

---

---

**Optique et instruments d'optique —  
Fonction de transfert optique — Principes  
de mesure de la fonction de transfert de  
modulation (MTF) des systèmes de  
formation d'image échantillonnés**

iTeh STANDARD PREVIEW

*Optics and optical instruments — Optical transfer function — Principles of measurement of modulation transfer function (MTF) of sampled imaging systems*

[ISO 15529:1999](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9cf5b67-c26f-4784-9959-0585dd1c7314/iso-15529-1999)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9cf5b67-c26f-4784-9959-0585dd1c7314/iso-15529-1999>



## Sommaire

1 Domaine d'application .....	1
2 Références normatives .....	1
3 Termes, définitions et symboles .....	2
4 Relations théoriques .....	4
5 Mesurage des MTF associées aux systèmes de formation d'image .....	7
6 Méthode de mesurage de la fonction de repliement du spectre.....	14
Annexe A (informative) Théorie fondamentale.....	15
Bibliographie.....	18

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

[ISO 15529:1999](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9cf5b67-c26f-4784-9959-0585dd1c7314/iso-15529-1999)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9cf5b67-c26f-4784-9959-0585dd1c7314/iso-15529-1999>

© ISO 1999

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'éditeur.

Organisation internationale de normalisation  
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse  
Internet iso@iso.ch

Imprimé en Suisse

## 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 3.

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.

La Norme internationale ISO 15529 a été élaborée par le comité technique ISO /TC 172, *Optique et instruments d'optique*, sous comité SC 1, *Normes fondamentales*.

L'annexe A de la présente Norme internationale est donnée uniquement à titre d'information.

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

[ISO 15529:1999](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9cf5b67-c26f-4784-9959-0585dd1c7314/iso-15529-1999)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9cf5b67-c26f-4784-9959-0585dd1c7314/iso-15529-1999>

## Introduction

La fonction de transfert de modulation (MTF) constitue l'un des principaux critères de description des performances d'un système ou d'un dispositif de formation d'image. Les conditions d'application du concept MTF auxquelles doit répondre un système de formation d'image sont prescrites dans l'ISO 9334. Elles nécessitent que le système de formation d'image soit linéaire et isoplanétique.

Pour qu'un système soit isoplanétique, l'image d'une droite objet (c'est-à-dire la répartition des éclaircissements dans l'image d'un point) doit être indépendante de sa position dans le plan objet, dans les limites d'exactitude prescrites. Il existe plusieurs types de systèmes de formation d'image où cette condition n'est pas strictement remplie. Ce sont des systèmes où l'image est générée en échantillonnant la répartition de la luminance dans l'objet sur un nombre de points discrets ou de lignes discrètes, plutôt que sur un continuum de points.

Parmi ces dispositifs ou systèmes, on peut citer : les lames frontales de fibres, les faisceaux de fibres optiques cohérents, les caméras utilisant des groupements de détecteurs tels que des matrices de CCD, les systèmes infrarouges à balayage tels que les caméras infrarouges (dont l'azimut est perpendiculaire aux lignes), etc.

Si l'on essaye de déterminer la MTF de ce type de système en mesurant la répartition des éclaircissements dans l'image d'une ligne (LSF) d'une droite objet statique étroite et en calculant le module de la transformée de Fourier, on trouvera que la courbe MTF résultante dépend étroitement de la position et de l'orientation exactes de la droite objet par rapport à la barrette des points d'échantillonnage (voir annexe A).

La présente Norme internationale décrit une «MTF» s'appliquant à des systèmes de ce type et expose plusieurs méthodes de mesure appropriées. La MTF prescrite répond aux principaux critères suivants:

- de la MTF dépend la qualité du système en tant que dispositif de formation d'image;
- la MTF est une valeur unique et indépendante de l'appareil de mesure (c'est-à-dire que l'effet des largeurs de la fente-mire, etc., peut faire l'objet d'une déconvolution à partir de la valeur mesurée);
- la MTF peut, en principe, être utilisée pour calculer la répartition de luminance dans l'image d'un objet défini, bien que le mode opératoire ne suive pas les mêmes règles que pour un système de formation d'image non échantillonné.

