



# **Contrôle non destructif champ complet Techniques et Applications**

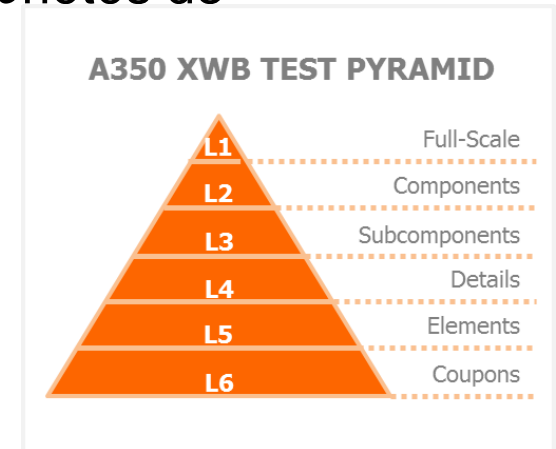
Dr. Marc GEORGES

Centre Spatial de Liège – Université de Liège

*CMOI-FLUVISU 2017  
Le Mans, 20 Mars 2017*

# Le Contrôle Non Destructif (CND)

- Ensemble de techniques visant à évaluer les propriétés de
  - Matériaux
  - Composants
  - Systèmes/Structures
- Sans les endommager !
- Terminologie
  - Essais Non Destructifs (END=CND)
  - Inspection /Contrôle de la « santé matière » (détection de défauts)
  - Non Destructive Testing (comportement structures)
  - Non Destructive Evaluation (propriétés matériaux)
  - Non Destructive Inspection (détection de défauts)
- Associations:
  - COFREND (France)
  - ASNT (USA)
  - Normes/Formations



# Le Contrôle Non Destructif (CND)

- Techniques
  - Test visuel (VT)
  - Radiographie X (RT)
  - Liquides pénétrants (PT)
  - Magnétoscopie (MT)
  - Courant de Foucault (Eddy Current) (ET)
  - Ultrasons (UT)
  - ....
  - Thermographie infrarouge (IRT)
  - Techniques Laser / Laser Testing
    - Interférométrie holographique
    - Interférométrie speckle
    - Shearographie
- Dans ce cours
  - Techniques laser (interférométriques)
  - Thermographie IR
  - Corrélation numérique

# Plan de l'exposé

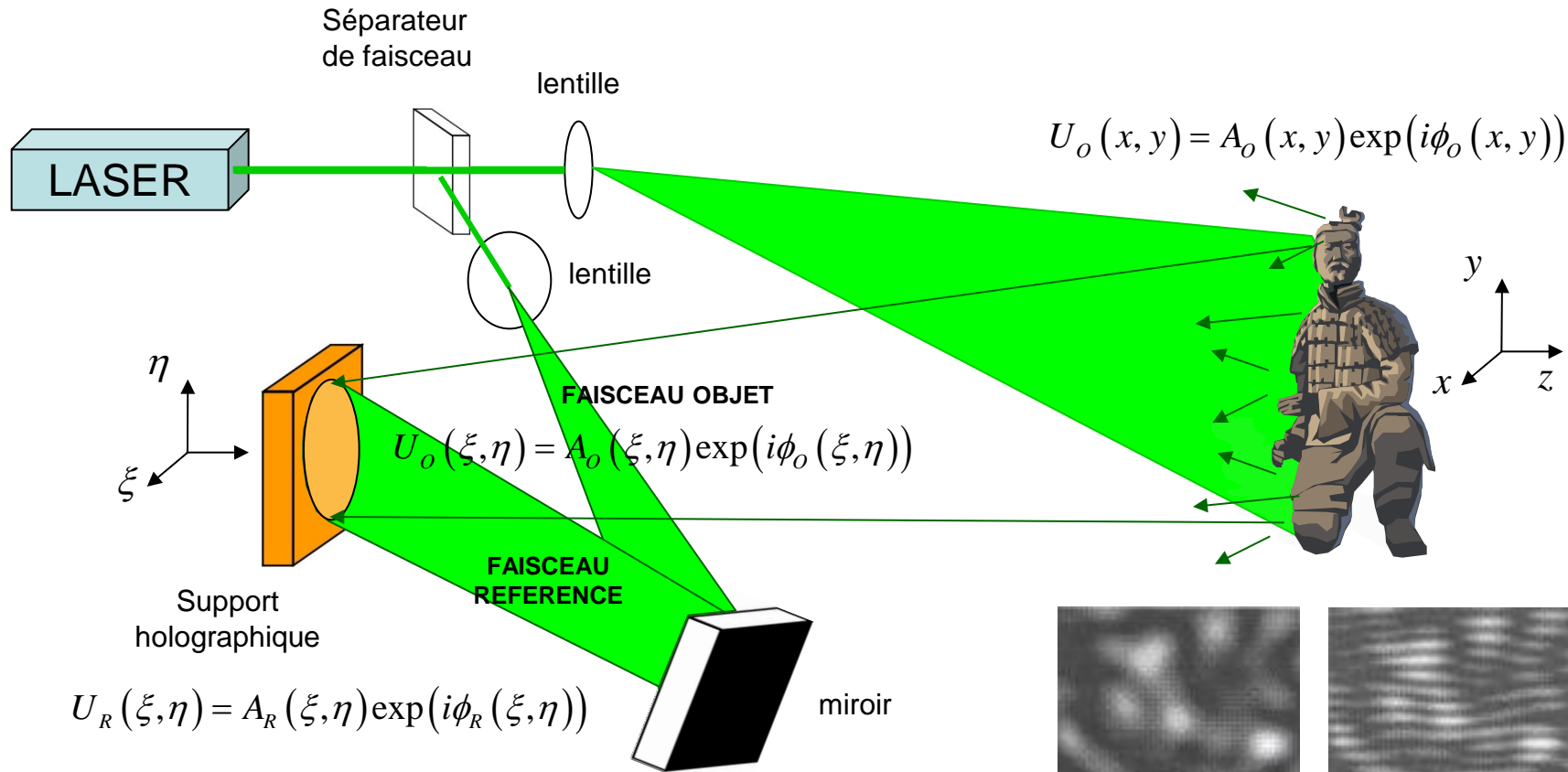
- Les techniques interférométriques
  - L'interférométrie holographique analogique
  - L'interférométrie de speckle
  - L'interférométrie holographique numérique
  - La shearographie
  - Principes et applications en CND
- La thermographie infrarouge active
  - La thermographie infrarouge
  - Techniques de thermographie infrarouges actives
  - Application en CND
- Corrélation numérique d'images
- Combinaison



# Les techniques interférométriques

# Holographie

- Holographie – 1 : Principe d'écriture



$$I(\xi, \eta) = (U_R(\xi, \eta) + U_o(\xi, \eta)) \cdot (U_R^*(\xi, \eta) + U_o^*(\xi, \eta))$$

$$= U_R \cdot U_R^* + U_o \cdot U_o^* + U_R \cdot U_o^* + U_o \cdot U_R^*$$

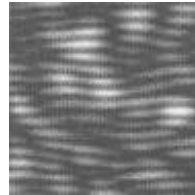
$$I(\xi, \eta) = I_R + I_o + 2\sqrt{I_R I_o} \cos(\phi_R - \phi_o) \quad 6$$

# Holographie

- Holographie – 2 : Types d'hogrammes

**Eclairement**

$$I(\xi, \eta) = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\phi_R - \phi_O)$$



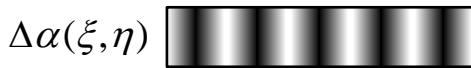
**Modification des propriétés du support holographique**



$$\tau(\xi, \eta) = T(\xi, \eta) \cdot \exp(i\vartheta(\xi, \eta))$$

**Transmission complexe**

**Variations d'absorption**



**Hologrammes en amplitude**

$$T(\xi, \eta) = a - \underbrace{bt_{\text{exp}} I(\xi, \eta)}_{\Delta\alpha(\xi, \eta)}$$

**Variations d'épaisseur**



**Hologrammes en phase**

$$\tau(\xi, \eta) = \exp(i\vartheta(\xi, \eta))$$

$$\vartheta(\xi, \eta) = a' + b't_{\text{exp}} I(\xi, \eta)$$

**Variations d'indice de réfraction**



# Supports d'enregistrement

## Plaques argentiques (AgBr)

© Yves Gentet

$\Delta\alpha(\xi, \eta)$

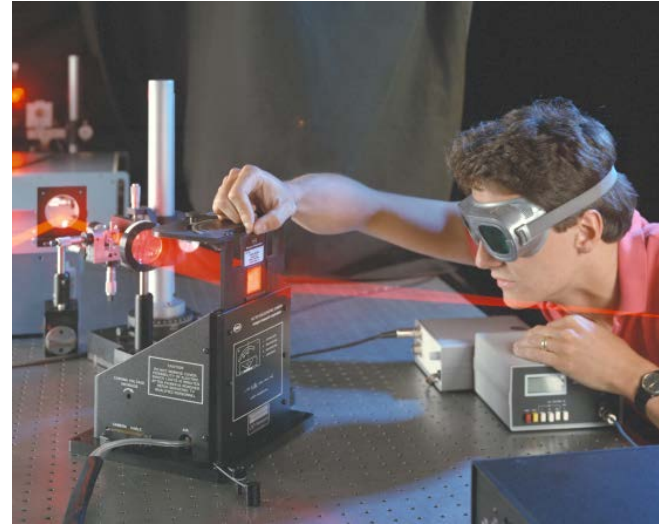
$\Delta n(\xi, \eta)$



## Plaques ou rouleaux photo-thermoplastiques

© Newport

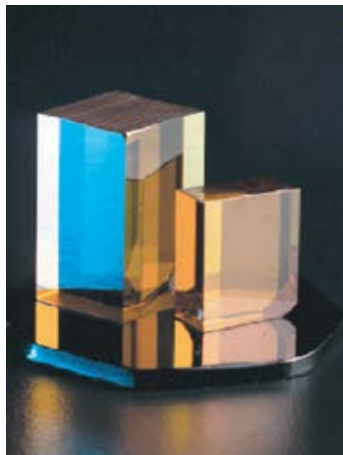
$\Delta h(\xi, \eta)$



## Cristaux photoréfractifs inorganiques

© ICMCB, Bordeaux

$\Delta n(\xi, \eta)$



## Polymères photoréfractifs

© Opt. Science Center, Tucson AZ

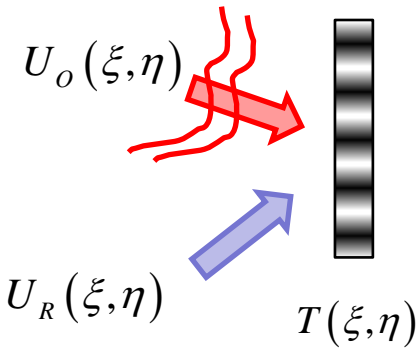
$\Delta n(\xi, \eta)$



# Holographie

- Lecture = Diffraction par réseau

**Hologrammes en amplitude**

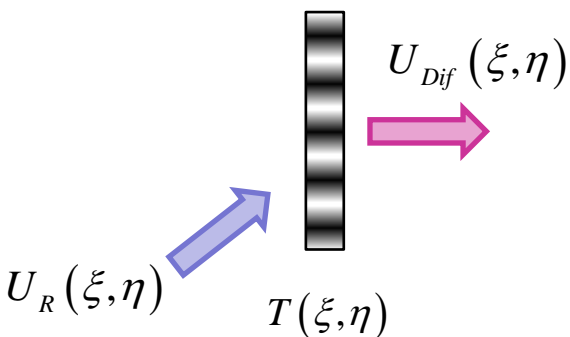


$$U_o(\xi, \eta) = A_o(\xi, \eta) \exp(i\phi_o(\xi, \eta))$$

$$U_R(\xi, \eta) = A_R(\xi, \eta) \exp(i\phi_R(\xi, \eta))$$

$$I(\xi, \eta) = U_R \cdot U_R^* + U_o \cdot U_o^* + U_R \cdot U_o^* + U_o \cdot U_R^*$$

$$T(\xi, \eta) \div I(\xi, \eta) = |U_R|^2 + |U_o|^2 + U_R \cdot U_o^* + U_o \cdot U_R^*$$



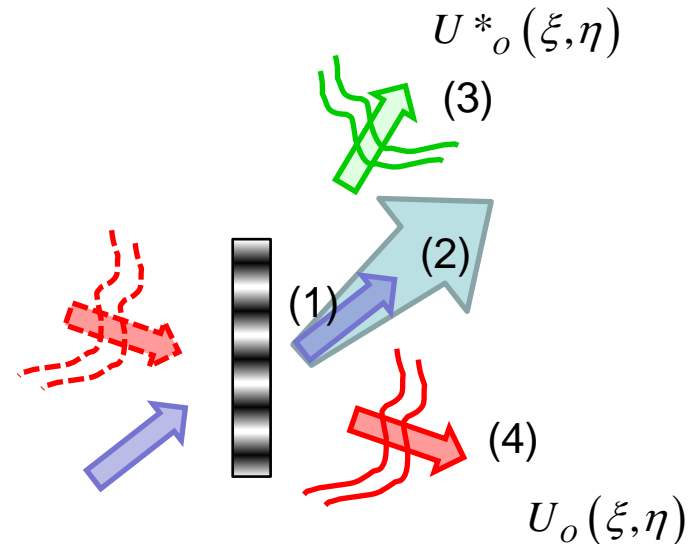
$$U_{Dif}(\xi, \eta) = T(\xi, \eta) \cdot U_R(\xi, \eta)$$

$$U_{Dif} \div U_R |U_R|^2 \quad (1)$$

$$+ U_R |U_o|^2 \quad (2)$$

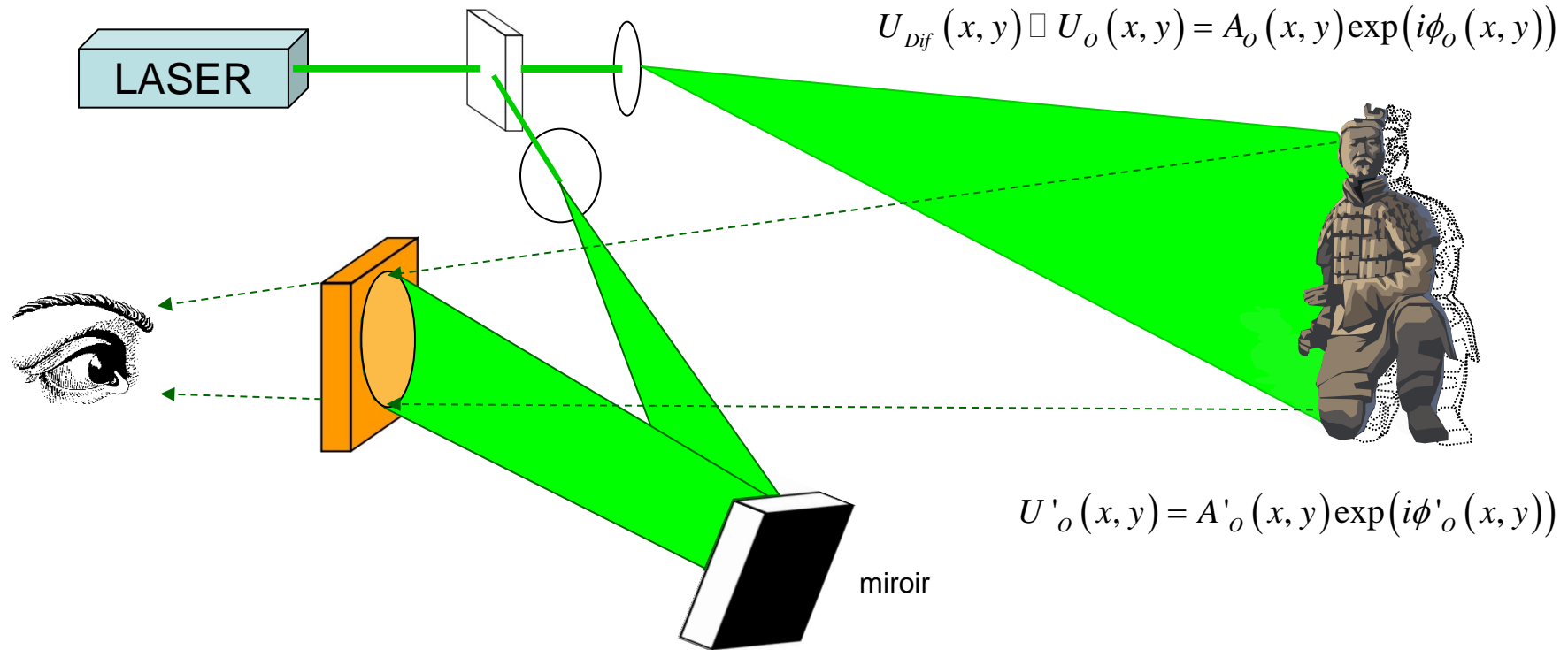
$$+ U_R^2 \cdot U_o^* \quad (3)$$

$$+ U_o \cdot |U_R|^2 \quad (4)$$



# Holographie

- Interférométrie holographique



$$U_{Dif}(x, y) \square U_o(x, y) = A_o(x, y) \exp(i\phi_o(x, y))$$

$$U'_o(x, y) = A'_o(x, y) \exp(i\phi'_o(x, y))$$

$$I(x, y) = (U_o(x, y) + U'_o(x, y)) \cdot (U_o^*(x, y) + U'^*_o(x, y))$$

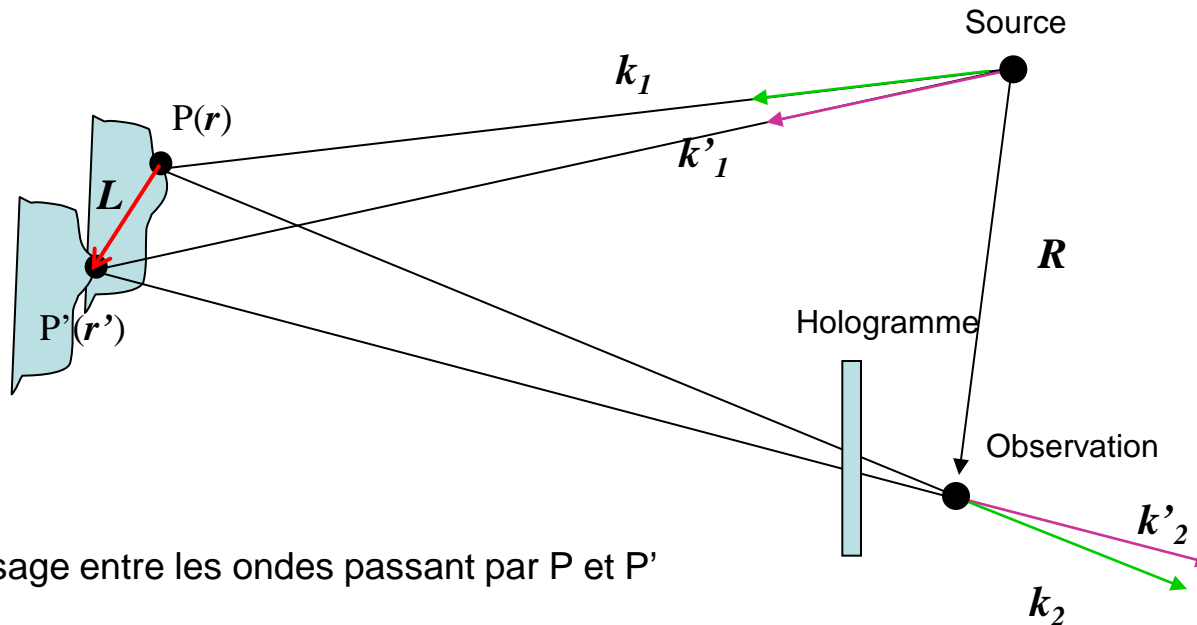
$$I(x, y) = I_o + I'_o + 2\sqrt{I_o I'_o} \cos(\phi_o - \phi'_o)$$

$$I(\cdot) = I_{moyen}(\cdot) \left[ 1 + m(\cdot) \cos(\Delta\phi(\cdot)) \right]$$

