

UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

THESE

Présentée à l'U.F.R. de Sciences Exactes et Naturelles

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

en SCIENCES : SPECIALITE ENERGETIQUE

par

Jean-Charles CANDORE

Sujet :

**DETECTION ET CARACTERISATION DE DEFAUTS PAR
THERMOGRAPHIE INFRAROUGE STIMULEE : APPLICATION AU
CONTROLE D'ŒUVRES D'ART**

Soutenue le 12 juillet 2010, à REIMS devant le jury :

M. Jean-Luc BODNAR	Maître de conférences hors classe, Université de Reims	Co-directeur de Thèse
M. Vincent DETALLE	Responsable du pôle peintures murales du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques	Co-encadrant de Thèse
M. Philippe GROSSEL	Professeur, Université de Reims	Directeur de Thèse
M. Philippe HERVE	Professeur, Université Paris X	Rapporteur
Mme. Simone MATTEI	Professeur, Université de Bourgogne	Rapporteur
M. Michel MENU	Ingénieur de recherche hors classe, C2RMF, Louvre	Examineur
M. Jean-Louis NICOLAS	Ingénieur de Recherche, Université de Reims	Invité
Mme. Isabelle PALLOT-FROSSARD	Directrice du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques	Invitée
M. Benjamin REMY	Maître de Conférences, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy	Examineur

AVANT-PROPOS

Je tiens tout d'abord à remercier vivement le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques et la Région Champagne-Ardenne pour avoir financé cette thèse.

Je remercie ensuite Monsieur Philippe GROSSEL d'avoir accepté la direction de ce travail de thèse.

J'exprime mes profonds remerciements à mon co-directeur de thèse, Monsieur Jean-Luc BODNAR pour m'avoir fait confiance, pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour sa patience et son encouragement. Son œil critique et ses compétences scientifiques m'ont été très précieux pour structurer et mener à bien ce travail. Il a toujours su m'orienter dans la bonne direction et m'a donné de nombreux conseils avisés.

Je remercie également mon encadrant de thèse au LRMH, M. Vincent DETALLE pour m'avoir permis de découvrir le monde des œuvres d'art sous une nouvelle facette. Il a toujours montré de l'intérêt pour mes travaux et répondu à mes sollicitations lorsque le besoin s'en faisait sentir.

Je remercie également Messieurs Didier CARON et Jean-Louis NICOLAS qui ont collaboré activement à ce travail de recherche, ainsi que toute l'équipe GRESPI/ECATHERM de l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

Je remercie les membres du jury, Mme. Simone MATTEI et M. Philippe HERVE qui ont acceptés d'être rapporteurs et de juger ce travail, Mme. Isabelle PALLOT-FROSSARD pour avoir accepté cette thématique de recherche au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques et pour avoir permis le co-financement de cette thèse, M. Benjamin REMY qui a été de très bon conseil quant à la mesure de paramètres thermophysiques, Jean-Louis NICOLAS et M. Michel MENU qui ont acceptés d'examiner cette thèse.

Enfin, je remercie Jean-Marc VALLET et Antoinette SINIGAGLIA de nous avoir permis de travailler sur les peintures murales de la chapelle de Villefranche-sur-Mer et Beaulieu-sur-Mer, Véronique Milande de nous avoir ouvert le Musée National de la Céramique, L'ANDRA pour avoir financé l'étude de peintures murales de l'église de Bonnet ainsi que M. Remelet, maire de Bonnet et Mme Taillefer, restauratrice du patrimoine de nous avoir accueillis sur le chantier de restauration, ELECTRA pour avoir financé un travail réalisé

