

# Holographie

**Pascal PICART**

École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans – ENSIM

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine – LAUM UMR CNRS 6613

Tel : 02.43.83.39.58.

email : [pascal.picart@univ-lemans.fr](mailto:pascal.picart@univ-lemans.fr)

**Fascicule 1 : Principe de l'Holographie**

# Sommaire

Introduction

Enregistrement d'un réseau sinusoïdal

Enregistrement d'un hologramme

Reconstruction d'un hologramme

Bases de la formation des images

Quelques illustrations de différents régimes d'enregistrement

Références bibliographiques

# Holographie : historique

**Holo** : toute, entière

**Graphe** : écriture

1947 : inventée par Dennis Gabor

(prix Nobel 1971)

1960 : premiers lasers

[D Gabor, Nature 161 \(1948\)](#)

1962 : premiers hologrammes laser

1965 : interférométrie holographique

1972 : première tentative pour l'holographie numérique

1982 : premiers hologrammes couleurs

1993 : « début » de l'holographie numérique [U Schnars et al, Appl. Opt. 33 \(1994\)](#)

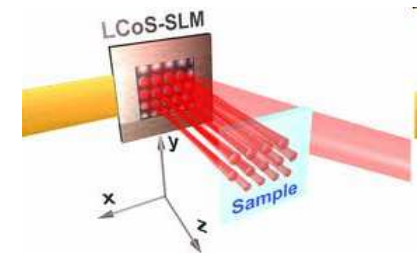
1994 : Aérospatiale installe *Alienor*

1997 : holographie couleur tri-chromatique

1997 : Optrion commercialise une caméra holographique pour le CND

2004 : commercialisation de SLM haute résolution

20... : affichage holographique vidéo 3D démocratisé ?

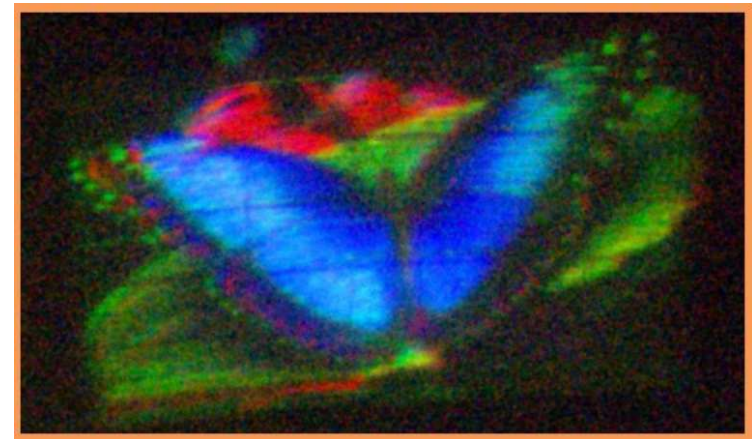


# Holographie : historique

## Quelques illustrations

<http://www.gizmag.com/holograph-3d-color-video-display-inexpensive-mit/28029/pictures>

Researchers at MIT's Media Lab have developed a new form of holographic projector that may enable the introduction of practical color 3D holographic video displays as well as higher-resolution 2D displays with lower power consumption. The new projector is built using principles of guided wave optics to construct the spatial light modulator (SLM) that is the heart of digital holography. The MIT holographic projector, which contains an SLM costing US\$10 to fabricate, provides 3D images at 30 frames per second (fps) with a resolution similar to that of a standard-definition TV.



# Holographie : historique

## Quelques illustrations (fin)

<http://www.ultimate-holography.com/>

A Holoprinter is a device able to convert digital data into a hologram. This state of the art is fitted with three lasers (red, green and blue) and an exclusive optical printing head. It is the result of 5 years of research and development. The holographic information is transferred one by one onto the Ultimate film as basic Holographic Elements, the hogels.

A HD 3DHoloprint is a true color reflection hologram: a 3D image, static or animated, floating in space, which can be seen without accessories and viewed by a simple halogen spot light.

A HD 3DHoloprint is the final result of the latest high tech developement in Holography. It is the printing by lasers of a 3D computer file on a unique holographic recording material: "Ultimate", the only media able to reconstruct bright and saturated colors with an exceptional field of view of 120° horizontaly AND verticaly .

Our HD 3DHoloprint have a printing resolution of about 500µm, which is unique on the market actualy. A 60x80cm (24"x32") HD 3DHoloprint has about 2 millions of pixels, which is equivalent to a Full HD TV screen with the same size. Only by being very near can you see the tiny pixels.



A HD 3DHoloprint of the nuclear station at Areva

# Qu'est ce qu'une méthode holographique ?

Méthode de codage/décodage permettant d'enregistrer l'amplitude et la phase d'un front d'onde issu d'un objet quelconque

Codage : enregistrement d'un réseau de franges d'interférences microscopiques sur un support photosensible

Décodage/lecture : un faisceau lumineux diffracte sur le réseau constitué par les franges d'interférences ; selon le mode de diffraction, hologramme en *réflexion* ou en *transmission*

# Enregistrement d'un réseau sinusoïdal (1)

Différents supports d'enregistrement

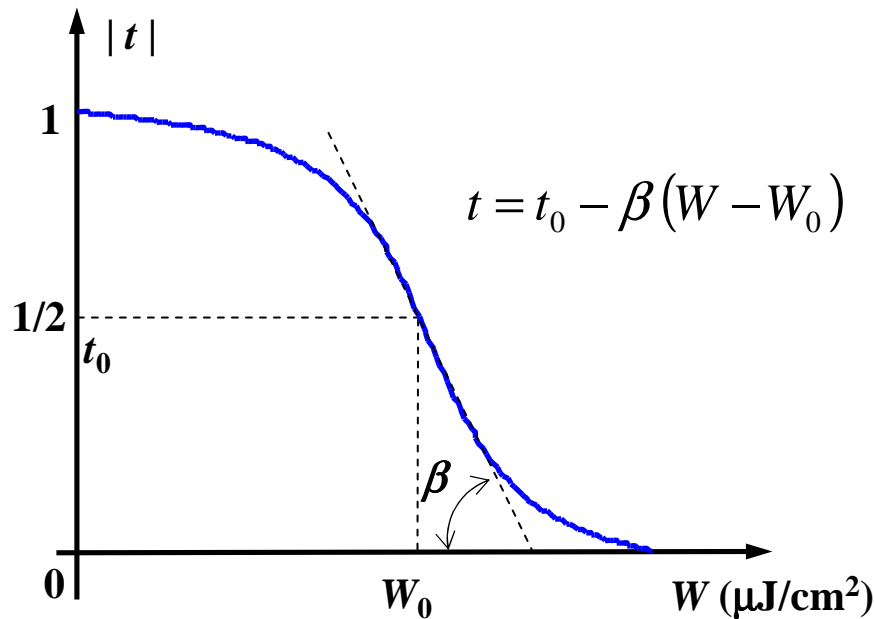
- argentiques
- photopolymères
- films thermoplastiques
- cristaux photoréfractifs
- numériques (CCD ou CMOS)