# Interférométrie holographique

- Interprétation des déplacements

Le point P de coordonnées  $\mathbf{r}$  se déplace en P' de coordonnées  $\mathbf{r}'$ , selon un vecteur déplacement  $\mathbf{L}$



Déphasage entre les ondes passant par P et P'

$$\Delta\phi(x, y) = \mathbf{S}(x, y) \cdot \mathbf{L}(x, y)$$

L'interférométrie holographique en lumière diffuse permet la mesure du déphasage donné par la projection du déplacement  $\mathbf{L}$  sur le vecteur sensibilité  $\mathbf{S}$  défini par

$$\mathbf{S} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$$

Au cas où  $\mathbf{L} \ll \mathbf{R}, \mathbf{r}, \mathbf{r}'$

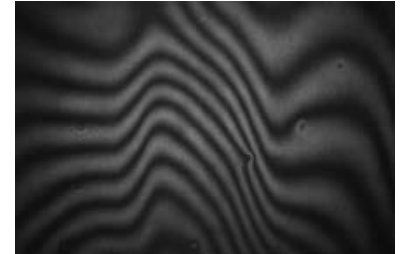
# Interférométrie holographique

- Différents cas

$$\Delta\phi(x, y) = \mathbf{S}(x, y) \cdot \mathbf{L}(x, y)$$

- Mesures Hors-Plan

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} L$$

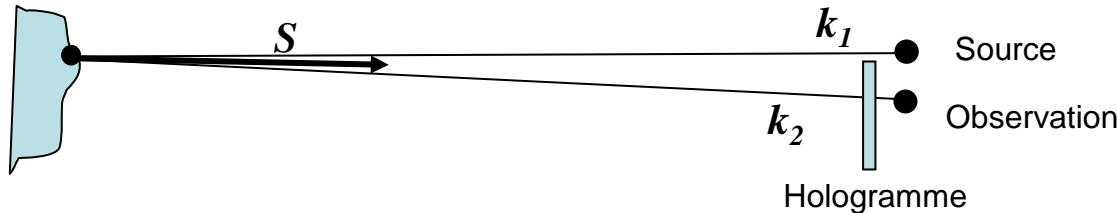


Maximas d'intensité pour

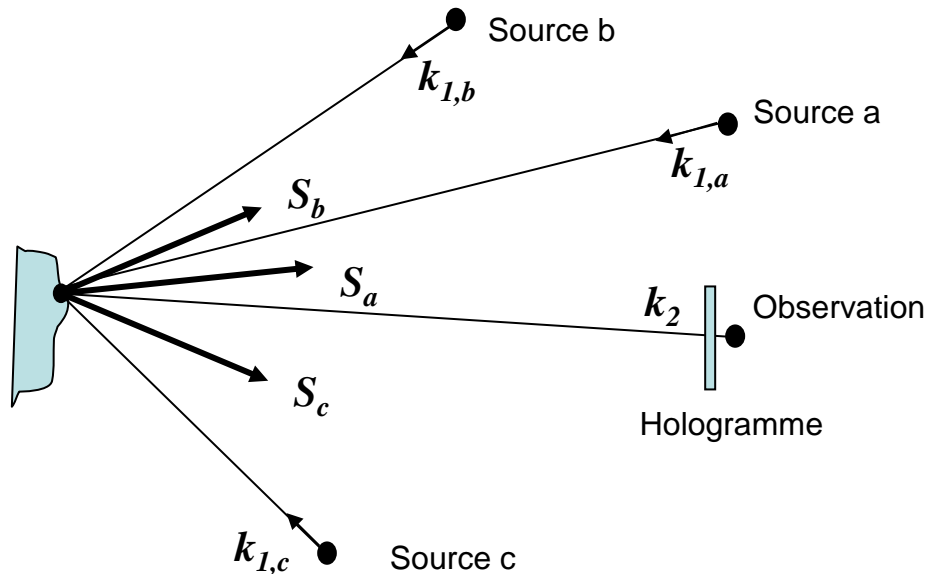
$$\Delta\phi = N2\pi$$

Distance entre 2 franges

$$L_{N+1} - L_N = \frac{\lambda}{2}$$



- Mesures 3 composantes de déplacement



3 mesures différentes avec  
3 vecteurs sensibilité différents

Résolution du système en L

$$\Delta\phi_a = \mathbf{S}_a \cdot \mathbf{L}$$

$$\Delta\phi_b = \mathbf{S}_b \cdot \mathbf{L}$$

$$\Delta\phi_c = \mathbf{S}_c \cdot \mathbf{L}$$

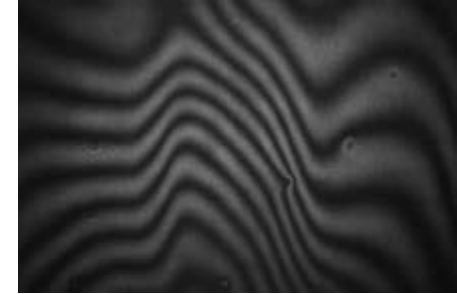


# Interférométrie holographique

- Extraction de la différence de phase

$$I(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y)) \right]$$

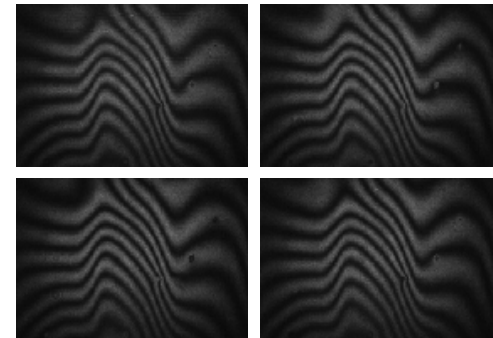
Différence de phase



## Technique du décalage de phase

$$I_k(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y) + (k-1) \times 90^\circ) \right]$$

$$\begin{cases} I_1(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y)) \right] \\ I_2(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y) + 90^\circ) \right] \\ I_3(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y) + 180^\circ) \right] \\ I_4(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y) + 270^\circ) \right] \end{cases}$$

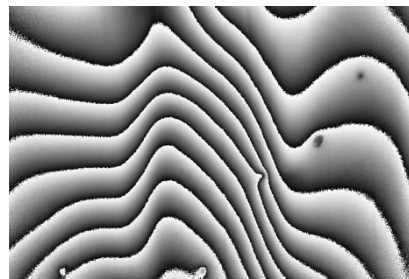


$$\Delta\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right]$$

Le décalage de phase permet d'obtenir des résolutions inférieures à la frange

$$\frac{\lambda}{10} \longrightarrow \frac{\lambda}{50}$$

$\Delta\phi(x, y) \pmod{2\pi}$

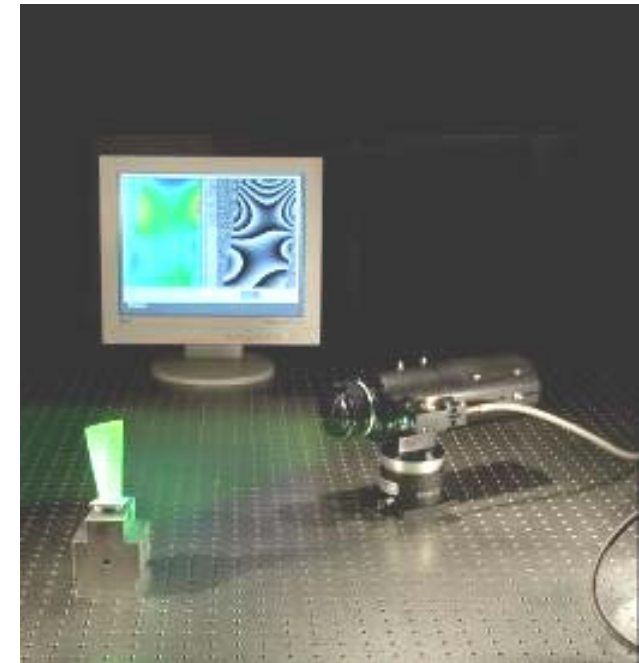
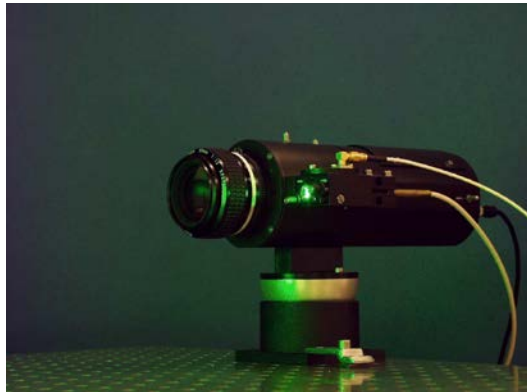
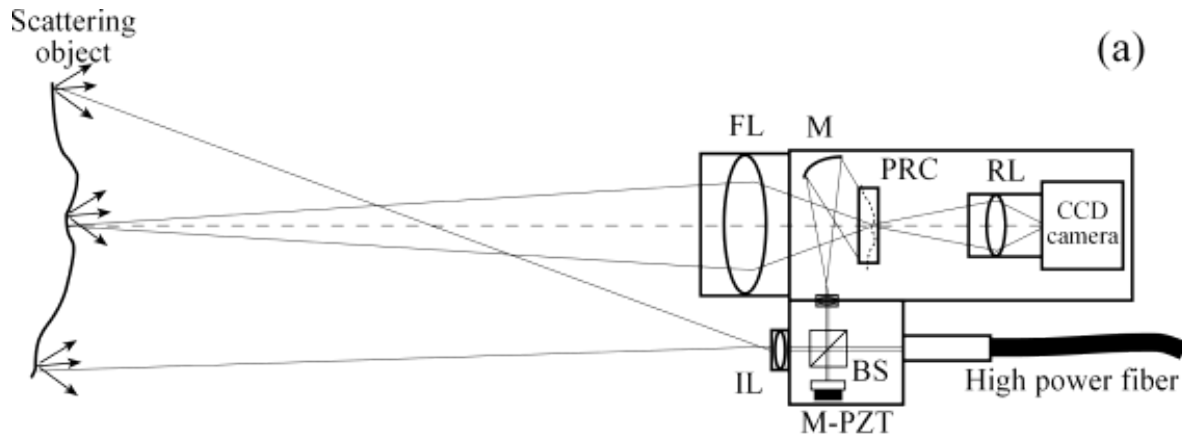


Après déroulage de phase  
(phase unwrapping)



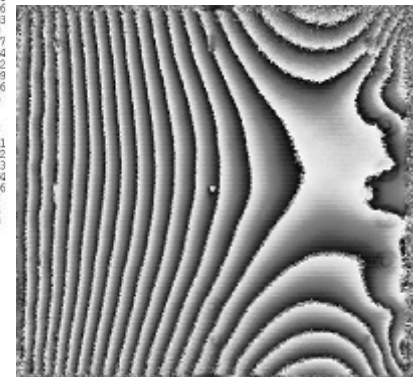
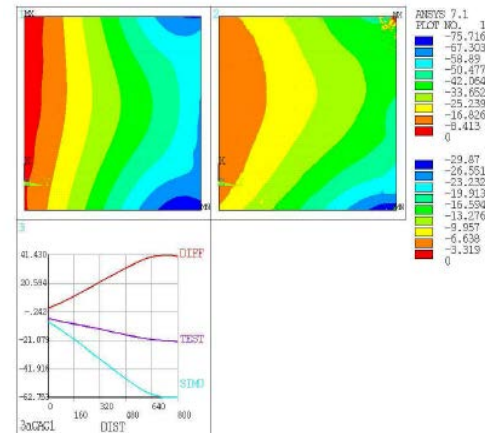
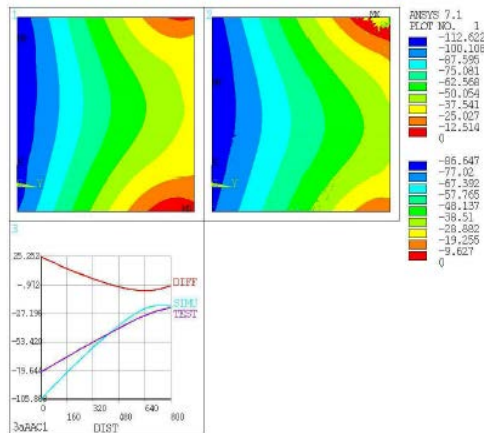
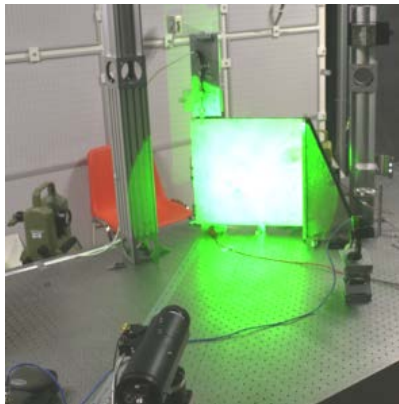
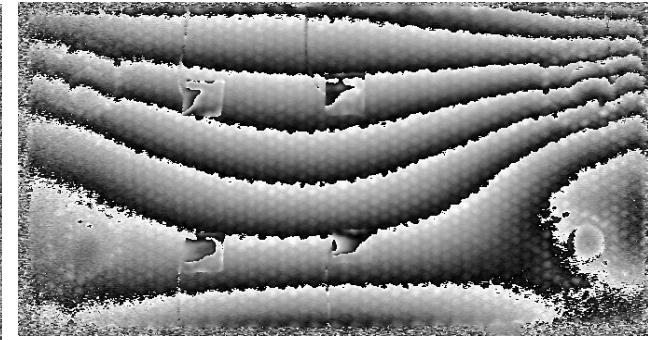
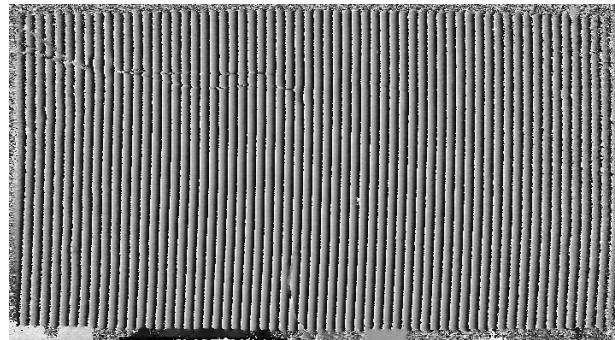
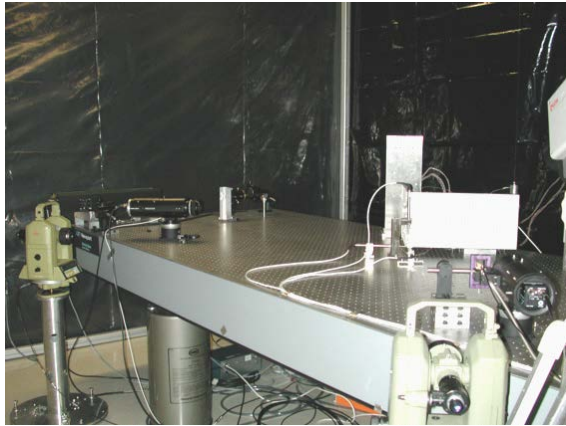
# Interféromètre holographique photoréfractif

- Système commercial basé sur des cristaux photoréfractifs
- Développé au CSL



# Interférométrie holographique

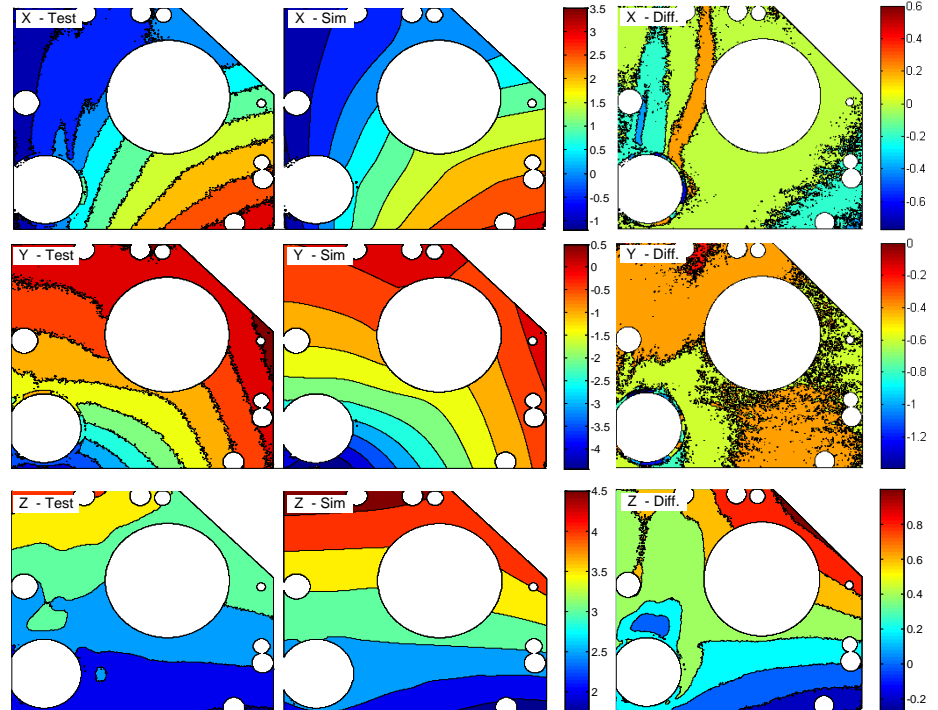
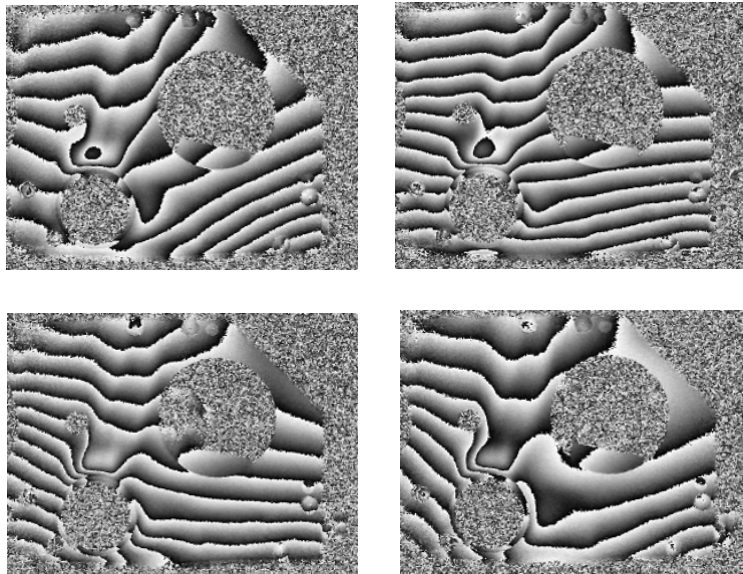
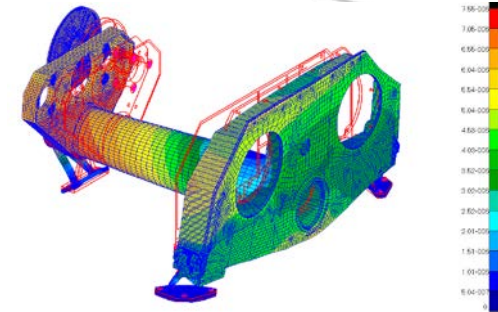
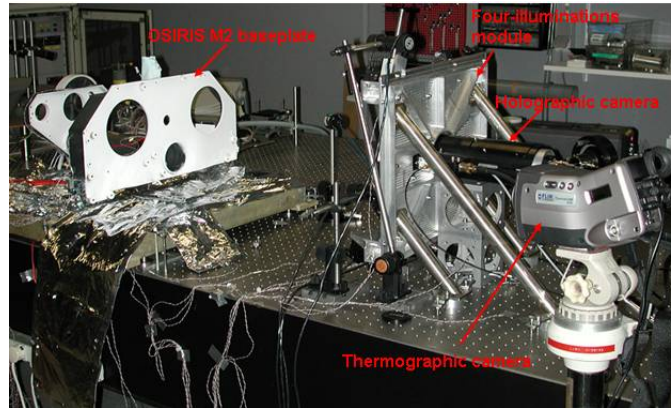
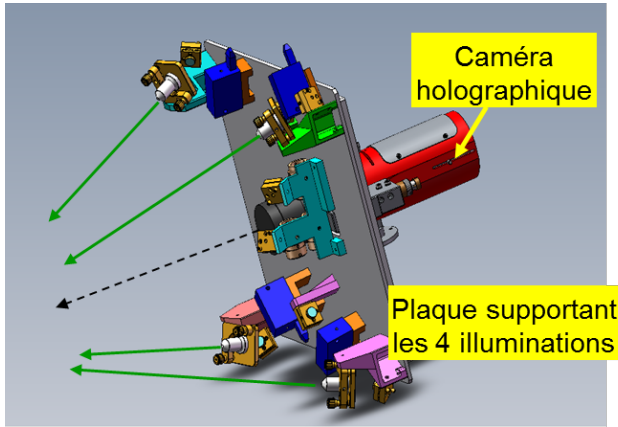
- Applications en métrologie du champ de déplacement
  - Mesures de déformations thermo-mécaniques sur diverses structures composites spatiales
  - Comparaison avec simulations par éléments finis





