

---

---

**Optique et photonique — Mesurage  
interférométrique de composants et  
systèmes optiques —**

**Partie 2:  
Mesurage et techniques d'évaluation**

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
*Optics and photonics — Interferometric measurement of optical  
elements and optical systems —  
(standards.iteh.ai)  
Part 2: Measurement and evaluation techniques*

ISO/TR 14999-2:2019

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5f6b48c3-244b-47f9-bd1c-a8da54dbeb46/iso-tr-14999-2-2019>



**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

ISO/TR 14999-2:2019

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5f6b48c3-244b-47f9-bd1c-a8da54dbeb46/iso-tr-14999-2-2019>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2019

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office  
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8  
CH-1214 Vernier, Genève  
Tél.: +41 22 749 01 11  
Fax: +41 22 749 09 47  
E-mail: [copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
Web: [www.iso.org](http://www.iso.org)

Publié en Suisse

## Sommaire

Page

<b>Avant-propos</b> .....	<b>v</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>vi</b>
<b>1 Domaine d'application</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Références normatives</b> .....	<b>1</b>
<b>3 Termes et définitions</b> .....	<b>1</b>
<b>4 Objets de mesurage</b> .....	<b>1</b>
4.1 Surfaces.....	1
4.1.1 Surfaces frontières des composants optiques.....	1
4.1.2 Degré de réflexion.....	2
4.1.3 Rugosité.....	2
4.1.4 Topologie des régions (régions discontinues).....	2
4.1.5 Continuité de la surface; gradient de la surface.....	2
4.1.6 Rigidité des miroirs; calculs par éléments finis.....	3
4.1.7 Homogénéité de température des miroirs.....	3
4.1.8 Exemples d'objets de mesurage.....	3
4.2 Composants optiques en transmission.....	3
4.2.1 Essais en simple passage par opposition aux essais en double passage.....	3
4.2.2 Fenêtres (aberrations de front d'onde en transmission).....	3
4.2.3 Prismes (aberrations de front d'onde et erreur angulaire).....	3
4.2.4 Influence de la température sur l'indice de réfraction.....	4
4.3 Systèmes optiques.....	4
4.3.1 Essais en simple passage par opposition aux essais en double passage.....	4
4.3.2 Examen dans la pupille.....	4
4.3.3 Aberrations chromatiques.....	4
4.4 Examen indirect de la fonction des composants optiques.....	4
4.4.1 Examen avec différentes longueurs d'onde.....	4
4.4.2 Examen avec différentes trajectoires de faisceau.....	4
4.4.3 Plage de tolérances.....	4
<b>5 Aspects matériels d'un interféromètre et de l'environnement d'essai</b> .....	<b>5</b>
5.1 Généralités.....	5
5.2 Principes de construction et influences sur la qualité des mesurages.....	6
5.2.1 Généralités.....	6
5.2.2 Erreurs intrinsèques de l'instrument et principe de trajet commun.....	7
5.2.3 Compensation optique des erreurs.....	9
5.2.4 Compensation mathématique des erreurs.....	10
5.2.5 Contraste en fonction de l'irradiance dans les bras d'essai et de référence: méthodes pour atteindre l'équilibre dans les deux bras.....	11
5.2.6 Contraste en fonction des performances de la source lumineuse.....	14
5.3 Environnement d'essai.....	16
5.3.1 Généralités.....	16
5.3.2 Influence des vibrations.....	17
5.3.3 Influence de la gravité et du support de l'éprouvette.....	19
<b>6 Méthodes pour évaluer la différence de trajet optique</b> .....	<b>20</b>
6.1 Généralités.....	20
6.2 Examen visuel des interférogrammes.....	21
6.2.1 Généralités.....	21
6.2.2 Exemple 1 — Interféromètre de Fizeau.....	21
6.2.3 Exemple 2 — Interféromètre de Twyman-Green.....	25
6.3 Évaluation manuelle des interférogrammes.....	27
6.4 Mesures de phase avec porteuse temporelle.....	29
6.4.1 Généralités.....	29
6.4.2 Interférométrie hétérodyne.....	30

6.4.3	Interférométrie à verrouillage de phase (PLI).....	31
6.4.4	Détection synchrone et interférométrie à décalage de phase .....	32
6.5	Mesures de phase avec porteuse spatiale.....	35
6.5.1	Analyse des franges par opérations de transformée de Fourier.....	35
6.5.2	Analyse de franges spatialement synchrones.....	36
6.6	Suppression des ambiguïtés de phase (développement de phase).....	38
6.7	Enregistrement des fronts d'onde; systèmes de coordonnées, définition d'un système de coordonnées.....	39
6.8	Polynôme et autres représentations des fronts d'onde.....	40
6.8.1	Représentation des données de phase .....	40
6.8.2	Polynômes de Zernike pour une frontière circulaire .....	41
6.8.3	Utilisation des polynômes de Zernike pour une frontière elliptique .....	41
6.8.4	Polynômes de Zernike-Tatian pour une forme circulaire avec un trou central (annulaire) .....	42
6.8.5	Polynômes de Legendre pour une frontière rectangulaire .....	42
6.8.6	Fonctions orthogonales sur «surfaces inhabituelles» .....	42
<b>7</b>	<b>Rapports d'essai et certificats d'étalonnage.....</b>	<b>43</b>
7.1	Généralités.....	43
7.2	Contenu des rapports d'essai et des certificats d'étalonnage .....	43
7.3	Rapports d'essai.....	44
7.4	Certificats d'étalonnage.....	44
7.4.1	Généralités .....	44
7.4.2	Spécification.....	44
7.4.3	Ajustage ou réparation .....	44
7.5	Avis et interprétations.....	44
7.6	Transmission électronique des résultats .....	45
7.7	Format des rapports et des certificats .....	45
7.8	Amendements aux rapports d'essai et aux certificats d'étalonnage .....	45
<b>8</b>	<b>Format des données.....</b>	<b>45</b>
<a href="https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5f6b48c3-244b-47f9-bd1c-18d54d6b46/iso-tr-14999-2-2019">https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5f6b48c3-244b-47f9-bd1c-18d54d6b46/iso-tr-14999-2-2019</a>		
<b>Annexe A (informative) Polynômes orthogonaux.....</b>		<b>46</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>63</b>

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir [www.iso.org/directives](http://www.iso.org/directives)).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir [www.iso.org/brevets](http://www.iso.org/brevets)).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir [www.iso.org/avant-propos](http://www.iso.org/avant-propos).