La présente Norme internationale décrit également les MTF destinées aux unités secondaires, c'est-à-dire les étapes de formation d'image constituant ce type de systèmes. Ces dernières répondent également aux critères susmentionnés.

# Optique et instruments d'optique — Fonction de transfert optique — Principes de mesurage de la fonction de transfert de modulation (MTF) des systèmes de formation d'image échantillonnés

## 1 Domaine d'application

La présente Norme internationale décrit les principales MTF associées à un système de formation d'image, ainsi que les conditions connexes. En outre, elle expose plusieurs méthodes de mesure possibles de ces MTF.

La présente Norme internationale s'applique particulièrement aux dispositifs d'imagerie électroniques tels que les caméras à CCD et les matrices de CCD elles-mêmes.

Bien qu'un certain nombre de méthodes de mesure soient décrites ci-après, le présent document n'a pas vocation d'exclure les autres méthodes si tant est qu'elles fournissent des résultats similaires et qu'elles correspondent aux définitions générales et aux lignes directrices visant à mesurer la MTF conformément à l'ISO 9334 et l'ISO 9335. L'exploitation de la mesure de la répartition des éclaircissements dans l'image d'un «bord de plage» (ESF), plutôt que de la répartition des éclaircissements dans l'image d'une ligne (LSF), est mentionnée comme solution de départ optionnelle pour déterminer l'OTF/MTF d'un système de formation d'image.

## 2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des normes internationales en vigueur à un moment donné.

ISO 9334:1995, *Optique et instruments d'optique — Fonction de transfert optique — Définitions et relations mathématiques.*

ISO 9335:1995, *Optique et instruments d'optique — Fonction de transfert optique — Principes et procédures de mesure.*

ISO 11421:1997, *Optique et instruments d'optique — Exactitude du mesurage de la fonction de transfert optique (OTF).*

### 3 Termes, définitions et symboles

#### 3.1 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les termes et définitions suivants s'appliquent.

##### 3.1.1

##### **système de formation d'image échantillonné**

système ou dispositif optique où l'image est générée par échantillonnage de l'objet sur un alignement de points discrets ou le long d'un ensemble de lignes discrètes, plutôt que sur un continuum de points

NOTE 1 L'échantillonnage sur chaque point est réalisé à partir d'une ouverture ou zone d'échantillonnage finie.

NOTE 2 Pour de nombreux dispositifs, «l'objet» est en fait une image produite par une lentille ou un autre système d'imagerie (par exemple lorsque le dispositif forme un groupement de détecteurs).

##### 3.1.2

##### **période d'échantillonnage**

$a$

distance physique entre les points ou les lignes d'échantillonnage

NOTE L'échantillonnage est souvent effectué au moyen d'une barrette uniforme de points ou de lignes. La période d'échantillonnage peut être différente dans deux directions orthogonales.

##### 3.1.3

##### **limite de Nyquist**

fréquence spatiale égale à  $1/(2 \cdot a)$

Voir 3.1.9.

NOTE C'est la fréquence spatiale maximale d'onde sinusoïdale que le système peut générer dans une image.

##### 3.1.4

##### **répartition des éclaircissements dans l'image d'une ligne de l'ouverture d'échantillonnage d'un système d'imagerie échantillonné**

$LSF_{ap}(u)$

variation de la luminance ou du signal échantillonné impliquant une ouverture ou une ligne simple de la barrette d'échantillonnage, alors qu'une droite objet étroite est transversale à cette ouverture ou à cette ligne, ainsi qu'aux ouvertures ou aux lignes adjacentes

NOTE 1 L'orientation de cette transversale est perpendiculaire à la longueur de la droite objet étroite et, dans le cas de systèmes s'échantillonnant sur des lignes discrètes, elle est également perpendiculaire à ces lignes

NOTE 2  $LSF_{ap}(u)$  est une fonction unidimensionnelle de la position  $u$  dans le plan objet ou d'une position équivalente dans l'image.

