
**Lasers et équipements associés aux
lasers — Méthodes d'essai pour la
détermination de la forme du front d'onde
du faisceau laser —**

**Partie 2:
Senseurs Shack-Hartmann**

iTeh STANDARD PREVIEW

(standard) (preview)
*Lasers and laser-related equipment — Test methods for determination
of the shape of a laser beam wavefront —*

Part 2: Shack-Hartmann sensors

ISO 15367-2:2005

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005>



PDF – Exonération de responsabilité

Le présent fichier PDF peut contenir des polices de caractères intégrées. Conformément aux conditions de licence d'Adobe, ce fichier peut être imprimé ou visualisé, mais ne doit pas être modifié à moins que l'ordinateur employé à cet effet ne bénéficie d'une licence autorisant l'utilisation de ces polices et que celles-ci y soient installées. Lors du téléchargement de ce fichier, les parties concernées acceptent de fait la responsabilité de ne pas enfreindre les conditions de licence d'Adobe. Le Secrétariat central de l'ISO décline toute responsabilité en la matière.

Adobe est une marque déposée d'Adobe Systems Incorporated.

Les détails relatifs aux produits logiciels utilisés pour la création du présent fichier PDF sont disponibles dans la rubrique General Info du fichier; les paramètres de création PDF ont été optimisés pour l'impression. Toutes les mesures ont été prises pour garantir l'exploitation de ce fichier par les comités membres de l'ISO. Dans le cas peu probable où surviendrait un problème d'utilisation, veuillez en informer le Secrétariat central à l'adresse donnée ci-dessous.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 15367-2:2005](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005>

© ISO 2005

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, 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 et les microfilms, sans l'accord écrit de l'ISO à l'adresse ci-après ou du comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax. + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos.....	iv
Introduction.....	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Symboles et unités	4
5 Principe d'essai des senseurs de front d'onde Hartmann et Shack-Hartmann	4
6 Installation de mesure et mode opératoire	5
6.1 Généralités	5
6.2 Système de détection	5
6.3 Mesurage	8
6.4 Étalonnage	9
7 Évaluation des gradients de front d'onde	9
7.1 Soustraction du bruit de fond	9
7.2 Évaluation	10
8 Reconstruction du front d'onde	10
8.1 Généralités	10
8.2 Intégration numérique directe (méthode de zone)	11
8.3 Reconstruction par mode du front d'onde	12
9 Représentation du front d'onde	12
10 Incertitude	13
10.1 Généralités	13
10.2 Erreurs de mesure statistiques	13
10.3 Effets environnementaux	13
10.4 Déficiences dans l'acquisition des données	14
10.5 Incertitudes dues au non-alignement géométrique	14
11 Rapport d'essai	14
Annexe A (informative) Reconstruction du front d'onde	19
Annexe B (informative) Polynômes de Zernike pour la représentation des fronts d'onde	21
Bibliographie	22

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 (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

L'attention est appelée 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.

L'ISO 15367-2 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 172, *Optique et photonique*, sous-comité SC 9, *Systèmes électro-optiques*.

L'ISO 15367 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Lasers et équipements associés aux lasers — Méthodes d'essai pour la détermination de la forme du front d'onde du faisceau laser*.

— *Partie 1: Terminologie et aspects fondamentaux*

— *Partie 2: Senseurs Shack-Hartmann*

Introduction

Une caractérisation du comportement de la propagation du faisceau laser est nécessaire dans de nombreux domaines à la fois de développement de systèmes laser et d'applications industrielles des lasers. Par exemple, la conception du résonateur ou de l'optique du faisceau s'appuie fortement sur des informations détaillées et quantitatives sur la distribution directionnelle du rayonnement produit. Des enregistrements en ligne du front d'onde du faisceau laser peuvent aussi permettre une optimisation de la focalisation du faisceau, en combinaison avec une optique adaptée. D'autres domaines concernés sont le contrôle et la réduction possibles des effets thermiques des lentilles, l'ajustement du résonateur en ligne, les considérations de sécurité ou des essais de longueur d'onde optique, y compris l'analyse de Zernike.