Comparaison entre différents supports d'enregistrement

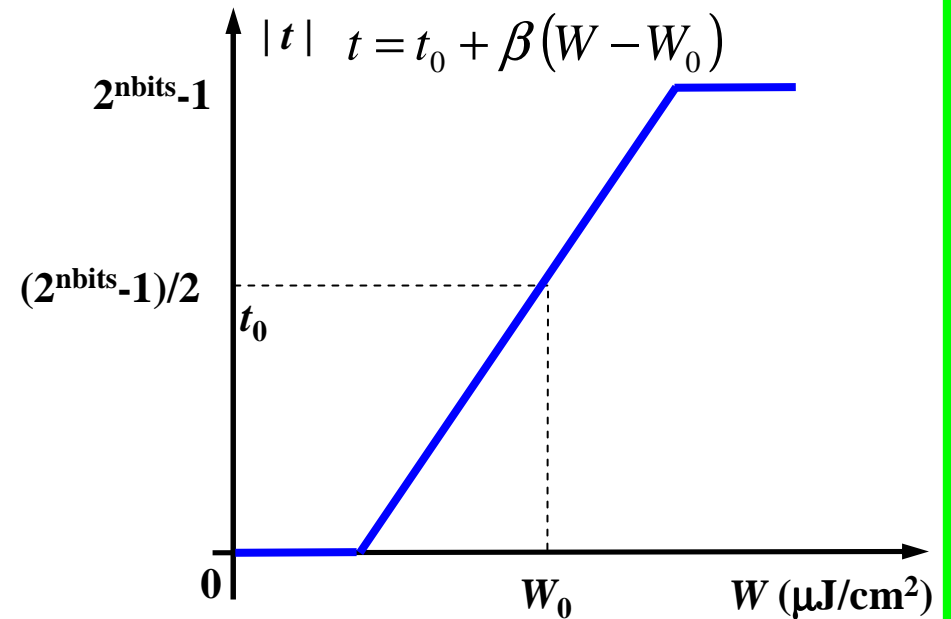
Matériaux	Processus	Type d'hologramme	Exposition requise (J/m <sup>2</sup> )	Sensibilité spectrale (nm)	Résolution (mm <sup>-1</sup> )	Réutilisable
Halogénures d'argent	chimique	amplitude ou phase	$5 \times 10^{-3}$ - $5 \times 10^{-1}$	400-700	1000-10000	non
Gélatines dichromatées	chimique	phase	$10^2$	350-580	>10000	non
Photo-résistants	chimique	phase	$10^2$	UV-500	3000	non
Photo-polymères	post-exposition	phase	$10$ - $10^4$	UV-650	200-1500	non
Photo-chromiques	aucun	amplitude	$10^2$ - $10^3$	300-700	>5000	oui
Photothermo-plastiques	charge et chauffage	phase	$10^{-1}$	400-650	500-1200	oui
Photoréfractif Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub>	aucun	phase	10	350-550	10000	oui
Photoréfractif LiNbO <sub>3</sub>	aucun	phase	$10^4$	350-500	1500	oui
Capteur CCD ou CMOS	numérique	amplitude	$5 \times 10^{-4}$	350-1000	500	oui

# Enregistrement d'un réseau sinusoïdal (2)

Courbe reliant l'amplitude transmise par un support photosensible en fonction de la densité d'énergie reçue