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 172, *Optique et photonique*, sous-comité SC 1, *Normes fondamentales*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO/TR 14999-2:2005), qui a fait l'objet d'une révision technique. Les principales modifications sont:

- a) La [Figure 1](#) a été mise à jour.
- b) [A.1](#) a été aligné sur la notation de l'ISO 14999-4.
- c) Mise à jour du texte faisant référence à des technologies ayant évolué depuis plus d'une dizaine d'années, telles que les lasers et détecteurs.
- d) Amélioration de la clarté de l'ensemble du document (nombreuses modifications mineures apportées tout au long du texte).

Une liste de toutes les parties de la série ISO 14999 est disponible sur le site Internet de l'ISO.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse [www.iso.org/fr/members.html](http://www.iso.org/fr/members.html).

## Introduction

Une série de Normes internationales sur les Indications sur les dessins techniques pour la représentation des composants optiques et systèmes optiques a été préparée par ISO/TC 172/SC 1, et publiée sous la forme de l'ISO 10110 sous le titre *Optique et photonique — Préparation des dessins pour éléments et systèmes optiques*. Lors de la rédaction de cette série de normes et notamment de sa Partie 5, *Tolérances de forme de surface* et de sa Partie 14, *Tolérance de déformation du front d'onde*, il est devenu évident pour les experts concernés qu'une documentation complémentaire supplémentaire était requise pour décrire comment les informations nécessaires sur la conformité des pièces fabriquées avec les tolérances établies pouvaient être démontrées. Par conséquent, le Comité ISO responsable, ISO/TC 172/SC 1, a décidé de préparer un Rapport technique ISO sur le Mesurage interférométrique des fronts d'onde optiques et la forme de surface des composants optiques.

Lors de la discussion des sujets qui devaient être inclus ou exclus d'un tel Rapport technique, il a été envisagé que, pour la première fois, un Rapport technique ou une Norme ISO puisse être préparé(e) qui traite d'optique ondulatoire, c'est-à-dire, dans lequel (laquelle) l'approximation par le rayon de l'optique géométrique ne soit plus valide. En conséquence, moins de références que d'habitude étaient disponibles, ce qui a rendu la tâche plus difficile.

Compte tenu du fait que le sujet de l'interférométrie a jusqu'à présent été laissé vierge à l'ISO, le souhait naturel a été d'être le plus exhaustif possible. Par conséquent, le comité a tenu des discussions pour savoir s'il convenait que des techniques importantes telles que la microscopie d'interférence (pour caractériser la micro-rugosité des pièces optiques), l'interférométrie de cisaillement (par exemple pour caractériser les systèmes optiques corrigés), l'interférométrie à faisceaux multiples, les techniques de détection des cohérences ou les techniques de conjugaison de phase soient incluses ou non. D'autres techniques, qui sont liées à l'interférométrie classique à double faisceau, comme l'interférométrie holographique, les techniques de moiré et la profilométrie ont également été mentionnées ainsi que la spectroscopie par transformée de Fourier ou les techniques de polarisation, qui sont surtout destinées à l'interférométrie microscopique.

En fin de compte, le comité a adopté la ligne directrice pour inclure des techniques qui sont à présent couramment utilisées aux fins de caractériser la qualité des pièces optiques comme décrit dans la série ISO 10110. La décision a été prise de rédiger un premier Rapport technique, et de l'actualiser ensuite en complétant les nouvelles parties, le cas échéant.

Le comité a l'intention que ce document couvre la nécessité de qualifier les pièces et les systèmes optiques complets concernant l'erreur de front d'onde qu'ils produisent. De telles erreurs se répartissent sur l'échelle de fréquences spatiales; dans le présent document, seules les parties de ce spectre d'erreur correspondant aux basses et moyennes fréquences sont couvertes, pas l'extrémité du spectre (fréquences très élevées). Ces erreurs en hautes fréquences peuvent seulement être mesurées par microscope, par mesurage de la lumière diffuse ou par palpation non optique de la surface.

Une constatation analogue peut être faite concernant la plage de longueurs d'onde du rayonnement utilisé pour les essais. L'ISO 14999 considère les méthodes d'essai avec lumière visible comme le cas typique. Dans certains cas, un rayonnement infrarouge de longueur d'onde supérieure (par exemple, lasers CO<sub>2</sub> de 10,6 µm) est utilisé pour soumettre à essai les surfaces rugueuses après meulage. Une variété de longueurs d'onde laser pourrait être utilisée pour les essais de systèmes optiques avec front d'onde transmis à la longueur d'onde d'application (par exemple, 1,55 µm ou 1,06 µm dans le proche infrarouge, ou 193 nm ou 248 nm dans l'ultraviolet avec les lasers à excimère pour optique microlithographique). Cependant, ce sont là des cas encore rares, qui sont inclus dans les normes et ne seront pas traités en détail. La plage de longueurs d'onde en dehors de ces limites n'est pas couverte.