au château de Versailles, Mme Catherine Dendrelle et M. Brice Moulinier pour nous avoir permis de réaliser une campagne d'analyses à l'abbaye de Saint-Savin sur Gartempe et enfin Gabriela Szatanik qui a suivi ce travail de thèse.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	10
CHAPITRE I : THERMOPHYSIQUE ET CARACTERISATION DE DEFAUTS	13
I- Thermographie infrarouge et œuvres d’art	14
I-1- Problème de conservation des œuvres d’art	14
II-2- Travail de la communauté scientifique	17
II- Principe de la thermographie infrarouge stimulée.....	26
II-1- Principe général de la radiométrie photothermique	28
II-2- Principe de l’analyse pulsée	28
II-3- Principe de l’analyse aléatoire	29
II-3-1 Principe de la création d’un bruit blanc	29
II-3-2- Principe de l’analyse corrélatore.....	32
II-3-2-1- Principe de l’analyse corrélatore simple	32
II-3-2-2- Principe de l’analyse corrélatore « complexe ».....	33
II-3-3- Principe de l’analyse paramétrique.....	33
II-3-3-1- Les modèles paramétriques utilisables.....	35
III- Mesure de diffusivité	36
III-1- Méthodes flash classiques.....	36
III-1-1- Principe de la méthode « historique » de Parker face avant	36
III-1-2- Principe de la méthode flash de Parker face arrière	37
III-2- Mesure de diffusivité thermique longitudinale par thermographie infrarouge	38
IV- Approche de la mesure de la profondeur à laquelle se situe le défaut	39
V- Conclusion.....	41
CHAPITRE II : APPROCHE DE LA DETECTION DE DEFAUTS SITUES DANS LES ŒUVRES D’ART PAR THERMOGRAPHIE INFRA-ROUGE STIMULEE	42
I- Le Système d’Analyse des Matériaux Minces par Thermographie InfraRouge développé pour l’étude.....	42
I-1- Pilotage de l’excitation.....	43
I-2- La chaîne optique de détection	44
I-3- Logiciel de post-traitement développé pour l’étude	45
II- Echantillons étudiés au laboratoire.....	50
II-1- Réplique partielle de fresque.....	50
II-1-1- « Vérification » des résultats obtenus par Gabriela Szatanik : étude de la minifresque par thermographie infrarouge pulsée.....	50
II-1-2- Etude en aléatoire.....	52

II-1-3- Post-traitement d'image	53
III- Analyses des possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière d'aide à la restauration d'autres types d'œuvres d'art	55
III-1- Analyse de marqueteries	55
III-1-1- Analyse d'un échiquier académique.....	55
III-1-2- Analyse des échantillons du programme européen LASERACT	56
III-1-3- Analyse d'un couvercle de boîte malgache	57
III-2- Analyse de vitraux	58
III-2-1- Etude du vitrail réalisé au LRMH	59
III-2-2- Vitrail de la cathédrale de Chartres	60
III-3- Analyse de céramiques	62
III-3-1- Analyse d'une amphore panathénaïque (MNC 7230, 332 avant Jésus Christ) du Musée National de la Céramique de Sèvres.....	63
III-3-2- Analyse d'une potiche ovoïde (MNC 7235, 1883) du Musée National de la Céramique de Sèvres.....	65
IV- Etude des possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière d'analyse de peintures murales <i>in situ</i>	67
IV-1- Analyse de peintures murales à l'église Saint-Florentin de Bonnet.....	67
IV-1-1- Analyse de la scène « Saint-Florentin alité »	67
IV-1-2- Analyse de la peinture sur toile marouflée représentant « Saint-Martin »	69
IV-2- Analyse de peintures murales à l'église abbatiale de Saint-Savin sur Gartempe	70
IV-3- Analyse de peintures murales de la Chapelle Saint-Pierre de Villefranche-sur-Mer	74
IV-3-1- Analyse de la peinture murale « Hommage aux pêcheurs de Sainte Marie »	74
IV-3-2- Analyse de la scène « Saint Pierre livré aux soldats de Pilate».....	76
IV-4- Analyse de peintures murales à la Villa Kerylos de Beaulieu sur Mer	79
VI- Conclusion	84
CHAPITRE III : MESURE DE DIFFUSIVITE THERMIQUE LONGITUDINALE.....	86
I- Principe de la méthode de mesure de diffusivité thermique longitudinale utilisée.....	87
I-1-Présentation du principe de la technique de mesure de diffusivité thermique longitudinale retenue	87
I-2-Modélisation thermique de la technique de mesure retenue.....	87
II- Simulation numérique et validation du programme d'estimation de diffusivité thermique	91
II-1-Les conditions de simulation retenues	91
II-1-1- Exemple de résultats obtenus lors d'une analyse face arrière de l'échantillon étudié..	93
II-1-2- Exemple de résultats obtenus lors d'une analyse face avant de l'échantillon.....	96
III- Mesure de diffusivité thermique longitudinale : les résultats expérimentaux	99