a) Support analogique de type argentique



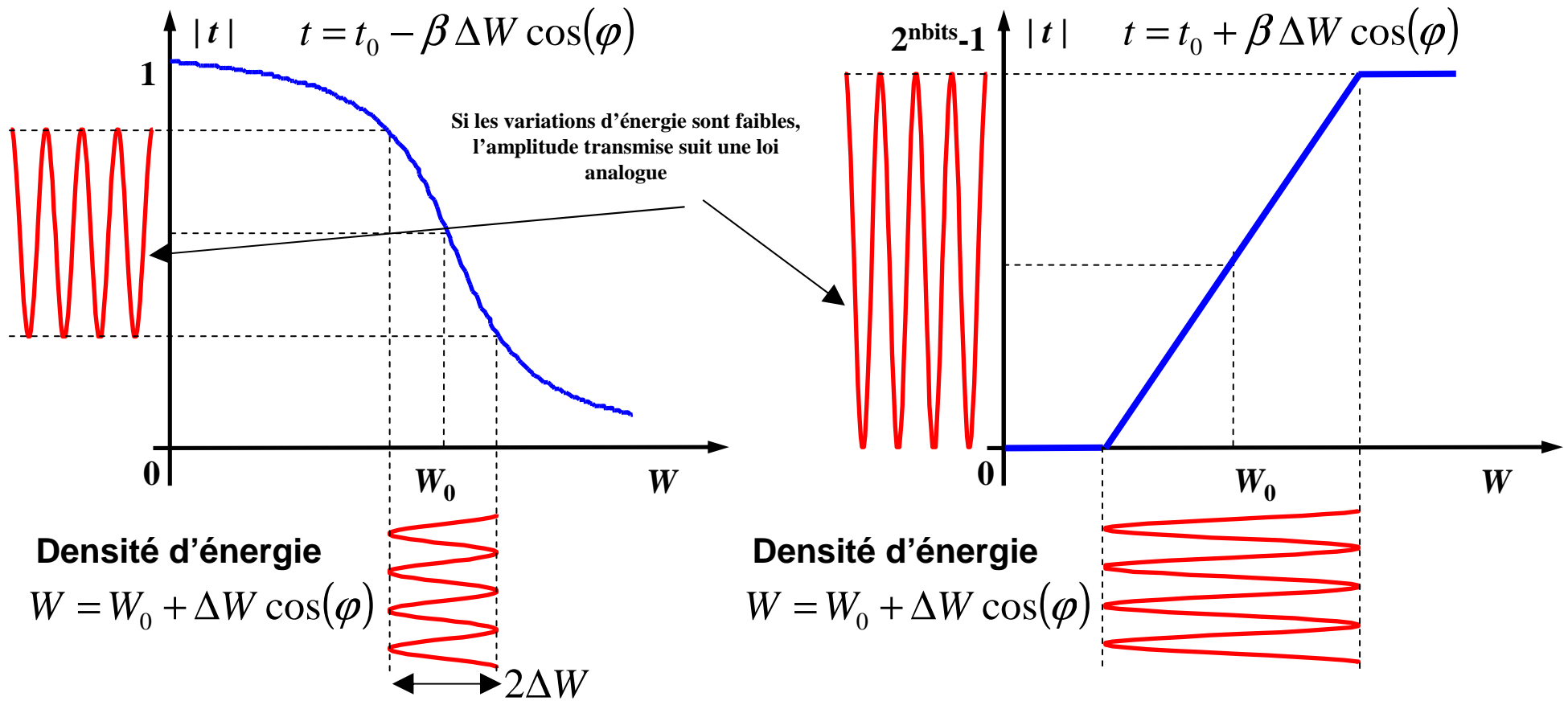
b) Support numérique de type CCD

$\beta \equiv$  pente de la zone linéaire  
 $t_0 \equiv$  transmission moyenne  
 $W_0 \equiv$  énergie moyenne reçue
 }
 $t = t_0 \pm \beta(W - W_0)$



# Enregistrement d'un réseau sinusoïdal (3)

Eclairage du support avec une modulation sinusoïdale



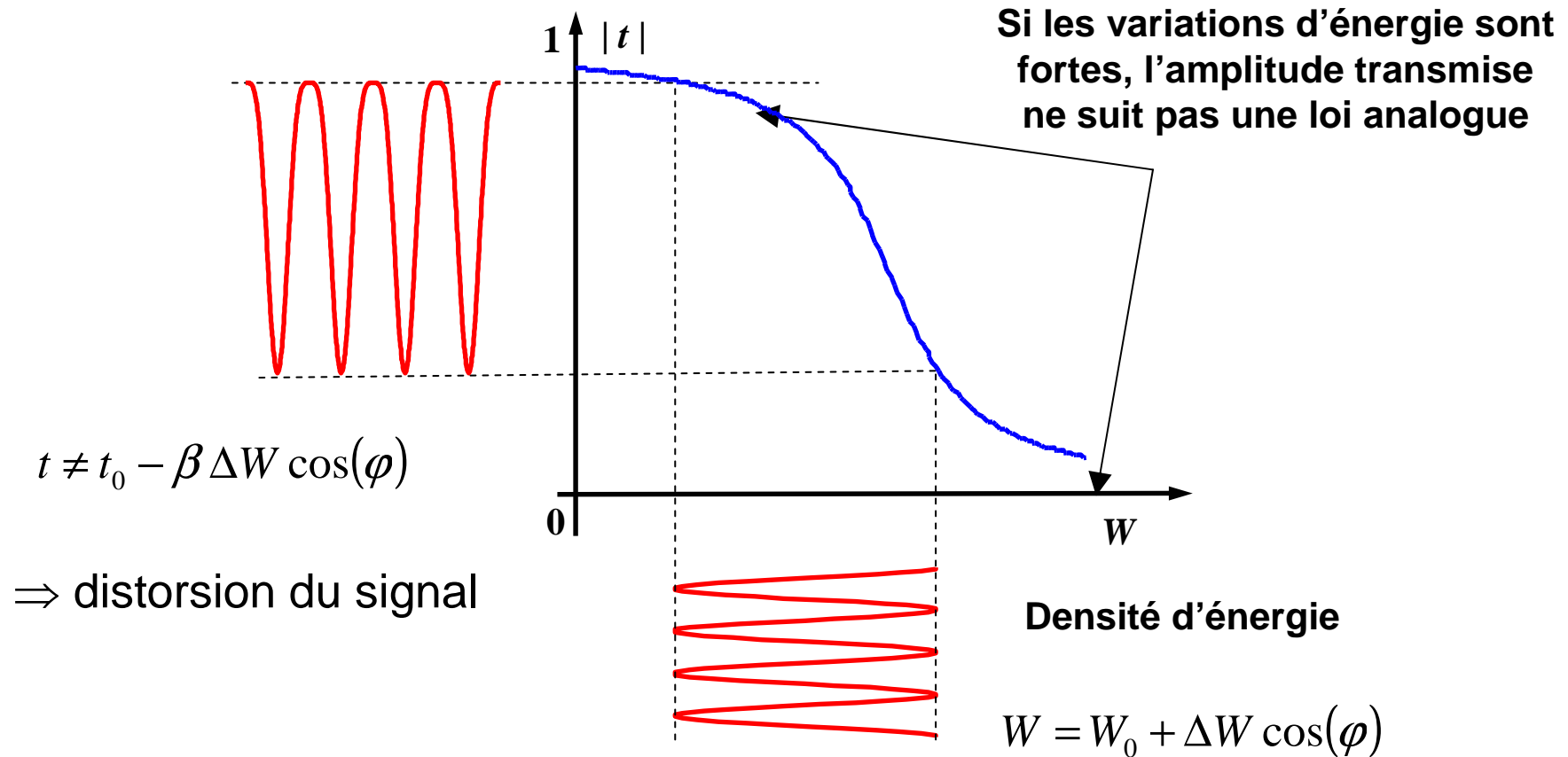
a) Support analogique de type argentique