##### 3.1.5

##### **fonction de transfert d'optique d'une ouverture d'échantillonnage**

$OTF_{ap}(r)$

transformée de Fourier de la répartition des éclaircissements dans l'image d'une ligne,  $LSF_{ap}(u)$ , de l'ouverture d'échantillonnage

$$OTF_{ap}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} LSF_{ap}(u) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot u \cdot r) du$$

où  $r$  est la fréquence spatiale

**3.1.6****fonction de transfert de modulation de l'ouverture d'échantillonnage**
 $MTF_{ap}(u)$ 

 module de l'OTF<sub>ap</sub>(r)
**3.1.7****fonction de reconstitution**

fonction utilisée pour convertir la sortie de chaque point, ligne ou ouverture échantillonnés, en une répartition de luminance dans l'image

NOTE La fonction de reconstitution possède une OTF et une MTF associées qui sont désignées OTF<sub>rf</sub>(r) et MTF<sub>rf</sub>(r) respectivement.

**3.1.8****MTF d'un système de formation d'image échantillonné**
 $MTF_{sys}(r)$ 

produit de MTF<sub>ap</sub>(r) et de MTF<sub>rf</sub>(r) par la MTF de tout dispositif d'entrée auxiliaire (par exemple une lentille) et de tout dispositif de sortie (par exemple un moniteur à tube cathodique) considérés comme composante du système de formation d'image

NOTE Lorsque l'on indique une valeur pour MTF<sub>sys</sub>, il convient de préciser les composantes du système. Ce dernier pourrait être simplement, par exemple, une matrice de détecteurs à CCD assortie de l'électronique de commande/de sortie, ou un ensemble complet impliquant une caméra à CCD et un écran à tube cathodique.

**3.1.9****fonction de repliement du spectre d'un système de formation d'image échantillonné**
 $AF_{sys}(r)$ 

différence entre la valeur crête et la valeur minimale de MTF<sub>sys</sub>(r), sachant que l'image de la fente testée de la MTF est décalée sur une distance supérieure ou égale à une période de la barrette

NOTE 1 C'est la valeur limite de cette différence sachant que la largeur de la fente testée a voisine zéro (c'est-à-dire que sa transformée de Fourier est proche de l'unité).

NOTE 2 AF<sub>sys</sub>(r) est une mesure du degré auquel le système répondra aux fréquences spatiales supérieures à la fréquence minimale d'échantillonnage (ou fréquence de Nyquist) et, en conséquence, générera les basses fréquences parasites dans l'image.

## 3.2 Symboles

Symbole	Paramètre	Unité
$a$	Période d'échantillonnage	mm, mrad, degré
$1/(2 \cdot a)$	Limite de Nyquist de la fréquence spatiale	$\text{mm}^{-1}$ , $\text{mrad}^{-1}$ , $\text{degré}^{-1}$
$u$	Coordonnées du plan de référence	mm, mrad, degré
$r$	Fréquence spatiale	$\text{mm}^{-1}$ , $\text{mrad}^{-1}$ , $\text{degré}^{-1}$
$\text{LSF}_{\text{ap}}(u)$	Répartition des éclairagements dans l'image d'une ligne d'une ouverture d'échantillonnage	sans dimension
$\text{OTF}_{\text{ap}}(r)$	Fonction de transfert optique d'une ouverture d'échantillonnage	sans dimension
$\text{MTF}_{\text{ap}}(r)$	Fonction de transfert de modulation d'une ouverture d'échantillonnage	sans dimension
$\text{OTF}_{\text{rf}}(r)$	Fonction de transfert optique d'une fonction de reconstitution	sans dimension
$\text{MTF}_{\text{rf}}(r)$	Fonction de transfert de modulation d'une fonction de reconstitution	sans dimension
$\text{MTF}_{\text{sys}}(r)$	Fonction de transfert de modulation d'un système de formation d'image échantillonné	sans dimension
$\text{FT}_{\text{sit}}(r)$	Transformée de Fourier de la fente objet	sans dimension
$\text{OTF}_{\text{ins}}(r)$	Fonction de transfert optique de la lentille auxiliaire	sans dimension
$\text{MTF}_{\text{ins}}(r)$	Fonction de transfert de modulation de la lentille auxiliaire	sans dimension
$\text{FT}_{\text{img}}(r)$	Transformée de Fourier de l'image finale de la fente objet	sans dimension
$\text{AF}_{\text{sys}}(r)$	Fonction de repliement du spectre du système testé	sans dimension
$\text{LSF}_{\text{in}}(u)$	Répartition des éclairagements dans l'image d'une ligne de la combinaison de la fente objet, de la lentille auxiliaire et de l'ouverture d'échantillonnage	sans dimension
$\text{FT}_{\text{in}}(r)$	Transformée de Fourier de $\text{LSF}_{\text{in}}(u)$	sans dimension
$\text{LSF}_{\text{av}}(u)$	Répartition des éclairagements dans l'image d'une ligne obtenue en calculant la moyenne de la LSF associée à différentes positions de la fente objet par rapport à la barrette d'échantillonnage	sans dimension
$\text{FT}_{\text{av}}(r)$	Transformée de Fourier de $\text{LSF}_{\text{av}}(u)$	sans dimension

