



Les techniques optiques et laser pour la mesure des déplacements et le contrôle non destructif

Dr. Marc GEORGES

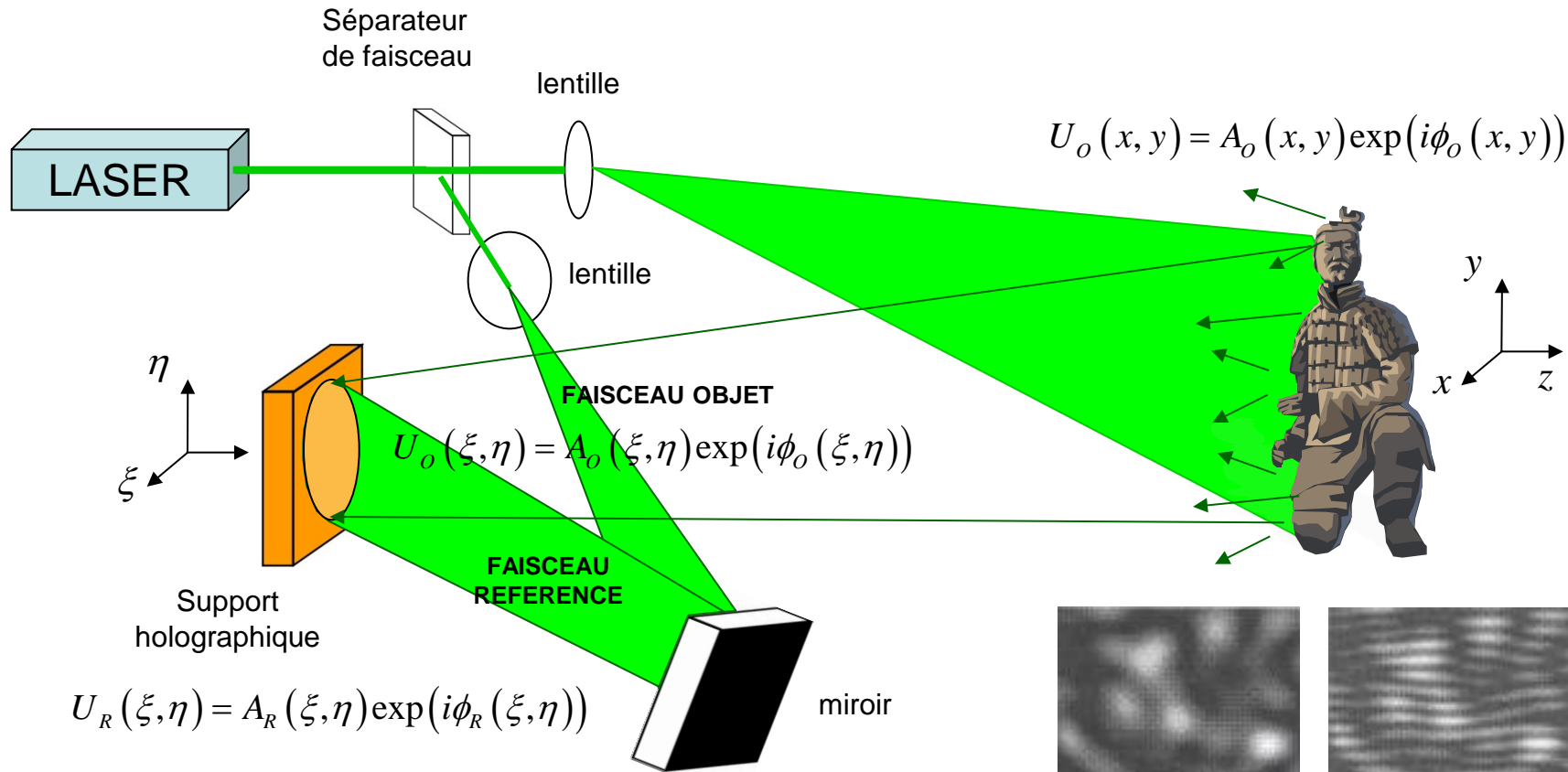
Centre Spatial de Liège – Université de Liège

Université de Liège, 24/11/16

L'holographie pour la mesure des déplacements

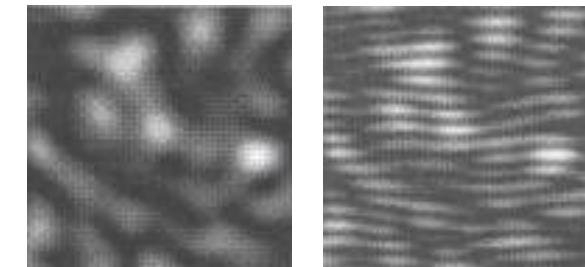
Holographie

- Holographie – 1 : Principe d'écriture



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

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



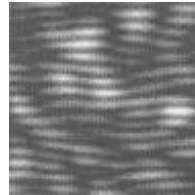
$$I(\xi, \eta) = I_R + I_o + 2\sqrt{I_R I_o} \cos(\phi_R - \phi_o) \quad 3$$

Holographie

- Holographie – 2 : Types d'hogrammes

Eclairement

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



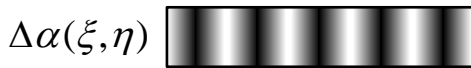
**Modification des propriétés
du support holographique**



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

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

$$\begin{aligned} \tau(\xi, \eta) &= \exp(i\vartheta(\xi, \eta)) \\ \vartheta(\xi, \eta) &= a' + b't_{\text{exp}} I(\xi, \eta) \end{aligned}$$

**Variations d'indice
de réfraction**



Supports d'enregistrement

Plaques argentiques (AgBr)

© Yves Gentet

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

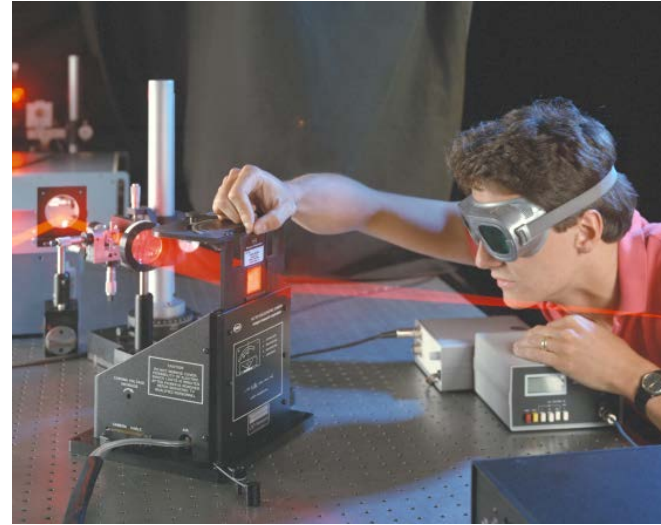
$$\Delta n(\xi, \eta)$$



Plaques ou rouleaux photo-thermoplastiques

© Newport

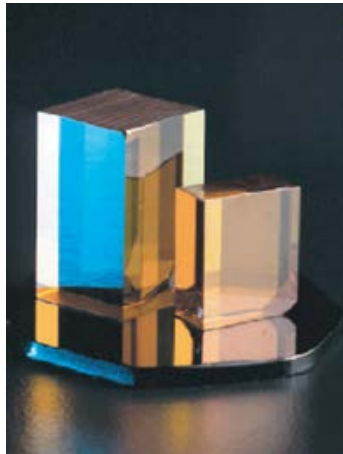
$$\Delta h(\xi, \eta)$$



Cristaux photoréfractifs inorganiques

© ICMCB, Bordeaux

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



Polymères photoréfractifs

© Opt. Science Center, Tucson AZ

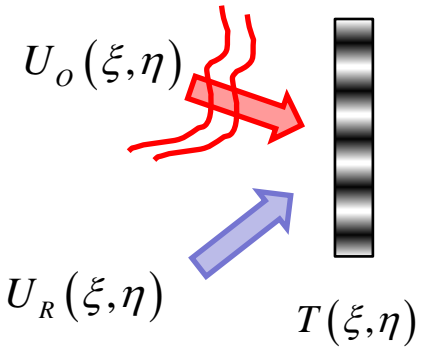
$$\Delta n(\xi, \eta)$$



Holographie

- Lecture = Diffraction par réseau

Hologrammes en amplitude

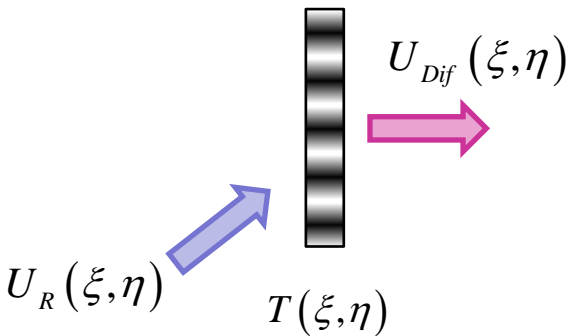


$$U_o(\xi, \eta) = A_o(\xi, \eta) \exp(i\phi_o(\xi, \eta))$$

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

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

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



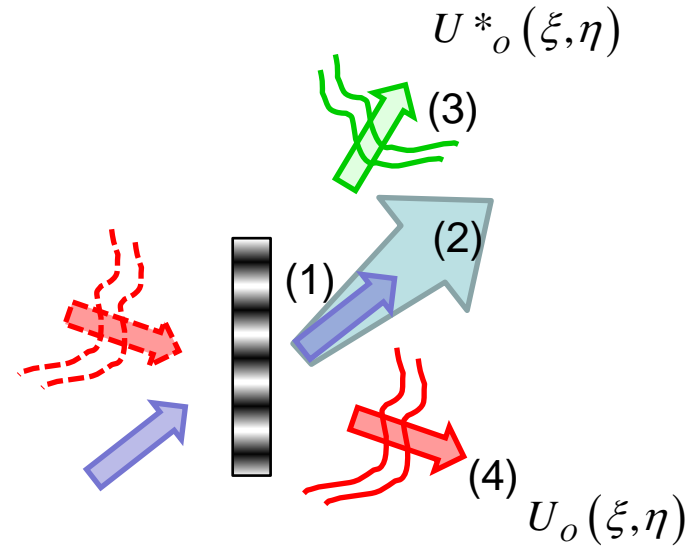
$$U_{Dif}(\xi, \eta) = T(\xi, \eta) \cdot U_R(\xi, \eta)$$

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

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

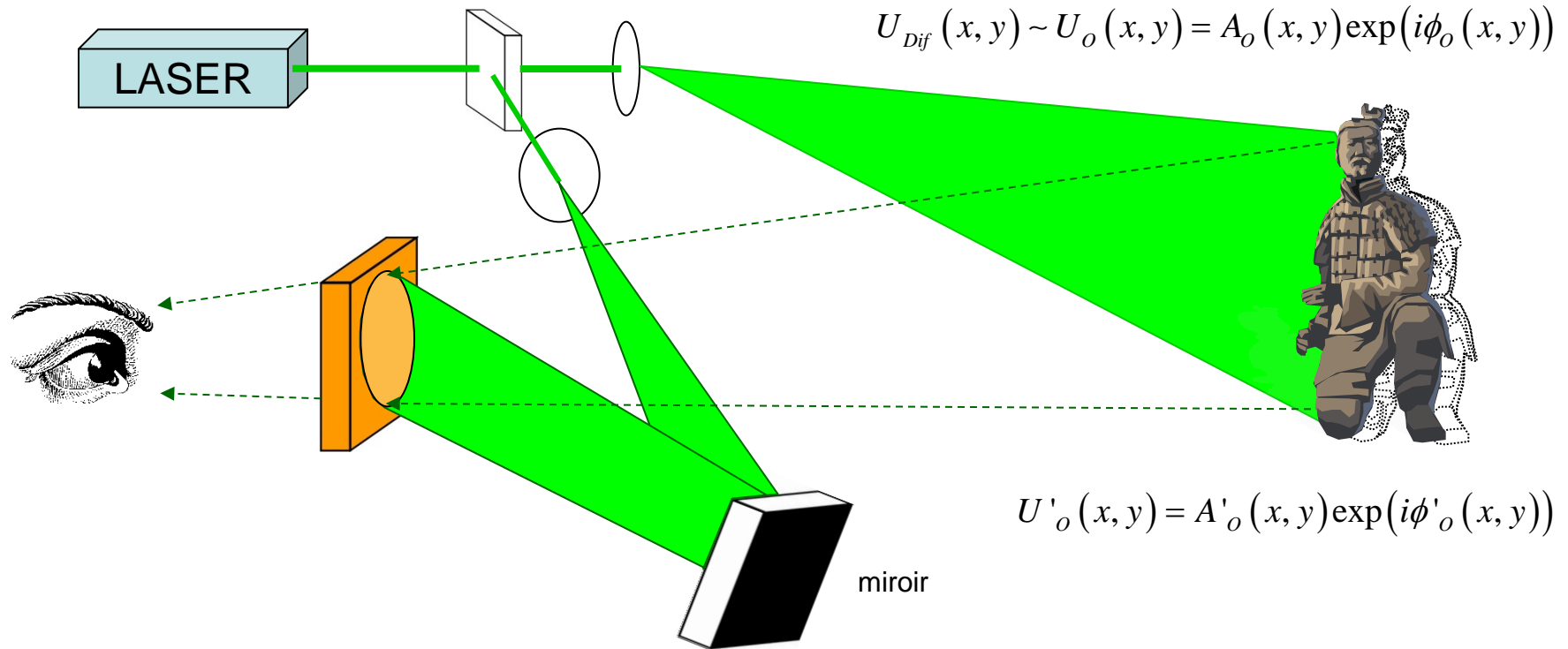
$$+ U_R^2 \cdot U_o^* \quad (3)$$

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



Holographie

- Interférométrie holographique



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

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

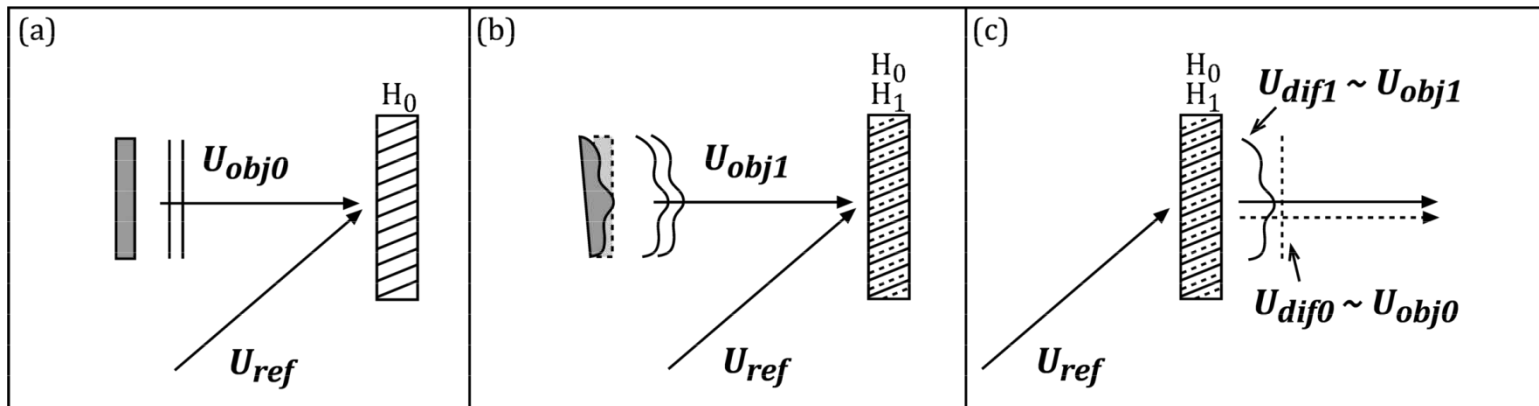
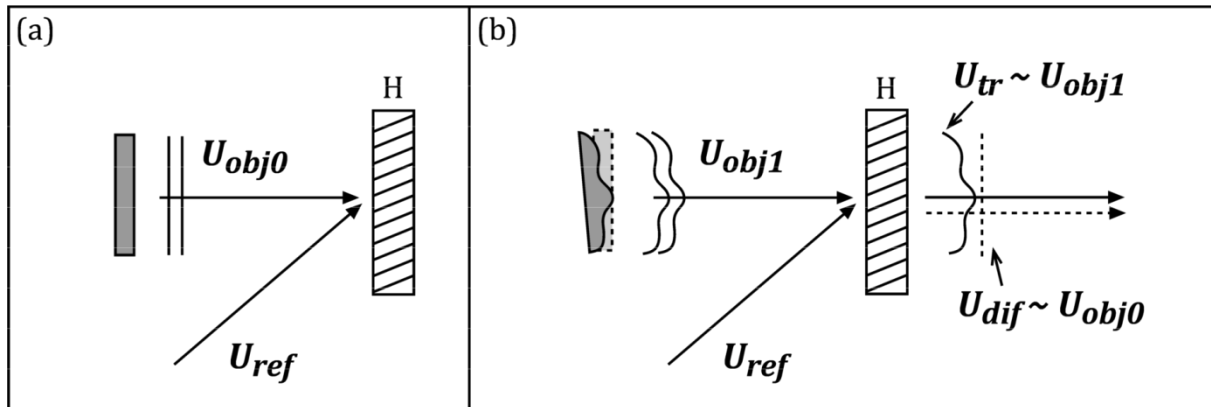
$$I(x, y) = (U_o(x, y) + U'_o(x, y)) \cdot (U_o^*(x, y) + U'^*_o(x, y))$$

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

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

Interférométrie holographique

- Temps réel vs. Double exposition



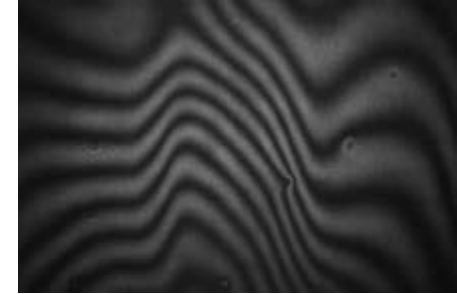
$$I(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y)) \right]$$

Interférométrie holographique

- Extraction de la différence de phase

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

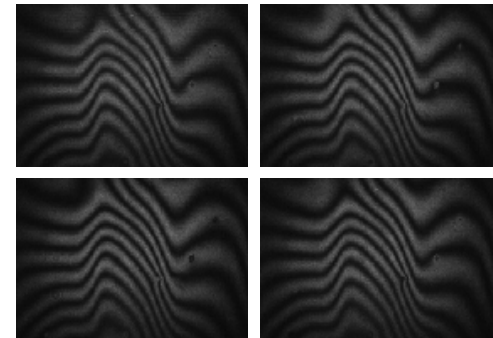
Différence de phase



Technique du décalage de phase

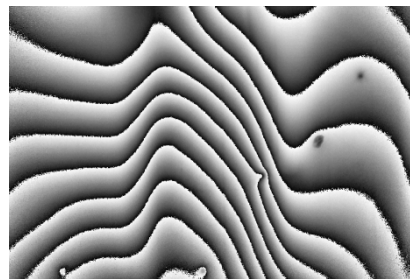
$$I_k(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y) + (k-1) \times 90^\circ) \right]$$