b) Support numérique de type CCD

⇒ la modulation du signal ne doit pas être égale à 1

# Enregistrement d'un réseau sinusoidal (4)

Cas d'un signal sur-modulé



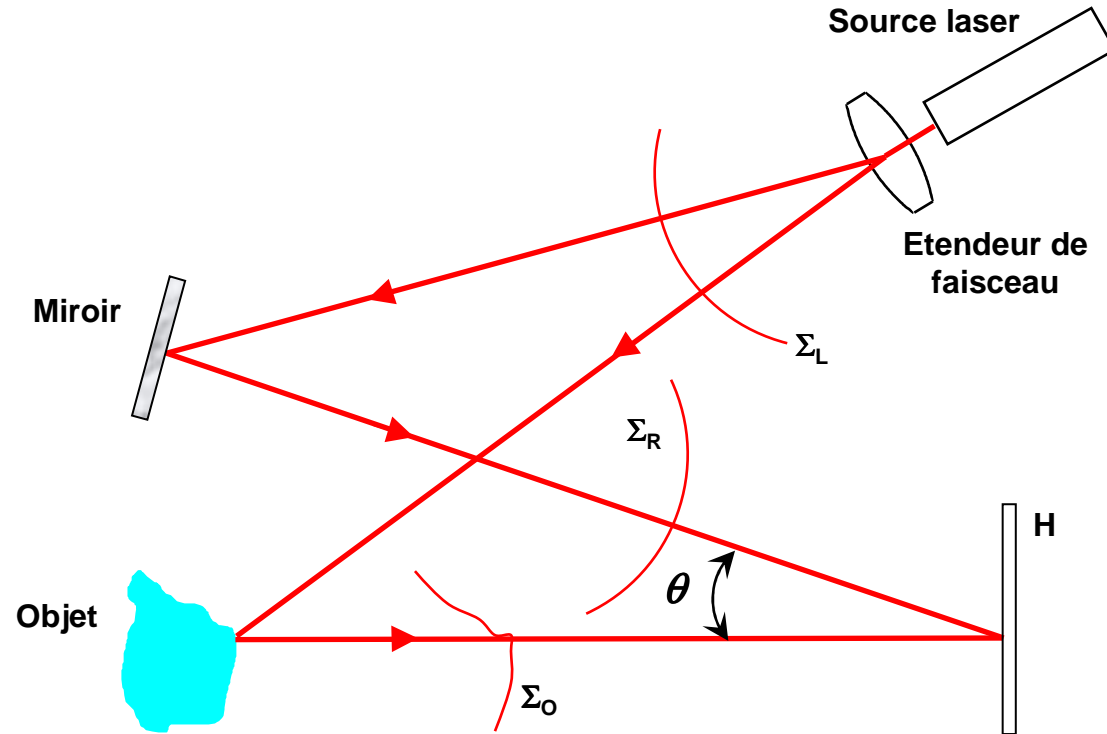
# Enregistrement d'un hologramme (1)

## Hologramme en transmission

Interférences en H entre le faisceau de référence et le faisceau diffracté par l'objet

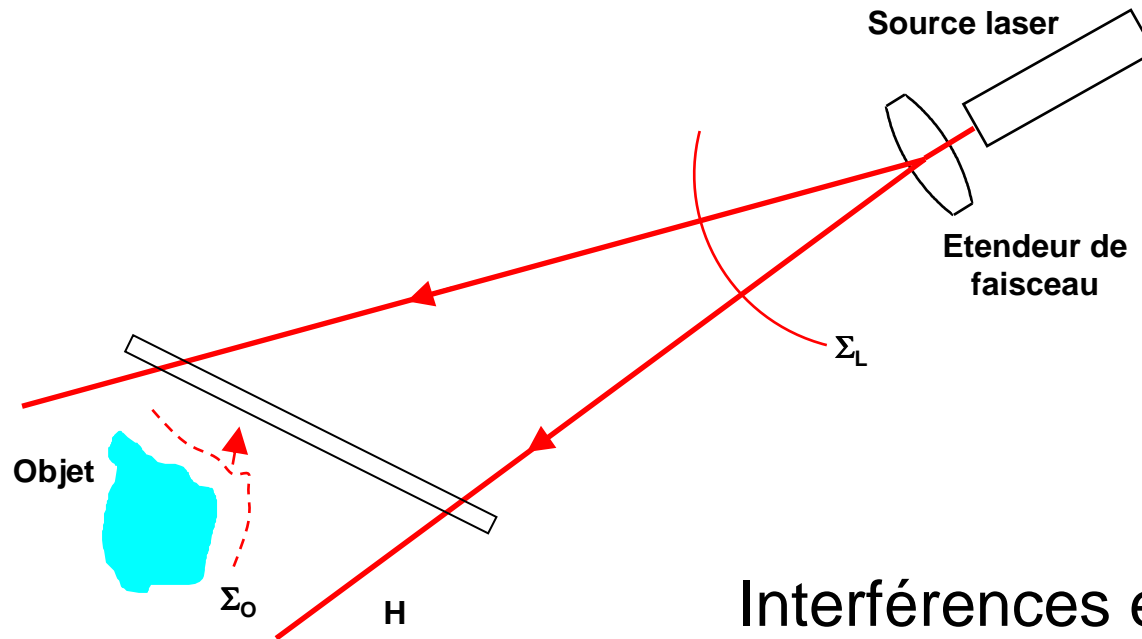
Source cohérente  
 - spatiale  
 - temporelle

⇒ laser !



# Enregistrement d'un hologramme (1)

Hologramme en réflexion



Interférences en H entre le faisceau de référence et le faisceau diffracté en réflexion par l'objet, vers H

## Enregistrement d'un hologramme (3)

Éclairement en H

$$H = |R|^2 + |O|^2 + RO^* + R^*O$$

avec

$$R = a_R \exp[i\varphi_R]$$

$$O = a_O \exp[i\varphi_O]$$

soit aussi

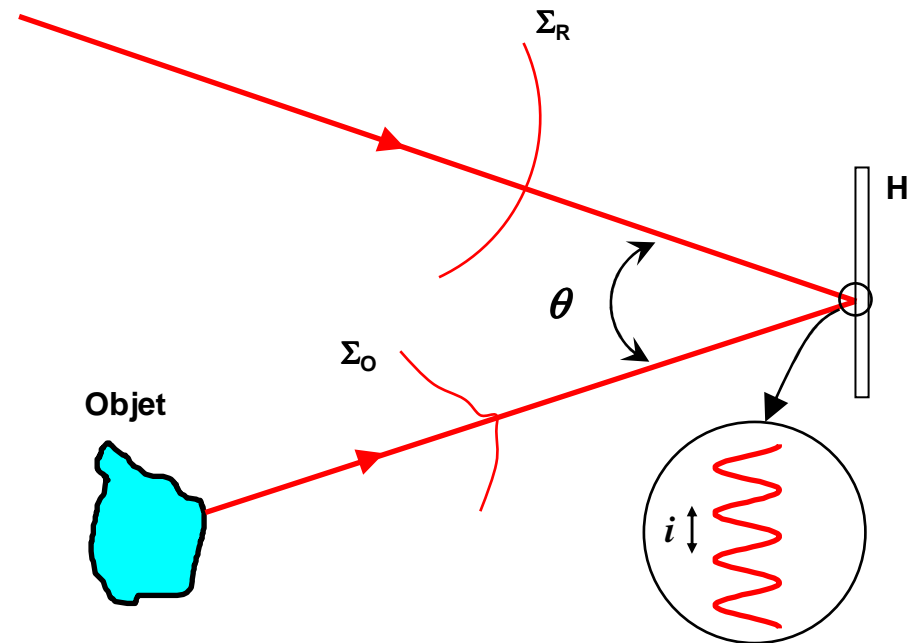
$$H = a_R^2 + a_O^2 + 2a_R a_O \cos(\varphi_R - \varphi_O)$$

Exemple

$$\theta = 60^\circ$$

$$\lambda = 0,500\mu\text{m} \Rightarrow i = 0,500\mu\text{m}$$

$\Rightarrow$  résolution supérieure à  $4000 \text{ mm}^{-1}$  !!!