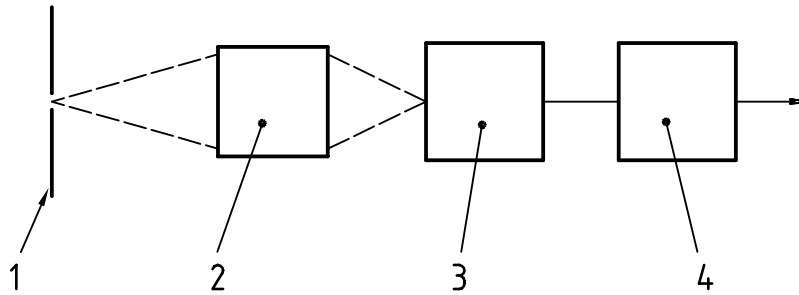
## 4 Relations théoriques

### 4.1 Transformée de Fourier de l'image de la fente objet (statique)

#### 4.1.1 Cas général

Les étapes de formation de l'image dans un système optique généralisé échantillonné sont illustrées à la Figure 1. Les valeurs des paramètres applicables utilisés dans le présent document sont spécifiées à l'article 3.





### Légende

- 1 Fente objet  $FT_{\text{slt}}(r)$
- 2 Lentille  $OTF_{\text{Ins}}(r) / MTF_{\text{Ins}}(r)$
- 3 Ouvertures d'échantillonnage  $OTF_{\text{ap}}(r) / MTF_{\text{ap}}(r)$
- 4 Fonction de reconstitution  $OTF_{\text{rf}}(r) / MTF_{\text{rf}}(r)$

**Figure 1 — Formation de l'image par un système optique échantillonné**

Pour un système de formation d'image échantillonné, nous obtenons:

$$FT_{\text{img}}(r) = \{\sum_k [FT_{\text{in}}(r - k/a) \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \phi \cdot (k/a))]\} \cdot OTF_{\text{rf}}(r) \quad (1)$$

où

$$FT_{\text{in}}(r) = FT_{\text{slt}}(r) \cdot OTF_{\text{Ins}}(r) \cdot OTF_{\text{ap}}(r) \quad (2)$$

et où  $k$  est un nombre entier (c'est-à-dire  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ ) et  $\phi$  est un terme de phase décrivant la position de la fente par rapport à la barrette d'échantillonnage.

NOTE De plus amples informations concernant les relations mathématiques existantes dans la formation d'image avec les systèmes échantillonnés figurent en [1] (voir Bibliographie), ainsi que dans la plupart des textes traitant des méthodes de transformation de Fourier.

### 4.1.2 Cas particuliers

Les relations mentionnées dans le présent article sont exemptes de leurs dérivées (une brève explication de ces dérivées figure dans l'annexe A).