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



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

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



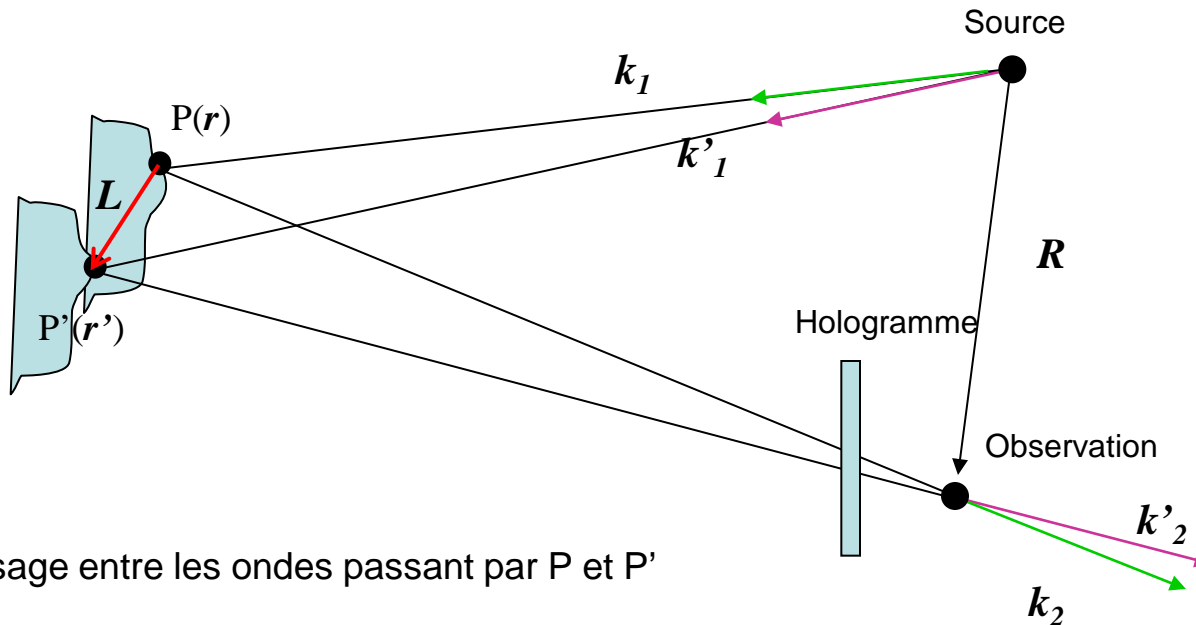
Après déroulage de phase
(phase unwrapping)



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'

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

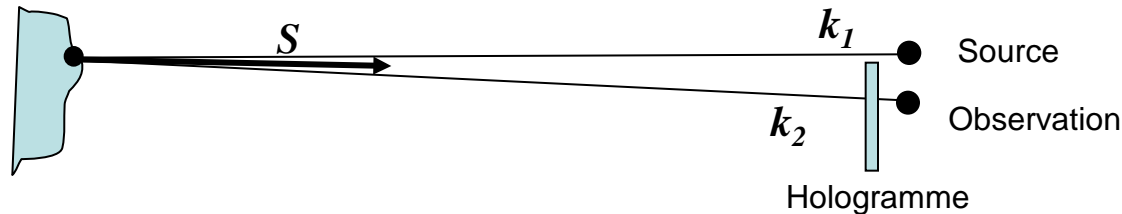
L'interférométrie holographique en lumière diffuse permet la mesure du déphasage donné par la projection du déplacement \mathbf{L} sur le vecteur sensibilité \mathbf{S} défini par

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

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

Interférométrie holographique

- Mesures hors-plan



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

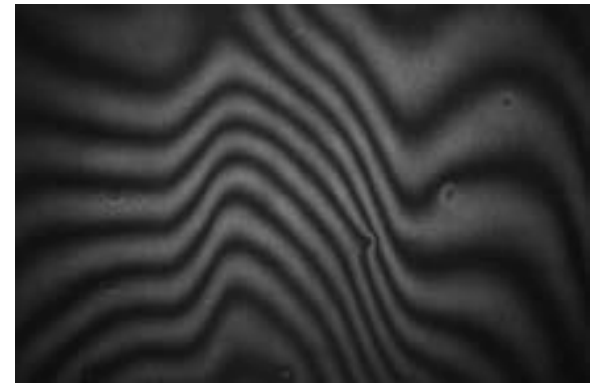


$$\Delta\phi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} L_{\perp}(x, y)$$

$$I(x, y) = 2I_o(x, y) \left[1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y)) \right]$$

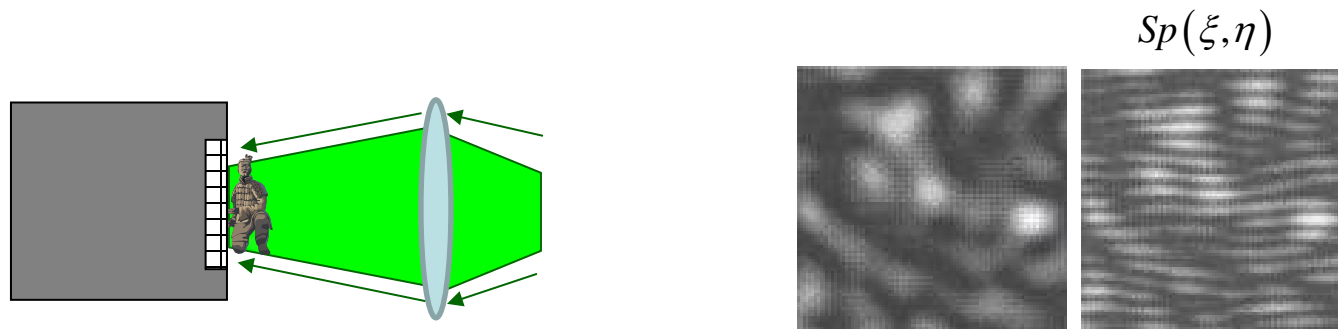
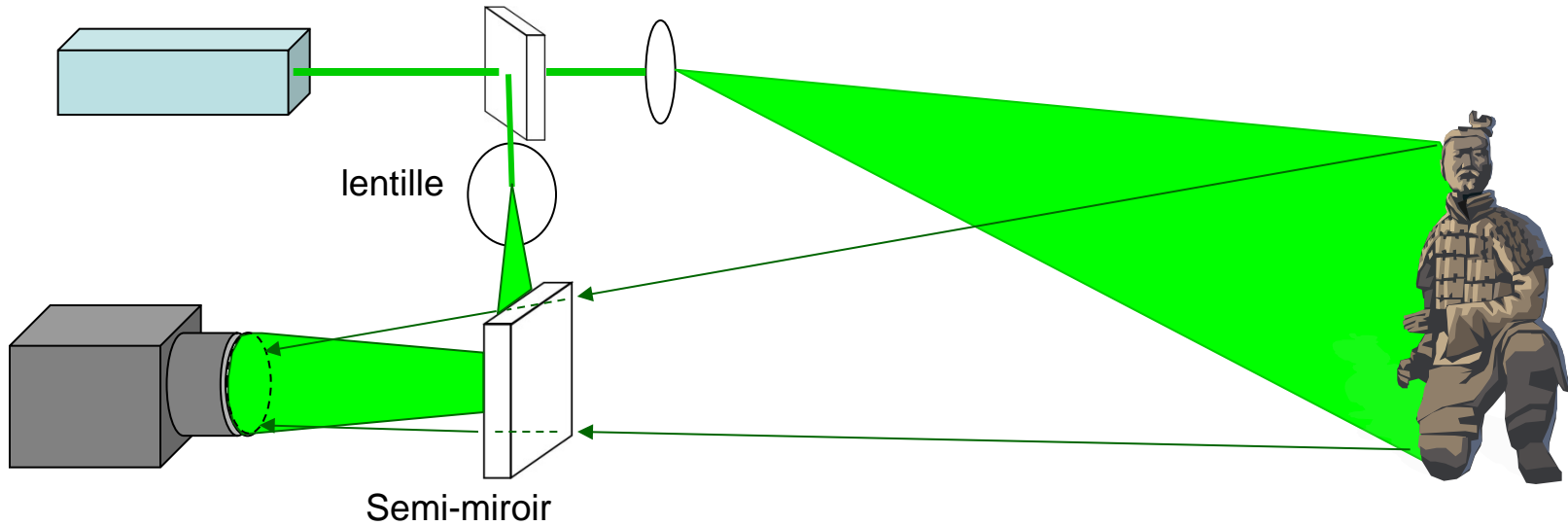
$$I(x, y) = \text{maximum si } \Delta\phi = N2\pi$$

$$\text{Distance entre 2 franges} \quad L_{N+1} - L_N = \frac{\lambda}{2}$$



Interférométrie de speckle

- Principe - 1



Interférométrie de speckle

- Principe - 2

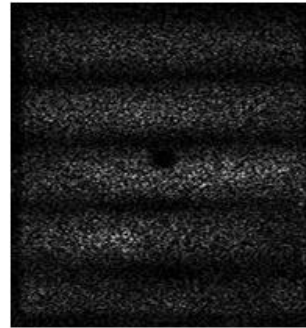
$$t=t_1: Sp(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[1 + m(x, y) \cos(\phi(x, y)) \right]$$

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

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

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

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



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

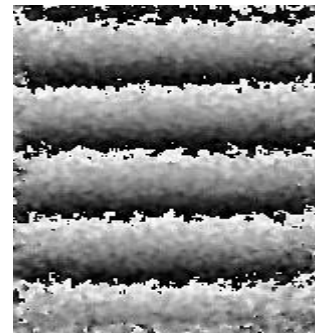
$$\phi'(x, y) = \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)$$

Décalage de phase

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

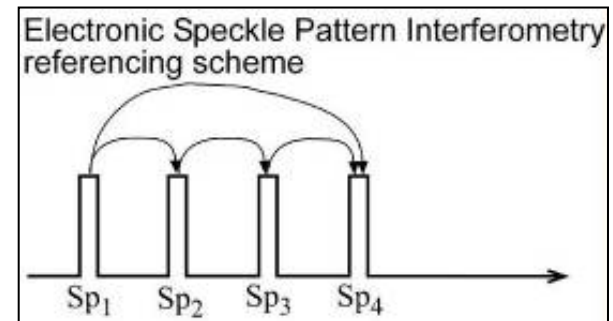
$$t=t_2: \phi'(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{Sp'_4(x, y) - Sp'_2(x, y)}{Sp'_1(x, y) - Sp'_3(x, y)} \right]$$

$\Delta\phi(x, y) \bmod 2\pi$



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 infrarouge

- Motivation

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

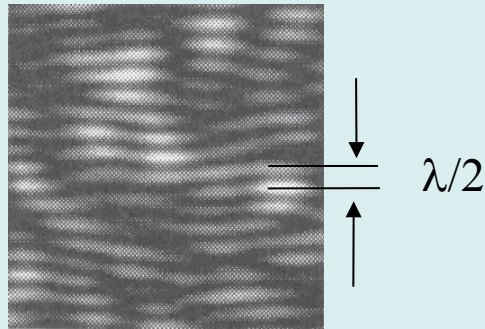
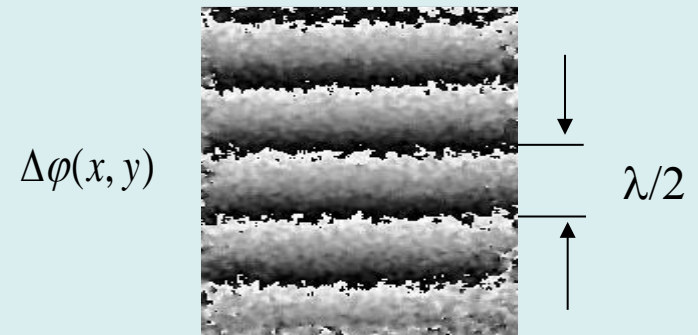


Figure d'intensité doit rester stable durant l'enregistrement (dépend du temps de réponse)

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

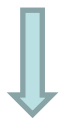
Lasers visibles: stabilité meilleure que **50 nm**

Interférogramme – Carte de phase



Gamme de mesure \leftrightarrow Nombre de franges

Lasers visibles: gamme = **50 nm – 10 μ m**



Stabilité relâchée à **1 μ m**

Laser CO₂

$\lambda=10 \mu$ m

(gamme LWIR)

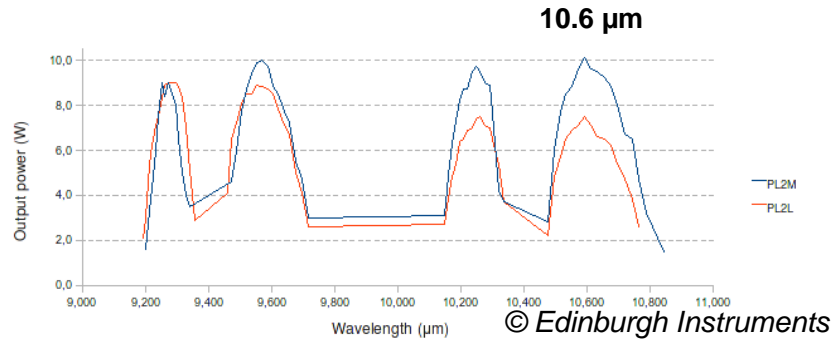


Gamme = **1 μ m – 200 μ m**

Interférométrie de speckle infrarouge

- Matériel spécifique

Lasers



Caméras



Jenoptik LOS

Caméra IR à microbolomètres

Spectral range
8-14 μm



Infratec

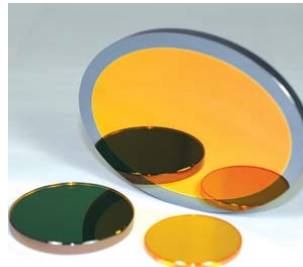
Caméra refroidie (MCT)

Composants optiques

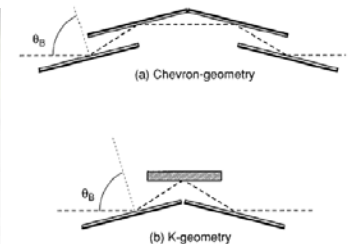
Lentilles
ZnSe



Séparateurs de faisceaux

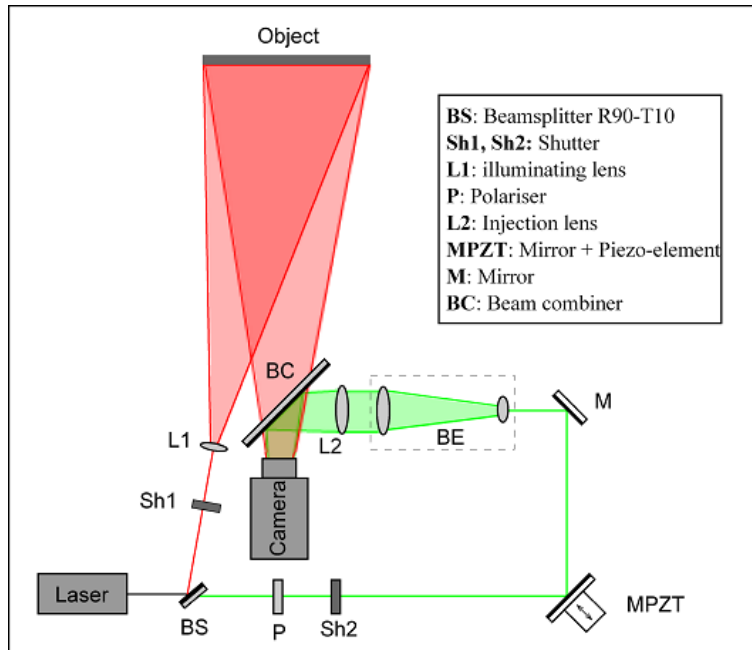


Polariseurs

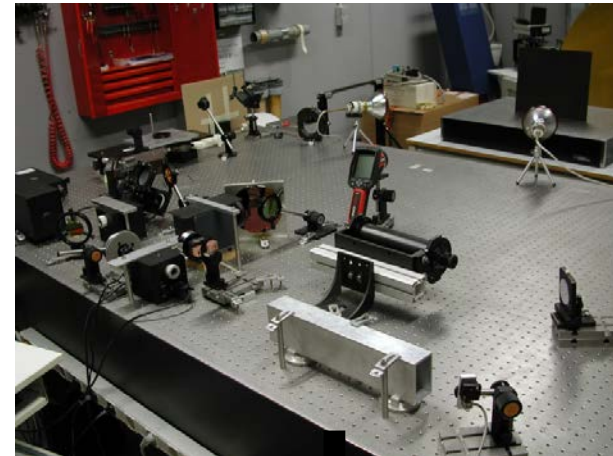


Interférométrie de speckle infrarouge

- Développements (projet Européen FANTOM)

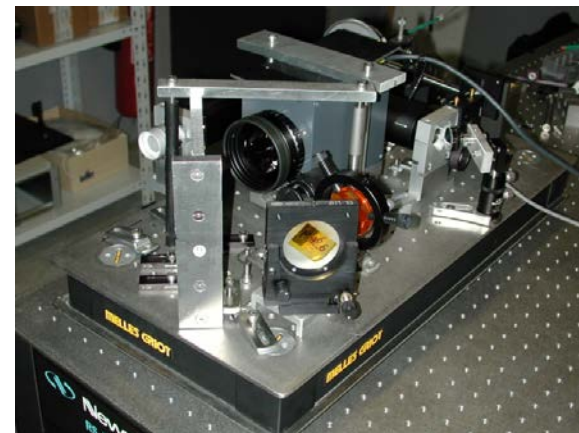
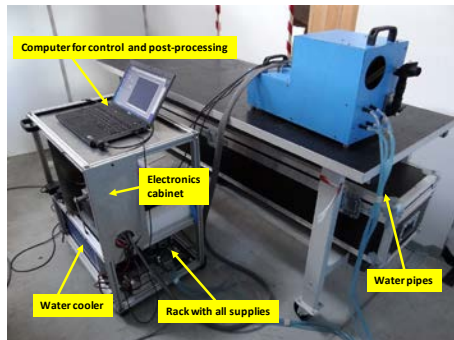