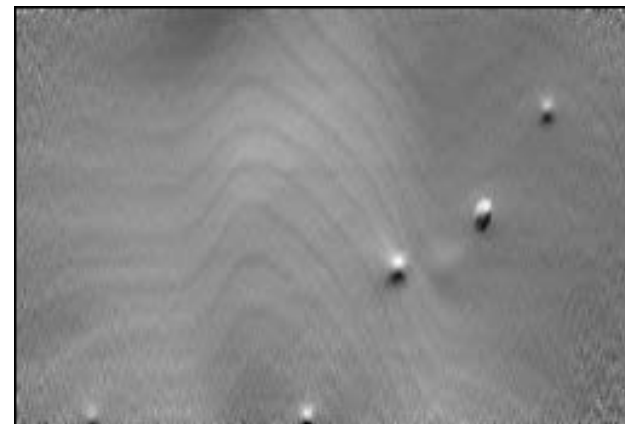
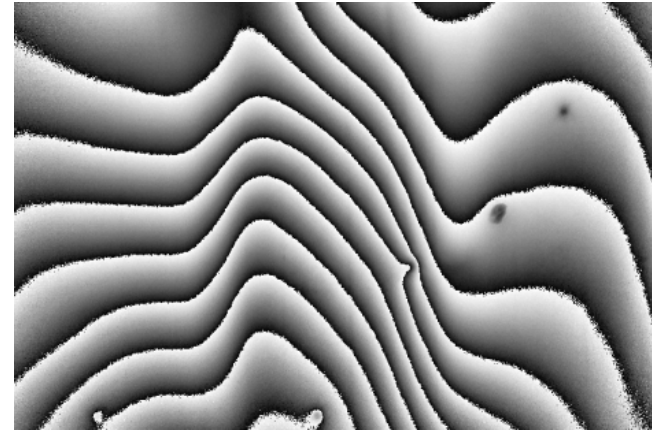
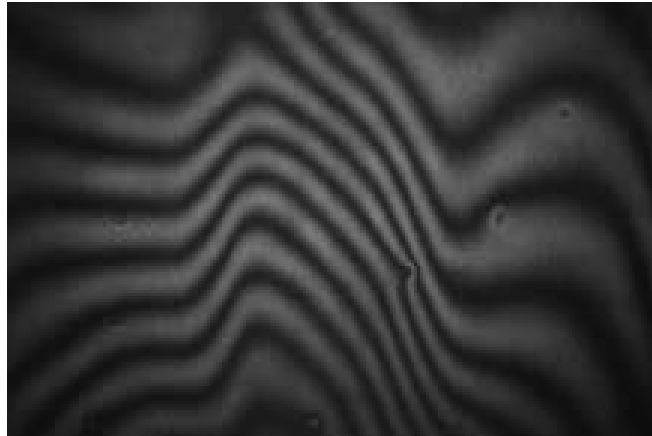
# Interférométrie holographique

- Champ de déplacement 3D



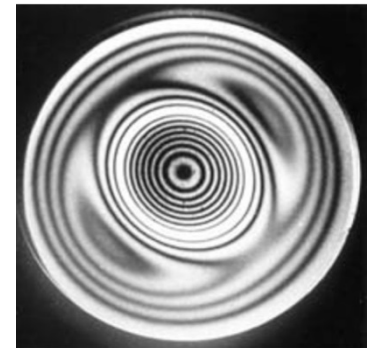
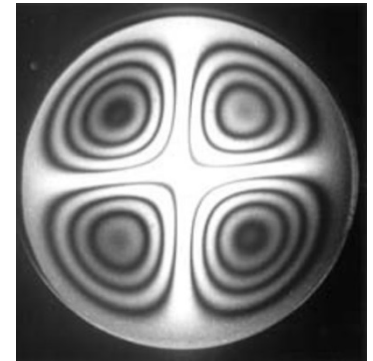
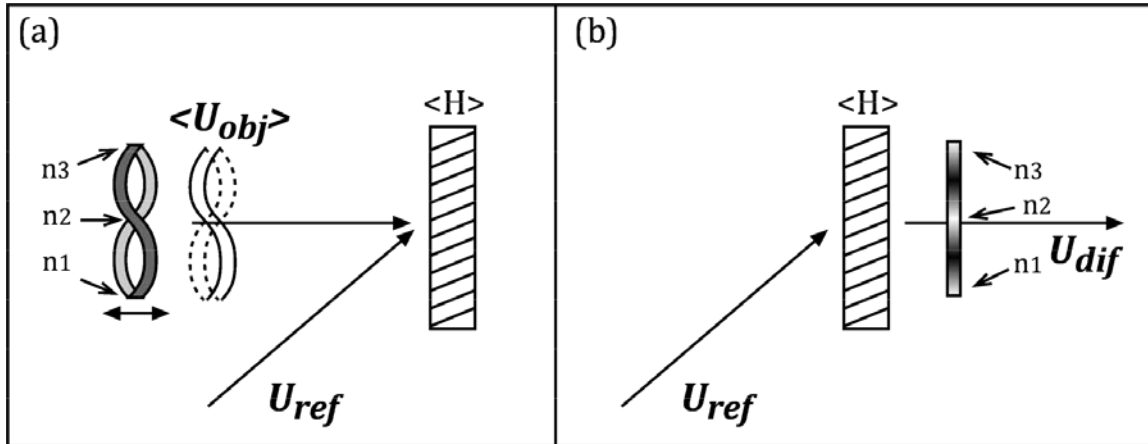
# Interférométrie holographique

- Détection de défauts



# Interférométrie holographique

- Cas des vibrations : le temps moyenné



$$\vec{L}(t) = \vec{A} \sin(\omega t)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi|\vec{A}|}{\lambda} \sin(\omega t) = \varphi_A \sin(\omega t)$$

$$I(t) = I_R(t) + I_O(t) + 2\sqrt{I_R(t) I_O(t)} \cos[\phi_R - \phi_O + \varphi_A \sin(\omega t)]$$

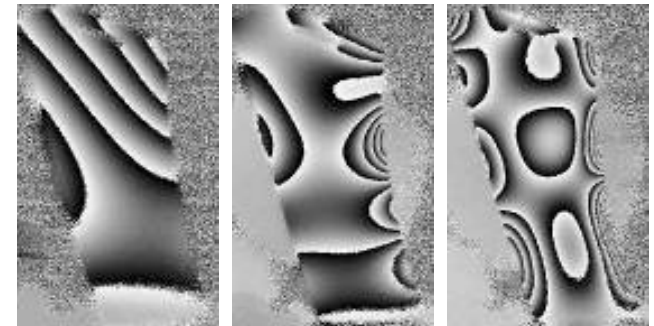
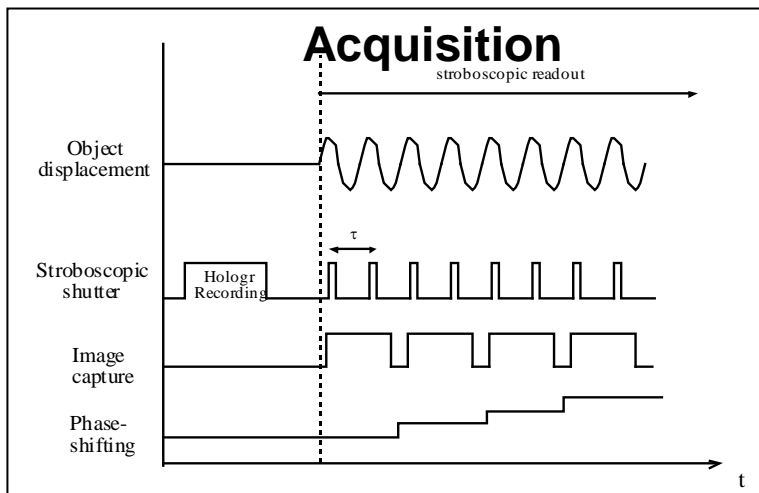
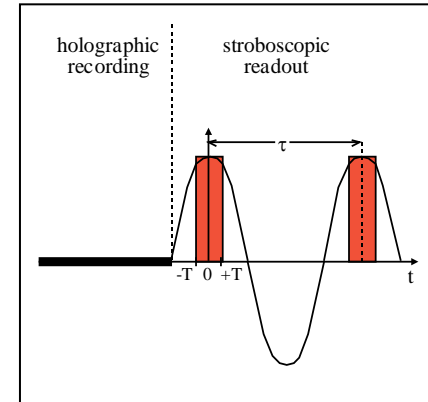
Durée enregistrement  $T \gg$  période vibration  $2\pi/\omega$

$$I_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt$$

$$I_{av} = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\psi) J_0(\varphi_A)$$

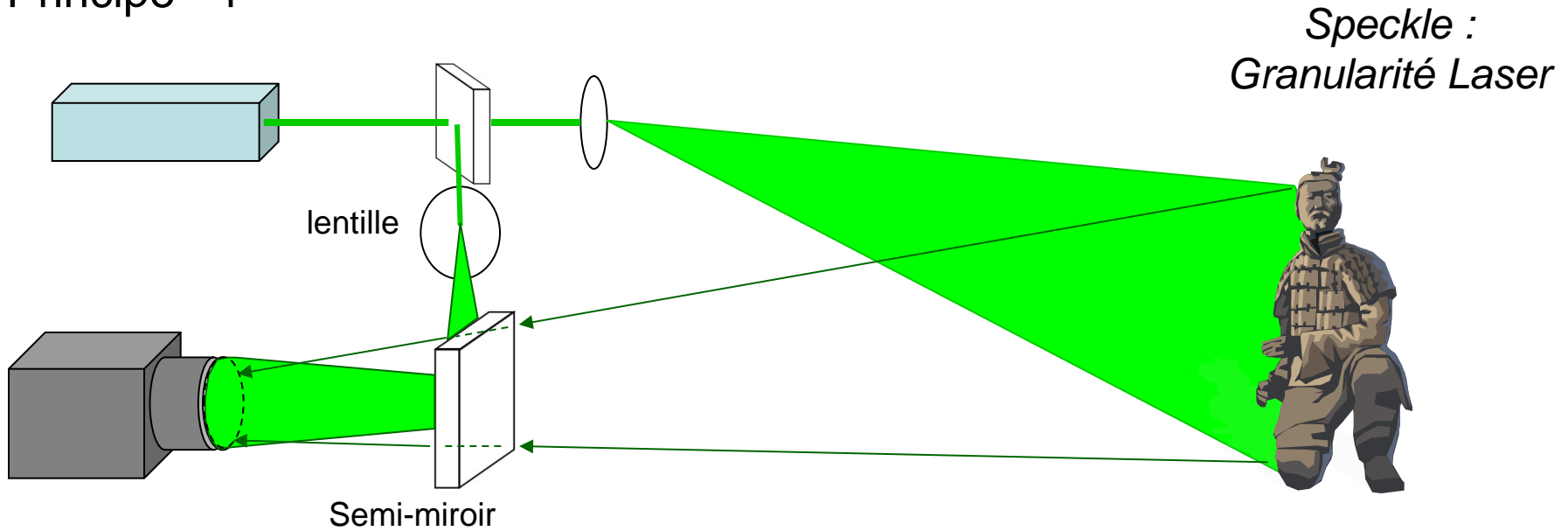
# Interférométrie holographique

- Cas des vibrations : le régime stroboscopique
  - Déflecteur acousto-optique synchronisé sur fréquence d'excitation
  - Ouverture au maximum du déplacement objet
  - Déplacement entre position moyenne (repos) et positions maximum
  - Duty cycle : 0.15 - 0.2
  - Compromis entre contraste des franges et intensité image



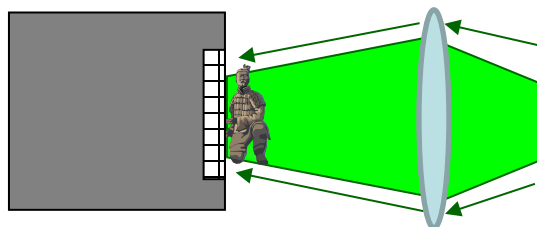
# Interférométrie de speckle

- Principe - 1

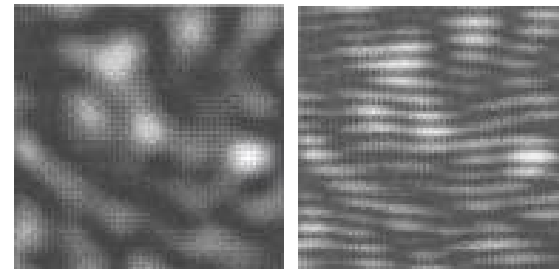


Rugosité objet  $R \geq \lambda$

Dimensions des grains de speckle  $\sigma \div \lambda \frac{f}{D}$



$Sp(\xi, \eta)$





# Interférométrie de speckle

- Principe - 2

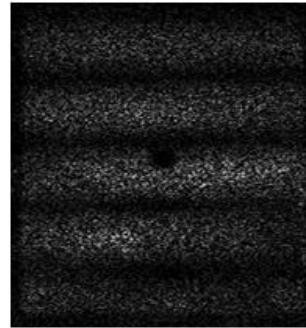
$$t=t_1: Sp(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\phi(x, y)) \right]$$

$$\phi(x, y) = \phi_R(x, y) - \phi_O(x, y)$$

$$t=t_2: Sp'(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\phi'(x, y)) \right]$$

$$\phi'(x, y) = \phi_R(x, y) - \phi'_O(x, y)$$

$$I(x, y) = |Sp_1 - Sp_2|(x, y) \div \sin \left[ \frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right]$$



$$\Delta\phi(x, y) = \phi'_O(x, y) - \phi_O(x, y)$$

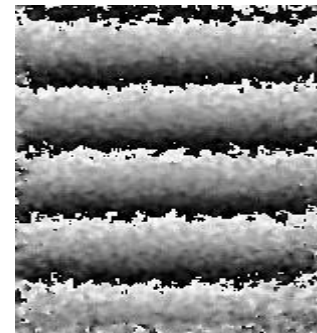
$$\phi'(x, y) = \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)$$

## Décalage de phase

$$t=t_1: \phi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{Sp_4(x, y) - Sp_2(x, y)}{Sp_1(x, y) - Sp_3(x, y)} \right]$$

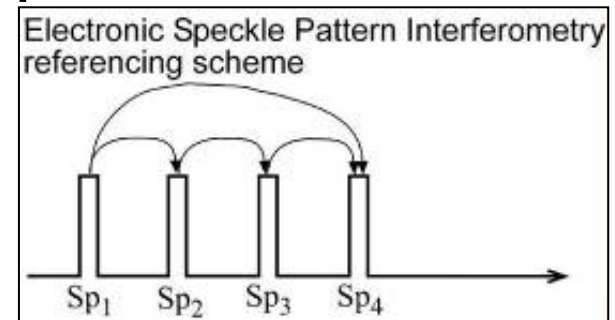
$$t=t_2: \phi'(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{Sp'_4(x, y) - Sp'_2(x, y)}{Sp'_1(x, y) - Sp'_3(x, y)} \right]$$

$\Delta\phi(x, y) \text{ mod } 2\pi$



# Interférométrie de speckle

- Configurations possibles :
  - Hors-plan
  - Dans-le-plan
  - Mesures vecteur déplacement (3-4 points d'illumination)
- Applications : idem interférométrie holographique
- Avantages par rapport à l'holographie :
  - Plus rapide à l'acquisition
  - Temps de réponse peut être très court
  - Beaucoup de longueurs d'onde utilisables
  - On peut choisir les états de référence
- Désavantages :
  - Images bruitées (speckle)
  - Résolution d'enregistrement plus faible que l'holographie analogique



