

# Contrôle non destructif champ complet. Techniques et applications

Dr. Marc GEORGES  
Centre Spatial de Liège-Université de Liège  
Liege Science Park, 4031 Angleur (Belgique)  
[mgeorges@ulg.ac.be](mailto:mgeorges@ulg.ac.be)

## 1 Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND), en anglais Non Destructive Testing (NDT), est un domaine qui regroupe différentes techniques visant à évaluer les propriétés de matériaux, composants, ou systèmes/structures complètes, sans les endommager, à différents stades de leur cycle de vie (fabrication, tests de validation, inspection durant la maintenance, etc).

Ce vocable peut se décliner sous différentes appellations, selon les techniques, les applications visées ou les secteurs industriels concernés. Les termes varient aussi en fonction de la langue et des pays. Ainsi, dans le monde francophone, nous trouverons le terme Essais Non Destructifs (END). Dans le monde anglo-saxon, nous trouvons aussi les termes Non destructive Inspection (NDI) et Non Destructive Evaluation (NDE). Il n'est pas très utile ici de discourir des spécificités de chacune des appellations. Par contre, il est utile de mentionner que ce domaine d'activité est très bien représenté par des organismes qui organisent séminaires, conférences et formations. Ainsi, en France, on trouve la COFREND (Confédération Française pour les Essais Non Destructifs) [1] et aux Etats-Unis, l'ASNT (American Society for Nondestructive Testing) [2].

Dans ce cours, nous parlerons uniquement des techniques de CND sans contact et qui font appel à de l'imagerie. Les techniques que nous détaillerons sont les techniques interférométriques et la thermographie.

## 2 Les techniques interférométriques

### 2.1 Préambule

Parmi les techniques, on retrouve parmi celle-ci l'interférométrie holographique [3,4], l'interférométrie de speckle [4] et la shearographie [7]. Dans tous les cas, ces techniques permettent d'observer les champs de déplacement d'un objet subissant une contrainte thermique, mécanique ou de toute nature que ce soit. Le signal observé est un interférogramme dont l'intensité en chaque point  $(x,y)$  du plan d'observation est donnée par :

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

avec  $I_{moyen}(x, y)$  l'intensité moyenne de l'interférogramme,  $m(x, y)$  le contraste des franges et  $\Delta\varphi(x, y)$  la différence de phase induite par la stimulation de l'objet et qui peut être reliée au déplacement de chaque point de la surface de l'objet.

L'interférogramme est une figure de franges claires et sombres superposées à l'image de l'objet, chacune de ces franges étant une zone d'iso-déplacement subi par l'objet (à l'instar des courbes de niveau sur une carte topographique). Dans ce chapitre, nous allons décrire les différentes techniques interférométriques utilisées en CND: l'interférométrie holographique analogique, l'interférométrie

de speckle, l'interférométrie holographique numérique et la shearographie. Ensuite nous passerons en revue les applications principales de celles-ci dans le domaine du CND.

Avant de les détailler, il est bon de noter que nous parlerons d'interférogrammes observés dans le plan du système d'observation  $(x, y)$ . Cependant, il y aura une correspondance de ce plan avec le plan  $(\xi, \eta)$  dans lequel se situe l'objet (supposant un dispositif d'imagerie idéal). On utilisera aussi dans certains cas un plan intermédiaire  $(x', y')$  dans lequel se situe, par exemple, un support holographique. La situation est montrée à la Figure 1.

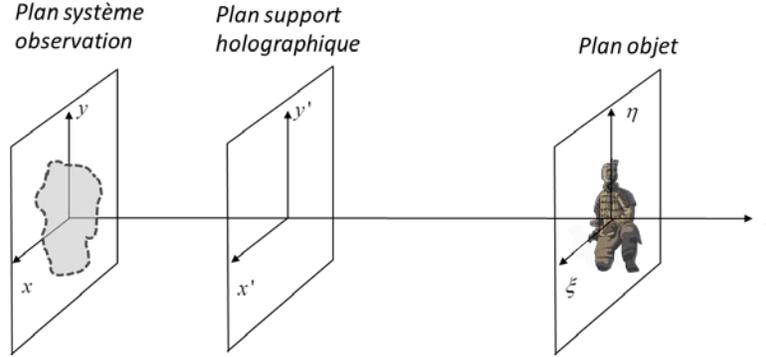


Figure 1. Conventions géométriques

## 2.2 Description des techniques

### 2.2.1 L'interférométrie holographique analogique

L'interférométrie holographique est une technique qui nécessite deux étapes. Tout d'abord, l'enregistrement de l'hologramme de l'objet testé à un instant donné et ensuite sa restitution en même temps que l'objet s'est déplacé/déformé à un instant ultérieur. Détaillons ces deux étapes.

Tout d'abord, le principe de l'enregistrement holographique qui est illustré dans la Figure 2. Le faisceau laser est séparé en un faisceau objet et un faisceau référence. Le faisceau objet illumine l'objet testé; la lumière diffusée par l'objet (onde  $U_o(\xi, \eta)$ ) arrive sur un support d'enregistrement (onde  $U_o(x', y')$ ) où elle interfère avec le faisceau référence (onde  $U_R(x', y')$ ) pour créer un hologramme. L'interférence locale au niveau du support holographique s'écrit comme

$$H(x', y') = (U_R(x', y') + U_o(x', y')) \cdot (U_R^*(x', y') + U_o^*(x', y')) \quad (2)$$

$$= I_R(x', y') + I_o(x', y') + 2\sqrt{I_R(x', y')I_o(x', y')} \cos(\phi_R(x', y') - \phi_o(x', y')) \quad (3)$$

où les intensités des ondes références et objets sont définies respectivement par

$$I_R(x', y') = U_R(x', y') \cdot U_R^*(x', y') = |U_R(x', y')|^2$$

$$I_o(x', y') = U_o(x', y') \cdot U_o^*(x', y') = |U_o(x', y')|^2$$

Le déphasage entre l'onde objet et l'onde référence au niveau du support d'enregistrement holographique se retrouve dans le terme d'interférence (3<sup>e</sup> terme de (3)).

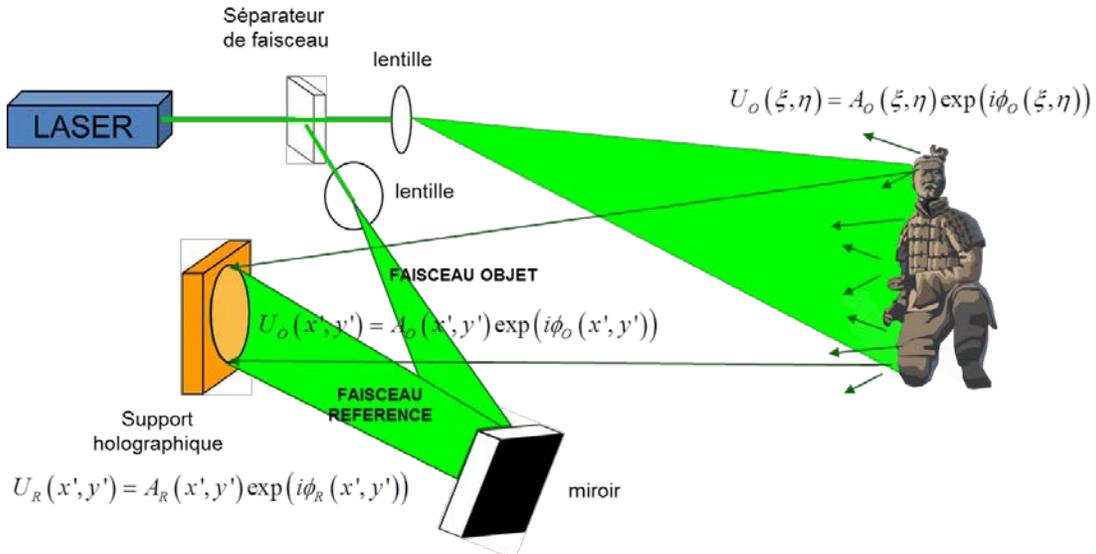


Figure 2. Principe de l'enregistrement holographique

L'hologramme peut s'enregistrer de différentes manières, en fonction du processus mis en jeu dans le support holographique. Tout d'abord, notons que l'éclairement du support  $I(x', y')$  transforme la transmission complexe du matériau  $\tau(x', y') = T(x', y') \cdot \exp(i\vartheta(x', y'))$ , comme le montre la Figure 3. On retrouve le cas où l'hologramme s'enregistre sous forme de variation de l'absorption  $\alpha(x', y')$ , donnant lieu à un hologramme en amplitude. Les deux autres cas, variation de l'épaisseur  $h(x', y')$  et de l'indice de réfraction  $n(x', y')$ , donnent lieu aux hologrammes en phase.

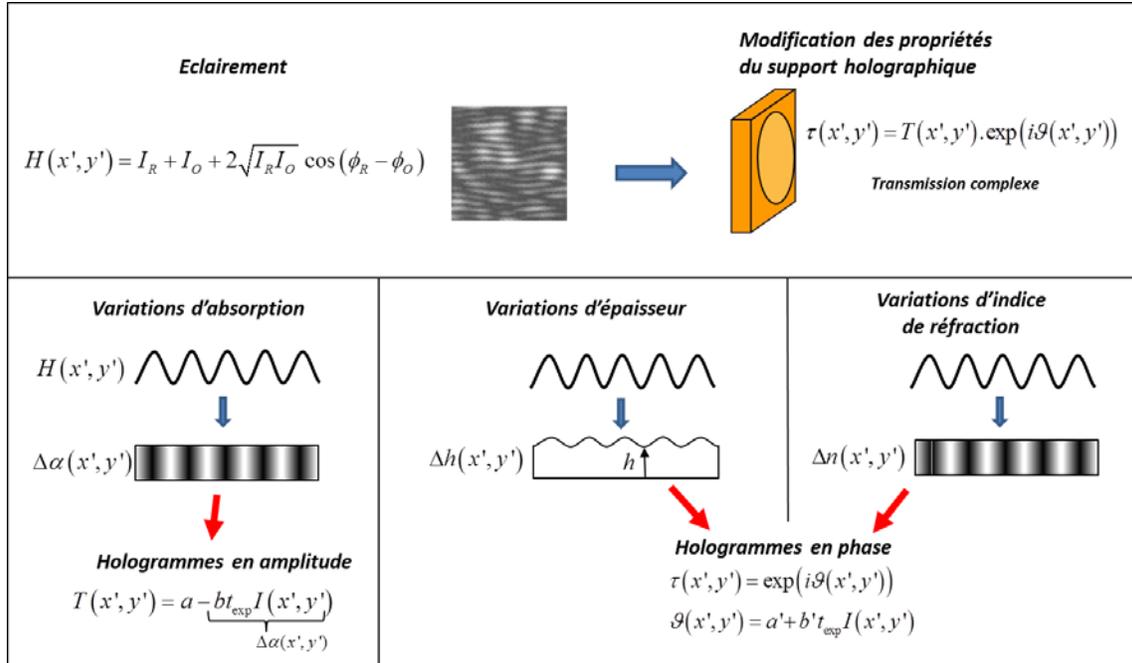


Figure 3. Différents mécanismes d'enregistrement holographique

Par exemple, les plaques holographiques argentiques permettent l'enregistrement d'hologrammes par variations de l'absorption ou de l'indice de réfraction (selon le processus de traitement chimique), les cristaux photoréfractifs permettent essentiellement des variations d'indice de réfraction. Nous n'entrerons pas dans les détails des différents matériaux holographiques ici.

La seconde étape est l'étape de restitution holographique et est montrée à la Figure 4. Le faisceau référence est identique à celui utilisé à l'étape d'écriture. Il permet la diffraction par l'hologramme de différentes ondes. Le processus de diffraction par le support holographique dépend très fort du type d'hologrammes (en amplitude ou en phase).

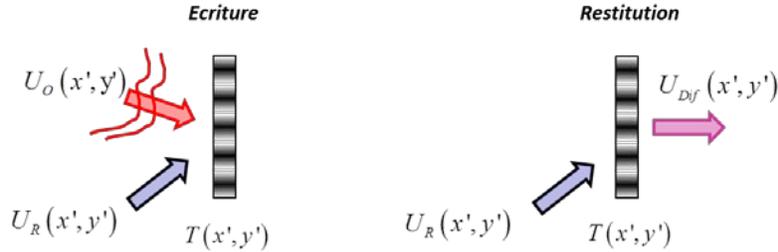


Figure 4. Principe de la restitution holographique

Le champ de l'onde diffractée  $U_{Dif}$  est donné par la projection de l'onde référence sur la transmission complexe, c'à d

$$U_{Dif}(x', y') = T(x', y') \cdot U_R(x', y') \quad (4)$$

Dans le cas simple de l'hologramme en amplitude, la transmission complexe  $T(x', y')$  est proportionnelle à l'éclairement  $H(x', y')$ , donnée par (2) et (3). On en déduit qu'il existe 4 termes dans le faisceau diffracté et qui se schématisent selon la Figure 5. La composante (1) est appelée "ordre 0" et représente essentiellement le faisceau référence transmis par l'hologramme. La composante (2) est appelée "halo". La composante (3) est proportionnelle au conjugué du faisceau objet ("ordre +1") et la composante (4) reproduit l'onde objet ("ordre -1"). Cette dernière composante est celle qui nous intéresse en interférométrie holographique. En effet, en plaçant un dispositif d'observation après l'hologramme, on pourra observer l'image restituée de l'objet. Dans la suite, nous ferons abstraction des autres ordres de diffraction et ne considérerons plus que l'ordre -1.

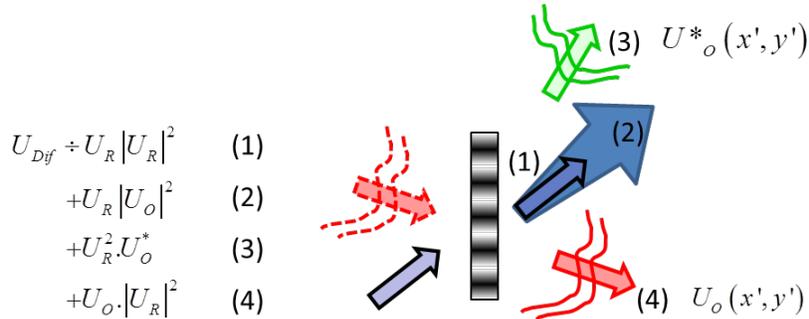


Figure 5. Ordres de diffraction par un hologramme

La Figure 6 illustre le principe de l'interférométrie holographique: l'hologramme une fois enregistré est utilisé dans la même configuration qu'à l'enregistrement. Il diffracte à l'ordre -1 l'image de l'objet tel qu'il était à l'enregistrement (ici la statuette en pointillé). En même temps, l'objet est toujours en place mais il est déplacé ou déformé (ici la statuette en trait plein). Dès lors, l'observateur voit 2 images de l'objet: l'image diffractée (onde  $U_{Dif}(x, y)$ ) représentant l'onde objet dans son premier état  $U_o(x, y)$  et l'onde objet actuelle dans son second état  $U'_o(x, y)$ .

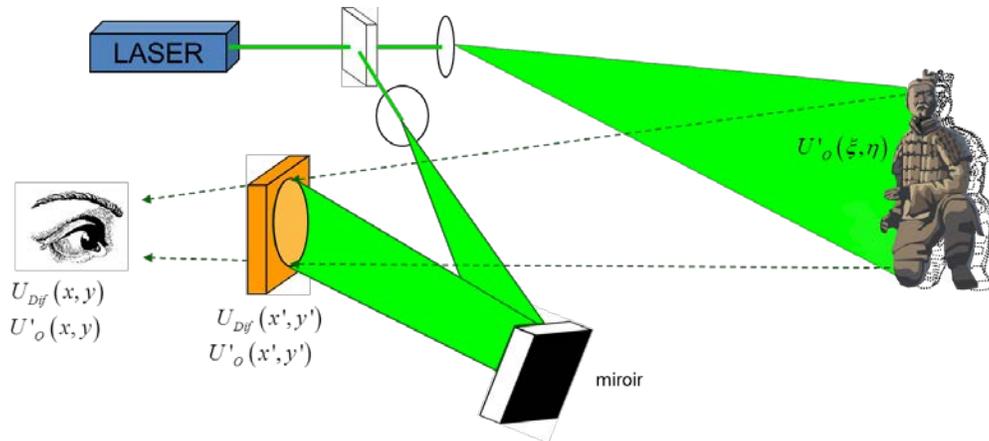


Figure 6. Principe de la restitution holographique avec l'objet déplacé

La superposition de ces deux images crée un interférogramme qui est donné par.

$$I(x, y) = (U_o(x, y) + U'_o(x, y)) \cdot (U_o^*(x, y) + U'^*_o(x, y)) \quad (5)$$

Cette expression donne lieu à une figure d'intensité du type (1) :

$$I(x, y) = I_{moyen}(x, y) [1 + m(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y))] \quad (6)$$

Avec

$$I_{moyen}(x, y) = I_o(x, y) + I'_o(x, y), \quad (7)$$

$$m(x, y) = 2\sqrt{I_o(x, y)I'_o(x, y)} / (I_o(x, y) + I'_o(x, y)) \quad (8)$$

$$\Delta\phi(x, y) = \phi_o(x, y) - \phi'_o(x, y) \quad (9)$$

respectivement l'intensité moyenne de l'interférogramme, le contraste et le déphasage entre l'onde objet dans ses 2 états.

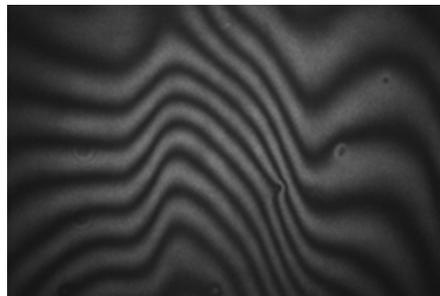


Figure 7. Interférogramme typique observé en interférométrie holographique

## 2.2.2 Interférométrie de speckle

La complexité du processus de traitement physico-chimique des supports holographiques a fait qu'une technique plus simple s'est développée, grâce à l'avènement des capteurs matriciels électroniques d'images, tels les caméras CCD et CMOS dans le domaine visible.

Cette technique, souvent dénommée ESPI/DSPI (de l'anglais Electronic/Digital Speckle Pattern Interferometry) ou encore TV-Holography, est basée sur le phénomène granularité laser (ou tavelure), mais nous utiliserons son équivalent anglais "speckle", plus courant. Le speckle est une figure d'interférence constituée de points clairs et sombres ayant une amplitude et une phase

aléatoire. Ce phénomène apparaît lorsqu' une surface rugueuse est éclairée par un faisceau cohérent, comme un laser. Pour observer le speckle, les défauts de la surface doivent avoir une taille comparable à la longueur d'onde du laser. La taille des grains de speckle est ajustée à l'aide d'un diaphragme (généralement inclus dans l'objectif de la caméra CCD): plus le diaphragme est fermé, plus les grains sont larges.