Montage laboratoire



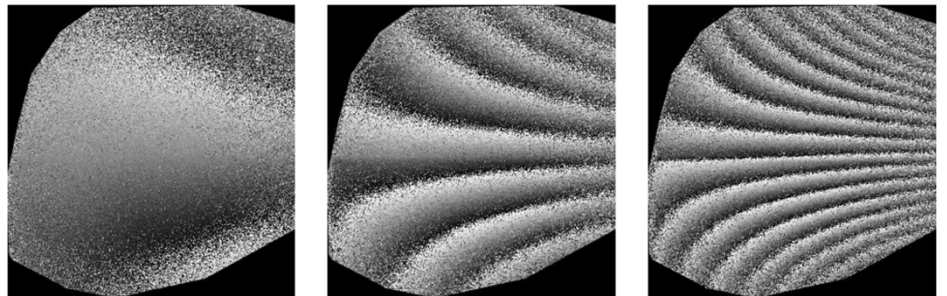
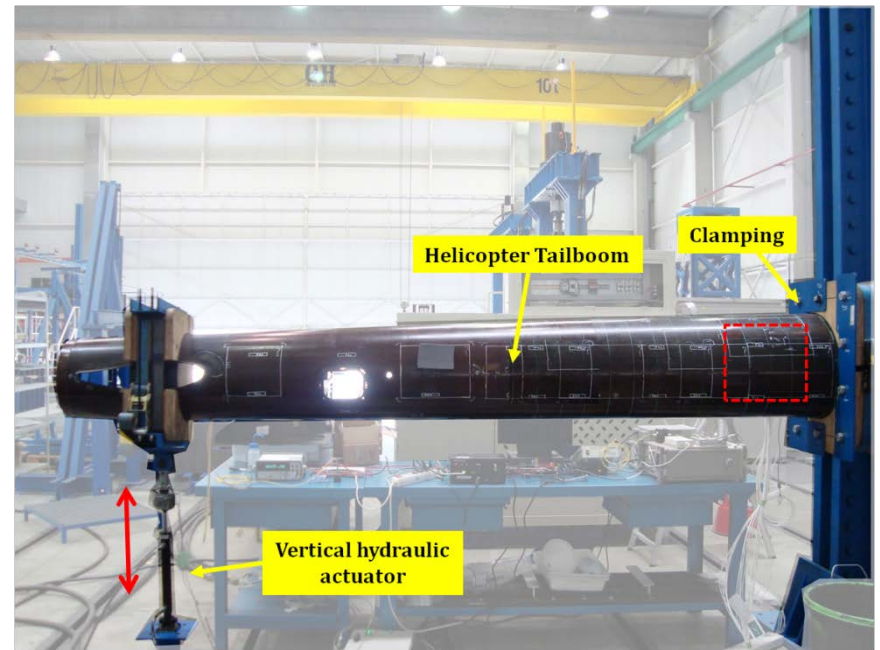
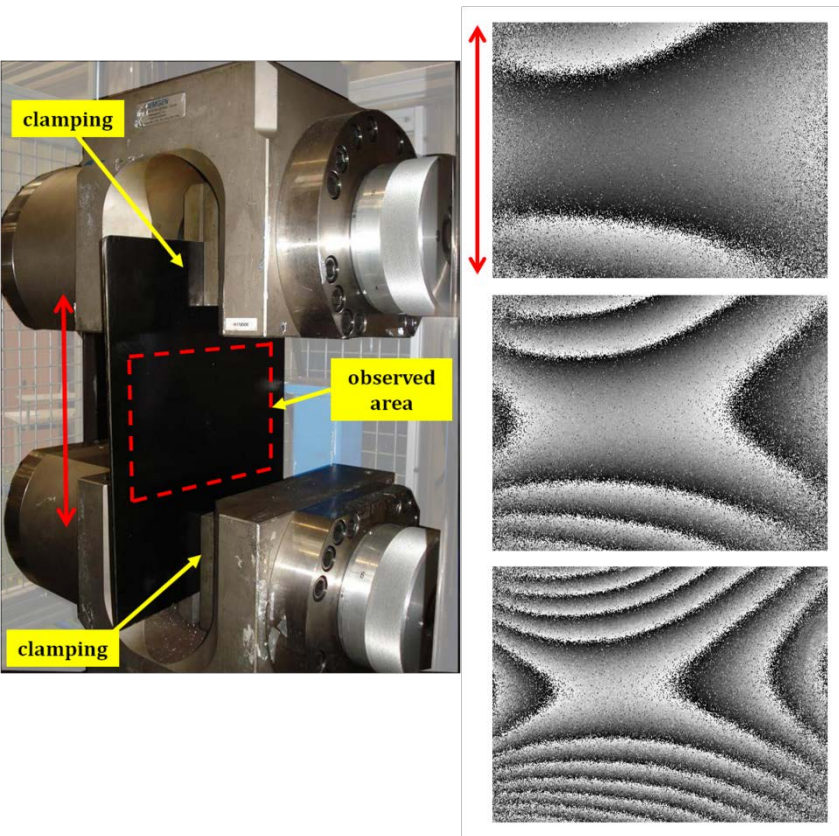
Prototype compact de labo

Système mobile



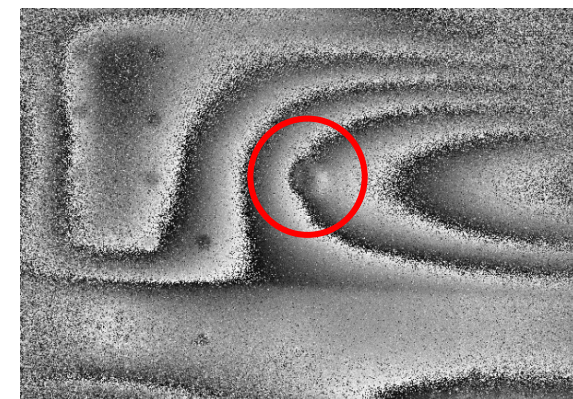
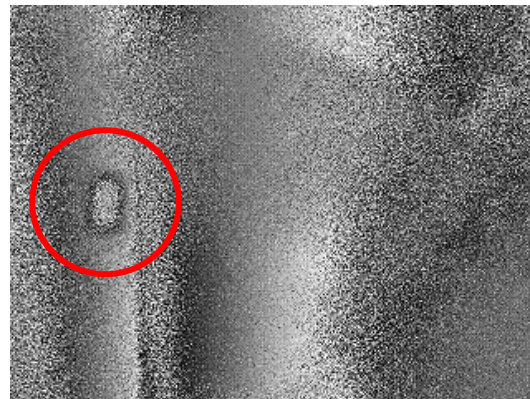
Interférométrie de speckle infrarouge

- Applications - 1
 - Mesure de grandes déformations
 - Mesure sur site industriel (CTA – Minano, Espagne)



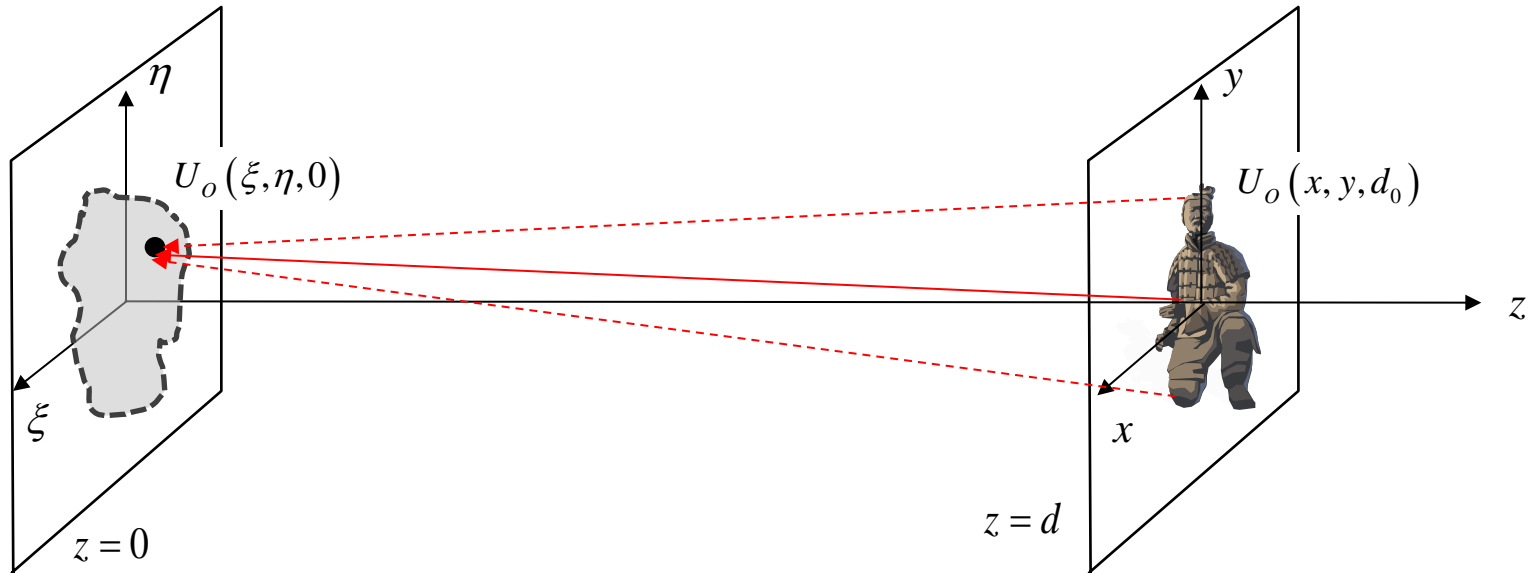
Interférométrie de speckle infrarouge

- Applications - 1
 - Détection de défauts
 - Mesure sur site industriel (Airbus D41, Toulouse)



Holographie numérique

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



Intégrale de diffraction de Fresnel (approximation paraxiale)

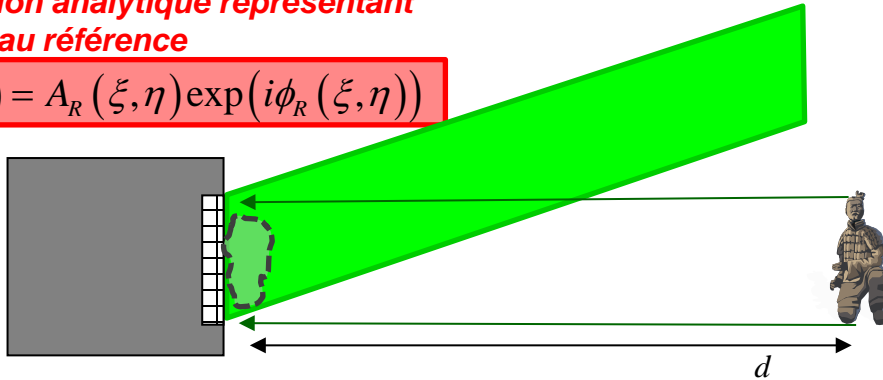
$$U_o(x, y, d_0) = \frac{\exp(ikd_0)}{i\lambda d_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_o(\xi, \eta, 0) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d_0} \left[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2\right]\right\} d\xi d\eta$$

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

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

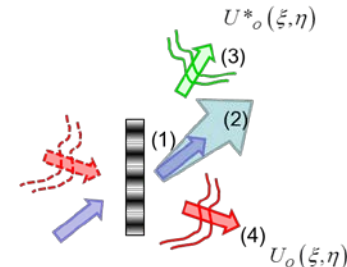
- Reconstruction (principe de Fresnel)

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

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

Rappel: holo analogique

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



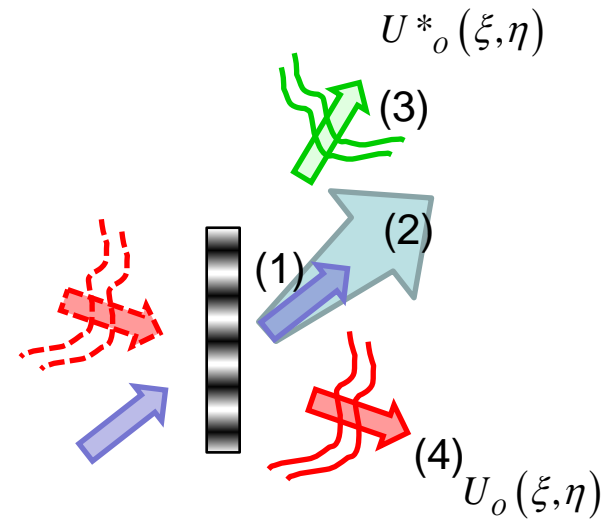
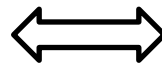
$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (...) \iff TF \left[I(\xi, \eta) U_R(\xi, \eta) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \right]$$

Holographie numérique

- Reconstruction - 2

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

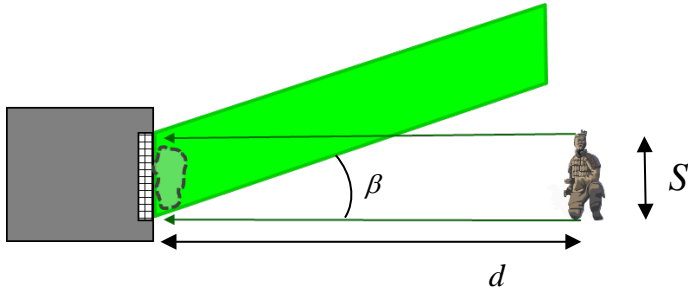
$$\times \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} I(k,l) U_R(k,l) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta\xi^2 + l^2 \Delta\eta^2)\right] \exp\left[i 2\pi \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N}\right)\right]$$



Holographie numérique

- Reconstruction – 3 : quelques points importants

Angle entre objet et référence – Dimension des objets



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

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

λ : longueur d'onde

Δ : dimension pixel

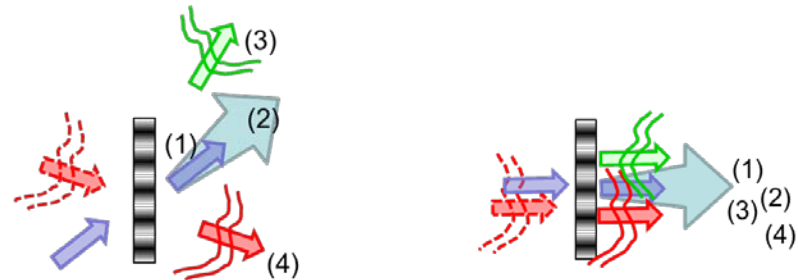
$$S_{\max} = \frac{d\lambda}{2\Delta}$$

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)

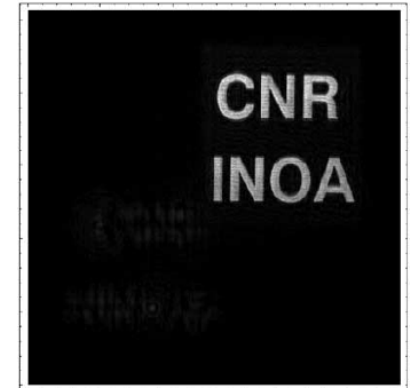
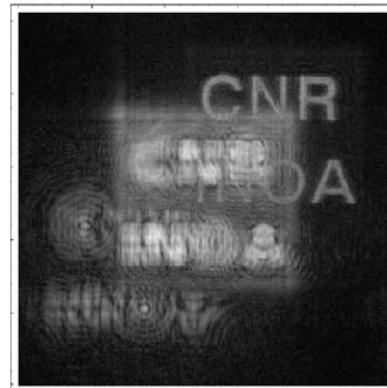
$$U'_R(\xi, \eta)I'(\xi, \eta) = U_R(\xi, \eta)I_1(\xi, \eta) + U_R(\xi, \eta)I_2(\xi, \eta)e^{-i\pi/2} + U_R(\xi, \eta)I_3(\xi, \eta)e^{-i\pi} + U_R(\xi, \eta)I_4(\xi, \eta)e^{-i3\pi/2} = 4|U_R(\xi, \eta)|^2 U_O(\xi, \eta)$$

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

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

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

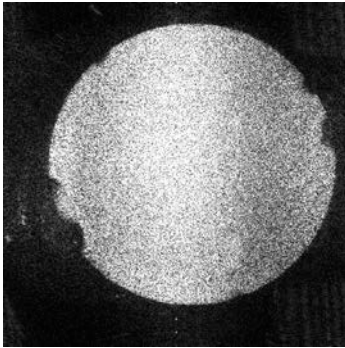
$$I_4(\xi, \eta) = I_{\text{moyen}}(\xi, \eta) [1 + m(\xi, \eta) \cos(\Delta\phi(x, y) + 3\pi/2)]]$$



Holographie numérique

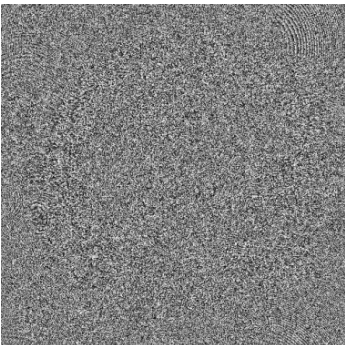
- Reconstruction - 5

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



Amplitude

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



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

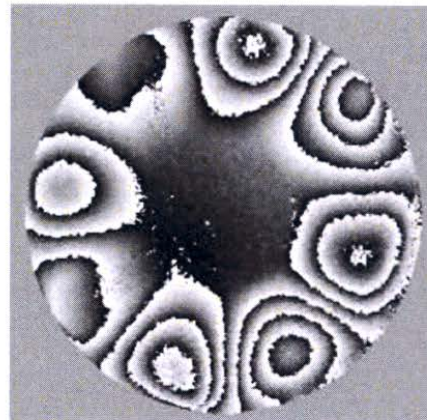


Phase de l'hologramme à l'état 2

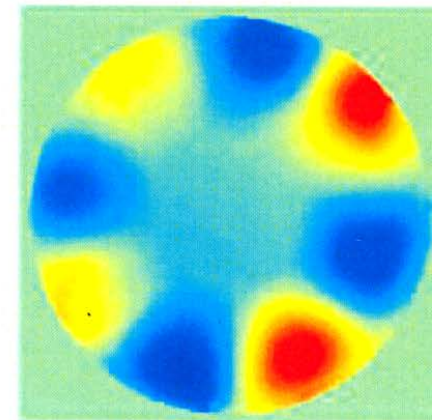


© LAUM, Thèse Patrice Tankam (2010)

Carte de différence de phase
non déroulée (mod 2π)



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

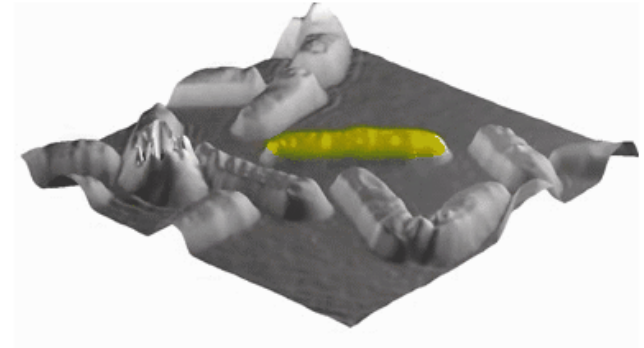
**Microscope
en réflexion**



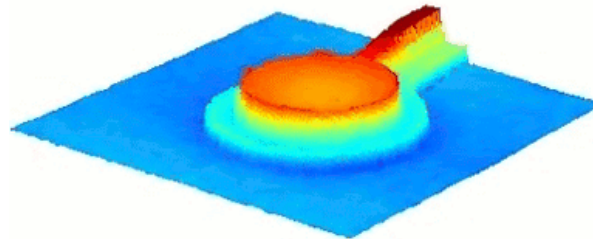
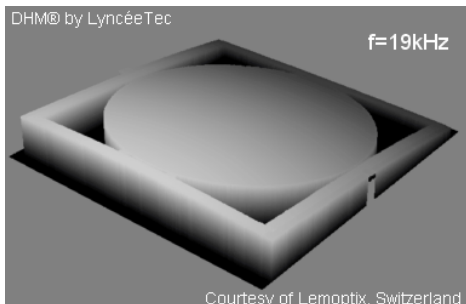
**Microscope
en transmission**