# Interférométrie de speckle

- Applications en CND

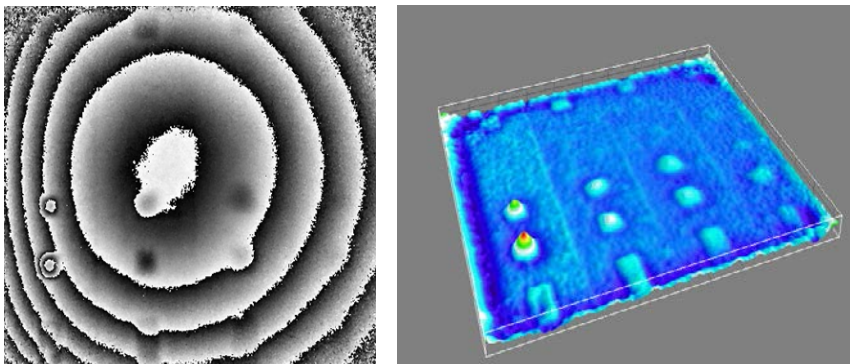
*Original*



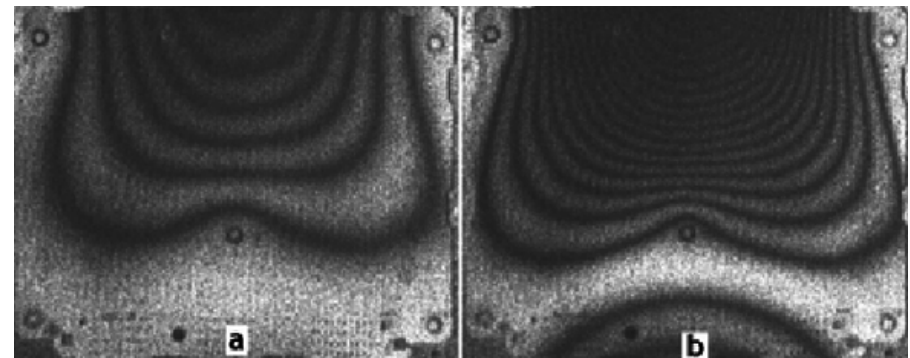
*Copie*



*Détection de défauts*



*Vibration Temps Moyenné*



# Interféromètres de speckle industriels

- Systèmes commerciaux existants

© GOM



© DANTEC



© DANTEC



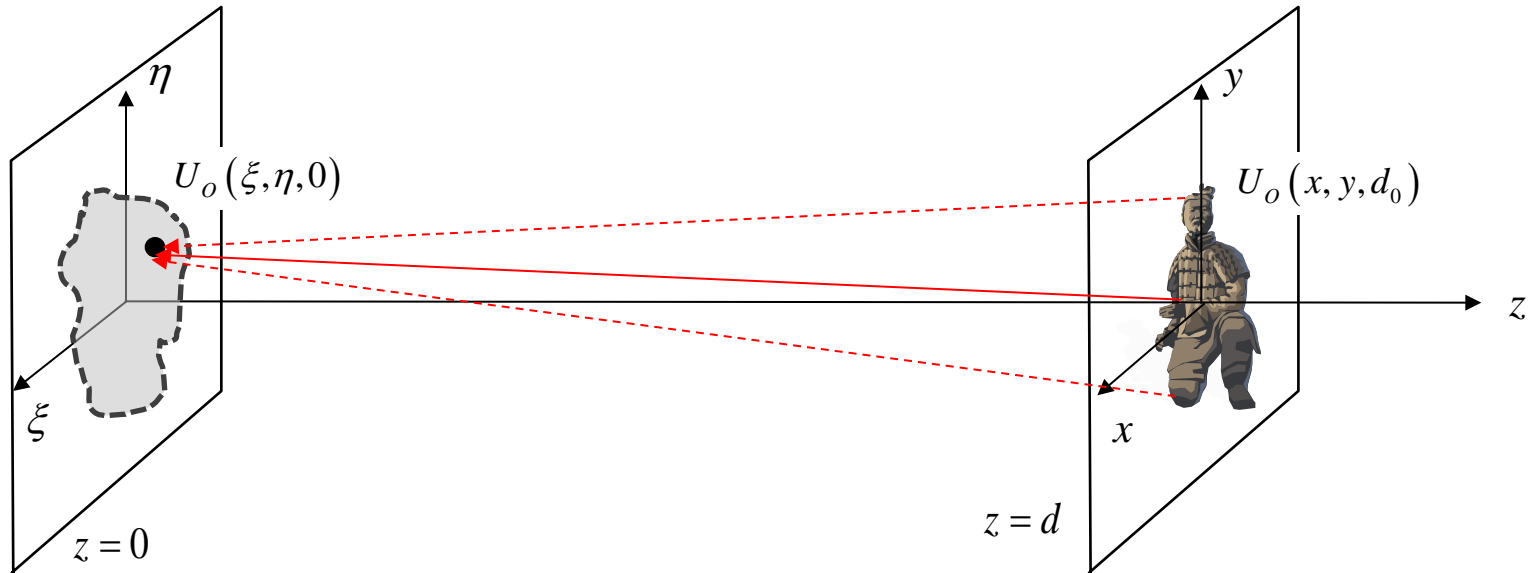
*Mesures 3D vibratoires  
Laser impulsionnel*

© DANTEC

[www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com)  
[www.steinbichler.de](http://www.steinbichler.de)  
[www.gom-france.com](http://www.gom-france.com)

# Holographie numérique

- Principe de base : propagation de la lumière de l'objet vers le capteur



**Intégrale de diffraction de Fresnel (approximation paraxiale)**

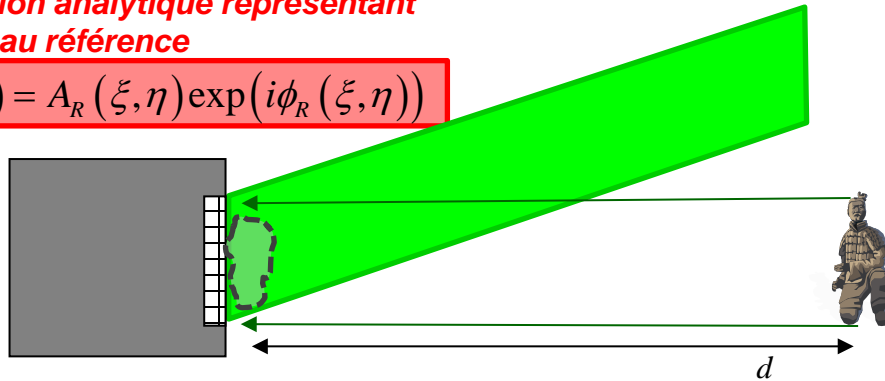
$$U_o(x, y, d_0) = \frac{\exp(ikd_0)}{i\lambda d_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_o(\xi, \eta, 0) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d_0} \left[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2\right]\right\} d\xi d\eta$$

# Holographie numérique

- Enregistrement (sans lentille entre objet et capteur)

*Expression analytique représentant le faisceau référence*

$$U_R(\xi, \eta) = A_R(\xi, \eta) \exp(i\phi_R(\xi, \eta))$$



$$U_O(x, y) = A(x, y) \exp(i\phi_O(x, y))$$

$$U_O(\xi, \eta) = A_O(\xi, \eta) \exp(i\phi_O(\xi, \eta))$$

$$I(\xi, \eta) = (U_R(\xi, \eta) + U_O(\xi, \eta)) \cdot (U_R^*(\xi, \eta) + U_O^*(\xi, \eta))$$

*Intensité de l'hologramme enregistré*

$$I(\xi, \eta) = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\phi_R - \phi_O)$$

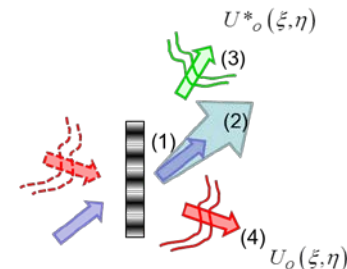
- Reconstruction (principe de Fresnel)

$$U_o(x, y, z = d) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right]$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(\xi, \eta) U_R(\xi, \eta) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta$$

*Rappel: holo analogique*

$$U_{Dif}(\xi, \eta) = T(\xi, \eta) U_R(\xi, \eta)$$



$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (...) \iff TF \left[ I(\xi, \eta) U_R(\xi, \eta) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \right]$$

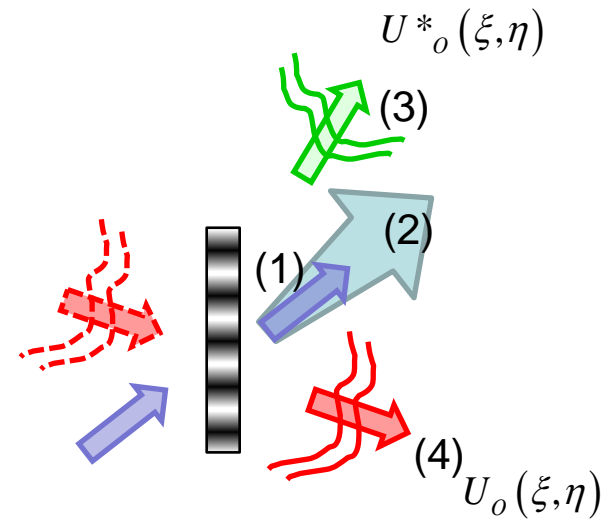
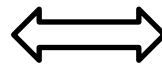


# Holographie numérique

- Reconstruction - 2

$$U_o(m,n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} \left(\frac{m^2}{M^2 \Delta\xi^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta\eta^2}\right)\right]$$

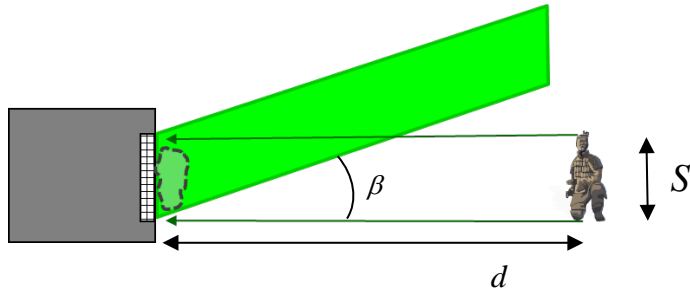
$$\times \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} I(k,l) U_R(k,l) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta\xi^2 + l^2 \Delta\eta^2)\right] \exp\left[i 2\pi \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N}\right)\right]$$



# Holographie numérique

- Reconstruction – 3 : quelques points importants

*Angle entre objet et référence – Dimension des objets*



- Pour pouvoir résoudre l'hologramme, l'angle  $\beta$  doit être correctement choisi
- Angle trop grand = franges trop serrées
- Franges plus résolues (théorème de Shannon)

$$\beta \leq 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{4\Delta}\right)$$

$\lambda$ : longueur d'onde

$\Delta$ : dimension pixel

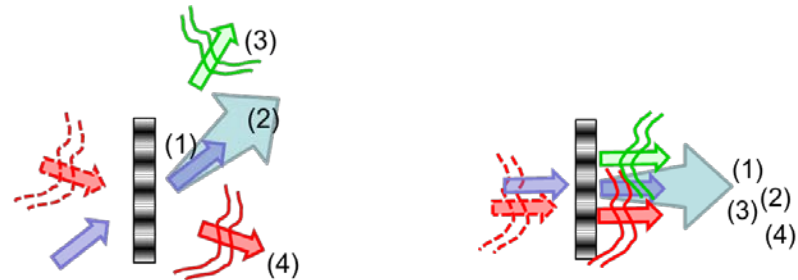
$$S_{\max} = \frac{d\lambda}{2\Delta}$$

$d$ : distance de reconstruction

*Séparation des ordres de diffraction*



- Angle trop petit : superposition des ordres
- Cas de l'holographie in-line





# Holographie numérique

- Reconstruction – 4 : Filtrage des ordres inutiles

$$I(\xi, \eta) = I_R(\xi, \eta) + I_O(\xi, \eta)$$

$$+ 2\sqrt{I_R(\xi, \eta)I_O(\xi, \eta)} \cos(\phi_R(\xi, \eta) - \phi_O(\xi, \eta))$$



**Suppression des basses fréquences**  
(Kreis et Jüptner – 1997)

$$I'(\xi, \eta) = I(\xi, \eta) - \langle I(\xi, \eta) \rangle$$



**Suppression du halo**  
(Skotheim – 2003)

$$I''(\xi, \eta) = I'(\xi, \eta) - I_R(\xi, \eta) - I_O(\xi, \eta)$$



**Décalage de phase** (De Nicola, 2002)

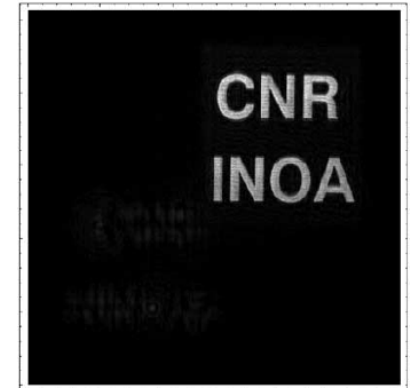
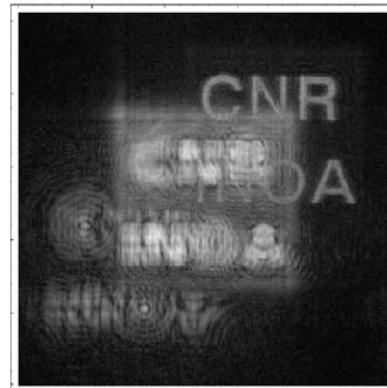
$$U'_R(\xi, \eta)I'(\xi, \eta) = U_R(\xi, \eta)I_1(\xi, \eta) + U_R(\xi, \eta)I_2(\xi, \eta)e^{-i\pi/2} + U_R(\xi, \eta)I_3(\xi, \eta)e^{-i\pi} + U_R(\xi, \eta)I_4(\xi, \eta)e^{-i3\pi/2} = 4|U_R(\xi, \eta)|^2 U_O(\xi, \eta)$$

$$I_1(\xi, \eta) = I_{\text{moyen}}(\xi, \eta) [1 + m(\xi, \eta) \cos(\Delta\phi(\xi, \eta))] ]$$

$$I_2(\xi, \eta) = I_{\text{moyen}}(\xi, \eta) [1 + m(\xi, \eta) \cos(\Delta\phi(x, y) + \pi/2)] ]$$

$$I_3(\xi, \eta) = I_{\text{moyen}}(\xi, \eta) [1 + m(\xi, \eta) \cos(\Delta\phi(x, y) + \pi)] ]$$

$$I_4(\xi, \eta) = I_{\text{moyen}}(\xi, \eta) [1 + m(\xi, \eta) \cos(\Delta\phi(x, y) + 3\pi/2)] ]$$

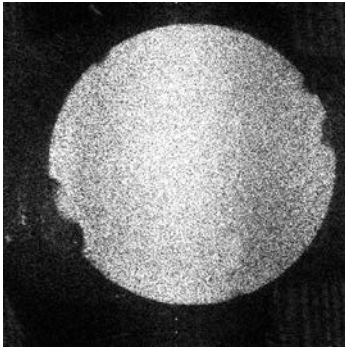


# Holographie numérique

- Reconstruction - 5

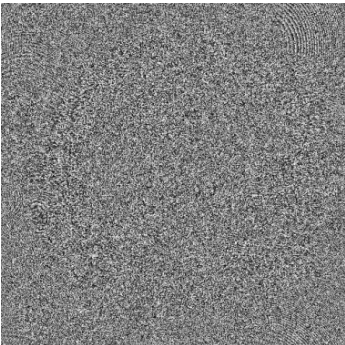
$$U_o(m,n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} \left(\frac{m^2}{M^2 \Delta \xi^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta \eta^2}\right)\right]$$

$$\times \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} I(k,l) U_R(k,l) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta \xi^2 + l^2 \Delta \eta^2)\right] \exp\left[i 2\pi \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N}\right)\right]$$



**Amplitude**

$$A(m,n) = \sqrt{(\text{Re}(U_o(m,n)))^2 + (\text{Im}(U_o(m,n)))^2}$$



**Phase**

$$\phi(m,n) = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}(U_o(m,n))}{\text{Re}(U_o(m,n))} \right]$$

# Holographie numérique

- Interférométrie holographique numérique

Phase de l'hologramme à l'état 1

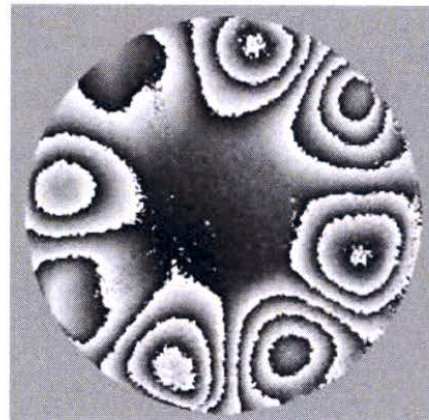


Phase de l'hologramme à l'état 2

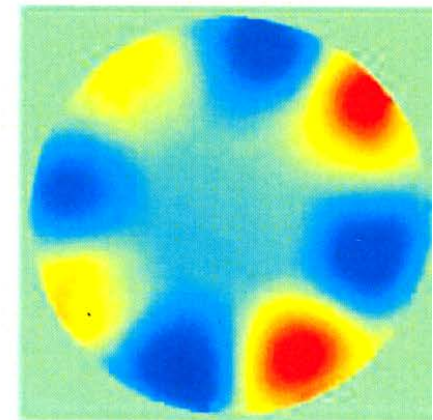


**Modes de vibration**  
(P. Picart, P. Tankam)

Carte de différence de phase  
non déroulée (mod  $2\pi$ )



Carte de différence de phase  
déroulée



$$\Delta\phi(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)$$

# Holographie numérique

- Applications commerciales
- Microscope holographique numérique

© Lynceetec

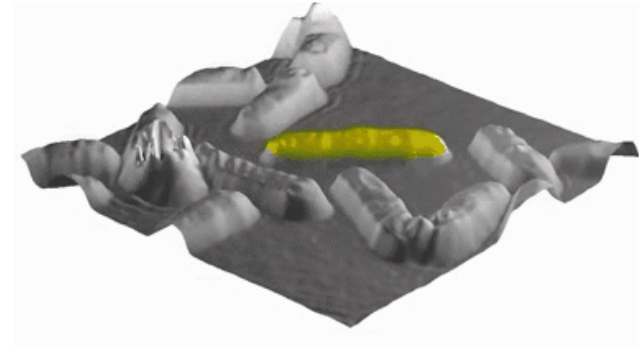
**Microscope  
en réflexion**



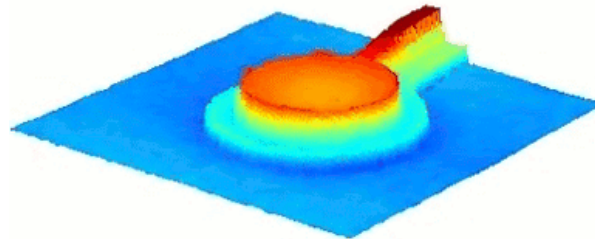
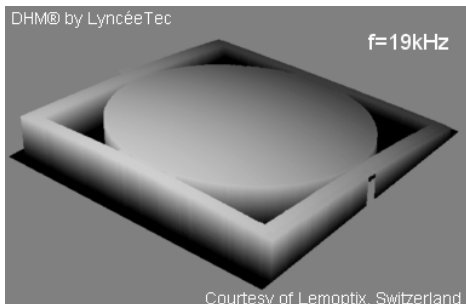
**Microscope  
en transmission**