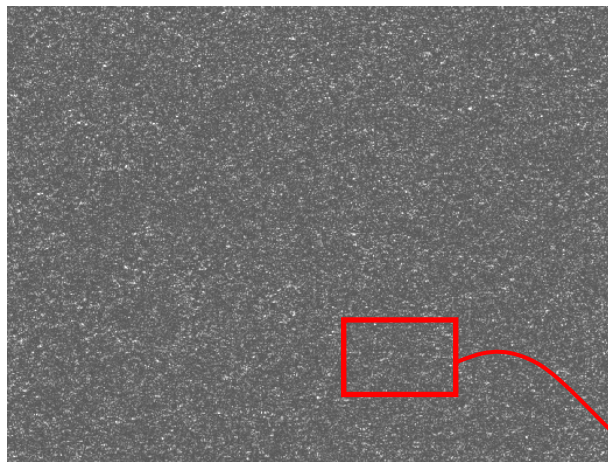
interfrange locale

$$i = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

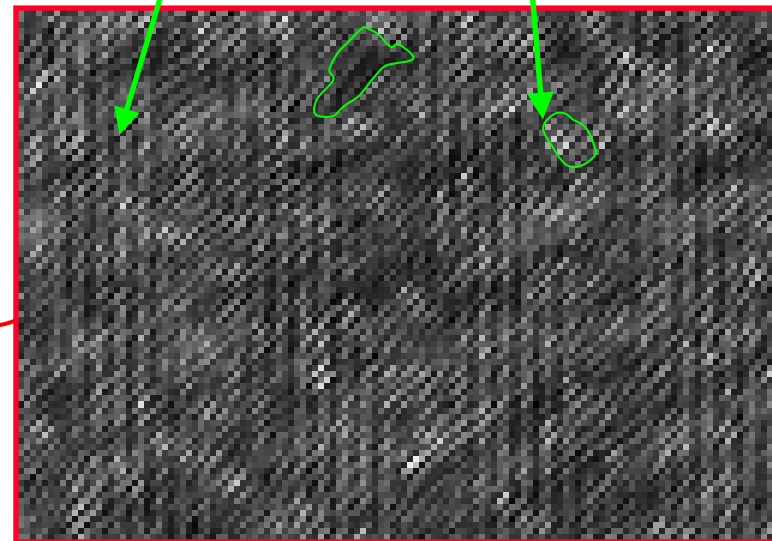
# Enregistrement d'un hologramme (4)

A quoi ressemble un hologramme ?