III-1- Dispositif expérimental mis en œuvre	99
III-2- Etude d'un bloc de plâtre	102
III-3- Présentation des résultats obtenus lors de l'étude du bloc de plâtre	103
III-4- Mesure de la diffusivité thermique du mélange chaux/plâtre constituant la réplique partielle du Saint-Christophe	105
IV- Conclusion	109
CHAPITRE IV : CARACTERISATION DE DEFAUT	110
I- Image tomographique de défaut	110
II- Etude expérimentale des paramètres caractéristiques des réponses thermiques ; sont-ils corrélés à la profondeur du défaut ?.....	111
III- Images « tomographiques » de défaut : thermogrammes synthétiques de paramètres caractéristiques	117
IV- Première technique de mesure de la profondeur à laquelle se situe le défaut.....	122
V- Mesure de profondeur à l'aide de techniques inverses.....	123
V-1- Modèle thermique faisant appel aux notions d'onde progressives et régressives.....	124
V-1-1- Présentation du modèle.....	124
V-1-2- Mesure de la profondeur d'un défaut incliné situé dans un échantillon de plâtre	127
V-2- Modèle thermique utilisant la méthode des quadripôles thermiques	129
V-2-1- Présentation générale du modèle	129
V-2-2- Simulation numérique à l'aide du logiciel COMSOL : application à la mesure de profondeur	131
V-2-3- Mesure de profondeur de défaut : étude expérimentale sur un échantillon de laboratoire	136
V-2-4- Mesure de profondeur de défaut : Etude expérimentale sur une peinture murale	139
VI- Conclusion	141
Conclusion générale	142

NOTATIONS

symboles	unités	dénominations
C_p	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	capacité calorifique massique
a	$m^2.s^{-1}$	diffusivité thermique
e	m	épaisseur
f	Hz	fréquence
h	$W.m^{-2}.K^{-1}$	coefficient d'échange par convection- rayonnement
TL		transformée de Laplace
l	m	longueur
TL ⁻¹		transformée de Laplace inverse
m	Kg	masse
n		ordre de la transformée de Fourier
p	s ⁻¹	variable de Laplace
q	$W.m^{-2}$	densité de puissance surfacique
Q	$J.m^{-2}$	énergie surfacique
S	m ²	surface
T ou θ	K	température
TF		transformée de Fourier
TF ⁻¹		transformée de Fourier inverse
t_{rp}	s	temps de rupture de pente

symboles grecs	unités	dénominations
Φ	W	flux thermique
φ	$W.m^{-2}$	Densité de flux thermique
T ou θ	K	température
λ	$W.m^{-1}.K^{-1}$	conductivité thermique
ρ	$kg.m^{-3}$	masse volumique

INTRODUCTION

Ce travail de thèse est la continuité d'une étude menée par Mme Gabriela Szatanik au cours de sa dernière année d'étude à l'Institut National du Patrimoine [1]. Elle a mené une étude et un travail de restauration autour d'une peinture murale déposée. Il s'agit du *Saint Christophe portant l'Enfant Jésus*, une œuvre florentine de la fin du XIV^e siècle, attribuée à Tommaso del Mazza. C'était une des dernières peintures de la collection Campana à ne pas avoir encore été restaurée. Elle présentait des altérations importantes de couche picturale qui conduisaient à des pertes de matière et qui nuisaient à la lisibilité de l'œuvre. De nombreuses interventions de restauration avaient mal vieilli et donnaient à la peinture un aspect hétérogène.

Ces différentes altérations sont considérées comme des défauts. Les types d'altérations qui nous intéressent particulièrement ici sont les poches d'air - ou déplacages - qui peuvent se former entre les différentes couches d'enduits de la peinture murale. La méthode traditionnelle des restaurateurs pour les détecter est le sondage acoustique. Le principe de cette méthode consiste à tapoter la surface de l'œuvre et à estimer, grâce aux sons rendus et aux vibrations induites par le tapotement, s'il y a bien des défauts sous la couche picturale et l'éventuelle étendue de ceux-ci. Cette méthode est robuste ce qui explique sa mise en œuvre dans le domaine de la restauration des œuvres d'art. Elle est toutefois aussi lente à mettre en œuvre et peut être destructrice pour l'œuvre elle-même si le défaut recherché est proche de la surface analysée.