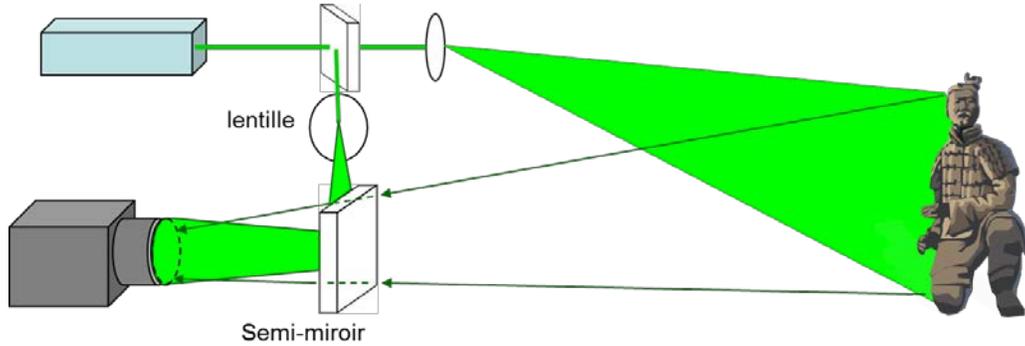


Figure 8. Principe de l'interférométrie de speckle

Le principe de l'interférométrie de speckle est illustré à la Figure 8. Le faisceau laser est séparé en un faisceau objet et un faisceau référence. Le faisceau objet illumine l'objet testé; la lumière diffusée par l'objet interfère avec le faisceau référence au niveau du recombineur de faisceaux ce qui permettra d'extraire la phase de chaque point de la surface de l'objet.

Dans cette technique, il n'y a plus d'hologramme intermédiaire. L'interférence entre le faisceau objet et référence, que nous appellerons ici "specklegramme" (au lieu d'hologramme) a exactement la même expression que (2) et (3), mais en la considérant au plan  $(x, y)$  :

$$\begin{aligned} Sp(x, y) &= I_R(x, y) + I_O(x, y) + 2\sqrt{I_R(x, y)I_O(x, y)} \cos(\phi_R(x, y) - \phi_O(x, y)) \\ &= Sp_{moyen}(x, y) [1 + m_{sp}(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y))] \end{aligned} \quad (10)$$

Ce specklegramme représente l'état initial de l'objet. Une stimulation est ensuite appliquée à l'objet testé, par exemple mécanique ou thermique, la figure de speckle est modifiée et un nouveau specklegramme est enregistré par la caméra CCD.

$$Sp'(x, y) = Sp'_{moyen}(x, y) [1 + m'_{sp}(x, y) \cos(\Delta\phi'(x, y))] \quad (11)$$

La soustraction de ces deux specklegrammes donne un interférogramme avec ses franges d'iso-déplacement. Si on suppose que la phase du référence n'a pas bougé entre les deux acquisitions, on obtient

$$I(x, y) = |Sp_1 - Sp_2|(x, y) \div \sin\left[\frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right] \quad (12)$$

Où  $\Delta\phi(x, y) = \phi_o(x, y) - \phi'_o(x, y)$ . La Figure 9 montre un interférogramme typique obtenu par interférométrie de speckle.

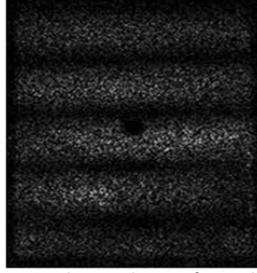


Figure 9. Interférogramme typique observé par interférométrie de speckle

Comme pour l'interférométrie holographique, cette technique permet de mesurer les déplacements de la surface de l'objet. Les avantages de l'interférométrie de speckle par rapport à l'interférométrie holographique sont une mise en œuvre plus simple (pas de support d'enregistrement), une moins grande sensibilité aux perturbations extérieures (pas d'enregistrement d'hologramme qui nécessite une bonne stabilité pendant plusieurs secondes). Par contre les interférogrammes sont plus bruités qu'en interférométrie holographique à cause de la présence du speckle.

### 2.2.3 L'interférométrie holographique numérique [5]

L'holographie numérique, à l'instar de l'interférométrie de speckle, utilise aussi l'enregistrement de l'hologramme directement sur le capteur de la caméra, sans support holographique intermédiaire. Cependant, la différence réside dans le traitement de l'information enregistrée. Aussi, la configuration expérimentale de l'holographie numérique ne nécessite pas nécessairement de placer une lentille devant le capteur, comme le montre la Figure 10.

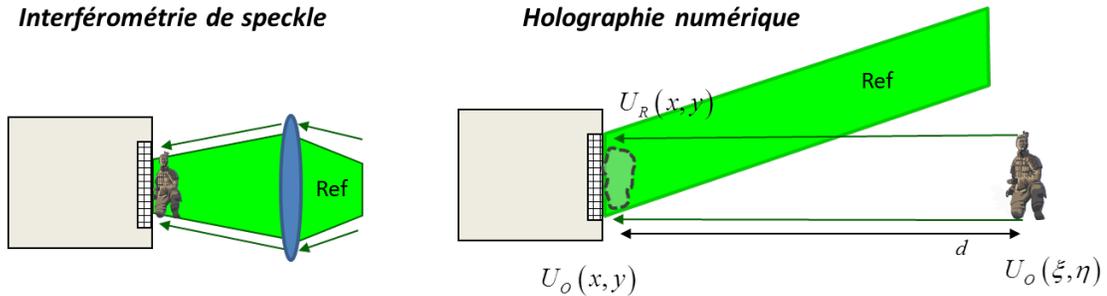


Figure 10. Différence expérimentale entre interférométrie de speckle et holographie numérique

En holographie numérique, le capteur permet d'enregistrer l'interférence de l'onde référence  $U_R(x, y)$  avec l'onde objet  $U_o(x, y)$  qui s'est propagée depuis l'objet (initialement  $U_o(\xi, \eta, d)$ ) pour l'objet situé à une distance  $z=d$ . Comme le montre la Figure 11, un point situé sur le capteur en  $z=0$  reçoit la lumière provenant de tous les points de l'objet. Dès lors, on peut l'exprimer par l'intégrale de Kirchoff, qui s'approxime par l'intégrale de Fresnel lorsque la distance à l'objet est grande. Nous resterons ici dans ce cas de figure.

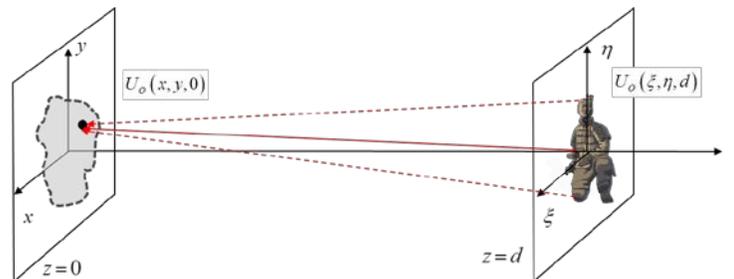


Figure 11. Propagation de la lumière d'un objet situé à un plan  $z=d$  du capteur situé en  $z=0$ .

Pour reconstruire l'image holographique de l'objet, telle qu'il est au plan  $z=d$ , il faut considérer la propagation selon l'intégrale de Fresnel du champ lumineux reçu en  $z=0$ . Ce dernier est le produit de l'intensité de l'hologramme enregistré  $H(x, y)$  (qui s'exprime comme (2)) et du faisceau référence tel que celui qui a été utilisé lors de l'enregistrement, c'ad  $U_R(x, y)$ . Ainsi on écrit:

$$U_o(\xi, \eta, z = d) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, y) U_R(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (\xi x + \eta y)\right] dx dy \quad (13)$$

La double intégrale revient en fait à calculer la Transformée de Fourier du produit  $H(x, y)U_R(x, y)\exp\left[-i(x^2 + y^2)\pi/\lambda d\right]$  et dans le cas d'une image échantillonnée, à une Transformée de Fourier discrète rapide (FFT). Cela donne lieu à des ordres de diffraction similaires à ceux observés en holographie analogique. Cependant, ici ils apparaissent numériquement sur un écran, après le calcul ci-dessus. La Figure 12 montre la reconstruction holographie sur base d'une expérience holographique simulée, où l'objet est le sigle CSL. On retrouve bien 4 contributions, comme en holographie analogique. Dans ce cas-ci, le faisceau référence arrive perpendiculairement au centre du capteur et l'objet à un certain angle d'incidence. Dès lors le terme (1), représentant le faisceau référence, apparaît au centre du plan de reconstruction. Le terme (2) de halo est clairement visible autour du précédent. Le terme (3) est l'image réelle de l'objet et apparaît nettement en bas à droite, tandis que le terme (4) apparaît flouté de manière symétrique au terme (3) par rapport au centre du plan de Fourier.

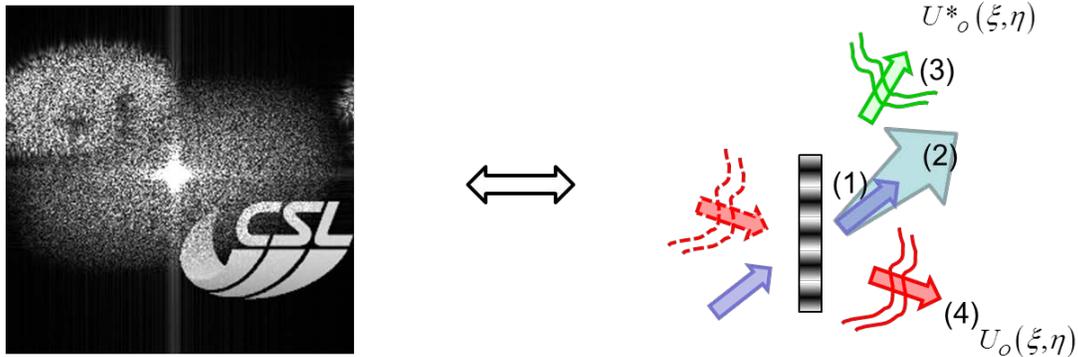


Figure 12. Reconstruction numériques des ordres de diffraction.

Seul le terme (3) nous intéresse. Pour qu'il apparaisse net, il faut que la distance de reconstruction  $z=d$  soit choisie égale à la distance qu'occupait réellement l'objet dans le montage. L'intérêt de l'holographie numérique est qu'elle permet de reconstruire des scènes 3D plan par plan, en ajustant simplement la distance de reconstruction.

Une étape importante est de filtrer les termes inutiles, afin de ne garder que l'image de l'objet. Il existe plusieurs stratégies pour cela. La Figure 13 de gauche montre le cas non filtré. Au centre est illustrée la suppression du pic d'ordre 0. Dans l'équation (13), l'hologramme  $H(x, y)$  est remplacé par un hologramme filtré  $H_{f1}(x, y)$  obtenu en retirant à l'hologramme initial sa moyenne sur toute l'image capturée. Ainsi on supprime une composante continue qui apparaissait comme un pic au centre du plan de Fourier. A droite est illustrée le résultat de la suppression du halo qui nécessite l'acquisition préliminaire de l'intensité du faisceau référence et du faisceau (séparément, en barrant tour à tour chaque faisceau).

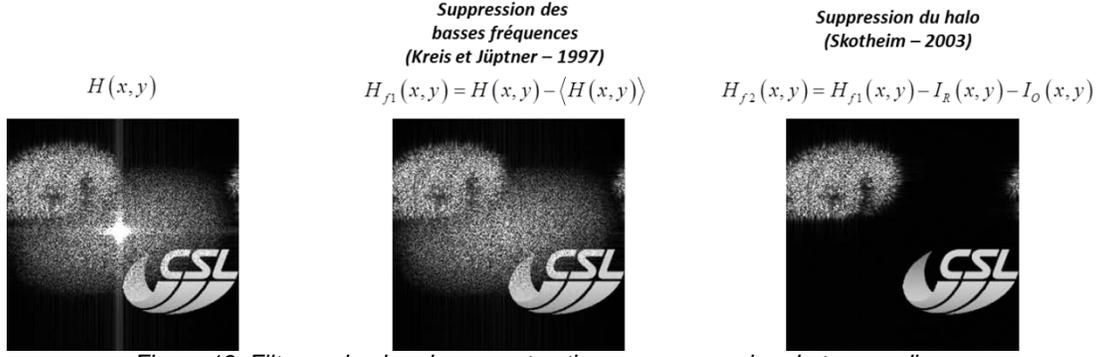
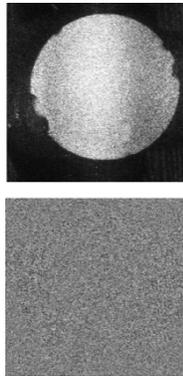


Figure 13. Filtrage du plan de reconstruction par suppression de termes divers.

Une fois filtrée, on peut segmenter le plan de reconstruction pour ne garder que l'image intéressante. On voit tout de suite qu'en faisant cela, on garde une image qui a au mieux une résolution moitié de l'image originale. Cela est dû au fait que l'on travaille en configuration dite "hors-axe", avec un angle entre les faisceaux référence et objet. Si diminue l'angle, et qu'on s'arrange pour que le faisceau référence soit co-aligné avec le faisceau objet (configuration "en ligne"), la Figure 12 suggère de manière évidente que tous les ordres diffractés seront superposés. Il ne sera plus possible alors de retirer l'image reconstruite des autres ordres, comme avec les méthodes simples évoquées ci-dessus. Cependant, l'avantage de la configuration en ligne est qu'elle permettra d'avoir la résolution spatiale maximale, et non pas moitié comme en configuration hors-axe. Il existe alors une procédure de filtrage permettant de retirer l'image: le décalage de phase [6]. Il consiste à acquérir 4 hologrammes décalés en phase de  $\pi/2$  et de former un nouvel hologramme  $H_{dp}(x, y)$  qui remplace l'hologramme dans (13):

$$H_{dp}(x, y) = H_1(x, y) + H_2(x, y). \exp(i\pi/2) + H_3(x, y). \exp(i\pi) + H_4(x, y). \exp(i3\pi/2) \quad (14)$$

La différence majeure entre la configuration hors-axe avec filtrage basique et la configuration en-ligne avec décalage de phase est que, dans la première, le calcul de (13) permet de retrouver la phase de l'onde objet  $U$  sur base d'une seule acquisition holographique. En effet, le résultat de (13) est un nombre complexe on peut retirer deux informations: l'amplitude et la phase, calculée comme suit sur base des parties réelle et imaginaire de (13)



$$A(\xi, \eta) = \sqrt{(\text{Re}(U_o(\xi, \eta)))^2 + (\text{Im}(U_o(\xi, \eta)))^2} \quad (15)$$

$$\phi_o(\xi, \eta) = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}(U_o(\xi, \eta))}{\text{Re}(U_o(\xi, \eta))} \right] \quad (16)$$

Figure 14. Amplitude et phase de l'image holographique reconstruite

En interférométrie holographique numérique, nous devons opérer la différence des phases  $\phi_o(\xi, \eta)$  et  $\phi'_o(\xi, \eta)$  de deux états consécutifs pour déduire le déplacement de l'objet entre ces deux états. En holographie hors-axe, nous pourrions donc traiter des objets instables, en mouvement (par exemple en vibration), tandis qu'en holographie en-ligne, si nous appliquons le décalage de phase, l'objet doit rester stable durant l'acquisition des 4 hologrammes. Nous serons dans ce cas limités aux cas où les

objets se déplacement/déforment lentement. La Figure 15 illustre le principe de l'interférométrie holographique numérique, sur base d'une configuration en-ligne, dans le cas de la mesure de déformation d'un grand miroir spatial lors d'un test cryogénique. Les hologrammes à gauche ont été acquis séquentiellement dans chaque état de l'objet (état de base, puis état déformé). Nous voyons que l'hologramme remplit tout le capteur et que la reconstruction profite de la pleine résolution. On extrait la phase de chaque état et, après masquage et filtrage des parties réelles et imaginaires, nous obtenons un interférogramme de bonne qualité. Les étapes de post-traitements (déroulage de phase et carte de déplacements) seront détaillées dans des sections ultérieures.

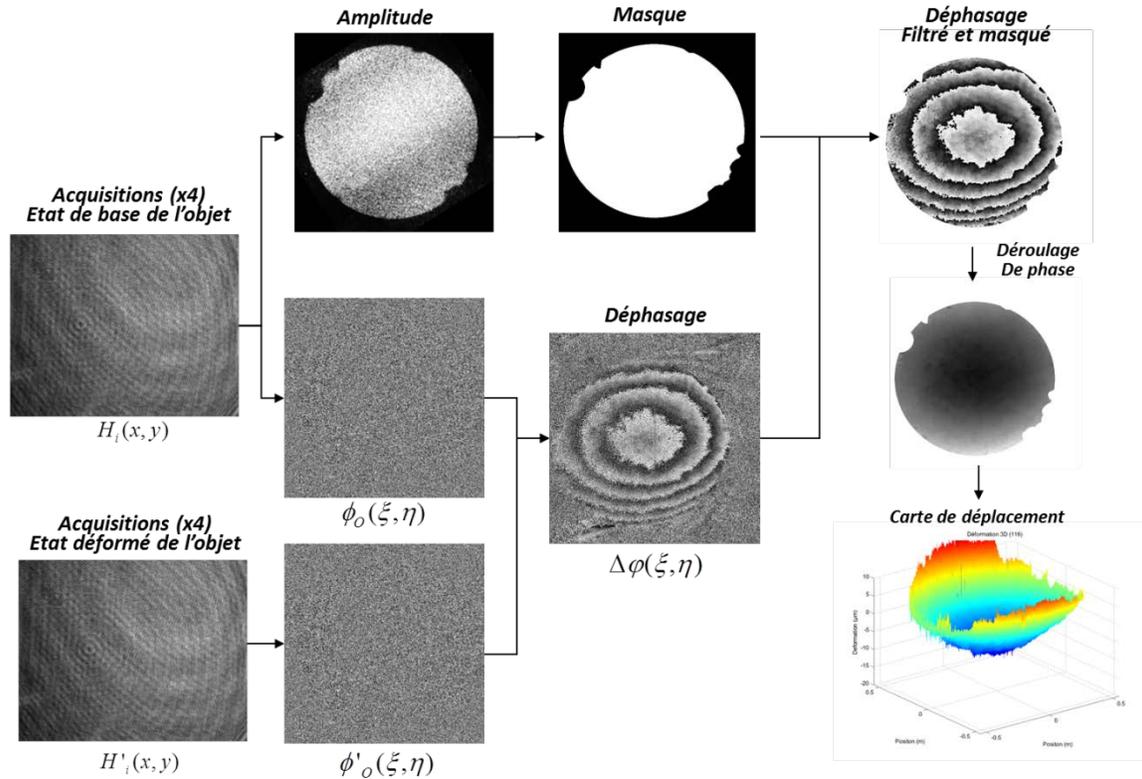


Figure 15. Interférométrie holographique numérique en ligne avec décalage de phase, calcul de la phase et divers post-traitements

## 2.2.4 La shearographie (ou interférométrie différentielle de speckle) [7]

Cette technique est également basée sur le phénomène de speckle. Elle permet de surmonter les limites de l'interférométrie holographique et de speckle en ce qui concerne la sensibilité aux vibrations en utilisant un montage auto-référencé. En effet, les trois techniques présentées ci-dessus utilisant un faisceau référence allant directement du laser sur le capteur (généralement situé sur le même banc), ce faisceau référence ne varie pas beaucoup en phase. Cependant, si le système holographique/speckle se situe sur un trépied à une certaine distance de l'objet, les infimes variations de phase du faisceau objet vont faire en sorte que la figure d'interférence entre les deux faisceaux, et qui permet l'enregistrement de l'hologramme  $H$  ou du specklegramme  $Sp$ , est instable dans le temps. On considère que les variations de chemins optiques de l'ensemble du montage doivent être inférieures au dixième de la longueur d'onde du laser utilisé durant la capture de l'hologramme/specklegramme, soit en lumière visible à environ 50 nm. C'est une contrainte importante qui a conduit au fait que l'holographie n'est généralement pas (ou très peu) adaptée au milieu industriel. Dès lors, différentes solutions ont été mises en oeuvre pour y pallier. L'une d'elles

est la technique de shearographie qui n'utilise pas de faisceau référence. Dès lors, toute variation de phase du faisceau objet sera perçue de manière identique par les deux faisceaux avant recombinaison et le shearogramme restera stable, assurant une bonne immunité en milieu industriel.