Hologramme enregistré par capteur CCD



zoom



microfranges

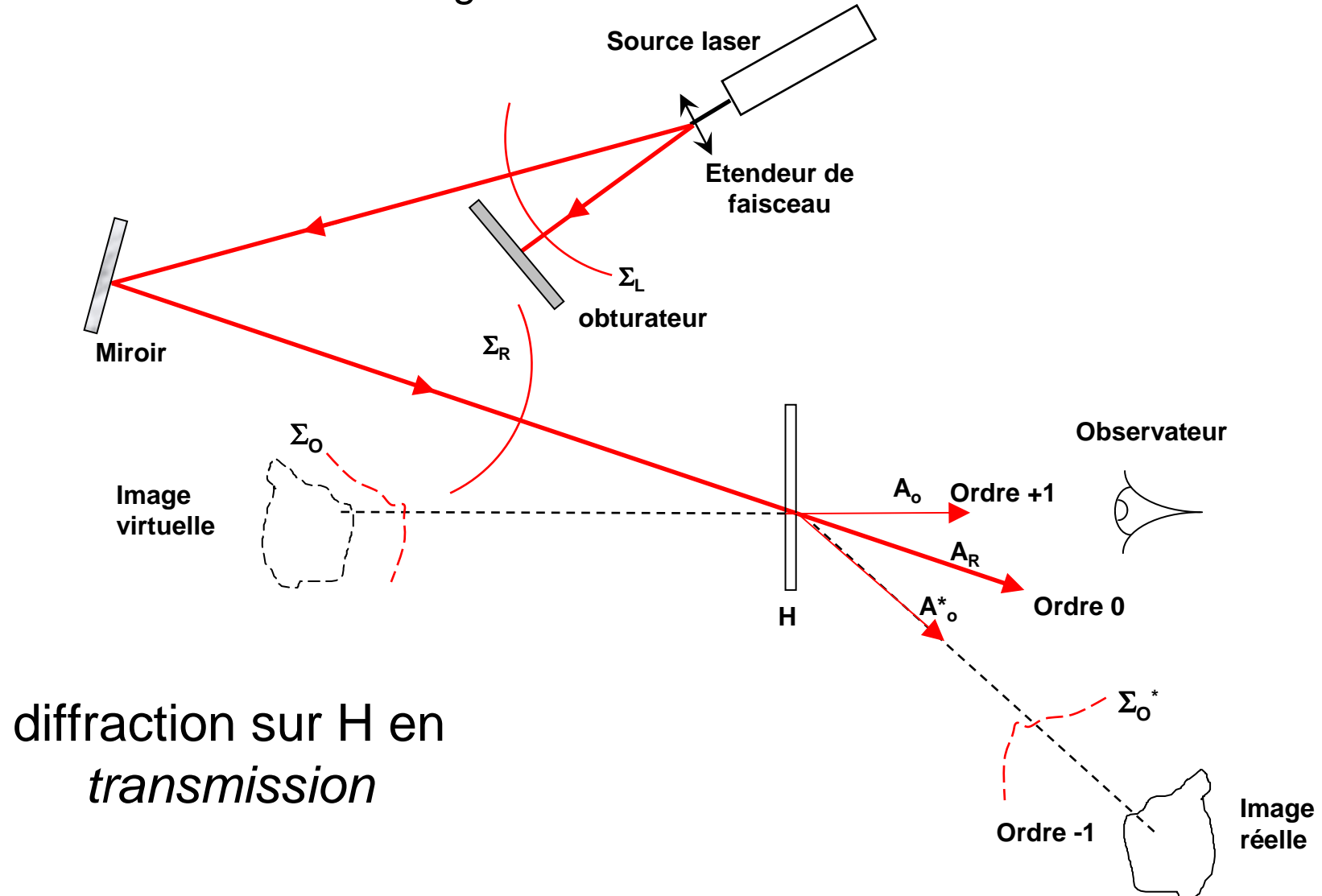
grains de speckle



enregistrement d'un *speckle*

# Reconstruction d'un hologramme (1)

Hologramme en transmission



# Reconstruction d'un hologramme (2)



Photographie d'un hologramme

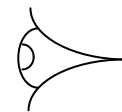
Faisceau de référence

$$A_t = R \times t$$



Observateur

Ordre +1



Ordre 0 R

Ordre -1

O\*

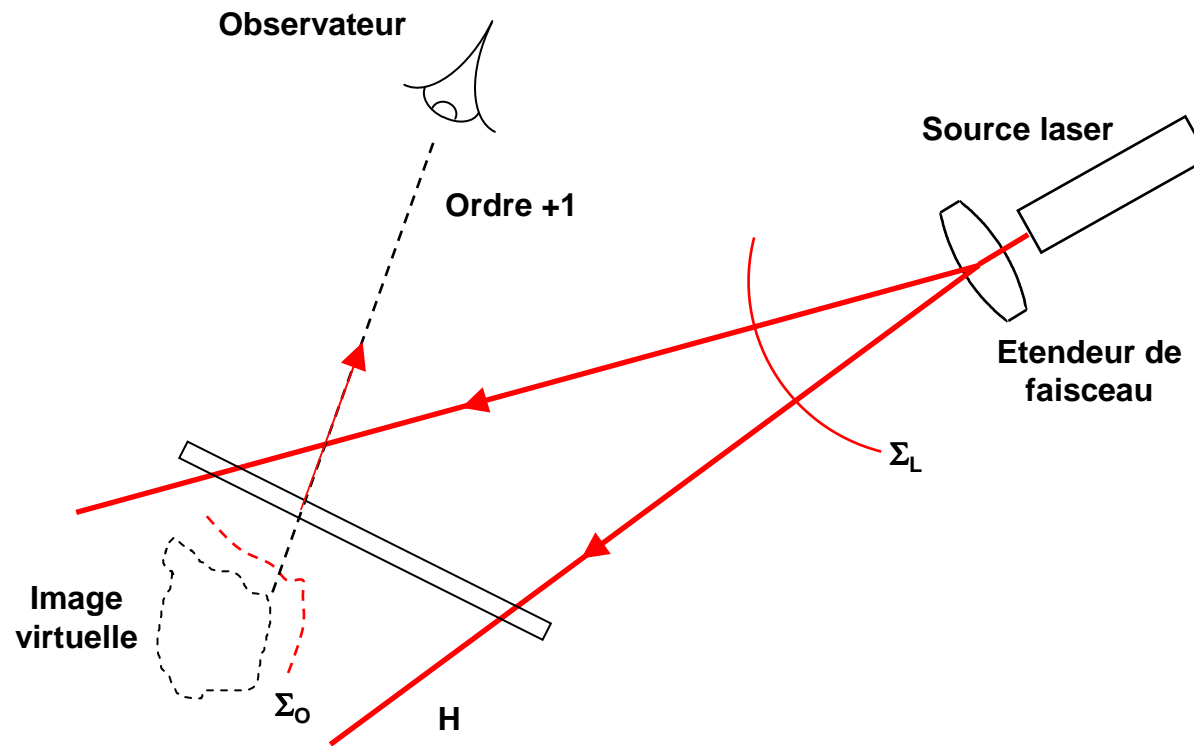
Image réelle

<http://www.ultimate-holography.com/>



# Reconstruction d'un hologramme (3)

## Hologramme en réflexion



diffraction sur H en *réflexion*

# Bases de la formation des images (1)

Transmission du support holographique

$$t = t_0 \pm \beta(W - W_0)$$

avec

$$W - W_0 = \tau R O^* + \tau R^* O$$

$\tau \equiv$  temps d'exposition

$$W = \int_0^\tau H dt$$

$$W_0 = \tau(a_O^2 + a_R^2)$$

Amplitude transmise

$$A_r = R \times t = R \times t_0 \pm \beta R (W - W_0)$$

Amplitude ordre 0

$$A_r^0 = R \times t_0$$

ordre sans intérêt

Amplitude ordre +1

$$A_r^{+1} = \pm \beta |R|^2 O$$

image virtuelle conforme à l'objet

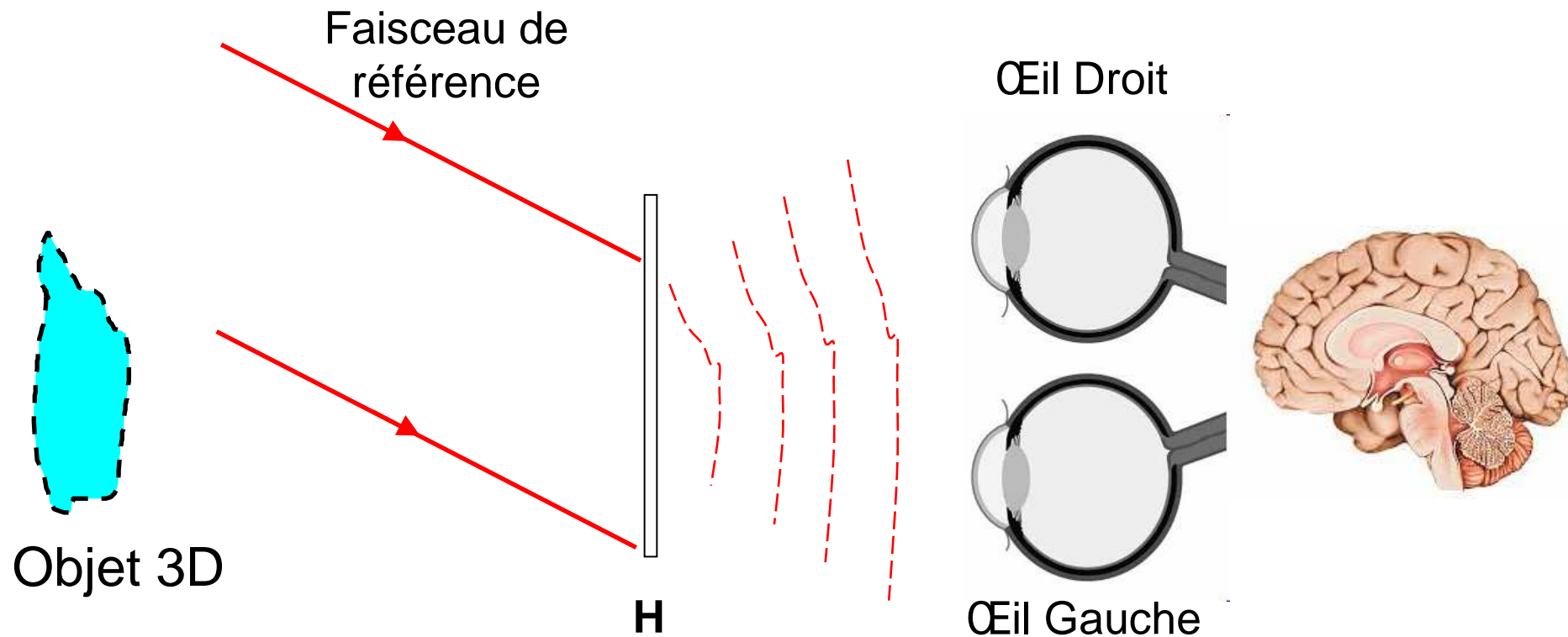
Amplitude ordre -1

$$A_r^{-1} = \pm \beta R^2 O^*$$

image réelle pseudoscopique

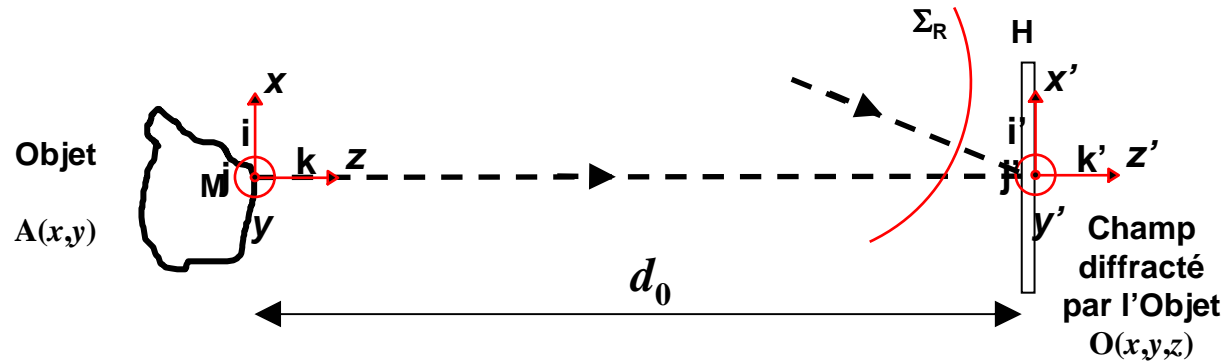
## Bases de la formation des images (2)

Vision en relief par codage de la phase optique de l'objet



la **phase optique** code le chemin optique donc le **relief**

# Bases de la formation des images (3)



Onde objet

$$O(x', y', d_0) = \frac{i \exp(2i\pi d_0 / \lambda)}{\lambda d_0} \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda d_0} (x'^2 + y'^2)\right)$$

$$\times \iint A(x, y) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda d_0} (x^2 + y^2)\right) \exp\left(-\frac{2i\pi}{\lambda d_0} (xx' + yy')\right) dx dy$$

$$A(x, y) = A_0(x, y) \exp[i\psi_0(x, y)]$$

$\psi_0 \equiv$  phase aléatoire

Onde de référence lisse et sphérique

$$R(x', y') = a_R \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda r_0} (x'^2 + y'^2) - 2i\pi(u_0 x' + v_0 y')\right]$$

fréquences spatiales  
 $\{u_0, v_0\}$   
 $r_0$  rayon de courbure ( $< 0$ )

## Bases de la formation des images (4)

### Reconstruction de l'image

Amplitude transmise par le support photosensible

$$A_r = R \times t = R \times t_0 \pm \beta R (W - W_0)$$

Prise en compte de la largeur  $L_x \times L_y$  de l'hologramme