Il y a quatre ensembles de paramètres concernés pour la propagation du faisceau laser:

- la distribution de densité de puissance (énergie) (ISO 13694);
- les largeurs de faisceaux, angles de divergence et facteurs de limite de diffraction (ISO 11146-1 et ISO 11146-2);
- la distribution du front d'onde (phase) (ISO 15367-1 et la présente partie de l'ISO 15367);
- la cohérence spatiale du faisceau (pas de norme en cours).

En général, une caractérisation complète requiert la connaissance de la fonction de cohérence mutuelle ou la fonction de densité spectrale, au moins dans un plan transversal. Bien que la détermination de ces distributions soit possible, l'investissement expérimental est important et les instruments commercialisés capables de mesurer ces grandeurs ne sont pas encore disponibles. Par conséquent, le domaine d'application de la présente Norme internationale ne s'étend pas à une description universelle du faisceau, mais est limité au mesurage du front d'onde, qui est équivalent à la distribution de phase dans le cas de faisceaux spatialement cohérents. De ce fait, une prédiction exacte de la propagation du faisceau est réalisable uniquement dans le cas limité de grande cohérence latérale.

Un nombre de phases ou des instruments de mesure de gradient de front d'onde sont capables de déterminer le front d'onde ou la distribution de phase. Ils comportent, sans être limités à, l'interféromètre de coupure latérale, le senseur de front d'onde Hartmann et Shack-Hartmann et le déflectomètre de Moiré. Dans ces instruments, les gradients soit du front d'onde, soit de la phase, sont mesurés, à partir de quoi la distribution de phase bidimensionnelle peut être reconstruite.

Dans ce document, seuls les senseurs de front d'onde Hartmann et Shack-Hartmann sont pris en compte en détail, puisqu'ils sont capables de mesurer le front d'onde à la fois de faisceaux entièrement cohérents et partiellement cohérents. Un nombre considérable de ces instruments sont disponibles sur le marché.

Les principaux avantages de la technique Hartmann sont:

- une large plage dynamique,
- un haut rendement optique,
- une compatibilité avec les faisceaux partiellement cohérents,
- aucune exigence de pureté spectrale,
- aucune ambiguïté en ce qui concerne l'incrément 2π de l'angle de phase,
- les fronts d'onde peuvent être acquis/analysés par un simple mesurage.

Les instruments qui sont capables de mesurer directement le front d'onde ou la phase, par exemple les interféromètres autoréférencés, ne relèvent pas du domaine d'application de la présente partie de l'ISO 15367.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 15367-2:2005

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005>

Lasers et équipements associés aux lasers — Méthodes d'essai pour la détermination de la forme du front d'onde du faisceau laser —

Partie 2: Senseurs Shack-Hartmann

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie les méthodes pour le mesurage et l'évaluation de la fonction de distribution du front d'onde, dans un plan transversal, d'un faisceau laser par l'utilisation de senseurs de front d'onde Hartmann ou Shack-Hartmann. Elle s'applique aux lasers totalement cohérents, partiellement cohérents et astigmatiques généraux, aussi bien impulsions que continus.

En outre, sont décrites des méthodes numériques raccordables pour une reconstruction par mode ou par zone de la distribution bidimensionnelle du front d'onde, en même temps que leur incertitude. La connaissance de la distribution du front d'onde permet la détermination de plusieurs paramètres de front d'onde définis dans l'ISO 15367-1.

(standards.iteh.ai)

2 Références normatives [ISO 15367-2:2005](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-f74914e68136/iso-15367-2:2005)

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-f74914e68136/iso-15367-2:2005)

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 11145, *Optique et instruments d'optique — Lasers et équipements associés aux lasers — Vocabulaire et symboles*

ISO 13694, *Optique et instruments d'optique — Lasers et équipements associés aux lasers — Méthodes d'essai de distribution de la densité de puissance (d'énergie) du faisceau laser*

ISO 15367-1, *Lasers et équipements associés aux lasers — Méthodes d'essai pour la détermination de la forme du front d'onde du faisceau laser — Partie 1: Terminologie et aspects fondamentaux*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 11145 et dans l'ISO 15367-1 ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1 espacement de la période de sous-pupille

d_x, d_y

distance entre les centres de trous sources ou microlentilles adjacents dans les directions x et y

3.2
espacement écran de sous-pupilles/détecteur

L_H
espacement entre l'écran de sous-pupilles (réseau de microlentilles ou écran Hartmann) et le réseau de détection

NOTE Pour les senseurs Shack-Hartmann, cela est souvent réglé à la distance focale du réseau de microlentilles.