# Optique et photonique — Mesurage interférométrique de composants et systèmes optiques —

## Partie 2: Mesurage et techniques d'évaluation

### 1 Domaine d'application

Le présent document donne des explications fondamentales sur les objets de mesurage interférométrique, décrit les aspects matériels des interféromètres et les méthodes d'évaluation, et donne des recommandations pour les rapports d'essai et certificats d'étalonnage.

### 2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

### 3 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>

### 4 Objets de mesurage

#### 4.1 Surfaces

##### 4.1.1 Surfaces frontières des composants optiques

Une tâche courante en interférométrie est le mesurage de la forme d'une surface. Cela peut être accompli de deux manières différentes. Soit la lumière réfléchie, soit la lumière transmise à travers une surface peut être utilisée pour le mesurage.

Le mesurage interférométrique est réalisé en comparant la différence des deux trajets optiques  $\int nd$ . Généralement, un trajet est appelé trajet de référence, l'autre, trajet de mesurage.

L'aberration d'onde résultante,  $\Delta W$ , pour un déplacement  $d$  de la surface, s'il est mesuré en réflexion, est  $\Delta W = 2nd$ . Le même déplacement mesuré en transmission aboutit à l'aberration d'onde  $\Delta W = (n_2 - n_1)d$ .

#### 4.1.2 Degré de réflexion

La réflexion de Fresnel sur la frontière entre deux milieux différents,  $R$ , peut être calculée à partir de l'indice de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  à la surface frontière.

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (1)$$

Pour la plupart des verres optiques, cette valeur est comprise entre 4 % et 6 %, ce qui signifie qu'une moyenne de 5 % est généralement une bonne estimation.

Cette réflexion provoque une perte de lumière du front d'onde transmis à chaque surface. D'autre part, cette réflexion est souvent utilisée pour le mesurage lui-même. Il convient que les deux faisceaux interférents aient approximativement la même intensité, afin d'obtenir une visibilité maximale ou un contraste maximal des franges. Modifier la réflectivité du séparateur de faisceau à l'intérieur d'un interféromètre change uniquement la quantité de lumière dans la combinaison d'interférences et ne change pas le rapport d'intensité des deux faisceaux, parce que la lumière des deux bras est transmise et réfléchi par le séparateur de faisceau une seule fois. Si le trajet de mesurage et le trajet de référence sont séparés, comme dans un montage de Mach-Zehnder ou de Twyman-Green, il est généralement possible d'ajuster les intensités de la lumière dans les deux bras.

Un problème majeur survient dans un interféromètre de Fizeau si la surface de référence a une réflectance élevée, le résultat sera des franges d'interférence à faisceaux multiples se traduisant par des franges étroites comme dans un interféromètre de Fabry-Perot. Si des franges sinusoïdales sont requises comme pour l'évaluation par interférométrie à décalage de phase, il convient que la surface de référence ait une réflexion faible, et un composant doit être introduit entre la surface de référence et la surface de mesurage qui absorbera la lumière sans déformer l'aberration d'onde.

Le problème peut être résolu par l'utilisation d'un interféromètre à décalage de longueur d'onde ou d'un interféromètre à cohérence courte.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5f6b48c3-244b-47f9-bd1c-a8da54dbeb46/iso-tr-14999-2-2019>

#### 4.1.3 Rugosité

Pour le mesurage interférométrique, il convient que la rugosité de la surface mesurée ne dépasse pas une certaine limite qui est une fraction de la longueur d'onde et de la différence entre les indices de réfraction, en cas d'utilisation en transmission.

#### 4.1.4 Topologie des régions (régions discontinues)

Des difficultés peuvent survenir avec le logiciel de l'interféromètre lorsque la surface du front d'onde présente des ruptures (en raison, par exemple, de sa division en segments par les supports mécaniques du miroir secondaire d'un télescope à miroir). Les problèmes sont les plus graves avec le logiciel d'analyse des franges statiques, qui dépend fortement de l'utilisation de points voisins pour déterminer la position et la continuité des franges. L'analyse logicielle des différences de phase n'est pas affectée de la même manière qu'une évaluation point par point des aberrations d'onde.

Des problèmes similaires peuvent survenir si la surface du front d'onde a un contour complexe.

#### 4.1.5 Continuité de la surface; gradient de la surface

En raison de l'ambiguïté inhérente du déphasage  $\pm n2\pi$ , il n'est pas possible de mesurer une forme de surface arbitraire uniquement. L'évaluation d'une surface lisse est généralement correcte, si l'aberration d'onde entre deux points résolubles est inférieure à  $\pi$ . Cela limite efficacement les pentes les plus fortes (ou les discontinuités de type marche les plus fortes) qui peuvent être mesurées sans ambiguïté avec l'interféromètre.

Le gradient de la surface soumise à essai par rapport à la surface de référence se traduit par un gradient de l'aberration d'onde mesurée et par une forte densité de franges ou des franges étroitement espacées. Les interférogrammes ne peuvent pas être évalués, si la séparation des franges est inférieure au

double de la distance de deux points résolubles. Ainsi le gradient local du front d'onde imagé doit être inférieur à  $(0,5 \lambda)/(\text{espacement des éléments détecteurs})$  pour une récupération de phase univoque. Si cette condition n'est pas possible par ajustage, ou en changeant le montage de mesure, un système optique de compensation peut être requis dans certains cas.

Certains des problèmes causés par l'ambiguïté du déphasage peuvent être résolus par interférométrie à longueurs d'onde multiples.