$$\Pi_{L_x, L_y}(x, y) = \begin{cases} 1/L_x \times 1/L_y & \text{si } |x| \leq L_x/2 \text{ et } |y| \leq L_y/2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Champ diffracté à une distance  $d_r$  quelconque du plan de H

$$A_r(X, Y, d_r) = -\frac{i}{\lambda d_r} \exp(2i\pi d_r / \lambda) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda d_r} (X^2 + Y^2)\right) \\ \times \iint \Pi_{L_x, L_y}(x', y') R(x', y') t_0(x', y') \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda d_r} (x'^2 + y'^2)\right) \exp\left(-\frac{2i\pi}{\lambda d_r} (Xx' + Yy')\right) dx' dy'$$

## Bases de la formation des images (5)

Reconstruction de l'image dans l'ordre +1

Amplitude dans l'ordre +1

$$A_r^{+1} = \pm \beta |R|^2 O$$

Champ diffracté à une distance  $d_r$  quelconque du plan de H

$$A_r(X, Y, d_r) = -\frac{i \exp(2i\pi d_r / \lambda)}{\lambda d_r} \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda d_r} (X^2 + Y^2)\right) \\ \times \iint \beta \pi \Pi_{L_x, L_y}(x', y') |R(x', y')|^2 O(x', y', d_0) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda d_r} (x'^2 + y'^2)\right) \exp\left(-\frac{2i\pi}{\lambda d_r} (Xx' + Yy')\right) dx' dy'$$

## Bases de la formation des images (6)

Champ diffracté à la distance  $d_r = -d_0$

⇒ côte du plan objet initial

⇒  $(X, Y) = (x, y)$

$$A_r^{+1}(x, y, -d_0) = -\frac{\beta \tau a_R^2}{\lambda^2 d_0^2} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d_0}(x^2 + y^2)\right] \\ \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Pi_{L_x, L_y}(x', y') F\left(\frac{x'}{\lambda d_0}, \frac{y'}{\lambda d_0}\right) \exp\left[-\frac{2i\pi}{\lambda d_0}(x'x + y'y)\right] dx' dy'$$

avec

$$F\left(\frac{x'}{\lambda d_0}, \frac{y'}{\lambda d_0}\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{F}(x, y) \exp\left[\frac{2i\pi}{\lambda d_0}(x'x + y'y)\right] dx dy$$

$$\tilde{F}(x, y) = A_0(x, y) \exp[i\psi_0(x, y)] \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda d_0}(x^2 + y^2)\right]$$

## Bases de la formation des images (7)

Expression du champ diffracté à la cote  $-d_0$

$$A_r^{+1}(x, y, -d_0) = -\frac{\beta \tau a_R^2}{\lambda^2 d_0^2} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d_0} (x^2 + y^2)\right] TF \left[ TF^{-1}[\tilde{F}(x, y)] \left[ \frac{x'}{\lambda d_0}, \frac{y'}{\lambda d_0} \right] \right] \left[ \frac{x}{\lambda d_0}, \frac{y}{\lambda d_0} \right] \\ * TF \left[ \Pi_{L_x, L_y}(x', y') \left[ \frac{x}{\lambda d_0}, \frac{y}{\lambda d_0} \right] \right]$$