#### 4.1.2.1 La fréquence spatiale de coupure de $|FT_{\text{in}}(r)|$ est inférieure ou égale à la fréquence minimale d'échantillonnage $1/(2 \cdot a)$

Dans cette condition, et pour les fréquences spatiales inférieures à la fréquence minimale d'échantillonnage, le système agit comme un système non échantillonné et l'on obtient:

$$|FT_{\text{img}}(r)| = |FT_{\text{in}}(r)| \cdot MTF_{\text{rf}}(r) \quad (3)$$

où

$$|FT_{\text{in}}(r)| = |FT_{\text{slt}}(r)| \cdot MTF_{\text{Ins}}(r) \cdot MTF_{\text{ap}}(r) \quad (4)$$

de sorte que

$$MTF_{\text{sys}}(r) = MTF_{\text{Ins}}(r) \cdot MTF_{\text{ap}}(r) \cdot MTF_{\text{rf}}(r) = |FT_{\text{img}}(r)| / |FT_{\text{slt}}(r)| \quad (5)$$

#### 4.1.2.2 La fréquence spatiale de coupure de $|FT_{in}(r)|$ est inférieure ou égale à deux fois la fréquence minimale d'échantillonnage (c'est-à-dire $1/a$ )

Dans cette condition, et pour les fréquences spatiales inférieures à deux fois la limite de Nyquist, on obtient une valeur crête et minimale pour  $|FT_{img}(r)|$  étant donné que la position de l'image de la fente par rapport aux ouvertures d'échantillonnage de la barrette est fluctuante. Les deux valeurs sont obtenues par:

$$|FT_{img}(r)|_{\max} = [|FT_{in}(r)| + |FT_{in}(r-1/a)|] \cdot MTF_{rf}(r) \quad (6)$$

et

$$|FT_{img}(r)|_{\min} = [|FT_{in}(r)| - |FT_{in}(r-1/a)|] \cdot MTF_{rf}(r) \quad (7)$$

de sorte qu'il est possible de démontrer que:

$$MTF_{sys}(r) = |FT_{in}(r)| \cdot MTF_{rf}(r) / |FT_{slt}(r)| = [|FT_{img}(r)|_{\max} + |FT_{img}(r)|_{\min}] / 2 \cdot |FT_{slt}(r)| \quad (8)$$

pour  $r < 1/(2 \cdot a)$

et

$$MTF_{sys}(r) = \{ |FT_{img}(r)|_{\max} - |FT_{img}(r)|_{\min} \} / 2 \cdot |FT_{slt}(r)| \quad (9)$$

pour  $r > 1/(2 \cdot a)$

iTeh STANDARD PREVIEW

(standards.iteh.ai)

Il convient de souligner qu'en théorie, la position de la fente par rapport à la barrette d'échantillonnage peut être différente pour chaque valeur de la fréquence spatiale  $r$ , lorsque l'on obtient  $|FT_{img}(r)|_{\max}$  et  $|FT_{img}(r)|_{\min}$ . Cela peut cependant se produire uniquement si  $LSF_{in}(u)$  est asymétrique, de sorte qu'il y ait une variation (non linéaire) sensible de la fonction de transfert de phase (PTF) associée à la fréquence spatiale. En pratique, l'effet sera limité et l'on peut supposer que les positions de la fente applicables sont identiques pour toutes les fréquences spatiales.

## 4.2 Transformée de Fourier de la sortie d'une ouverture d'échantillonnage simple impliquant une fente objet explorée à travers l'ouverture

Dans ce cas, on définit la répartition des éclairagements dans l'image d'une ligne  $LSF_{in}(u)$ , qui est le signal obtenu à partir d'une ouverture d'échantillonnage simple, comme une fonction de la position  $u$  d'une fente dans l'espace objet (voir Figure 2). Le module de la transformée de Fourier de  $LSF_{in}(u)$  est obtenu par:

$$|FT_{in}(r)| = |FT_{slt}(r)| \cdot MTF_{Ins}(r) \cdot MTF_{ap}(r) \quad (10)$$

et l'on obtient

$$MTF_{ap}(r) = |FT_{in}(r)| / [|FT_{slt}(r)| \cdot MTF_{Ins}(r)] \quad (11)$$

Notons que  $MTF_{rf}$  n'apparaît pas dans ces équations.

