

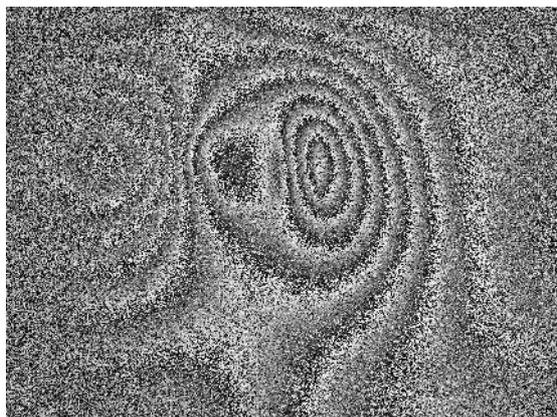
BLAIN Pascal

Promotion 2007

Mémoire de Projet de fin d'étude

Université Louis Pasteur
Master de science ® mention ISTI spécialité PARI

Détection de défauts par Shearographie dans les ouvrages d'arts



Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, tout particulièrement le groupe de recherche « Métrologie et Méthodes Physiques », au sein duquel j'ai effectué mon stage.

Je remercie Valérie MUZET, mon maître de stage, pour m'avoir permis de participer à ce projet, pour ses conseils et le temps qu'elle m'a consacré.

Je remercie également Pierre CHARBONNIER, responsable des méthodes optiques et traitement d'images au laboratoire, pour son aide et ses conseils.

Je citerai également les autres stagiaires du groupe, pour leur gentillesse et leur soutien.

Cette dernière année d'étude à l'ENSPS, de spécialisation dans le domaine du traitement de l'image, s'est avérée être des plus instructives. Merci aux enseignants d'avoir su communiquer et transmettre des notions souvent complexes.

Merci à l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'ENSPS pour ces trois années de formation.

Résumé

Dans les ouvrages d'art, les fissures sont un signe de fragilisation de la structure. La détection et la caractérisation préventives de ces fissures permettent de réduire les coûts d'intervention. Le contrôle non destructif permet de caractériser l'état d'intégrité de structures, sans les dégrader.

La shearographie, également appelée interférométrie de speckle à dédoublement latéral est une méthode optique sans contact, plein champ, qui possède une certaine tolérance aux mouvements d'ensemble de la structure inspectée. Elle permet de mesurer des déplacements de l'ordre de quelques nanomètres entre deux états d'un objet.

Le Laboratoire des Ponts et Chaussées de Strasbourg voudrait optimiser son installation de shearographie pour la détection de fissures dans les ouvrages d'art. Cet exposé propose l'étude des différentes méthodes de calcul de phase par shearographie ainsi que les techniques de quantification de défaut.

Les méthodes de calcul de phase par transformée en ondelettes de Morlet et transformée de Hilbert sont les plus adaptées à notre étude. Elles sont implémentées et testées en laboratoire et en extérieur sur des ouvrages d'art. Les cartes de déphasage obtenues ont un meilleur contraste que celles recueillies avec les algorithmes classiques de calcul de phase. La méthode de quantification choisie est celle de détermination de longueur de défaut dans la direction du cisaillement par transformée en ondelettes. Un premier test satisfaisant de faisabilité a été réalisé en laboratoire.

Abstract

The metallic and concrete structures used in civil Engineering show their defects by the appearance of cracks. Early detection of defects on concrete structures is of a crucial importance since it makes maintenance tasks easier, hence minimizing the costs of repair. Non destructive evaluation allows to characterize the state of integrity of structures, without degrading them.

Shearography, also called differential speckle interferometry, is an optical method without contact, full field, which has a certain tolerance with the overall movements of the inspected structure. It makes it possible to measure displacements about some nanometers between two states of an object.

The Laboratoire des Ponts et Chaussées de Strasbourg would like to optimize its shearography installation for the detection of cracks in structures. This survey proposes the study of the various calculation methods of phase by shearography as well as the techniques of defect quantification.

The phase calculation methods, the Morlet wavelet transform and the Hilbert transform suit to our study. They are implemented and tested in laboratory and outside on real structures. The obtained phase shift maps have a better contrast than the ones made with the classic algorithms of phase calculation. The selected method of quantification is length of defect determination in the shearing direction by Wavelet transform. A first satisfactory test of feasibility was realized in laboratory

Table des matières

Remerciements.....	2
Résumé.....	3
Abstract.....	4
Table des matières.....	5
Introduction.....	7
Contexte et but de l'étude.....	8
2. Problématique.....	9
1. Analyse du besoin.....	9
2. Utilisation de la shearographie.....	10
3. La shearographie.....	11
1. Le speckle.....	11
2. Interférométrie de speckle à dédoublement latéral ou shearographie.....	11
2.1. Principe.....	12
2.2. Calcul théorique.....	12
2.3. Décorrélation du speckle.....	15
3. Détection de défaut.....	15
4. Cahier des charges.....	16
1. Présentation du projet.....	16
2. Description du projet.....	16
3. Prestations attendues.....	17
4. Planning.....	17
État de l'art de la shearographie.....	18
5. L'extraction de phase.....	19
1. Décalage de phase à N images.....	19
2. Phase en continu.....	19
3. Temps moyenné.....	20
4. Addition/soustraction de phase.....	21
5. Méthodes pour l'étude de déformations continues.....	22
5.1. Étude de déformations continues de grande amplitude.....	22
5.2. Calcul de la phase pour l'étude de déformations continues de grande amplitude.....	22
6. La Shearographie quantitative.....	26
1. Le décisaillage.....	26
1.1. Déformation de l'image apportée par la shearographie.....	26

1.2. Principe.....	26
1.3. Autres algorithmes.....	27
2. La transformée en ondelette de Haar.....	29
3. Détermination de la longueur d'un défaut suivant la direction du cisaillement.	29
3.1 Principe.....	29
3.2 Longueur d'un défaut à partir des extrema du profil de phase.....	30
3.3 Recherche par transformée en ondelettes.....	31
7. Application in situ et aux ouvrages d'art.....	34
1. La shearographie en extérieur.....	34
2. Tests effectués en extérieurs sur des échantillons en béton armé.....	34
2.1. Gestion des paramètres extérieurs.....	34
2.2. Les types de fissures détectées.....	34
2.3. Les différentes sollicitations.....	35
3. Shearographie et ouvrages d'art.....	35
8. Synthèse.....	37
Mise en oeuvre et expérimentations.....	38
9. Prise en main du matériel et évaluation de ses performances	39
1 Dispositif disponible AU LRS.....	39
2 Amélioration matérielle.....	40
3 Étude expérimentale de l'influence de la taille du speckle.....	41
3.1 Résolution spatiale des franges.....	41
3.2 Incertitude de phase.....	42
3.3 Ouverture numérique optimale.....	43
10. Adaptation logicielle.....	44
1. Acquisition et enregistrement d'image.....	44
2. Nouvelles méthodes de calcul de phase.....	45
2.1 Pré-traitement.....	45
2.2 La transformée en ondelettes de Morlet	46
2.3 La transformée de Hilbert.....	47
2.4 Le traitement des déphasages.....	47
3. La quantification.....	48
3.1 Principe.....	48
3.1.1 Étalonnage.....	48
3.1.2 Acquisition et traitement de carte de phase.....	50
3.1.3 Reconversion pixel en distance métrique	51
3.1.4 Mise en oeuvre de la transformée en ondelettes.....	51
11. Expérimentations.....	54
1 Tests en laboratoire	54
2 Tests en extérieur.....	56
2.1 Premiers tests.....	56
2.2 tests sous un pont circulé fissuré.....	57
3 Quantification.....	60
Conclusion.....	63
Bibliographie.....	64
ANNEXE.....	67
Présentation du laboratoire.....	68

Introduction

Dans les ouvrages d'art, les fissures sont un signe de fragilisation de la structure. La détection et la caractérisation préventive de ces fissures permet de réduire les coûts d'intervention. Les moyens de mesures conventionnels sont généralement ponctuels. La précision et le diagnostic de ces mesures dépendent beaucoup de l'expérience de l'opérateur. Les méthodes optiques permettent de réaliser objectivement un tel contrôle ainsi qu'une visualisation du champ de déformation d'un objet. L'interférométrie de speckle à dédoublement latéral ou shearographie est l'une de ces techniques. Elle semble assez robuste pour être utilisée sur site [MUZET_06]. Elle donne accès à la dérivée première des déplacements et à la détection de défaut d'un objet stimulé par des actions mécaniques, thermiques ou ondulatoires.

Au vu de ces caractéristiques, le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg (LRS) a fait l'acquisition d'une installation de shearographie auprès de la société HOLO3. Des tests [MUZET_04] et [MUZET_06] ont été effectués, aussi bien en laboratoire qu'en extérieur sur de petits échantillons. Ces expériences sont prometteuses pour la détection de défauts sur des structures en métal ou en béton. Cependant, opérer des mesures sur de réels ouvrages d'art constitue un tout autre challenge. En effet, les conditions de mesures ainsi que la sollicitation à apporter à la structure sont à prendre en compte. De plus, l'information donnée est essentiellement qualitative (visuelle). La caractérisation (quantification) de ces défauts n'a pas encore été effectuée. Le but de mon stage est double. Il s'agira d'abord de déterminer un protocole de détection de défauts en extérieur sur des ouvrages d'art. Ce protocole nécessitera de déterminer les paramètres, méthodes et stimulations les plus adaptées aux conditions extérieures (vibrations, bruit...). Puis, il faudra évaluer une méthode de quantification des résultats obtenus. Cette quantification donnera les caractéristiques d'intérêt d'un défaut, suivant l'application souhaitée.

Dans un premier temps, nous donnerons le but et le contexte précis de cette étude, tout en explicitant les bases de la shearographie. Dans un second temps, nous détaillerons les différentes techniques de calcul de phase et de quantification utilisées en shearographie, afin d'établir celles qui conviennent à l'auscultation d'ouvrages d'art. Enfin, dans une dernière partie, nous expliquerons la mise en oeuvre des méthodes choisies et présenterons les résultats obtenus.

Contexte et but de l'étude

Première partie

Chapitre 1

1. Problématique

Dans les ouvrages d'art, les fissures sont un signe de fragilisation de la structure. La détection et la caractérisation préventive de ces fissures permet de réduire les coûts d'intervention. Il existe des moyens visuels de mesure qui sont généralement ponctuels. La précision de ces mesures dépendent beaucoup de l'expérience de l'opérateur.

Après discussion avec un spécialiste des ouvrages d'art au LRS, M. Przybyla, nous avons établi une analyse du besoin en matière de détection de défaut ainsi que des spécifications.

1. Analyse du besoin

Les fissures dans les ouvrages d'art sont l'objet de suivis et d'expertises. Elles sont caractérisées par leur largeur (ouverture) en plusieurs points à une température donnée. Ces mesures se font ponctuellement avec un régllet ou un fissuromètre, dont l'utilisation est illustrée par la Fig.1. Il s'agit d'une technique fastidieuse et subjective. Ces techniques ne permettent pas de dire si une fissure est active (origine mécanique) ou non.



Fig. 1 : Mesure de l'ouverture d'une fissure à l'aide d'un régllet (source LRS)

Cette méthode visuelle permet d'évaluer l'ouverture de la fissure avec une précision de 0,1mm. Elle nécessite d'être en contact avec l'ouvrage et donc soulève des questions de sécurité pour l'opérateur, car les fissures se trouvent en hauteur.

2. Utilisation de la shearographie

La shearographie est l'une des nombreuses techniques d'interférométrie de speckle utilisées depuis plusieurs années en contrôle non destructif. La shearographie étant une méthode interférométrique à chemins optiques quasi-confondus, elle possède de ce fait de nombreux avantages si on la compare

à l'holographie : une certaine tolérance aux mouvements d'ensemble de la structure inspectée, une exigence réduite pour la longueur de cohérence du laser, elle conduit à une instrumentation compacte et de sensibilité ajustable. Cette technique sans contact, plein champ, et en quasi-temps réel permet de mesurer des déplacements de l'ordre de quelques nanomètres entre deux états d'un objet. La shearographie semble a priori être la méthode optique la plus appropriée dans notre cas d'étude.

Au LRS, une installation de shearographie a déjà été utilisée en extérieur [MUZET_06] et ce à des distances allant jusqu'à une quinzaine de mètres de l'objet étudié. Pour ce qui est de son application à des constructions d'aussi grande envergure que des ouvrages d'art, l'analyse bibliographique de la deuxième partie de ce rapport se propose de dresser un bilan des différentes techniques pouvant mener à la détection de défauts ainsi que leur quantification en extérieur et en laboratoire.

La shearographie peut-elle permettre de détecter des défauts sur des ouvrages d'art ? Si oui, les défauts détectés peuvent-ils être mesurés ? Le but de cet exposé est de déterminer la réponse à ses questions. Pour cela, il faut d'abord connaître le principe de base de cette technique interférométrique. C'est ce que nous proposons de résumer au chapitre suivant.

Chapitre 2

2.La shearographie

Ce chapitre résume essentiellement la partie théorique de [MUZET_06]. Le lecteur intéressé trouvera plus de détail techniques et pratiques sur la shearographie dans [STEINCHEN_04].

1. Le speckle

Un faisceau laser est dit "cohérent" spatialement et temporellement. La cohérence spatiale du faisceau signifie qu'en tout point de la section du faisceau la phase est la même. La cohérence temporelle exprime la durée du train d'ondes (c'est-à-dire l'intervalle de temps t pendant lequel les photons sont représentés par la même onde $E(z,t)$ pendant laquelle la phase de l'onde se conserve. Le speckle ou grain de lumière, également connu sous le nom de tavelure, est un phénomène d'apparence aléatoire résultant de l'éclairement d'une surface optiquement rugueuse par une lumière cohérente, il y aura une interférence entre tous les rayons issus de la surface éclairée en un point P (Fig.2.a). Chaque point de l'image constitue un petit interférogramme indépendant formant ainsi un ensemble de zones claires et sombres représentatives de la surface observée (Fig.2.b). Plus de précisions sur le caractère statistique des champs de speckle sont disponibles au chapitre 3 de [LEHMANN_PhD].

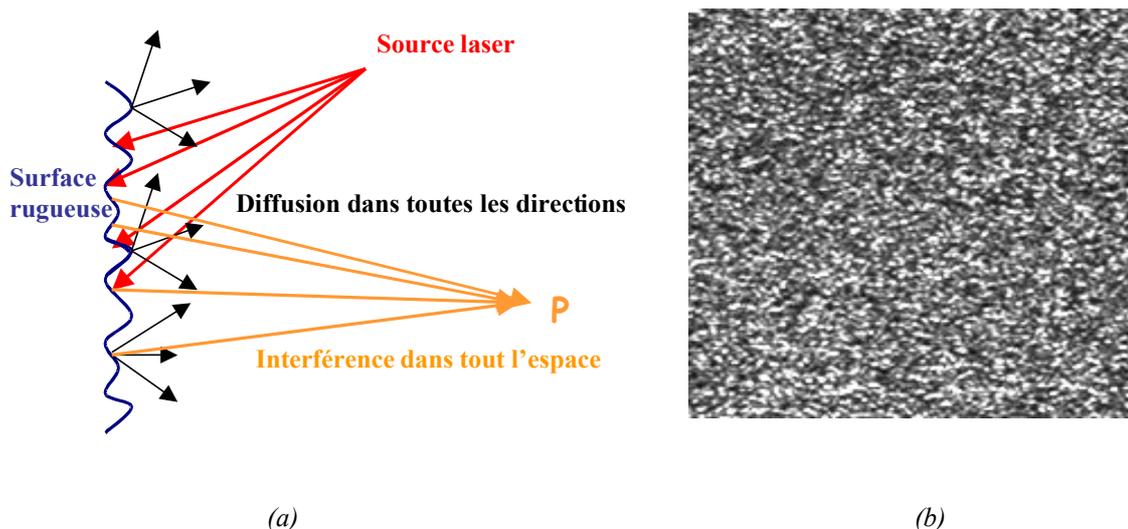


Fig.2: Le speckle. (a)Principe de génération de speckle. (b)Figure de speckle [MUZET_06].

Une des caractéristiques du speckle est son diamètre moyen $\langle S \rangle$ observé à travers une lentille. La

relation (1) lie l'ouverture numérique du système imageur et la longueur d'onde de la lumière cohérente λ :

$$\langle S \rangle = 2.44 \frac{\lambda f}{D} \quad (1)$$

où f est la focale de la lentille, D est le diamètre du diaphragme, l'ouverture numérique étant le rapport de D sur f .

2. Interférométrie de speckle à dédoublement latéral ou shearographie

2.1. Principe

La shearographie, fait interférer deux ondes issues de l'objet. Pour cela, l'image de l'objet est dédoublée en décalant une onde par rapport à l'autre (cf. Fig.4). On dit aussi que l'on a cisailé l'image, d'où le terme *to shear*, cisaillement en anglais.

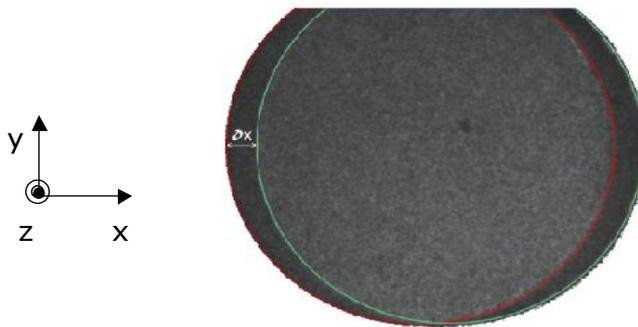


Fig. 3 : Aperçu du dédoublement de l'image créé par le décalage latéral dans la direction x pour une taille de cisaillement δx (source DEIOS)

L'utilisation d'un interféromètre de Michelson (cf. Fig.4) permet le réglage du taux de cisaillement grâce à un miroir orientable. Deux images légèrement décalées d'une quantité connue δ interfèrent sur le capteur CCD d'une caméra à niveaux de gris. Un cristal piézoélectrique est placé derrière le second miroir afin d'ajouter un terme de phase connu au signal si nécessaire.

2.2. Calcul théorique

Ces calculs sont issus de [TAILLADE_PhD]. Ils sont valables pour les techniques optiques de contrôle tels que la TV-holographie et la shearographie.

Dans le cas de l'étude d'une déformation ou sollicitation, on enregistre au minimum deux images, l'une avant I_1 et l'autre après la sollicitation I_2 .

Pour l'image de référence I_1 , comme les deux ondes cisillées interfèrent dans le plan de la camera, l'intensité enregistrée en chaque pixel est donnée par la relation :

$$I_{1(x,y)} = I_{0(x,y)} \left(1 + m_{(x,y)} \cos(\varphi_{(x,y)}) \right) \quad (2)$$

où I_0 , m , et φ représente respectivement l'éclairement moyen, le contraste et le déphasage entre l'onde objet et l'onde de référence. Par la suite, les termes (x,y) des expressions comme $I_{0(x,y)}$ ne seront pas réécrits pour plus de clarté.

Cette première image d'interférence constitue l'objet dans un état de référence. Supposons que l'objet subisse une légère déformation. Un déphasage $\Delta\varphi$ est alors introduit par cette déformation. L'équation (3) donne l'expression du nouvel éclairement :

$$I_2 = I_0(1 + m \cos(\varphi + \Delta\varphi)) \quad (3)$$

La soustraction des deux images I_1 et I_2 , produit des franges

$$I_1 - I_2 = 2I_0 \left(m \sin\left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right) \quad (4)$$

La différence des deux images d'intensité fait donc apparaître des franges peu contrastées appelées pseudo-franges car elles sont issues d'une différence d'éclairement. Les pseudo-franges noires et blanches correspondent aux lieux des points où la différence de phase $\Delta\varphi$ est due à la déformation.

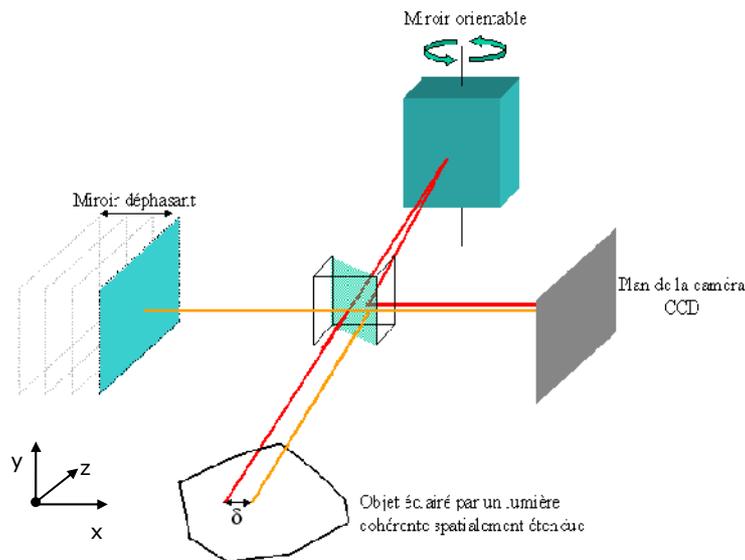


Fig.4: Principe de la shearographie avec un dispositif de Michelson[Web]

Ces résultats sont communs aux deux méthodes optiques citées. La shearographie est préférée à la TV_holographie, dans le cadre de contrôle non destructif en milieu industriel, du fait de sa robustesse aux fluctuations externes (elle utilise des chemins optiques objet et image quasi-communs) et grâce à l'information à laquelle elle donne accès, c'est-à-dire la dérivée première des déplacements (grandeur directement utilisée en mécanique des milieux continus pour rendre compte des états de contrainte d'un matériau). La suite des calculs expose les hypothèses nécessaires à l'estimation de cette grandeur.