Propriétés de la TF

$$TF \left[ TF^{-1}[\tilde{F}(x, y)] \left[ \frac{x'}{\lambda d_0}, \frac{y'}{\lambda d_0} \right] \right] \left[ \frac{x}{\lambda d_0}, \frac{y}{\lambda d_0} \right] = \lambda^2 d_0^2 \tilde{F}(x, y)$$

$$TF \left[ \Pi_{L_x, L_y}(x', y') \left[ \frac{x}{\lambda d_0}, \frac{y}{\lambda d_0} \right] \right] = \text{sinc} \left( \frac{\pi L_x x}{\lambda d_0} \right) \times \text{sinc} \left( \frac{\pi L_y y}{\lambda d_0} \right) = \tilde{W}_A(x, y, -d_0)$$

objet reconstruit  
par diffraction  
sur l'hologramme

$$A_r^{+1}(x, y, -d_0) = -\beta \tau a_R^2 A_0(x, y) \exp[i\psi_0(x, y)] * \tilde{W}_A(x, y, -d_0)$$

**inclut le relief**



## Bases de la formation des images (8)

Résolution spatiale de l'ordre +1

Objet reconstruit convolué à fonction sinc

⇒ fonction d'élargissement qui limite la résolution spatiale

$$\tilde{W}_A(x, y, -d_0) = \text{sinc}\left(\frac{\pi L_x x}{\lambda d_0}\right) \times \text{sinc}\left(\frac{\pi L_y y}{\lambda d_0}\right)$$

Largeur de la fonction

$$\rho_x = \frac{\lambda d_0}{L_x} \qquad \rho_y = \frac{\lambda d_0}{L_y}$$

si  $L_x \times L_y$  augmente alors la résolution augmente  
⇒ intérêt d'un support photosensible large

# Quelques illustrations de différents régimes d'enregistrement (1)

## Régime de « temps moyenné »

Amplitude de l'objet en vibration sinusoïdale

Enregistrement de l'hologramme pendant l'excitation

Condition :

$$\tau \gg T_0$$

$$W = \int_{t_1}^{t_1+\tau} H(t) dt$$



⇒ **objet reconstruit est modulé en amplitude par  $J_0$   
modulation ne dépend que de l'amplitude de vibration**

# Quelques illustrations de différents régimes d'enregistrement (2)

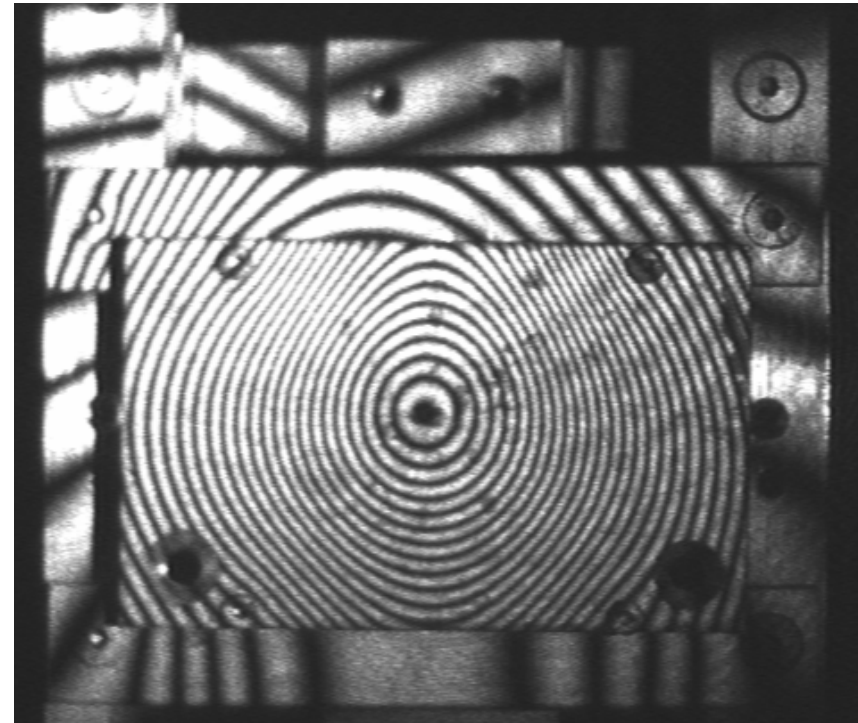
## Régime de « double exposition »

Enregistrement de 2 hologrammes sur le même support

Sollicitation de l'objet entre les 2 expositions

$$W = \tau \left( 2|R|^2 + |O_1|^2 + |O_2|^2 \right) \\ + \tau \left( R^* O_1 + R^* O_2 \right) \\ + \tau \left( R O_1^* + R O_2^* \right)$$

➔  $I_r^{+1} = I_0 (1 + m \cos(\Delta\varphi))$



⇒ **objet reconstruit est modulé en amplitude par des franges d'interférences qui dépendent de la façon dont l'objet s'est déformé entre les 2 expositions**

## Références bibliographiques (1)

1. R. Jones & C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0-521-34417-4 (1989)
2. T.H. Kreis, *Holographic interferometry – Principles and methods*, Éditions Akademie Verlag, Berlin, ISBN 3-05-501644-0 (1996)
3. J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Second Edition, Editions McGraw-Hill, New York (1996)
4. P. Smigielski, *Holographie industrielle*, Éditions Teknéa Toulouse, ISBN 2-87717-041-1 (1994)
5. P. Hariharan, *Basics of holography*, Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0-521-807417 (2002)
6. U. Schnars, W. Jüptner, *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, ISBN 978-3540219347 (2004)
7. P. Picart, J.C. Li, *Holographie numérique : Principes, Algorithmes et Applications*, Éditions Hermès Paris, ISBN 978-2-7462-3200-6 (2011)
8. M.K. Kim, *Digital Holographic Microscopy: Principles, Techniques, and Applications*, Editions Springer-Verlag New York, ISBN 978-1441977922 (2011)

## Références bibliographiques (2)

### Cours en ligne « Optique pour l'Ingénieur »

1. [http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M02\\_C10/co/OPI\\_fr\\_M02\\_C10\\_web.html](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M02_C10/co/OPI_fr_M02_C10_web.html)
2. [http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M02\\_C11/co/OPI\\_fr\\_M02\\_C11\\_web.html](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M02_C11/co/OPI_fr_M02_C11_web.html)