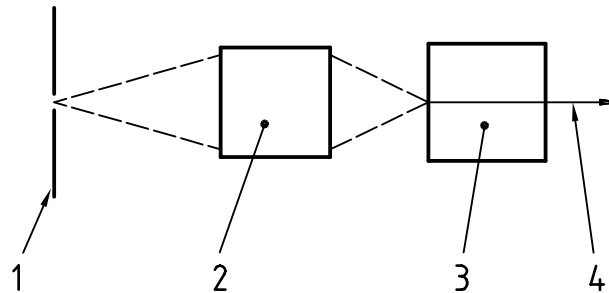
## 4.3 Transformée de Fourier de la LSF moyenne impliquant différentes positions de la fente objet

Si la LSF du système de formation d'image échantillonné est mesurée pour différentes positions de la fente objet par rapport à la barrette d'échantillonnage et si leur valeur moyenne ( $LSF_{av}(u)$ ) est adoptée après réglage sur une position commune de la fente, la transformée de Fourier de cette LSF moyenne sera obtenue alors par:

$$|FT_{av}(r)| = |FT_{in}(r)| \cdot MTF_{rf}(r) \quad (12)$$

et

$$MTF_{sys} = MTF_{Ins} \cdot MTF_{ap} \cdot MTF_{rf} = \left| FT_{av}(r) \right| / \left| FT_{slt}(r) \right| \quad (13)$$

**Légende**

- 1 Fente objet  $FT_{slt}(r)$
- 2 Lentille  $OTF_{Ins}(r) / MTF_{Ins}(r)$
- 3 Ouvertures d'échantillonnage  $OTF_{ap}(r) / MTF_{ap}(r)$
- 4 Sortie de l'ouverture d'échantillonnage simple [voir Figure 2b)]

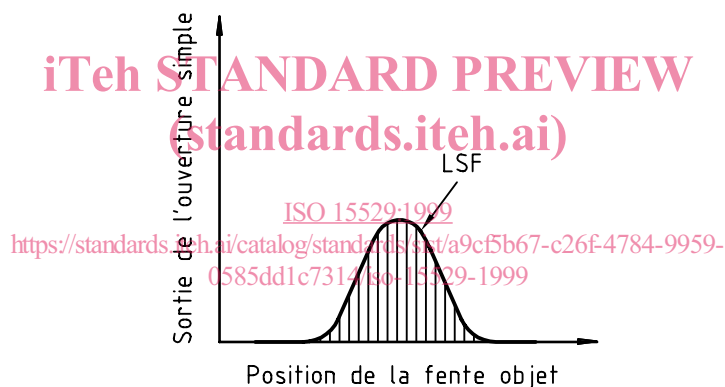
**a) Disposition schématique du mesurage****b) Illustration de la sortie**

Figure 2 — Sortie d'une ouverture d'échantillonnage simple lors de l'exploration de la fente image

## 5 Mesurage des MTF associées aux systèmes de formation d'image

### 5.1 Généralités

#### 5.1.1 Domaine d'application

Les méthodes de mesure appropriées reposent sur les relations exposées à l'article 4.

Cependant, il existe de nombreux types de systèmes d'imagerie échantillonnés différents et chacun d'eux peut requérir l'utilisation d'une disposition expérimentale particulière pour mettre en œuvre ces méthodes. La présente norme vise principalement à décrire ces relations et la manière dont ces dernières peuvent être appliquées pour mesurer les paramètres appropriés. La présente norme ne détaille pas les méthodes de mesure impliquant chaque type de système d'imagerie échantillonné, mais décrit l'application d'une méthode particulière assortie de quelques exemples spécifiques. La majorité des méthodes et des appareils de mesure de la MTF des systèmes appropriés de formation d'image non échantillonnés peuvent être adaptés pour tester le système d'imagerie échantillonné par les méthodes prescrites dans la présente Norme internationale.