On définit tout d'abord la notion de déplacement. Soit un objet dans un état de référence A (cf. Fig.5). Chaque point de l'objet dans cet état peut être considéré dans des coordonnées cartésiennes $\vec{x}_A = (x_A, y_A, z_A)$. On applique une contrainte à cet objet. Celui-ci se trouve dans un état déformé B. Les coordonnées en chaque point deviennent $\vec{x}_B = (x_B, y_B, z_B)$. Ce changement de position dû à une contrainte correspond au déplacement $\vec{U} = (u, v, w)$.

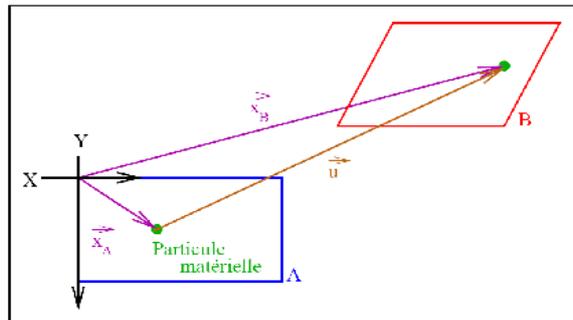


Fig.5 : Schéma d'un vecteur déplacement

À partir d'une ou plusieurs images d'éclairage I_i , il est possible d'obtenir la phase j_i dans un état i donné. Nous verrons au chapitre suivant qu'en fonction du type d'étude menée, il existe différentes techniques d'extraction de phase. Pour avoir une carte de phase relative, il faut soustraire deux cartes de phase j_1 et j_2 prises dans des états différents. Le résultat obtenu en (5) donne la carte de phase relative entre les deux états. Elle est représentative de la déformation de l'objet entre un état 1 et 2.

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (5)$$

$\Delta \varphi$ obtenu présente des discontinuités, ce sont de brusques sauts de phase qui se traduisent par des variations brusques de niveaux de gris (cf Fig.6.a.), on appelle cela une carte de phase enroulée. La phase dans cette état ne peut être interprétée du point de vue de la déformation. Il est nécessaire de dérouler la phase (cf Fig.6.b.) pour obtenir une information sur la dérivée des déplacements.

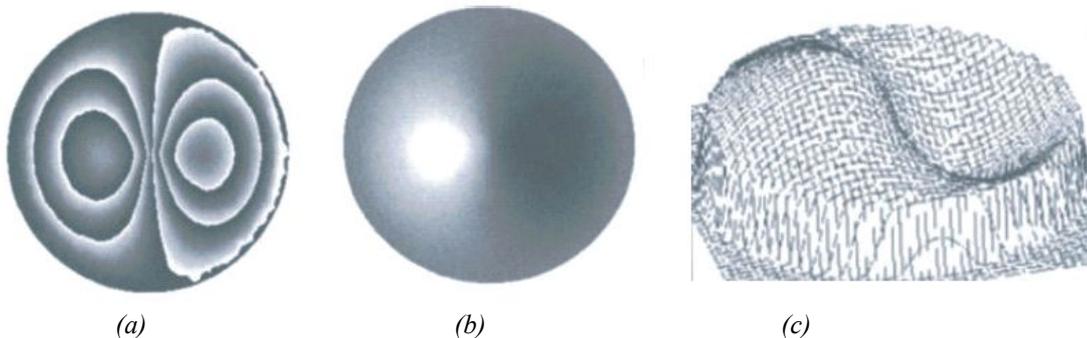


Fig.6: Déroulage de phase : (a) phase enroulée. (b) phase déroulée. (c) phase déroulée en 3D [STEINCHEN_04]

[STEINCHEN_04] montre qu'une fois la phase déroulée, pour :

- un faible cisaillement δ_x dans la direction X conformément au repère de la Fig. 4,
- un montage en ligne (l'angle entre le faisceau émis et réfléchi est faible)
- un déformation hors plan (déplacement perpendiculaire à la direction du cisaillement,
- un déplacement $U(u,v,w)$,

la différence de phase s'approxime par :

$$\Delta \varphi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \delta_x \quad (6)$$

La différence de phase entre deux états est donc proportionnelle à la dérivée première des déplacements dans la direction du cisaillement.

2.3. Décorrélation du speckle

Dans (5), on a supposé que le terme de phase aléatoire ne variait pas. Cela suppose que le déplacement latéral des points de la surface est bien plus petit que la taille caractéristique des grains de speckle. Dans le cas contraire, les grains de speckle dédoublés ne peuvent plus interférer entre eux. On parle de décorrélation des figures de speckle. C'est un des points qui limitent l'application de cette méthode (Pour plus de précision sur la décorrélation : chapitre 6 de [LEHMANN_PhD]).

3. Détection de défaut

Un défaut constitue une concentration de tension au sein d'un solide. Il se déformera donc différemment du reste de l'objet lorsque celui-ci sera sollicité. Cela se traduit en shearographie par une concentration de franges dans une carte de phase enroulée.

Chapitre 3

3. Cahier des charges

1. Présentation du projet

✓ **Objet du projet**

Le but de ce projet est l'étude de la détection et de quantification de défaut par shearographie sur des ouvrages d'art.

✓ **Maîtrise d'ouvrage**

L'étude est demandée par le LRS et plus particulièrement Valérie MUZET, responsable d'activité au sein du groupe « mesures physiques ».

✓ **Environnement du projet**

Le LRS dispose d'une tête shearographique de la société HOLO3 déjà équipée d'un logiciel d'acquisition d'image, « fringe analysis ». Le dispositif complet de shearographie est composé d'un laser Nd-Yag d'une puissance de 400mW, d'un ensemble de lentilles permettant d'élargir le faisceau laser. Des études en extérieur sur de objets de petites tailles, [MUZET_04] et [MUZET_06], ont déjà été menées.

2. Description du projet

✓ **Description générale du projet**

L'objectif est de disposer d'un protocole validé permettant de détecter et éventuellement de quantifier des défauts de structures en laboratoire et en extérieur.

Une revue bibliographique des différentes techniques d'acquisition et de traitement des informations sera faite en vue de déterminer celles qui sont les plus adéquates pour notre cas d'étude. Les solutions et adaptations retenues seront ensuite testées en laboratoire puis en extérieur. Enfin la question de la quantification sera soulevée.

✓ **Configuration logicielle**

Les développements logiciel de programmes de traitement des données acquises seront faits sous Matlab® et en C/C++ si besoin est. Aucune interface homme machine graphique n'est demandée.

✓ **Configuration matérielle**

Le matériel utilisé sera celui disponible au LRS. Le dispositif existant devra simplement être adapté à la détection en extérieur et sous des ouvrages d'art. Le dispositif de mesure doit permettre de visualiser une fissure située à la verticale de l'observateur.

✓ **Sécurité**

Le laser utilisé demande des conditions de sécurité particulières. Il faudra donc prévoir la sécurité des opérateurs ainsi que celle de tout autres personnes à proximité du dispositif.

✓ **Reprise de l'existant**

Les précédentes études menées au LRS serviront de références et certains algorithmes déjà implémentés seront réutilisés.

3. Prestations attendues

✓ **Présentation des prestations attendues**

La revue bibliographique des différentes techniques d'acquisition et de traitement des informations se fera sous forme de rapport. Elle devra être exhaustive et réutilisable.

Les développements logiciels seront clairs et suffisamment commentés pour être ré-exploités.

✓ **Documents à remettre**

Un rapport synthétisera les différentes études et résultats obtenus.

✓ **Exigences**

Si la quantification est possible la précision avec laquelle l'ouverture d'une fissure est donnée doit être inférieure ou équivalente à celle du simple fissuromètre, soit une précision de l'ordre de 0,1mm.

4. Planning

Au vu des différentes tâches à effectuer, un planning prévisionnel (Fig. 7) a été rédigé. Le travail a été séparé en quatre parties distinctes pouvant être traitées séparément et parallèlement (bibliographie, méthode d'extraction de phase, quantification, et application aux ouvrages d'art). Des réunions de suivi mensuel avec les responsables du groupe de recherche ont été prévues.

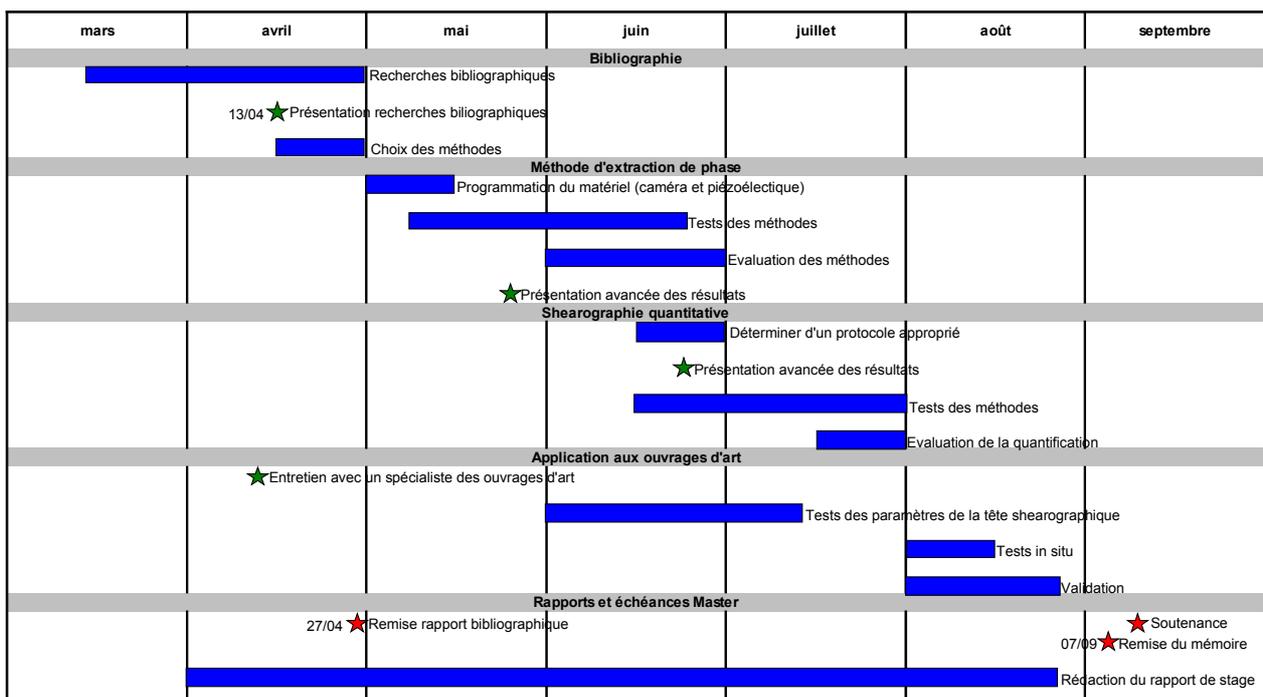


Fig. 7 : Planning prévisionnel

État de l'art de la shearographie

Deuxième partie

La shearographie n'est pas un domaine figé. Il existe plusieurs méthodes de calcul de phase, chacune étant adaptée à des domaines différents et variés comme la mécanique, le contrôle non destructif, l'analyse de contraintes, la détection de défaut, etc.

Dans un premier temps, nous dresserons un état de l'art des différentes techniques d'extraction de phase, afin de déterminer lesquelles sont les plus adéquates pour notre problème. Dans un second temps, nous verrons les différentes possibilités de quantification de défaut. Enfin, nous donnerons un aperçu des différentes sollicitations d'ouvrages possibles ainsi que les paramètres pertinents pour l'adaptation du dispositif sur site. Une synthèse dressera l'ensemble des méthodes à tester.

Chapitre 4

4. L'extraction de phase

Ce chapitre résume les différentes méthodes d'extraction de phase, ces méthodes sont utilisées en fonction du phénomène étudié (ponctuel, lent ou périodique).

1. Décalage de phase à N images

Il s'agit de la méthode la plus utilisée en shearographie. Ce résumé est inspiré de [MUZET_04]. La mesure de décalage de phase à N images est utilisée généralement pour l'étude de phénomènes lents ou encore ponctuels.

On enregistre N images (3,4 ou 5) successives auxquelles on rajoute un déphasage supplémentaire φ_i à l'aide du miroir déplacé par un cristal piézoélectrique de la Fig.4.

Pour chaque image, (2) devient :

$$I_i = I_0 (1 + m \cdot \cos(\varphi + \varphi_i)) \quad (7)$$

Voici l'exemple de l'algorithme à 4 images pour lequel un le déphasage appliqué est de $\pi/2$, avec $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \pi/2$, $\varphi_3 = \pi$, $\varphi_4 = 3\pi/2$.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0(1 + m \cdot \cos(\varphi)) \\ I_2 &= I_0(1 - m \cdot \sin(\varphi)) \\ I_3 &= I_0(1 - m \cdot \cos(\varphi)) \\ I_4 &= I_0(1 + m \cdot \sin(\varphi)) \end{aligned} \quad \varphi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (8)$$

2. Phase en continu [LAMARQUE_PhD]

La mesure de phase en continu est utilisée pour des phénomènes plus rapides.

Contrairement à la technique précédente, le déphasage introduit évolue continûment. Chaque pixel intègre l'intensité sur le temps d'acquisition d'une trame.

$$I_n = \int_{\varphi_n^r - \delta_\varphi/2}^{\varphi_n^r + \delta_\varphi/2} I_0 [1 + m \cdot \cos(\varphi + \varphi^r(t))] d\varphi^r(t) \quad (9)$$

où φ' est le déphasage introduit en fonction du temps et δ_φ la plage de variation de φ' . Pour chaque pixel, on intègre simplement et on obtient (10) :

$$I_n = I_0 [1 + m \cdot \text{Sinc}(\delta_\varphi/2) \cdot \cos(\varphi + \varphi_n(t))] \quad (10)$$

Le résultat est similaire à celui de (7) avec les coefficients m pondérés par des termes en $\text{Sinc}(\delta_\varphi/2)$. Ces termes engendrent une perte de contraste par rapport à la méthode discrète.

3. Temps moyenné

Ce résumé est inspiré de [MUZET_04]. Le temps moyenné est le plus utilisé pour les phénomènes périodiques.

On considère une sollicitation sous forme d'une pulsation ω . Le déplacement w s'écrit comme suit :

$$w(x, y, t) = a(x, y) \cos(\omega t + \beta) \quad (11)$$

À partir de l'équation (6), il vient

$$\Delta \varphi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \delta x = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial a}{\partial x} \cdot \delta x \cos(\omega t + \beta) \quad (12)$$

On pose

$$I = I_0 [1 + m \cdot \cos(\varphi)] \quad \text{et} \quad \Omega = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial a}{\partial x} \cdot \delta x \quad (13)$$

Il vient

$$I = I_0 [1 + m \cdot \cos(\varphi) \cos(\Omega \cos(\omega t + \beta)) - m \cdot \sin(\varphi) \sin(\Omega \cos(\omega t + \beta))] \quad (14)$$

Les expressions $\cos(\Omega \cos(\omega t + \beta))$ et $\sin(\Omega \cos(\omega t + \beta))$ peuvent s'écrire comme des sommes infinies d'harmoniques pondérées par des fonctions de Bessel. Si $1/2\pi\omega$ est inférieur au temps d'acquisition d'une trame, il restera l'éclairement moyen :

$$\langle I \rangle = I_0 [1 + m \cdot J_0(\Omega) \cdot \cos(\varphi)] \quad (15)$$

En déphasant deux images successives I_1 et I_2 de π , on obtient

$$\langle I_{diff} \rangle = \langle I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \quad (16)$$

I_{diff} a pour expression

$$\langle I_{diff} \rangle = 2 \cdot m \cdot \cos(\varphi) \cdot J_0(\Omega) \quad (17)$$

Cette méthode ne permet pas d'obtenir directement à la phase, mais permet de déterminer les modes propres d'un matériau.

4. Addition/soustraction de phase [MADJAROVA_02]

On considère l'éclairement suivant,

$$I = I_0 + I_m \cdot \cos(\theta + \varphi) \quad (18)$$

Avec I_0 l'éclairement constant (ou biais), I_m le terme de modulation, φ la phase aléatoire du speckle, θ phase due à une déformation.

On considère un ensemble de N images prises par la caméra. On forme la différence entre une image à un instant i et une image à un instant $i+p$.

$$I_{diff} = |I_i - I_{i+p}| = 2 \cdot I_m \left| \sin\left(\theta + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right| \cdot \left| \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right| \quad (19)$$

Comme on l'a vu au chapitre 1, ces pseudo-franges sont peu contrastées. Pour pallier ce défaut on va calculer un terme d'addition. En additionnant les images I_i et I_{i+p} on a

$$I_i + I_{i+p} = 2 \cdot I_m \left| \cos\left(\theta + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right| \cdot \left| \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right| + 2I_0 \quad (20)$$

Il y a alors une indéterminée provoquée par le terme $2I_0$. Pour déterminer I_0 , il suffit de calculer une moyenne temporelle de l'intensité de chaque pixel pour une série d'images autour de I_i . La Fig.8 montre un exemple d'évolution d'intensité d'un pixel dans le temps.

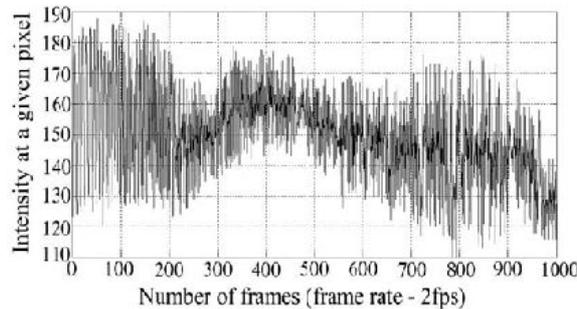


Fig.8 : Détermination de I_0 [MADJAROVA_02].

On définit le terme d'addition d'images

$$I_{add} = |I_i + I_{i+p} - 2 \cdot I_0| = 2 \cdot I_m \left| \cos\left(\theta + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right| \cdot \left| \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right| \quad (21)$$

On moyenne spatialement I_{add} et I_{diff} pour annuler les termes de phase aléatoire, on obtient la

différence de phase relative entre un état i et $i+p$:

$$\Delta \varphi = 2 \cdot \arctan \frac{\langle I_{diff} \rangle}{\langle I_{add} \rangle} \quad (22)$$

Cette méthode peut être également utilisée dans le cadre de l'étude de déformation continue.

5. Méthodes pour l'étude de déformations continues

5.1. Etude de déformations continues de grande amplitude

Ces méthodes permettent de suivre une déformation au cours du temps. L'acquisition et le traitement d'images successives permet de visualiser la réponse d'une structure à des sollicitations plus importantes sans décorrélation du speckle.

Pour ce faire, il existe différentes méthodes :

- Appliquer un déphasage supplémentaire connu (ex. : $\pi/2$) à chaque image. Cette opération permettra de ne pas avoir à dérouler spatialement la phase et donc d'éviter les erreurs qui pourraient en découler [JACQUOT_99].
- Mettre à jour une image de référence (image avec laquelle l'image courante est soustraite) régulièrement afin d'éviter les trop grands changements de phase et la décorrélation. L'image de référence sera une simple carte de phase calculée avant la carte de phase courante [MADJAROVA_02].
- Les signaux pour chaque pixel sont très bruités. L'utilisation d'un filtre moyenneur temporel permet de pallier ce défaut.

L'intensité de certains pixels peut ne pas varier suffisamment au cours du temps et donc ne pas donner une information concluante. Ces pixels défectueux peuvent être filtrés avec un filtre médian [MADJAROVA_03].

5.2. Calcul de la phase pour l'étude de déformations continues de grande amplitude

• Transformée de Fourier [JOENATAHN_99]

Les images sont enregistrées en temps réel et le signal $x_k(t)$ est analysé en chaque pixel. Pour chaque pixel, la FFT de l'intensité en fonction du temps est calculée (cf. (23)).

$$FFT(x_k(t)) = \sum_{k=0}^{n-1} x_k \cdot \exp(-jk \frac{2\pi}{n}) \quad (23)$$

Où k désigne le k -ième pixel et n est le nombre de pixel dans une ligne.

Le spectre de ce signal est généralement formé de trois composantes. À l'aide d'un filtre passe bande adapté, on ne sélectionne qu'une partie du spectre (on enlève la composante continue ainsi que le complexe conjugué). On réalise la transformée de Fourier inverse du signal filtré. La tangente inverse de la partie réelle de ce signal sur la partie imaginaire donnera accès à la phase.

Le défaut de cette méthode réside dans le fait qu'il faille choisir une largeur de bande passante différente pour chaque pixel. Cette opération est délicate et fastidieuse. Le schéma de la Fig.9 résume le principe de la méthode.