Le principe de la shearographie est illustré à la Figure 16. L'objet testé est illuminé par un faisceau laser. La lumière diffusée par l'objet arrive sur un dispositif de cisaillement (« shear » en anglais). Il en existe différents types. Le plus commun est montré à la Figure 16 et est un interféromètre de Michelson qui comporte un séparateur de faisceau qui sépare le faisceau objet en deux. Chacune des deux parties poursuit son chemin vers un miroir (M1 ou M2) puis est renvoyée par au travers du séparateur vers un dispositif d'imagerie. Ce dernier reçoit donc les deux images de la scène. Un des miroirs est légèrement incliné de manière à ce qu'il existe deux images de la scène décalées latéralement (ici dans la direction horizontale  $x$ ). Ce cisaillement peut être réglé en direction et en amplitude. Ces deux images se superposent au niveau de la caméra CCD et interfèrent. La fonction d'interférence (17) est appelée "shearogramme" et revêt la même forme que l'hologramme ou le specklegramme, à ceci près que le déphasage porte sur l'onde avec elle-même décalée.

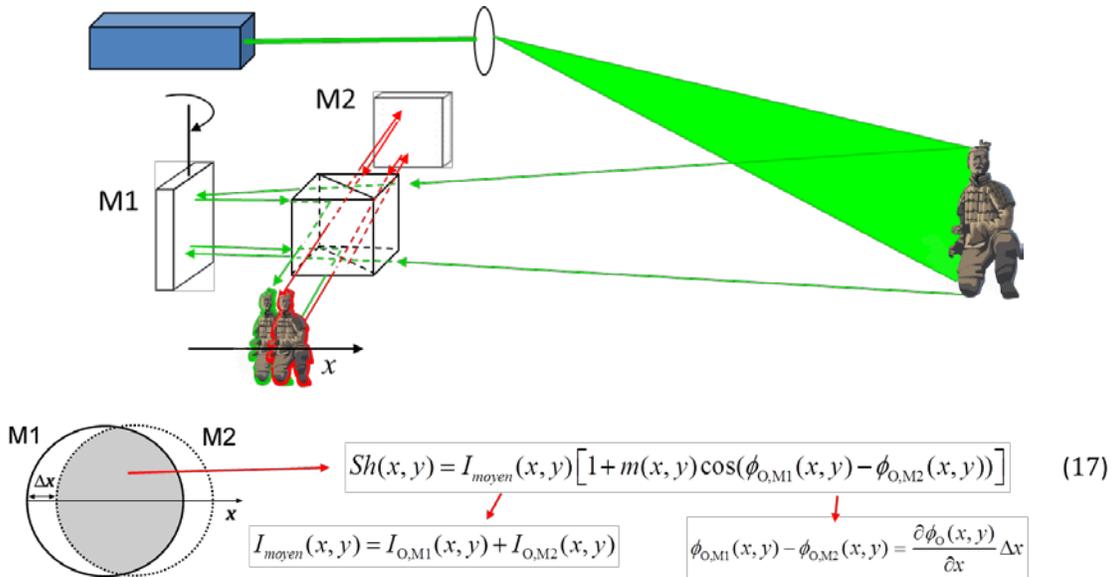


Figure 16. Principe de la shearographie

Comme pour les autres techniques numériques (speckle et holographie numérique), on enregistre un shearogramme à un instant donnée, puis un second plus tard quand l'objet s'est déformé. On obtient alors un interférogramme. Nous allons maintenant discuter de la manière d'interpréter ces interférogrammes et le déphasage en termes de déplacement.

### 2.2.5 Quantification du déphasage

Pour toutes les techniques interférométriques décrites ci-dessus, l'interférogramme (1) est le signal de base. Il contient l'information importante qui est la différence de phase  $\Delta\varphi$  et qui doit être calculée avant d'être interprétée en termes de déplacement. Cependant, la différence de phase est contenue dans un terme cosinus et (1) ne peut être inversé, vu la présence d'autres inconnues que sont l'intensité moyenne et le contraste. Dès lors, des techniques de quantification de la phase sont apparues et permettent de résoudre ce problème. Nous ne détaillerons pas ici toutes les techniques existantes. Nous nous contenterons de présenter la plus connue et implantée dans les systèmes interférométriques commerciaux ou académiques: le décalage de phase [8]. Dans le cas de l'interférométrie holographique analogique, la technique s'applique à l'étape de restitution. Elle consiste à acquérir plusieurs interférogrammes l'un à la suite de l'autre, avec un incrément de phase.

Il existe différents algorithmes, mais le plus connu est celui où les sauts de phase sont de  $\pi/2$ , ce qui s'exprime comme suit:

$$I_k(x, y) = I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos \left( \Delta\varphi(x, y) + (k-1) \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (17)$$

En particulier, si on acquiert 4 interférogrammes ( $k=1,2,3,4$ ) avec un saut de  $\pi/2$  entre chaque acquisition, il vient:

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\Delta\varphi(x, y)) \right] \\ I_2(x, y) &= I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos \left( \Delta\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2} \right) \right] \\ I_3(x, y) &= I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos(\Delta\varphi(x, y) + \pi) \right] \\ I_4(x, y) &= I_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m(x, y) \cos \left( \Delta\varphi(x, y) + \frac{3\pi}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

Si on suppose que l'intensité moyenne et le contraste n'ont pas changé entre les 4 acquisitions, le déphasage se calcule simplement de la manière suivante:

$$\Delta\varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (19)$$

La Figure 17 illustre le principe du décalage de phase temporel: de (a) à (d) les 4 interférogrammes déphasés de  $\pi/2$  ont été capturés. La Figure 17(e) montre le déphasage  $\Delta\varphi(x, y)$  modulo  $2\pi$ , dont le profil des franges est en dent de scie (il varie de 0 à  $2\pi$ ), alors que l'interférogramme a un profil d'intensité sinusoïdal.

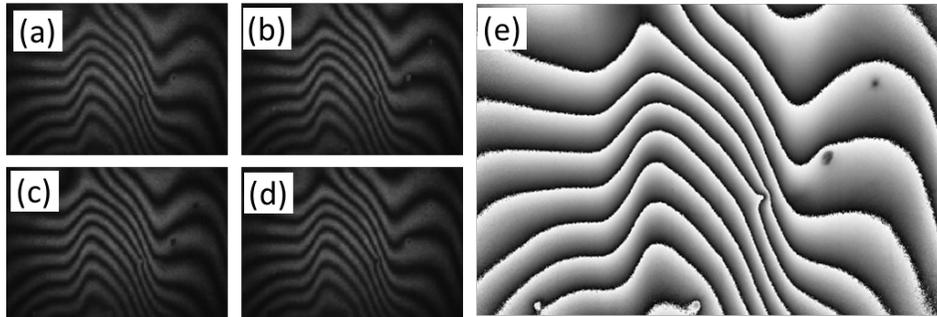


Figure 17. Principe du décalage de phase. De (a)-(d): 4 interférogrammes décalés de  $90^\circ$ , (e) Déphasage

D'autres algorithmes utilisent des sauts de phase différents, un nombre d'acquisition différents. En pratique, le décalage de phase temporel nécessite de faire varier la phase d'un des faisceaux qui interfèrent. En interférométrie holographique et de speckle, cela se fait généralement en translatant un miroir dans le trajet du faisceau référence. La bonne valeur du saut de phase à appliquer est ajustée dans une phase préliminaire de calibration.

Il faut bien sûr supposer que durant l'acquisition des interférogrammes, les quantités  $I_{moyen}(x, y)$ ,  $m(x, y)$  et  $\Delta\varphi(x, y)$  ne doivent pas avoir varié, c'est-à-dire en particulier que l'objet n'a pas bougé. Le décalage de phase s'applique donc à l'analyse de phénomènes quasi-statiques et non pas dynamiques.

Pour les déformations qui évoluent très vite, on choisira des techniques de quantification de la phase qui ne nécessitent que l'acquisition d'un seul interférogramme [9], ou dans le cas de l'holographie numérique, la configuration hors-axe, comme déjà discuté plus haut.

Dans les cas de techniques basées sur le speckle (interférométrie de speckle et shearographie), la quantification de la phase se fait sur chaque état (état de base et état déformé). Prenons le cas de specklegrammes obtenus par interférométrie de speckle. On acquiert une série de 4 specklegrammes décalés en phase  $Sp_k(x, y)$  dans l'état de base,  $Sp'_k(x, y)$  puis 4 autres dans l'état déformé.

$$Sp_k(x, y) = Sp_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m_{Sp}(x, y) \cos \left( \Delta\phi(x, y) + (k-1) \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

$$Sp'_k(x, y) = Sp'_{moyen}(x, y) \left[ 1 + m'_{Sp}(x, y) \cos \left( \Delta\phi'(x, y) + (k-1) \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

Les déphasages apparaissant dans les cosinus sont, rappelons-le, les déphasages entre l'onde référence et l'onde objet (equation (10)). Dans le cas de la shearographie, il s'agit du déphasage entre l'onde objet et elle-même décalée transversalement. On calcule séparément chacun d'eux pour chaque état, par une formule identique à (19):

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

$$\Delta\phi'(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{Sp'_4(x, y) - Sp'_2(x, y)}{Sp'_1(x, y) - Sp'_3(x, y)} \right]$$

Le déphasage lié à la déformation de l'objet est alors simplement la différence des deux (en supposant que la phase référence n'a pas bougé entre les deux groupes d'acquisitions):

$$\Delta\varphi(x, y) = \phi'_o(x, y) - \phi_o(x, y) = [\phi_r(x, y) - \phi'_o(x, y)] - [\phi_r(x, y) - \phi_o(x, y)]$$

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

Une fois le déphasage modulo  $2\pi$  calculé, pour accéder à la carte 2D des déplacements, il faut annuler les sauts de phase de  $2\pi$  qui ne sont pas naturels, mais résultent de la nature cyclique de la fonction tangente inverse. Cette étape s'appelle en anglais "phase unwrapping", ce qui se traduit généralement en français par "déroulage" ou "dépliage" de phase. Elle consiste à détecter les sauts de  $2\pi$  dans l'image et de les annuler. Différentes stratégies existent et on se référera à la littérature abondante sur le sujet [9,10]. La Figure 18(b) montre le résultat du déroulage de phase sur la carte de phase non déroulée (a). Ce résultat est maintenant une fonction monotone de la phase et peut-être utilisée pour l'interprétation en terme de déplacement en chaque point de l'image.

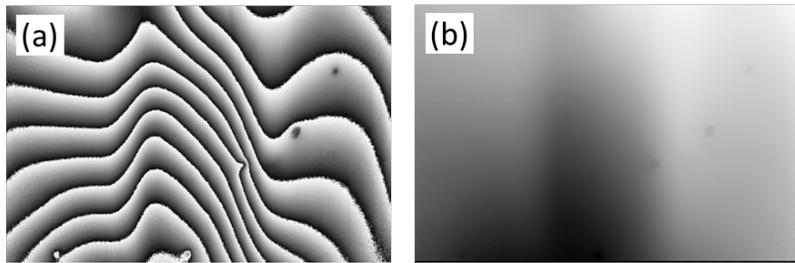


Figure 18. Résultat du déroulage de phase

## 2.2.6 Interprétation du déphasage

### 2.2.6.1 Considérations générales

L'interprétation de la phase en termes de déplacement dépend fortement de la configuration géométrique. La Figure 19 montre la configuration générale d'un système interférométrique. On considère une source ponctuelle qui envoie un rayon lumineux vers un point P situé à une position vectorielle  $\mathbf{r}$  selon un "vecteur d'illumination  $\mathbf{k}_1$ ". Ce rayon arrive en un point d'observation situé à une position vectorielle  $\mathbf{R}$  de la source et selon une direction  $\mathbf{k}_2$  ("vecteur d'observation"). On a représenté un hologramme mais on peut faire abstraction de celui-ci dans le cas des systèmes basés sur l'enregistrement holographique numérique. En holographie analogique, l'hologramme est là pour diffracter l'image de tous les points P vers le système d'observation situé derrière lui. Lorsque l'objet s'est déplacé/déformé, le point P s'est déplacé en P' ( $\mathbf{r}'$ ), selon le vecteur déplacement  $\mathbf{L}$ . Dès lors le vecteur d'illumination devient  $\mathbf{k}'_1$  et le vecteur d'observation  $\mathbf{k}'_2$ . Les trajets différents des deux paires de rayon nous permet de calculer en chaque point  $\mathbf{r}$  de l'objet le déphasage en fonction du déplacement  $\mathbf{L}$ .

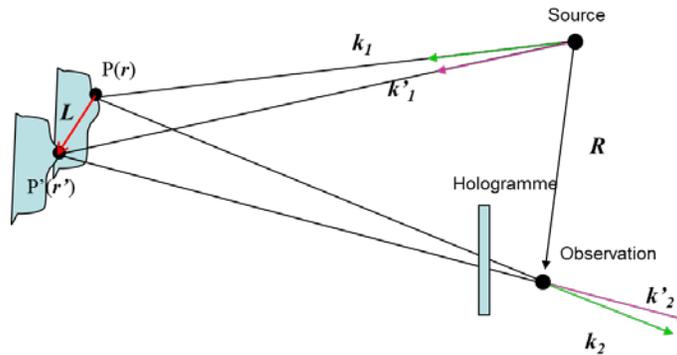


Figure 19. Géométrie d'un système holographique

Dans le cas pratique où le déplacement  $\mathbf{L}$  est très petit par rapport à la distance objet et système "source-observation" (càd  $L \ll R, r, r'$ ), on obtient la relation suivante, qui est la relation fondamentale reliant le déphasage observé et le déplacement

$$\Delta\varphi(x, y) = \mathbf{S}(x, y) \cdot \mathbf{L}(x, y) \quad (20)$$

où  $\mathbf{S}$ , appelé "vecteur sensibilité" est défini par  $\mathbf{S} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ . Il existe quelques cas particuliers, dont le principal est la configuration de mesure hors-plan.

### 2.2.6.2 Cas de la mesure hors-plan

Le cas le plus courant est celui où la source laser est très proche du système d'observation, ces deux éléments étant souvent montés sur un banc unique. Dans ce cas, les vecteurs  $\mathbf{k}_1$  et  $\mathbf{k}_2$  sont quasiment confondus et le vecteur-sensibilité (bissecteur des deux précédents) pointe vers le système holographique, comme le montre la Figure 20.

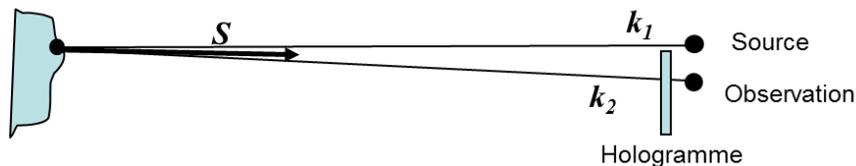


Figure 20. Géométrie hors-plan

Si l'objet est globalement un plan orienté perpendiculairement à  $\mathcal{S}$ , nous avons que le système est sensible au déplacement hors-plan  $L_{\perp}(x, y)$  de chaque point de l'objet, selon

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} L_{\perp}(x, y) \quad (21)$$

La relation (21) nous exprime de manière simple que le déphasage observé est proportionnel au déplacement et inversement proportionnel à la longueur d'onde  $\lambda$  du laser utilisé. Cette dépendance en la longueur d'onde provient du fait que la norme des vecteurs d'onde est donnée par  $\|\mathbf{k}_i\| = 2\pi/\lambda$ .

Cela nous amène à la propriété importante que la longueur d'onde est une quantité qui va nous permettre de faire varier la sensibilité de la mesure interférométrique. La relation (21) amène aussi à la règle simple que la distance entre deux franges de l'interférogramme (par ex, Figure 7) est égale à la moitié de la longueur d'onde (périodicité du cosinus). Par exemple, dans la Figure 7, la longueur d'onde est de 532 nm. En comptant le nombre de franges de part et d'autre de l'image, on peut dès lors déterminer le déplacement/la déformation hors-plan de l'objet. Lorsque la déformation devient trop grande, le nombre de franges augmente, l'interdistance entre elles diminue donc, jusqu'à éventuellement ne plus être visible, comme l'illustre la Figure 21. Sur base d'une déformation hors-plan donnée, nous avons simplement fait varier la longueur d'onde. En (a), une grande déformation est observée avec une longueur d'onde très grande (correspondant à un laser CO2,  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ). Cela donne lieu à des franges qui peuvent être résolues. Les interférogrammes (b) à (c) montrent l'effet d'une longueur d'onde décroissante. Cet exemple montre l'importance de bien choisir la longueur d'onde du système interférométrique pour observer des déplacements d'amplitude donnée, ou inversement de considérer des déplacements entre deux mesures qui soient tels qu'on puisse les observer.

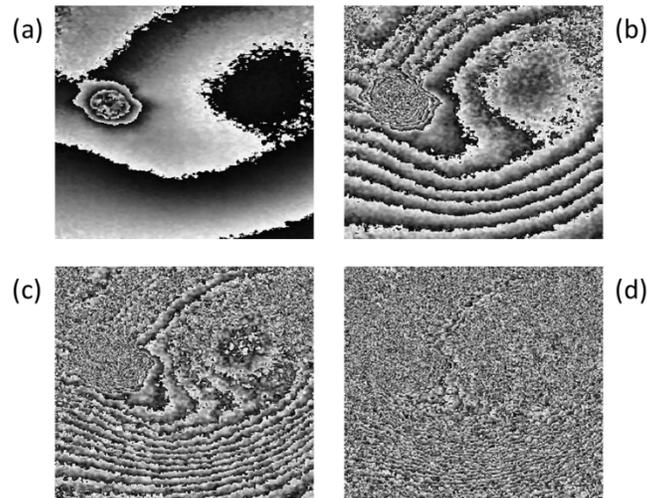


Figure 21. Effet de la longueur d'onde sur le déphasage observé

Cette limitation liée à la longueur d'onde fixe les modalités d'application de la technique et influence directement la stratégie d'acquisition des hologrammes/specklegrammes. Ainsi pour des grands déplacements/déformations et une longueur d'onde donnée, nous devons parfois procéder à un grand nombre d'acquisitions rapides qui permettront de calculer la déphasage de proche en proche, entre deux états consécutifs (pourvu que le déphasage soit bien résolu comme à la Figure 21(a)).

### 2.2.6.3 Cas de la mesure tri-dimensionnelle du déplacement

Pour mesurer plus de composantes du vecteur déplacement, il faut se former une base de vecteur-sensibilité, en utilisant, par exemple, un vecteur d'observation et plusieurs vecteurs d'illumination. Cette situation générale est montrée à la Figure 22 dans le cas de 3 sources dans un système

d'interférométrie holographique analogique. On peut aussi envisager une direction d'illumination et 3 systèmes d'observation.