3.3
distance focale du réseau de microlentilles

f
distance focale des microlentilles pour un senseur Shack-Hartmann

3.4
largeur de sous-pupille

d_s
largeur de la pupille des trous sources respectivement d'un écran Hartmann ou des microlentilles d'un réseau Shack-Hartmann

3.5
plage angulaire dynamique

β_{max}
plage angulaire maximale utilisable des senseurs Hartmann ou Shack-Hartmann

NOTE Pour les pupilles carrées, la plage angulaire dynamique est donnée par

$$\beta_{max} = \frac{d_x}{2L_H} - \frac{\lambda}{d_x}$$

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

3.6
répétabilité des mesurages d'un front d'onde

$w_{r,rms}$
différence quadratique entre deux mesurages consécutifs $w_n(x, y)$ du même front d'onde et le front d'onde moyen $\bar{w}(x, y)$

[ISO 15367-2:2005](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005>

$$w_{r,rms} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \sqrt{\frac{\sum_x \sum_y E_n(x,y) [w_n(x,y) - \bar{w}(x,y)]^2}{\sum_x \sum_y E_n(x,y)} - \left(\frac{\sum_x \sum_y E_n(x,y) [w_n(x,y) - \bar{w}(x,y)]^2}{\sum_x \sum_y E_n(x,y)} \right)}$$

où

n est le nombre de mesurages;

k est le nombre d'échantillons prélevé;

$$\bar{w}(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^k E_n(x,y) \times w_n(x,y)}{\sum_{n=1}^k E_n(x,y)}$$

3.7**exactitude de mesure du front d'onde** $w_{a,rms}$

moyenne de la différence quadratique entre un front d'onde de référence w_r et le front d'onde corrigé en inclinaison $w_{tc,n}$ après que des inclinaisons variées θ_n ont été appliquées au front d'onde de référence

$$w_{a,rms} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \sqrt{\frac{\sum_x \sum_y E_n(x,y) [w_{tc,n}(x,y) - w_r(x,y)]^2}{\sum_x \sum_y E_n(x,y)}}$$

où

n est le $n^{ième}$ mesurage du front d'onde avec l'application d'inclinaisons $\theta_{x,n}$ et $\theta_{y,n}$;

k est le nombre d'échantillons prélevé;

$w_{tc,n}$ est le front d'onde corrigé en inclinaison, comme suit:

$$w_{tc,n}(x,y) = w_n(x,y) - \theta_{x,n}x - \theta_{y,n}y$$

NOTE Voir aussi l'ISO 15367-1:2003, 3.4.7.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 15367-2:2005](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005>