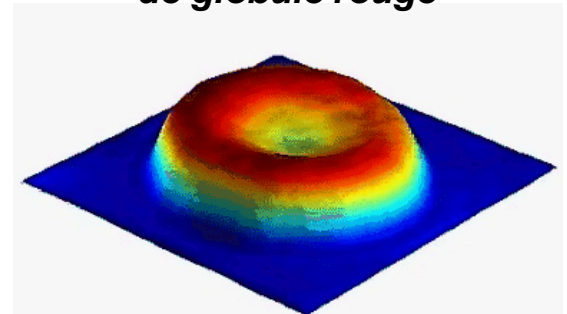
**Division cellulaire**



**Déformations - mouvements de MEMS**



**Fluctuations membrane  
de globule rouge**



# Holographie numérique infrarouge

- Motivation

## Zoom sur l'interférence locale (hologramme – specklegramme)

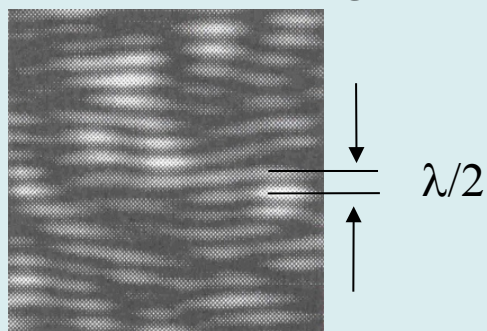
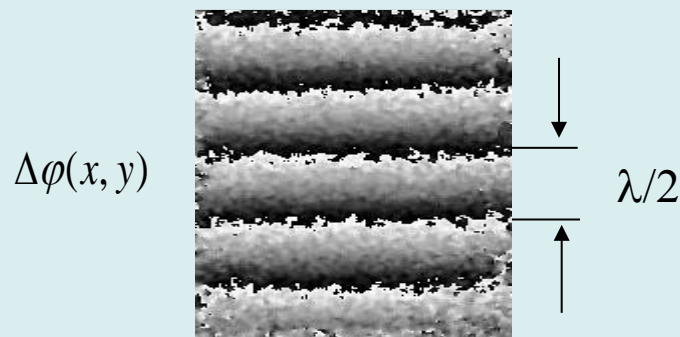


Figure d'intensité doit rester stable durant l'enregistrement (dépend du temps de réponse)

Critère de stabilité du montage:  $< \lambda/10$

Lasers visibles: stabilité meilleure que **50 nm**

## Interférogramme – Carte de phase



Gamme de mesure  $\leftrightarrow$  Nombre de franges

Lasers visibles: gamme = **50 nm – 10  $\mu$ m**

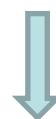


Stabilité relâchée à **1  $\mu$ m**

**Laser CO<sub>2</sub>**

**$\lambda=10 \mu$ m**

**(gamme LWIR)**

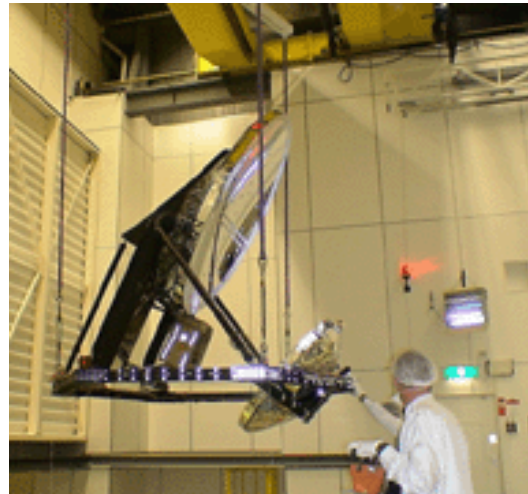


Gamme = **1  $\mu$ m – 200  $\mu$ m**



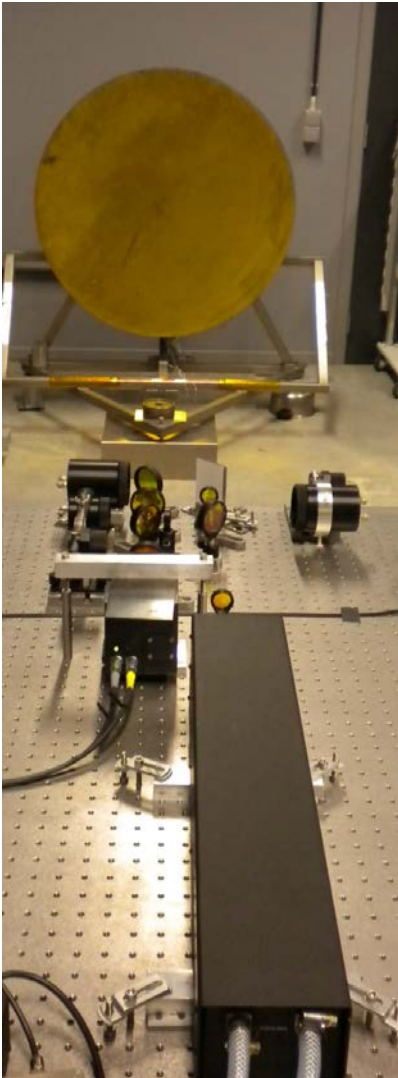
# Holographie numérique infrarouge

- Besoins de l'Agence Spatiale Européenne
  - Déformations champ complet de réflecteurs asphériques
  - Test en ambiance vide thermique simulée
  - Large réflecteurs: jusqu'à 4 m de diamètre
  - Gamme de mesure: 1  $\mu\text{m}$  – 250  $\mu\text{m}$

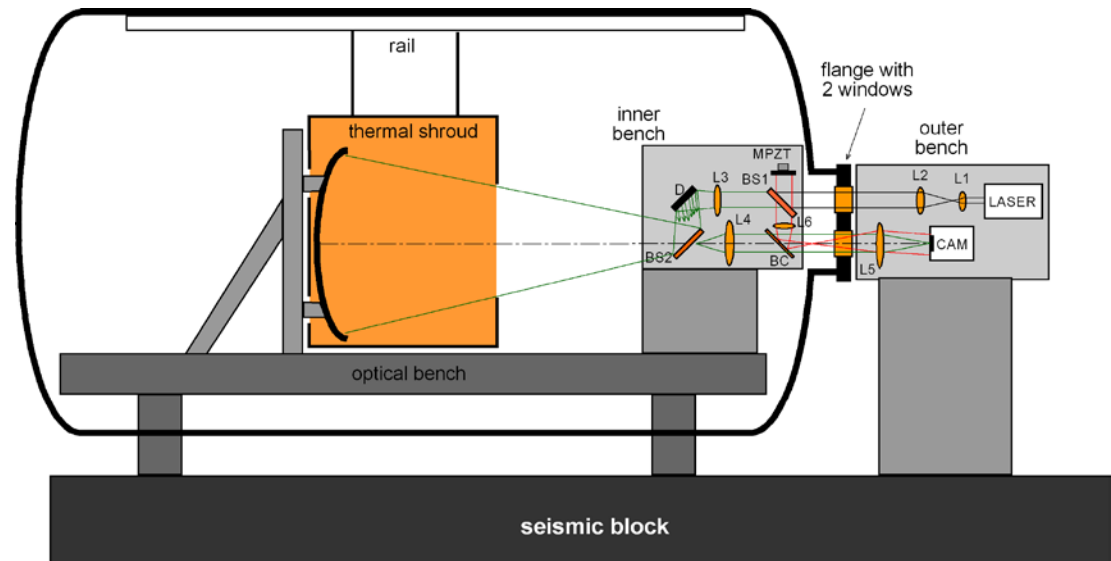
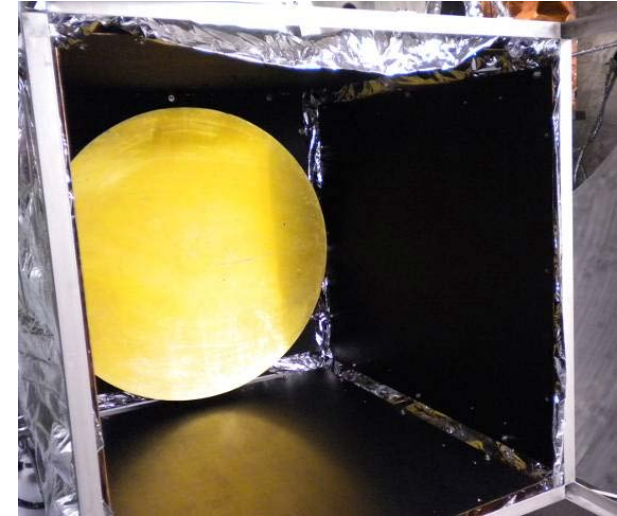


# Holographie numérique infrarouge

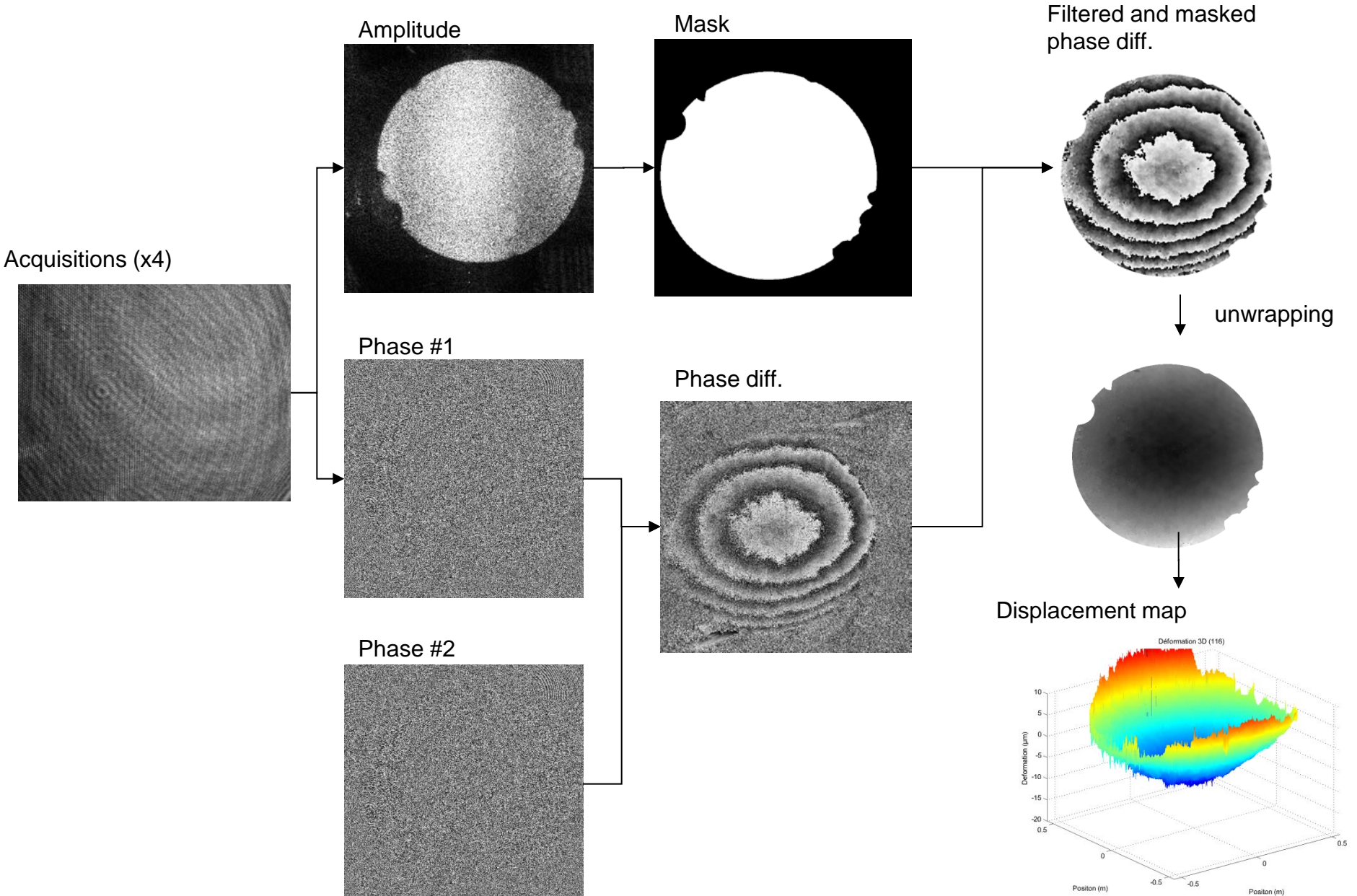
*Études en laboratoire*



*Implémentation dans test sous vide*



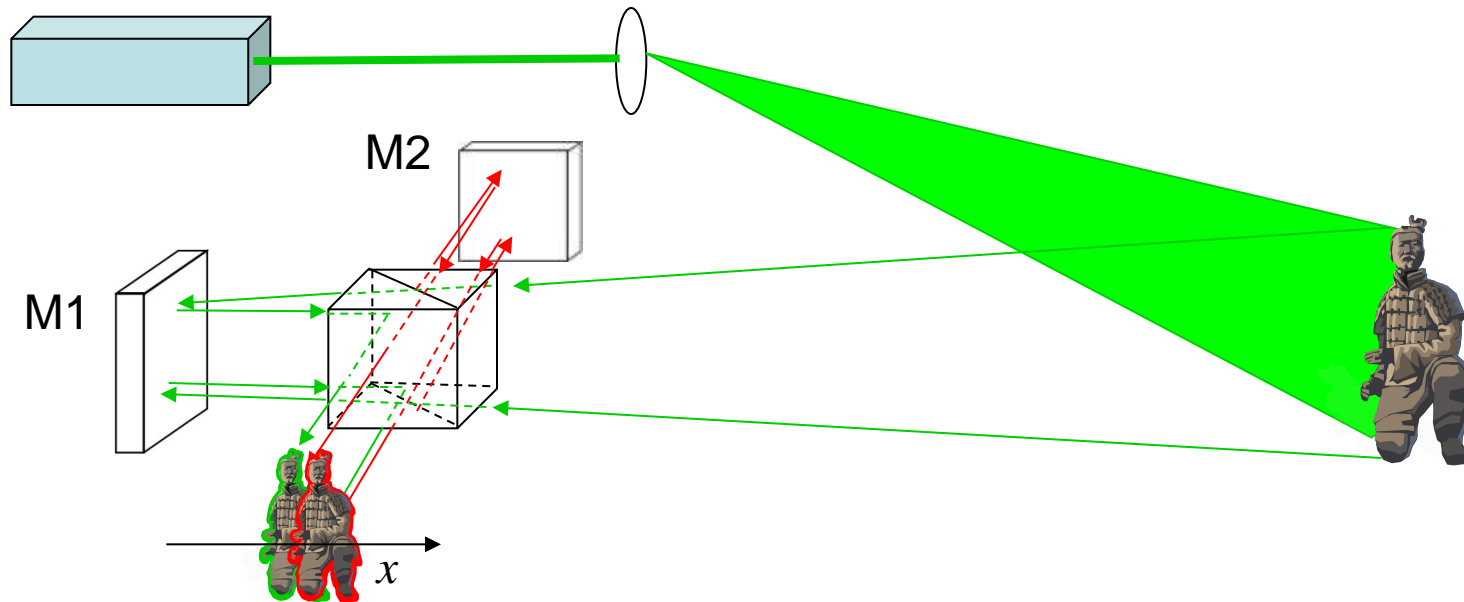
# Holographie numérique infrarouge



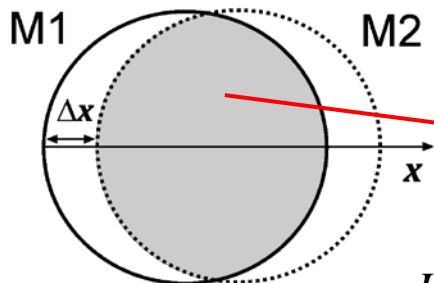


# Shearographie

- Principe



$x$  : direction du cisaillement optique (shear)  
 $\Delta x$  : amplitude du cisaillement



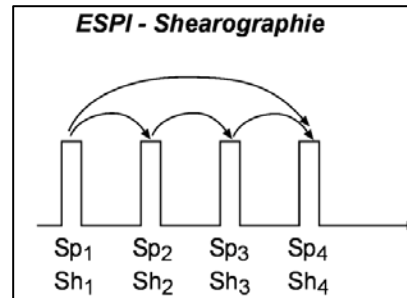
$$Sh(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\phi_{O,M1}(x, y) - \phi_{O,M2}(x, y)) \right]$$

$$I_{moyen}(x, y) = I_{O,M1}(x, y) + I_{O,M2}(x, y)$$

$$\phi_{O,M1}(x, y) - \phi_{O,M2}(x, y) = \frac{\partial \phi_O(x, y)}{\partial x} \Delta x$$

# Shearographie

- Principe 2



$$t=t_1: \quad Sh(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\phi_{O,M1}(x, y) - \phi_{O,M2}(x, y)) \right]$$

$$\text{avec} \quad \phi_{O,M1}(x, y) - \phi_{O,M2}(x, y) = \frac{\partial \phi_O(x, y)}{\partial x} \Delta x \quad (1)$$

$$t=t_2: \quad Sh'(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\phi'_{O,M1}(x, y) - \phi'_{O,M2}(x, y)) \right]$$

$$\text{avec} \quad \phi'_{O,M1}(x, y) - \phi'_{O,M2}(x, y) = \frac{\partial \phi'_O(x, y)}{\partial x} \Delta x \quad (2)$$

$$|Sh(x, y) - Sh'(x, y)| \div \sin(\Delta\phi(x, y)) = \sin((1) - (2)) = \sin\left(\frac{\partial(\phi_O(x, y) - \phi'_O(x, y))}{\partial x} \Delta x\right)$$

Or on sait que

$$\phi_O(x, y) - \phi'_O(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} L_{\perp}(x, y)$$

Donc

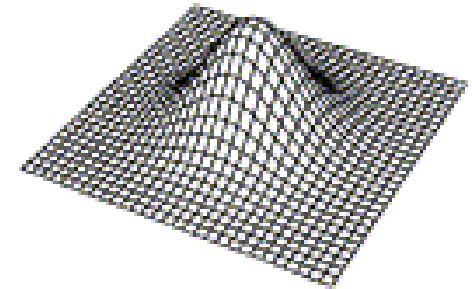
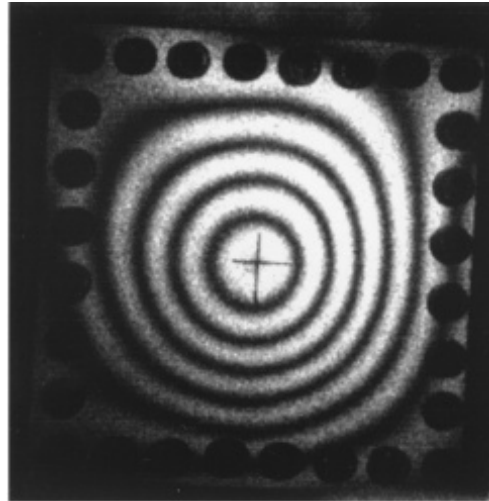
$$\Delta\phi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial L_{\perp}(x, y)}{\partial x} \Delta x$$