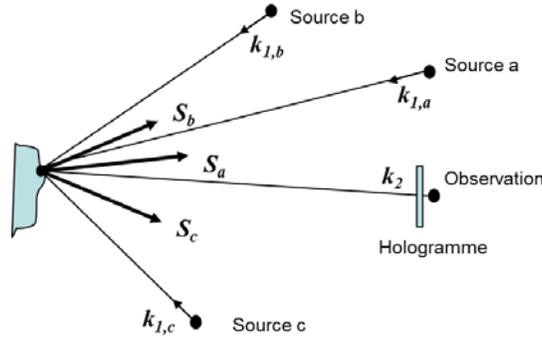


Figure 22. Base de vecteurs sensibilité pour la mesure tri-dimensionnelle

Dans le cas d'un système à 3 vecteurs sensibilité  $\{S_a, S_b, S_c\}$ , on effectue 3 captures d'hologrammes (simultanément ou séquentiellement) avec les 3 sources, puis lorsque l'objet est déformé, on capture les interférogrammes correspondant. De ces derniers, on retire une série de déphasages (par ex, par décalage de phase) correspondant à chaque vecteur sensibilité. On forme ainsi un système de 3 équations à 3 inconnues que sont les 3 composantes du vecteur déplacement  $L(L_x, L_y, L_z)$ , les vecteurs sensibilité étant connus par la géométrie du montage.

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_a &= S_a \cdot L \\ \Delta\varphi_b &= S_b \cdot L \\ \Delta\varphi_c &= S_c \cdot L\end{aligned}\quad (22)$$

En inversant le système précédent, on retrouve ainsi les 3 composantes de déplacement. Il existe un cas particulier, celui des mesures dans une seule direction du plan pour lesquelles on s'arrange pour que la direction d'observation soit perpendiculaire à l'objet et les illuminations soient incidentes au même angle mais de part et d'autre et symétrique par rapport à la direction d'observation. Ainsi, le système d'équations (22) se ramène à 2 équations à 2 inconnues, les composantes dans le plan et hors du plan de l'objet.

Il existe un cas particulier, celui de l'interférométrie de speckle sensible dans le plan [4] et sans faisceau référence, et pour lequel seul deux d'illumination symétriques à des angles par rapport à la normale de l'objet sont nécessaires, comme le montre la Figure 23. On capture un specklegramme dans un état, avec décalage de phase induit par un miroir et un piézo PZT dans un des deux bras d'illumination. Ensuite, lorsque l'objet s'est déplacé/déformé, on répète l'opération et on en déduit un déphasage  $\Delta\varphi_\eta(x, y)$  lié au déplacement  $L_\eta$  dans le plan de l'objet, dans la direction  $\eta$ . Dans ce cas, la sensibilité de la mesure dépend de l'angle  $\theta$ , comme le montre l'équation (23).

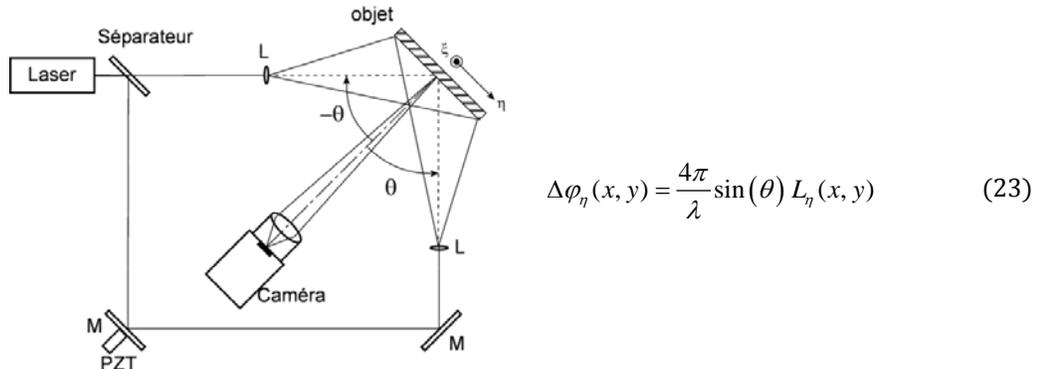


Figure 23. Cas particulier de l'interférométrie de speckle sensible dans le plan

## 2.2.7 Interprétation de la phase – cas particulier de la shearographie

Dans le cas des techniques d'interférométrie holographique analogique et numérique, ainsi que de speckle, nous avons vu que l'on pouvait interpréter les déphasages en termes de déplacement de chaque point du plan de l'objet, qu'il soit dans ou hors du plan de l'objet. Dans le cas de la shearographie, la différence de phase entre deux shearogrammes s'interprète non pas en terme de déplacement, mais de dérivée du déplacement dans la direction de cisaillement de l'image. La Figure 24 et les expressions qui y sont données montrent le parallèle entre les deux techniques pour une même déformation hors du plan de l'objet (figure (a)). Si celle-ci est du type "colline", provenant d'une plaque encastrée en ses 4 bords et contrainte mécaniquement au centre, par l'arrière, on observera en interférométrie holographique/speckle une figure d'interférence, telle qu'en figure (c). Un profil de ligne est montré à gauche en figure (b), correspondant à cette situation. En shearographie, avec une direction de cisaillement de l'image montrée par une flèche, on obtient un interférogramme montré à la figure (d)

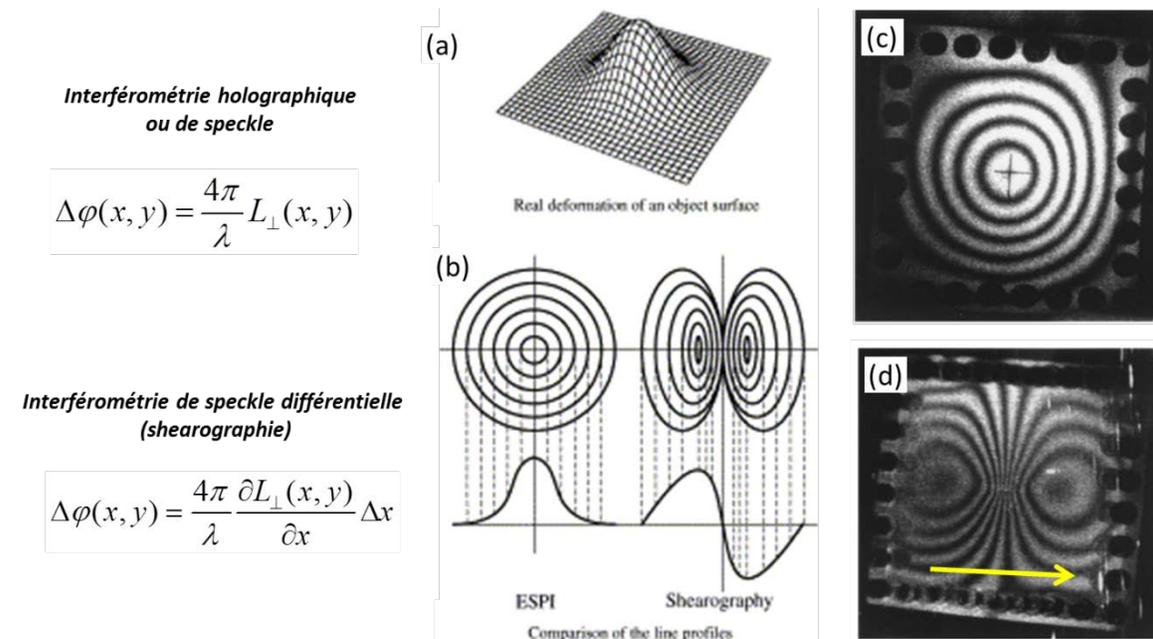


Figure 24. Principes comparés de l'interférométrie holographique et de speckle, mesurant les déplacements, et la shearographie mesurant les dérivées transverses du déplacement.

Comme déjà expliqué plus haut, l'intérêt de la shearographie comparativement aux autres techniques est sa relative insensibilité aux perturbations environnementales. Cependant, si l'on cherche le déplacement, il faudra intégrer le déphasage en tenant compte de l'amplitude de cisaillement (p.ex.  $\Delta x$  dans notre exemple ci-dessus). Nous verrons cependant dans les applications, que la shearographie est surtout utilisée pour la détection de défauts, et ne nécessite pas d'interprétation poussée en terme de déplacement.

## 2.3 Principales applications des techniques interférométriques

### 2.3.1 Mesures du champ de déplacement sous contraintes statiques ou quasi-statiques

De manière naturelle, les techniques d'interférométrie holographique ou de speckle permettent d'observer le champ de déplacement. Les cas les plus simples sont ceux où l'état de référence (hologramme ou specklegramme de référence) est enregistré lorsque l'objet est au repos ou non chargé. Ensuite la contrainte est appliquée à l'objet et on observe l'interférogramme à tout instant ultérieur. Les contraintes peuvent être mécaniques, thermiques, voire une combinaison des deux.

Un premier exemple est montré à la Figure 25 et concerne la mesure de déformation hors-plan d'une structure de satellite en panneau sandwich (coeur en nid d'abeille et peaux en composite). Ce dernier est solidement attaché sur le côté vertical droit et est contraint mécaniquement hors du plan du côté gauche. La Figure 25(a) montre l'ensemble du montage avec à l'avant-plan une caméra holographique photoréfractive effectuant la mesure. La Figure 25(b) montre l'interférogramme en phase obtenu sous certaines conditions de contraintes. Cette mesure peut être comparée à la simulation par éléments finis. Il faut dès lors veiller à bien reproduire expérimentalement les conditions prévues dans la simulation, en particulier les conditions aux frontières du problème (p.ex. l'encastrement). Une fois l'interférogramme de phase de la Figure 25(b) converti en carte de déplacement, Figure 25(c), on peut aisément le comparer à une simulation par éléments finis, Figure 25(d). L'expérience montrée à la Figure 25 provient d'un projet financé par l'Agence Spatiale Européenne en vue du développement d'outils de simulation numérique du comportement de structures de satellites, le recalage de modèles par des mesures expérimentales étant une étape incontournable.

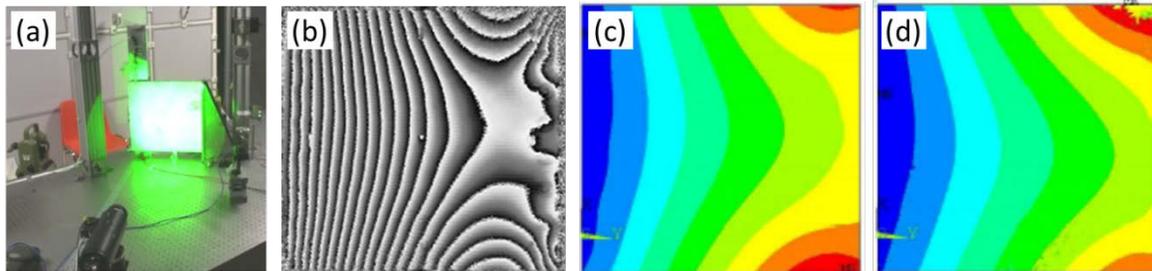


Figure 25. Expérience d'interférométrie holographique sur un panneau sandwich. (a) Montage expérimental, (b) interférogramme de phase, (c) carte de déplacements obtenue expérimentalement, (d) carte de déplacement obtenue par simulation.

D'autres exemples peuvent être montrés dans un cadre similaire de corrélation entre simulation et expérience, dans le cadre d'une mesure du champ de déplacement dans les 3 directions. La Figure 26 (a) montre un schéma avec 4 points d'illumination et une direction d'observation, adaptation d'un système holographique analogique (cristal photoréfractif). Nous considérons ici 4 illuminations pour avoir une mesure redondante pour résoudre le système (22). A la figure (b), on voit le montage sur une table optique avec le spécimen testé. Il s'agit d'un banc mécanique supportant des éléments optiques et qui sera monté sur satellite. Il fallait étudier les déformations dans les 3 directions, sur base de contraintes thermiques locales, induisant des gradients de température et donc des déformations importantes dans les 3 directions. La simulation est montrée à la figure (c).

La Figure 27 (gauche) montre les 4 interférogrammes (après décalage de phase) obtenus après que le spécimen ait été chauffé localement. Ces résultats sont utilisés pour déduire les déplacements dans les 3 directions (à droite) sur base de l'inversion d'un système d'équations adapté de (22) pour le cas à 4 illuminations. La figure montre aussi les déplacements simulés par les ingénieurs en charge du développement de la structure testée (EADS Astrium, actuellement Airbus D&S).

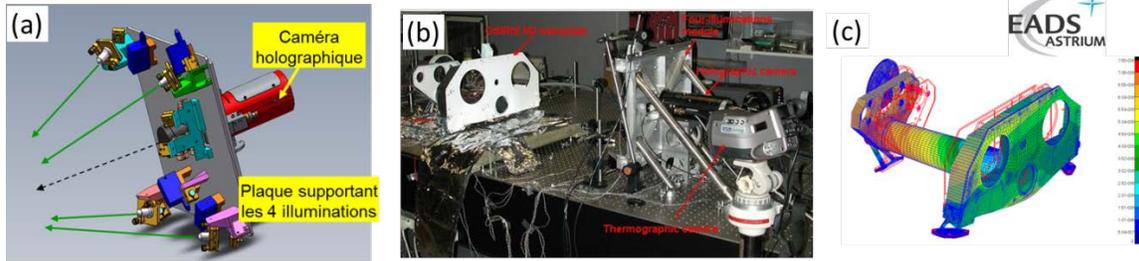


Figure 26. (a) Interféromètre holographique analogique avec un système à 4 illuminations et 1 direction d'observation pour la mesure 3D de déplacements. (b) Specimen de test, (c) simulation des déformations liées à des gradients thermiques

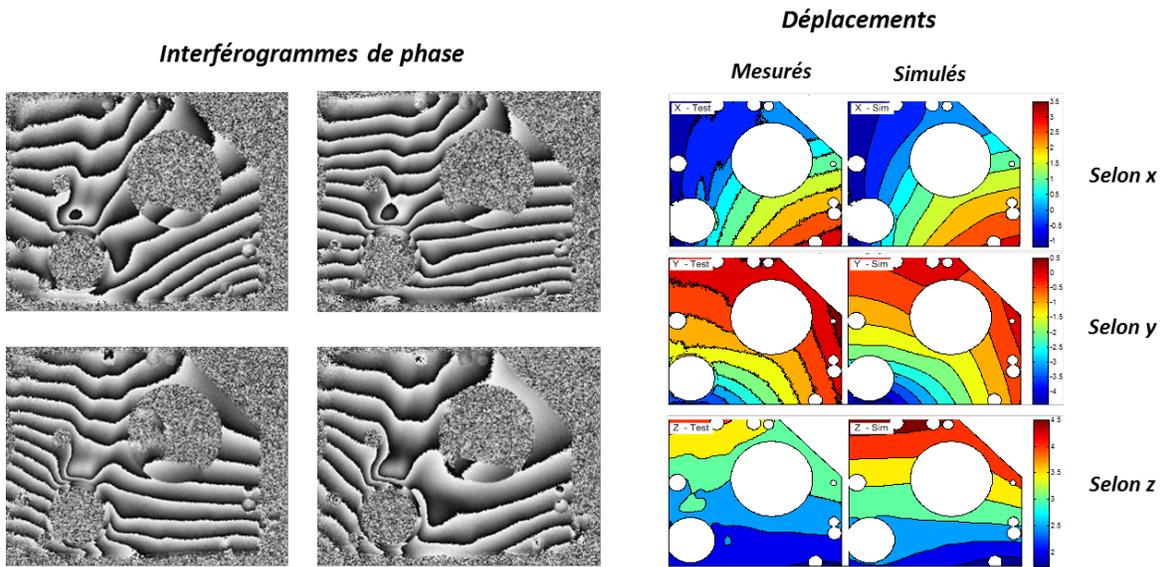


Figure 27. Interférogrammes de phase obtenus avec chaque illumination séparément, et déplacements calculés et simulés selon les 3 directions.

### 2.3.2 Observation des modes de vibration

Les techniques interférométriques permettent l'étude d'objets mis en vibration. Généralement, on considère le cas d'une seule fréquence de vibration. La première technique qui fut mise au point à l'avènement de l'holographie est celle dite en "temps moyenné". Lorsqu'un objet est en vibration, il existe certaines fréquences de résonance qui provoquent l'apparition de noeuds de vibration, c'est-à-dire où l'objet ne bouge pas, et de ventres de vibration, là où l'objet est en mouvement. On obtient alors des figures de déplacement, appelées modes de vibration. En dehors des résonances, tous les points de l'objet ont un mouvement égal, et il n'y a pas de modes. Regardons tout d'abord le cas de l'holographie analogique. Supposons que l'objet subisse des déplacements lorsqu'il est vibré à une fréquence angulaire  $\omega$ , le déplacement s'exprime comme suit:  $L(x, y, t) = A(x, y) \sin(\omega t)$ . La Figure 28(a) montre un objet en vibration avec 3 noeuds ( $n_1, n_2, n_3$ ). L'onde objet arrivant sur l'hologramme porte en elle cette information: sa phase varie de la même manière. L'hologramme s'écrit alors, à chaque instant  $t$  (en omettant la dépendance spatiale par simplicité)

$$H(t) = I_R(t) + I_O(t) + 2\sqrt{I_R(t)I_O(t)} \cos(\phi_R - \phi_O + \phi_A \sin(\omega t)) \quad (24)$$

Avec le déphasage lié à la vibration donné par  $\phi_A \sin(\omega t)$ . A moins d'utiliser un laser impulsionnel avec une durée d'impulsion beaucoup plus courte que la période de vibration, il n'est pas possible de capturer un hologramme statique en cours de vibration.