#### 4.1.6 Rigidité des miroirs; calculs par éléments finis

Il convient qu'un élément optique soumis à essai ne soit pas déformé d'une manière autre que celle avec laquelle il le serait dans son application prévue. Il peut être difficile de remarquer si un élément optique est déformé pendant le mesurage par l'appareillage d'essai, qui maintient l'élément optique en place pendant cette même étape. Comme première indication de l'influence de l'appareillage d'essai, l'objet peut être mesuré en utilisant deux appareillages d'essai différents ou plus pour maintenir l'élément optique de différentes façons. En cas de doute, un calcul par éléments finis est recommandé pour évaluer l'effet de déformation sur l'élément optique.

#### 4.1.7 Homogénéité de température des miroirs

Durant le mesurage, il convient que l'objet ait une température homogène. Les températures inhomogènes peuvent occasionner des déformations. Le coefficient de dilatation thermique des matériaux optiques est relativement élevé et la conductivité thermique des matériaux optiques est très faible. Il convient qu'un temps suffisant soit autorisé pour que les éléments optiques soumis à essai atteignent un équilibre thermique. Cela peut prendre plusieurs minutes dans certains cas, mais dans d'autres, il peut falloir plusieurs heures pour atteindre un équilibre thermique.

#### 4.1.8 Exemples d'objets de mesurage

Les éléments qui peuvent être mesurés par interférométrie incluent les plans optiques, les fenêtres, le verre brut, les miroirs convexes et concaves, les lentilles, les prismes, et les systèmes optiques.

### 4.2 Composants optiques en transmission

#### 4.2.1 Essais en simple passage par opposition aux essais en double passage

Les composants optiques de transmission peuvent être mesurés en simple passage ou double passage, en fonction du montage interférométrique. Le mesurage en double passage augmente la sensibilité par un facteur de deux mais peut également inclure l'effet de la surface réfléchissante. Dans les mesurages en double passage, il convient aussi de tenir compte de la possibilité que la lumière réfléchie repasse à travers le composant en différentes positions.

#### 4.2.2 Fenêtres (aberrations de front d'onde en transmission)

Pour les fenêtres, l'erreur de forme des surfaces n'est généralement pas importante. En outre, le front d'onde transmis mesuré inclura l'homogénéité du matériau. En fonction de l'application, une certaine quantité de puissance peut être tolérée séparément des autres aberrations d'onde. Par ailleurs, un coin toléré peut être mesuré par interférométrie. Cependant, il peut être plus pratique d'utiliser d'autres appareils pour mesurer les erreurs angulaires.

#### 4.2.3 Prismes (aberrations de front d'onde et erreur angulaire)

Comme dans le cas des fenêtres, les aberrations de front d'onde et les erreurs angulaires des prismes peuvent être mesurées par différents appareils. Cependant, si les tolérances angulaires sont dans la région interférométrique, et que de nombreuses pièces doivent être mesurées, il peut être plus pratique de mesurer les deux éléments par interférométrie. Dans ce cas, un montage fixe, ou un échantillon maître, est utilisé comme référence.

#### 4.2.4 Influence de la température sur l'indice de réfraction

Pour le mesurage d'un composant optique en transmission, il convient de noter que non seulement les objets peuvent être déformés par la dilatation thermique, mais également que l'indice de réfraction du matériau change avec la température. Par conséquent, le réglage thermique de l'éprouvette avant les essais est encore plus important.

### 4.3 Systèmes optiques

#### 4.3.1 Essais en simple passage par opposition aux essais en double passage

Les systèmes optiques complets peuvent être mesurés par interférométrie d'une manière similaire aux essais de composants uniques. Il est, cependant, important que les systèmes soient mesurés dans la même géométrie que celle dans laquelle ils sont destinés à être utilisés. Cela peut conduire à un montage complexe en simple ou double passage. Pour les longs systèmes soumis à essai en double passage et en présence d'aberrations graves, il est nécessaire de supposer que le trajet de la lumière réfléchie peut être considérablement différent du trajet de la lumière incidente.

#### 4.3.2 Examen dans la pupille

Il convient que les mesurages interférométriques soient effectués dans la pupille de sortie du système optique.

#### 4.3.3 Aberrations chromatiques

Si les systèmes sont mesurés à des longueurs d'onde différentes de celles pour lesquelles ils sont conçus, il convient que les effets provoqués par les aberrations chromatiques soient calculés. Il y aura certains systèmes où les aberrations d'onde peuvent être simplement mises à l'échelle par le rapport des longueurs d'onde d'essai et de conception, alors que d'autres systèmes sont si différents qu'un mesurage n'est pas possible.

Concernant les mesurages des fronts d'onde transmis avec un interféromètre à décalage de longueur d'onde, examiner s'il convient d'utiliser l'indice de réfraction classique ou l'indice de réfraction du groupe pour décrire le milieu.

### 4.4 Examen indirect de la fonction des composants optiques

#### 4.4.1 Examen avec différentes longueurs d'onde

Dans certains cas, l'examen des composants optiques plans est possible à des longueurs d'onde autres que la longueur d'onde d'application. Dans ces cas, les corrections peuvent être mises à l'échelle à la longueur d'onde d'application. Il convient de noter, cependant, que les inhomogénéités des matériaux optiques peuvent dans une certaine mesure dépendre de la plage de longueurs d'onde. En raison de la présence d'aberrations chromatiques, aucune recommandation universelle n'est possible.

#### 4.4.2 Examen avec différentes trajectoires de faisceau

Il est préféré que le montage de mesurage soit aussi semblable que possible à l'application. Cependant, dans certains cas, il peut être plus pratique de mesurer des composants optiques d'une manière différente de leur utilisation. Dans ce cas, il peut être plus difficile de trouver une corrélation entre l'aberration d'onde mesurée et la manière dont l'application est affectée par ces aberrations.