Le travail de Mme Gabriela Szatanik a alors consisté à étudier, en collaboration avec Monsieur Jean-Luc Bodnar, les possibilités d'une méthode encore peu utilisée en conservation, la thermographie infrarouge, en matière d'aide à la restauration de peintures murales en général et du Saint-Christophe en particulier.

Les résultats obtenus au cours de cette étude, rappelés au chapitre I montre clairement l'intérêt d'utiliser cette technique de contrôle non destructif pour aboutir à une aide à la restauration de peintures murales. Toutefois, ce mémoire technico-scientifique de l'Institut National du Patrimoine a été développé avec les moyens disponibles à l'époque, incomplets et pas forcément bien adapté à l'étude. Par ailleurs, cette dernière ne concernait que l'étude qualitative du Saint-Christophe et non l'aspect de caractérisation des défauts. Il y avait donc à

compléter et à généraliser cette étude. D'une part il y avait à concevoir et à réaliser une instrumentation dédiée à l'analyse des peintures murales. Il y avait ensuite à généraliser l'étude à d'autres peintures murales, y compris des peintures murales situées dans des monuments historiques. Il y avait encore à tester la méthode dans des conditions réelles de restauration. Il y avait aussi à étendre l'étude à d'autres types d'œuvres d'art (marqueteries, vitraux...). Il y avait enfin à étudier les possibilités de la méthode en matière de caractérisation dimensionnelle de défaut (étendue et profondeur auxquelles se situent les défauts).

En résumé, il fallait développer un travail de recherche complémentaire à cette étude technico-scientifique. C'est ce que nous avons fait à l'occasion de cette thèse de doctorat. Ce sont donc les résultats obtenus au cours de celle-ci que nous présentons maintenant.

Notre travail de thèse se décompose en quatre étapes.

La première étape a consisté à développer une étude bibliographique. Cette dernière visait d'une part à connaître les travaux développés par la communauté scientifique dans le domaine du contrôle non destructif des peintures murales par thermographie infrarouge stimulée. Elle visait d'autre part à prendre connaissance de l'état de l'art en matière de mesure de diffusivité thermique et de caractérisation dimensionnelle de défaut. Ce travail est présenté au chapitre I.

La seconde étape de notre travail de thèse a consisté à étudier les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection de défauts situés dans des peintures murales. Ce travail fait l'objet du chapitre II. Dans ce dernier, nous présentons d'abord l'instrumentation développée pour l'étude. Nous présentons ensuite les études développées sur un échantillon académique ainsi que les études développées *in situ*. Enfin, afin d'ouvrir le champ d'application de cette technique, nous présenterons enfin des analyses effectuées sur d'autres types d'œuvres d'art que des peintures murales.

La troisième et la quatrième étapes de notre travail de thèse ont consisté à étudier les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de caractérisation dimensionnelle de défaut. Pour cela, il y avait d'abord à déterminer, y compris *in situ*, les propriétés thermophysiques de la peinture murale étudiée. La présentation de la technique de

mesure retenue, puis les résultats théoriques et expérimentaux obtenus font l'objet du chapitre III.

Enfin le chapitre IV est consacré à l'étude des possibilités de la méthode photothermique en matière de mesure de profondeur de défaut. Nous présentons différentes approches et montrons que celle concernant une résolution quadratique de l'équation de la chaleur et des techniques inverses permet une bonne approximation de la profondeur recherchée.

Le bilan de l'étude ainsi que les perspectives envisagées pour l'avenir sont enfin l'objet de la conclusion générale.

CHAPITRE I : THERMOPHYSIQUE ET CARACTERISATION DE DEFAUTS

Le premier chapitre de cette thèse s'intitule : Thermophysique et caractérisation de défauts. Il a pour objectif de situer notre travail de thèse parmi les travaux de la communauté scientifique. D'autre part, nous présentons une synthèse des travaux développés par la communauté scientifique dans le domaine du contrôle non destructif des peintures murales par thermographie infrarouge stimulée (en particulier les travaux de Gabriela Szatanik), dans le domaine de la mesure de diffusivité thermique ainsi que dans le domaine de la caractérisation dimensionnelle de défaut.