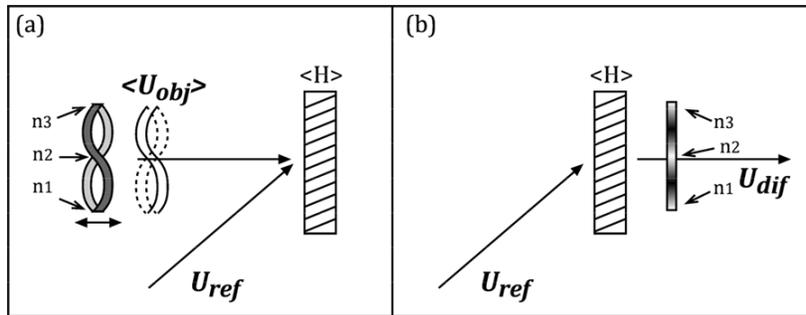


Figure 28. Principe de l'holographie en temps moyenné

Le support holographique analogique, ainsi que les supports numériques, ont un temps de réponse ou d'intégration beaucoup plus long que les périodes de vibrations. Notons que les fréquences de vibration vont généralement de plusieurs centaines de Hz à quelques dizaines de kHz. Il se passe donc que le support holographique intègre un ensemble de figures d'interférence de type (24). On a donc un hologramme moyenné dont l'intensité s'exprime comme

$$\langle H \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T H(t) dt \quad (25)$$

Ce qui conduit à des figures de franges dont le contraste varie comme une fonction de Bessel d'ordre 0. Celui-ci est maximal lorsque le déplacement de l'objet est nul (à l'encastrement de l'objet, et aux noeuds de vibration) et qui passe par une série de maxima, progressivement décroissants, lorsque le déplacement augmente. Le temps moyenné peut-être appliqué pour toutes les techniques interférométriques décrites précédemment. Voici quelques exemples de modes de vibration observé par temps moyenné en holographie analogique (Figure 29), interférométrie de speckle (Figure 30)

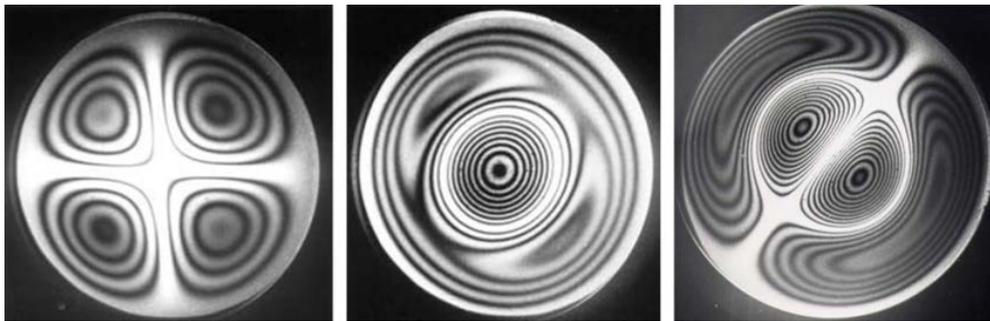


Figure 29. Holographie analogique en temps moyenné

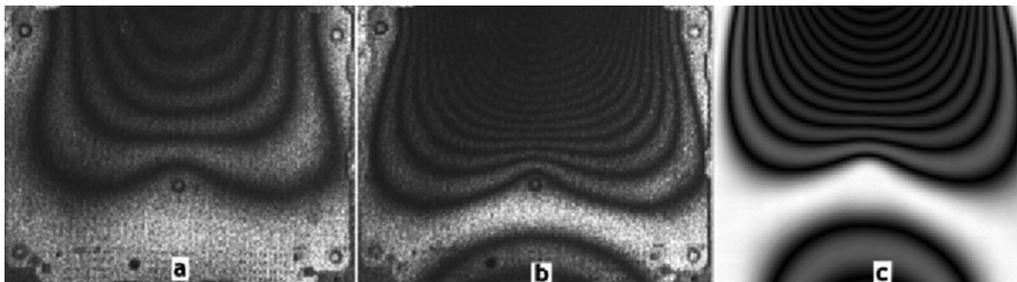


Figure 30. Interférométrie de speckle en temps moyenné (a-b), mode simulé (c) (crédit: Dan Borza)

Nous observons bien sur ces exemples que le contraste diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne des noeuds. Ce profil non-sinusoidal ne permet pas d'appliquer le décalage de phase pour une quantification des déplacements. Il y a cependant d'autres modalités pour observer les vibrations et

en déduire un déphasage quantifié. Tout d'abord, citons la technique stroboscopique qui peut être appliquée aux techniques holographiques analogiques ou numérique/speckle. En holographie analogique, on enregistre l'hologramme au repos (avant vibration) (Figure 31). Ensuite, à l'étape de restitution, on actionne un obturateur rapide (stroboscope) dans le faisceau laser et qui est synchronisé à la fréquence de vibration de l'objet. Le stroboscope est ajusté de manière telle à ce qu'il laisse passer la lumière dans le montage quand l'objet est à son maximum de déplacement modal, c'est-à-dire quand il s'arrête momentanément avant de repartir en mouvement vers le maximum opposé. La phase de l'onde objet est alors figée brièvement durant la vibration. On peut dès lors observer un interférogramme statique montrant un mode de vibration lorsqu'on est à la résonance. Les franges sont ici à profil sinusoïdal, et prennent une forme tout à fait classique, comme (6). Cependant, la durée d'intégration de la caméra est beaucoup plus grande que la période de vibration et on intègre un grand nombre de période de vibration (la figure n'en montre que 2). On peut aussi appliquer le décalage de phase temporel en faisant varier la phase de l'onde référence durant la capture.

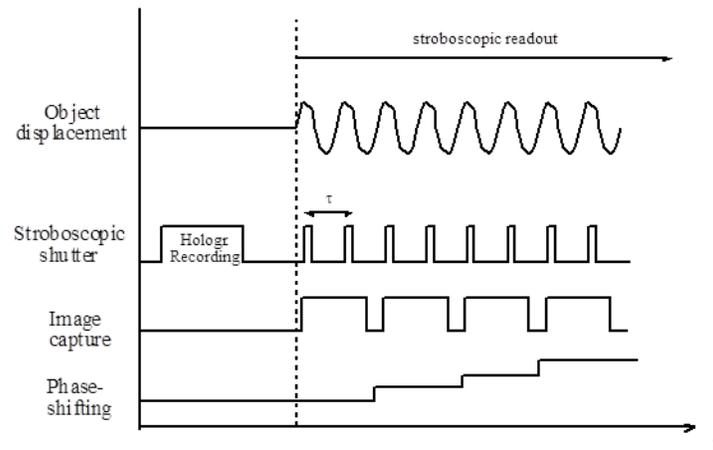


Figure 31. Principe du régime stroboscopique

Cette technique permet d'observer aisément les modes de vibrations, comme le montre la Figure 32 dans le cas d'une aube de compresseur encastrée dans le bas.

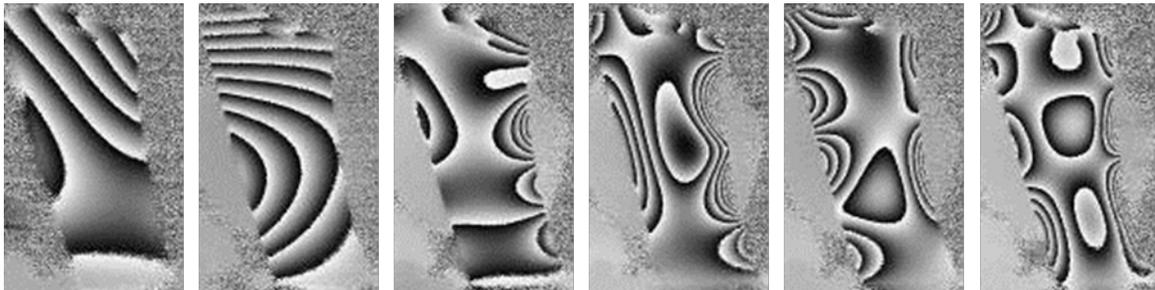


Figure 32. Interférométrie holographique analogique en mode stroboscopique avec décalage de phase

Le régime stroboscopique s'applique aussi à l'interférométrie de speckle ou la shearographie. Dans ce cas on enregistre les 4 specklegrammes/shearogrammes au repos, on en déduit la phase. Ensuite, lorsque l'objet vibre, on effectue la même opération pour déduire la phase et par différence on observe le déphasage, qui est similaire à la figure ci-dessus.

Ensuite, citons l'exemple très intéressant de l'holographie numérique hors-axe pour laquelle on obtient directement la phase d'un objet, sur base d'une seule acquisition. Dans le cas des vibrations, il faut que l'illumination de l'objet ou l'intégration de la caméra soit suffisamment brève pour ne pas moyenniser différents états. Dans ce cas, on enregistre un hologramme à un instant donné, puis un second plus tard durant la vibration. On calcule les phases de chaque état selon la méthode expliquée à la Section 2.2.3, puis le déphasage, comme le montre la Figure 33.

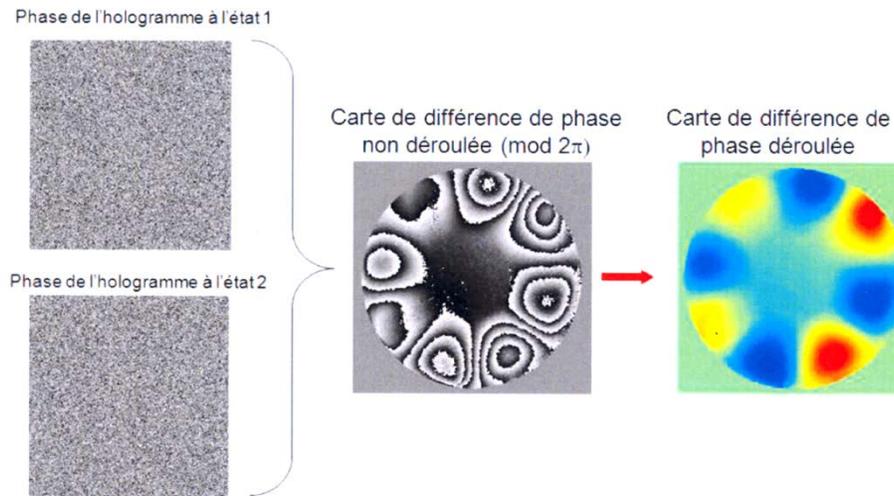


Figure 33. Holographie numérique hors-axe pour l'observation de modes de vibration (crédit P. Picart)

### 2.3.3 Détection de défauts

Les défauts sont observés par des déviations locales de ces franges, correspondant à une déformation différente causée par le défaut sous-jacent à la surface. Afin de provoquer une déformation différente, il faut soumettre le spécimen à une contrainte. Le type de défaut, sa géométrie, la structure dans laquelle il se situe, sont autant de paramètres qui rendent cette application très complexe pour mettre en évidence les défauts.

Toutes les techniques présentées ci-dessus peuvent être utilisées pour détecter des défauts. Commençons par l'interférométrie holographique analogique. Les images montrées à la Figure 7 puis à la Figure 17(e) sont un exemple de détection de défauts inclus dans une structure composite de 60x40 cm<sup>2</sup>. Pour les obtenir, on enregistre l'hologramme de la structure au repos. Ensuite, on la chauffe grâce à une lampe halogène pendant quelques secondes à quelques dizaines de secondes. Ensuite, on arrête de chauffer et dans le refroidissement de la pièce, après quelques dizaines de secondes, on procède à la restitution, accompagnée éventuellement du décalage de phase. Ce dernier permet d'avoir une meilleure netteté des franges (carte de phase) que l'interférogramme lui-même. La Figure 17(e) montre une série de franges de déformation globale liée à la mise sous contrainte thermique. On y voit aussi des zones de où les franges s'écartent de l'allure générale, trahissant un comportement thermo-mécanique différent, signe de la présence d'un défaut.

L'interférométrie de speckle permet aussi la détection de défauts. La Figure 34 montre deux exemples de structures en matériaux composites qui sont des structures sandwich avec un coeur en mousse et des peaux en composites à base de carbone. Un specklegramme (avec décalage de phase) est enregistré, puis la pièce est chauffée. On réitère l'acquisition et on calcule le déphasage entre les deux états. On obtient ainsi les images des figures (a) et (b). On voit facilement le défaut dans le premier cas. Dans le second cas, plusieurs défauts (artificiellement introduits entre les peaux en carbone et la mousse) donnent des variations faibles localisées dans le système de franges global. Ce dernier est composé de franges concentriques, typiquement d'un gonflement du centre de la structure qui est contrainte sur ses bords qui ne bougent pas, ou peu. Pour améliorer la visibilité des défauts, on procède à un déroulage de phase de l'image (b), puis on effectue un ajustement polynomial 2D de l'ensemble de la phase déroulée. Ensuite on retranche cet ajustement qui correspond à la déformation globale, pour ne garder que l'image des défauts, Figure 34 (c).

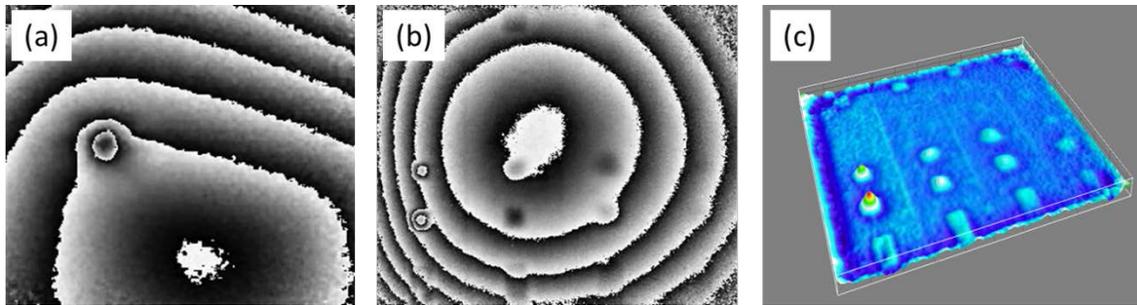


Figure 34. Interférométrie de speckle pour la détection de défauts dans des matériaux composites par excitation thermique

La technique interférométrique la plus répandue en industrie pour la détection de défauts est la shearographie. En effet, nous avons déjà discuté plus haut que, grâce à son caractère auto-référencé, elle était mieux immunisée contre les perturbations environnementales extérieures. Ainsi des systèmes ont été mis sur le marché et ont un succès relatif en détection de défauts. Les systèmes les plus couramment répandus ressemblent à celui montré à la Figure 35, qui contient une tête shearographique (caméra, optique, laser) et lampes d'excitation. Le système est mis en contact avec la structure testée puis on procède à la mesure. Ensuite il peut se déplacer sur la surface. Un résultat typique est montré à droite. La déformation globale, telle qu'observée avec les techniques précédentes, n'apparaît pas ou que très peu, lié au fait que l'on observe la dérivée du champ de déplacement. Seule ici une frange globale est visible. Les signatures locales liées aux défauts apparaissent comme des ailes de papillons, avec un lobe positif et un lobe négatif symétrique (pour rappel, voir Figure 24(b)), ici au nombre de 3. Le nombre de franges observées dans le défaut peut être lié à la profondeur du défaut: plus de franges signifie une plus grande déformation, donc un défaut qui est moins profond car il réagit plus au stimulus.



Figure 35. Système shearographique avec excitation thermique pour la détection de défauts (ici sur pale d'éolienne en composites)

Un autre cas très connu en détection de défaut est celui de la mise en dépression pour observer des décollements entre deux surfaces où de l'air est emprisonné. C'est le cas dans l'exemple suivant, pour l'inspection de pneus qui nécessiteraient un rechapage. La Figure 36 montre un exemple industriel où la shearographie est utilisée dans une enceinte géante dans laquelle on fait varier la pression. Des systèmes plus petits sont depuis une vingtaine d'années utilisés et sont même devenus la norme pour ce type d'application.

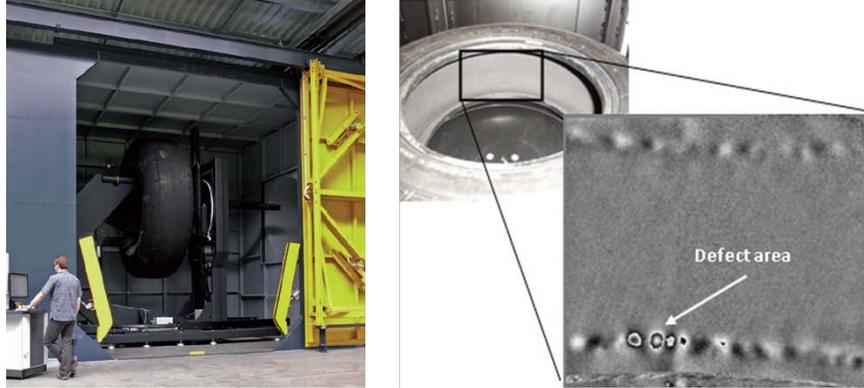


Figure 36. Application de la shearographie pour la détection de décollements dans les pneus. A gauche une enceinte à dépression dans laquelle se situe un pneu.

Enfin, une dernière application intéressante est l'utilisation de la vibration avec la shearographie. En effet, si un décollement existe, en faisant vibrer la structure, on crée un mode de vibration local, à la position du défaut. En faisant varier la fréquence, on peut faire apparaître plus ou moins fort le défaut, et éventuellement faire voir certains défauts à une fréquence, et certains autres à d'autres fréquences. La Figure 37 illustre l'utilisation d'une tête shearographique avec un dispositif vibratoire. Ce dernier est un excitateur piézoélectrique qui est mis en contact avec la surface de l'objet (ici en haut à droite de ce dernier) et maintenu en place grâce à un petit dispositif de ventouse sous vide. La tête shearographique fonctionne soit en temps moyenné (Figure 37(b)), soit en régime stroboscopique (Figure 37(c)). La qualité des résultats est nettement meilleure dans le second cas.

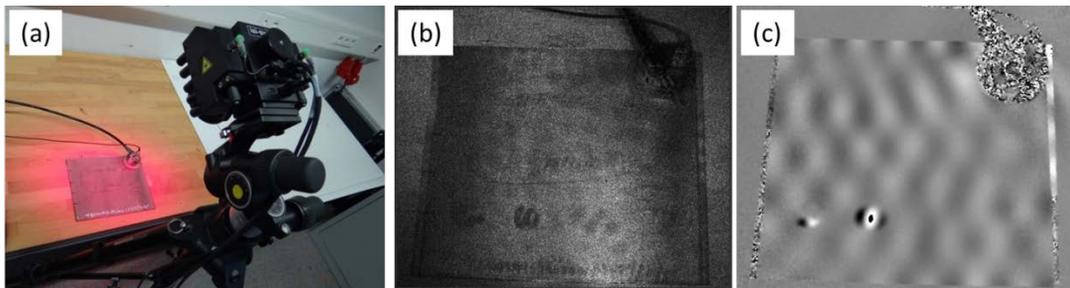


Figure 37. Shearographie en régime vibratoire.

Malgré les belles performances des techniques interférométriques pour le contrôle non destructif, dans le cas de la détection des défauts, une technique beaucoup plus simple a cependant pris de l'avance et est de plus en plus répandue dans le domaine industriel. Nous allons en discuter dans le chapitre suivant: la thermographie infrarouge active.

### 3 La thermographie infrarouge active

#### 3.1 Introduction – le thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique sans contact qui permet d'observer la distribution de température en surface d'un objet. Elle résulte de la loi de Planck d'émission du corps noir qui stipule qu'un corps noir émet une quantité de rayonnement électromagnétique (luminance spectrale) qui dépend de la température  $T$  et de la longueur d'onde lumineuse comme suit

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hv/kT) - 1} \quad (26)$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $c$  la vitesse de la lumière,  $\nu$  et  $\lambda$  respectivement la fréquence et la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique. Cette loi se traduit graphiquement par des courbes pour différentes températures montrées à la Figure 38(a). La Figure 38(b) montre une autre manière de représenter la même loi, où l'on retrouve une propriété intéressante, exprimée par la loi de Wien que le produit de la longueur d'onde du maximum d'émission et la température est une constante, donnée par l'expression (27). On peut en déduire qu'un corps noir idéal ayant une température de 300 K (environ 20°C), émet préférentiellement aux alentours de 10  $\mu\text{m}$ , ce qui correspond au domaine de l'infrarouge lointain.