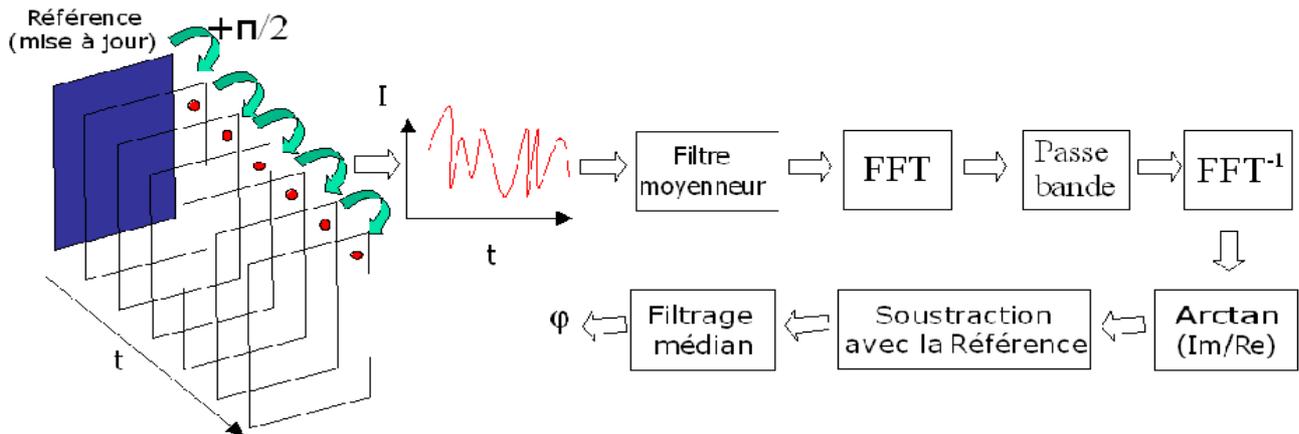


Fig. 9 : Principe de la méthode de Fourier

• **Transformée en ondelettes [JACQUOT_99]**

Le principe est le même que la technique précédente mais dans le cas présent une transformée en ondelettes 1D est appliquée à l'intensité d'un pixel à travers le temps.

On utilise une ondelette de Morlet (cf. (24)) dont la forme d'ondelette mère est donnée Fig.10 :

$$M_{a,b}(t) = M\left(\frac{t-b}{2a}\right) = \exp\left(-\frac{t-b}{2a}\right) \cdot \exp\left(j\frac{\omega_0}{a}(t-b)\right) \tag{24}$$

Où a désigne la largeur de l'ondelette, b une translation et ω_0 la fréquence de l'ondelette mère . La valeur de cette fréquence est égale à 2π .

La transformée en ondelette d'un signal $s(t)$ est donnée par (25). Les maxima du module appelés crêtes d'ondelette de cette transformée correspondent aux ondelettes qui ressemblent le plus au signal.

$$S(a,b) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \exp\left(-\frac{t-b}{2a}\right) \cdot \exp\left(j\frac{\omega_0}{a}(t-b)\right) dt \tag{25}$$

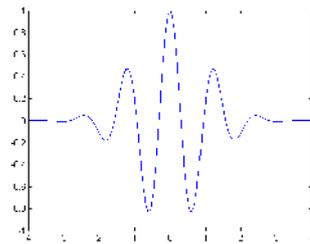


Fig.10 : Forme de l'ondelette mère de Morlet (abscisse : temps, ordonnées : amplitude)[MALLAT].

Les coefficients donnés par cette transformée sont des complexes. Le module et la phase de cette transformée sont calculés, les résultats se présentent sous forme de deux cartes 2D (cf. Fig.11). L'axe des abscisses désigne le temps, donc le terme de translation b . L'axe des ordonnées désigne l'amplitude a de l'ondelette. On recherche le maximum pour chaque b du module. Les ondelettes correspondantes dans la carte de phase de la transformée vont correspondre à la phase du pixel.

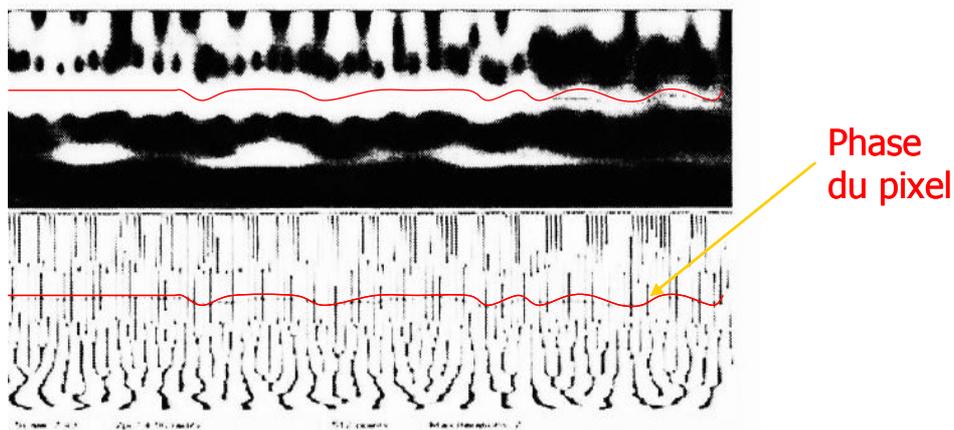


Fig.11: Transformée en ondelette.(En haut) Le module de la transformée. (En bas) La phase. [JACQUOT_99]

L'inconvénient de cette méthode est le temps de calcul nécessaire. Le fait de calculer le module et la phase de la transformée en ondelettes pour chaque pixel nécessite beaucoup de ressources et il faut de plus faire des recherches de maxima. Un algorithme de recherche de maxima rapide ne nécessitant que la phase de la transformée en ondelette est proposé. Le principe général de la méthode des ondelettes est résumé dans la Fig.12.

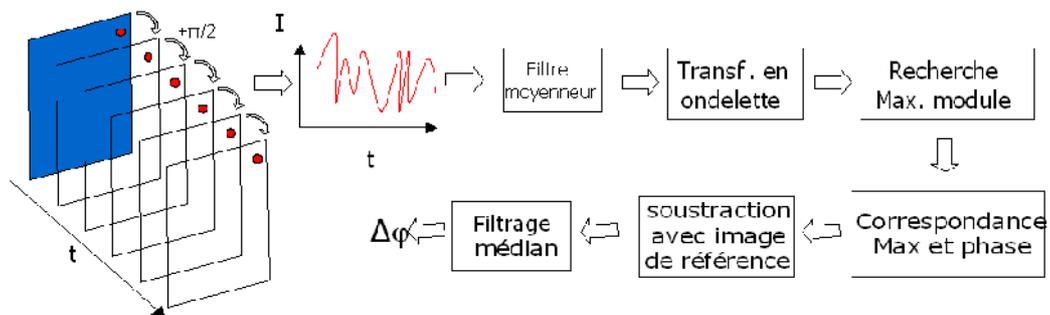


Fig. 12 : Principe de la méthode avec la transformée en ondelette

• **Transformée de Hilbert [MADJAROVA_03]**

Une transformée de Hilbert est appliquée à l'intensité d'un pixel à travers le temps. On considère l'éclairement sous la forme (18). La transformée de Hilbert d'un signal $u(t)$ est

$$Hi\{u(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(t')}{t'-t} dt \tag{26}$$

Il s'agit de la fonction de convolution entre le signal $u(t)$ et $1/\pi t$.

Tout front d'onde $u(t)$ réel peut s'écrire sous forme de fonction analytique. Une fonction analytique est donnée par

$$\psi = u(t) + iv(t) \tag{27}$$

Où $v(t)$ est la transformée de Hilbert de $u(t)$.

Ainsi pour toute fonction f de $\Phi(t)$, on a :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Hi\{f(\phi)\}}{f(\phi)}\right) \tag{28}$$

Le principe de cette méthode est résumé dans la Fig.13.

Les avantages de cette technique par rapport aux deux méthodes précédentes sont sa rapidité d'exécution et sa facilité d'implémentation.

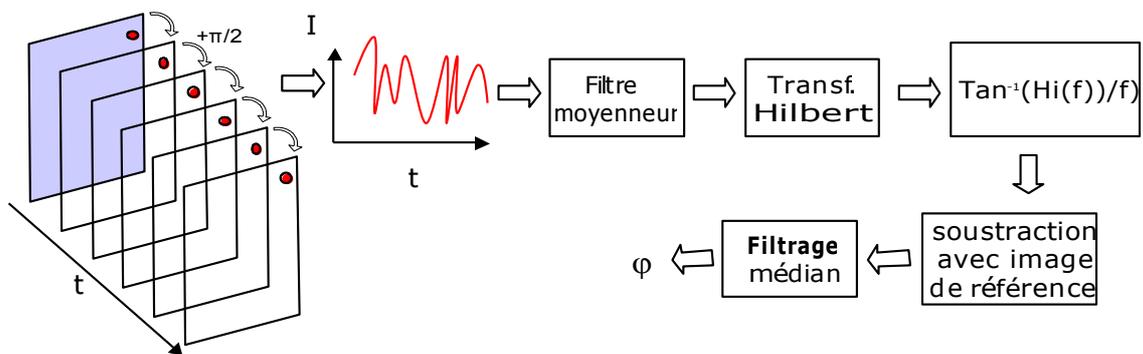


Fig.13 : Principe de la méthode par transformée de Hilbert

Chapitre 5

5. La Shearographie quantitative

Il existe différentes approches de quantification qui conduisent à des grandeurs différentes (longueur, dérivée seconde des déplacements).

1. Le décisaillement [WALDNER_96]

1.1. Déformation de l'image apportée par la shearographie

La shearographie ne permet d'obtenir en réalité qu'une approximation des dérivées de l'équation (6), approximation d'autant plus importante que l'amplitude du décisaillement est grande. Ainsi, une simple intégration numérique peut s'avérer insuffisante pour réaliser une étude quantitative des déplacements ou de la forme de l'objet, l'erreur sur l'approximation des dérivées se répercutant dans l'image intégrée. On peut résoudre ce problème par la méthode dite du décisaillement.

1.2. Principe

En respectant les conditions de [STEINCHEN_04] vues au chapitre 1, la différence de phase vaut

$$\Delta \varphi(i, j) = \frac{4\pi}{\lambda} (w(i, j) - w(i - \delta, j)) \quad (29)$$

Avec i la i -ème ligne de N pixels, j la colonne du pixel considéré, w la composante hors plan du déplacement et δ la taille du cisaillement dans la direction x .

On considère un pixel décalé de δ par rapport au pixel précédent :

$$\Delta \varphi(i - \delta, j) = \frac{4\pi}{\lambda} (w(i - \delta, j) - w(i - 2\delta, j)) \quad (30)$$

La somme de (29) et (30) donne

$$\Delta \varphi(i, j) + \Delta \varphi(i - \delta, j) = \frac{4\pi}{\lambda} (w(i, j) - w(i - 2\delta, j)) \quad (31)$$

Le terme en $w(i-\delta, j)$ disparaît, tout en laissant apparaître un autre terme. Cette addition a un intérêt, car si on additionne membre à membre chacune des égalités pour des pixels d'une même ligne espacés du cisaillement avec $n=N/\delta$, on obtient :

$$\sum_{k=0}^n \Delta \varphi(i-k \delta, j) = \frac{4\pi}{\lambda} (w(i, j) - w(i-(n+1)\delta, j)) \tag{32}$$

D'où l'expression du déplacement w :

$$w(i, j) = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\sum_{k=0}^n \Delta \varphi(i-k \delta, j) - w(i-(n+1)\delta, j) \right] \tag{33}$$

Si le terme $w(i-(n+1)\delta, j)$ est connu, on peut grâce à (33). Déterminer le déplacement en chaque pixel de l'image. Ce terme sera d'ailleurs nul si la zone de l'objet comprise entre $1-\delta$ et 1 n'est pas déformée, ou cachée par un masque (masque positionné entre la tête shearographique et l'objet déformé). (33) devient :

$$w(i, j) = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\sum_{k=0}^n \Delta \varphi(i-k \delta, j) \right] \tag{34}$$

On peut ainsi obtenir la composant du vecteur déplacement.

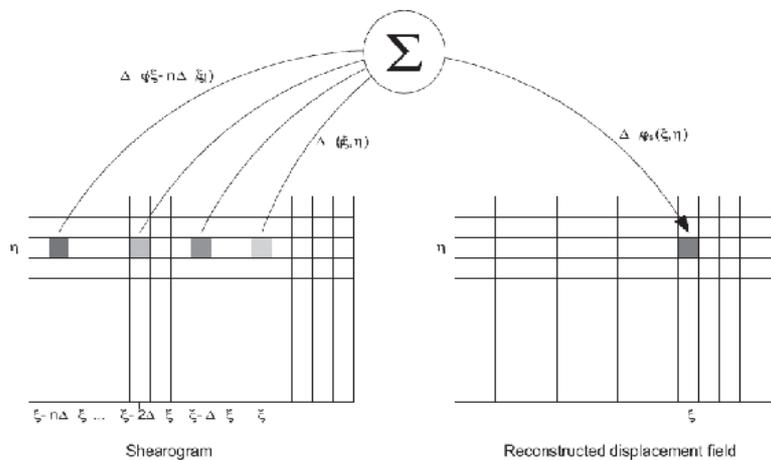


Fig.14 : Principe de la méthode de décisaillement avec ξ une colonne et η une ligne [WALDNER_PhD].

Dans [WALDNER_PhD], se trouve un exemple illustrant la détermination de la longueur et la largeur d'un défaut par cette méthode. La Fig.12 résume le principe de cette méthode.

1.3. Autres algorithmes

La méthode présentée ci-dessus ne permet d'effectuer le décisaillement que dans un seul sens (de

gauche à droite ou *vice versa*). Des erreurs se répercutent alors dans l'image décisaillée (cf Fig.15.b). [LAMARQUE_PhD] propose une amélioration de cette méthode en posant deux conditions limites (à gauche et à droite) et non plus une seule. [TAILLADE_PhD] propose une variante adaptée aux mesures vibratoires.

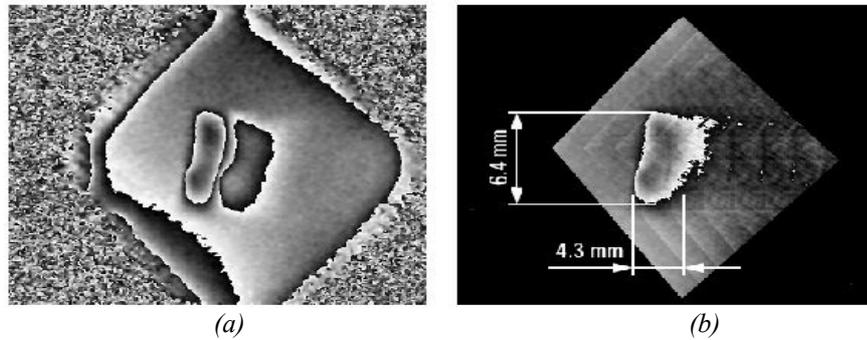


Fig.15 : Décisaillement d'une carte de phase. (a) Carte de phase déroulée. (b) Carte de phase décisaillée. [WALDNER_PhD]

2. La transformée en ondelette de Haar [TAY_05]

L'utilisation de cette ondelette revient à dériver le signal. L'expression de l'ondelette mère de Haar est la suivante :

$$\begin{aligned} \psi(x) &= 1 & \text{si } 0 \leq x < 1/2 \\ \psi(x) &= -1 & \text{si } 1/2 \leq x < 1 \\ \psi(x) &= 0 & \text{sinon} \end{aligned} \tag{35}$$

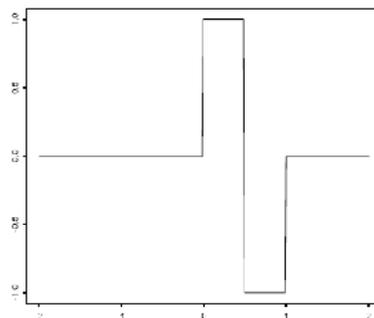


Fig.16 : Ondelette mère de Haar[MALLAT]

Il est possible de translater et dilater cette ondelette le long de l'axe des x avec (36)

$$\psi_{m,n}(x) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}(x - 2^m)) \tag{36}$$

On applique une Transformée 1D en ondelette à chaque ligne (ou colonne) d'une carte de phase déroulée.

$$S(m, n) = \frac{1}{m} \int_{-\infty}^{\infty} s(x) \cdot \psi_{m,n}(x) dx \quad (37)$$

Chaque ligne est considérée comme un signal $s(x)$. La transformée en ondelette fournit une carte 3D. Les axes x et y correspondent respectivement à la taille et au centre de l'ondelette. Les maxima de z en (x,y) correspondent au signal. La valeur z en (x,y) est la dérivée en x calculée sur un domaine dx proportionnel à la taille de l'ondelette.

Le résultat est une carte donnant la dérivée seconde des déplacements, soit une carte de la courbure et de torsion de l'objet déformé. Cette grandeur est liée à la contrainte appliquée.

3. Détermination de la longueur d'un défaut suivant la direction du cisaillement.

3.1 Principe [MICHEL_07]

Soit une carte de phase déroulée comme celle de la Fig.17, qui a été réalisée avec un cisaillement horizontal d'une longueur de 1cm. Le système de mesure est supposé parfaitement étalonné. On trace le profil de phase d'une des lignes de cette carte de phase.

A l'aide de cette carte de phase, une estimation de la position et de la taille d'un défaut est possible. Ce défaut se remarque sur la carte de phase et sur le profil de phase par un changement brusque de niveaux de gris. Pour délimiter les bornes du défaut, plusieurs théories s'opposent. Certains proposent de prendre en compte les extrema du saut de phase [KOUNG_03], d'autres de considérer les points d'inflexions [CARRE_PhD].

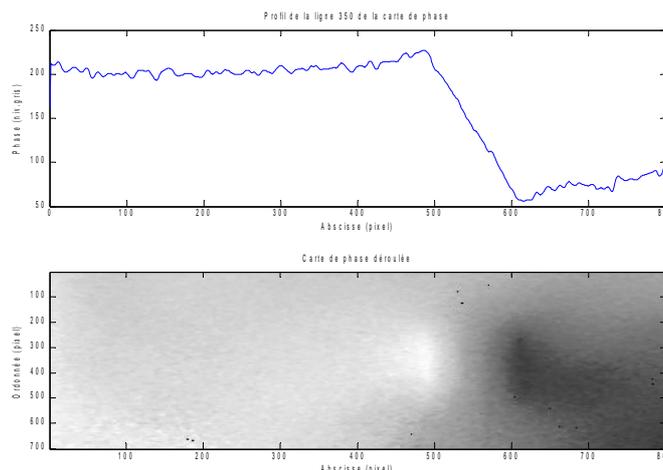


Fig. 17 : Profil d'une ligne de carte de phase déroulée.

Considérons les frontières x_1 et x_2 du défaut sur le profil de phase, avec $x_2 < x_1$. La longueur L du défaut se calcule facilement comme suit

$$L = x_2 - x_1 \tag{38}$$

Cette longueur L constitue la longueur apparente du défaut. Il ne faut pas oublier que l'images est cisailée, dédoublée (cf. Fig.18). En effet, si l'on considère la longueur de défaut dans la direction parallèle à celle du cisaillement δ_x , il vient

$$x_1^{réel} = x_1 + \delta_x \tag{39}$$

et

$$x_2^{réel} = x_2 + \delta_x - \delta_x = x_2 \tag{40}$$

d'où

$$L^{réel} = L - \delta_x \tag{41}$$

Dans ces conditions, la longueur du défaut est mesurable. La détermination quantitative d'une longueur de défaut est envisageable en considérant le profil de phase dans la direction du cisaillement.

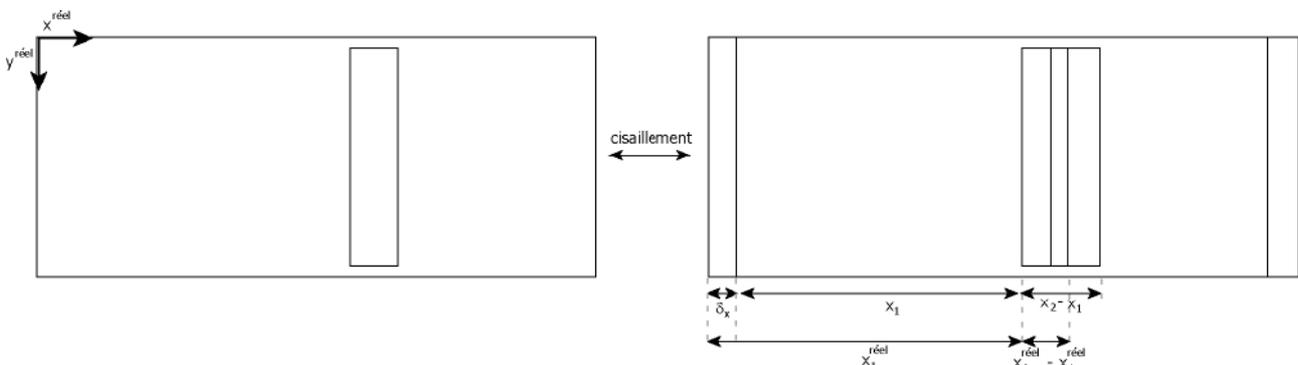


Fig. 18 : Illustration de la détermination de la longueur réelle d'un défaut. A gauche, représentation d'un défaut rectangulaire sur une plaque. A droite le même défaut cisailé à travers l'interféromètre.[MICHEL_07]

3.2 Détermination de la longueur d'un défaut à partir des extrema du profil de phase

D'après [KOUNG_03], une dimension de défaut n'est mesurable que si elle est dans la direction du cisaillement. Les détails qui sont dans d'autres directions ne peuvent être quantifiés, à moins d'effectuer plusieurs fois la mesure avec des directions de cisaillement différentes.

La méthode de mesure de la longueur d'un défaut est assez intuitive. Il s'agit de tirer des profils d'une carte de phase déroulée et la distance entre le minimum et le maximum de la dérivée des déplacements correspond à une approximation de la longueur du défaut le long du cisaillement. En effet, le minimum et le maximum de la dérivée des déplacements correspondent aux points d'inflexion du déplacement (cf Fig.19) hors plan, ce qui peut être une délimitation de la longueur du défaut.