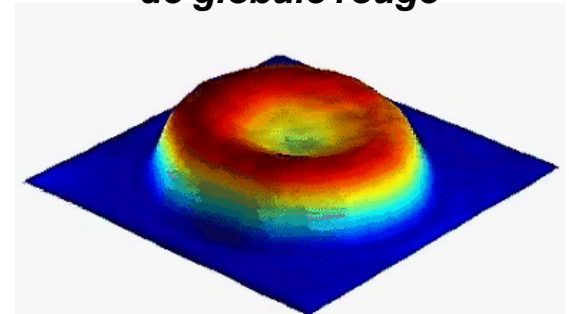
Division cellulaire



Déformations - mouvements de MEMS

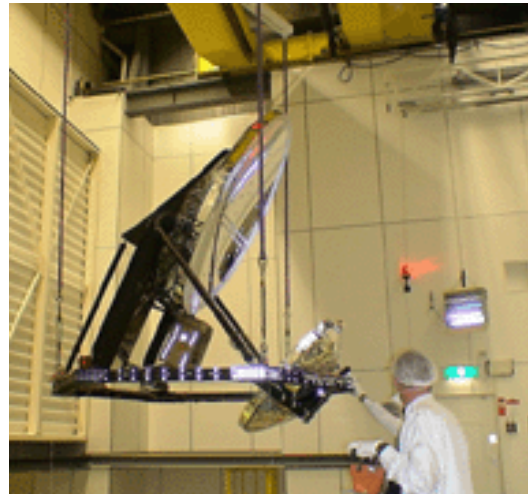


**Fluctuations membrane
de globule rouge**



Holographie numérique infrarouge

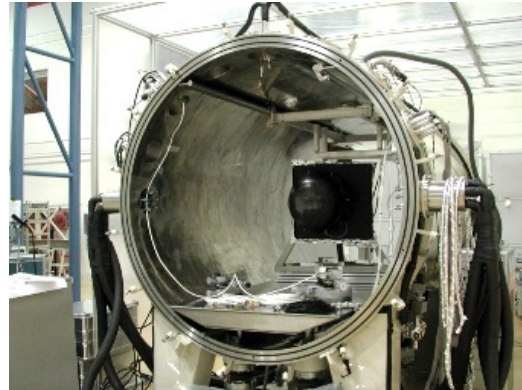
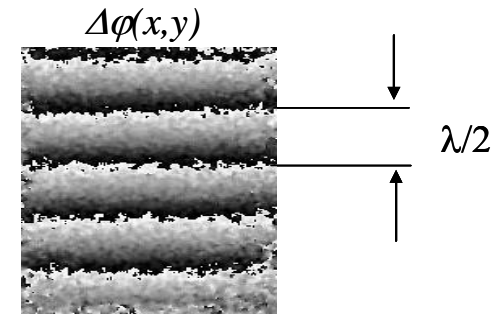
- Besoins de l'Agence Spatiale Européenne
 - Déformations champ complet de réflecteurs asphériques
 - Test en ambiance vide thermique simulée
 - Large réflecteurs: jusqu'à 4 m de diamètre
 - Gamme de mesure: 1 μm – 250 μm
 - **Les réflecteurs ne peuvent pas être équipés de cibles coopératives ou couverts de peinture diffusante**



Holographie numérique infrarouge

- Propriétés spécifique de l'infrarouge lointain

- Réduit la sensibilité de mesure
- Réduit la sensibilité aux perturbations extérieures



- Taille des objets reconstruits est plus grande qu'en lumière visible

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

$$\left(\frac{\lambda}{\Delta}\right)_{10\mu\text{m}} \approx 7 \left(\frac{\lambda}{\Delta}\right)_{532\text{nm}}$$



**Objets reconstruits
7 x plus grands à 10 μm**

- Objets réfléchissent de manière plus spéculaire à 10 μm qu'en lumière visible (à rugosité égale)

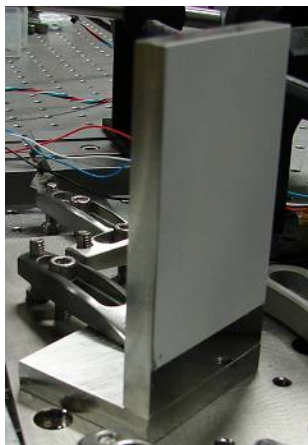
Holographie numérique infrarouge

- Application 1 – Test réflecteur parabolique

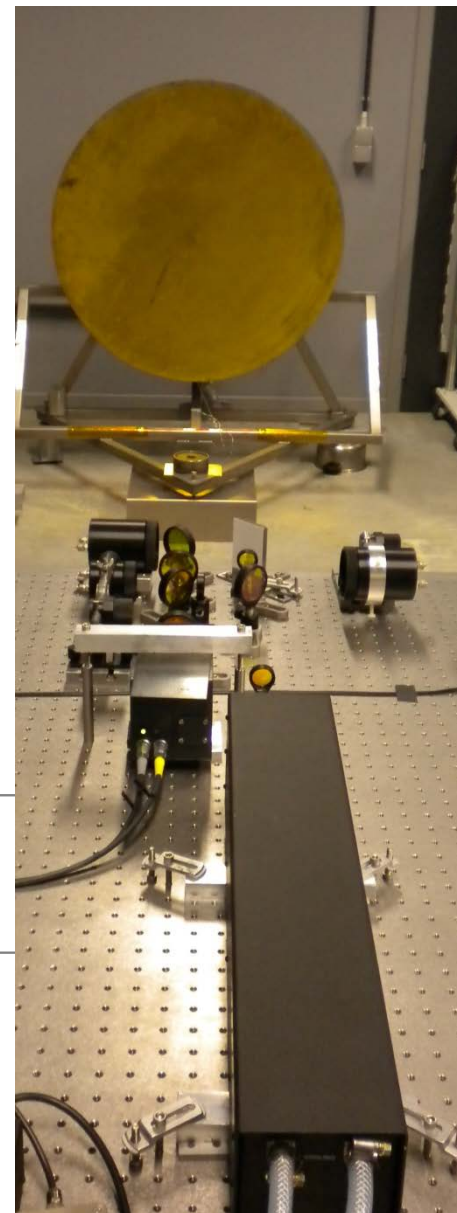
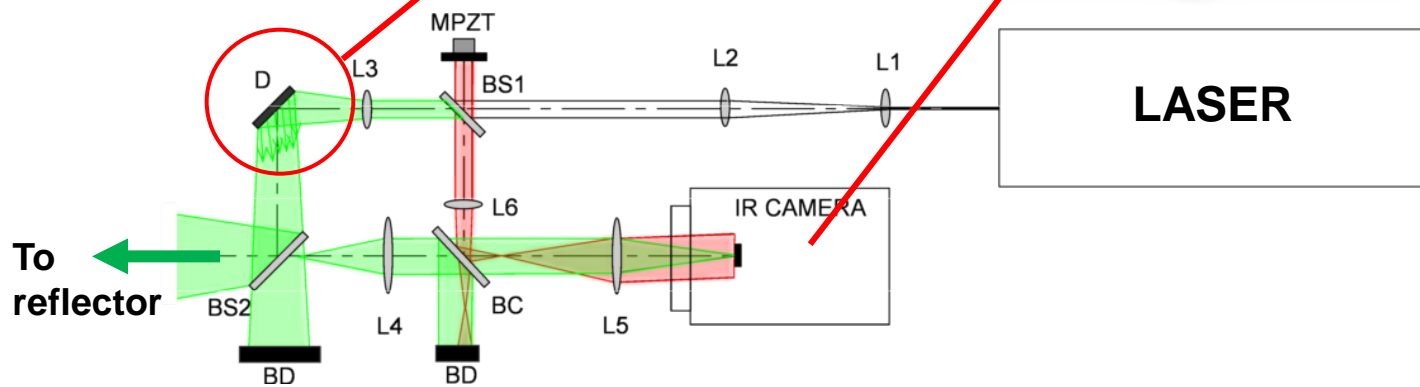
Diameter: 1.1 m
Focal Length: 1.58 m



Diffuser

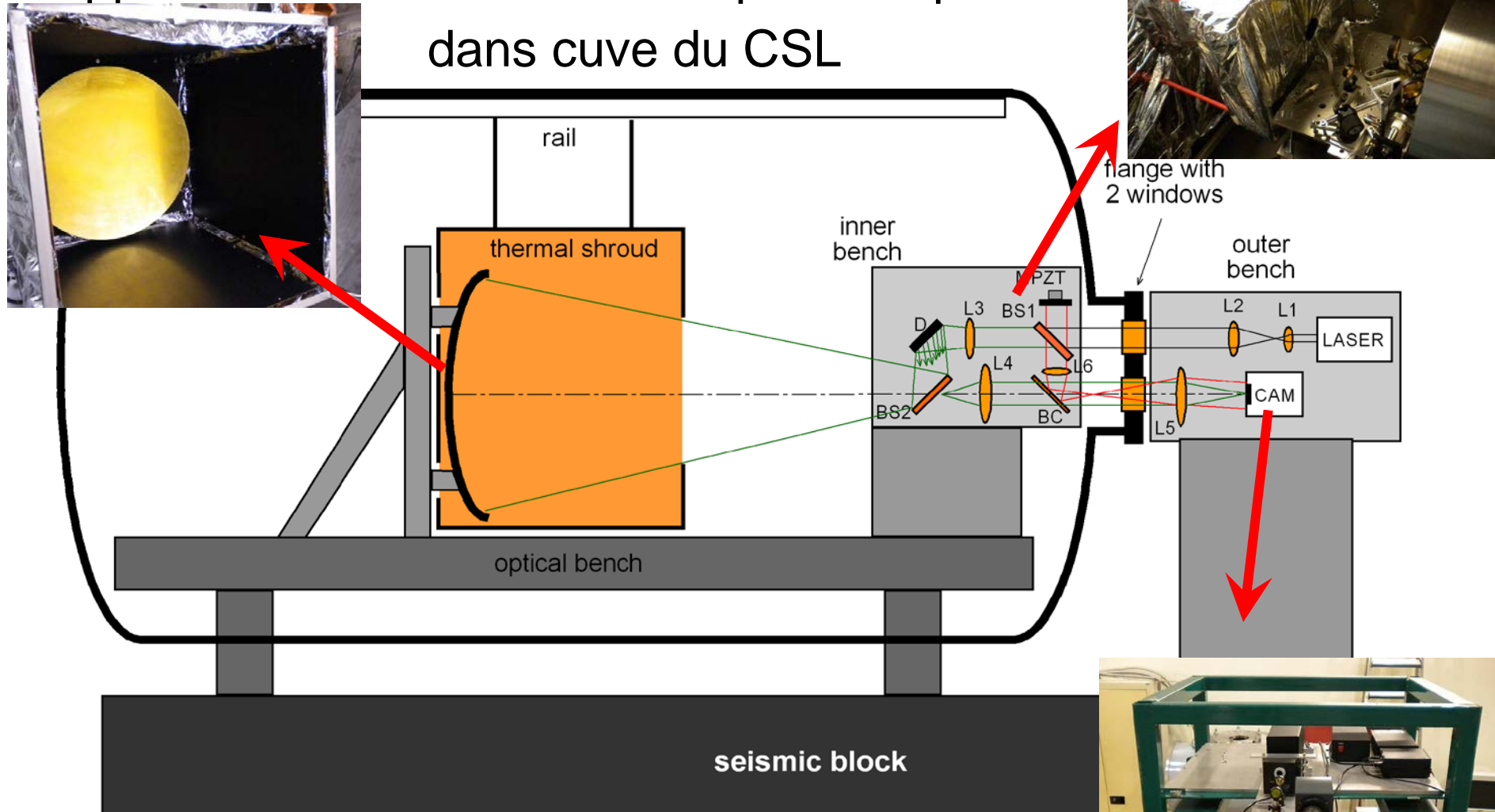


Uncooled μ -bolometer
640x480 pixels
Pixel Pitch : 25 μm
Frame rate 60 Hz
16 bits

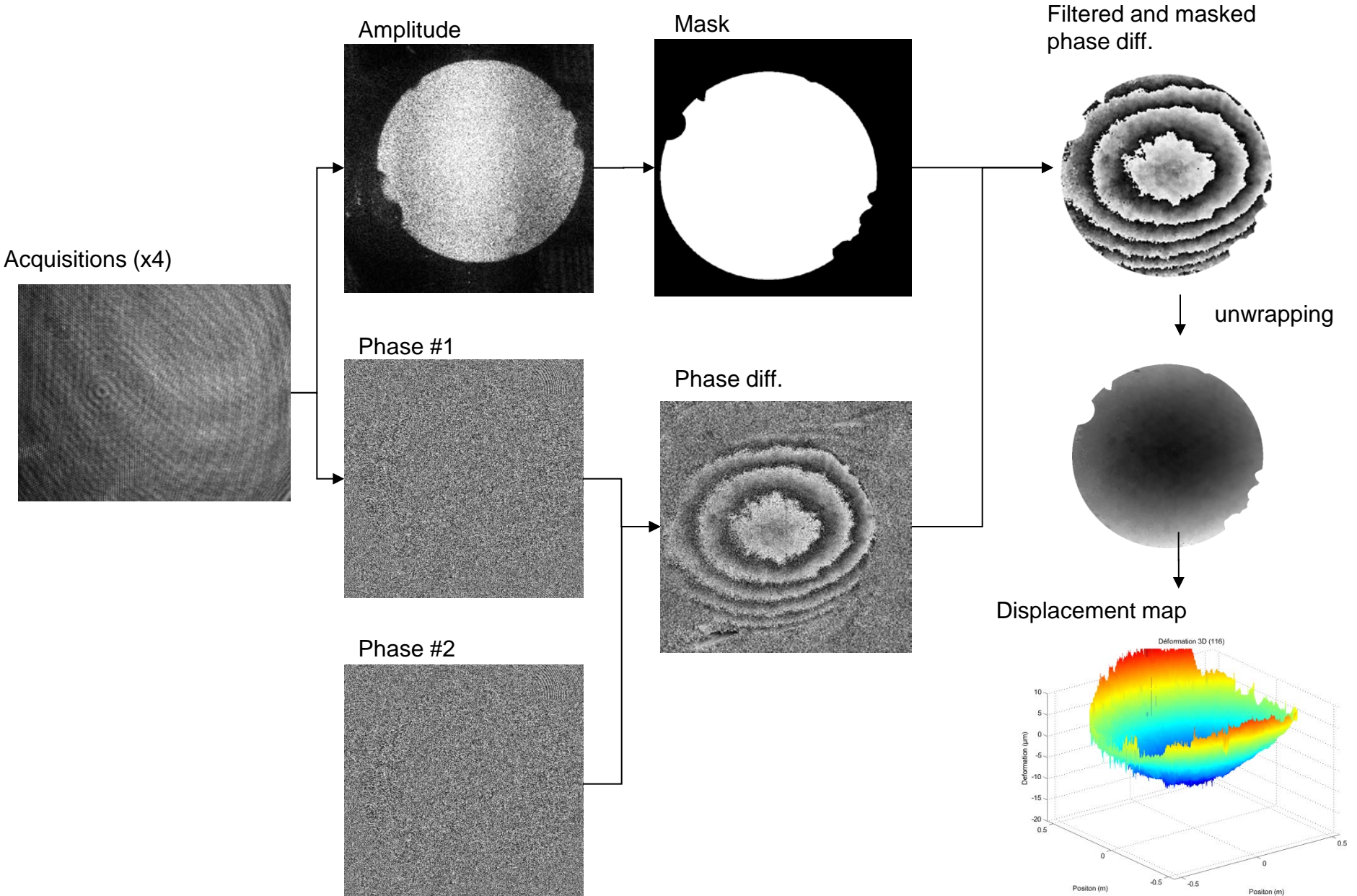


Holographie numérique infrarouge

- Application 1 – Test réflecteur parabolique dans cuve du CSL



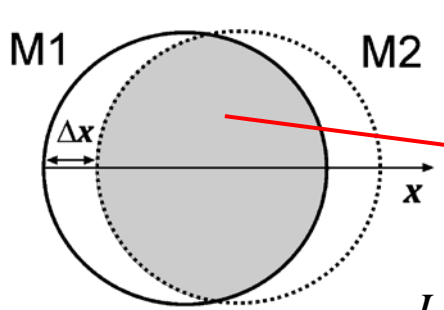
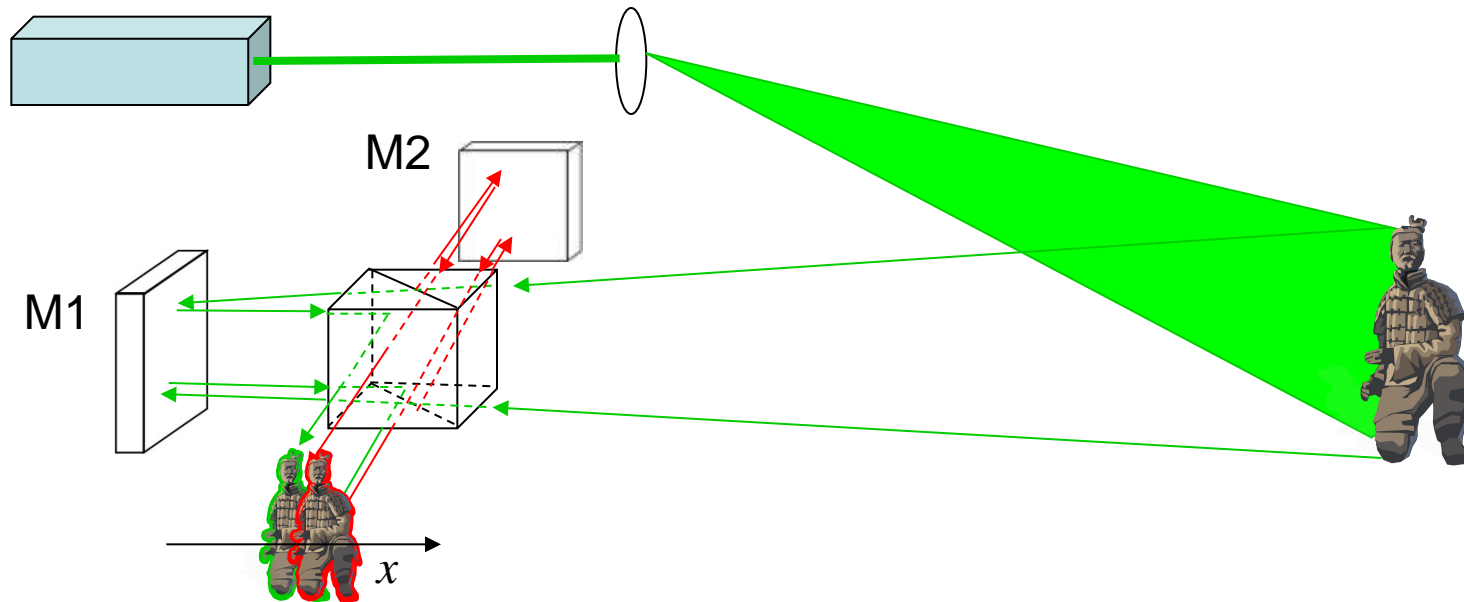
Holographie numérique infrarouge



Les techniques optiques et laser du contrôle non destructif

Shearographie

- Principe



x : direction du cisaillement optique (shear)
 Δx : amplitude du cisaillement

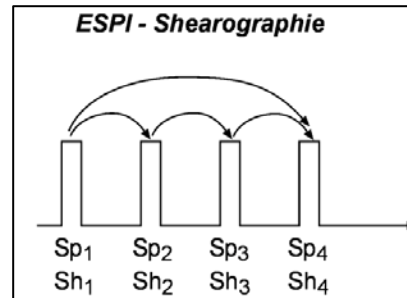
$$Sh(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[1 + m(x, y) \cos(\phi_{O,M1}(x, y) - \phi_{O,M2}(x, y)) \right]$$

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

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

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

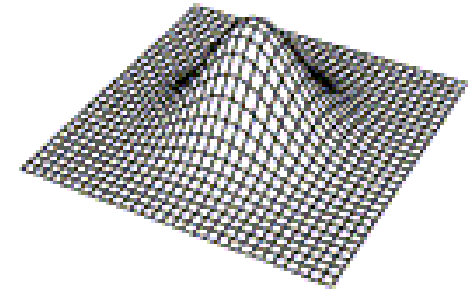
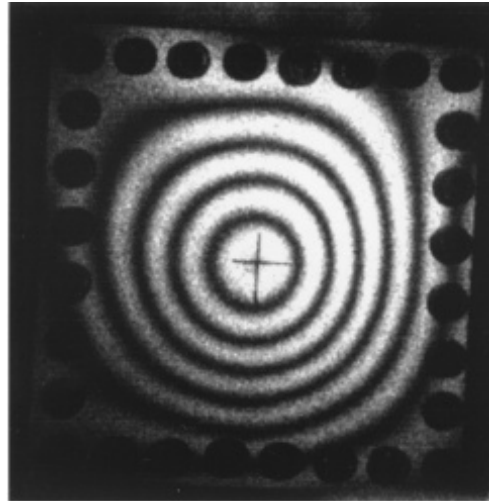
$$\Delta\phi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial L_{\perp}(x, y)}{\partial x} \Delta x$$