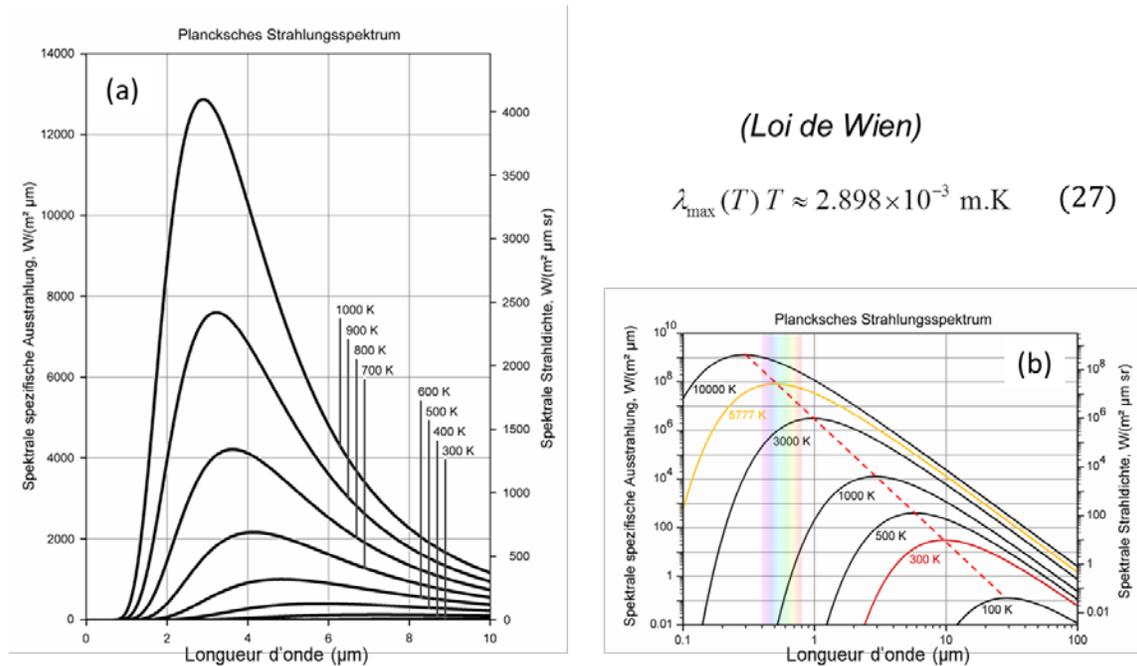


Figure 38. Luminance spectrale et loi de Wien

Les caméras infrarouges permettent d'observer le rayonnement électromagnétique des bandes spectrales variées. En fonction des technologies de capteurs, elles intègrent le rayonnement émis par un objet. A la Figure 39, le rectangle montre la bande d'intégration centrée sur 10  $\mu\text{m}$  (correspondant aux détecteurs de type microbolomètres). On peut voir que les corps plus chaud émettent plus de rayonnement. Moyennant une calibration du système, on peut ainsi déduire la température du corps sur base de l'intensité reçue par la caméra. Cela permet de mettre en évidence des zones chaudes et froides, représentées en fausses couleurs, dans le domaine des audits énergétiques du bâtiment, en biomédical, etc.

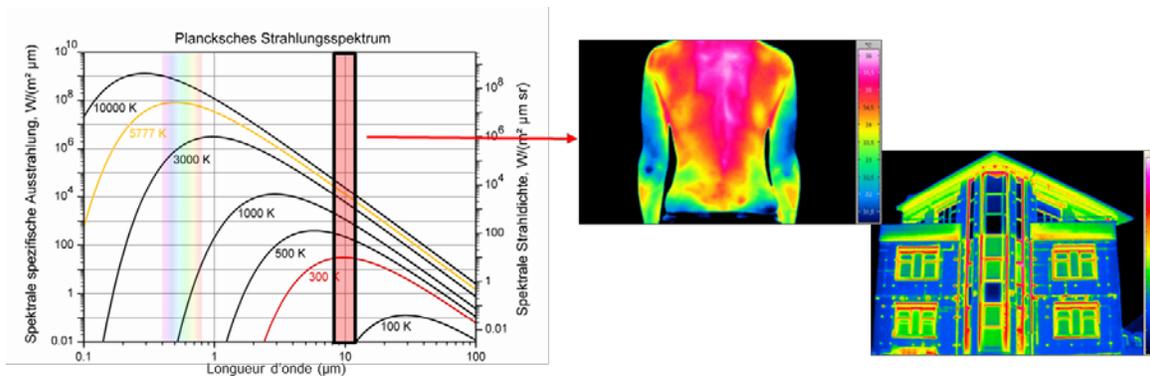


Figure 39. Intégration du spectre par une caméra infrarouge, montrant les différences de température en surface de différents objets

Il existe différentes technologies de capteurs d'image thermique et qui observent dans différentes bandes. Nous allons donc présenter rapidement les différentes technologies de capteurs thermiques.

### 3.2 Technologies de capteurs thermiques

La plupart des caméras thermiques fonctionnent dans deux fenêtres de transmission atmosphérique infrarouge : l'infrarouge moyen (Mid-Wave Infrared - MWIR) de 3 à 5  $\mu\text{m}$  et l'infrarouge lointain (Long-Wave Infrared - LWIR) de 8 à 14  $\mu\text{m}$  (Figure 40)

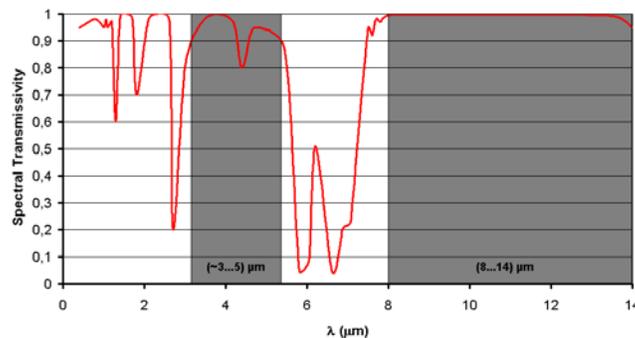


Figure 40. Fenêtres infrarouge atmosphériques.

Il existe plusieurs technologies de capteurs matriciels fonctionnant à l'une ou l'autre des fenêtres thermiques. Celles-ci vont donner lieu à des caméras de performances et de coûts très différents. On distingue deux grandes catégories :

Les détecteurs photoniques qui convertissent l'énergie d'un photon absorbé en électrons dont le changement d'état énergétique fait varier les propriétés électriques du matériau dont ils sont constitués. On distingue différentes classes de détecteurs, mais dans tous les cas ils requièrent un dispositif de refroidissement qui permet de limiter le bruit de lecture. Pour cela, les caméras basées sur ces technologies de capteurs sont appelées caméras refroidies. Les technologies de capteurs sont les QWIP (Quantum Well Infrared Photodetector) et les MCT (Mercury Cadmium Telluride). Les QWIP ont des transmissions spectrales à spectre étroit (8-9  $\mu\text{m}$ ) tandis que les MCT ont des bandes plus larges (3-5  $\mu\text{m}$ ) ou (8-12  $\mu\text{m}$ ), les bandes obtenues dépendant des paramètres de fabrication des matériaux de détection. Actuellement les caméras refroidies les plus populaires en CND sont basées sur les MCT.

Les détecteurs thermiques absorbent l'énergie lumineuse sur un large spectre et l'effet observé est un échauffement du matériau de détection. Le changement de température fait varier les propriétés électriques que l'on mesure pour déterminer la puissance lumineuse. Il s'agit du principe du bolomètre que l'on retrouve actuellement sur des capteurs matriciels à microbolomètres

(microbolometers arrays), qui ne requièrent pas de système de refroidissement car ils montrent des rapports signal-bruit acceptables à température ambiante. On parlera ici de caméras non refroidies.

Le tableau suivant montre l'état de l'art des capteurs de différents types. Les paramètres importants en pratique sont

- le NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) qui donne la résolution en température
- la résolution latérale du capteur (en nb de pixels)
- la cadence image

Type	Detector Material	Spectral range	Maximum pixel numbers	Maximum frame rate	NETD @ 30°C
Uncooled Microbolometer FPA	a-Si VOx	8 ... 14 $\mu\text{m}$	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 $\mu\text{m}$	640 x 512 384 x 288	120 Hz 300 Hz	20 mK
Cooled QWIP FPA	AlGaAs/GaAs	8 ... 9 $\mu\text{m}$ (small band)	1024 x 1024	120 Hz	35 mK
			640 x 512	120 Hz	25 mK
			384 x 288	260 Hz	25 mK

En CND, les systèmes les plus exigeants utilisent des caméras refroidies, avec des NETD plus petits (permettent de voir des différences de température plus faibles) et des cadences images supérieures (utile pour la Pulse Thermography discutée dans la suite). Cependant, le prix de tels systèmes est plus élevé que des caméras non refroidies. Le choix de la caméra se fera donc sur base d'un compromis performance-coût.

### 3.3 La thermographie IR pour le CND

La thermographie infrarouge active consiste à apporter de la chaleur d'une manière ou d'une autre. Elle permet de mettre en évidence la présence d'éléments sous-jacents à la surface (tels des défauts) dont la signature thermique se distingue en surface comme des intensités de signal thermique différentes du reste de la pièce.

Depuis une trentaine d'années, la recherche en thermographie active pour le contrôle non destructif est principalement orientée sur la manière d'apporter la chaleur et sur le traitement des images obtenues, généralement des séquences temporelles d'images.

Nous allons décrire les différentes procédures utilisées en thermographie IR active et qui sont présentées dans la littérature ou chez les fabricants de systèmes commerciaux.

Il existe différents moyens d'excitation utilisables en thermographie. La littérature montre un grand nombre de manière d'appliquer ces excitations et de traiter les signaux résultants. Il nous a paru utile de regrouper les différentes techniques de la manière suivante

- La thermographie par excitation thermique convective
- la thermographie optique pulsée (pulsed thermography)
- la thermographie optique modulée (modulated thermography) ou déclenchée (lock-in thermography)
- la vibrothermographie
- la thermographie par induction

Les sections suivantes vont s'attacher à décrire les principales caractéristiques de chacune de ces techniques. Dans certains cas, nous décrirons, sur base de la littérature, différentes possibilités de post-traitements des données qui permettent d'améliorer grandement le contraste thermique lié au défaut.

### 3.3.1 La thermographie par excitation thermique

Un moyen très simple de s'essayer à la thermographie pour le CND est l'utilisation d'une chaufferette (décapeur thermique - hot air blower en anglais) qui apporte la chaleur par convection. Bien que très facile à mettre en oeuvre, elle ne permet pas d'obtenir des résultats facilement reproductibles quantitativement. Utilisée à moindre frais avec une caméra thermographique non refroidies, elle permet d'avoir rapidement une idée des défauts pas trop profonds.

Nous n'avons pas trouvé de littérature sur le sujet car il s'agit bel et bien d'une première approche du CND par thermographie.

### 3.3.2 La thermographie optique pulsée

La thermographie optique pulsée (Optical Pulse Thermography) est parfois appelée plus simplement thermographie pulsée (Pulse Thermography) ou thermographie flash (Flash Thermography) est illustrée à la Figure 41.

On chauffe le matériau durant un temps bref par lampe(s) flash (généralement 2) et on enregistre son refroidissement avec une caméra thermique. Un comportement anormal de la décroissance de température trahit la présence d'un défaut. La température du matériau change rapidement après que le bref échauffement car l'onde thermique se propage par diffusion sous la surface.

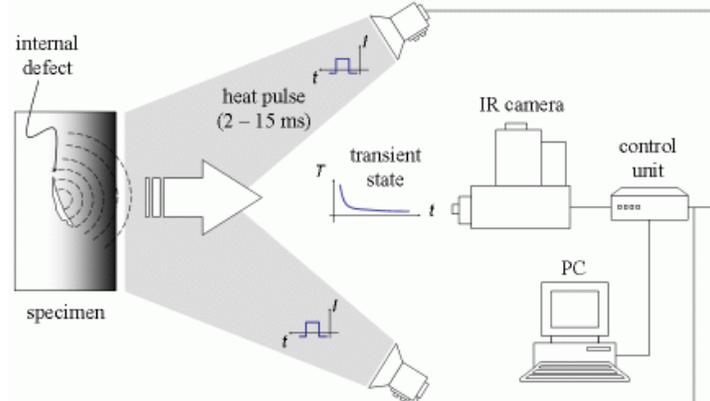


Figure 41. Principe de la Thermographie Pulsée [12]

Pour un échantillon semi-infini, sans défaut, la dépendance temporelle de la température en surface  $T(t)$  en réponse à une impulsion de chaleur instantanée (pulse de Dirac) est donnée par [11]

$$\Delta T = T(t) - T(0) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} = \frac{Q}{\kappa\rho c_s\sqrt{\pi t}} \quad (27)$$

où  $Q$  est l'apport de chaleur par unité de surface,  $e$  l'effusivité thermique,  $\kappa$  la conductivité thermique,  $\rho$  la densité et  $c_s$  la chaleur spécifique. La figure suivante montre la variation de température dans une zone sans défaut et avec défaut.

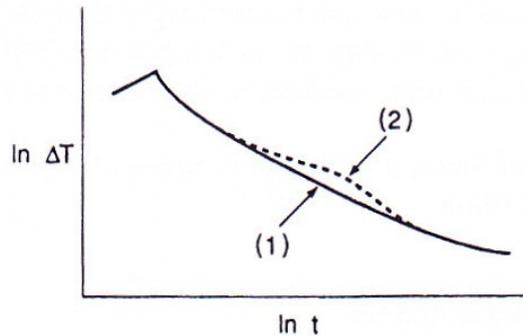


Figure 42. Variation temporelle de la température dans une zone sans défaut (1) et avec défaut (2)

La présence d'un défaut réduit le taux de diffusion de manière telle que observée en surface, la température du défaut apparaît différente du matériau environnant (courbe pointillée (2) par rapport à (1)). La courbe ci-dessus montre que des défauts profonds seront observés à un instant ultérieur.

Il a été montré dans la littérature que l'intervalle de temps  $t$  d'observation d'un défaut est proportionnel à  $z^2/\alpha$ , avec  $\alpha$  la diffusivité thermique du matériau environnant et la perte de contraste est inversement proportionnelle au cube de la profondeur [11].

Ainsi l'onde thermique met 40 ms pour se propager à une profondeur de 2 mm dans de l'aluminium et environ 30 s dans du CFRP. La technique PT est donc limitée à l'observation des défauts peu profonds et donne des contrastes en température faibles. Une règle empirique est que le rayon du plus petit défaut détectable est au moins 1 à 2 fois plus large que sa profondeur [11].

L'utilisabilité de la PT en CND va dépendre des matériaux observés (de la diffusivité thermique), de leur épaisseur, de la manière d'exciter thermiquement l'objet, des NETD des caméras thermiques utilisées, et des techniques de post-traitements de séquences temporelles qui permettent d'aller discriminer les zones défectueuses. Dans la suite, nous allons analyser les solutions qui sont apparues en pratique et qui constituent les applications modernes de la PT pour le domaine du composite.

Il est à noter que la thermographie pulsée fonctionne aussi bien avec un dépôt de chaleur qu'avec un refroidissement bref, ce qui peut être utile pour analyser un composant déjà à haute température (sortant d'un four, p.ex.).

Actuellement, les systèmes les plus courants commercialement utilisent des lampes flash à haute énergie qui chauffent une surface entière. Lorsque nous parlons ici de Thermographie Pulsée, nous sous-entendons donc l'utilisation de lampes flash à hautes énergies qui permettent d'élever la température de quelques degrés.

La manière dont sont traités les signaux temporels des images thermiques  $T(t)$  est capitale si l'on veut caractériser les défauts, comme par exemple déterminer la profondeur de ceux-ci.

Ainsi une série de techniques de post-traitements ont été développées afin d'améliorer la visibilité des défauts. Elles s'adressent principalement à la thermographie pulsée, peu importe le moyen d'excitation. Nous allons décrire les techniques suivantes :

- le contraste absolu différentiel (Differential Absolute Contrast - DAC)
- la thermographie pulsée en phase (Pulse Phase Thermography - PPT)
- la reconstruction du signal thermographique (Thermographic Signal Reconstruction - TSR)
- la décomposition du signal thermographique en composantes principales (Principal Component Thermography - PCT)

### 3.3.2.1 Le contraste absolu différentiel - Differential Absolute Contrast (DAC)

Il existe différentes définitions du contraste thermique [11]. Elles nécessitent toute de spécifier une zone saine  $S_a$  (sans défaut). Le contraste thermique absolu est défini par

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{Sa}(t) \quad (28)$$

avec  $T_d(t)$  la température d'un pixel (ou la moyenne d'un groupe de pixels) dans une zone défectueuse à l'instant  $t$  et  $T_{Sa}(t)$  la température à l'instant  $t$  pour la zone  $S_a$ . Aucun défaut ne peut être détecté si  $\Delta T(t)=0$ . Le principal inconvénient de la technique est d'établir la zone saine  $S_a$ , en particulier par des techniques automatisées.

Dans la méthode DAC, au lieu de chercher une zone sans défaut pour définir  $S_a$ , une température idéale  $T_{Sa}(t)$  est calculée localement sur les quelques premières images à un instant  $t'$  choisi entre  $t_0$ , instant du flash, et  $t_1$ , instant auquel il y a assez de contraste pour observer le défaut. Pour tout temps  $t'$  tel que  $t_0 < t' < t_1$ , on a donc

$$T_{Sa}(t') = T(t') = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t'}} \quad (29)$$

On notera que le rapport  $Q/e$  qui est une donnée invariable dans le problème peut s'écrire

$$\sqrt{\pi t'} T_{Sa}(t') = \sqrt{\pi t} T_{Sa}(t) = \frac{Q}{e} \quad (30)$$

Pour tout instant  $t > t_1$ , on calcule alors en chaque point de l'image

$$\Delta T_{DAC}(t) = T(t) - T_{Sa}(t) = T(t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} T(t') \quad (31)$$

La Figure 46 illustre l'intérêt de la technique DAC [17]. A gauche (a), le contraste thermique absolu défini par l'équation 33 a été utilisé en définissant 4 points dans les zones saines ( $S_{a1}$  à  $S_{a4}$ ), représentés sur le thermogramme. Le résultat obtenu par la technique DAC à droite (b) montre clairement que l'on s'affranchit du choix de la zone saine obtenant ainsi des contrastes identiques avec chacune de celles-ci. Cette technique montre cependant ses limites pour des temps élevés car l'équation 34 provient du modèle du solide semi-infini qui n'est qu'une approximation.