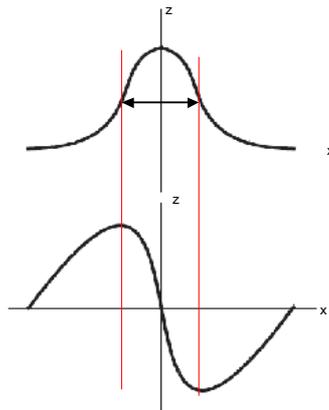


Fig.19 : Relation entre min et max de la dérivée première des déplacements et la longueur du défaut. (En haut) Le déplacement induit par une sollicitation perpendiculaire à z. (En bas) la dérivée des déplacements correspondante.

3.3 Recherche par transformée en ondelettes

[MICHEL_07] propose une méthode de détection automatique des bords d'un défaut.

Une fonction $\psi(x)$ qui appartient $L^2(\mathbb{R})$ est une ondelette si elle vérifie la condition suivante :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \tag{42}$$

Cette ondelette pourra être dilatée d'un paramètre d'échelle s et translatée de u pour former un ensemble d'ondelette $\psi_{u,s}(x)$ défini par l'équation (43). $\psi(x)$ sera appelée ondelette mère et $\psi_{u,s}(x)$ l'ensemble des ondelettes filles

$$\psi_{u,s}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x-u}{s}\right) \tag{43}$$

La transformation en ondelettes continue d'une fonction f pour une échelle s et une position u correspond au produit de convolution entre $f(x)$ et l'ondelette $\psi_{u,s}(x)$:

$$W_{\psi} f(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{u,s}^{-}(x) dx \tag{44}$$

L'ensemble des ondelettes filles représente une base dans le plan espace-échelle pour le signal $f(x)$ considéré.

Cette partie théorique repose sur la technique de suivi des maxima de module de transformée en ondelette de [MALLAT] (pp. 173-186).

Après avoir calculé la transformée en ondelettes du profil de phase avec une ondelette appropriée, la trajectoire des maxima locaux du module dans le plan position-échelle (u,s) est construite.

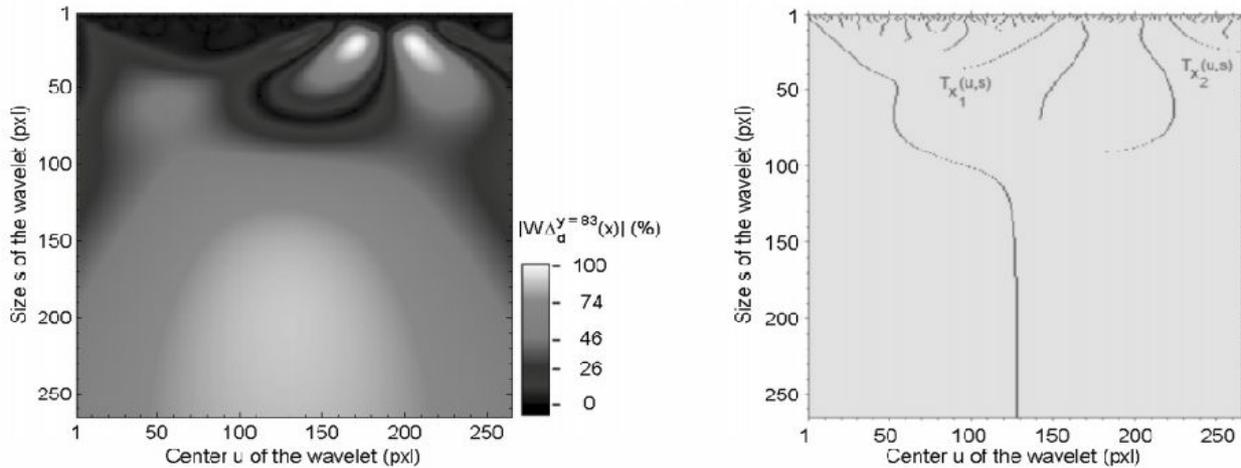


Fig. 20 : Détection de singularité dans un signal par transformée en ondelette. A gauche, le module de la transformée en ondelette du profil de phase. A droite, les courbes des maxima locaux du module de la transformée en ondelettes. (source [MICHEL_07])

La convergence vers les fines échelles des lignes maxima est étudiée. Il faut déterminer la forme d'ondelette appropriée à notre étude et déterminer les trajectoires de maxima qui sont censés coïncider avec les bords de la fissure.

[MALLAT] montre que si $\psi = (-1)^p \theta^{(p)}$ est la $p^{\text{ième}}$ dérivée d'une fonction θ , avec θ une gaussienne, alors les points de module maximaux de $W_\psi f(u,s)$ appartiennent à des courbes connexes, qui ne s'interrompent jamais quand l'échelle diminue. Il est judicieux de prendre une ondelette dérivée de gaussienne pour la suite de notre étude. En particulier, si la fonction d'ondelette est la dérivée première de la gaussienne, les extrema locaux de la transformée en ondelettes correspondent aux discontinuités du signal à différentes échelles. De même, si l'ondelette est définie comme la dérivée seconde de la gaussienne, ce sont les passages par zéro qui correspondent aux discontinuités.

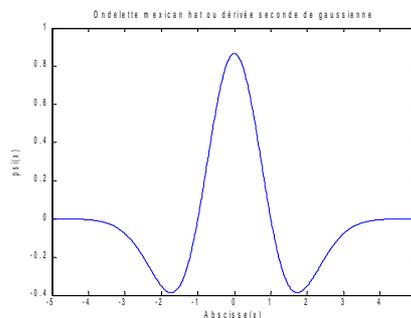


Fig.21 : Allure de l'ondelette dérivée seconde de gaussienne

La dérivée première de la gaussienne aura pour paramètre d'échelle l'écart-type de la gaussienne. Si on utilise la dérivée seconde de la gaussienne, les minima locaux, donc les passages par zéro de

cette dérivée seconde, correspondent à un point d'inflexion de la fonction étudiée. Tandis que les maxima locaux sont associées aux discontinuités du signal observées à différentes échelles. Il est donc judicieux de se concentrer sur la dérivée seconde de la gaussienne. On notera que l'ondelette dérivée seconde de gaussienne est également appelée ondelette chapeau mexicain (cf. Fig.21). La fonction de l'ondelette mère correspondante :

$$\psi(x) = \frac{2\sqrt[4]{\pi}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{s}} \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right) \quad (45)$$

Pour l'évaluation des bords d'un défaut, il faut sélectionner les lignes de maxima adéquates. [MALLAT] montre que lorsque l'on étudie l'évolution des maxima d'ondelette à travers les échelles, le bruit ne va pas diffuser dans toutes les échelles. En revanche, les principales discontinuités, les singularités du signal, sont encore présentes dans les échelles grossière. Les bords de fissure correspondent aux lignes de maxima les plus longues, dont il faut déterminer la position à la plus faible échelle possible. Les singularités du profil de phase correspondent aux maxima d'ondelettes s'étalant sur les plus grandes plages d'échelles. On peut soit les sélectionner graphiquement soit automatiquement. Il est donc proposé de suivre l'évolution des maxima dans les échelles et de supprimer ceux qui ne diffusent pas au delà d'une certaine échelle « seuil ». Il faut donc déterminer un seuil à partir duquel on peut considérer que la courbe a fini de converger. [MICHEL_07] fixe arbitrairement le seuil à 5% des nouvelles trajectoires vers les fines échelles. Les abscisses trouvées pour les bords de la fissure sont les positions des ondelettes correspondante à ces échelles à 5%.

Chapitre 6

6. Application in situ et aux ouvrages d'art

Le point est fait sur les difficultés de réaliser des tests en extérieur ainsi que sur des ouvrages d'art. Les conclusions des tests réalisés en extérieur par le LRS montrent que la détection des défauts est possible sur des plaques en béton armé fissuré.

1. La shearographie en extérieur

[LEHMANN_PhD] énonce les conditions extérieures influençant la qualité des images obtenues par des méthodes optiques telles que la TV holographie ou la shearographie : le faible éclairage des surfaces, les vibrations environnantes, les turbulences dans l'air, la décorrélation (due aux mouvements des objets de grande envergure).

2. Tests effectués en extérieurs sur des échantillons en béton armé [MUZET_06]

2.1. Gestion des paramètres extérieurs

La détection est pour l'instant visuelle. La shearographie se montre suffisamment robuste :

- La distance par rapport à l'objet observé (à condition d'utiliser un laser puissant et un objectif zoom à fort grossissement) et les vibrations alentours n'affectent pas ou peu la détection de fissure.
- Les turbulences de l'atmosphère et les déplacements parasites d'ensemble affectent de façon similaire les deux images dédoublées et ont peu d'influence sur les résultats.

2.2. Les types de fissures détectées

Fissures actives / inactives

Une fissure est dite active si elle est d'origine mécanique. Elle résulte de l'usure des matériaux trop sollicités. Une fissure inactive sera inversement un « défaut d'origine » qui n'altère en rien les propriétés mécaniques d'une structure. La shearographie permet de déceler les fissures actives.

Fissures débouchantes

Une fissure est dite débouchante si elle est visible en surface. L'intérêt de détecter une fissure débouchante en shearographie sera de déterminer si elle est active ou non.

2.3. Les différentes sollicitations

Des sollicitations thermiques et mécaniques ont été utilisées en extérieur. La stimulation thermique permet la détection d'une fissure débouchante mais ne permet pas la visualisation de fissures non débouchantes, les phénomènes thermiques observés n'intervenant qu'à la surface de l'objet étudié. Les stimulations mécaniques de type traction permettent de détecter des fissures débouchantes et non débouchantes.

La Fig.22 montre la plaque de béton armé avec laquelle des tests en extérieur ont été effectués avec des sollicitations thermiques et en traction.

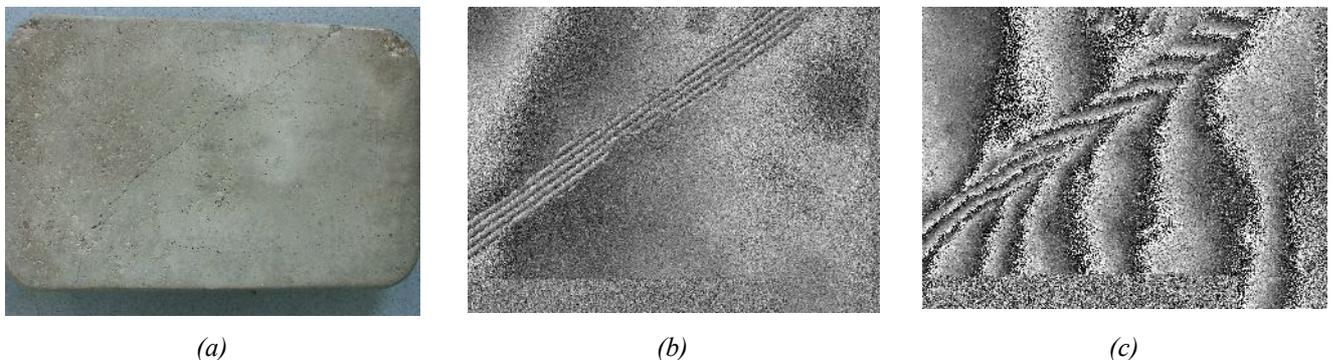


Fig.22 : Fissure débouchante visualisée en extérieur à 1,5m de distance.(a)Plaque en béton armé fissurés. (b)Visualisation de la plaque après une sollicitation mécanique .(c)Visualisation de la plaque après une sollicitation thermique. [MUZET_06]

Pour les sollicitations mécaniques, il y a aussi des sollicitations vibratoires. On peut utiliser des ondes sonores, des ondes générées par un pot vibrant, ou d'autres comme par exemple celles utilisées par [TAILLADE_PhD], les ondes de Lamb. Il s'agit d'ondes guidées par la plaque et qui peuvent se propager sur plusieurs mètres sans être atténuées. Cette propriété explique qu'elles étaient déjà utilisées pour détecter des défauts de surface dans une direction donnée. L'alliance ondes de Lamb et shearographie semble donc être un bon moyen de détection de déformation plein champs

3. Shearographie et ouvrages d'art

Différentes études ont été menés à ce sujet. Celle qui se rapproche le plus de notre cas est l'étude de [SATPATHI_95] sur le contrôle non destructif de ponts avec la shearographie. Selon lui, le principal ennemi de la shearographie est la décorrélation du speckle. Il préconise donc une étude de l'influence de la taille du grain de speckle sur les cartes de phase. Une grande taille de grains de speckle serait un atout considérable pour avoir des chances de détecter un défaut en extérieur. La stimulation qui devra déformé l'objet afin d'obtenir un changement de phase relative sera donc

d'autant plus importante. Celle-ci ne doit pas être trop importante sous peine de se retrouver dans un cas de décorrélation.

Un pont sous circulation vibre avec une amplitude de l'ordre de 0,1 à 3 mm. De telles vibrations engendreront nécessairement une décorrélation. Il ne sera donc pas possible de faire des mesures lorsqu'un pont est sous trafic. Néanmoins avec le passage d'un seul véhicule léger, le pont vibrera beaucoup moins, et des tests pourront être effectués.

Une autre étude porte sur la détection et quantification de fissures non débouchantes des pipelines [KOUNG_03]. Cette étude est intéressante car elle montre qu'il est possible de détecter et quantifier des défauts sur des ouvrages d'arts. Cependant les tests n'ont pas été menés en extérieur.

Chapitre 7

7. Synthèse

Les études menées au LRS montrent la possibilité d'effectuer des détections de défaut par shearographie en extérieur. Cependant, ces expériences ont été réalisées sur de petits échantillons en béton armé ou en métal, et non des objets de grandes envergure comme les ouvrages d'art. Or ces objets de grande taille sont sujets à des mouvements et oscillations importantes. Il faut donc établir une méthode d'extraction de phase ainsi qu'une sollicitation appropriée pour de telles constructions.

Grâce aux résultats de [SATPATHI_95] sur les sollicitations adéquates pour la shearographie appliquée à des ouvrages d'art, il apparaît que les méthodes d'extraction de phase les plus adaptées soient les méthodes de déformations continues (transformée de Fourier, transformée en ondelettes 1D, transformée de Hilbert). Mis à part la méthode de Fourier, qui semble plus laborieuse, ces techniques seront testées. De plus, Le même ouvrage suggère également une étude de l'influence de la taille du speckle afin d'éviter la décorrélation. Celle-ci sera donc menée dans le cadre de l'application aux ouvrages d'art.

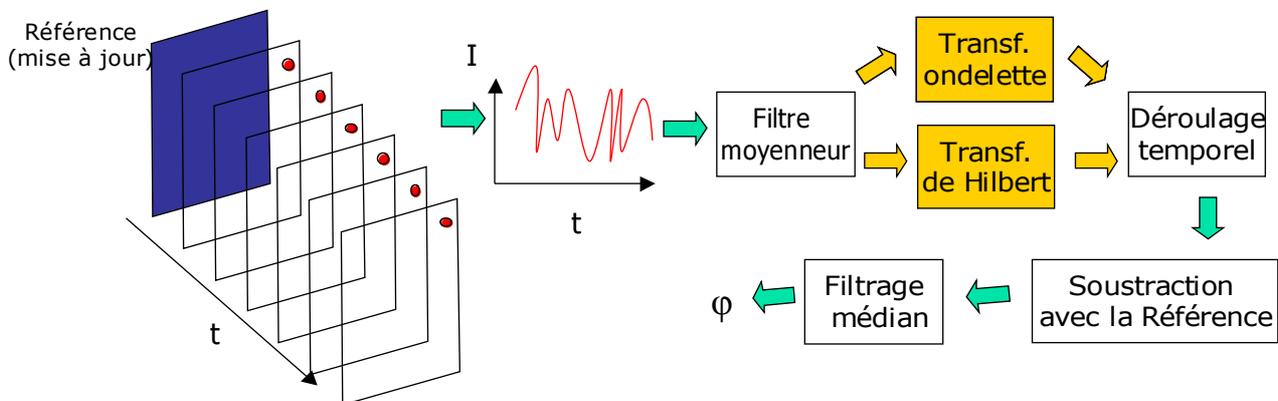


Fig. 23 : Synthèse des méthodes de calcul de phase à implémenter

La quantification est nécessaire à l'obtention de résultats significatifs pour les gestionnaires d'ouvrages d'art. Elle est possible et la faisabilité de mesure d'épaisseur de fissure par shearographie sera étudiés. Toutes les méthodes de quantification présentées dans cette partie ne vont pas être évaluées. D'après les conseils et l'expérience de la société DEIOS s.a., société belge dans le domaine du scanner 3D et des méthodes de contrôle optiques, nous avons choisi la méthode de détermination de longueur d'un défaut dans la direction du cisaillement par transformée en ondelette.

Mise en oeuvre et expérimentations

Troisième partie

Chapitre 8

8. Prise en main du matériel et évaluation de ses performances

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'influence d'un paramètre optique, l'ouverture numérique, de l'installation de shearographie. Avant cette étude, nous verrons les différentes modifications et ajustements qui ont dû être apportés à l'installation de shearographie déjà disponible au LRS.

1 Dispositif disponible AU LRS

Le dispositif de shearographie est constitué d'un système d'éclairage et d'un système optique couplé avec une caméra numérique noir et blanc que nous appellerons tête shearographique.

Le **système d'éclairage** est composé :

- d'un laser Nd-Yag doublé TEM00 monomode longitudinal d'une puissance de 400mW (laser de classe 3b). C'est un laser TORUS de Quantum de longueur d'onde 532nm ,
- d'un condenseur pour étendre le faisceau parallèlement,
- d'une lentille qui élargira le faisceau étendu afin que ce dernier éclaire une large surface de l'objet étudié.

La **tête shearographique** dont les éléments sont détaillés à la Fig.24, est constituée :

- d'une caméra SONY CCD XCD-SX900 1280*960 pixels (taille du pixel 4.65µm).
- d'une lentille biconvexe de 80mm de focale,
- d'un interféromètre de Michelson,
- d'un miroir permettant de dédoubler l'image (réglage manuel) dans toutes les directions,
- d'un miroir piézoélectrique pour générer les décalages de phases (réglage logiciel),
- d'un objectif interne de focale 50mm placé avant la caméra CCD,
- d'un objectif externe zoom 70/300 de focale f/4~f/5.6D.

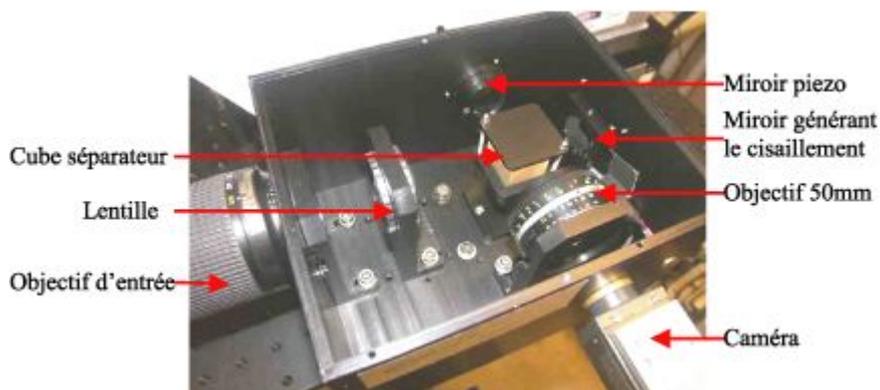


Fig. 24 : Photographie de la tête shearographique [MUZET_06]

2 Amélioration matérielle

L'ensemble du dispositif (laser, tête shearographique et lentilles) est fixé par vissage sur une plaque optique, elle-même montée sur un trépied. Ce trépied à roulette autorise une inclinaison quasi verticale du dispositif. On peut ainsi éclairer et observer un objet étant à la verticale de l'observateur. L'alimentation du piézoélectrique, du laser ainsi qu'un PC sont posés sur une table roulante permettant de déplacer toute l'installation.

Pour répondre au besoin de sécurité laser en extérieur afin de protéger tout passant des faisceaux parasites (réflexion et diffusion) du laser, le dispositif sera placé à l'arrière d'une fourgonnette banalisée (cf. Fig.25). Tous les rayons susceptibles d'être dangereux ne seront donc perceptibles que par les utilisateurs, eux même protégés par des lunettes filtrant partiellement ou totalement la longueur d'onde du laser.



Fig..25 : Dispositif de mesure adapté aux ouvrages d'arts

Pour alimenter l'installation complète, on n'utilise pas la batterie de la camionnette. Son utilisation engendre trop de vibrations néfastes à la shearographie. L'alimentation se fera par un groupe électrogène de 2,3kW de puissance, placé à bonne distance du véhicule.

3 Étude expérimentale de l'influence de la taille du speckle

Nous allons déterminer expérimentalement quelle est l'ouverture numérique optimale du système. Nous baserons notre étude suivant le protocole utilisé par [TAILLADE_PhD].

Le plus petit élément perceptible par la caméra CCD est le speckle. La taille du speckle est donc directement reliée à la résolution spatiale des franges. De plus la taille d'un grain de speckle peut être de inférieure ou supérieure à celle d'un pixel. Suivant le cas, le pixel moyennera l'intensité en provenance de plus ou moins beaucoup de tavelures. La taille du speckle est donc également révélatrice de l'incertitude sur la mesure de phase. Pour avoir un idée sur cette incertitude de phase, il faut étudier des cartes de phase brute. La phase brute est obtenue sans déformation entre deux états successifs d'un même objet.

Nous avons vu au chapitre 2 que la taille du speckle est inversement proportionnelle à l'ouverture numérique du système imageur. On déterminera donc l'ouverture numérique optimale du dispositif pour obtenir la meilleure résolution spatiale et la plus petite incertitude de phase possible.

