableau 3 : les coefficients de rugosité.

1.2 Mesure de rugosité



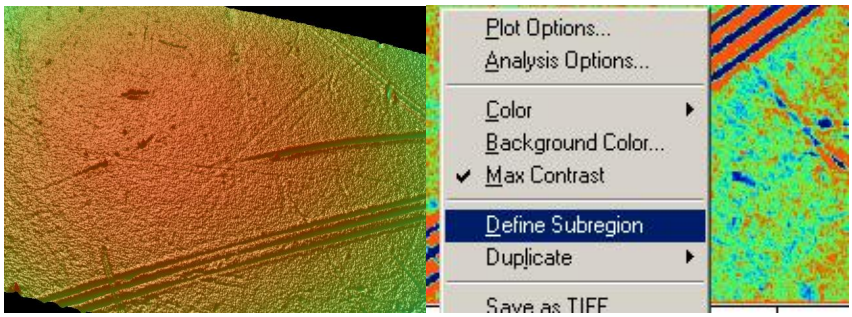
cadre 19 : Rugetalon_VSI_X20_FOV1 et Etalon_VSI_X5_FOV1

Visualiser en 3D l'échantillon CN2. Relever les coefficient R_q et R_t.

L'échantillon était peut-être incliné. Compenser l'inclinaison en cochant l'option "Tilt Only". Relever les coefficients.

Cet échantillon présente une courbure cylindrique. Compenser la par l'option "Cylinder and Tilt". Relever les coefficients.

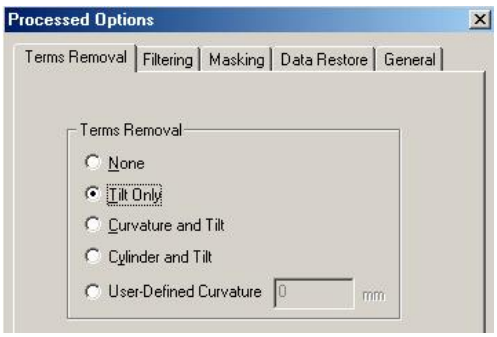
Compléter le tableau.

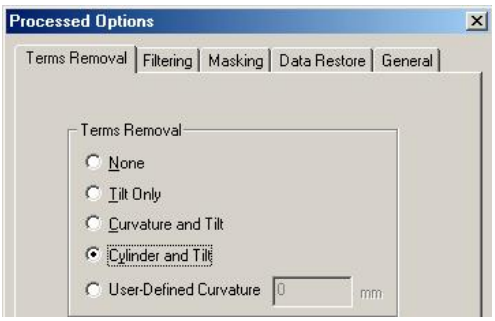


cadre 21 : stries à la surface d'une lentille

Compensation	None	Tilt	Cylinder
R_q			
R_t			

Tableau 4 : rugosité de l'échantillon CN2





cadre 20 : Bouton droit "Analysis option"

Quelles valeurs de rugosité allez vous retenir ?

Faire une sortie imprimante de la représentation 2D avec diagrammes en X et en Y et les valeurs de R_a, R_t retenues.

2. Etude de la courbure et des stries d'une lentille

Des rayures apparaissent sur la surface de la lentille.

Mesurer leur profondeur.

Choisir une zone par l'option "Define Subregion" (cadre 21).

Mesurer alors la profondeur des stries.

Faire une sortie imprimante de "2D Analysis". Profondeur des stries. Valeur de R_q

Mesurer la valeur de Rq dans une région ne comportant pas de stries (sans oublier de compenser la courbure sphérique).