# Shearographie

- Shearographie vs. Interférométrie de speckle

## Interférométrie de speckle

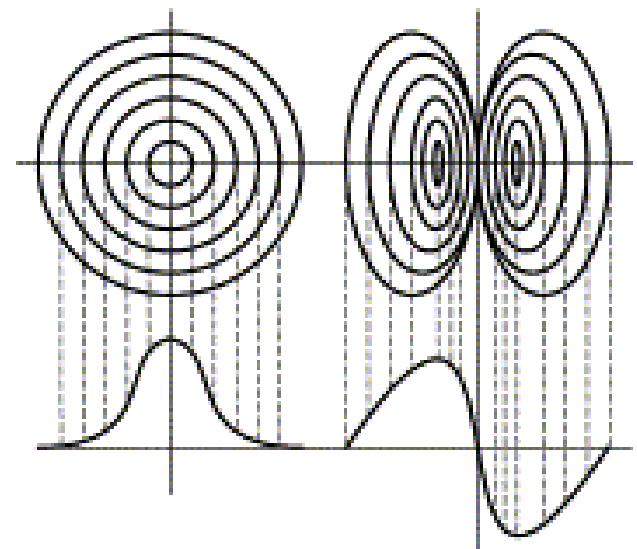
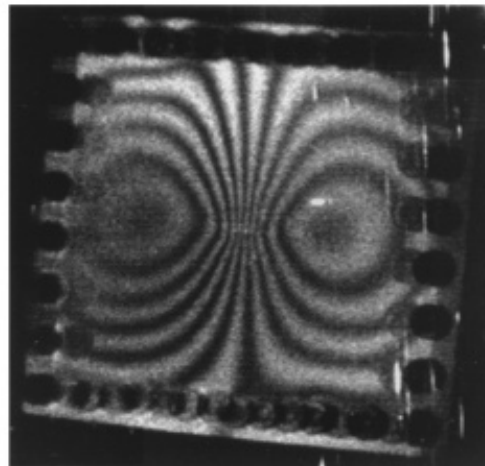
$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} L_{\perp}(x, y)$$



(a) Real deformation of an object surface

## Interférométrie de speckle différentielle (shearographie)

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial L_{\perp}(x, y)}{\partial x} \Delta x$$



(b) Comparison of the line profiles

# Shearographie

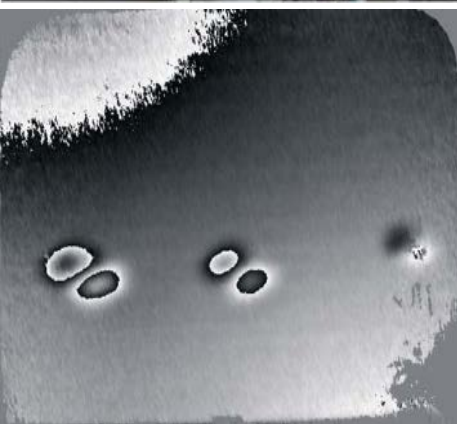
- Avantages et applications

- Avantages :

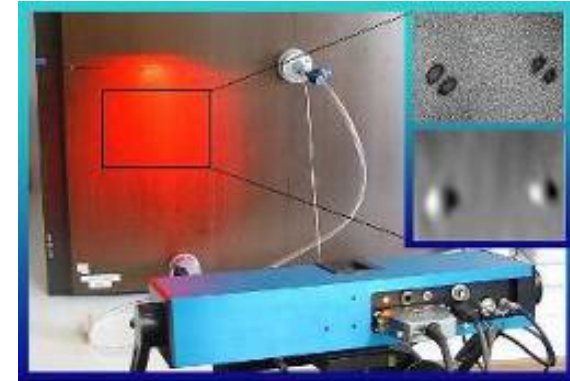
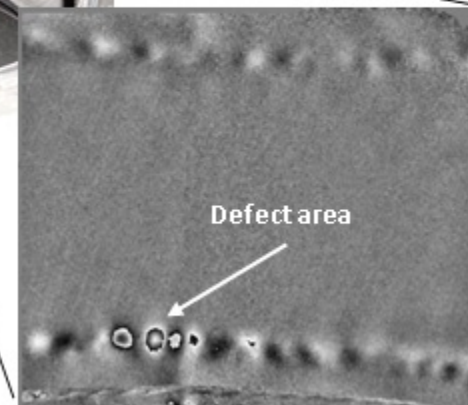
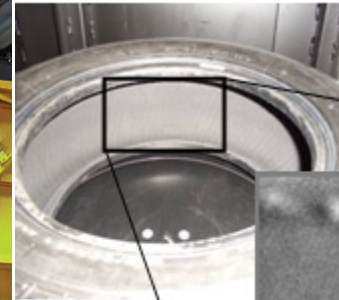
- Technique auto-référencée : pas de faisceau référence extérieur
    - Peu sensible aux perturbations de l'environnement

- Application principale : détection de défauts

## *Excitation thermique*



## *Dépression*



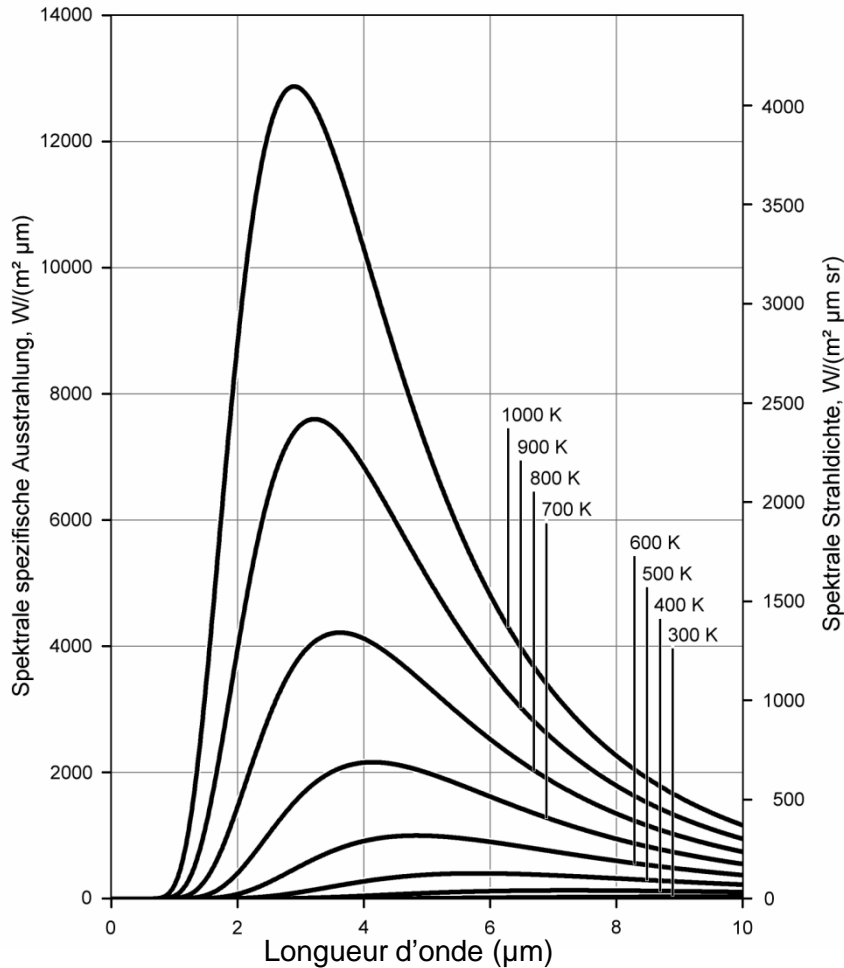
## *Vibration*

# La thermographie infrarouge

# Thermographie

- Thermographie : mesure de la température
  - Loi de Planck d'émission du « corps noir »

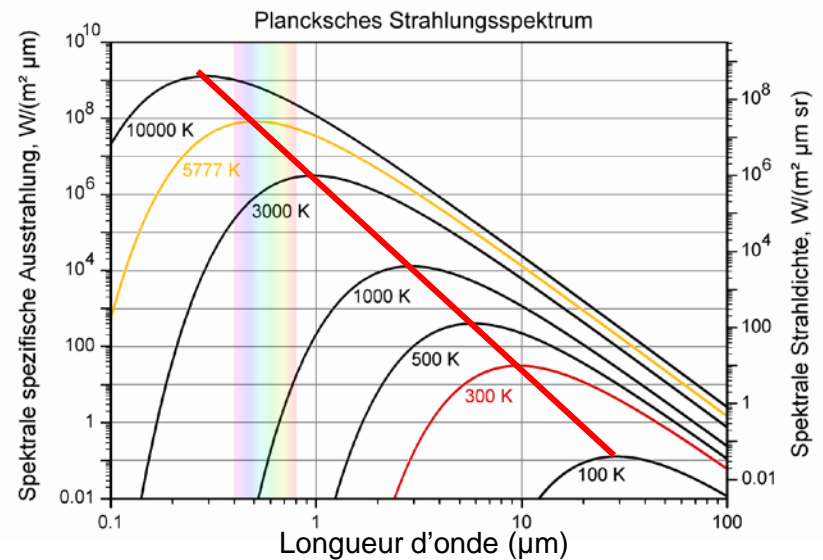
Plancksches Strahlungsspektrum



$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hv/kT) - 1}$$

(Loi de Wien)

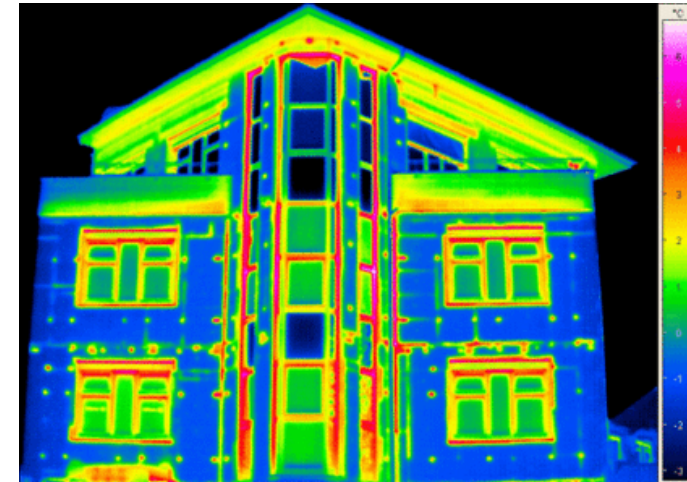
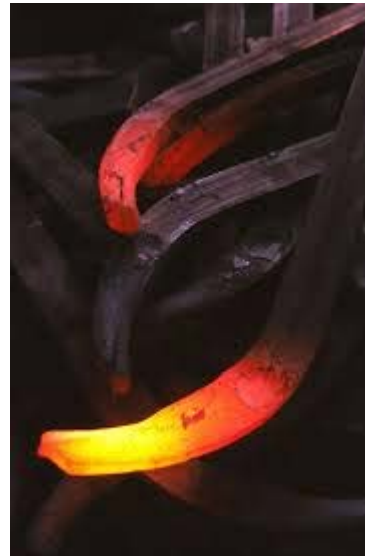
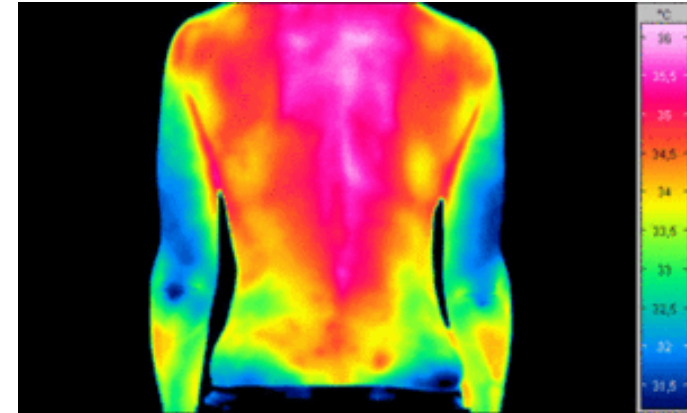
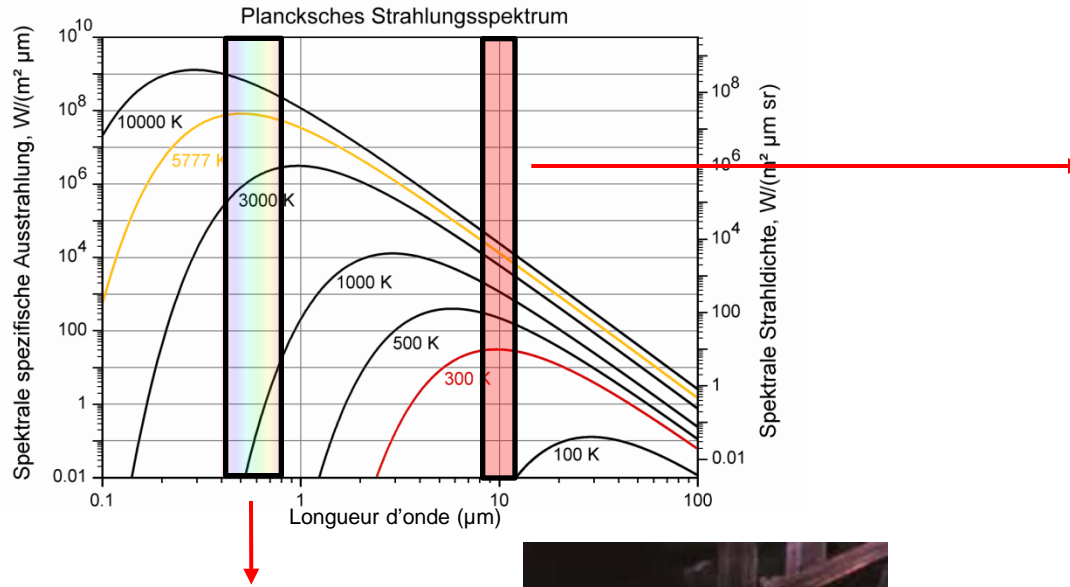
$$\lambda_{\max}(T) T \approx 2.898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$





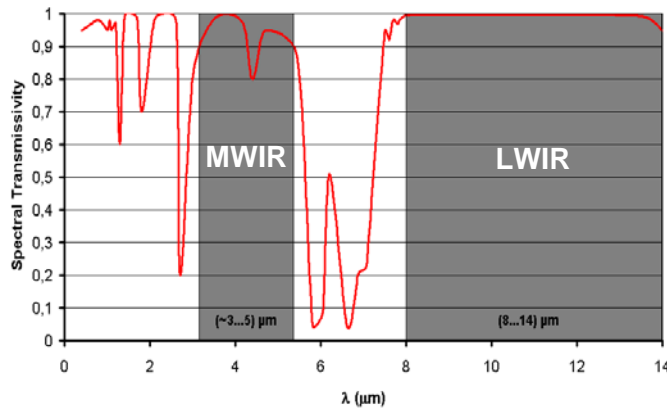
# Thermographie

- Thermographie : « mesure » de la température



# Thermographie

- Thermographie IR ou Imagerie thermique
  - Différentes gammes infrarouges
  - Différentes technologies de capteurs



Type	Detector Material	Spectral range	Maximum pixel numbers	Maximum frame rate	NETD @ 30°C
Uncooled Microbolometer FPA	a-Si VOx	8 ... 14 μm	1024 x 768	30 Hz	85 mK
			640 x 480	60 Hz	50 mK
			384 x 288	60 Hz	40 mK
Cooled IR-Photodiode FPA	HgCdTe (MCT)	8 ... 10 μm	640 x 512 384 x 288	120 Hz 300 Hz	20 mK
Cooled QWIP FPA	AlGaAs/GaAs	8 ... 9 μm (small band)	1024 x 1024	120 Hz	35 mK
			640 x 512	120 Hz	25 mK
			384 x 288	260 Hz	25 mK

[www.flir.com](http://www.flir.com)  
[www.jenoptik.de](http://www.jenoptik.de)  
[www.infratec.de](http://www.infratec.de)  
[www.xenics.com](http://www.xenics.com)  
[www.telops.com](http://www.telops.com)

....

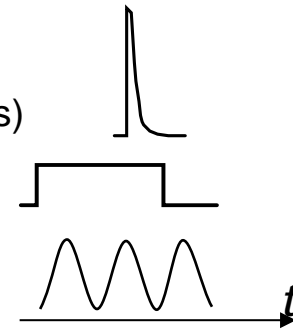
# Thermographie

- Application au Contrôle Non Destructif: **Thermographie « active »**
- Une source extérieure apporte de la chaleur pour révéler les défauts

## *Thermographie optique (Chauffage par lampe)*

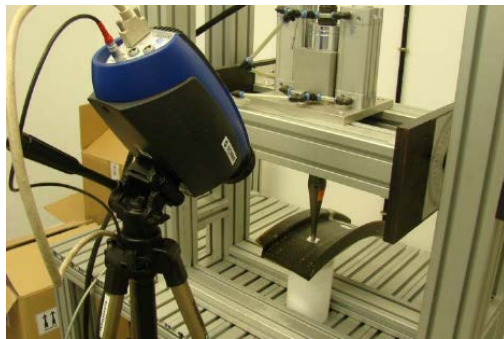


- Chauffage impulsionnel (Flash lamps)
- Chauffage par pas
- Chauffage modulé

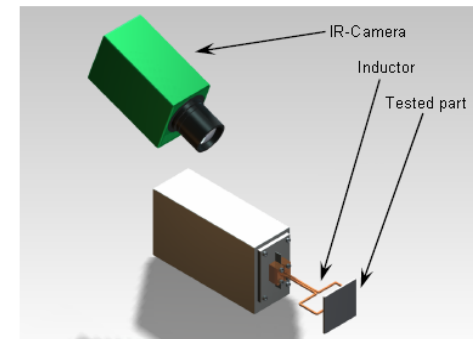


- Une sollicitation externe permet aux défauts de générer de la chaleur

## *Vibrothermographie*



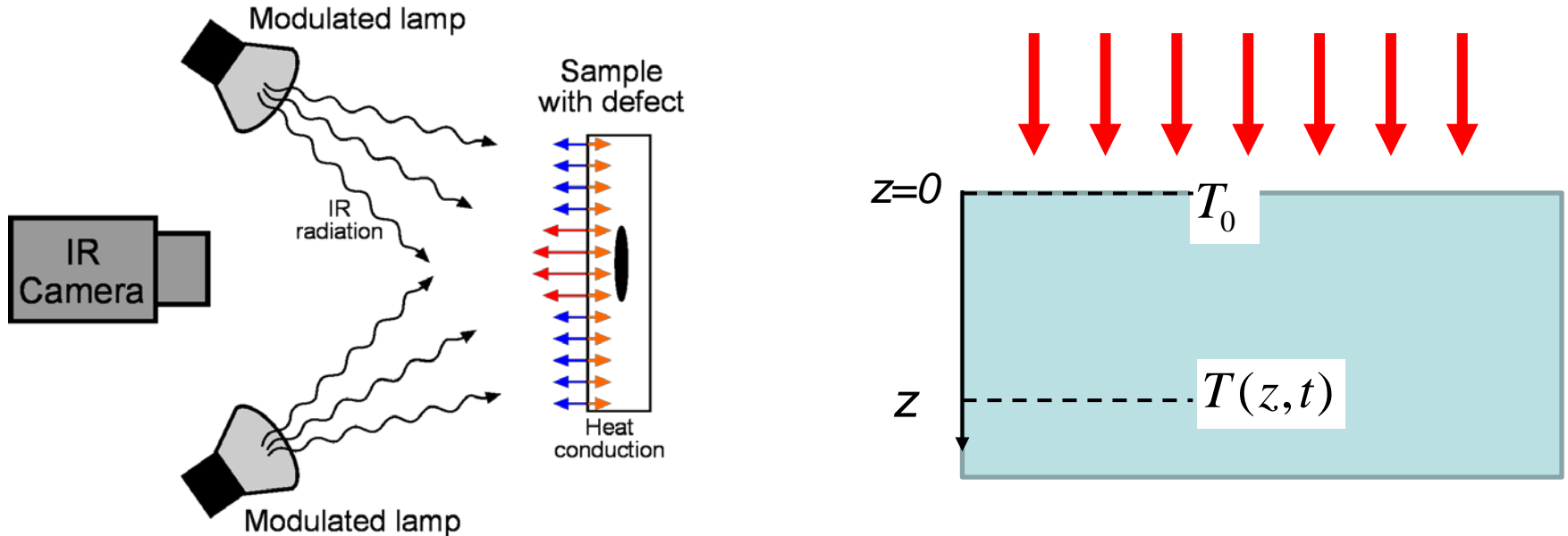
## *Thermographie par induction*



# Thermographie

- Thermographie optique Lock-In (OLT)