#### 4.4.3 Plage de tolérances

Parfois, la relation entre le mesurage interférométrique et les tolérances des objets mesurés n'est pas claire. Généralement, il convient que le montage d'essai complet soit pris en compte et, si possible, que la

sensibilité aux tolérances de mesure soit analysée avec des calculs par éléments finis. Les calculs de conception optique peuvent également être utilisés comme une méthode d'évaluation.

## 5 Aspects matériels d'un interféromètre et de l'environnement d'essai

### 5.1 Généralités

L'objet du présent article est d'informer l'utilisateur des problèmes courants associés aux mesurages interférométriques pouvant affecter l'exactitude des mesurages. En réalité, deux personnes différentes utilisant le même matériel et effectuant leurs mesurages dans le même laboratoire, n'obtiendront pas nécessairement des résultats identiques avec leurs mesurages. L'utilisateur expérimenté peut obtenir un résultat très précis, alors que l'utilisateur inexpérimenté peut avoir plusieurs erreurs graves dans son résultat, dont il pourrait ne pas s'apercevoir. Il est important de ne pas oublier qu'une bonne reproductibilité du mesurage ne garantit pas un résultat exact, parce que les sources systématiques d'erreurs ont pu influencer les résultats mesurés. La connaissance de telles influences éventuelles, et de la façon de les éviter, relève des compétences expérimentales.

Les sources d'erreurs dans les mesurages interférométriques incluent, par exemple:

- mauvaise utilisation de l'instrument de mesure due à une mauvaise compréhension des principes optiques, par exemple, incapacité à imager la surface soumise à l'essai sur la caméra CCD de l'interféromètre;
- utilisation de dispositifs de fixation inadaptés pour maintenir l'éprouvette, induisant une contrainte qui provoque une flexion;
- influence de la gravité sur l'éprouvette;
- vibrations du montage d'essai, qui peuvent induire des erreurs de mesure de phase;
- utilisation inadaptée d'ajustements polynomiaux concernant la forme donnée de l'ouverture (par exemple, en raison de certaines parties obscurcies de la forme circulaire) et soustraction adjacente de termes d'erreur comme les termes d'inclinaison et de mise au point, à cause d'une violation de l'hypothèse d'orthogonalité;
- présence de couches d'air stables avec différentes températures dans la cavité de l'interféromètre, provoquant une aberration d'ordre inférieur systématique;
- retournement (mise en miroir), ou une autre anomalie, d'une carte des erreurs d'étalonnage concernant l'orientation, la forme ou le grossissement effectifs du champ mesuré;
- influence de différents réglages de température ou de mise au point entre l'étalonnage et le mesurage;
- utilisation d'éprouvettes qui ne sont pas homogènes en température et ont un coefficient de dilatation thermique considérable;
- ajustages avec soustraction de l'inclinaison ou de la mise au point, pouvant entraîner des défauts d'alignement inaperçus.

Ce sont seulement des exemples; même s'il y a un nombre de sources d'erreur «typiques» beaucoup plus important. La seule manière de surmonter ces types d'erreur, qui dépendent pour beaucoup de la situation de l'essai concerné et des exigences pour l'exactitude finale, est qu'il convient que l'opérateur planifiant et montant le dispositif d'essai soit conscient des influences possibles sur l'exactitude du mesurage, qui peuvent être de nature optique ou mécanique.

Théoriquement, il est très important de ne pas se fier aveuglément aux résultats que l'instrument donne. En même temps, il est tout aussi important de ne pas rejeter la faute sur l'instrument, ou sur le principe du mesurage interférométrique, s'il y a des résultats inexplicables. Notons que dans la majorité des cas, l'instrument indique les «bons» résultats à partir de ce qui lui est présenté, même s'il ne s'agit pas de la tâche de mesurage en question. Si, par exemple, la carte des erreurs mesurées ne pivote pas

de 72° lorsque l'éprouvette pivote physiquement de 72°, cela est susceptible d'indiquer que la surface de référence peut contribuer considérablement à l'erreur totale. Le support de l'éprouvette peut aussi influencer le mesurage, etc.

Un autre essai pourrait être de répéter le mesurage après 1 h sans rien toucher entretemps. Si les résultats s'écartent les uns des autres, la température de la surface soumise à essai ou sa structure de support a pu avoir une distribution irrégulière dans le premier essai. Le temps nécessaire à l'obtention d'une stabilité thermique adéquate pour le mesurage peut varier significativement, en fonction des dimensions de la pièce et du dispositif de fixation, du coefficient de dilatation thermique, de  $dn/dT$ , de la conductivité thermique, de la capacité thermique, de la distribution initiale de la température, et de l'exactitude de mesure souhaitée. En outre, la température dans le laboratoire a pu changer, l'instrument a pu se réchauffer, etc.

Ces tests sont impératifs afin d'exclure au moins les sources d'erreur les plus courantes. Il est fortement recommandé de répéter un mesurage au moins trois fois et de comparer les résultats; il convient que cette répétition inclue le démontage et le remontage de la pièce dans le montage d'essai, ainsi que tous les réglages du montage et les paramètres de l'interféromètre. Il est encore mieux de répéter toute la procédure d'essai un autre jour, voire même par un autre opérateur.

Il convient que l'ensemble des conditions et des paramètres de mesurage soient documentés et que les ensembles de données finales soient enregistrés sur l'ordinateur d'une manière organisée. Idéalement, il convient que la documentation soit stockée avec les ensembles de données mesurés. Il convient que tout autre traitement comme la soustraction de l'inclinaison ou même des fonctions d'ordre supérieur (Zernike), le nombre de moyennes, tout filtrage comme le lissage avec un filtre passe-bas ou médian spatial pour supprimer les «pointes», soit documenté et stocké avec l'ensemble de données. Ces informations font partie du résultat et, lorsqu'elles ne sont pas données avec la carte de la surface mesurée, le résultat est inutile et ne peut pas servir de preuve de qualité pour la pièce soumise à essai.