3.1 Résolution spatiale des franges

La résolution spatiale des franges dépend de la taille moyenne grains de speckles. Si la taille de grains de speckle est inférieure à celle d'un pixel alors l'intensité reçue par le pixel correspond à une intensité moyenne de plusieurs grains de speckle $I_{moy}(\phi)$. Si on introduit un déphasage π dans l'interféromètre, cette intensité devient alors $I_{moy}(\phi + \pi)$, qui est symétrique de $I_{moy}(\phi)$ par rapport à l'intensité moyenne des niveaux de gris (dans notre cas, la valeur de cette moyenne est 127 niveaux de gris). Ces intensités moyennes sont sensiblement les mêmes. Si la relation (46) est vérifiée,

$$I_{moy}(\phi + \pi) - I_{moy}(\phi) \leq 1 \quad (46)$$

Cela signifie que la différence entre les deux intensités est inférieure à un niveau de numérisation. On dit alors que le pixel considéré est un pixel « mort ». Ces pixels morts sont évalués parmi des pixels « utiles » constitués des pixels qui ne sont ni saturés ni trop sombres.

Expérimentalement, pour avoir accès au nombre de pixels morts, on utilise 4 images déphasées de $\pi/2$. La moyenne et l'écart-type de ces 4 images sont calculés pour chaque pixel. Les pixels utiles seront définis par l'image des intensités moyennes (cf. Fig.26 gauche). Ce sont ceux dont l'intensité moyenne est comprise dans l'intervalle défini par la largeur à mi-hauteur de l'histogramme des niveaux de gris dont le profil est supposé gaussien (cf. Fig.26 droite). Parmi ces pixels, ceux dont l'écart-type est inférieur à un niveaux de gris sont des pixels morts.

Pour effectuer les tests en ne changeant que l'ouverture numérique, on travaille à dynamique d'image constante, c'est-à-dire que l'on essaie d'avoir à chaque fois les mêmes conditions d'illuminations. On ne modifie pas les temps d'intégration et le gain de la CCD, par contre on joue sur l'éclairement du laser à l'aide de densités optiques placées devant ce dernier.

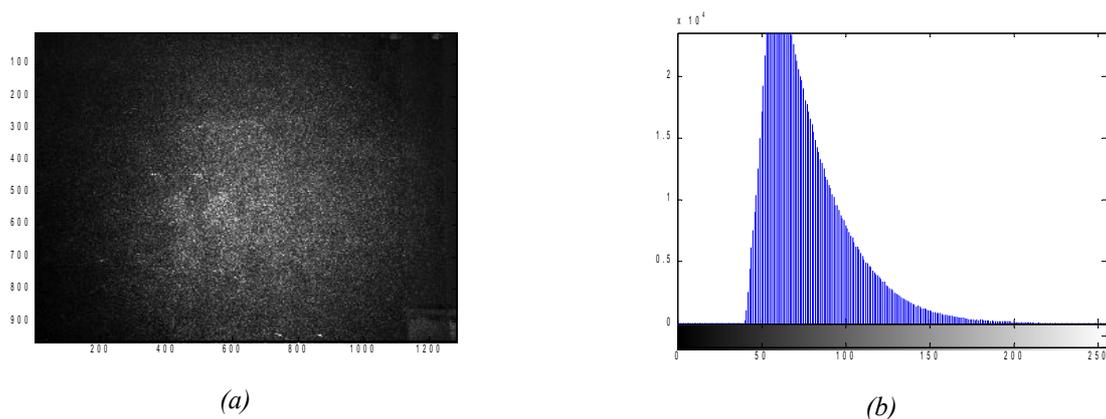


Fig.26 : (a) Image de l'intensité moyenne des 4 images déphasées pour une ouverture numérique de 4. (b) Histogramme des niveaux de gris de l'image a.

La Fig.27 montre le nombre de pixels utiles et de pixels morts en fonction de l'ouverture numérique de l'objectif interne. Le nombre de pixels utiles varie peu, il semble donc que ce nombre ne dépende pas de l'ouverture numérique. Le nombre de pixels morts est peu important pour des ouvertures numériques comprises entre 1.8 et 8. Ce résultat est normal car on travaille ici avec un temps d'intégration et un gain constant, on ne fait varier que l'ouverture numérique de l'objectif interne. Or une grande ouverture numérique engendre une perte considérable de luminosité au niveaux de l'image qui ne peut pas être compensé même s'il n'y a plus de densité devant le laser. L'incertitude de phase semble donc être la meilleure pour des ouvertures numériques de l'objectif interne inférieure à 8.

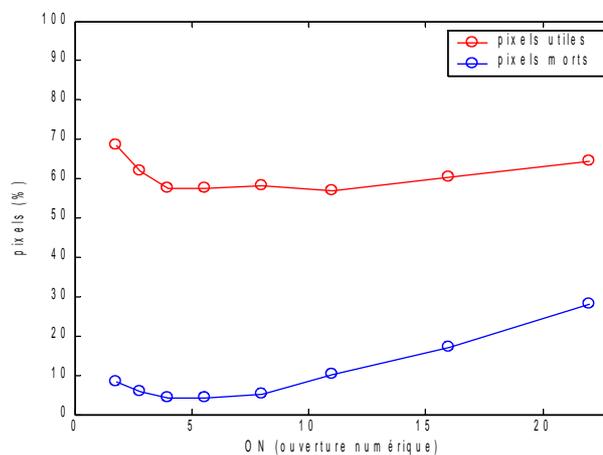


Fig.27: Pourcentage de pixels morts et utiles en fonction de l'ouverture numérique

3.2 Incertitude de phase

L'étude précédente ne suffit pas à affirmer que l'on ait une incertitude de phase minimale, d'où la nécessité d'étudier les écarts-types de l'histogramme des niveaux de gris des cartes de phases brutes en fonction de l'ouverture numérique.

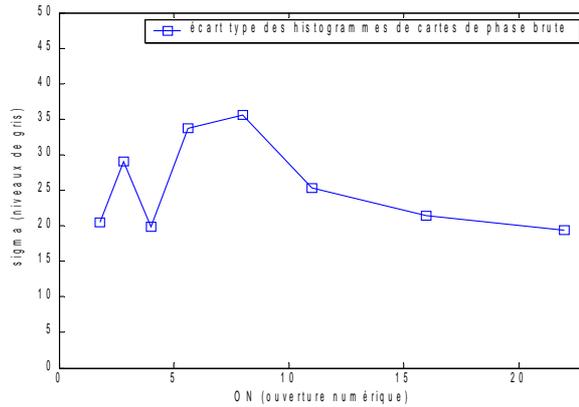


Fig.28 : Écart-type des histogrammes de niveaux de gris des cartes de phase brute

La Fig.28 renseigne sur l'incertitude de phase en fonction de l'ouverture numérique de l'objectif interne. Pour de grandes ouvertures numériques (ON > 11) l'écart-type diminue lorsque l'ouverture augmente. Au contraire, pour des ouvertures numériques inférieures, l'incertitude semble augmenter avec l'ouverture numérique.

3.3 Ouverture numérique optimale

L'ouverture optimale peut être évaluée en dressant un graphique représentant le nombre de pixels morts en fonction de l'incertitude sur la phase paramétrée par le nombre d'ouverture de l'objectif (cf. Fig.29). Le meilleur compromis entre incertitude de phase et résolution spatiale semble être une ouverture numérique de 4.

Au chapitre précédent, on a vu que dans des conditions de mesures extérieures, une ouverture numérique grande était préférable afin d'avoir les plus gros speckle possible. Dans cette étude on voit effectivement qu'avec notre installation de shearographie, on aura une incertitude de phase faible pour une très grande ouverture numérique, mais que cette méthode aura des inconvénients sur la résolution spatiale de franges.

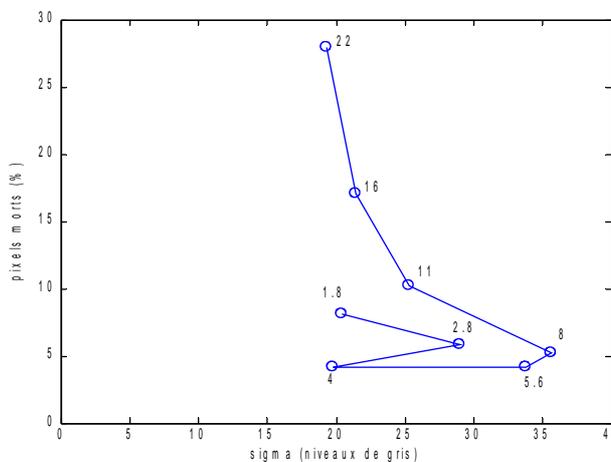


Fig.29 : Pixels morts en fonction de l'écart type sur la phase brute paramétré par l'ouverture numérique

Chapitre 9

9. Adaptation logicielle

1. Acquisition et enregistrement d'image

Pour mettre en oeuvre les méthodes par transformée en ondelettes temporelle ainsi que celle de Hilbert, on doit être indépendant du logiciel livré avec la tête shearographique, car il ne permet pas l'acquisition d'images décalées d'un incrément de phase connu. On devra gérer indépendamment le cristal piézoélectrique ainsi que l'enregistrement d'images successives.

Une application a été développée en C. L'opération consiste à acquérir une image, enregistrer l'image, introduire un déphasage de $\Pi/2$ dans l'interféromètre puis recommencer. L'acquisition doit permettre à l'utilisateur de gérer le gain et le temps d'intégration de la caméra, ainsi que la valeur d'offset et de tension à appliquer à l'amplificateur du piézoélectrique. Un offset doit être introduit pour se placer dans le domaine linéaire du piézoélectrique. L'offset est fixé à 0,5V, soit 50V en sortie de l'amplificateur.

La fréquence d'acquisition de la caméra doit être maximale. L'opération d'enregistrement étant la plus coûteuse en temps, elle sera effectuée en fin d'acquisition de toutes les images souhaitées. Pour cela, les images acquises sont temporairement placées dans une file FIFO (first in first out) puis enregistrées après toutes les acquisitions.

De plus pour acquérir une image, il faut « trigger », c'est-à-dire déclencher, la caméra. Ce trigger peut être interne ou externe. En mode trigger interne, la caméra est limitée par des formats prédéfinis, on ne peut donc pas jouer sur la vitesse d'acquisition comme on le souhaiterait. C'est donc le mode trigger externe qui a été utilisé. Ce mode permet de synchroniser l'acquisition avec un signal analogique externe. Ce trigger externe est assuré par un générateur basse fréquence. On peut donc modifier à souhait la vitesse d'acquisition, tout en sachant que la vitesse maximale est de 7,5 frames/seconde et qu'il ne faut pas que le temps d'intégration de la caméra soit supérieur au temps d'acquisition.

L'autre facteur limitant du choix de temps d'acquisition est le temps de relaxation du miroir piézoélectrique. La tension envoyée vers le piézoélectrique oscille légèrement avant de se stabiliser autour de la valeur de tension demandée. Ce temps de réponse est de 80 ms. Pour la caméra utilisée au laboratoire, ce facteur est peu contraignant, si on considère la vitesse d'acquisition maximale.

Néanmoins, dans l'étude bibliographique qui a été menée, il semble qu'il faille des vitesses bien supérieures à celle que l'on peut obtenir avec ce dispositif, en général c'est 40Hz [JACQUOT_00]. Nous avons donc emprunté, sur une courte durée, une caméra plus rapide. Avec cette nouvelle

caméra, la SONY CCD XCD-SX910 1280*960 pixels, le temps de réponse du piézoélectrique a été le principal facteur limitant. Nous avons tout de même pu atteindre des fréquence d'acquisition allant jusqu'à 11Hz. Si l'on veut s'affranchir de ce facteur limitant, il faudrait repenser entièrement le système de déphasage. Le but de n'étant pas de changer le dispositif, mais de l'améliorer, nous nous sommes contentés des fréquences d'acquisition que nous pouvions obtenir.

2. Nouvelles méthodes de calcul de phase

2.1 Pré-traitement

Les images acquises sont toutes considérées en même temps. S'il y a trop d'images de trop grandes dimensions, l'application peut s'arrêter par manque de mémoire. La solution est de sélectionner une partie de l'image ou alors de considérer moins d'images.

L'évolution temporelle de l'intensité de chaque pixel au cours du temps est effectuée. Il faut alors traiter ce signal pour un pixel à la fois. Le signal temporel est pré-traité avant de subir une la transformée en ondelettes. Ce pré-traitement est constitué d'une normalisation et d'un léger lissage, car le signal brut est très bruité (on peut voir ce signal pré-traité en haut de la Fig.30). La normalisation permet d'éviter la présence de composantes continues se traduisant par des coefficients dans l'espace temps-échelle concentrés dans les larges échelles.

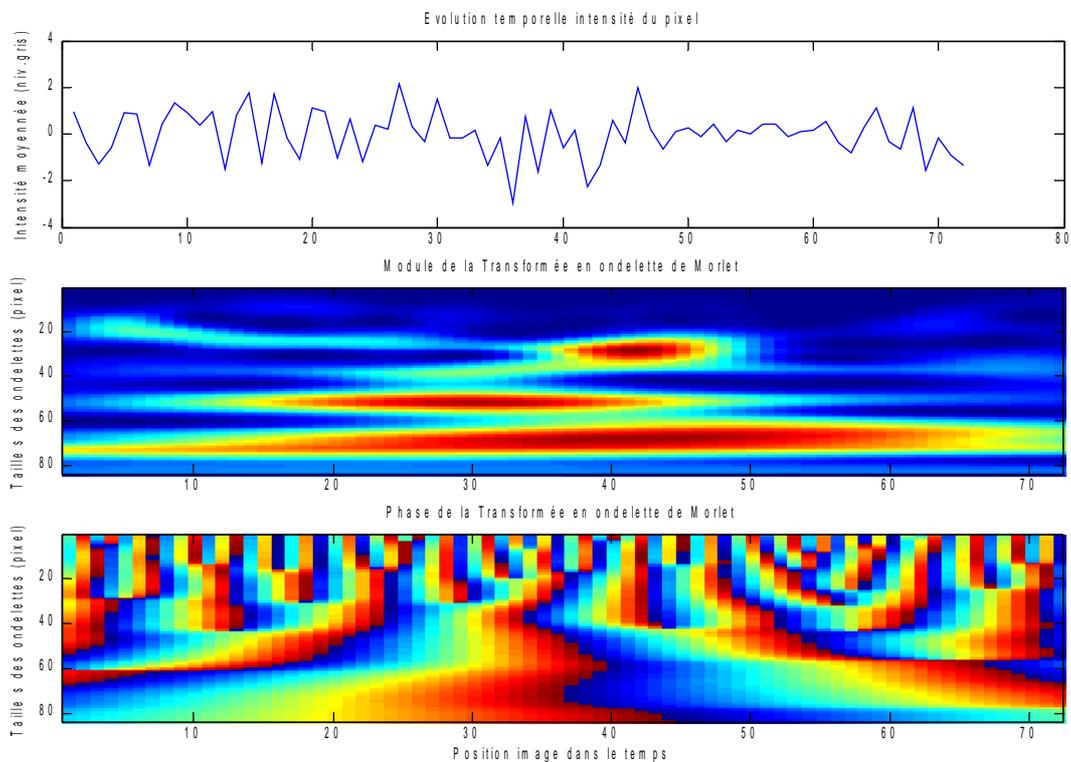


Fig.30 : Transformée en ondelettes de Morlet. En haut, l'évolution de l'intensité moyennée d'un pixel dans le temps. Au milieu, le module de la transformée en ondelettes. En bas, la phase de la transformée en ondelette.

2.2 La transformé en ondelettes de Morlet

Cette méthode avait déjà été utilisé au laboratoire pour des calculs de phase en lumière structuré, il a suffit de l'adapter pour notre application.

Cette transformée en ondelette dépend d'un paramètres, la fréquence ω_0 de l'ondelette mère. On choisit la valeur 6 pour ce paramètre.

La transformée en ondelette de ce signal traité se fait dans l'espace de Fourier. De cette manière on opère des multiplications au lieu de de faire des convolutions. Il faut bien faire attention à la périodisation du signal et au décalage de la FFT sous Matlab. Le choix des échelles est fait de sorte que l'échelle la plus grande corresponde à la taille du signal. La carte du module de la Fig.30 est alors obtenue.

La phase est déterminée grâce aux maxima du module de la transformée en ondelettes pour chaque position d'image (chaque colonne). Les échelles correspondantes au maxima sont reportées dans la carte de phase (le bas de la Fig.30) pour déterminer la phase du signal.

La Fig.31 montre la traitement apporté à la phase . Elle est d'abord déroulée temporellement, ensuite l'incrément de phase qui a été ajoutée à chaque image est retiré pour obtenir la phase du signal au cours du temps.

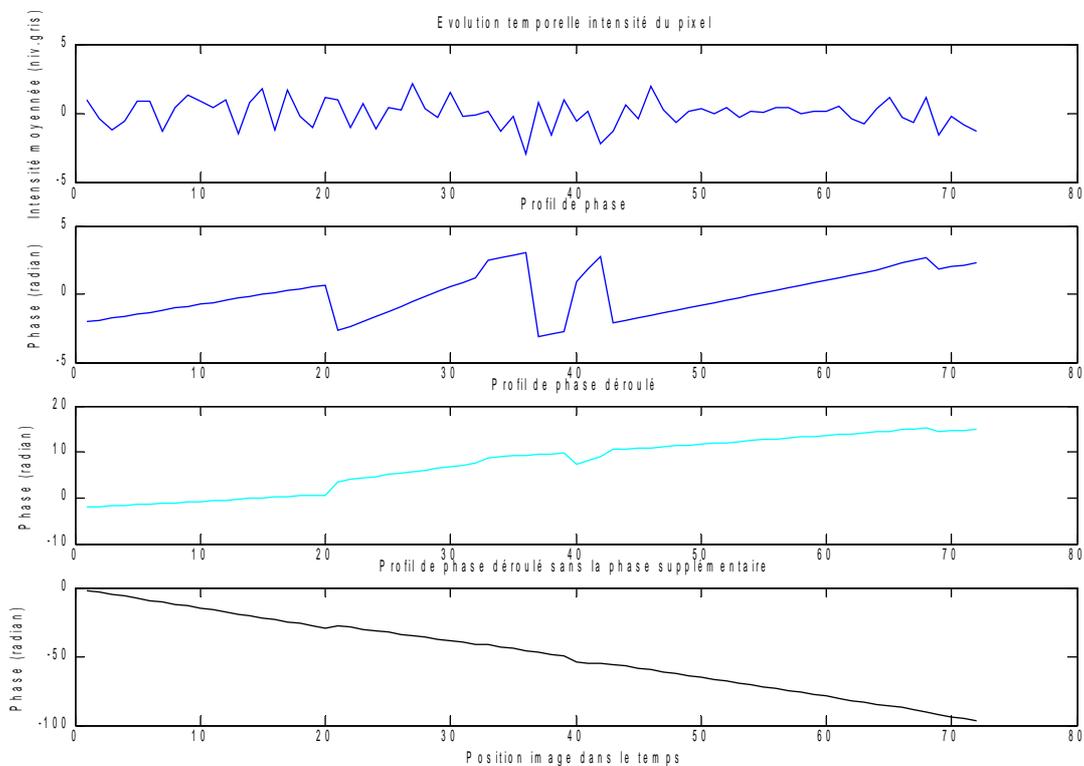


Fig. 31 : Transformée en ondelettes de Morlet. De haut en bas, l'évolution de l'intensité d'un pixel dans le temps, la phase de la transformée en ondelettes, la phase déroulée spatialement, la phase déroulée sans la phase supplémentaire

2.3 La transformée de Hilbert

On utilise le signal temporel pré-traité de l'intensité pour chaque pixel. La transformée de Hilbert du signal est calculée (cf. chapitre 4). On peut remarquer, à la Fig. 32 que la transformée de Hilbert du signal correspond au signal légèrement décalé. La phase du signal est calculée avec l'arctangente du rapport de la transformée du signal sur le signal. Les opérations sur la phase sont alors les mêmes que précédemment. La courbe en rose de la Fig. 32 désigne la phase du signal au cours du temps. On voit que la phase obtenue à la Fig. précédente est sensiblement la même que celle obtenue par transformée de Hilbert. La principale différence à ce stade est le temps d'exécution bien plus important de la transformée en ondelettes. La méthode utilisant la transformée de Hilbert est cinq fois plus rapide.