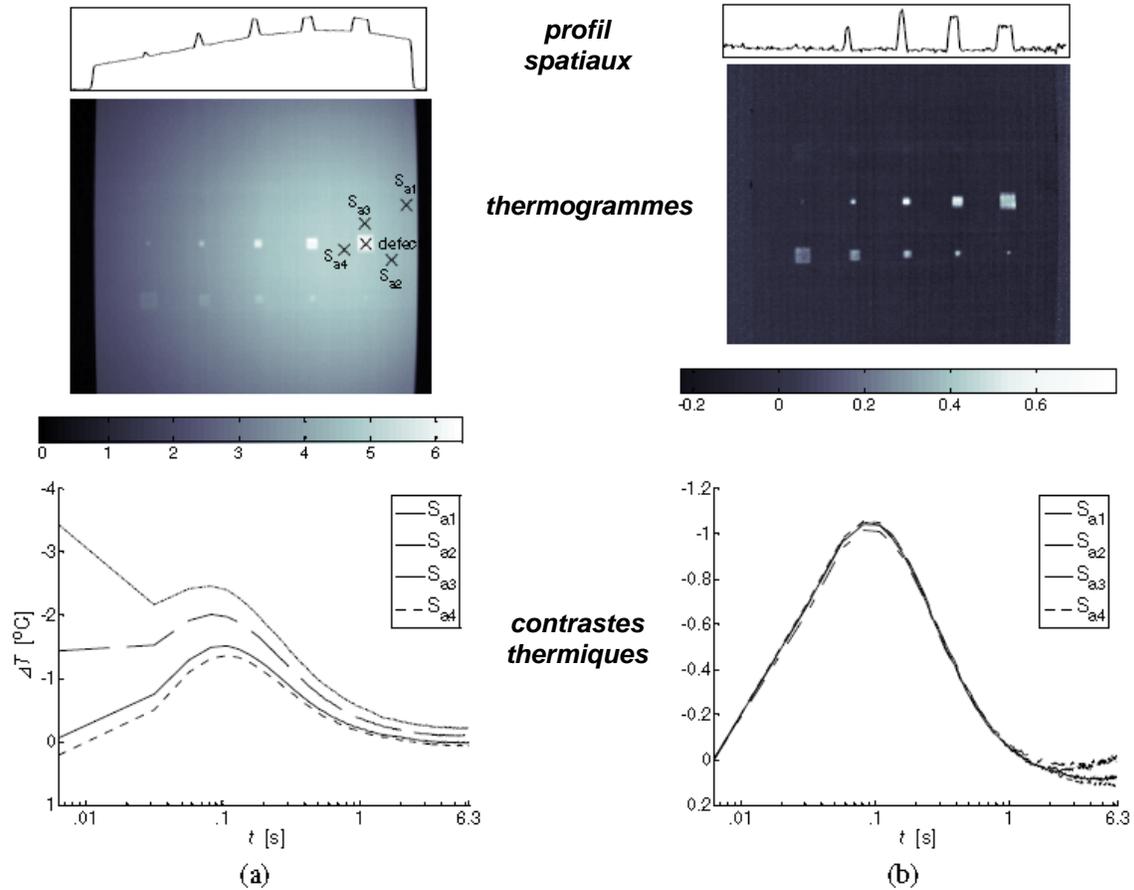


Figure 43. Profils spatiaux, thermogrammes et contrastes thermiques obtenus (a) en choisissant des zones saines Sa1, Sa2, Sa3 et Sa4 différentes, (b) en utilisant la technique DAC qui s'affranchit de ce choix

Récemment divers auteurs ont proposé des méthodes DAC modifiées en utilisant un modèle plus complet pour décrire la propagation de la chaleur dans un matériau d'épaisseur finie (modèles des quadrupoles thermiques) [18]. L'expression de  $T_{Sa}$  dans l'expression de  $\Delta T_{DAC}$  ci-dessus n'est plus donnée par la racine carrée du rapport  $t'/t$  mais est calculée par rapport de transformée de la Laplace inversée de quantités dépendant de paramètres tels la diffusivité du matériau, son épaisseur et l'instant  $t'$ . La méthode DAC modifiée est sensible à certains paramètres d'entrée mais donne de meilleurs résultats que la technique originelle pour des défauts plus profonds, dont le signal est visible plus tard que les défauts superficiels.

### 3.3.2.2 La thermographie pulsée en phase - Pulse Phase Thermography (PPT)

Une impulsion peut être décomposée mathématiquement en la somme d'une multitude de composantes sinusoïdales individuelles. Ainsi l'excitation pulsée correspond à l'émission de plusieurs ondes thermiques, d'amplitudes et de fréquences variables, selon un mode transitoire. La démodulation de cet ensemble de fréquences pour retrouver les composantes individuelles est une technique de post traitement que l'on nomme la thermographie pulsée en phase.

La technique consiste à utiliser le signal thermique temporel  $T(t)$  pris à chaque intervalle de temps  $\Delta t$  en chaque pixel  $T(t)=T(k\Delta t)$  et à lui appliquer une transformée de Fourier unidimensionnelle discrète pour obtenir un signal dans l'espace de phase dont la nième composante est donnée par

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) \exp(-j2\pi kn/N) = Re_n + j Im_n \quad (32)$$

où  $n$  est l'incrément en fréquence ( $n=0,1,\dots,N$ ),  $\text{Re}$  et  $\text{Im}$  sont respectivement les parties réelle et imaginaire. De ces dernières, on peut déduire l'amplitude  $A_n$  et la phase  $\phi_n$  pour chaque composante :

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2} \quad (33)$$

$$\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n}\right) \quad (34)$$

L'analyse des images en amplitude et en phase des fréquences basses permet d'obtenir une image des défauts profonds tandis qu'à plus hautes fréquences, on observe mieux les défauts proches de la surface.

Traditionnellement on s'intéresse plutôt aux images de phase car elles ne sont pas entâchées des variations spatiales de l'échauffement. En effet, en thermographie excitée optiquement, on retrouve quasiment toujours dans les images une empreinte de la lampe dans l'image, ce qui réduit fortement la visibilité des défauts. Cet effet n'est plus présent dans les images de phase  $\phi_n$ .

Un paramètre important de la technique PPT est la durée d'acquisition de la séquence temporelle. La résolution en fréquence étant donnée par l'inverse du temps d'observation, elle sera d'autant meilleure que l'on acquiert une longue série de thermogrammes [14].

L'autre paramètre d'importance est la fréquence d'échantillonnage qui doit être suffisamment élevée pour ne pas générer d'aliasing (supérieur à la fréquence de Nyquist) [14]. L'échantillonnage en fréquence est donné par

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (35)$$

Pour avoir la fréquence d'échantillonnage la plus élevée, le choix de la caméra est crucial. Ainsi généralement la technologie refroidie fournit des performances meilleures à ce niveau par rapport à celle des microbolomètres non refroidis.

L'observation des défauts à différentes profondeurs se fera en sélectionnant la première harmonique (basse fréquence) de la série de Fourier et les défauts plus superficiels en sélectionnant une harmonique supérieure (haute fréquence). La Figure 43 montre un exemple d'images de phase obtenue avec un échantillon contenant des défauts de dimensions et profondeurs variées [14]. La durée d'acquisition est de 16 secondes, ce qui donne une fréquence de 0,06 Hz pour la première harmonique, les harmoniques suivantes étant des multiples entiers de celle dernière. La figure (a) correspond à l'harmonique 1 (0,06 Hz) et montre les défauts les plus profonds, tandis que la figure (b) correspondant à l'harmonique 7 (0,44 Hz), montre des défauts superficiels.

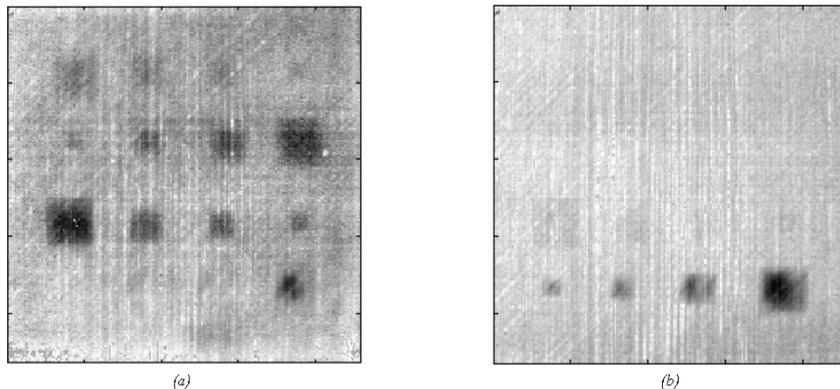


Figure 44. Images de phase d'un échantillon avec des inclusions à différentes profondeurs et différentes tailles : (a) harmonique 1 (0,06 Hz), (b) harmonique 7 (0,44 Hz) [14]

### 3.3.2.3 La thermographie aux composantes principales - Principal Component Thermography (PCT)

La thermographie pulsée en phase (PPT) a clairement démontré son efficacité pour améliorer le contraste des défauts, elle suscite une interrogation conceptuelle en ce qui concerne le fait que l'on cherche à représenter un signal décroissant exponentiellement par des fonctions oscillantes typiques de la transformée de Fourier. Partant de ce constat, Rajic [15,16] a développé une voie alternative qui comme la PPT utilise la décomposition en base de fonctions orthogonales entre elles, mais contrairement à la PPT qui impose des fonctions oscillantes, sa technique utilise des fonctions orthogonales empiriques (EOF - Empirical Orthogonal Functions) qui se construisent sur base des données elles-mêmes, maximisant la projection des données sur les éléments de cette base.

La technique requiert l'acquisition d'une séquence de  $N_t$  thermogrammes de dimensions spatiales  $N_x \times N_y$ . Cette série de thermogrammes fournit une matrice tridimensionnelle ( $N_x \times N_y \times N_t$ ) qui est réarrangée en matrice bidimensionnelle  $A$  ( $M \times N$ ) avec  $M = N_x N_y$  et  $N = N_t$ .

La matrice  $A$  ( $M \times N$ ) se réécrit

$$A = U \Gamma V^T \quad (36)$$

Si  $M > N$ , la matrice  $\Gamma$  est une matrice diagonale  $N \times N$  dont les éléments positifs ou nuls représentent les valeurs singulières de  $A$ ,  $U$  est une matrice  $M \times N$  et  $V^T$  est la transposée d'une matrice  $N \times N$ . Les colonnes de la matrice  $U$  contiennent les modes orthogonaux décrivant les variations spatiales dans les observations. La contribution de ces modes sont proportionnels aux valeurs singulières et varient dans le temps selon les coefficients des composantes principales associées (ou fonctions propres) qui apparaissent en ligne dans la matrice  $V^T$ .

La technique de la décomposition en valeurs singulières (SVD) est appliquée à cette matrice  $A$  réarrangée fournit donc des matrices  $U$ ,  $\Gamma$  et  $V^T$  qui dont les éléments fournissent un ensemble de compact réduit et compact représentant l'évolution du champ de température.

Les modes orthogonaux les plus pertinents sont les 2 premiers. Le premier (EOF1) représente la dilatation globale de la pièce et le second, plus faible, (EOF2) donne la réponse des défauts locaux (Figure 44). On cherchera donc à analyser l'évolution temporelle de ce second mode en lui associant un contraste (Primary Contrast Mode - PCM).

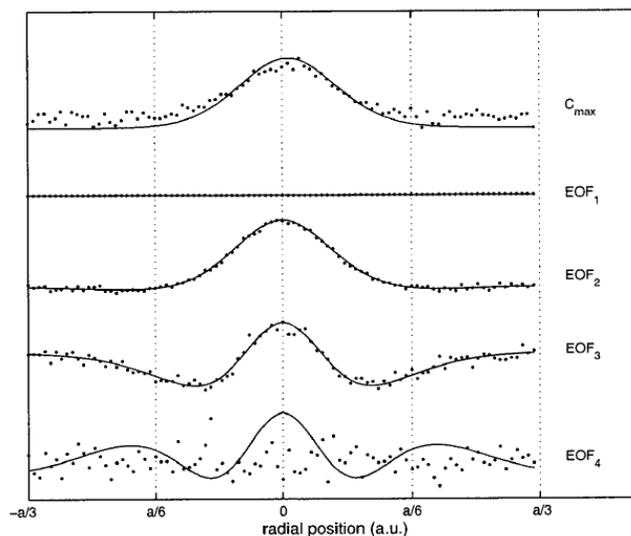


Figure 45. Différents modes orthogonaux empiriques (EOF) et image de contraste maximum [16].

L'auteur effectue une comparaison de la technique PPT et PCT et montre que le rapport signal/bruit est meilleur avec la PCT qu'avec la PPT. Cela se voit sur la Figure 45 où l'auteur effectue l'analyse d'une série de thermogrammes obtenu sur un échantillon avec des défauts de plus en plus profonds et déduit, d'une part, le contraste lié au mode EOF2 (PCM) avec la techniques PCT et, d'autre part, les images de phases pour différentes harmoniques ( $\phi_{1FR}, \dots, \phi_{4FR}$ ) avec la technique PPT. On y retrouve aussi le thermogramme pour lequel le contraste maximum était observé.

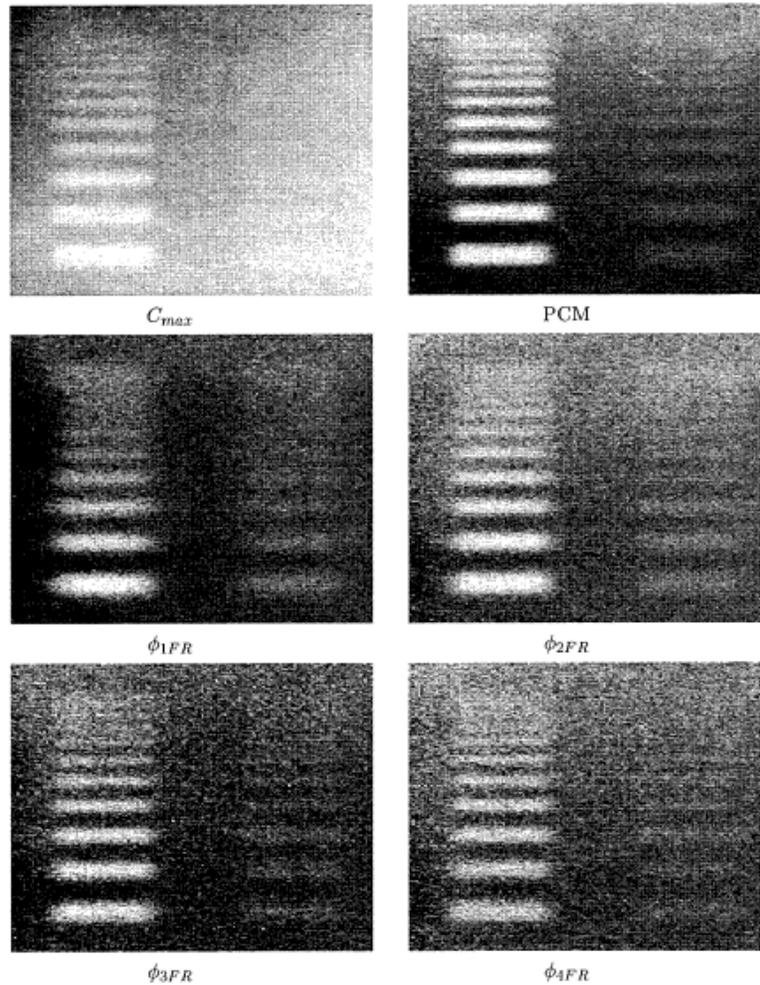


Figure 46. Comparaison entre contraste du mode EOF2 (PCM) obtenu avec technique PCT et les 4 premières harmoniques obtenues avec la technique PPT [16]

### 3.3.2.4 La reconstruction du signal thermographique - TSR

La technique TSR est une technique dont l'attrait réside dans l'accroissement de la résolution spatio-temporelle d'une séquence de thermogrammes, tout en réduisant la quantité de données. La TSR est basée sur l'hypothèse que les profils de décroissance thermique d'une zone non défectueuse suivent une courbe donnée par la solution uni-dimensionnelle de l'équation de propagation de la chaleur, que l'on réécrit sous forme logarithmique de la manière suivante :

$$\ln(\Delta T(t)) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t) \quad (37)$$

Shepard [19] effectue un fit polynomial des données provenant de séries de thermogrammes. En un pixel donné, les valeurs de température prise sur série de thermogrammes sont approximées par un polynôme de degré  $p$  du type

$$\ln(\Delta T(t)) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_p \ln^p(t) \quad (38)$$

Les zones sans défaut vont suivre une décroissance linéaire (représentée par les 2 premiers termes) tandis que les zones défectueuses vont s'écarter de la linéarité pendant un certain temps. La figure montre le signal thermique de 2 zones ayant des comportements différents. Ainsi la détection des inflexions des courbes permet, si l'on connaît la diffusivité du matériau, de déterminer la profondeur d'un défaut ou de tout autre matériau/élément de structure sous jacent. Il suffit de calculer la dérivée seconde du signal TSR.

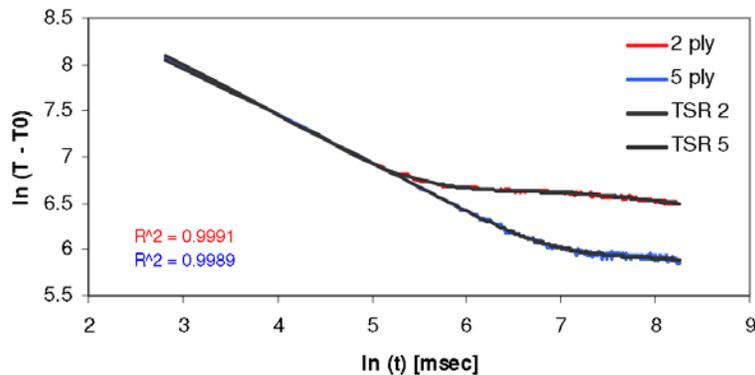


Figure 47. Données brutes et approximation TSR de zones avec 2 et 5 plis [20]

La série de thermogrammes peut se réduire à un ensemble de  $p+1$  paramètres, généralement 5 ou 6 par pixels, ce qui représente un avantage important en terme de compression des données. Les thermogrammes reconstruits comportent un niveau de bruit assez faible. La Figure 48 montre un exemple de thermogramme obtenu avec un échantillon de CFRP de 3,3 mm d'épaisseur et des inserts de Rohacell de diamètres 25,4 mm, 12,7 mm et 6,3 mm à des profondeurs diverses. Le thermogramme originel (gauche) est obtenu après 1,6 s après le flash, après traitement TSR on obtient l'image de droite qui montre que les plus petits défauts les plus profonds (2 mm) sont observables.

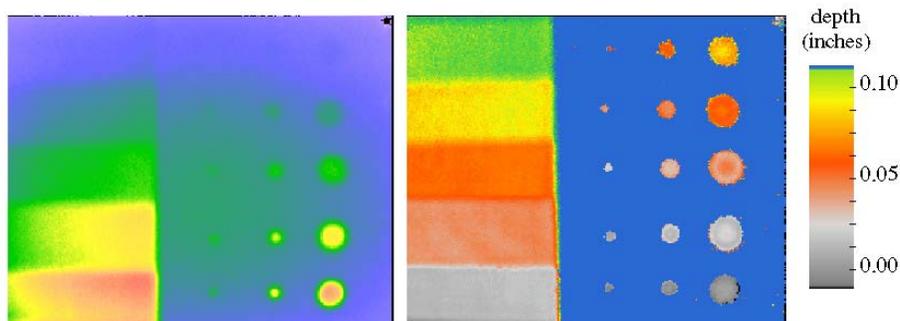


Figure 48. Thermogramme original (gauche) et reconstruit par TSR (droite) [20]

### 3.3.3 La thermographie optique modulée - Lock-in Thermography (LT)

En thermographie modulée, la surface de la pièce testée est illuminée périodiquement par une ou plusieurs sources lumineuses (généralement des lampes halogènes) (Figure 49). L'onde se propage alors dans le matériau et les défauts internes se comportent comme des barrières à la propagation de

la chaleur, produisant une modification de l'amplitude et la phase de la réponse en température à la surface du matériau. La réponse thermique du matériau est enregistrée durant les cycles d'excitation. En général des ondes thermiques sinusoïdales sont utilisées.