Shearographie

- Shearographie vs. Interférométrie de speckle

Interférométrie de speckle

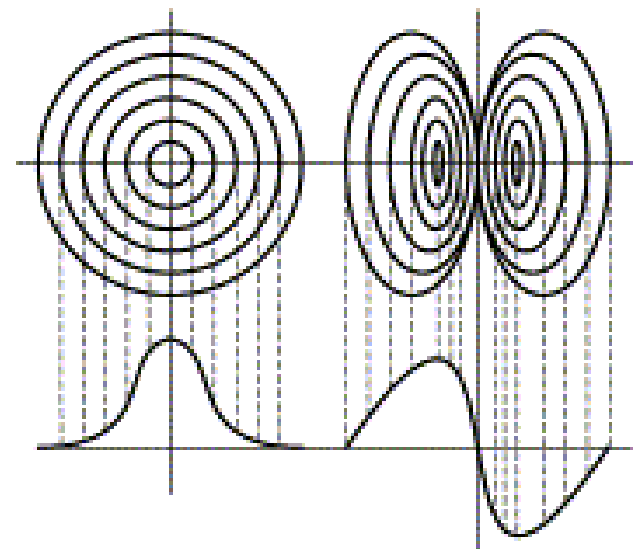
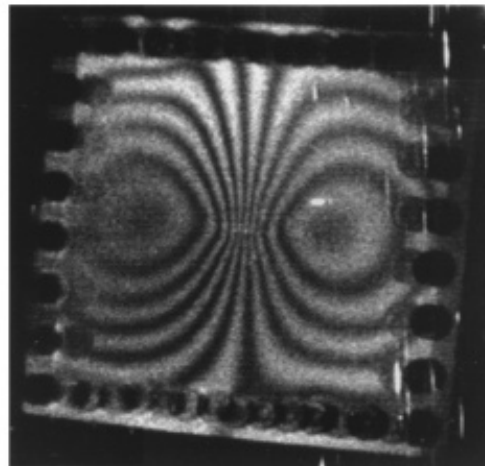
$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} L_{\perp}(x, y)$$



(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

Interférométrie de speckle différentielle

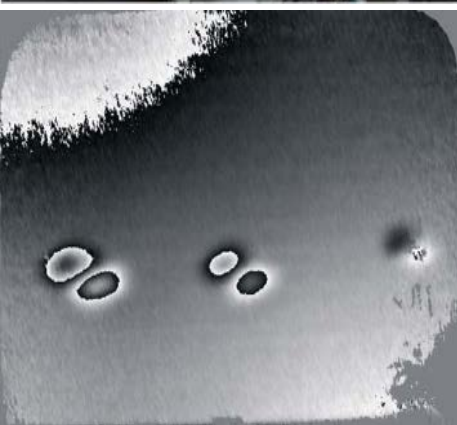
- Avantages et applications

- Avantages :

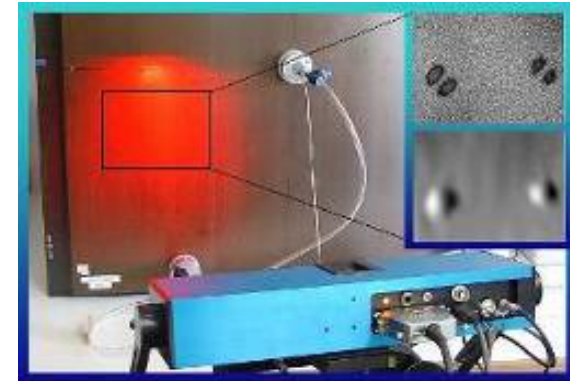
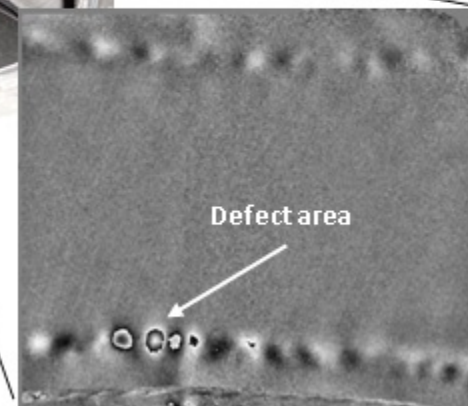
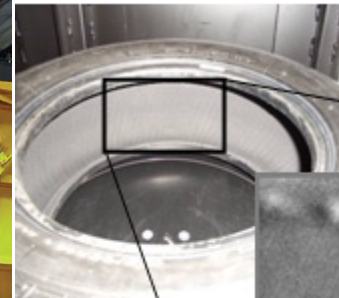
- Technique auto-référencée : pas de faisceau référence extérieur
 - Peu sensible aux perturbations de l'environnement

- Application principale : détection de défauts

Excitation thermique



Dépression

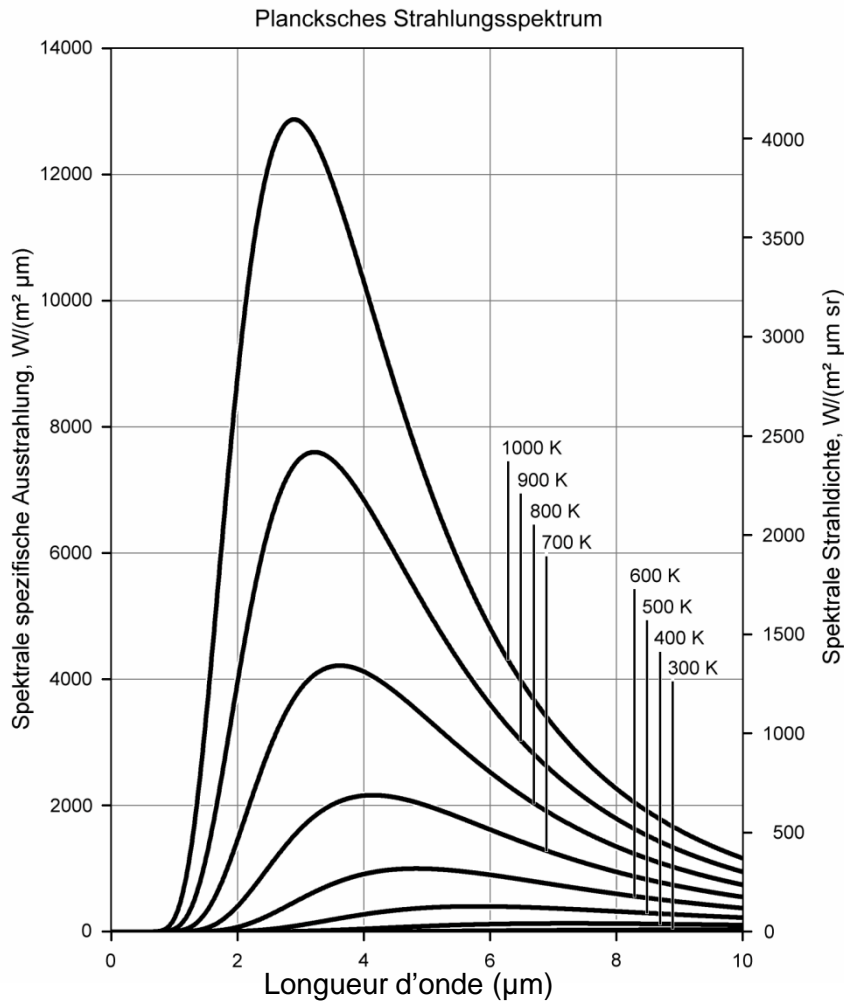


Vibration

La thermographie

Thermographie

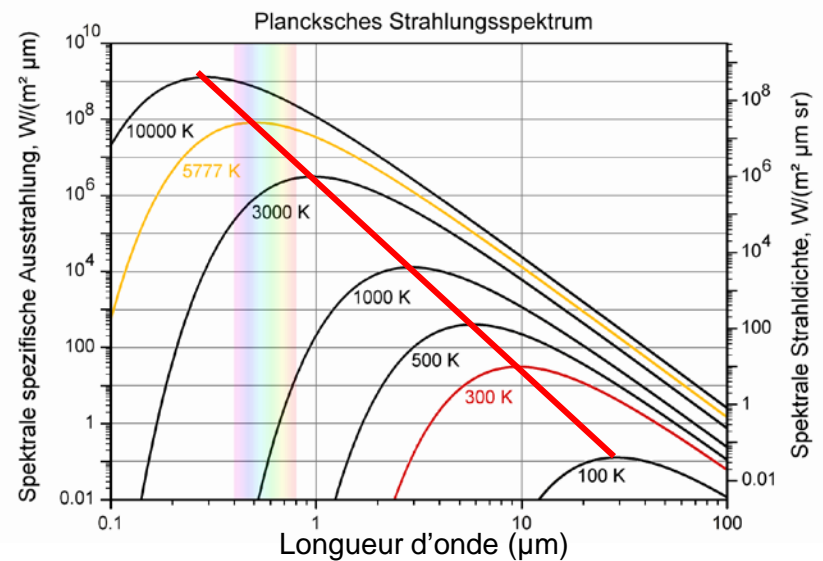
- Thermographie : mesure de la température
 - Loi de Planck d'émission du « corps noir »



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

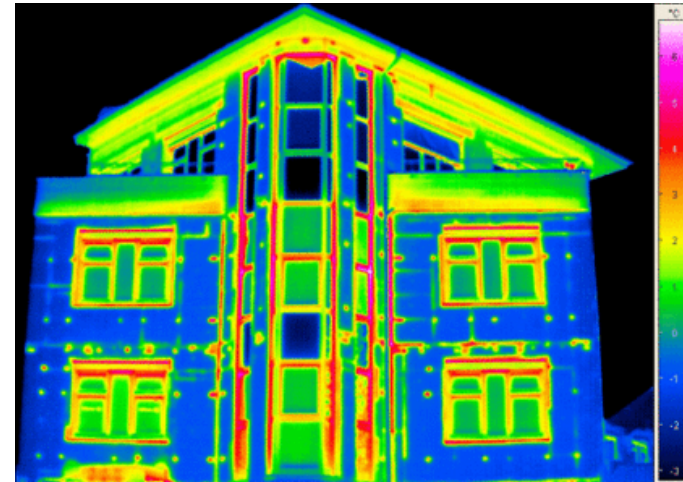
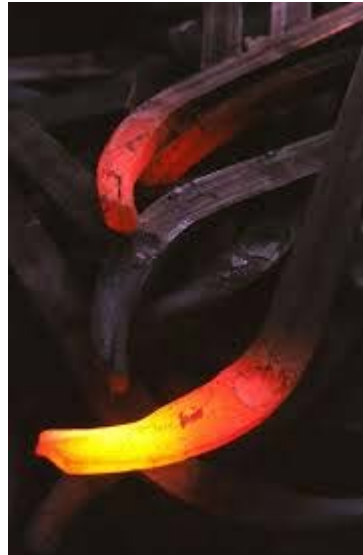
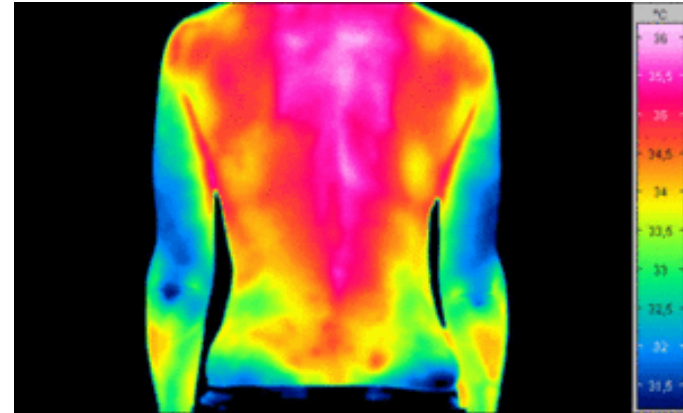
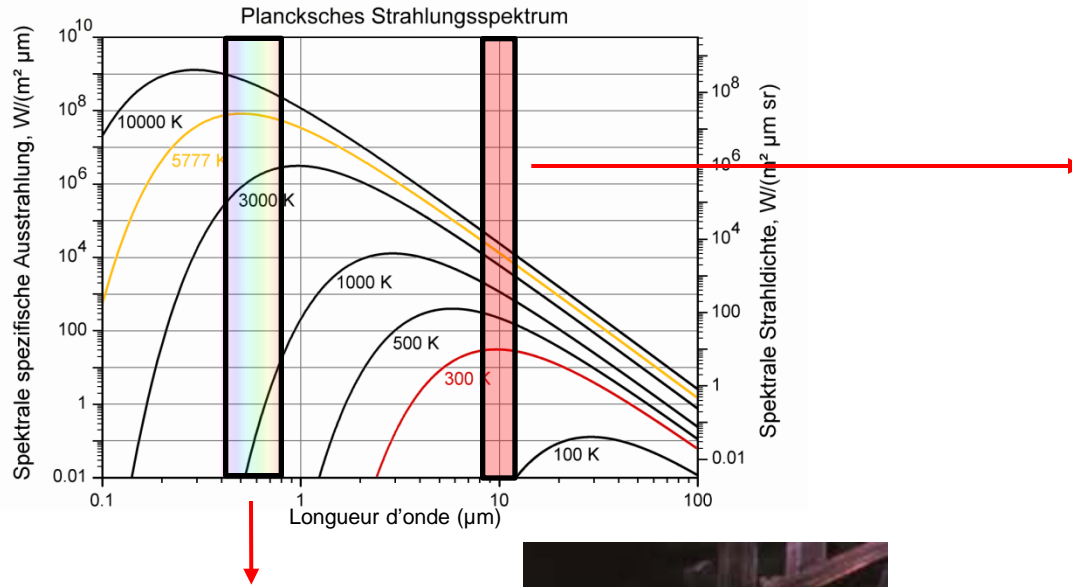
(Loi de Wien)

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



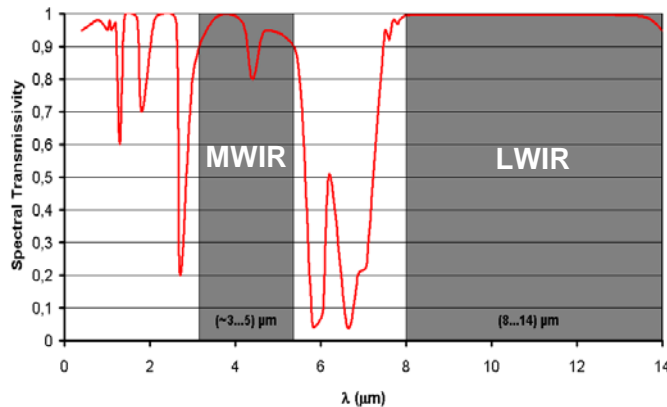
Thermographie

- 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
www.jenoptik.de
www.infratec.de
www.xenics.com
www.telops.com

....

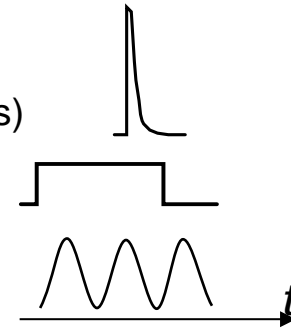
Thermographie

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

Thermographie optique (Chauffage par lampe)