## 5.2 Principes de construction et influences sur la qualité des mesurages

ISO/TR 14999-2:2019

### 5.2.1 Généralités

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5f6b48c3-244b-47f9-bd1c-a8da54dbeb46/iso-tr-14999-2-2019>

Lorsque l'écart de front d'onde d'une éprouvette est mesuré par un interféromètre, l'éprouvette devient partie intégrante du système optique de l'instrument. Il convient que la condition d'autocollimation soit remplie, ainsi que la condition d'imagerie de la surface soumise à essai sur le détecteur. Afin d'obtenir une grande flexibilité des positions possibles pour la surface soumise à essai et pour différentes configurations d'essai, il y aura des exigences strictes sur la cohérence spatiale et temporelle de la source lumineuse, qui doivent être remplies. Celles-ci peuvent être facilement réunies par l'utilisation d'un laser et, conjointement avec une très forte intensité par rapport aux autres sources lumineuses, sont la raison pour laquelle le laser est la source lumineuse typique pour les interféromètres.

Une des conséquences de la très grande cohérence des lasers est que toutes les sortes d'imperfections, telles que les impuretés et substrats, collages et revêtements optiques, micro-rayures, bulles, trous, particules de poussière, micro-rugosité des surfaces, qui peuvent apparaître dans n'importe quelle partie du trajet lumineux à travers l'interféromètre, sont «collectées» et sont superposées sous la forme d'une souillure, à savoir, de modulations d'amplitude et de phase indésirables des fronts d'onde. Plus les défauts perturbateurs sont loin d'un plan image du détecteur, plus les défauts sont modifiés dans leurs distributions de phase en raison de la diffraction de Fresnel et dans leur fréquence spatiale. Un défaut très étroit situé sur une surface près d'une image de la source lumineuse pourrait s'étendre jusqu'à apparaître de grande taille dans le plan du détecteur. La spécification des pièces optiques utilisées dans un montage d'interféromètre doit donc être beaucoup plus stricte que dans les instruments optiques conventionnels et dépendre de la position de la pièce sur le trajet des rayons. Pour les surfaces à proximité de l'image de la source lumineuse (où les diamètres des faisceaux de rayons sont faibles), il convient que les exigences ultra-élevées de qualité de surface soient maintenues. De manière générale, plus l'exactitude de l'essai a besoin d'être élevée, plus les exigences pour la qualité de toutes les pièces de l'interféromètre sont sévères.

Comme expliqué dans l'ISO/TR 14999-1, il est très important d'imager le front d'onde soumis à essai sur le plan du détecteur. Si la position de ce front d'onde par rapport à l'instrument change d'un montage

d'essai à l'autre, il convient de prévoir une possibilité de refocalisation du détecteur dans cette nouvelle position. Dans certains instruments, une disposition est prise pour modifier le grossissement avec lequel le front d'onde soumis à essai est imagé sur le détecteur. Dans certains cas, ceci est fait par étapes fixes, dans d'autres cas, ceci est fait en continu sur une certaine plage. D'autre part, il est nécessaire d'obtenir une bonne correction des fronts d'onde optiques lors de l'«adaptation» des fronts d'onde dans l'instrument à la forme souhaitée et, en même temps, de la réalisation d'une bonne fonction de transfert optique pour l'amplitude et la phase lors de l'imagerie du front d'onde soumis à essai sur le plan du détecteur. La capacité d'un interféromètre à transférer différents éléments de fréquence spatiale (avec des amplitudes d'une petite fraction d'une longueur d'onde) au détecteur est quantifiée avec une fonction de transfert de l'instrument (ITF). Celle-ci porte aussi parfois l'appellation de fonction de transfert du système (STF) ou fonction de transfert de hauteur (HTF). Les définitions et méthodes pour quantifier l'ITF figurent dans les Références [5], [6] et [7] et dans d'autres ouvrages.

Toutes ces possibilités et exigences entraînent une certaine complexité de l'ensemble optique d'un tel instrument, conduisant à des systèmes optiques avec de multiples surfaces. Il est évident qu'il est plus difficile de maintenir les perturbations supplémentaires indésirables par les pièces optiques lorsque davantage de pièces optiques sont nécessaires pour obtenir la fonctionnalité souhaitée. La compétence du concepteur d'un instrument réside dans sa capacité à trouver le meilleur compromis entre le degré de correction des aberrations (maintenir faibles les erreurs de front d'onde à basses fréquences spatiales) et le degré de bruit (à savoir, erreurs aux fréquences spatiales élevées). Le bruit augmente avec chaque surface supplémentaire qui peut être nécessaire pour la correction des aberrations. Puisque la complexité du montage optique croît avec l'universalité de l'usage de l'instrument, il est beaucoup plus facile de construire un instrument à usage unique de grande qualité.

En raison du coût élevé de production, et de la détérioration de l'apparence des interférogrammes évidente pour tout client, les entreprises tendent à minimiser le nombre de composants optiques et à chercher à obtenir la meilleure correction pour les aberrations de front d'onde. Cela peut avoir des conséquences pour la manipulation de l'instrument. Si, par exemple, la sphère de transmission, utilisée pour les essais sphériques, n'est pas alignée correctement lorsqu'elle est attachée à l'instrument, un coma et un astigmatisme peuvent être introduits dans le front d'onde mesuré. Si des écarts d'alignement du réglage de focalisation entre les mesurages d'étalonnage et les mesurages finaux pour les pièces soumises à essai existent, ceci peut à nouveau provoquer des erreurs de front d'onde dans les résultats finaux. Alors qu'un instrument qui incorpore davantage de composants correcteurs de fronts d'onde peut être «robuste» contre les erreurs d'aberration d'ordre supérieur, il peut conduire à des résultats de mesurage avec une quantité supérieure de bruit cohérent en raison du nombre accru de surfaces.