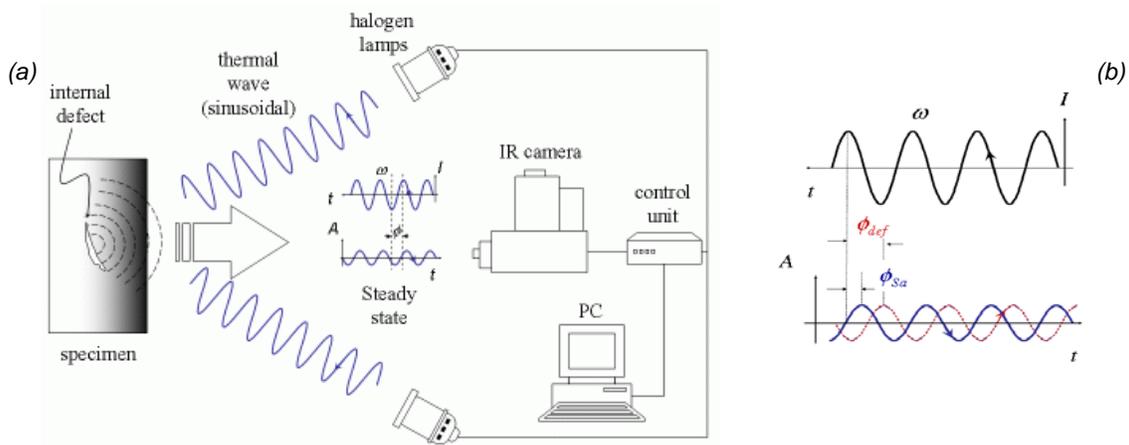


Figure 49. Principe de la thermographie modulée ou lock-in [12]

Comme le montre la Figure 49 (b), si on utilise des ondes thermiques sinusoïdales, la réponse du matériau est sinusoïdale (graphe inférieur), seule l'amplitude est altérée. La réponse provenant d'un défaut accuse un retard de phase  $\phi_{def}$  différent de celui de la réponse venant d'une partie saine de la pièce  $\phi_{Sa}$ . Le retard de phase étant proportionnel à la profondeur du défaut, des ondes thermiques de fréquences plus basses vont permettre de sonder des défauts plus profonds. Une analyse par Lock-in Thermography consiste à moduler les lampes avec des fréquences différentes pour en retirer des informations à différentes profondeurs.

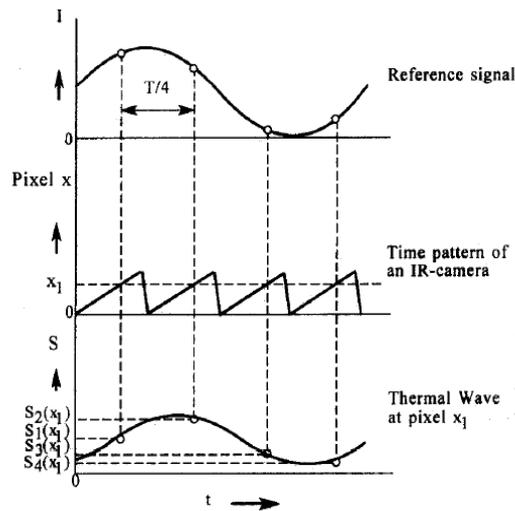


Figure 50. Variation de l'excitation thermique (haut) et température observée sur un pixel  $x_1$  donné (bas).

A l'instar de la thermographie pulsée, il existe différentes manières de traiter le signal modulé. Cependant la littérature est peu abondante sur le sujet car une technique simple et efficace s'est imposée et est couramment utilisée dans les systèmes commerciaux. Il s'agit de la technique à 4 images séparées de  $\frac{1}{4}$  de période [21] et qui s'apparente à la technique du décalage de phase utilisée en interférométrie. Elle est illustrée à la Figure 50 : l'onde thermique est modulée de manière sinusoïdale et le signal en température mesuré sur un pixel donné  $x_1$ . Le signal  $S_k(x_1)$  est mesuré à 4 instants  $t_k$  ( $k=1, \dots, 4$ ). On en déduit l'amplitude et la phase du signal selon les formules suivantes

$$\varphi(x_1) = \tan^{-1} \left[ \frac{S_1(x_1) - S_3(x_1)}{S_2(x_1) - S_4(x_1)} \right] \quad (39)$$

$$x_1 = \sqrt{[S_1(x_1) - S_3(x_1)]^2 + [S_2(x_1) - S_4(x_1)]^2} \quad (40)$$

Il est intéressant de noter que les images de phase  $\varphi(x,y)$  obtenues sur l'ensemble des pixels sont exemptes des inhomogénéités d'éclairage.

Les signaux  $S_k$  doivent être acquis sur au moins une période de modulation de la lampe. Le rapport signal/bruit est amélioré si plusieurs cycles sont effectués et les résultats moyennés sur ceux-ci. La littérature regorge d'exemples d'inspection non destructive par Lockin Thermography, en particulier, le groupe de l'IKT de Stuttgart, à la base de la technique, s'est illustré dans bon nombre d'applications. La Figure 51 montre des résultats obtenus par la technique à 4 images sur un échantillon en composite (portion de bord d'attaque d'aile d'avion). La Figure 51 (a) est l'image en amplitude, qui montre l'effet de chauffe de la lampe plus important sur une partie de la pièce, la Figure 51 (b) montre le résultat en phase pour lequel on a des détails de la réponse locale, liée à la construction interne de la pièce (surépaisseurs, etc..)

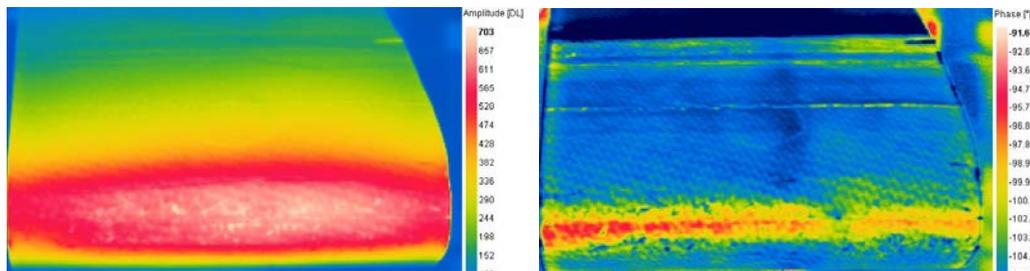


Figure 51. (a) Image en amplitude obtenue sur portion de bord d'attaque en CFRP, (b) Image de phase

La Figure 52 montre la réponse d'une structure en composite avec des raidisseurs à l'arrière. Les images de phase ont été obtenues avec différentes fréquences de modulation. Les fréquences les plus basses permettent d'observer plus en profondeur [22], notamment la présence des raidisseurs.

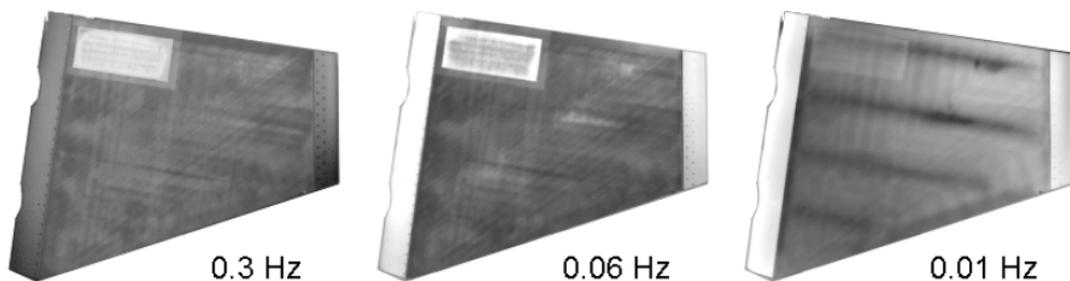


Figure 52. Images de phase (en niveau de gris) montrant la réponse de la pièce à différentes fréquences.

Une des faiblesses de la technique lock-in optique est qu'elle nécessite une grande stabilité dans le montage car il ne faut pas que l'objet bouge pendant que la lampe effectue son cycle. Dans le cas des composites, les fréquences utilisées sont basses, et si l'on désire obtenir un bon rapport signal-bruit, il faut moyennner sur plusieurs cycles. Ainsi une mesure peut prendre plusieurs minutes.

### 3.3.4 La vibrothermographie

Dans le cas de l'excitation mécanique, l'énergie est appliquée au spécimen au moyen d'oscillations mécaniques utilisant un transducteur sonore, ultrasonique ou à plus basse fréquence mécanique (piezo, shaker) qui est mis en contact avec le spécimen, le plus souvent au travers de milieu couplant. Dans ce cas le défaut est excité de manière interne et l'énergie mécanique est dissipée aux

discontinuités sous forme de chaleur qui se propage dans le matériau par conduction jusqu'à être visible en surface.

La Figure 54 montre un excitateur ultrasonore en contact avec la pièce, soit dans une installation fixe (a) ou en configuration manuelle (b). La figure (c) montre un détail du couplage avec la pièce, ici au travers d'un adhésif aluminium.



Figure 53. Dispositifs d'excitation vibratoire pour la vibrothermographie

Comme pour le cas de l'excitation optique, on décline la vibrothermographie modulée en amplitude (lock-in) [24,25] et en mode pulsé (ultrasound burst) [26] et. La Figure 55 illustre les deux possibilités. Contrairement à l'excitation optique par lampe, l'excitation est plus rapide, d'une fraction de secondes à quelques secondes. En régime pulsé, on applique le traitement en phase, à l'instar de ce que l'on fait en Pulse Phase Thermography basée sur des lampes (section 3.3.2.1.1). La remarque est valable pour la vibrothermographie lock-in.

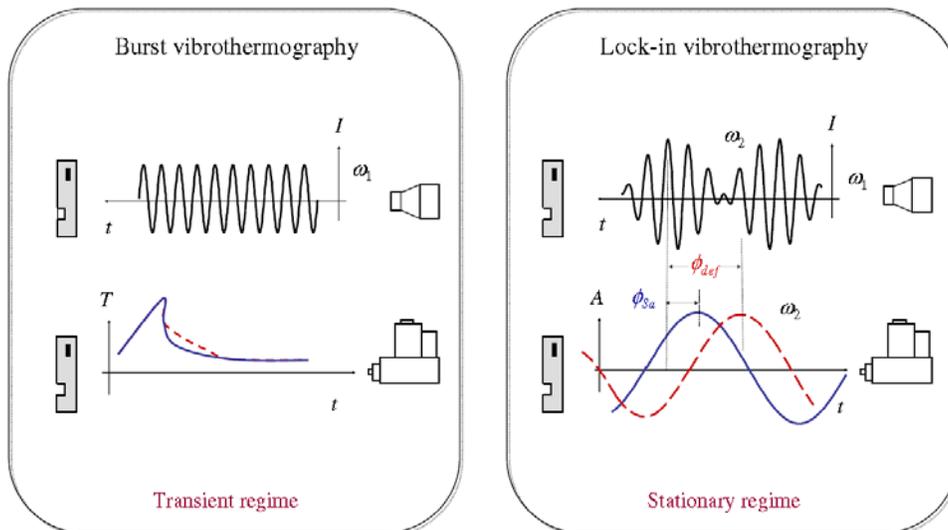


Figure 54. Schémas conceptuels de la vibrothermographie en régime pulsé (burst) et modulé en amplitude à fréquence fixe (Lock-in) [27]

Il est aussi possible de moduler la fréquence dans l'un ou l'autre mode, on parle alors de « wobble », et dont l'idée est de couvrir une série de plages de fréquences car il est a priori difficile de prédire la meilleure fréquence pour une application donnée. La Figure 56 illustre le principe de la wobble en régime impulsionnel.

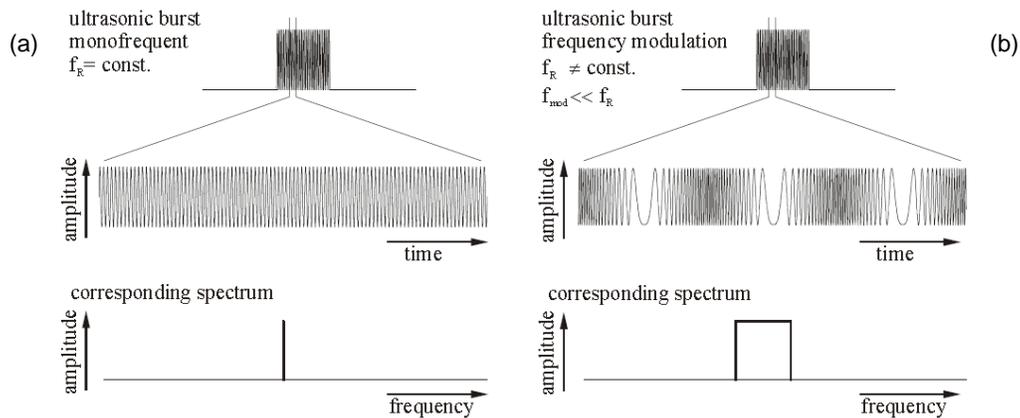


Figure 55. Comparaison du régime ultrasonore pulsé à une fréquence ultrasonore (a) et wobble (b) [26]

La wobble a comme avantage de s'affranchir de l'observation d'ondes thermiques stationnaires qui peuvent apparaître lorsqu'une seule fréquence est appliquée. La Figure 57 montre l'exemple de l'utilisation de la wobble en régime pulsé. L'image de gauche montre l'image de meilleur contraste thermique obtenu après impulsion ultrasonore, l'image du centre est une image de phase obtenue par application d'un calcul de Fourier (similaire à la Pulse Phase Thermography). Dans cette dernière, on observe les échauffements dus aux ondes mécaniques stationnaires provoqués par l'excitation à une seule fréquence ultrasonore. L'image de droite montre l'application de la wobble qui permet d'éviter les ondes stationnaires, augmentant ainsi la qualité des résultats. En bas à droite de l'image, on aperçoit le dispositif d'excitation.

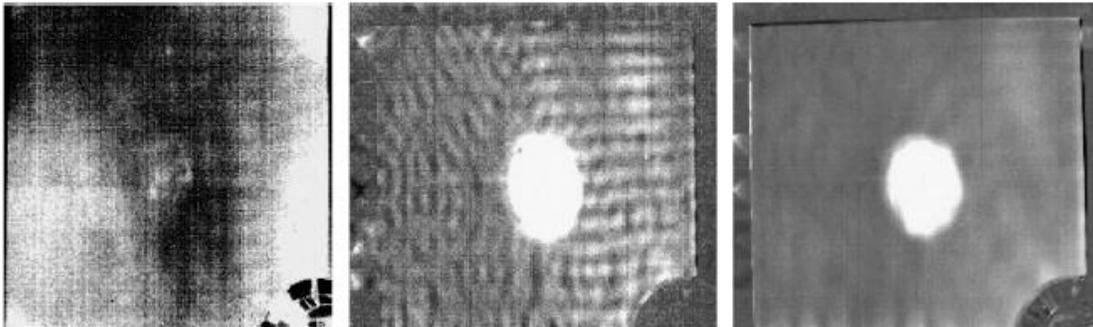


Figure 56. Exemples d'inspection par vibrothermographie en régime pulsé. A gauche, image de meilleur contraste, au centre après calcul de phase (Ultrasound Burst Phase Thermography) et à droite après application de la wobble [26]

## Références

1. COFREND, [www.cofrend.com](http://www.cofrend.com)
2. ASNT, [www.asnt.org](http://www.asnt.org)
3. T. Kreis, *Holographic Interferometry – Principles and Methods* (Akademie Verlag, 1996).
4. R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry* (Cambridge University Press, 1989).
5. J. Li and P. Picart, *Holographie numérique. Principes, algorithmes et applications*, (Hermès, 2012)

6. S. De Nicola, P. Ferraro, A. Finizio, and G. Pierattini, "Wave front reconstruction of Fresnel off-axis holograms with compensation of aberrations by means of phase-shifting digital holography," *Opt. Las. Eng.* **37**, 331 (2002).
7. W. Steinchen, *Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing*, SPIE-International Society for Optical Engineers (31 Jan 2003)
8. K. Creath, "Phase-measurement interferometry techniques", *Progress in Optics XXVI*, 349-393 (1988)
9. D.W. Robinson, and G.T. Reid, eds., *Interferogram Analysis. Digital Fringe Pattern Measurement Techniques* (IOP Publishing, 1993)
10. D. Ghiglia, and M.D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software* (Wiley, 1998)
11. X. Maldague, "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing", Wiley Interscience (2001)
12. Visioimage, Tutorial ([www.visioimage.com](http://www.visioimage.com))
13. X. Maldague, S. Marinetti, "Pulse Phase Infrared Thermography", *J. Appl. Phys.* **79**(5), pp. 2694-2698 (1996)
14. S. Marinetti, Y.A. Plotnikov, W.P. Winfree, A. Braggiotti, "Pulse Phase thermography for defect detection and visualization", NASA Technical Document NASA/TM-2004-211991/PT3, 1999 (<http://hdl.handle.net/2060/20040086812>)
15. N. Rajic, "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures", *Composite Structures* **58**, pp. 521-528 (2002)
16. N. Rajic, "Principal component thermography", Report DSTO-TR-1298, BSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Victoria Australia, April 2002
17. C. Ibarra-Castanedo, A. Bendada and X. Maldague, "Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography", *International Workshop on Imaging NDE*, Chennai, India, April 25-28 (2007)
18. H. Benitez, C. Ibarra-Castanedo, A. Bendada, X. Maldague, H. Loaiza, E. Caicedo, "Modified Differential Absolute Contrast Using Thermal Quadrupoles for the Nondestructive Testing of Finite Thickness Specimens by Infrared Thermography", CCECE 2006 - *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* -, Ottawa (Ontario) Canada, May 7-10 (2006)
19. S.M. Shepard, "Advances in Pulsed Thermography", *Proc. SPIE 4360 Thermosense XXVIII*, pp.511-515 (2011)
20. S.M. Shepard, "Flash Thermography of Aerospace Composites", IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, October 2007
21. G. Busse, D. Wu, W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography", *J. Appl. Phys.* **71**, pp. 3962-3965 (1992)
22. T. Ullmann, R. Aoki, T. Schmidt, "Lock'in thermography for process integrated non destructive evaluation of carbon fiber reinforced aircraft structures", 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Quantitative Infrared Thermography (QIRT10), July 27-30, Québec, Paper 140 (2010)
23. J. Rantala, D. Wu, G. Busse, "Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites", *Research in Nondestructive evaluation*, **7**, pp.215-218 (1996)

24. Th. Zweschper, A. Dillenz, G. Riegert, D. Scherling, G. Busse, "Ultrasound excited thermography using frequency modulated waves", *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 45 (3), pp. 178-182 (2003)
25. Th. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz, G. Busse, "Ultrasound burst phase thermography (UBP) for applications in the automotive industry", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 22*, AIP Conference Proceedings, Volume 657, pp. 531-536 (2003)
26. C. Ibarra-Castenado, M. Genest, S. Guibert, J-M. Piau, X. Maldague, A. Bendada, "Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: a comparative study", *Proc. SPIE 6541 on Thermosense XXIX*, paper 654116 (2007)