D'autre part, nous présentons la thermographie infrarouge stimulée et la radiométrie photothermique aléatoire, méthode potentiellement intéressante, de par son aptitude à travailler sous contraintes énergétiques moindres, pour le contrôle non destructif des matériaux fragiles comme les œuvres d'art. Cette méthode à l'origine de notre travail avait été mise en œuvre pour des analyses ponctuelles mais jamais pour des analyses étendues.

Notre présentation se décompose alors en quatre parties.

La première partie présente le principe de la thermographie infrarouge stimulée en général et celui de la radiométrie photothermique aléatoire en particulier.

La seconde partie recense les problèmes de conservation des œuvres d'art et les travaux déjà réalisés dans le domaine du contrôle d'œuvres d'art par thermographie infrarouge.

La troisième partie est consacrée à la présentation des différentes méthodes de mesure de diffusivité thermique. Dans un premier temps, nous rappelons les méthodes de mesure classiques (flash face avant et face arrière). Dans un second temps, nous présenterons la nouvelle méthode développée au LEMTA, méthode de champ, de laquelle dérive celle que nous avons développée dans nos travaux.

La quatrième partie de ce chapitre sera consacrée à la mesure de profondeur. Nous présentons différentes méthodes citées dans la littérature, notamment les méthodes utilisant l'étude des courbes de contraste (exploitation de différents paramètres tels que le maximum

de contraste, le contraste naissant) ou encore les méthodes utilisant un ajustement théorie/expérience pour aboutir à la mesure de ce paramètre géométrique.

I- Thermographie infrarouge et œuvres d'art

I-1- Problème de conservation des œuvres d'art

En général, les principaux facteurs de détérioration dans des œuvres d'art peuvent être divisés en trois catégories : physiques, chimiques et biologiques. Leur incidence respective dépend surtout de l'environnement dans laquelle l'œuvre d'art est conservée.

Les détériorations physiques sont causées par les paramètres environnementaux, dont l'action se manifeste par un caractère mécanique. Par exemple, dans des œuvres d'art (peinture murale) situées dans environnement ouvert, l'augmentation du volume d'eau dans la structure causée par une exposition aux pluies, peut conduire à des forces de compression et de traction qui, si non supportées par les matériaux, donnent naissance à des fentes. Des processus de dilatation et de contraction, causés par le changement de température, soumettent l'œuvre à des sollicitations mécaniques internes. Comme l'œuvre est composée de matériaux divers, les tensions de cisaillement peuvent être telles qu'elles peuvent engendrer des fissures et des déplacements et, dans des cas extrêmes, une rupture totale et une chute de pans entiers de composition. La migration de sels solubles par capillarité à travers l'œuvre d'art joue aussi un rôle important dans la dégradation de celle-ci ; en effet lorsque le sel cristallise, il provoque des tensions, lesquelles créent des fissures. Le vent, lui aussi, exerce une action abrasive sur la surface de l'œuvre.

La pollution atmosphérique est la principale source concernant les détériorations chimiques et minéralogiques de la surface des œuvres d'art. Un exemple de cette pollution et de ces effets est observable sur les églises (noircissement des pierres) et statues.

Des problèmes de nature biologique peuvent encore se produire comme par exemple l'attaque de micro-organismes.

Tous ces facteurs de détérioration agissent de façon plus ou moins analogue sur les peintures murales et sur les autres types d'œuvres d'art. Les principaux défauts que l'on peut

trouver dans les peintures murales sont des décollements entre les couches et des défauts superficiels (sels), car ils sont favorisés par la structure laminaire (en couche) des œuvres [7]. Dans le cas des fresques, la Figure I.1 présente une structure de couches souvent rencontrée. Cette figure montre que sur le support (mur) est d'abord déposée une couche de *rinzaffo*, afin de niveler la surface du mur, au cas où celle-ci est très rugueuse, ensuite, une couche d'*arriccio* (enduit grossier), puis une couche d'*intonaco* (enduit fin) et enfin la couche picturale.