Les critères opposés pour la manière de concevoir un interféromètre laser exigent un compromis entre la qualité du front d'onde, la correction du champ, la polyvalence d'une part, et le nombre et la position des surfaces, d'autre part.

## 5.2.2 Erreurs intrinsèques de l'instrument et principe de trajet commun

La tâche devient de plus en plus difficile lorsque les erreurs, qui doivent être mesurées avec exactitude, deviennent de plus en plus petites. Il pourrait être conclu de ceci qu'il serait presque impossible d'obtenir des résultats de mesurage fiables. Il va sans dire qu'il est nécessaire que les «erreurs intrinsèques» provoquées par l'instrument lui-même ne soient pas au moins supérieures aux erreurs entraînées par l'éprouvette. Exemple: supposons que l'éprouvette soit une surface sphérique bien polie d'une lentille. L'interféromètre lui-même peut inclure au total 12 surfaces de lentilles et 10 autres surfaces de lames planes. Par conséquent, il serait nécessaire de fabriquer les 22 surfaces à l'intérieur de l'instrument à un degré de perfection qui soit au moins 22 fois meilleur que celui de l'éprouvette afin d'obtenir la même perturbation avec l'instrument (à savoir, «erreurs intrinsèques») et avec l'éprouvette. Ou, il pourrait être conclu qu'un facteur 4 à 5 serait suffisant pour des erreurs réparties aléatoirement. Même dans le dernier cas, il serait presque impossible de fabriquer et d'assurer la maintenance d'un instrument avec un tel degré de perfection.

Cet argument est à la fois correct et incorrect. C'est le principe d'interférence que les erreurs communes aux deux ondes, à savoir, l'onde d'essai et l'onde de référence, s'annulent. L'utilisation ultime de ce principe est apparente dans l'interféromètre de type Fizeau, où toutes, sauf la dernière surface avant la surface à soumettre à essai et l'air entre ces deux surfaces, sont communs aux deux ondes.

La quantité qui est mesurée par un interféromètre de Fizeau est la différence de trajet optique entre les deux surfaces se faisant face (la «distribution de l'épaisseur optique» de la lame d'air; ceci inclut la distribution de l'indice de réfraction de l'air). Jusqu'ici, l'argument est faux; mais il est juste pour les erreurs très faibles. Il n'est jamais possible que les rayons empruntent exactement le même trajet, donc le principe de «trajet commun» avec annulation des erreurs communes est toujours transgressé, si un bruit aux fréquences spatiales élevées est demandé. Ainsi, même si les interféromètres de Fizeau sont plus robustes pour les erreurs avec de basses fréquences spatiales, ceci n'est pas le cas pour le bruit cohérent.

Afin de vérifier la sensibilité d'un instrument aux erreurs d'alignement ainsi que pour le bruit intrinsèque à hautes fréquences, les deux procédures suivantes peuvent être utiles.

- a) Il convient que la procédure suivante soit répétée avec différentes orientations des franges et également avec le nombre le plus élevé de franges que l'instrument est capable de mesurer. Cet essai est une mesure de la robustesse de l'instrument contre les défauts d'alignement de toutes sortes. Procéder comme suit.
- 1) Placer un plan de référence devant le plan de transmission de l'instrument et régler pour obtenir environ 25 franges d'inclinaison.
  - 2) Réaliser un mesurage et stocker le résultat.
  - 3) Régler pour obtenir des franges nulles et réaliser un autre mesurage.
  - 4) Soustraire les données de mesurage de l'étape 3 des données de l'étape 2 et calculer les termes de Zernike pour l'ensemble de données de différence résultant; en plus d'autres erreurs, l'inclinaison du front d'onde induit par rapport à l'axe optique rend visible les aberrations du front d'onde optique qui vont normalement avec le faible angle de l'onde d'essai.
- b) La seconde procédure contrôle le bruit intrinsèque à hautes fréquences et donc la capacité à détecter les erreurs très faibles qui vont normalement avec de très faibles amplitudes. Procéder comme suit.
- 1) Relever les données de l'écart du mesurage sur l'axe et du mesurage avec les 25 franges d'inclinaison.
  - 2) Soustraire les 36 premiers termes de Zernike. La carte de la surface restante montre surtout le bruit cohérent intrinsèque de l'instrument.
  - 3) Lorsque les «pointes», qui se produisent à la frontière de la pièce mesurée, sont supprimées, la valeur quadratique moyenne est un indicateur de qualité pour le bruit intrinsèque. Il convient que ce bruit soit non corrélé lorsque l'expérience est répétée avec différentes orientations des franges et se réduise donc avec la loi des racines carrées, si les mesurages avec différentes orientations des franges sont moyennés et que la différence de ces moyennes est calculée au lieu de la différence de seulement deux mesurages.

En plus de ces essais, il est recommandé que deux autres contrôles simples soient réalisés pour évaluer le bon alignement de l'instrument:

La collimation de l'onde plane quittant le système peut être contrôlée avec l'aide d'une lame à faces parallèles, épaisse (>30 mm) et de bonne qualité optique connue, en insérant la lame à faces parallèles avec un angle incident de 45° dans le faisceau et en projetant l'interférogramme en cisaillement latéral sur un écran. Si la lame n'a pas d'angle de coin, il convient qu'aucune frange ne soit visible, mais elles seront présentes si le front d'onde de l'interféromètre converge ou diverge.