Busse G., Wu D. and Karpen W., *J. Appl. Phys.* **71**, 3962 (1992)



$$T(z,t) = T_0 e^{-z/\mu} \cos\left(\frac{z}{\mu} - \omega t\right)$$

*phase de l'onde thermique*

*Profondeur de pénétration dépend de la fréquence*

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$

- $z$  : profondeur
- $\mu$  : profondeur de pénétration
- $\omega=1/\tau$  : fréquence angulaire de modulation de la lampe

$\alpha$  : diffusivité thermique du matériau

# Thermographie

- Thermographie optique Lock-In (OLT) : Interpretation

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$$

**Carbon Fiber  
Reinforced Polymer**

**Glass Fiber  
Reinforced Polymer**

		$f = 1 \text{ Hz}$	$f = 0.01 \text{ Hz}$
<b>Materiau</b>	$\alpha(10^{-7} \text{ m}^2/\text{s})$	$\mu(\text{mm})$	$\mu(\text{mm})$
Air	200	2.52	25.2
CFRP	1.7	0.23	2.3
CFRP ⊥	1.3	0.2	2
GFRP	37	1.09	10.9
GFRP ⊥	4.2	0.37	3.7
Aluminium	620	4.44	44.4

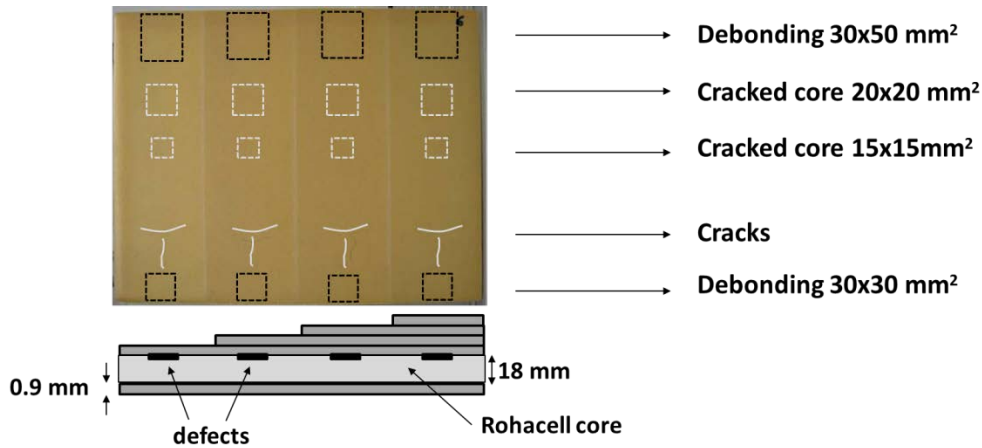
Haute fréquence  $f$  ↔ Faible profondeur pénétration  $\mu$  ↔ Défaut peu profond  
 Basse fréquence  $f$  ↔ Grande profondeur pénétration  $\mu$  ↔ Défaut profond



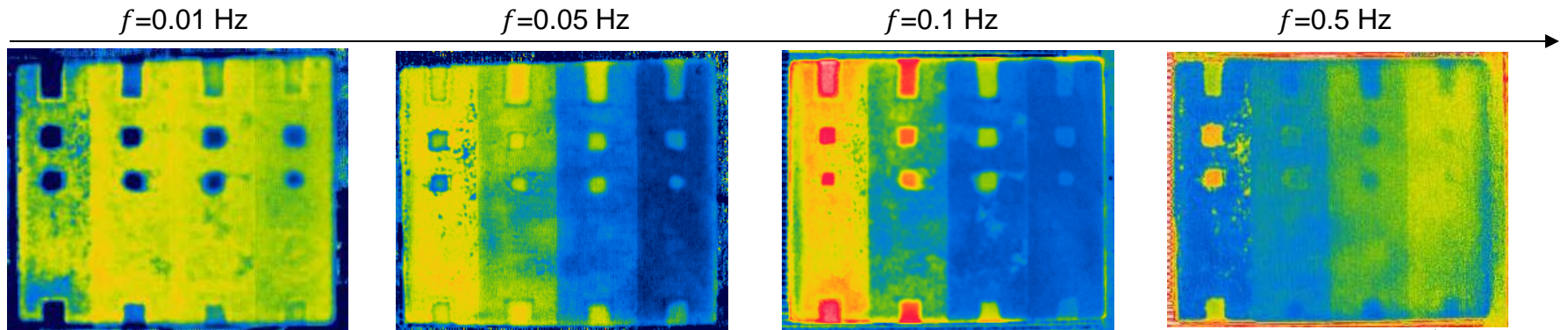


# Thermographie

- Thermographie optique Lock-In (OLT) : Résultats



*Thermogrammes de phase*



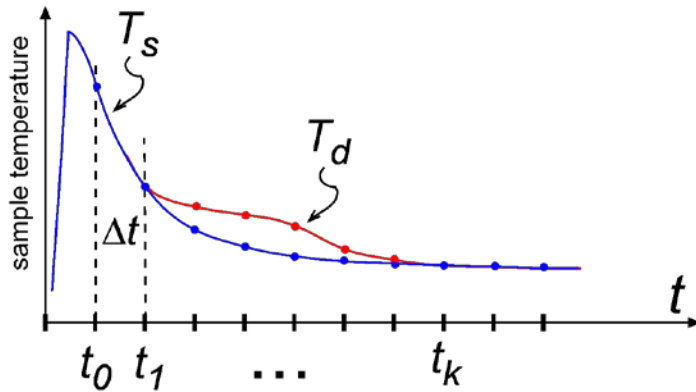
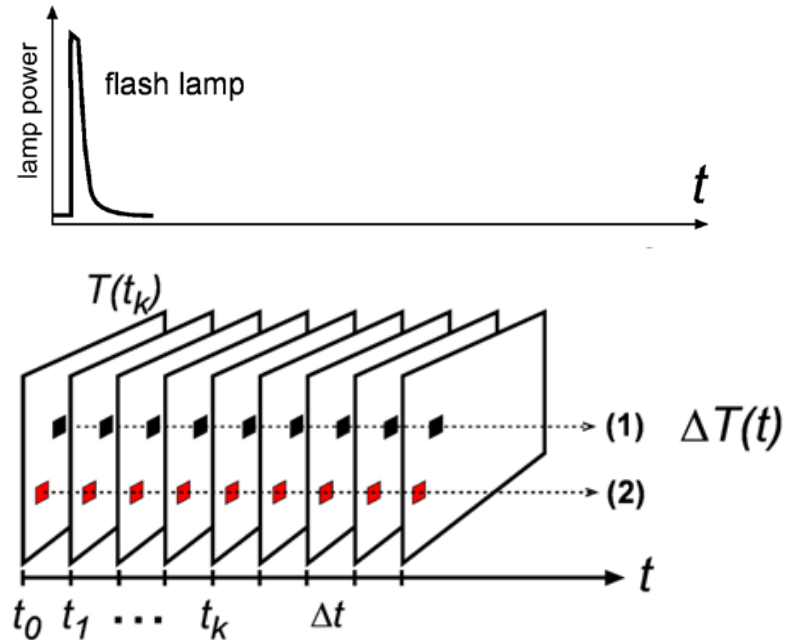
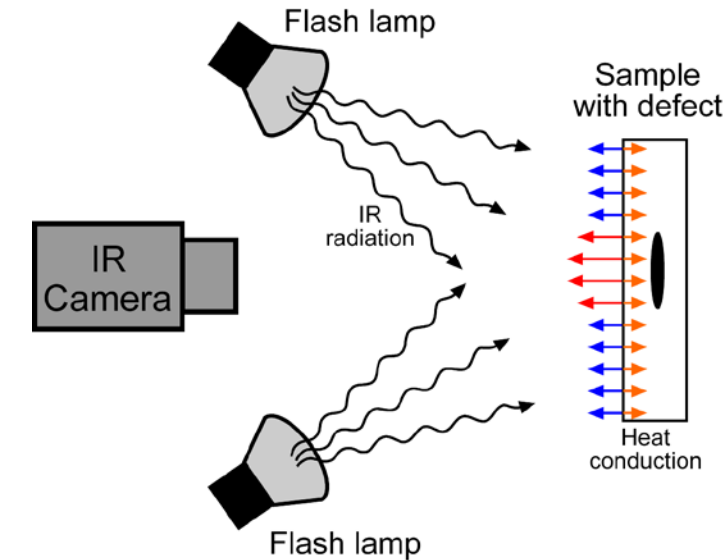
***Contraste important  
pour défauts profonds***

***Contraste important  
pour défauts peu  
profonds***

***Faible contraste pour  
défauts profonds***

# Thermographie

- Optical Pulse Thermography (OPT) : Principle



$$t_d \approx \frac{z_d^2}{\alpha}$$

$z_d$ : profondeur défaut  
 $\alpha$ : diffusivité thermique

# Thermographie

- Pulse Phase Thermography (PPT)

Maldague X. and Marinetti S.,  
J. Appl. Phys. **79**, 2694 (1996)

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) \exp(-j2\pi kn/N) = Re_n + j Im_n$$

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2}$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{Im_n}{Re_n} \right)$$

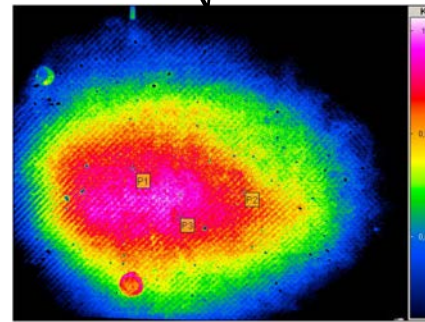
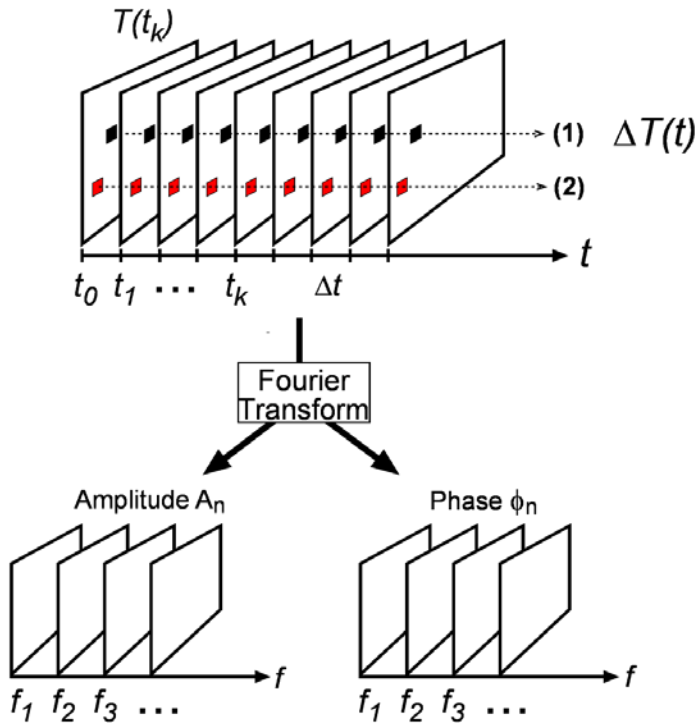


Figure 19: Amplitude image of the PPT analysis

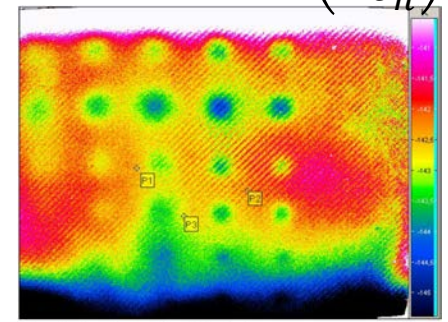
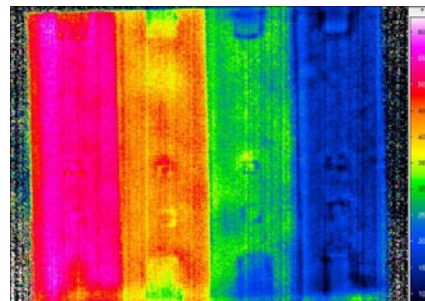


Figure 18: Phase image of the PPT analysis

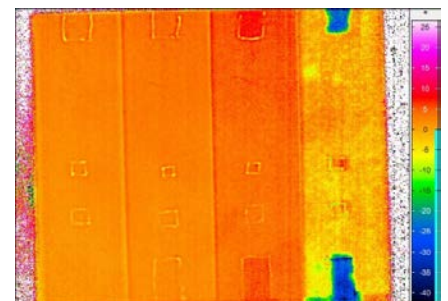
© Infratec GmbH

$$f_n = \frac{n}{N \Delta t}$$

$f$  : basse ( $n$  petit)  
 $t$  : élevé  
 $z$  : profond



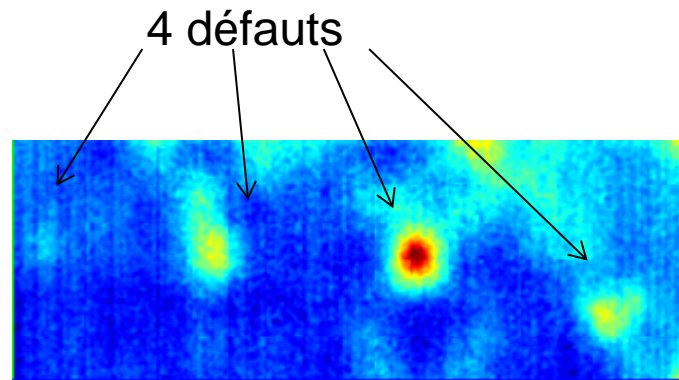
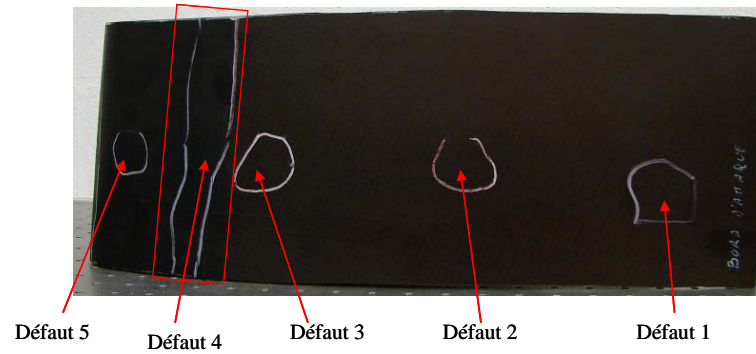
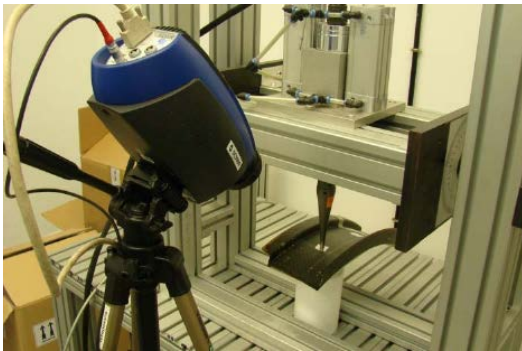
$f=0.0125$  Hz



$f=0.25$  Hz

# Thermographie

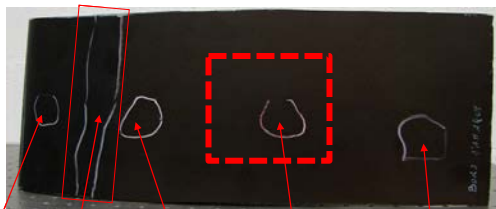
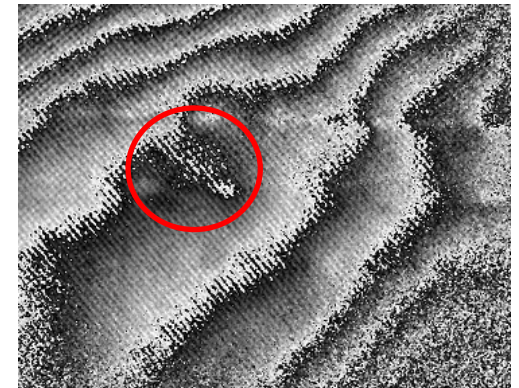
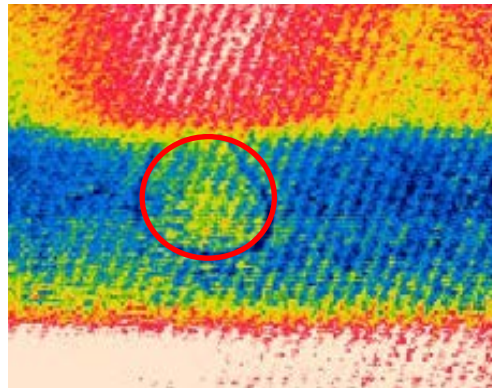
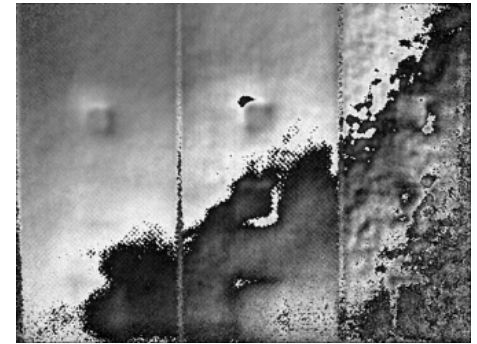
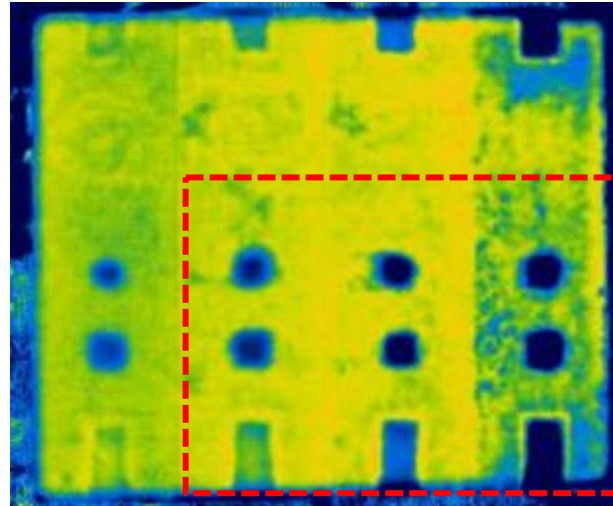
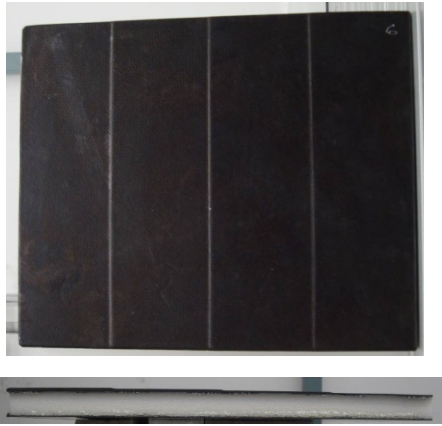
- Vibrothermographie