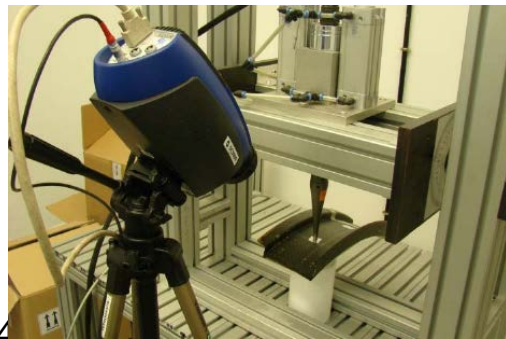


- Chauffage impulsionnel (Flash lamps)
- Chauffage par pas
- Chauffage modulé

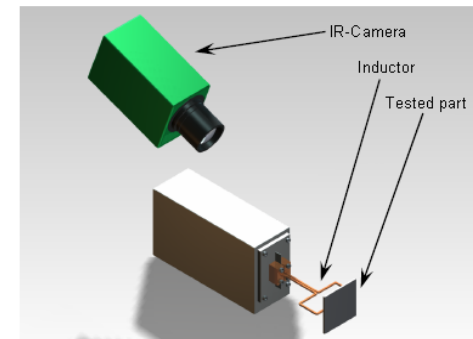


- Une sollicitation externe permet aux défauts de générer de la chaleur

Vibrothermographie



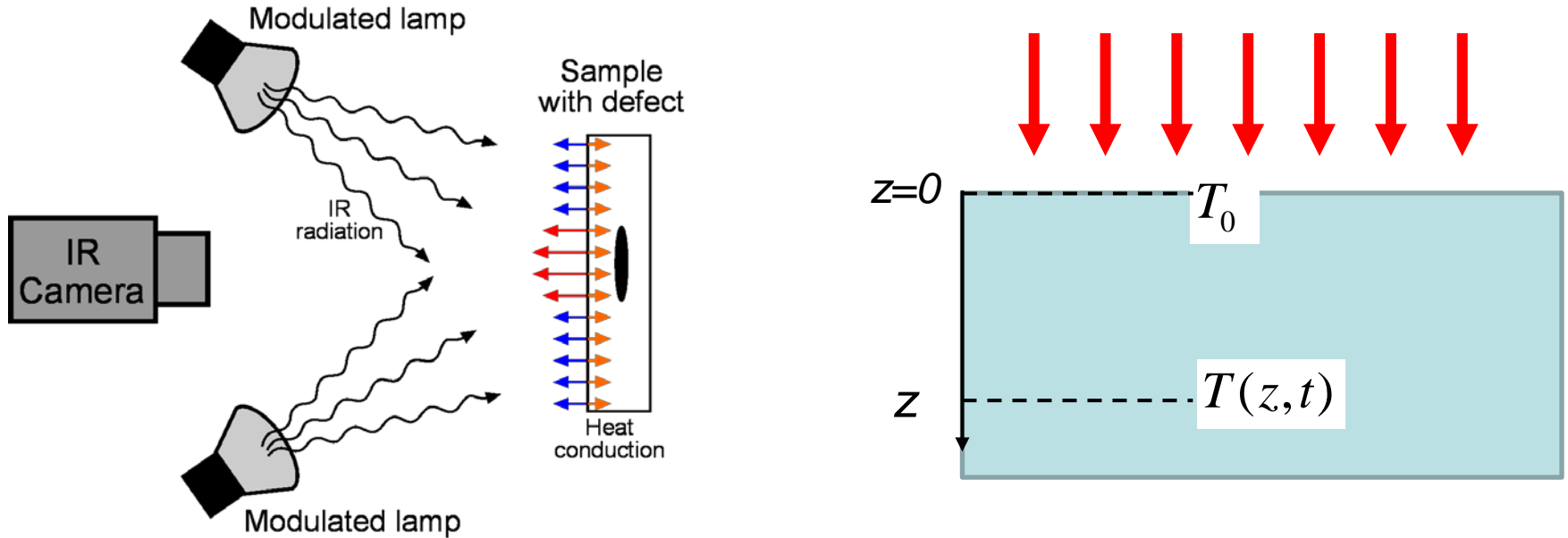
Thermographie par induction



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

α : 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**

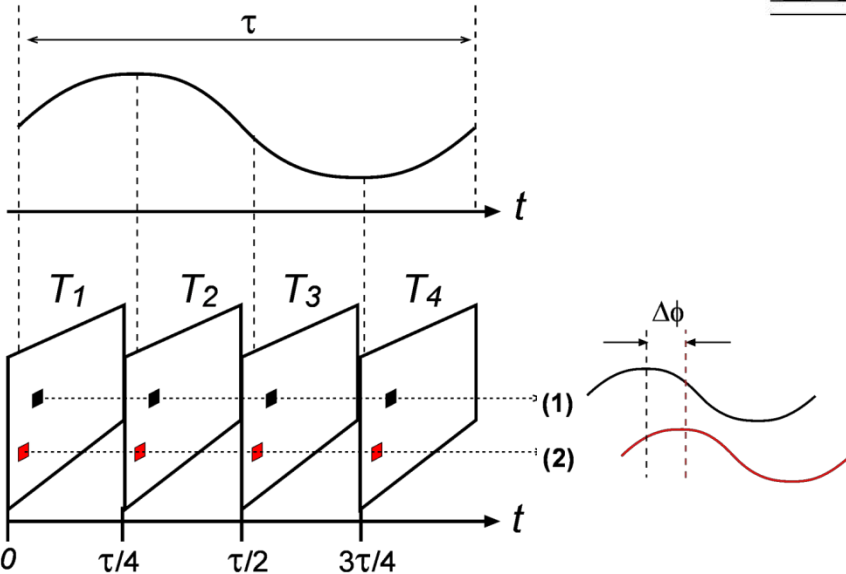
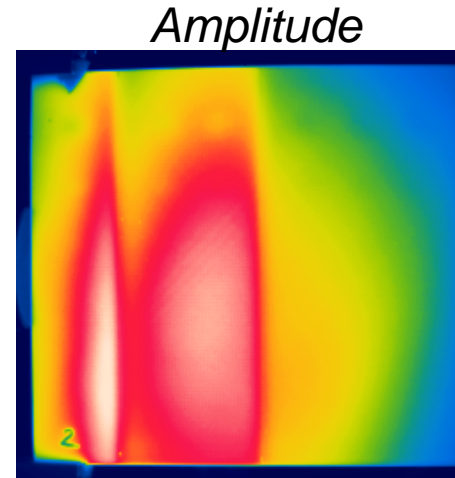
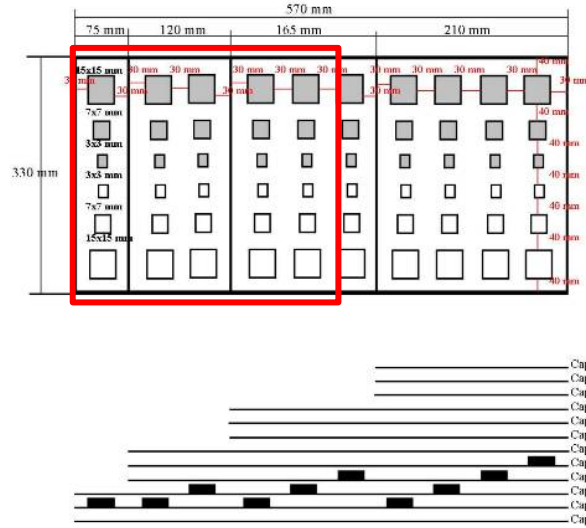
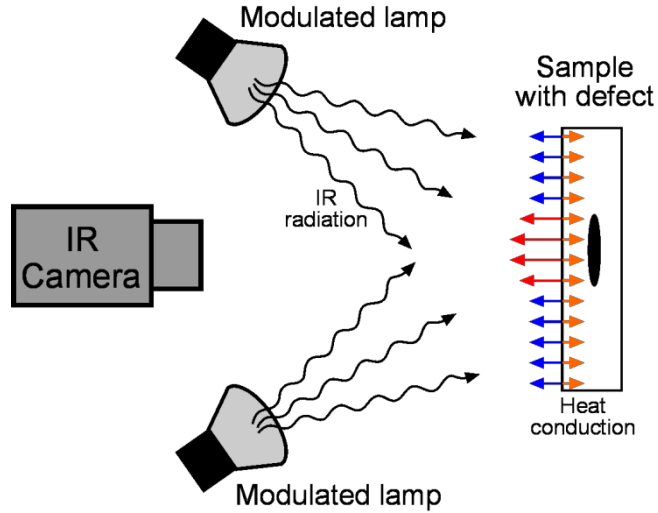
**Glass Fiber
Reinforced Polymer**

		$f = 1 \text{ Hz}$	$f = 0.01 \text{ Hz}$
Materiau	$\alpha(10^{-7} \text{ m}^2/\text{s})$	$\mu(\text{mm})$	$\mu(\text{mm})$
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 μ ↔ Défaut peu profond
 Basse fréquence f ↔ Grande profondeur pénétration μ ↔ Défaut profond

Thermographie

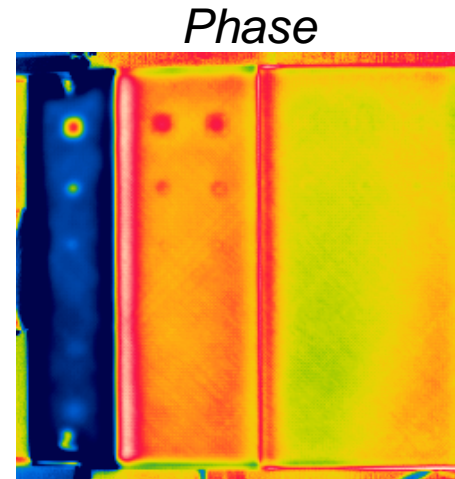
- Thermographie optique Lock-In (OLT) : Principe 2



$$A = \sqrt{[T_1 - T_3]^2 + [T_2 - T_4]^2}$$

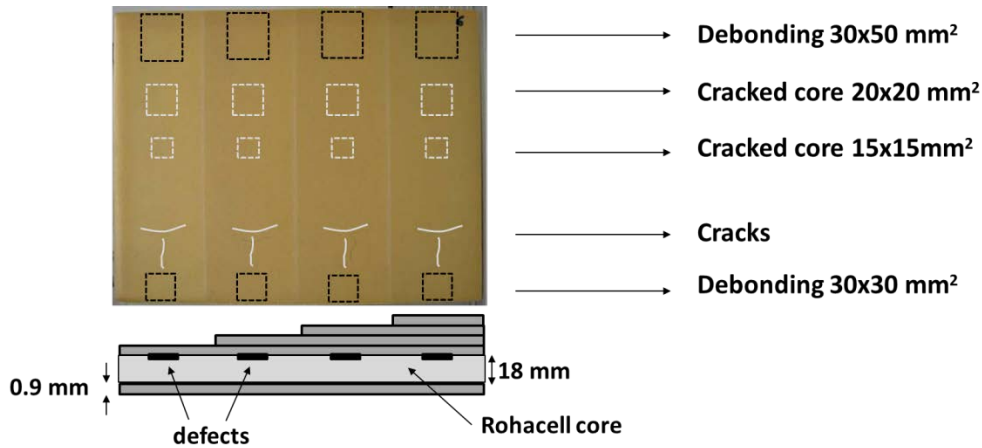
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{T_4 - T_2}{T_1 - T_3} \right)$$

*phase de l'onde
thermique est différente
à l'endroit du défaut*

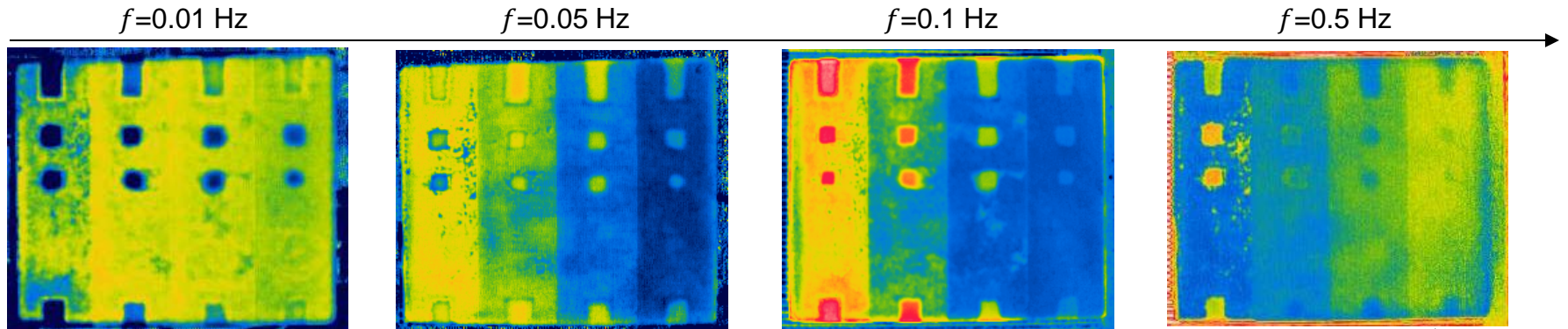


Thermographie

- Thermographie optique Lock-In (OLT) : Résultats



Thermogrammes de phase



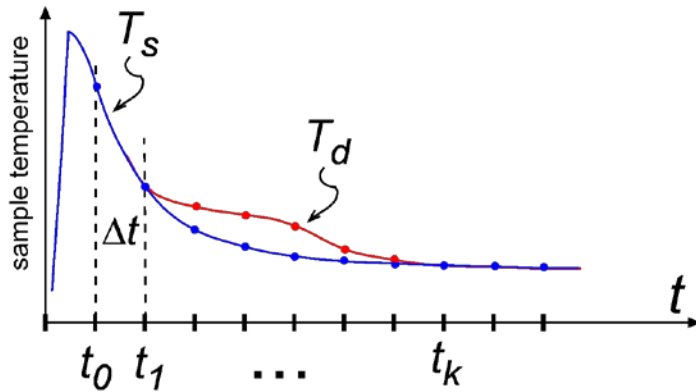
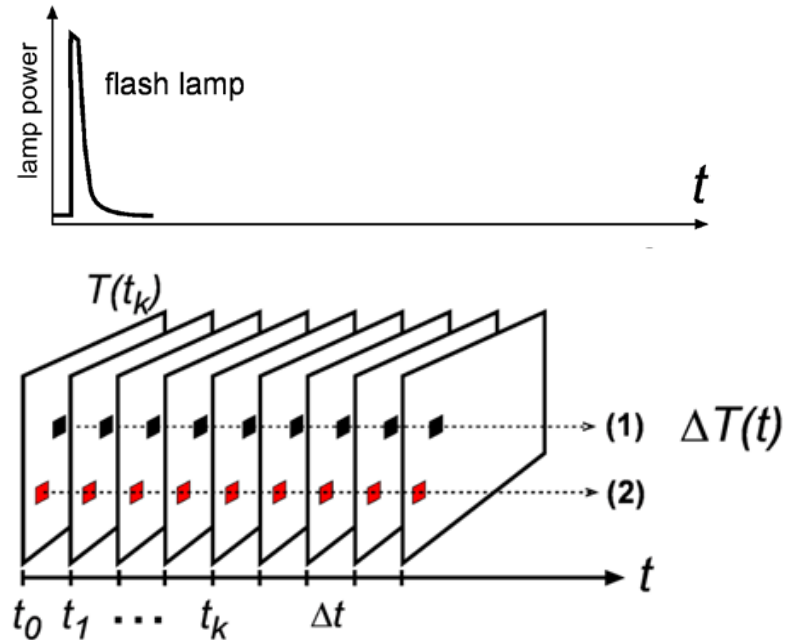
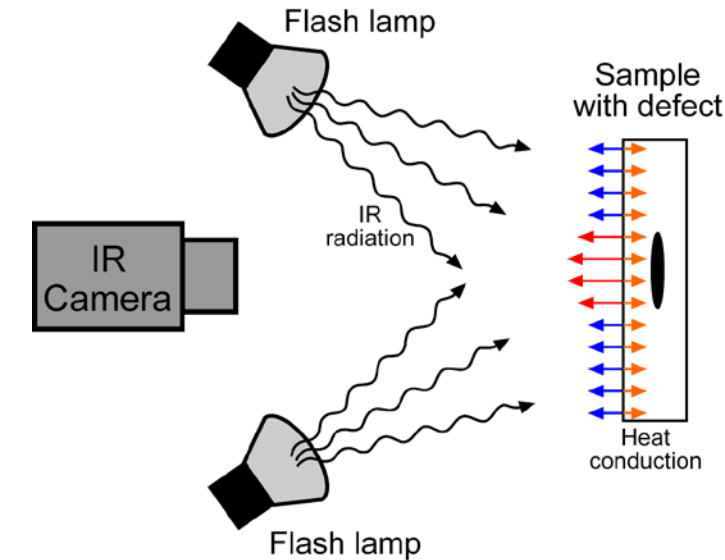
Contraste important pour défauts profonds

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
 α : diffusivité thermique

Thermographie

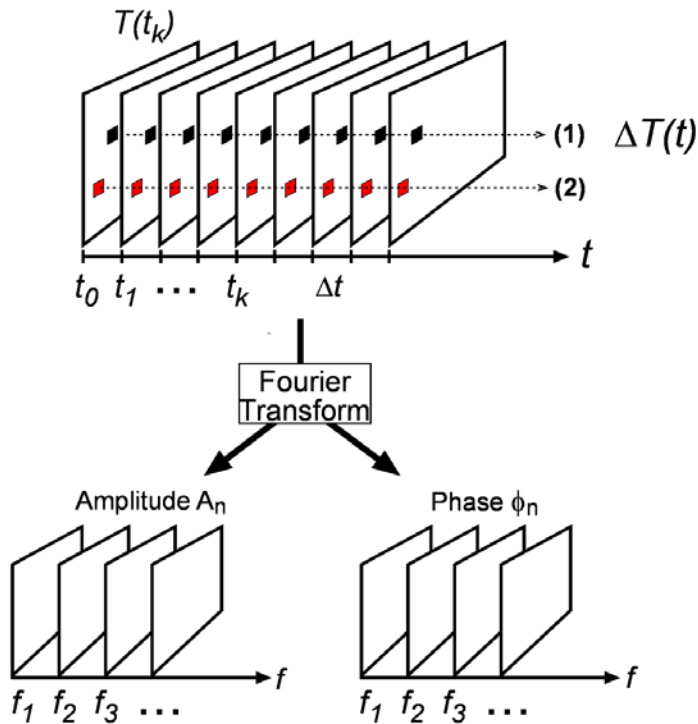
- Pulse Phase Thermography (PPT)

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

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

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

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



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

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

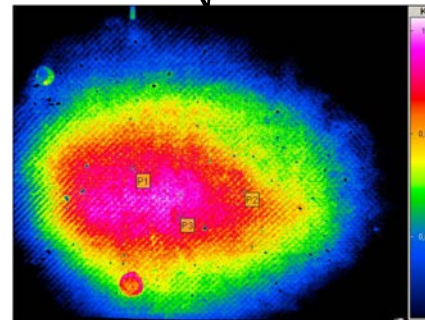


Figure 19: Amplitude image of the PPT analysis

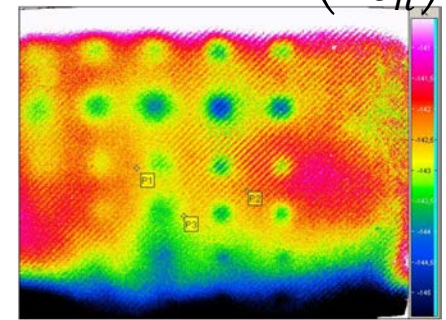
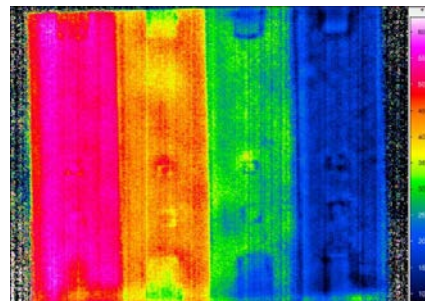
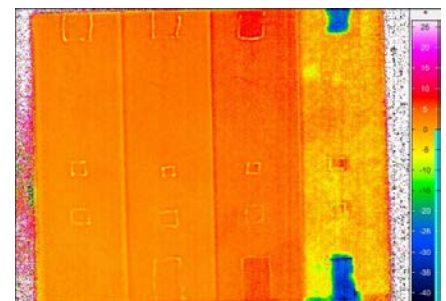


Figure 18: Phase image of the PPT analysis

© Infratec GmbH



$f=0.0125$ Hz



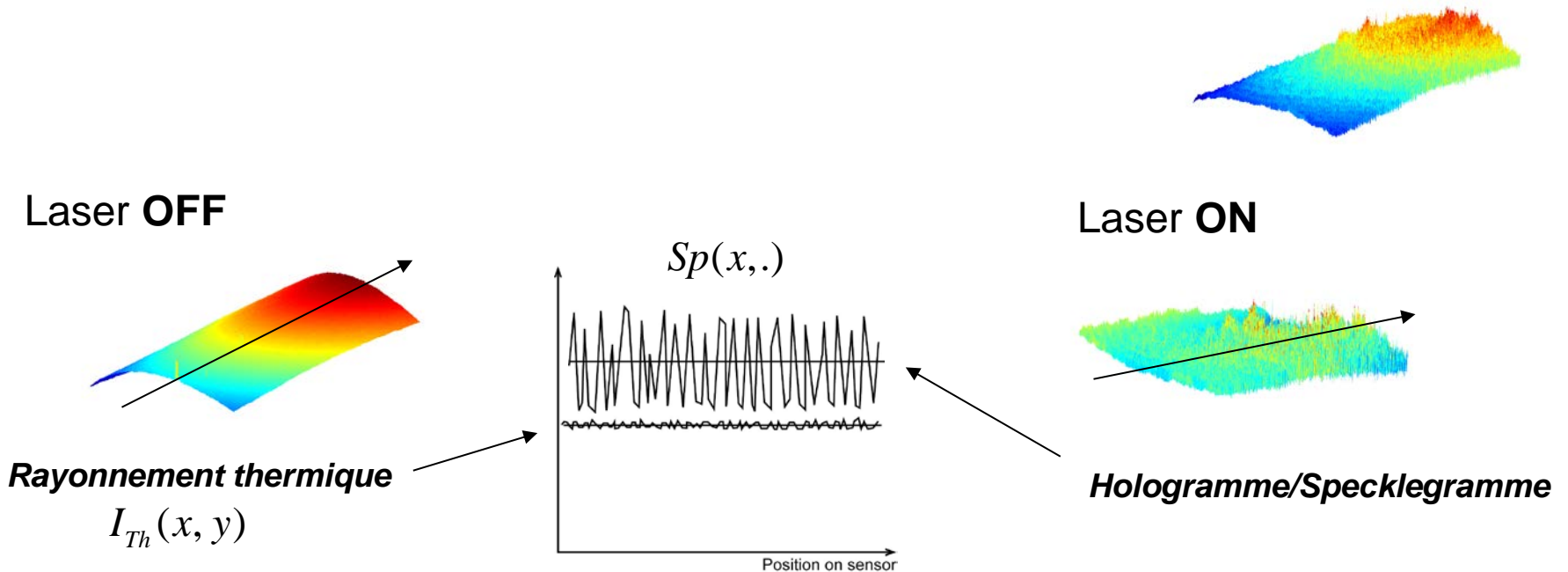
48 $f=0.25$ Hz

Combinaison thermographie-holographie

- Interférométrie de speckle infrarouge

$$t=t_1: Sp(x, y) = I_{Th}(x, y) + I_R(x, y) + I_O(x, y) + 2\sqrt{I_R(x, y)I_O(x, y)} \cos(\phi_R(x, y) - \phi_O(x, y))$$

$$t=t_2: Sp'(x, y) = I'_{Th}(x, y) + I_R(x, y) + I_O(x, y) + 2\sqrt{I_R(x, y)I_O(x, y)} \cos(\phi_R(x, y) - \phi'_O(x, y))$$