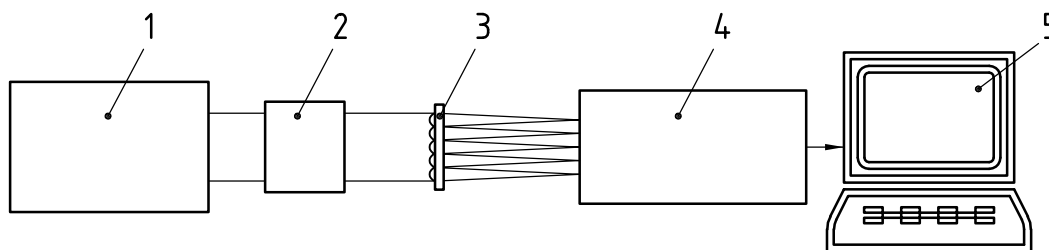
4 Symboles et unités

Tableau 1 — Symboles et unités

Symbole	Paramètre	Unités	Défini dans
$E(x, y), H(x, y)$	distribution de densité de puissance (énergie)	W/cm ² , J/cm ²	I'ISO 13694
x, y, z	axes mécaniques (coordonnées cartésiennes)	mm	I'ISO 15367-1:2003, 3.1.5, 3.1.7
z	axe du faisceau	mm	I'ISO 15367-1:2003, 3.1.5
λ	longueur d'onde	nm	
z_m	position du plan de mesurage	mm	I'ISO 15367-1:2003, 3.1.4
$w(x, y)$	forme du front d'onde moyen	nm	I'ISO 15367-1:2003, 3.1.1
$\Phi(x, y)$	distribution de phase	rad	I'ISO 15367-1:2003, 3.1.1, Note 1
$w_c(x, y)$	front d'onde corrigé	nm	I'ISO 15367-1:2003, 3.4.2
$s(x, y)$	surface sphérique approximative	—	I'ISO 15367-1:2003, 3.4.3
R_{ss}	rayon ou focale de la meilleure sphère	mm	I'ISO 15367-1:2003, 3.4.5
$w_{AF}(x, y)$	fonction d'aberration du front d'onde	nm	I'ISO 15367-1:2003, 3.4.6
w_{PV}	irrégularité du front d'onde	nm	
w_{rms}	déformation quadratique pondérée	nm	I'ISO 15367-1:2003, 3.4.7
d_x, d_y	espacement de la période de sous-pupille	mm	3.1
L_H	espacement écran de sous-pupille/détecteur	mm	3.2
f	distance focale du réseau de microlentilles	mm	3.3
d_p	taille de la tache	µm	
d_s	largeur de sous-pupille	µm	3.4
β_{max}	plage angulaire dynamique	mrad	3.5
$(x_c, y_c)_{ij}$	coordonnées du barycentre du faisceau dans une sous-pupille ij , c'est-à-dire les moments de premier ordre de la distribution de densité de puissance dans une sous-pupille ij	mm	I'ISO 11146-1
$(x_r, y_r)_{ij}$	coordonnées du faisceau de référence dans une sous-pupille ij	mm	
$(\beta_x, \beta_y)_{ij}$	composants du gradient du front d'onde local (inclinaison, pente)	—	ISO 15367-1:2003, 3.5.1, 3.5.3
$w_{r,rms}$	répétabilité des mesurages d'un front d'onde	nm	3.6
$w_{a,rms}$	exactitude de mesure du front d'onde	nm	3.7
B	matrice géométrique de l'algorithme de reconstruction du front d'onde	—	
C	matrice de covariance	—	

5 Principe d'essai des senseurs de front d'onde Hartmann et Shack-Hartmann

Le principe Hartmann est basé sur une subdivision du faisceau en un nombre de rayons partiels. Cela est réalisé soit par un écran opaque avec des trous sources placés sur un réseau régulier (senseur Hartmann), soit par une microlentille ou un réseau de microlentilles (senseur Shack-Hartmann), conduisant à un échantillon de gradient de front d'onde moyen (voir Figure 1) et à un meilleur rendement de collecte du rayonnement. La distribution de densité de puissance (énergie) derrière le réseau est enregistrée par un détecteur de position sensible, le plus souvent un senseur CCD ou un réseau de détecteurs quadrants («quadcells»). Les signaux du détecteur peuvent être comptabilisés par un système informatique d'acquisition de données et un système d'analyse.



Légende

- 1 laser
- 2 atténuateur
- 3 réseau de microlentilles
- 4 position du détecteur sensible
- 5 système d'acquisition de données et d'analyse

Figure 1 — Installation expérimentale pour le mesurage du front d'onde utilisant la technique Shack-Hartmann

La position des barycentres des rayons partiels doit être déterminée à l'intérieur de chaque sous-pupille, à la fois pour le faisceau soumis à essai et pour la source de référence, de préférence un faisceau laser collimaté. Les déplacements des barycentres par rapport à la référence représentent les gradients locaux de front d'onde à partir desquels le front d'onde $w(x, y)$ est reconstruit par intégration directe ou par des techniques d'ajustement de mode (voir Article 8).

Le type, le fabricant et la désignation du modèle de l'instrument utilisé pour les mesurages du front d'onde Hartmann ou Shack-Hartmann aussi bien que la taille du réseau et l'espacement lentille/trou doivent être consignés dans le rapport d'essai.