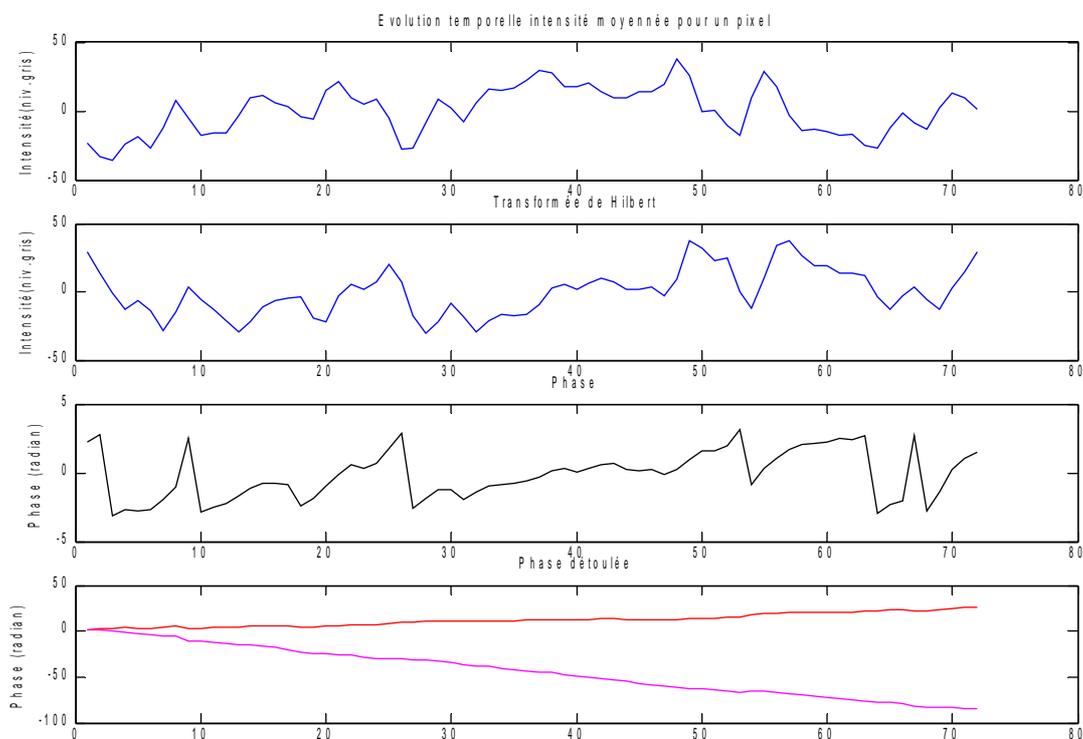


Fig. 32 : Transformée de Hilbert. De haut en bas, l'évolution de l'intensité moyennée d'un pixel dans le temps, la transformée de Hilbert du signal, la phase associée à cette transformée, la phase déroulée spatialement en rouge et la phase déroulée sans la phase supplémentaire en rose.

2.4 Le traitement des déphasages

Une fois l'une des transformées réalisées, pour tous les pixels de l'ensemble des images, le déphasage relatif à des états de déformation reste à déterminer. Pour ce faire, on soustrait simplement les cartes de phase à une carte de référence. Cette carte de référence peut être mise à jour à intervalle régulier. La dernière étape consiste à filtrer ses cartes de déphasage, notamment pour faire disparaître les pixels qui n'ont pas suffisamment évolué. Un filtrage médian suffit.

L'avantage de ces méthodes est la possibilité de suivre des déformations de forte amplitude grâce à

une carte de phase de référence qui évolue au cours de l'acquisition. Une seule référence initiale ne permet que de suivre une faible amplitude de déformation.

3. La quantification

Pour pouvoir mesurer une longueur, à partir d'une image, il est nécessaire au préalable d'étalonner le système de mesure. L'étalonnage permettra d'établir une correspondance entre un nombre de pixels et une distance métrique.

3.1 Principe

On peut décomposer la quantification en trois étapes successives. Tout d'abord l'étalonnage du système sert à établir la correspondance entre les distances réelles et les distances en pixel. Ensuite, on réalise l'acquisition et le traitement des cartes de phase, puis la mesure de distance sur un profil de phase qui sera convertie en distance métrique.

3.1.1 Étalonnage

La première étape consiste à étalonner le dispositif de mesure. La plupart des méthodes employées dans la littérature au niveau de la shearographie sont de simples enregistrement d'objet étalon (mire) dont les dimensions sont connues et le grandissement transversal du système approximativement estimé à partir de la mesure de distance entre deux lignes de l'objet étalon. Nous irons plus loin, en calibrant le dispositif de mesure, c'est-à-dire en déterminant les paramètres intrinsèques et extrinsèques de l'ensemble caméra et tête shearographie. Ce calibrage se fera sans aucun cisaillement. On peut s'assurer de cet état en considérant que sans cisaillement et en lumière cohérente, l'interféromètre de Michelson donnera des figures d'interférence sans qu'il y ait de sollicitation extérieure.

Aucune méthode de calibration n'a été programmée. La solution clé en main *Camera Calibration Toolbox for Matlab* et sa documentation est utilisée. Elle est disponible gratuitement à l'adresse internet suivante http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.

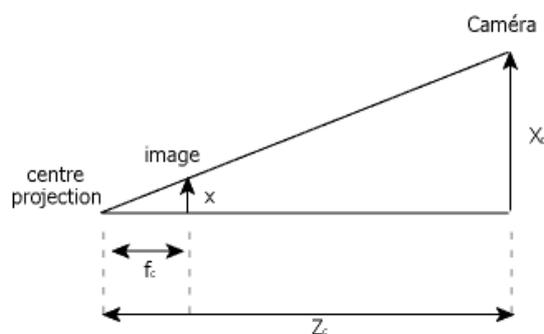


Fig.33 : Modèle sténopé pour la Toolbox camera calibration

Les paramètres intrinsèques du dispositif sont tous d'abord déterminés. Ces paramètres (la distance focale f_c , le centre de projection appelé point principal c_c , le biais α_c qu'il peut y avoir entre les pixels si ceux-ci ne sont pas bien quadrillés et les coefficients k_c de distorsion dûs à l'optique du montage) sont établis à partir le modèle sténopé de la Fig.33.

On considère un point dans l'espace des coordonnées $[X_c, Y_c, Z_c]$. L'opération consiste à projeter ce point dans le plan image par rapport aux paramètres intrinsèques. Les coordonnées sont d'abord normalisées par rapport à la distance au plan image.

$$x_n = \begin{bmatrix} X_c / Z_c \\ Y_c / Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (47)$$

On pose

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (48)$$

La distorsion causée par l'optique est ensuite prise en compte

$$x_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = (1 + k_c(1)r^2 + k_c(2)r^4 + k_c(5)r^6) x_n + dx \quad (49)$$

$$\text{avec } dx = \begin{bmatrix} 2k_c(3)xy + k_c(4)(r^2 + 2x^2) \\ k_c(3)(r^2 + 2y^2) + 2k_c(4)xy \end{bmatrix} \quad (50)$$

Où k_c est un vecteur de 6 éléments concernant les distorsions radiales et tangentielles (dx). Une fois la distorsion prise en compte, on peut finalement remonter aux coordonnées en pixels en tenant compte de l'échantillonnage. En effet, l'image est échantillonnée par la matrice CCD. Il faut donc introduire un facteur d'échelle, qui est ici représenté par f qui représente le rapport entre la distance focale et la taille d'un pixel. Il faut ensuite effectuer le changement de repère grâce au centre de projection et à la non orthogonalité des axes de la cellule CCD, biais des pixels. Les coordonnées du pixels sont finalement :

$$\begin{aligned} x_p &= f_c(1)(x_d(1) + \alpha_c \cdot x_d(2) + c_c(1)) \\ y_p &= f_c(2)x_d(2) + c_c(2) \end{aligned} \quad (51)$$

Pour déterminer ces paramètres, on réalise des prises de vue d'une mire dont les motifs et dimensions sont connues (cf. Fig.34). La mire utilisée est un damier dont les carrés font 1cm de côté. À partir des images de cette mire, sont extraits un certain nombre de points de références, dont la position est connue à la fois dans le plan de la caméra et dans le plan image. Ces points de référence sont les coins de carrés de la mire. On peut ainsi estimer les paramètres du modèle.

Pour que la transformation du repère de la caméra au repère image soit inversible, il faut que la donnée Z_c soit connu. Il faut donc faire l'hypothèse du monde plan qui impose $Z=0$. Nous nous servons de cette astuce dans la troisième étape de cette méthodologie.

Les paramètres extrinsèques sont ensuite calculés. Ces paramètres constituent la rotation R_c ayant 9 degrés de liberté et de translation T_c ayant 3 degrés de liberté. Ces transformations se font du repère monde réel vers le repère lié à la caméra. Il suffit d'une seule prise de vue de la mire pour

déterminer ces paramètres. Il est préférable que la mire soit dans le même plan que l'objet étudié. Pour cela on colle une mire semblable à celle utilisée précédemment. La méthode de correspondance entre les deux repères est alors la même que pour les paramètres extrinsèques.

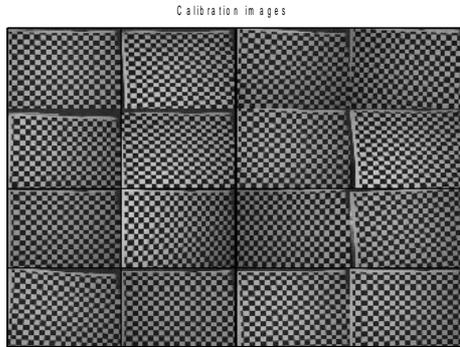


Fig.34 : Différentes prises de vue de la mire pour les paramètres intrinsèques.



Fig. 35 : Mire pour la détermination de paramètres extrinsèques

Pour compléter cette étape, on introduit un cisaillement dans l'interféromètre dont il faut établir une mesure précise. Ce cisaillement sera, dans toute la suite de cet exposé, pris dans le sens horizontal. Ce cisaillement ne devra pas être trop grand, sinon il ne correspondra plus à un dédoublement latéral de l'image car l'angle entre les deux images cisailées ne pourra plus être négligeable et donc introduira des ambiguïtés dans la mesure comme le montre la Fig.36.

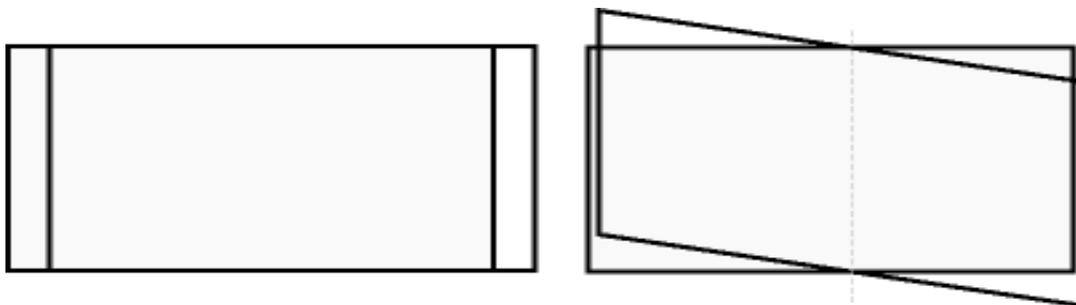


Fig.36 : Schéma illustrant les effets d'un grand et d'un petit cisaillement. A gauche, pour un petit cisaillement, on peut considérer que l'angle entre les deux images soit suffisamment petit pour pouvoir considérer un dédoublement latéral entre les deux images. A droite, pour un cisaillement trop grand, on sort de cette approximation.

3.1.2 Acquisition et traitement de carte de phase

On réalise une acquisition de carte de phase sans modifier les réglages de la tête shearographique. Il faut conserver tous les paramètres intacts, si on veut préserver les paramètres précédemment estimés.

On peut utiliser n'importe quelle technique d'extraction de phase. Pour plus de commodité nous avons utilisé la technique de décalage à 4 images pour réaliser les premiers tests.

On réalise deux figures d'interférences prises dans des états différents d'un même objet. L'objet utilisé pour les tests suivants est une plaque de métal noire que nous avons artificiellement fissuré en y perçant une ligne de 5cm de long et de 2mm de large.

Pour avoir une carte de phase, on soustrait les deux images (soustraction modulo 256 niveaux de gris). Il faut alors traiter cette carte de phase enroulée. L'image étant très bruitée, on lui applique tout d'abord un filtre adapté aux cartes de phase. Il s'agit d'un filtrage médian qui agit sur le cosinus et le sinus de la phase. Enfin, pour avoir une information représentative vis à vis de la déformation, il est nécessaire de dérouler (déplier) la phase. Pour cela, on peut choisir la méthode directement proposée par Fringe Analysis 2 ou bien alors effectuer un déroulage directement sous Matlab avec la méthode [BONIFANT_99] qui avait déjà utilisé au laboratoire.

La carte de phase ainsi traitée peut servir à la quantification. On considère un profil de phase judicieusement choisie perpendiculairement à la fissure.

3.1.3 Reconversion pixel en distance métrique

À partir du profil choisi, on détermine les bords de la fissure en pixel. La manière de déterminer les bords de cette fissure dépend de la convention choisi par l'utilisateur. On pourra soit prendre les extrema du profil de phase soit les points d'inflexions au droit de la fissure.

On obtient alors les abscisses en pixel des points considérés. Il faut utiliser les paramètres estimés à la première étape pour tout d'abord compenser l'échantillonnage et la projection au point central, puis l'éventuel biais existant dans l'axe de la cellule CCD est annulé. Ensuite, la distorsion est compensée. Enfin, les rotations et translations sont prises en compte pour en faisant l'hypothèse du monde plan qui impose $Z=0$, c'est-à-dire que l'on considère que la mire est exactement dans les même plan que celui de l'objet étudié. Ainsi, il est possible d'inverser les deux dernières transformations et retrouver les position des deux points dans le repère réel.

On estime également la taille du cisaillement de la même manière en utilisant une image faite à cet effet. Cette image pour être celle de l'objet sur lequel est collé la mire, sans éclairage laser.

Finalement, on soustrait la distance trouvée pour la largeur de la fissure et la taille du cisaillement, ce qui devrait permettre d'obtenir l'ouverture de la fissure.

3.1.4 Mise en oeuvre de la transformée en ondelettes

3.1.4.1 Problème de la gestion des effets de bord

Jusqu'à présent la méthode que nous avons utilisé pour réaliser la convolution entre le signal et l'ondelette était de passer par l'espace de Fourier afin de simplement y effectuer une multiplication plutôt qu'une opération de convolution. Cette démarche présente un défaut. La FFT engendre des effets de bords aux bornes du signal. Cela se remarque à la Fig.37, à droite, par la présence de cônes sur les bords de l'image de transformée en ondelette bien qu'il n'y aient pas de discontinuités aux extrémités du profil de phase considéré.

Ce phénomène provient du fait qu'il faut périodiser le signal pour la FFT. C'est comme si on accolait deux fois le profil de phase avant qu'il ne soit transformé dans l'espace de Fourier. Ce nouveau signal présente bien des discontinuités qui ne sont pas sur le signal de départ.

Pour pallier ce défaut, il suffit de changer de transformée avec laquelle on opère la convolution. La transformée en cosinus (DCT) est équivalente à la FFT pour un signal symétrique. Pour un signal f , elle est donnée par

$$DCT[f]_k = F(k) = \sum_{i=0}^{N-1} f(i) \cos\left(\frac{\pi k(i+1/2)}{N}\right) \tag{52}$$

La DCT nécessite de symétriser le signal avant de faire la transformation. Le nouveau signal traité ne présente donc plus les discontinuités rencontrées avec la FFT. En passant par l'espace de la DCT, la transformée en ondelettes donne la Fig.37, à droite. Cette figure ne présente pas de cône sur les extrémités. Le problème des bords est donc résolu. La DCT sera utilisée dans la suite de cet exposé.

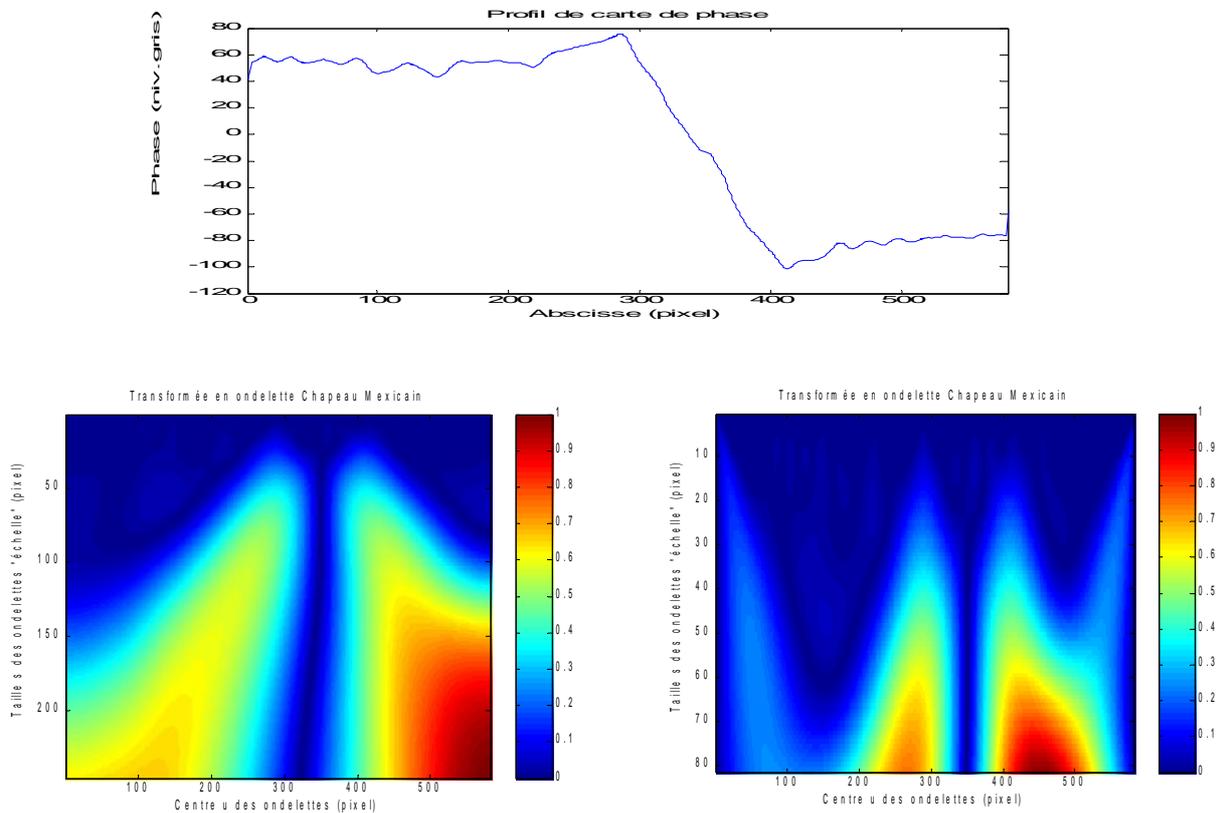


Fig.37 : En haut, le profil de phase. À gauche, utilisation de la DCT. À droite, utilisation de l'espace de Fourier.

N.B. : le profil présente des valeurs de phase négatives car on a retranché la valeur moyenne du signal afin d'éviter des composantes continues trop importantes.

3.1.4.2 Les courbes de maxima

En théorie, les courbes des maxima du module de la transformée en ondelettes doivent être connexes et continues des échelles grossières vers les échelles les plus fines. En pratique, ce n'est pas toujours le cas, car l'espace des échelles considéré est continu, or on le représente de manière discrète. Il est impératif de réaliser un algorithme de chaînage des maxima locaux allant des grandes échelles vers les plus petites pour obtenir des courbes de maxima allant vers les fines échelles sans discontinuité. Ce problème n'est pas trivial. Il existe plusieurs méthodes et algorithmes de chaînage des maxima. Le lecteur intéressé trouvera des algorithmes au deuxième chapitre de [CARRÉ_PhD]. Cependant cette partie sur la quantification a été réalisée à la fin de la période de mon stage, et par manque de temps, il n'a pas été possible d'explorer cette possibilité. Nous avons donc éluder le problème.

On calcule la transformée en ondelettes Chapeau Mexicain dans l'espace de la transformée en cosinus pour pouvoir déterminer la carte de maxima locaux de chaque ligne de la carte des coefficients de transformé en ondelettes. On détecte les variations de niveaux de gris, dès qu'il y a une croissance puis décroissance le long d'une ligne, un maximum est détecté. Pour obtenir des courbes définies comme des régions uniques de la carte, on considère chaque courbe de maxima est vue comme un objet 8-connexe. Les courbes ne sont pas tout à fait continues. En établissant une analyse plus fine du profil de phase, on diminue le pas de quantification dans l'espace des échelles et on obtient un résultat plus proche de l'espace continu des échelles. Il y a alors beaucoup moins, voire très peu, de discontinuité observable sur les lignes des maxima (un pas de quantification vaut 1/10 pixel). S'il subsiste encore quelques problèmes lorsque la courbure des lignes de maxima est trop importante, on enlève toutes les composante 8-connexes qui ne convergent pas vers les plus petites échelles. Pour l'exemple de la figure précédente, on obtient la Fig.38.

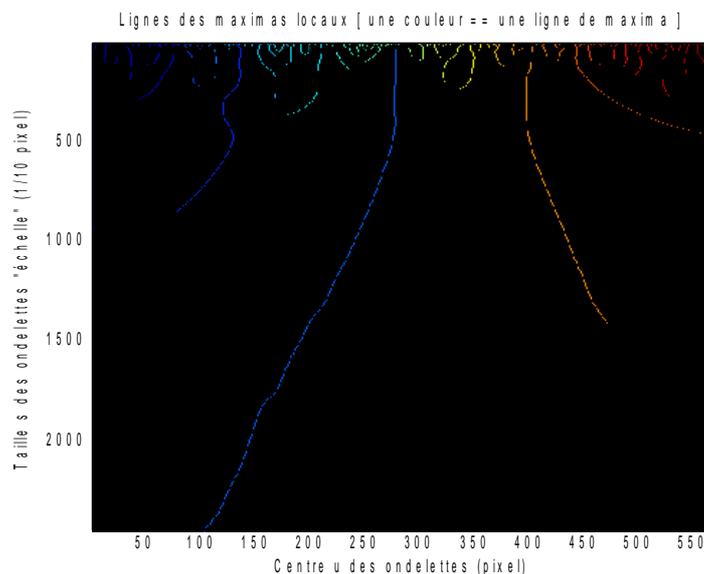


Fig. 38 : Cartes des lignes de maxima locaux du module de la transformée en ondelettes

Chapitre 10

10. Expérimentations

1 Tests en laboratoire

Les tests en laboratoire ont été effectués sur des dalles en béton armée fissurée comme celle de la Fig.35. Les tests portent sur la transformée en ondelette de Morlet ainsi que la transformée de Hilbert. La stimulation qui s'est révélée la plus efficace a été une stimulation mécanique. Cette sollicitation se fait par serrage d'une visse derrière la plaque. De cette manière plus on visse, plus on ouvre la fissure. Au cours du temps, la sollicitation augmente.