# Thermographie vs. Holo/Shearographie

- Etude comparée sur échantillons de référence avec défauts



Défaut 5    Défaut 4    Défaut 3    Défaut 2    Défaut 1

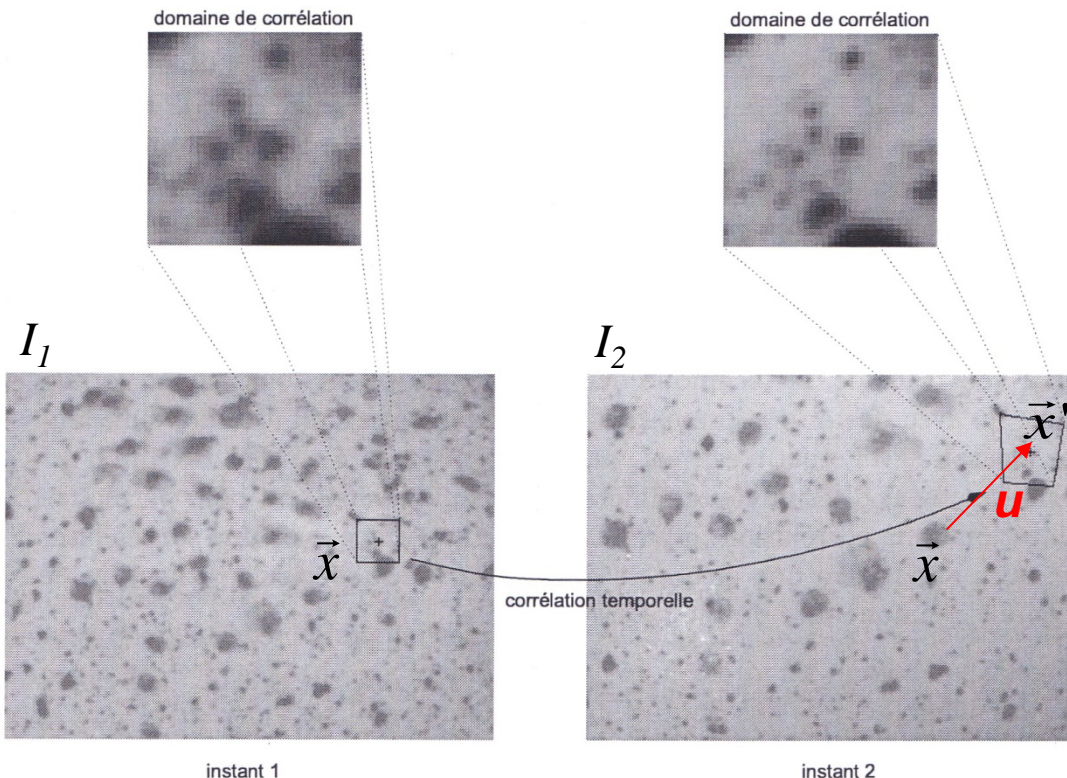
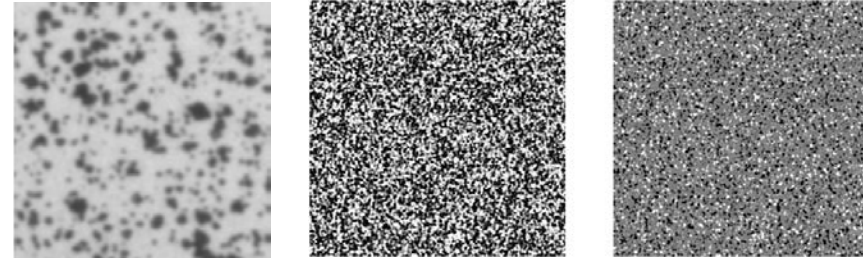
# La corrélation numérique d'images



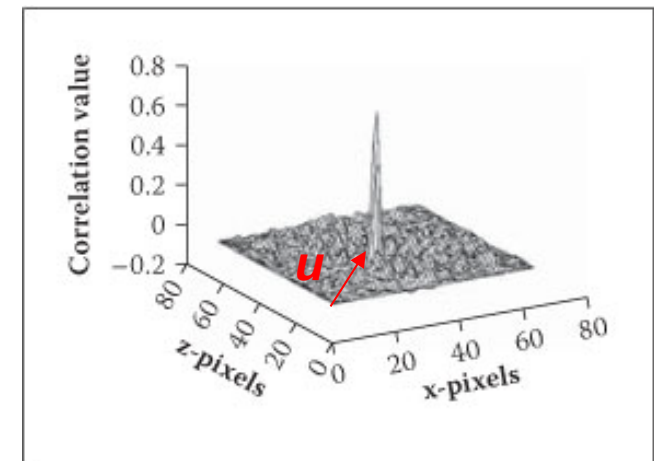
# Corrélation numérique d'images

- Principe de corrélation

- Suivi du mouvement de taches au cours du temps
- Taches irrégulières (mouchetis)
- Généralement peintes sur objet

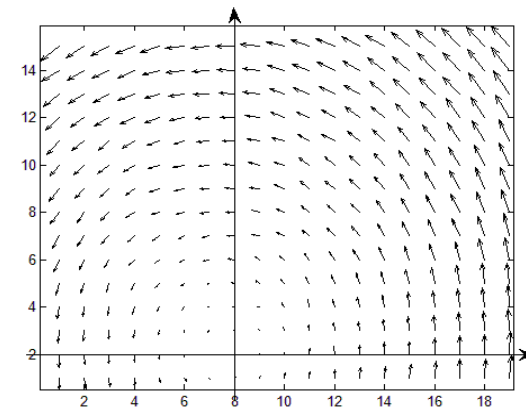
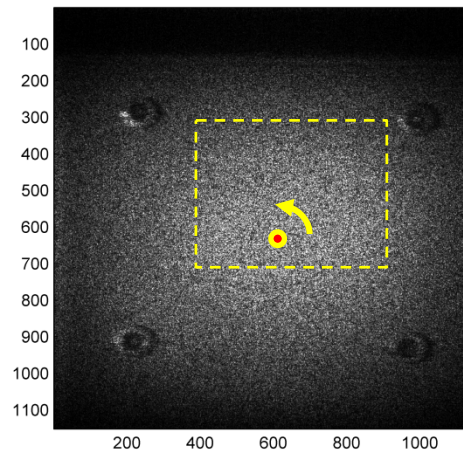
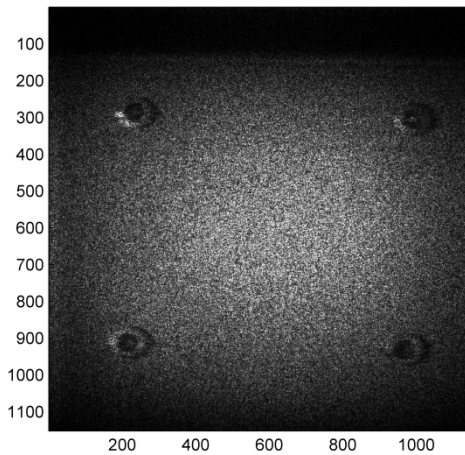


## Corrélation croisée de sous-images

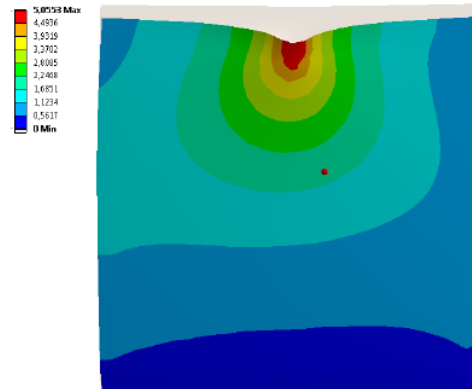
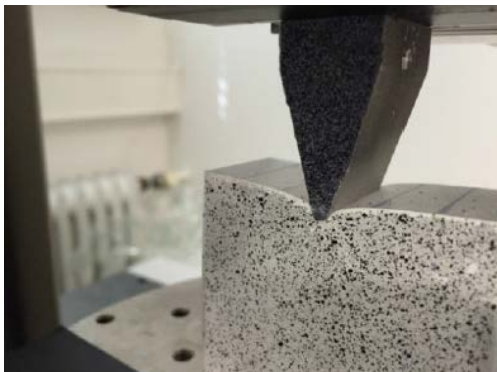


# Corrélation numérique d'images

- Applications – 1 caméra : Mesure déplacements dans le plan
  - Corrélation de speckle (Digital Speckle Photography – DSP)



- Corrélation classique (sur base de mouchetis)



Speckle :

de qqs dizaines de  $\mu\text{m}$   
à 100-150  $\mu\text{m}$

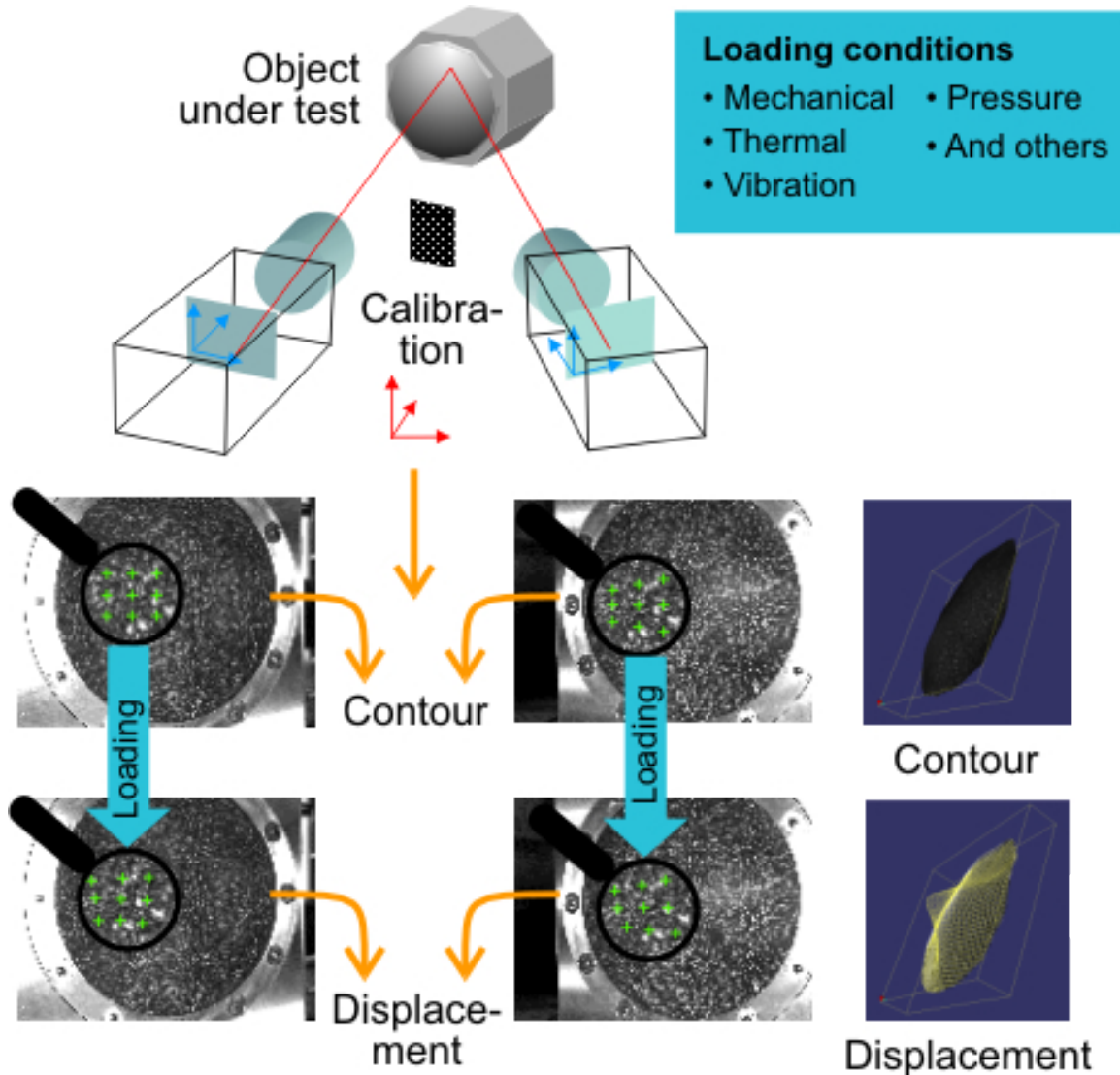
Classique :

Gamme de mesure de déplacements  
dépend du volume observé  
qqs dizaines de  $\mu\text{m}$  à qqs cm

*(parfois jusqu'à rupture  
Test Destructifs !)*

# Corrélation numérique d'images

- Applications – 2 caméras : Mesure de forme (triangulation)





# Corrélation numérique d'images

- Applications – 2 caméras : Mesure de forme (triangulation)



[www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com)  
[www.correlatedsolutions.com](http://www.correlatedsolutions.com)

**Handheld**



**High speed (vibrations)**



**Micro**



# Résumé

- Techniques vs. Applications

	Holographie Speckle	Shearographie	Thermographie	Corrélation image 1 caméra	Corrélation image 2 caméras
Mesure déplacements	<b>X</b> (dépend de $\lambda$ )	<b>X</b> (intégration)		<b>X</b>	<b>X</b>
Modes vibration	<b>X</b>	<b>X</b>			<b>X</b>
Détection de défauts	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
Température			<b>X</b>		
Forme (coordonnées 3D)	<b>X</b> (variation de $\lambda$ )		<b>X</b>		<b>X</b>

- Techniques complémentaires : intérêt de la combinaison
  - Utilisées en parallèle
  - Techniques hybrides

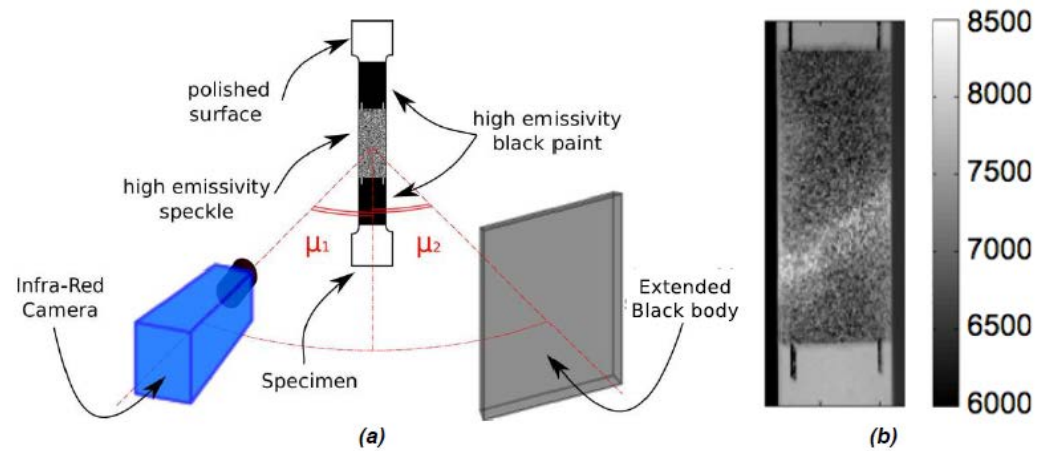
# Combinaison

- Exemple 1:
  - Corrélation numérique
  - Thermographie IR

## *Systèmes parallèles*



## *Hybride : Corrélation numérique IR*

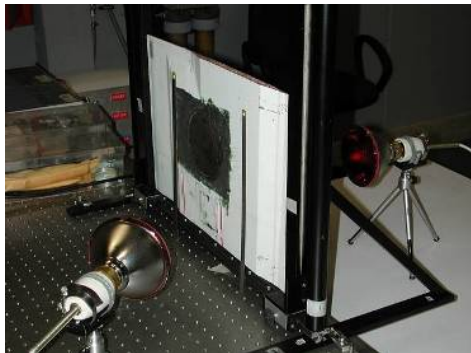


LMT Cachan, 2012

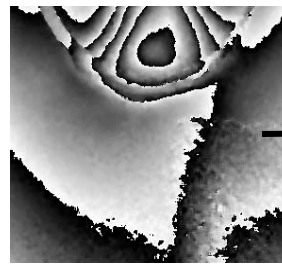


# Combinaison

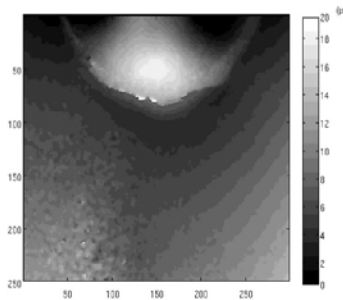
- Exemple 2: Interférométrie de speckle infrarouge
  - Interférométrie speckle
  - Thermographie IR



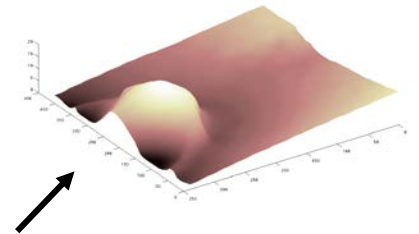
Déphasage



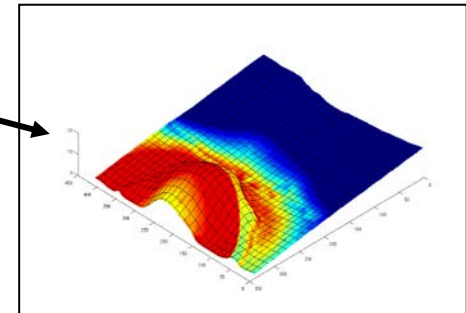
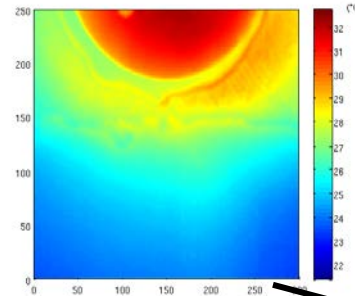
Après déroulage



Plot 3D de déformation



Variation de température



*Merci pour votre attention !*

[mgeorges@ulg.ac.be](mailto:mgeorges@ulg.ac.be)

[www.csl.ulg.ac.be](http://www.csl.ulg.ac.be)