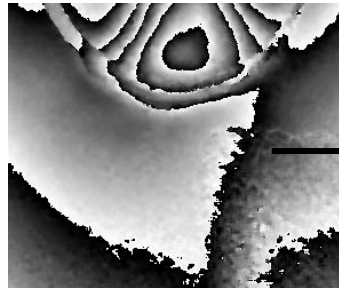


Combinaison thermographie-holographie

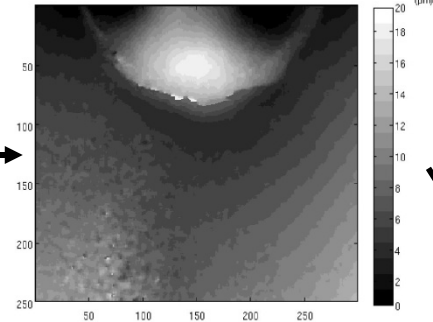
- Interférométrie de speckle infrarouge



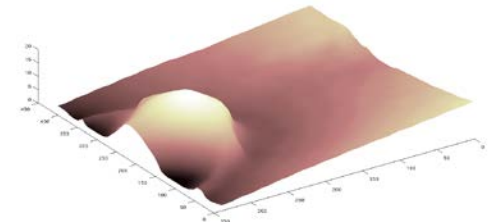
Phase mod 2π



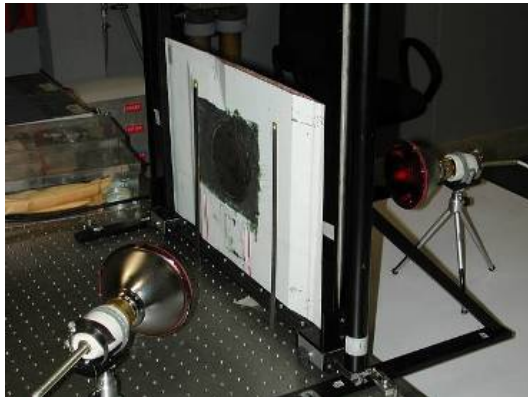
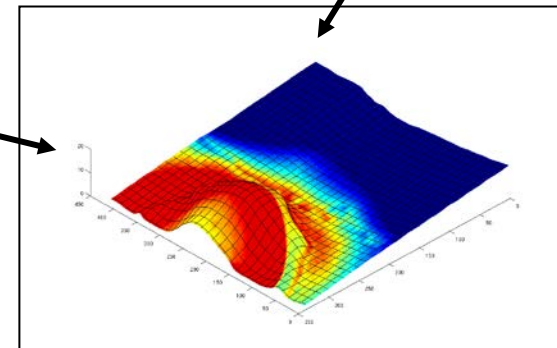
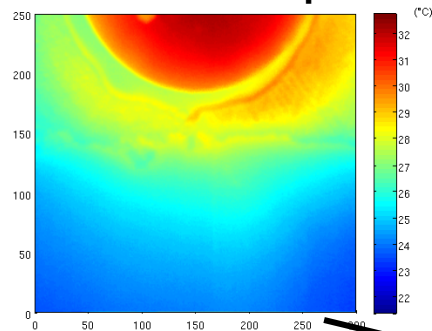
Phase déroulée



Plot 3D de déformation



Variation de température

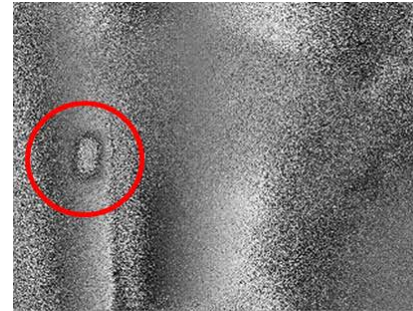
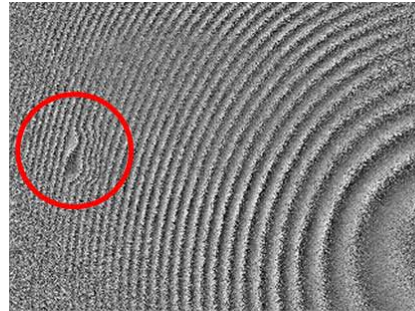
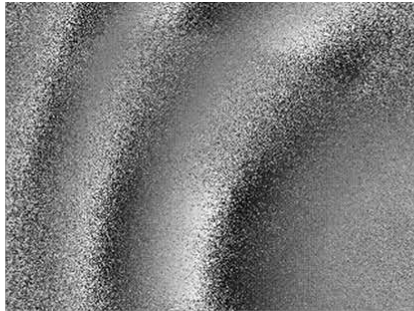


Combinaison thermographie-holographie

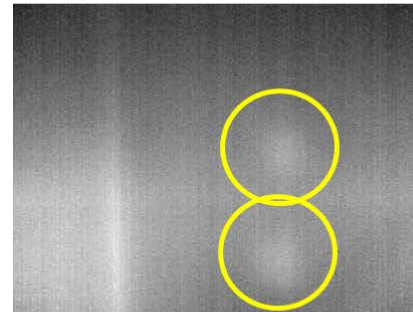
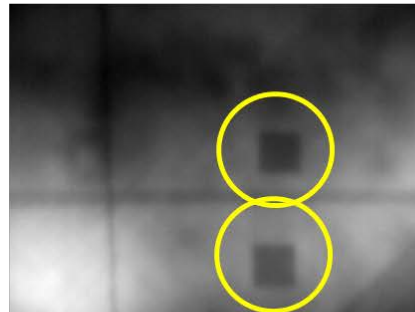
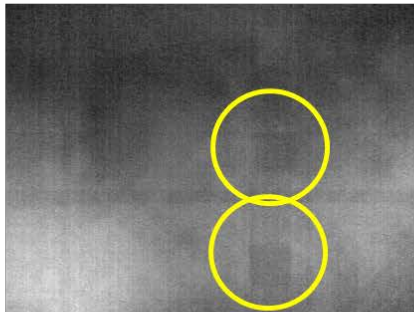
- Application 3: Détection de défauts sur site industriel



$\Delta\phi$



ΔT°



After 2 seconds

After 30 seconds

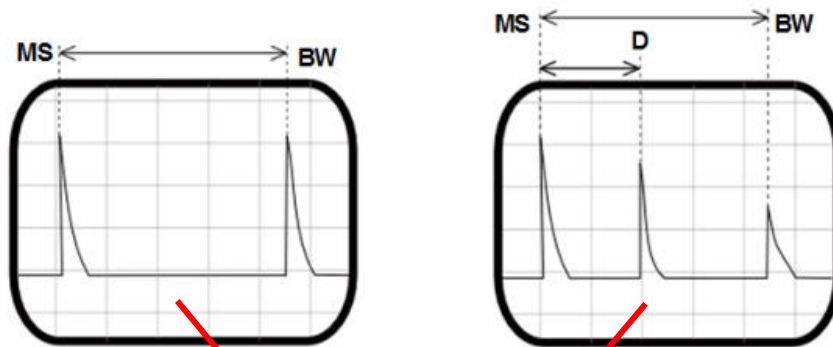
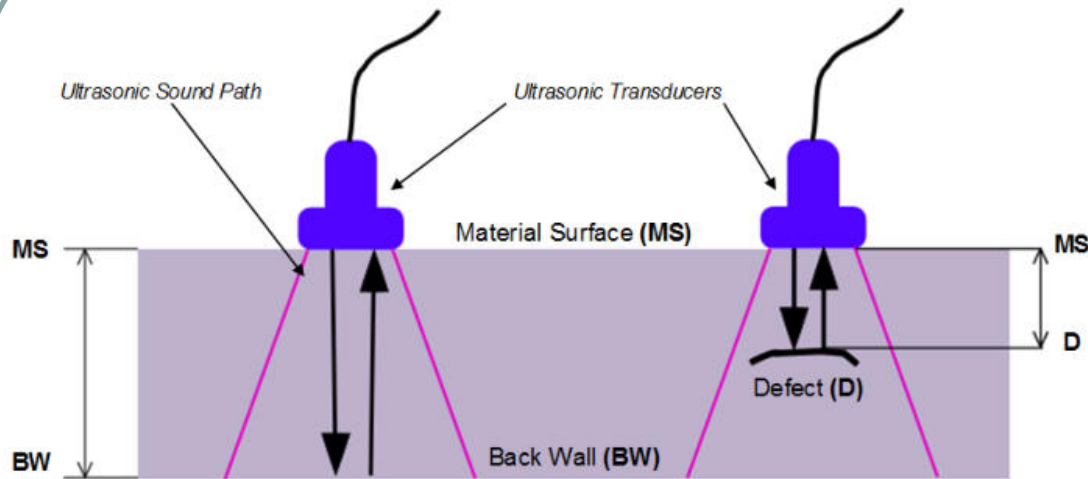
After 6 minutes

time

Lamp start

Les Ultrasons par Laser

Les ultrasons classiques

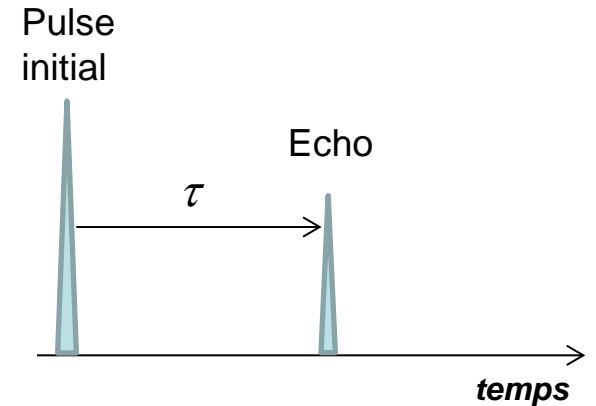


Flaw Detector Screen display
Shows good material on the left screen and a Defect detected on the right screen

A-Scan

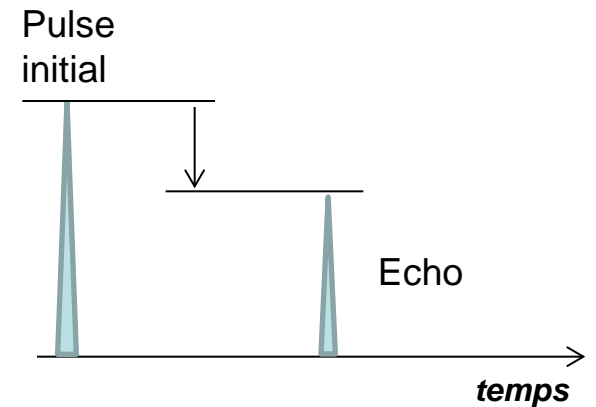
© <http://www.advanced-ndt.co.uk>

Temps de Vol



Temps τ \leftrightarrow Mesure d'épaisseur
Distance du défaut

Attenuation



Changement de matériau
Changement de densité
Changement d'épaisseur...

Les ultrasons classiques

Contact direct



Gel couplant



Jet d'eau



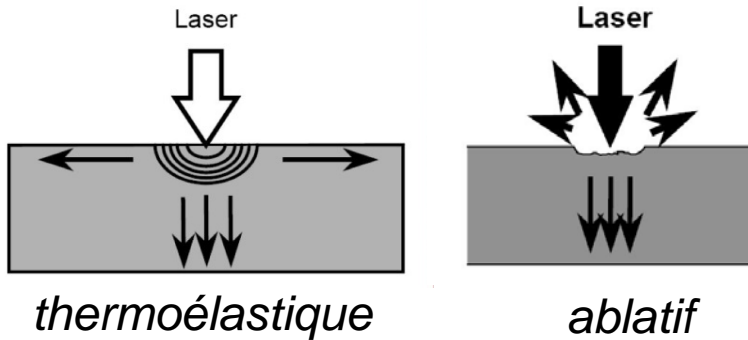
Piscine + scan X-Y



Les ultrasons par Laser

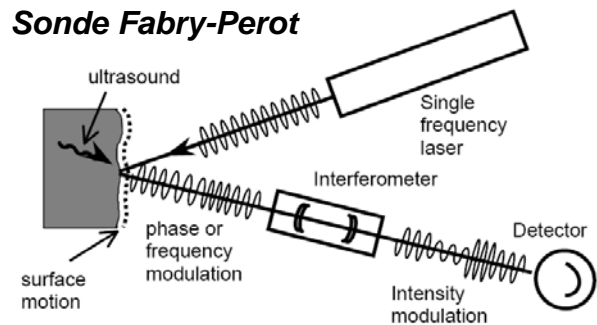
- Technique sans contact
- Combinaison de deux principes

Génération d'Ultrasons par LASER



Détection d'Ultrasons par LASER

Sonde Fabry-Perot



Efficacité de génération dépend de

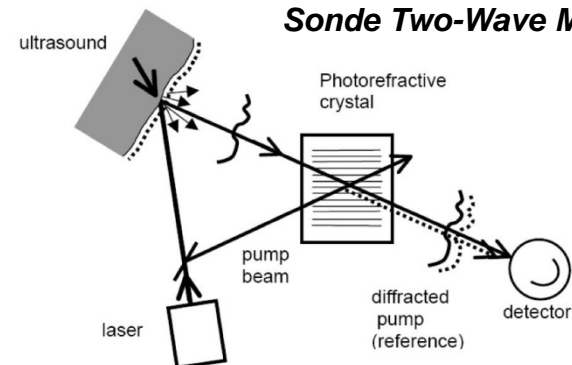
- Du matériau
- La longueur d'onde du laser
- La densité d'énergie de l'impulsion (en restant < seuil d'ablation)

CO₂-TEA : 10.6 μm

YAG : 1064-532 nm

OPO : 3.2-3.5 μm \longrightarrow *composites*

Sonde Two-Wave Mixing



Les ultrasons par Laser

- Systèmes industriels

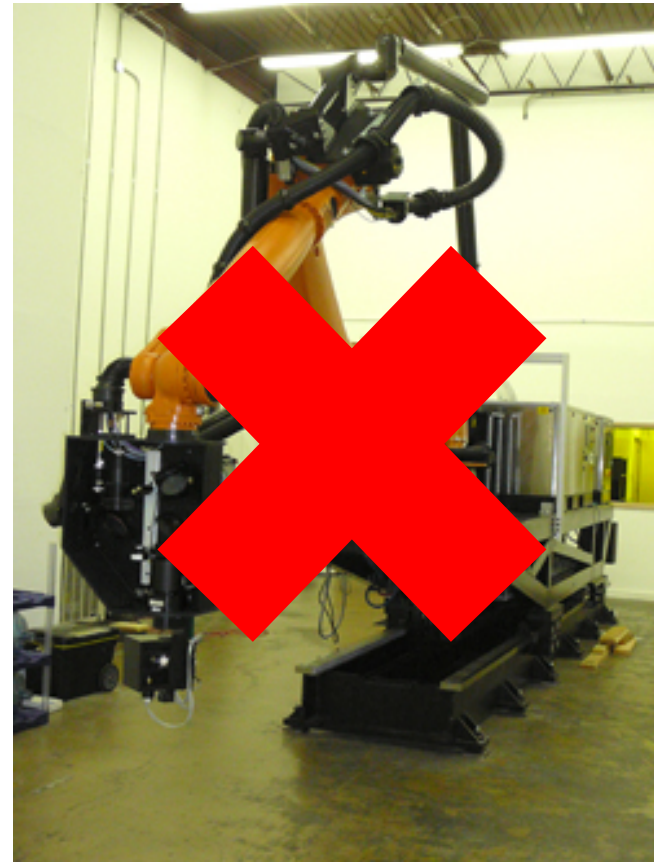
LUIS (commercialisé par UltraOptec puis TECNAR)



Lockheed Martin (USA)



LUCIE (Tecnocampus, Nantes)



www.tecnar.com
www.iphoton.com

...

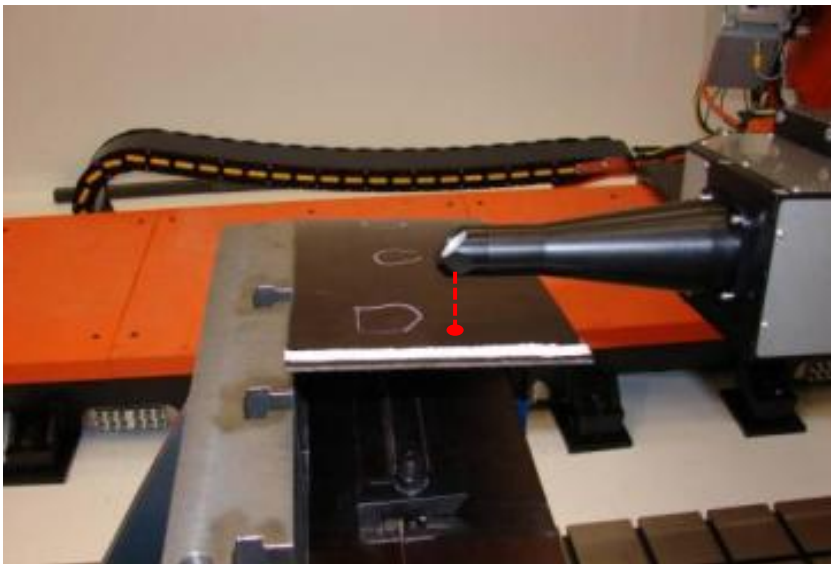
Les ultrasons par Laser

- Systèmes industriels



CTA Montreal

- Generation : pulsed CO2 laser (10.6 μm)
- Detection : pulsed YAG laser (1064 nm)
- Probe TWM
- repetition rate : 100 Hz
- Laser Spot : 2 mm
- Scanning step : 0,5 mm
- manufacturer TECNAR