Le défaut considéré est une fissure débouchante sur dalle en béton armé continûment déformée par l'arrière. La fréquence d'acquisition d'image est de 2Hz. Vu la faible fréquence, la soustraction d'image de référence se fera par images immédiatement successives, c'est-à-dire qu'une image considérée sera soustraite à l'image qui la précède. Dans ce qui suit, nous noterons TO la transformée en ondelettes et TH celle de Hilbert.

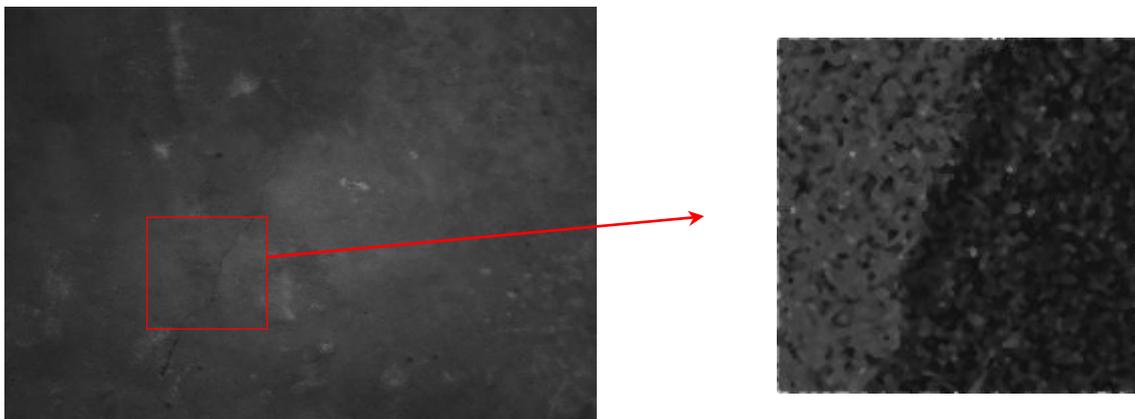


Fig. 39: Exemple de détection de fissure en intérieur en utilisant la transformée en Ondelettes de Morlet. A gauche la plaque de béton armé fissurée. A droite, la fissure détectée.

La Fig.39 montre un résultat obtenu par transformée en ondelettes. Cette image présente un mauvais contraste. Le défaut est tout de même détecté.

La Fig.40 montre un résultat obtenu par transformée de Hilbert. Le contraste est de bien meilleure qualité et le défaut est détecté. Il est à noter que les images résultats ont légèrement décalées car la

zone sélectionnée pour la transformée en ondelettes est légèrement plus à gauche que pour la transformée en ondelettes.

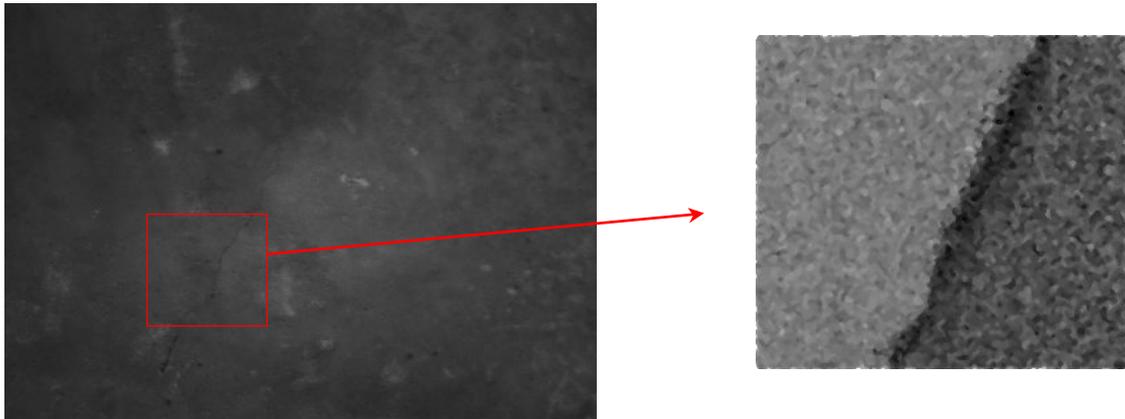


Fig. 40: Exemple de détection de fissure en intérieur en utilisant la transformée de Hilbert. A gauche la plaque de béton armé fissurée. A droite, la fissure détectée.

La Fig.41 permet de suivre l'évolution des déphasages en fonction de la sollicitation appliquée. On voit que dans les deux cas, l'image se dégrade, même si le contraste est toujours meilleur pour la TH.

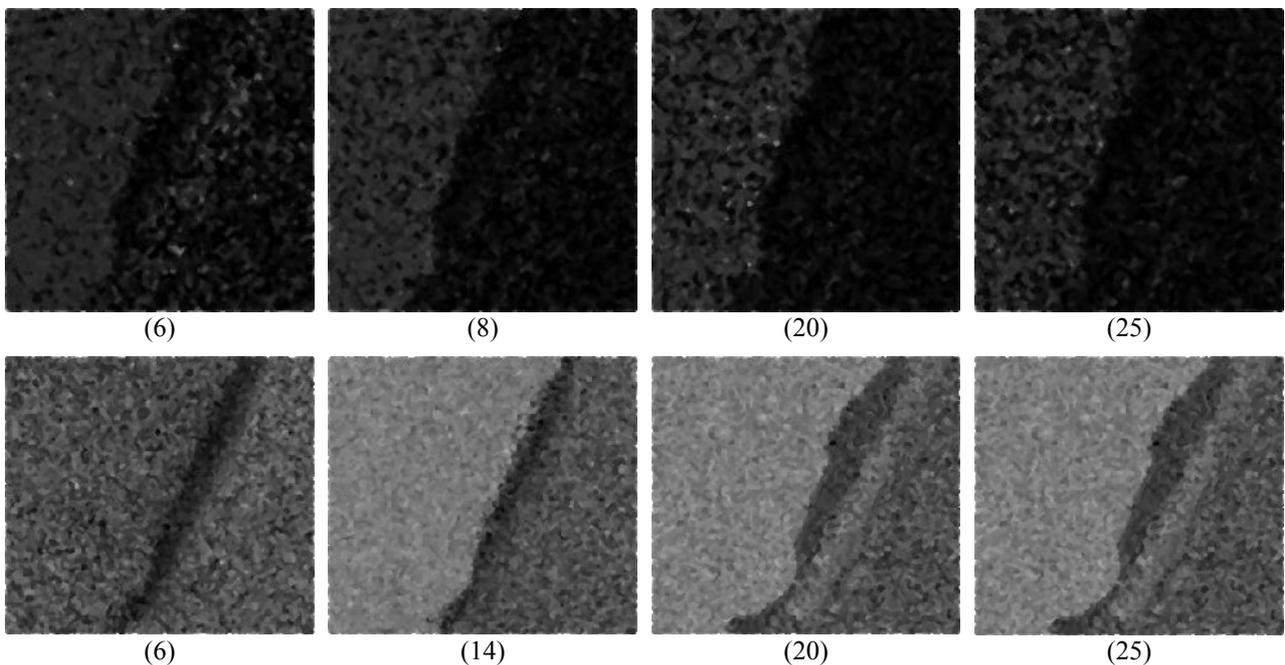


Fig.41 : Comparatif chronologique des deux méthodes pour des mêmes déformation. En haut, transformée en ondelettes de Morlet pour 4 déformations. En bas, Transformée de Hilbert pour les mêmes déformations.

Le défaut est détecté dans les deux cas. Néanmoins, dans les conditions de laboratoire, d'autres méthodes donnent des résultats similaires, voire meilleurs et pour une durée de traitement moindre. Un exemple est des décalage de phase à 4 images qui donne de meilleurs résultats [MUZET_06].

2 Tests en extérieur

Les tests menés en extérieur au LRS [MUZET_06] ont montré l'efficacité de la shearographie, mais aussi certaines limites de ce procédé lorsqu'il est appliqué à des structures étudiées de grandes envergures. Ils avaient été réalisés en plaçant des éprouvettes de béton en extérieur. De nouveaux tests ont été réalisés sur des ouvrages d'art. Il avait pour but de valider les algorithmes implémentés. Ces tests avaient aussi pour but de voir si les sollicitations naturelles donnaient des résultats. Cette sollicitation doit être suffisante sans être trop importante pour éviter les trop grandes fluctuations qui pourraient être la cause de la décorrélation du speckle.

2.1 Premiers tests

Les premiers tests furent négatifs. Tout d'abord, un pont ferroviaire a été étudié. Il présentait d'importantes zones fissurées visibles à l'oeil nu. Le passage des trains devait servir de sollicitation. Aucune détection n'a été possible. Ceci peut s'expliquer de deux manières. Soit la sollicitation est trop importante, soit la fissure n'est pas active.



Fig. 42 : (a) pont ferroviaire testé avec la zone fissurée encadrée. (b) pont circulé et la zone non fissurée et recouverte de poussière en rouge.

Ensuite, en supposant que c'était la sollicitation qui était trop importante, il a fallu penser à une autre forme de sollicitation mécanique sur un ouvrage d'art. La circulation routière semblait convenir pour un pont d'autoroute. Plusieurs zones de ce pont ont été étudiées, une zone fissurée qui avait déjà été observée par des spécialistes des ouvrages d'art (cf. Fig.43) et une zone non fissurée mais sale, recouverte de poussières et toiles d'araignée (Fig.42(b)). Sur cette dernière zone, aucune détection de fissure n'a été observée. Ce test prouve que la shearographie ne détecte que les défauts d'origine mécanique. Les défauts d'aspect de surface ne provoquent pas de déformation anormale et que cette méthode est naturellement peu sujette à provoquer des fausses détections.

2.2 tests sous un pont circulé fissuré

La zone étudiée avait été étudiée par le groupe des ouvrages d'art. Elle était marquée d'un trait à la craie bleue, c'est d'ailleurs ce trait de craie que l'on voit sur la photographie 43 de la zone fissurée et non la fissure elle même. Une ébauche de fissure apparaît en utilisant la technique de phase en continue. L'image est peu contrastée et très bruitée.



Fig. 43: Détection de fissure par phase en continu. A gauche et au centre, la zone fissurée. A droite, la fissure détectée par une mesure de phase en continue.

La sollicitation, le passage des véhicules sur le pont, semble donc adéquate pour l'étude qui a été menée. Pour voir apparaître une fissure, il faut tout de même que le trafic ne soit pas trop important. En effet, la détection de fissure se fait généralement lors de la stabilisation du pont après passage de véhicules. Cette sollicitation n'est certes pas reproductible, mais elle permet de détecter des fissures, ce qui est le but. De plus elle permet, de faire une auscultation d'ouvrages dans des conditions réelles, sans avoir à apporter de sollicitation mécanique ou ondulatoire supplémentaire.

Les méthodes classiques ont été utilisées et sont comparées Fig.44. La méthode du décalage de phase est peu efficace, la fissure est à peine perceptible. Cette méthode, pourtant très employée dans des conditions de laboratoire, ne convient pas du tout pour l'auscultation d'ouvrages d'art. Une carte de phase est faite à partir de quatre images pendant ce calcul, l'état de l'ouvrage a beaucoup changé lors de ces quatre prises de vues.

Le résultat de la phase en continue est meilleure, bien que très bruitée. Cette technique peut être utilisée comme premier test de détection pour voir globalement la forme de la fissure. On remarque que la fissure n'est représentée que par une seule pseudo-frange sombre alors que l'image n'a pas été déroulée. On peut interpréter ce résultat par le fait qu'il s'agisse d'une très grosse frange et qu'on en observe qu'une fine partie.

La fissure est encore mieux détectée par temps moyenné, l'image présente plus de contraste. L'interprétation de ce résultat n'est pas triviale. En effet, la sollicitation est complexe. Le temps moyenné permet cependant de bien visualiser la différence de sollicitation de part et d'autre de la fissure et ainsi de la détecter.

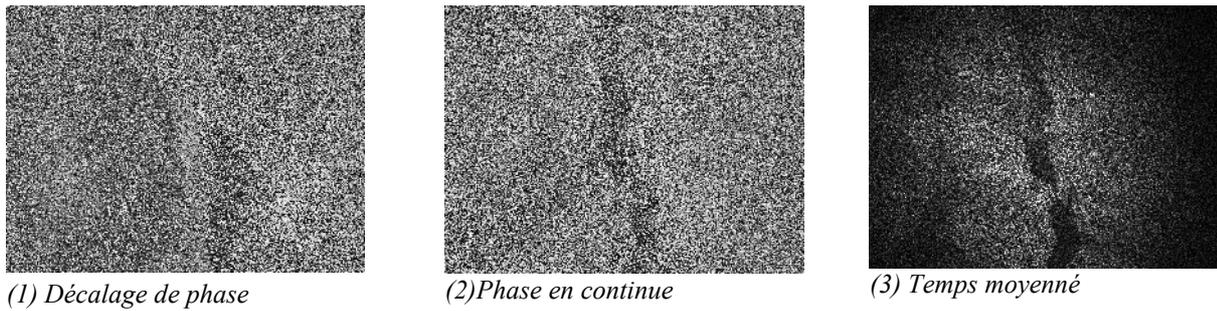


Fig. 44: Détection de fissure par le méthodes classique.

Les méthodes implémentées sont testées avec la Fig.45 pour la TO et la Fig.46 pour la TH. On peut comparer les résultats obtenus par rapport aux techniques classiques avec les Fig.47 qui montre le profil de phase obtenu par décalage de phase et phase en continu (un filtre médian est appliqué) et Fig.48 pour TH et TO pour une carte de déphasage au même moment.

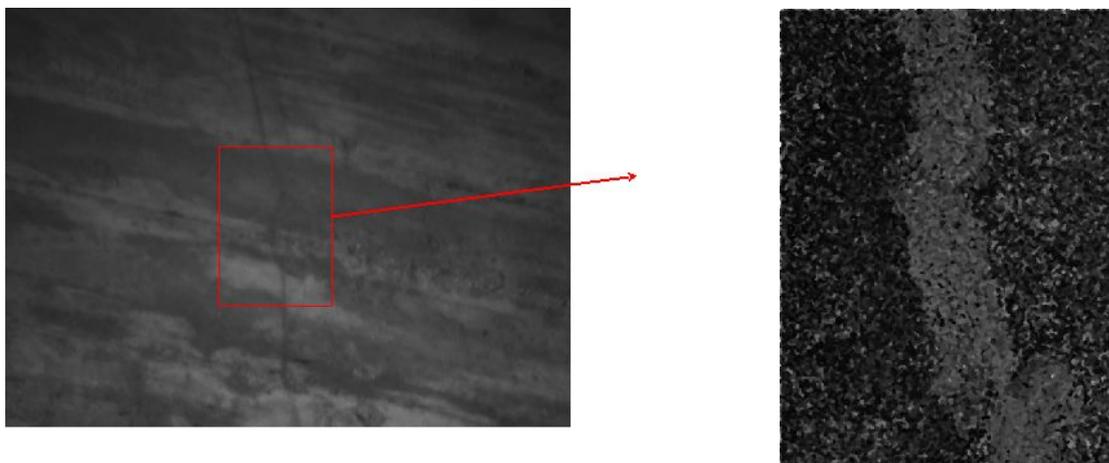


Fig. 45: Détection de fissure in situ en utilisant la TO. A gauche, la zone fissurée. A droite, la fissure détectée.

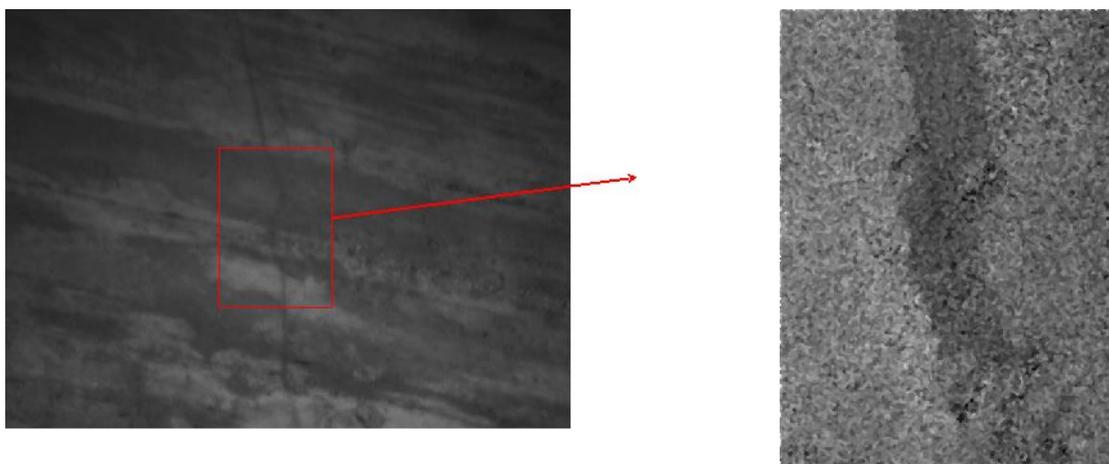


Fig. 46: Détection de fissure in situ en utilisant la TH. A gauche, la zone fissurée. A droite, la fissure détectée.

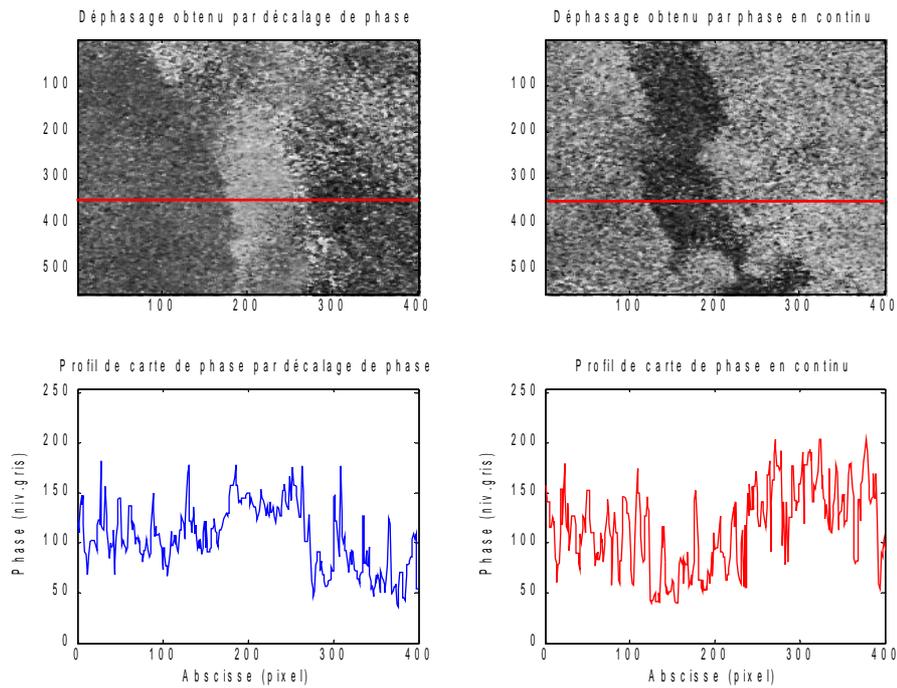


Fig.47 : Comparatif de profil de carte de déphasage entre deux états de la fissure.

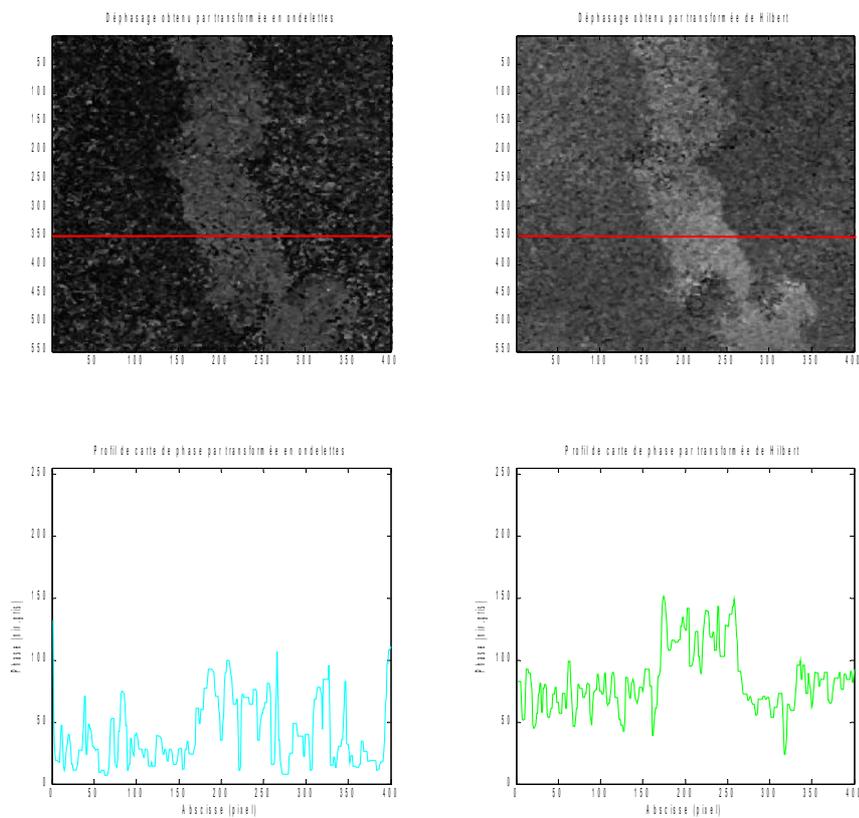


Fig.48 : Comparatif de profil de carte de déphasage entre deux états de la fissure.