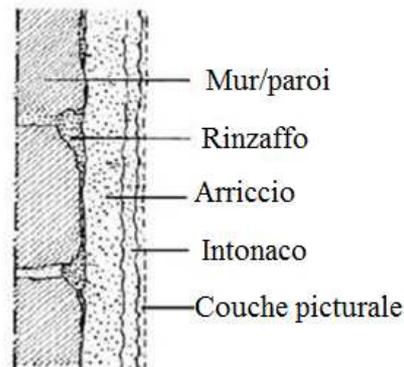


Figure I.1 : Structure typique d'une fresque

Dès que la couche d'*intonaco* est posée, l'artiste dépose les pigments de la couche picturale. Il travaille sur une couche fraîche en cours de solidification d'où le nom « *afresco* ». Une fine croûte transparente se forme sur la surface de la fresque, ceci est le résultat de la carbonatation du mortier d'hydroxyde de calcium qui produit une enveloppe protectrice et fixe définitivement les pigments.

En plus de provoquer des dommages visuellement perceptibles (fissures, efflorescences de sels...), l'action de la pollution atmosphérique, des variations d'humidité et la température ambiante provoquent des décollements non visibles qui peuvent sérieusement porter préjudice à l'intégrité de l'œuvre. Ces cavités peuvent encore être causées par des tensions imposées par la structure de base en se localisant, normalement, dans l'interface mur/*arriccio* et dans l'interface *arriccio/intonaco* (Figure I.2).

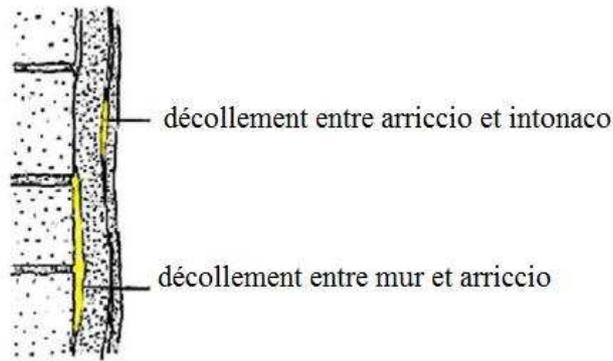


Figure I.2 : Décollements typiques dans des fresques

Dans le cas de peintures murales déposées et refixées, des structures en bois peuvent être ajoutées, elles ont pour effet de réduire la tendance au gauchissement, à la courbure ou à la rupture.

La technique traditionnelle d'évaluation de défauts dans des œuvres d'art est une inspection manuelle et visuelle appelée « sondage acoustique ». Ce sondage consiste à parcourir la surface de l'enduit en la tapotant légèrement avec les doigts. Pour évaluer la force des vibrations induites, le restaurateur se sert de l'ouïe et du toucher : pendant qu'il tapote la surface d'une main, l'autre main reste plaquée contre l'enduit pour déterminer l'ampleur et la distance de propagation des vibrations. Cette méthode ne demande aucun équipement particulier et reste simple à mettre en œuvre. Cependant la qualité du diagnostic dépend « des capacités de perception et de l'expérience du restaurateur, qui seules lui permettent d'apprécier et d'interpréter les sons rendus par l'enduit ». Cette méthode reste toujours subjective et limitée quant aux informations qu'elle fournit : la profondeur de la poche, son épaisseur ou encore l'état de cohésion du mortier sont autant d'informations utiles qui permettraient au restaurateur non seulement de mieux évaluer la fragilité réelle de la peinture, mais aussi de mettre en œuvre des moyens plus adaptés pour la consolidation. Par ailleurs, le sondage acoustique nécessite un contact physique énergique et prolongé avec la surface qui peut être dangereux si la peinture est pulvérulente ou fragilisée par des soulèvements. L'enduit, lui-même, s'il est très fin, peut s'effondrer facilement si l'action manque de délicatesse. Enfin, il faut noter également que, dans les cas de décorations murales très étendues, couvrant souvent l'ensemble des murs d'un édifice, l'examen acoustique s'avère très laborieux et très lent à mettre en œuvre. D'autres méthodes de contrôle non destructif (CND), comme la thermographie infrarouge stimulée peuvent donc trouver leur place dans ce

domaine d'application, ce bien sûr de façon complémentaire à l'analyse acoustique. Cela explique l'objet de ce travail de thèse