[ISO 15367-2:2005](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a41e06ce-3421-4e29-8981-67d8b1e081b3/iso-15367-2-2005>

6 Installation de mesure et mode opératoire

6.1 Généralités

Les questions concernant les différents types de lasers, la sécurité laser, l'environnement d'essai, les modifications du faisceau (y compris l'échantillonnage/l'atténuation et l'optique de manipulation du faisceau) aussi bien que les exigences générales relatives aux détecteurs à utiliser pour le mesurage du gradient de phase sont traitées dans l'ISO 15367-1.

Tous les détails sur l'échantillonnage du faisceau et l'optique d'atténuation doivent être consignés dans le rapport d'essai.

6.2 Système de détection

Le système de détection utilisé pour les mesurages du front d'onde Hartmann et Shack-Hartmann doit comprendre deux éléments:

- a) un dispositif pour la segmentation du faisceau soumis à essai en groupes de rayons (écran de sous-pupille), par exemple un réseau (réfractif ou diffractif) de microlentilles (Shack-Hartmann) ou un réseau de trous (Hartmann);
- b) un détecteur sensible à la position (par exemple une caméra CCD) positionnée à une distance L_H derrière le réseau de segmentation (L_H peut être ajustée à f dans le cas d'un détecteur Shack-Hartmann ou une correction appropriée peut être appliquée).

La surface de détection doit être divisée en sous-pupilles correspondant au réseau de segmentation utilisé pour la segmentation du faisceau. Le plus fréquemment, un réseau orthogonal de microlentilles/trous avec un espacement fixe d_x, d_y (dans les directions x, y , respectivement) est utilisé. Dans ce cas, le réseau de détection doit être divisé en $N \times M$ sous-pupilles rectangulaires avec un espacement d_x, d_y et indexé (ij) .

La plage angulaire dynamique du senseur de front d'onde par rapport à la variation du front d'onde est directement liée à la taille des taches générées sur le détecteur, rapportée à la dimension des sous-pupilles. Pour éviter un chevauchement, la taille de la tache doit être inférieure à la taille de la sous-pupille. En fonction du gradient de front d'onde local, la tache d'une sous-pupille se déplace vers la frontière de sa région assignée sur le détecteur. Si la tache franchit la frontière, sa position peut ne plus s'obtenir correctement. Cet effet limite la plage angulaire dynamique du senseur.

Pour les senseurs Shack-Hartmann, la taille de la tache, d_p , est donnée approximativement par

$$d_p = 2 \frac{\lambda f}{d_s} \quad (1)$$

où

f est la distance focale du réseau de microlentilles;

d_s est la largeur des pupilles carrées des microlentilles;

et où il est supposé que l'espacement écran de sous-pupilles/détecteur est égal à la distance focale. Le déplacement Δx d'une tache dû à un gradient de front d'onde local et horizontal β_x au niveau de sa sous-pupille correspondante est donné par

$$\Delta x = \beta_x \times f \quad (2)$$

Le déplacement maximal autorisé Δx_{\max} pour empêcher la tache de franchir sa région désignée est

$$\Delta x_{\max} = \frac{1}{2}(d_x - d_p) \quad (3)$$

et le gradient de front d'onde horizontal maximal correspondant est

$$\beta_{x,\max} = \frac{d_x}{2f} - \frac{\lambda}{d_s} \quad (4)$$

Si la taille de la pupille de la microlentille d_s est égale à l'espacement des éléments du réseau d_x , le gradient de front d'onde horizontal maximal donne

$$\beta_{x,\max} = \frac{d_x}{2f} - \frac{\lambda}{d_x} \quad (5)$$

Ainsi, pour éviter un chevauchement de taches, il faut que la distance focale du réseau de microlentilles soit inférieure à $d_x^2/2\lambda$. Pour obtenir une plage angulaire dynamique utile et minimiser la diaphonie, la distance focale doit être inférieure à $2d_x/5\lambda$. Une distance focale inférieure aboutira à une plus grande plage angulaire dynamique, mais peut également générer une incertitude de mesure plus grande. Pour la direction verticale, une expression similaire est valable.