3. Etude d'un exemple choisi (exemple d'une feuille de mica).

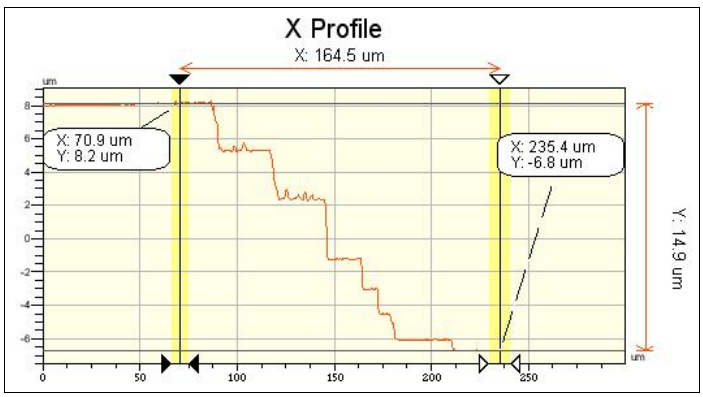
Mesure de la hauteur de la marche (par ex :14,9 ± 0,1 µm).

4. Calibration

Utiliser l'aide ou/et la documentation. Expliquer en quelques mots comment se fait la calibration du mode PSI.

5. Performances de la méthode

Les performances d'une méthode interférométrique sont caractérisées par trois paramètres : précision, reproductibilité, résolution. Voir ***Vocabulaire.pdf***



cadre 22 : valeur du pas mesuré sur Mica X20 FOV0,5.opd

La **précision** est un paramètre lié à la technique de mesure employée. Elle représente la grandeur de déviation d'une mesure par rapport à la valeur exacte. Une haute précision implique que la valeur mesurée s'approche plus de la valeur exacte.

La **reproductibilité** est déterminée par les conditions dans lesquelles s'effectue la mesure. Elle représente la variation des valeurs mesurées par rapport à la valeur moyenne dans un large ensemble de mesures, c'est-à-dire l'habilité à produire la même mesure dans les mêmes conditions de travail.

La **résolution** est l'aptitude à distinguer deux valeurs très proches. Elle est mesurer par l'écart minimum perceptible par le système de mesure indépendamment de la justesse.

Réaliser une étude sur un exemple de votre choix permettant d'évaluer la reproductibilité et la résolution. Faire un tableau de résultats, y porter vos conclusions sur une feuille annexe.
Compléter votre étude en fonction des indications fournies par le constructeur dans "Technical Reference Manual" pages 1-7 à 1-9.

6. Autres techniques

Consulter le document ***Caractérisation_surfaces.pdf***.

Quelles sont les techniques concurrentes à la microscopie interférométrique ?
Précisez le champ d'application de chacune.

LISTE DU MATERIEL et DES LOGICIELS

Type matériel	Nbre	Remarques
Interféromètre Sopra modifié	1	Avec un miroir concave et un miroir à déplacement par céramique piézoélectrique.
alimentation 0 à 100V pour céramique piézoélectrique	1	
Objectif avec diaphragme	1	Focale f = 75 mm
Filtre interférentiel	1	λ = 635 nm; transmission = 55%; BP = 10 nm
Webcam	1	L'objectif de la caméra a été retiré
Une lampe 12 V avec alimentation 2à 12V	1	
Système interférométrique NT 1100 + accessoires suivants ...	1	76040 € HT
Zoom 0,5X	1	permet d'augmenter d'un facteur 2 la surface de mesure
Objectif Michelson, grossissement 5X	1	
Objectif Mirau, grossissement 10X	1	
Objectif Mirau, grossissement 20X	1	
Lame de mica	1	
Lentille Plan convexe (f=80mm)	1	
Miroir	1	**Surface fragile ! Ne pas essuyer.**
Rugotest	1	27 échantillons obtenus par différentes méthodes d'usinages. Classes N10 à N2.
Etalon de rugosité Hommel	1	Ra = 0,76 ; Rt = 2,5 µm
Etalon de calibration WYKO	1	Step : 10,032 µm
Micro-ordinateur	1	
Imprimante	1	

Logiciels	Documentation sur sites
µInterf.xls	Optical profiler Veeco Wyko NT1100 : http://cmi.epfl.ch/metrology/Wyko_NT1100-v03.htm
VSI_PSI	Basics of interferometry : http://cmi.epfl.ch/metrology/Wyko_fichiers/Interferometery_Basics.pdf
Vision32	Etats de surfaces : http://134.214.73.187/etats%20de%20surface/parametres/menu.htm
Excel	

cadre 23 : liste du matériel