L'ajustage du réticule d'alignement, ou d'autres moyens pour l'alignement du faisceau, peut également être vérifié en utilisant un miroir ou prisme en coins de cube de bonne qualité connue. Il convient que le faisceau réfléchi soit incident précisément au centre du dispositif d'alignement. Cela est également une méthode pour régler la surface de référence perpendiculairement au faisceau. En inclinant la surface de référence, il convient que les franges d'interférence formées par l'onde de référence et une onde

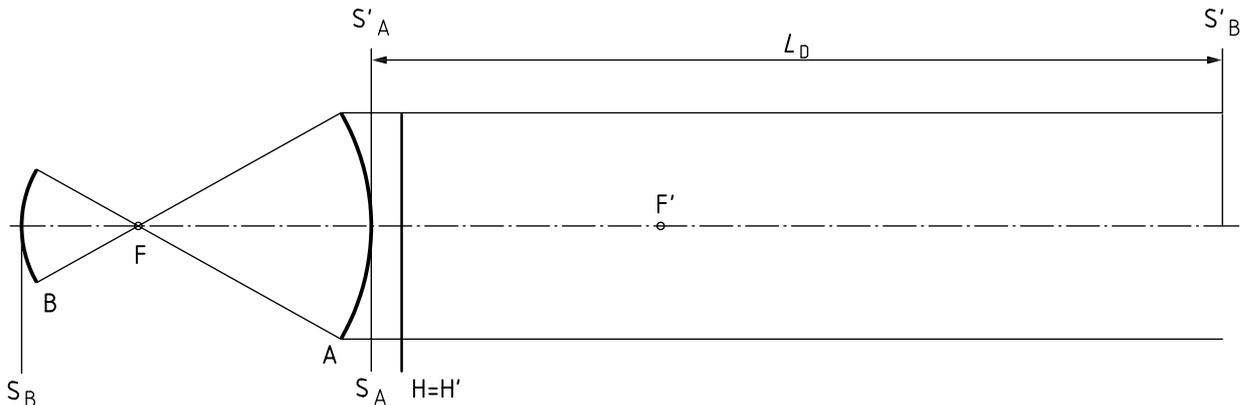
réfléchi par le triple miroir (ayant trois surfaces avec des angles de  $90^\circ$  entre eux) soient rendues les plus larges possible.

### 5.2.3 Compensation optique des erreurs

C'est une propriété très utile de l'interférence de deux faisceaux que le principe physique peut aider à supprimer les erreurs provoquées par les composants de l'interféromètre. Si les deux faisceaux interférents connaissent les mêmes perturbations lorsqu'ils traversent les pièces optiques, les erreurs de front d'onde imprimées sur eux sont identiques et s'annulent dans la différence de front d'onde finale. Par conséquent, il convient que les deux fronts d'onde empruntent presque le même trajet à travers l'instrument pour que la «compensation optique» des erreurs se produise. Le meilleur moyen d'obtenir cela est de réaliser un montage d'essai de Fizeau, où la surface d'essai et la surface de référence se font face sans aucun composant entre elles. Cette annulation n'est pas nécessairement parfaite, s'il y a des écarts de trajet optique lorsque les faisceaux sont inclinés l'un par rapport à l'autre.

Un autre écart par rapport à la symétrie parfaite des ondes interférentes est dû aux conditions d'imagerie des deux surfaces en question sur le détecteur. Les deux surfaces dans une configuration de Fizeau, la surface d'essai et la surface de référence, ne peuvent pas toutes les deux être imagées exactement sur la surface du détecteur en même temps. Normalement, la surface de référence est plus grande que nécessaire, pour que la surface soumise à essai définisse l'ouverture finale pour la taille de l'interférogramme. Dans ce cas, aucune erreur n'est introduite dans un premier ordre par la diffraction de Fresnel à la frontière de la surface de référence, lorsque cette frontière est plus grande que le diamètre utilisé. Néanmoins, il y a une autre erreur d'ordre supérieur, qui sera expliquée conjointement avec les essais des surfaces sphériques avec ce que l'on appelle une «sphère de transmission de Fizeau».

La [Figure 1](#) montre les conditions optiques lors de l'essai d'une surface sphérique B par rapport à une surface de référence A. Dans cet exemple, il est supposé que la surface de référence A (il s'agit de la dernière surface de la sphère de transmission) ainsi que la surface d'essai B sont toutes les deux concaves. Les sommets des surfaces sont appelés  $S_A$  et  $S_B$ . La cavité de Fizeau est réglée correctement lorsque les deux surfaces sont disposées de sorte qu'elles aient un centre de courbure commun. Si la lentille de Fizeau est calculée et fabriquée convenablement, ce point central coïncide avec le point focal F de l'onde sphérique, éclairant la surface de référence A.



**Figure 1** — Les images  $S'_A$  et  $S'_B$  des sommets de la surface de référence  $S_A$  et de la surface d'essai  $S_B$  sont défocalisées l'une par rapport à l'autre

Comme on peut le voir sur la [Figure 1](#), les deux surfaces en question sont imagées par la sphère de transmission, qui est optiquement représentée par le plan principal  $H = H'$  et les points focaux F et F', dans différentes positions de l'axe optique. Les tailles des images correspondent, mais la distance axiale entre les images,  $L_D$  (la «défocalisation»), est représentée sur la [Figure 1](#). À présent, il est supposé qu'il pourrait y avoir des aberrations déjà présentes dans le front d'onde éclairant la sphère de transmission ainsi que des aberrations supplémentaires ajoutées par la sphère de transmission elle-même. Il convient que la sphère de transmission image un objet infini dans le point focal F sans introduire d'aberration sphérique supplémentaire. En outre, il convient que le sommet de la surface d'essai  $S_B$  soit imagé en  $S'_B$  et le sommet de la surface de référence  $S_A$  en  $S'_A$  sans ajouter différents termes de phase dans ces images.