La détection semble meilleure et plus précise, les bords de la fissure sont mieux délimités. De même que pour les tests en laboratoire, la TO est moins bien contrastée que la TH.

Ces tests ont été complétés par des tests d'influence de la taille du cisaillement. La fissure est détectée quel que soit le cisaillement apportée dans l'interféromètre, tant que l'on reste dans l'hypothèse d'un petit cisaillement. La largeur apparente de la fissure augmente en même temps que la taille du cisaillement.

L'impact de la vitesse d'acquisition d'image a également été testé pour les méthodes TO et TH. Pour des fréquences allant de 1Hz à 11Hz, la fissure est détectée. Néanmoins, on note également une dégradation des images de déphasage qui deviennent de plus en plus bruitées.

3 Quantification

Les résultats présentés précédemment sont purement qualitatifs. Il n'y a pas de mesure précise. Nous avons essayé d'établir une méthode de quantification des résultats. Les tests ont été réalisés en laboratoire sur une plaque de métal (cf Fig.49) qui est percée d'une fissure artificielle par l'arrière. Cette fissure mesure 5cm de long et 2mm de large. Nous évaluons à la fois la méthode manuelle de détermination des bords de la fissure et celle utilisant la transformée en ondelettes.

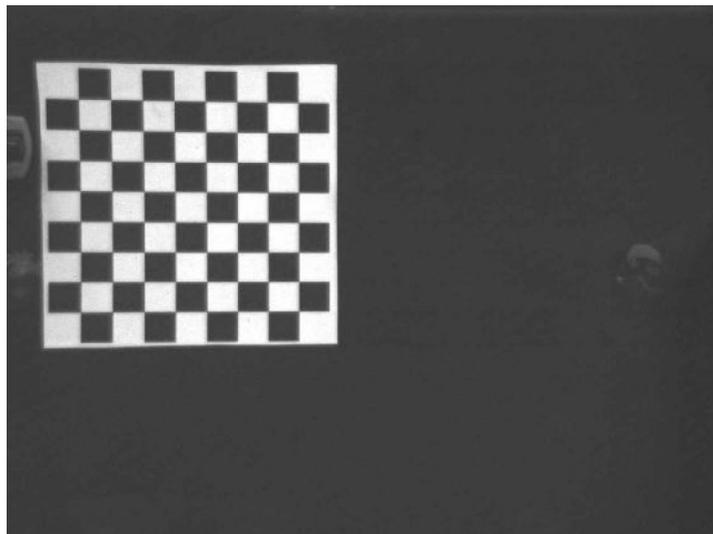


Fig. 49 : Plaque métallique avec une mire de carrés de 1cm de côté.

La méthode de calcul de phase utilisée est le décalage de phase à 4 images. La sollicitation est thermique, une exposition de quelques secondes à l'aide d'une lampe à IR.

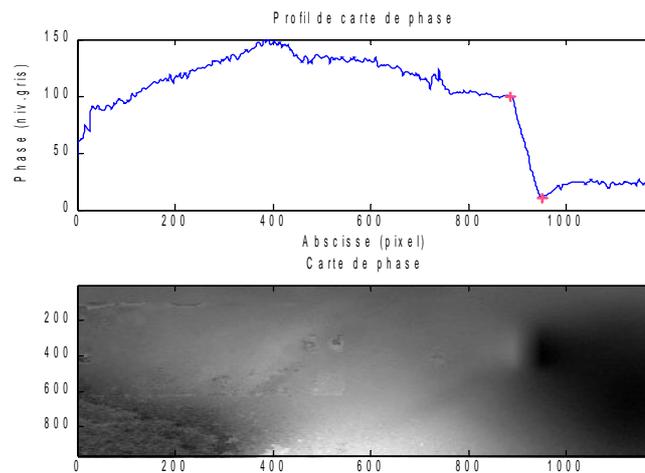


Fig. 50 : Détermination manuelle des bornes de la fissure qui correspondent aux extrema du profil de phase. En haut, le profil de phase ainsi que les bornes (en rose) de la fissure placées aux extrema du saut de phase. En bas, la carte de phase qui a été préalablement filtrée et déroulée.

Pour la détermination manuelle des extrema du saut de phase, on détermine graphiquement la longueur du cisaillement puis du défaut cisailée.

Pour la détermination automatique, le cisaillement est déterminé graphiquement, ensuite la transformée en ondelettes du profil considéré est calculé ainsi que les courbes des maxima du module (cf Fig.51).

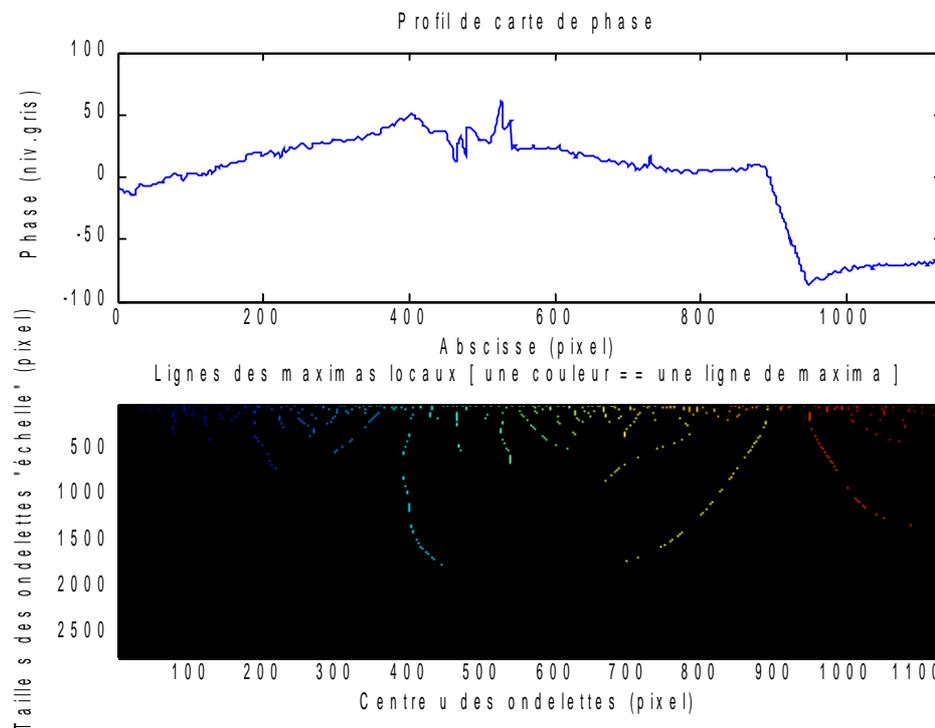


Fig. 51 : Méthode automatique de détermination des bords de fissure. En haut le profil de phase sélectionné. En bas, les lignes de maxima de la transformée en ondelettes du signal.

Le défaut de cette méthode réside dans le fait qu'il faille sélectionner manuellement les lignes de maxima voulue. L'utilisateur doit savoir que les courbes correspondante aux bords de la fissure s'étalent jusqu'aux grandes échelles et avoir une idée de l'emplacement du défaut.

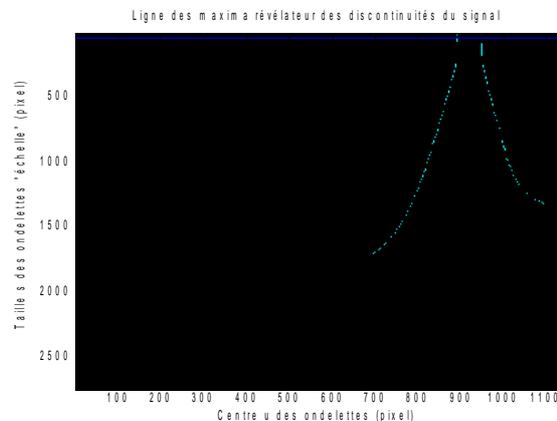


Illustration 52: Lignes de maxima sélectionnée et (en bleu foncé) seuil des 5% à partir duquel la position de l'ondelette sera déterminée.

Les deux méthode sont répétées à plusieurs reprises pour avoir une valeur moyenne de taille de défaut. Ces résultats sont répertoriés dans le tableau suivant :

	Mesurée avec un réglet	Méthode manuelle	TO
Ouverture de fissure	2mm	2.099mm	2,313mm
Écart-type	-	0.30mm	0,00mm

La méthode manuelle donne des résultats qui varient beaucoup. La méthode par TO donne toujours le même résultat. La valeur obtenue est supérieur à la valeur mesurée avec le réglet. Cela peut certes être du aux erreurs de mesures ou d'étalonnage, ou alors, cela peut découler de l'approximation de considérer les bords du saut du profil de phase. On ne voit pas vraiment une taille de défaut mais plus sa déformation, son impact sur la structure. Ces bords correspondraient plus aux limites de la zone sollicitée lors d'un déformation. Néanmoins, elle permet de se faire une idée des dimensions du défaut.

Il faudrait refaire ces tests pour des ouvertures plus petites et avec des échantillons en béton. Cela n'a pas été fait faute de temps.

Conclusion

La théorie relative à la shearographie a permis de poser les bases nécessaires à la compréhension de la shearographie (Chapitre 3). Ensuite une étude approfondie des différentes méthodes de calcul de phase (Chapitre 5) et de quantification de défauts (Chapitre 6) ont permis de choisir des méthodes adaptées à l'auscultation d'ouvrages d'art et de proposer une méthode de quantification de défauts. Ces techniques ont été implémentées et testées.

Les méthodes de calcul de phase ont été testées en extérieur sur un pont routier circulé. Ce test a permis de mettre en évidence deux résultats. La seule circulation sur un pont est une sollicitation suffisante pour faire vibrer ce pont, sans pour autant que cette vibration soit trop importante pour être visible par shearographie. Le trafic automobile est donc une sollicitation idéale pour l'application de la détection de défaut par shearographie appliquée aux ouvrages d'art. Le second résultat est le bon comportement des méthodes de calcul de phase par TO et TH. Elles permettent d'acquérir des cartes de phase relatives mieux contrastées et moins bruitées que les techniques de calcul de phase dites classiques. Ces méthodes sont adaptées aux conditions in situ. Leur défaut est une durée de post-traitement relativement long par rapport aux autres méthodes. Il serait intéressant d'optimiser ces algorithmes et de les implémenter en C/C++. Le protocole de quantification de défaut est opérationnel et donne des résultats cohérents. Faute de temps, il n'a pas pu être testé sur de vraies fissures d'ouverture inférieure à 2mm. Des tests complémentaires doivent être effectués pour valider cette méthode.

Ce stage enrichissant, aussi bien sur le plan humain que professionnel, m'a permis de travailler sur un sujet vraiment captivant au sein d'une équipe dynamique. J'ai pu mettre en oeuvre mes connaissances générales en physique, photonique et aussi en traitement du signal et d'images en vue d'adapter une installation interférométrique à des conditions exigeantes et contraignantes. Le travail de recherche et de mise en oeuvre de méthodes technologiques adéquates à un problème constitue une expérience valorisante en tant que futur ingénieur généraliste spécialisé en traitement d'images.

Bibliographie

- [CARRÉ_PhD]** Carré P., « Méthodes numériques temps-échelle et temps-fréquence pour le traitement du signal et des images », Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, 2000, 248p.
- [BONIFANT_99]** Bonifant W. , « Interferometric Synthetic Aperture Sonar Processing », Rapport de master de l'institut de technologie de Gorgia, 1999, 191p.
- [COLONNA_PhD]** Colonna de Lega X. - « *Processing of non stationnarity interference patterns : adapted phase shifting algorithms and wavelet analysis. Application to dynamic deformation measurments by holographic and speckle interferometry* », Thèse de doctorat École polytechnique fédérale de Lausanne, 1997, 227p.
- [MADJAROVA_02]** Madjarova V., Toyooka S., Widiastuti R., Kadono H., « *Dynamic ESPI with subtraction–addition method for obtaining the phase,* » Optics communications, 2002, Vol.212, pp. 35 – 43.
- Erratum, Optics communications, mars 2003, Vol.212, p. 441.
- [MADJAROVA_03]** Madjarova V., Kadono H., « *Dynamic electronic speckle pattern interferometry (DESPI) phase analyses with temporal Hilbert transform* », Optics express, 2003, Vol. 11, No. 6 , pp. 617-623.
- [JACQUOT_99]** SPIE Conference on Wavelet Applications in Signal & Image Processing VII. Denver, Colorado, July 1999.
Jacquot P., Cherbuliez M., Colonna de Lega X.; « *Wavelet processing of interferometric signals and fringe patterns* »; SPIE Vol. 3813, Wavelet Applications in Signal and Image Processing VII, pp. 692-702.
- [JACQUOT_00]** Jacquot P. , Lehmann M., Colonna de Lega X. and Facchini M.; « *Speckle Interferometry Improvements for Applications in Civil Engineering* »; Solid Mechanics and Its Applications, 2000, Vol. 82, pp. 199-212.
- [JOENATAHN_98]** Joenathan C., Franze B., Haible P.,Tiziani H.J., « *Large in-plane displacement*

measurement in dual-beam speckle interferometry using temporal phase measurement », *Journal of Modern Optics*, Vol.44, pp.1975 - 1984.

- [KOUNG_03]** Koung-Suk K., Yong-Hun C., Ki-Soo K., Man-Yong C., and Dong-Pyo H., « *Quantitative Evaluation of a Crack Inside of Pressure Pipeline by Shearography and ESPI, Review of progress in quantitative nondestructive evaluation* », Volume 22. AIP Conference Proceedings, Volume 657, pp. 939-946 (2003).
- [KOUNG_06]** Koung-Suk K., Yong-Hun C., Ki-Soo K., Man-Yong C., and Dong-Pyo H. bien « *Influence of Shearing Amount on Detecting Crack-Shaped Internal Defect by Shearography* », *Key engineering materials*, vol. 321-323 (2006) pp. 112-115.
- [LAMARQUE_PhD]** Lamarque T. - « *Caractérisation de délaminage par interférométrie de speckle à cisaillement avec sollicitation thermique ou mécanique* », Thèse de doctorat Université paris 6, 18 mars 1998, 198 p.
- [LEHMANN_PhD]** Lehmann M. - « *Statistical theory of two-wave speckle interferometry and its application to the optimization of deformation measurements* », Thèse de doctorat Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998, 222p.
- [MALLAT]** Mallat S., « *Une exploration des signaux en ondelettes* ». Les éditions de l'école polytechnique, Ellipse diffusion, Paris, 2000 – 635p.
- [MICHEL_07]** Michel F. et al, « *Quantification of defect size in shearing direction by shearography and wavelet transform* », *Proc. SPIE, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V*, Vol. 6616 No. 36, juin 2007, 10p.
- [MUZET_04]** Muzet V., Erragragui H., Ancenay J., Lacot E., Guillard Y., « *Détection de fissures dans du béton par interférométrie de speckle à dédoublement latéral (shearographie) et rétro-injection laser(méthode LOFI)* », *Rapport de recherche LCPC – Opération 11A025*, 2004, 49p.
- [MUZET_06]** Muzet V., Walter J., Guillard Y., « *Rapport d'expérience : Étude de l'influence de la distance d'observation en laboratoire et in situ* », *Rapport de recherche LCPC – Opération 11N065*, décembre 2006, 37p.
- [SATPATHI_95]** Satpathi D.; Maji, A. K., « *Electronic bien shearography for bridge inspection* », *Proc. SPIE, Smart Structures and Materials 1995: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Vol. 2446, pp. 170-180.
- [STEINCHEN_95]** International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering 26.-28.09.1995, Berlin.Germany.
Steinchen W. , Yang L., Kupfer G. , Schuth M. , Budelmann H., « *Non-destructive Testing and Strain Measuring of Reinforced Concrete by means of Digital Shearography* », *Proceedings of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Sept. 1995, Berlin, Allemagne, pp. 245-252.

- [STEINCHEN_04] Steinchen W. , Yang L., « Digital shearography, theory and application of digital speckle pattern interferometry », SPIE press, USA, 2004 - 310p.
- [TAILLADE_PhD] Taillade F. - « *Association de la shearographie et des ondes de Lamb pour la détection rapide et quantitative des délaminages* », Thèse de doctorat Conservatoire National des Arts et Métiers, le 17 novembre 2000, 145 p.
- [TAILLADE_05] Taillade F., « Détection de fissure débouchante sur béton : intérêt pour l'auscultation des ouvrages d'art depuis un drone », Recherche LCPC – Opération 11A025, décembre 2005, 10p.
- [TAY_05] Tay C. J., Fu Y., « *Determination of curvature and twist by digital shearography and wavelet transforms* », Optics Letters, 2005, Vol. 30, Issue 21, pp. 2873-2875.
- [WALDNER_96] Waldner S., « *Removing the Image-Doubling in Shearography by reconstruction of the Displacement Field* », Optics Communications, Vol.127 (1996), pp. 117-126.
- [WALDNER_PhD] Waldner S. - « *Quantitative strain analysis with image shearing speckle pattern interferometry (shearography)* », thèse de doctorat Swiss federal institute of technology Zurich, 2000, 125 p.

Webographie

- [Web] <http://echo.onera.fr/CONFERENCES/conf-sec2004/cnd.pdf>
- [Web0] http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- [Web1] <http://www-ljk.imag.fr/membres/Valerie.Perrier/PUBLI/Cours1-VP.pdf>

ANNEXE

Présentation du laboratoire

Mon stage a été effectué au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg (LRS). Ce laboratoire fait partie du Centre d'Études Techniques et de l'Équipement de l'Est (CETE de l'Est). Ce chapitre développe d'abord les caractéristiques du CETE, puis celles du laboratoire et enfin le groupe dans lequel j'ai travaillé, l'équipe des Méthodes optiques et traitement d'images.

1. Le Centre d'Études Techniques et de l'Équipement de l'Est

Vocation

Le CETE de l'Est est un service extérieur du Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables, apportant des prestations d'ingénierie dans les domaines touchant aux infrastructures et à leur exploitation, à l'équipement, à l'aménagement du territoire ainsi qu'à l'environnement.

Prestations

Des équipes interdisciplinaires, offrent un large éventail de prestations, consistant en études, recherche, assistance, expertises, méthodologie, contrôle. Le CETE agit pour le compte de l'Etat, mais se met aussi au service des villes, des collectivités territoriales, et de divers organismes publics, para-publics, privés et étrangers.

Zone d'action

La zone de compétence du CETE couvre 3 régions : la Lorraine, l'Alsace, la Champagne-Ardenne, soit 10 départements.

Le Laboratoire de Nancy intervient sur la région Lorraine ainsi que sur les départements de la Haute-Marne et de l'Aube. Le laboratoire de Strasbourg mobilise ses compétences prioritairement en Alsace, sur le territoire de Belfort et l'arrondissement de Saint-Dié des Vosges.



Fig.53 : Zone d'action du CETE de l'Est(source LRS)

Le CETE et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a pour mission de réaliser des recherches de base et appliquées dans les domaines des infrastructures de transport et de leurs usages, de la géotechnique, des ouvrages d'art, du génie civil, du génie urbain et de leurs conséquences sur l'environnement.

Le CETE de l'Est participe à ces différentes actions par l'intermédiaire de trois équipes reconnues comme Équipes de Recherche Associées au LCPC (ERA). Les activités des trois équipes du CETE de l'Est portent sur l'acoustique, la viabilité hivernale et l'utilisation des méthodes optiques dans le Génie Civil.

2. Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg

Les domaines d'activités commune à l'ensemble des laboratoires régionaux sont :

- la géotechnique : fondation, sondages carottés, terrassement, analyse des zones instables.
- les chaussées : dimensionnement, assistance technique et contrôle extérieur, auscultation, gestion des réseaux routiers, expertises.
- les ouvrages d'art : suivi de construction (assistance technique, matériaux), gestion des ouvrages (inspections, expertises, instrumentation), réparations.

Des savoir-faire spécifiques se sont développés à Strasbourg, dans les domaines suivants :

- chaussées : liants hydrocarbonés, orniérage, étanchéité
- environnement – risques : lutte contre le bruit des transports, prévision des niveaux sonores, classement des voies, études d'impact, écrans.
- sécurité routière : méthodes optiques, analyse d'images, holographie, Ecodyn, Coluroute.
- construction : promotion de la qualité technique de l'habitat, constructions publiques.
- autres : vérification des tamis, éthylomètres, microbilles de verre.

Le laboratoire de Strasbourg mobilise les compétences d'une centaine d'ingénieurs et techniciens, repartis dans différents groupes ayant des domaines d'activités différents :

- Géotechnique – terrassement
- Chaussée
- Ouvrages d'art
- Constructions
- Acoustiques et méthodes physique



Fig. 54 : Locaux du LRS (source LRS)

3. Mon intégration au sein de l'équipe

C'est au sein du groupe « méthodes physiques » et plus particulièrement dans l'ERA « imagerie – méthodes optiques » que j'ai été accueillie pour effectuer ce stage. L'ERA Méthodes Optiques est plus particulièrement impliquée dans les infrastructures de transports et de leurs usages. Elle est spécialisée dans la mise en œuvre de méthodes sans contact, dites globales telles que l'interférométrie holographique, le speckle et la projection de franges ou des méthodes basées sur des techniques de traitement d'images.