Les ultrasons par Laser

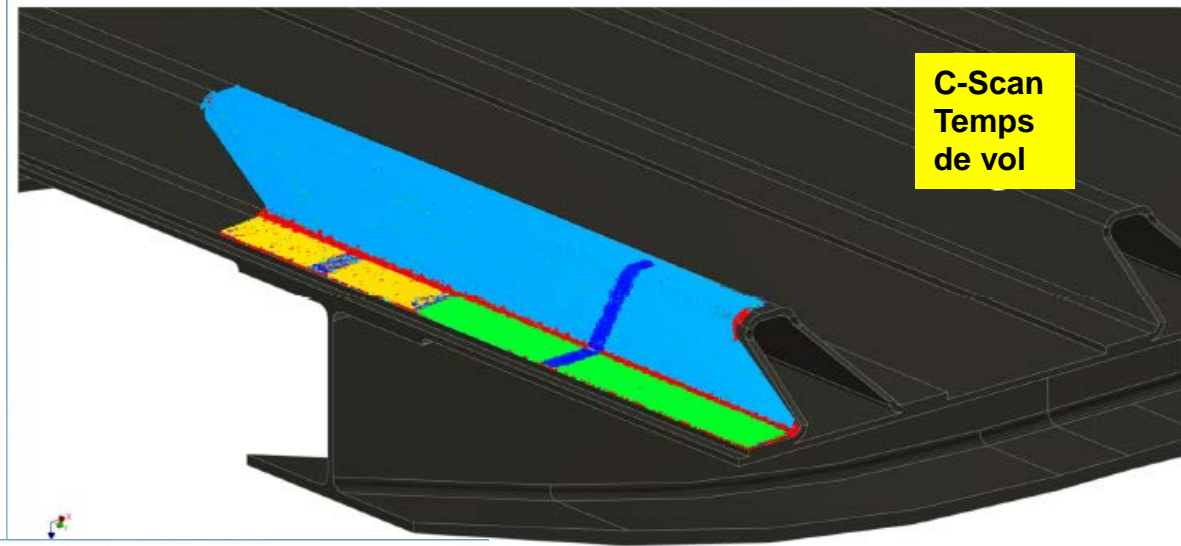
- Premiers essais sur nos échantillons

CTA Montréal



Les ultrasons par Laser

- Premiers essais sur nos échantillons



C-Scan
Temps
de vol



C-Scan
Amplitude

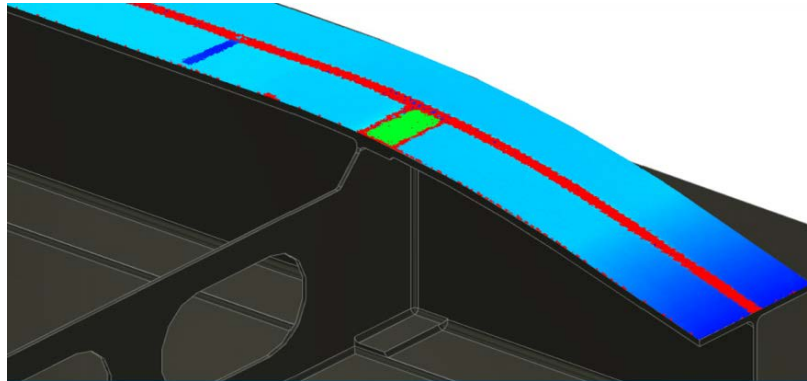
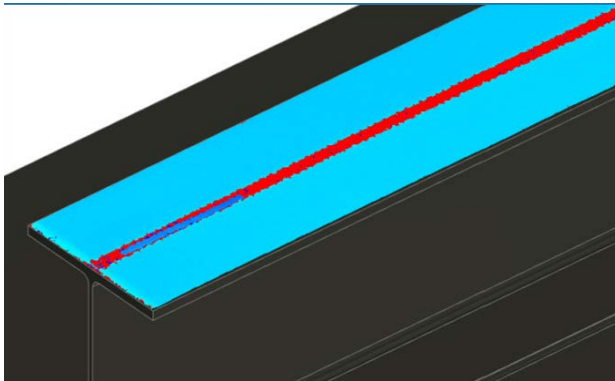


Les ultrasons par Laser

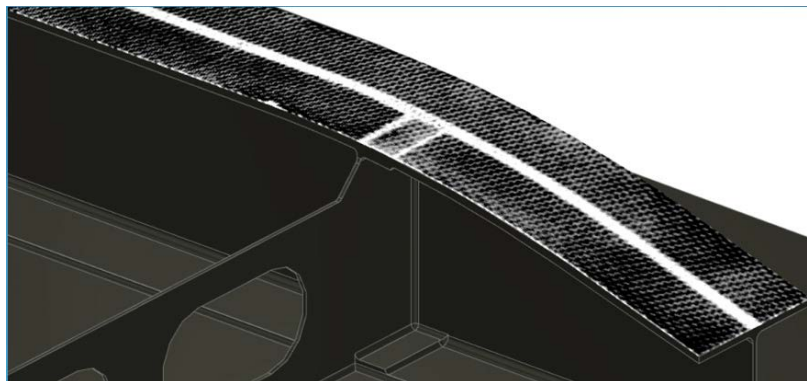
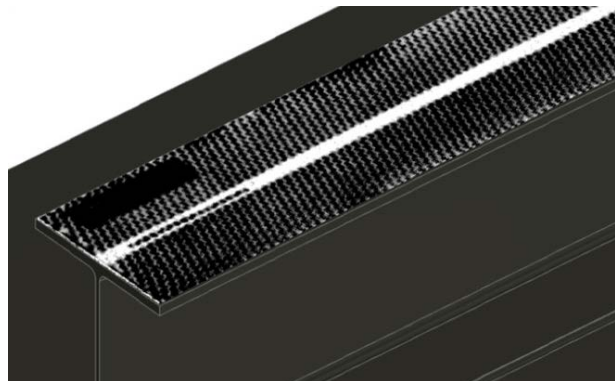
- Premiers essais sur nos échantillons



CTA
Montréal



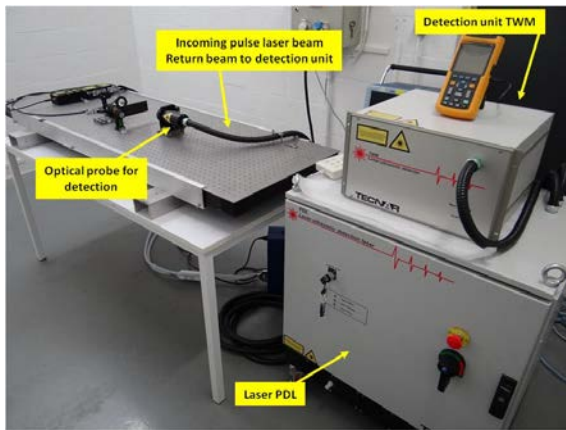
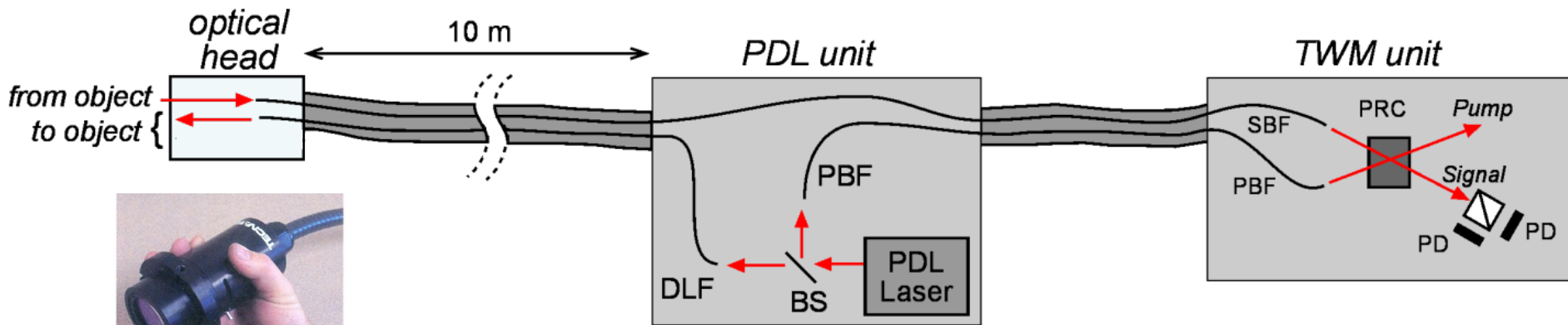
C-Scan
Temps de vol



C-Scan
Amplitude

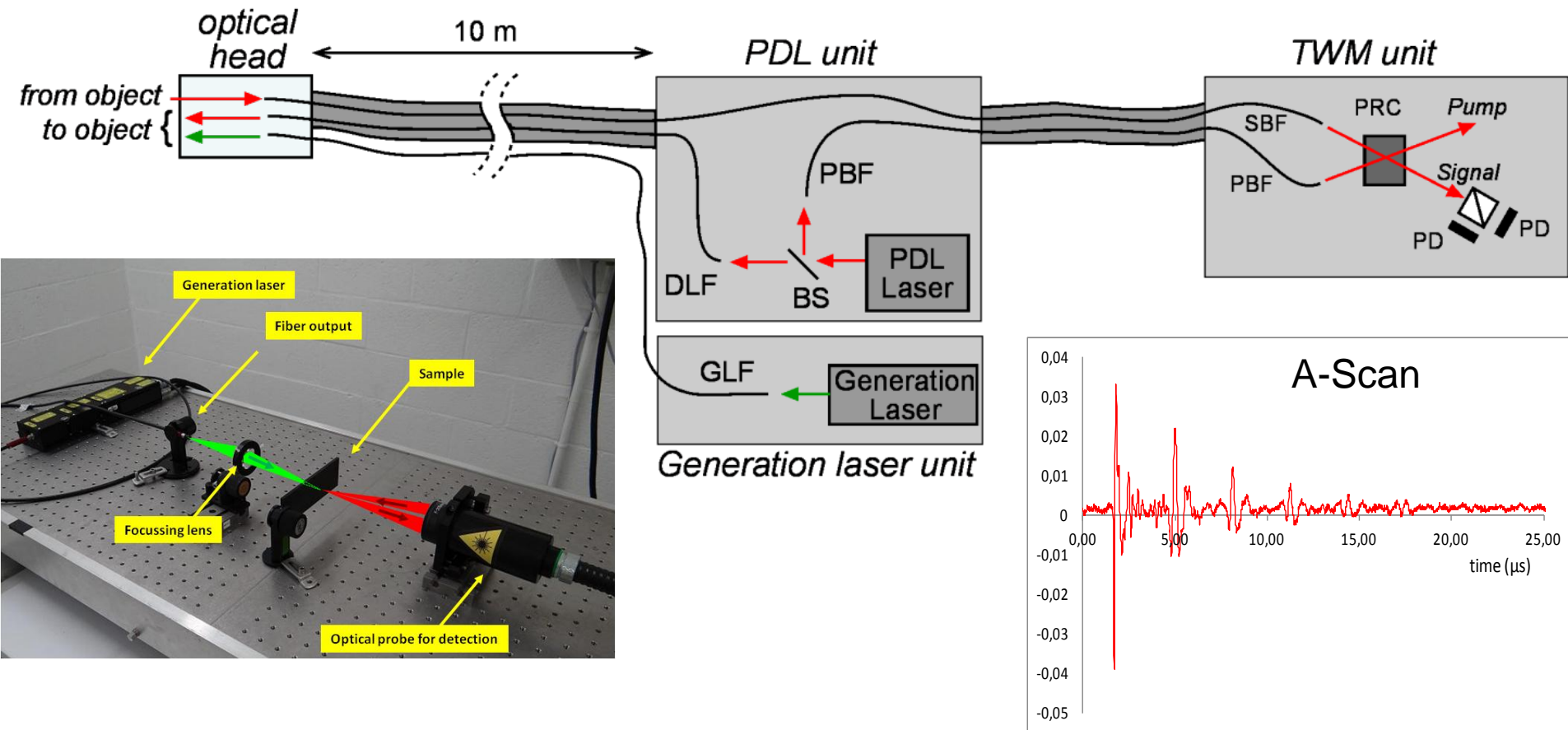
Les ultrasons par Laser

- Développement Ultrasons Laser au CSL : Détection
 - Laser PDL Tecnar avec sonde TWM
 - Flexibilité OK → 10 m de fibres optiques
 - Longueur d'onde : 1064 nm



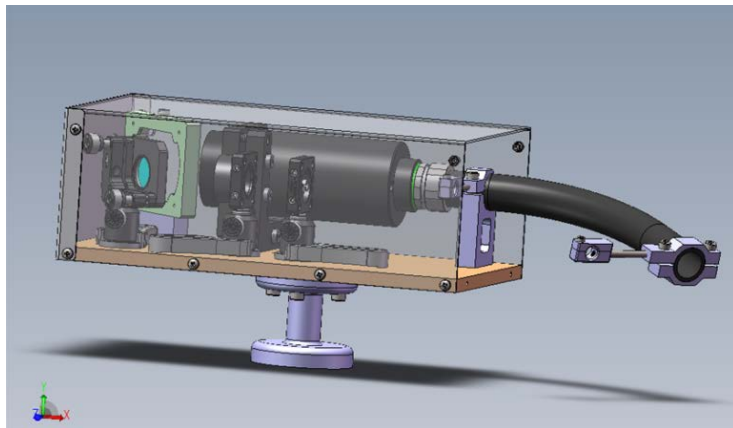
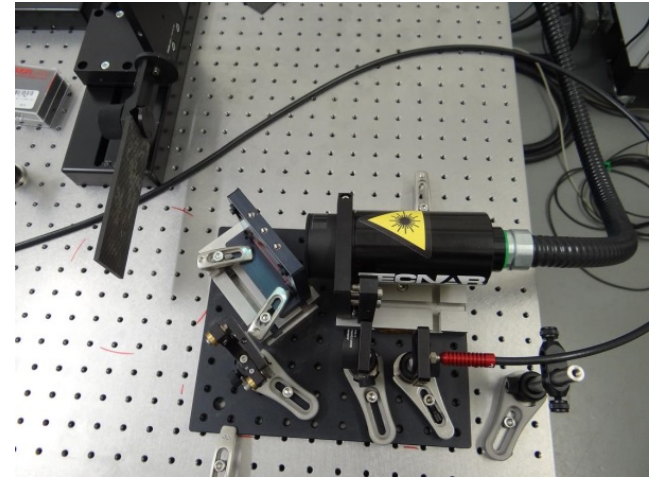
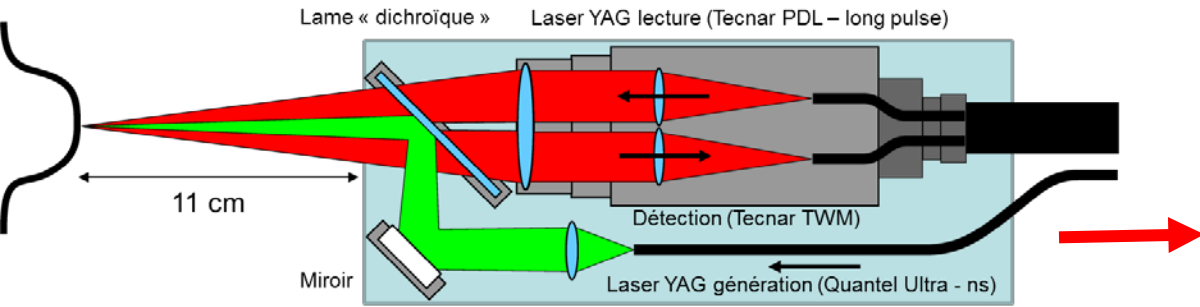
Les ultrasons par Laser

- Développement Ultrasons Laser au CSL : Génération
 - Laser Ultra 50 de Quantel
 - Fibre optique spéciale
 - Longueur d'onde : 532 nm



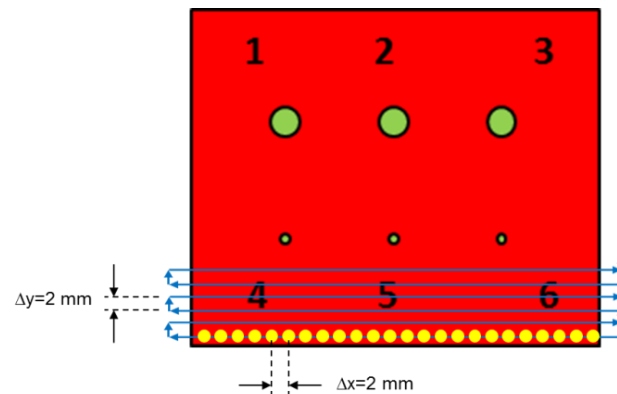
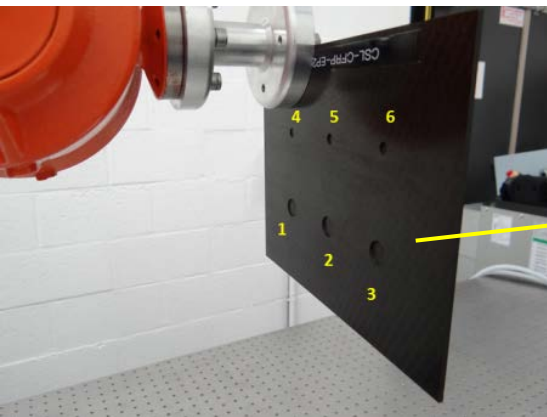
Les ultrasons par Laser

- Couplage des deux systèmes

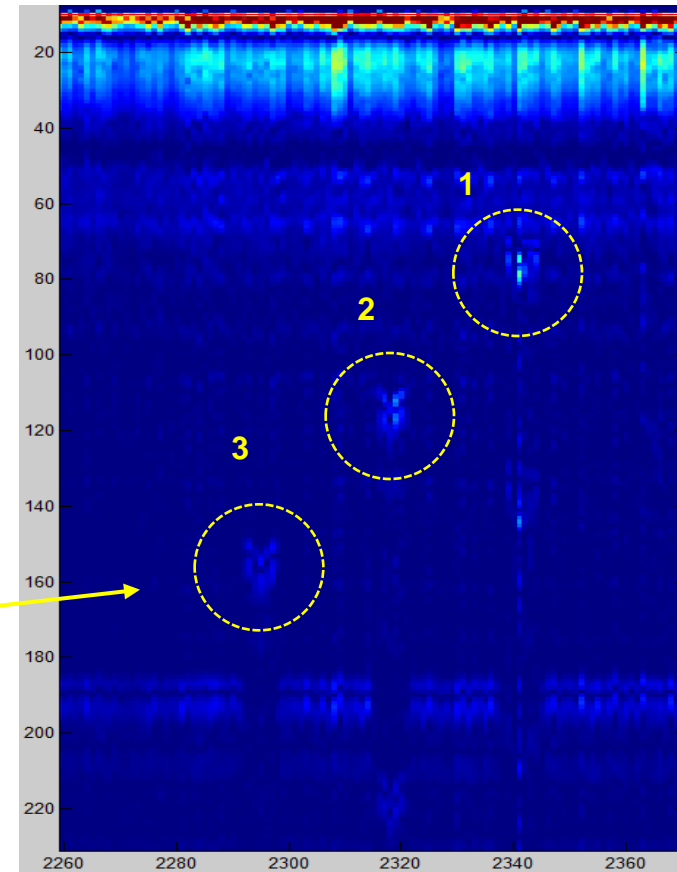


Les ultrasons par Laser

- Développement d'une installation d'inspection robotisée
 - Essais sur éprouvettes planes et trous à fond plat
 - Balayage robot simplifié (X-Y)
 - Traitement simple des signaux



B-Scan

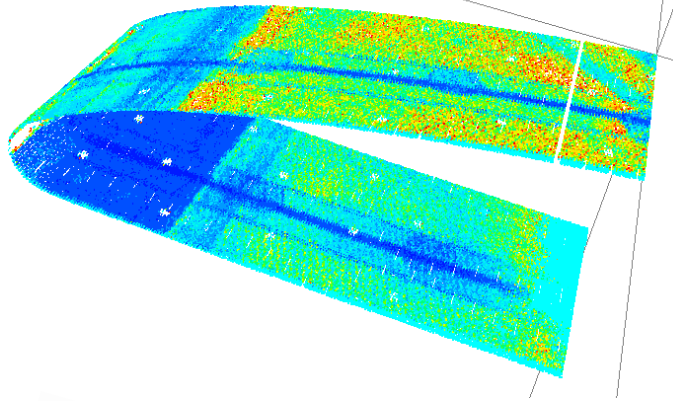


Les ultrasons par Laser

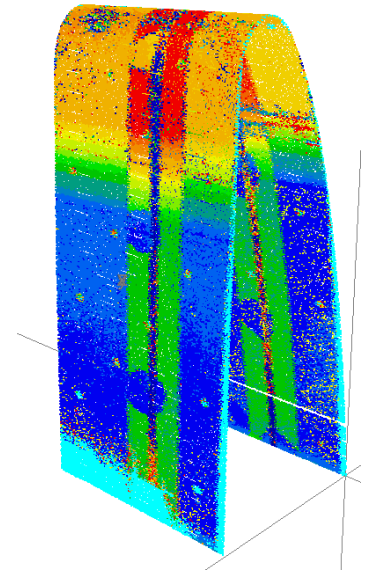
- Développement d'une installation d'inspection robotisée
 - Inspection d'échantillons complexes



C-Scan Amplitude



*Carte des défauts
sous différents angles*



C-Scan Time of Flight