II-2- Travail de la communauté scientifique

Examinons maintenant une rapide synthèse des travaux développés par la communauté scientifique dans ce domaine. C'est à partir des années 1970 que l'on a tenté d'appliquer les méthodes de CND à l'examen des œuvres d'art. Les plus étudiées sont l'auscultation ultrasonique, la vibrométrie laser, l'interférométrie holographique et, enfin, la thermographie infrarouge stimulée. Leur application à l'examen des œuvres d'art comporte toujours des avantages et des inconvénients variables en fonction des procédés. Par exemple, les systèmes qui utilisent l'auscultation ultrasoniques nécessitent un contact avec l'enduit et les mesures sont ponctuelles, comme avec l'examen acoustique manuel. Les autres méthodes ont l'avantage de fonctionner à distance et de couvrir des surfaces plus larges. Cependant, aucun de ces procédés ne permet de détecter l'ensemble des défauts de structure dans tous les cas de figure. En effet, le nombre de paramètres qui entrent en compte rend l'interprétation des résultats difficile. Aussi ces méthodes doivent-elles être choisies en fonction de l'objet à examiner. Elles doivent également être considérées comme complémentaires. Examinons plus particulièrement les travaux liés à la thermographie infrarouge stimulée.

Les travaux scientifiques portant sur la thermographie infrarouge appliquée aux œuvres d'art datent de la fin des années 1970 [8]. Ce sont majoritairement des travaux italiens. En 1979 un grand projet de restauration, financé par l'*Istituto Centrale per il Restauro* du *Ministero per i Beni e Attività Culturali*, a utilisé des données de thermographie infrarouge et de mesures météorologiques pour établir les conditions microclimatiques à l'intérieur d'églises à Rome : Ceci a mené à l'établissement d'un programme de conservation des fresques. Les résultats de ces premières recherches étaient encourageants mais ils n'ont pas été jugés suffisants pour gagner la confiance des professionnels de la restauration et de la conservation de biens culturels ; des doutes subsistaient dans la capacité des essais thermiques non destructifs à diagnostiquer des défauts non apparents dans des œuvres d'art. Ensuite les travaux de Grinzato *et al* [9] concernant l'inspection de la chapelle *Scrovegni*, présentent une panoplie complète d'applications possibles de la thermographie infrarouge stimulée appliquée aux œuvres d'art (Figure I.3).

La chapelle *Scrovegni* de Padoue (Italie) fut l'un des premiers monuments pour lequel l'Institut Central de Restauration italien décida d'inclure la thermographie infrarouge dans ses plans de restauration et de conservation. Le but des analyses est d'observer le niveau de conservation et l'impact des visiteurs sur les œuvres peintes par l'artiste. La température en surface est alors un bon paramètre à prendre en compte : la thermographie permet d'obtenir des informations sur la circulation de l'air à l'intérieur de la chapelle et de mettre en place ainsi différentes stratégies de visite du lieu afin de préserver les fresques au maximum.



Figure I.3 : Vue de l'installation des deux appareils de mesure thermographique, avec le transept de la chapelle *Scrovegni* en arrière-plan

La thermographie permet aussi de détecter facilement les structures de différentes natures enfouies dans les maçonneries, en particulier sous les fresques. La prise en compte des propriétés thermiques des matériaux des échantillons offre de précieuses données concernant l'histoire et l'état de conservation du monument. L'information la plus importante concerne la profondeur des fissures, la thermographie permettant d'évaluer si le craquement ne touche que la surface, traverse l'épaisseur de la brique ou touche le mur sur toute sa largeur. La thermographie permet d'étudier de la même manière les décollements de l'enduit peint.

La surveillance du développement de la moisissure sur la surface du bâtiment et l'étude des conditions microclimatiques sont extrêmement importantes pour la maintenance. La thermographie est un outil permettant d'identifier des ponts thermiques, où la basse température en surface peut favoriser la condensation de la vapeur d'eau engendrée par les visiteurs.

La thermographie infrarouge peut enfin servir dans l'étude de la dynamique des fluides. Dans le cas de cette application, l'approche suivie ici est la mesure continue de la température en surface par cartographie. Les données peuvent ensuite être utilisées pour détecter les fuites d'air, notamment au niveau des fenêtres et des portes, afin de vérifier la parfaite étanchéité de la chapelle.

Meola *et al* [10-11] présentent quant à eux des études portant sur l'évaluation non destructive de structures. Dans un premier temps, l'étude se déroule en laboratoire sur des échantillons constitués d'une couche de plâtre et d'un support de marbre ou de brique pour simuler des structures de maçonnerie. Des poches d'air sont créées à l'intérieur des échantillons pour simuler des détachements. Meola *et al* ont utilisé la thermographie infrarouge à détection synchrone pour analyser les échantillons de laboratoire. Ils détectent les défauts et observent que les défauts sous une couche épaisse de plâtre deviennent visibles plus tard que ceux situés sous une couche de plâtre mince. Dans un second temps, des analyses *in situ* sont réalisées pour inspecter l'état d'un mur recouvert de mosaïque. L'étude a été réalisée un jour ensoleillé. Le film infrarouge a été enregistré lorsque la façade s'est retrouvée à l'ombre après plusieurs heures d'exposition au soleil. Les résultats obtenus ont prouvé que certaines parties de la mosaïque étaient en très mauvaises conditions.

D'autres travaux portant sur l'examen des structures par thermographie infrarouge ont été réalisés, notamment par N.P. Avdelidis et A. Moropoulou [12-13]. Ils démontrent l'efficacité de la thermographie infrarouge concernant l'analyse non destructive de structures historiques. Les études ont été exécutées sur les surfaces architecturales de sites historiques. Les images thermiques obtenues fournissent des informations significatives sur l'état des matériaux analysés, elles permettent l'évaluation des traitements de conservation comme la consolidation de pierre, la restauration des mortiers ou encore la détection de zones dégradées dans des mosaïques. Grinzato *et al* [14] ont inspecté l'arsenal de Venise par thermographie infrarouge. Ils l'ont utilisée pour cartographier les murs et observer ainsi les zones d'humidité ainsi que les défauts internes à la structure du bâtiment.

Ibarra-Castanedo *et al* [15] ont travaillé sur des échantillons de plus petites dimensions. Ils ont utilisé la thermographie de phase pulsée pour analyser une fresque dans laquelle ils ont inséré des défauts. Ils ont montré que leur technique est un outil intéressant pour l'évaluation qualitative et quantitative de défauts situés dans les fresques. Toujours dans le registre des échantillons de plus petites dimensions, H. Berglinda et A. Dillenz [16] ont

utilisé la thermographie infrarouge avec une excitation thermique en créneau afin de détecter les manques de colle sur des échantillons de bois multicouches. G. M. Revel et S. Rocchi [17] ont, quant à eux, utilisé la thermographie de phase pulsée pour analyser des tuiles en céramique. Ces tuiles comprennent des défauts dont on connaît la localisation et les dimensions. Des résultats satisfaisants ont été obtenus en termes de détection de défaut.

La thermographie est un outil d'évaluation puissant pour l'analyse des structures mais son champ d'application ne s'arrête pas là. En effet, elle est aussi utilisée pour la détection de moisissures et d'humidité dans différents types d'œuvres d'art telles que des panneaux en bois peints, des statues. N. P. Avdelidis *et al* [18] ont étudié la présence d'humidité dans des pierres poreuses en laboratoire et sur site. La thermographie a servi à contrôler la montée par capillarité de l'eau dans les pierres. E. Rosina *et al* [19] essayent de cartographier l'humidité des pièces d'un château par thermographie infrarouge afin de faciliter le travail de restauration des fresques.

La présence d'humidité, de moisissures et de défauts n'est pas un problème inhérent aux bâtiments et aux pierres, ainsi des chercheurs se sont penchés sur les problèmes rencontrés par le bois. N. Ludwig *et al* [20] utilisent la thermographie pour détecter l'humidité dans le bois et les plâtres. T. Toshinari [21] analyse le bois de construction par thermographie infrarouge pour évaluer son niveau de détérioration. Ce travail n'est pas évident car le bois est un matériau anisotrope, il contient des nœuds et donc des densités différentes. Cependant, T. Toshinari montre dans ses travaux que la technique est prometteuse car elle fournit de bons résultats, elle est non destructive et permet d'analyser de grandes surfaces rapidement. P. Meinlschmidt [22] applique la thermographie infrarouge au contrôle en ligne. La production et le rendement imposés par les industriels ont mené à ce choix. P. Meinlschmidt montre que la thermographie peut détecter des défauts non seulement invisibles dans des matériels à base de bois comme la particule stratifiée et des agglomérés, mais peut être utilisée aussi pour détecter des défauts dans le bois de charpente.

Les articles précédents montrent que la thermographie infrarouge est une technique performante de contrôle non destructif, sans contact qui est utilisée pour la détection de défaut, contrôler la qualité sur une ligne de production, cartographier des zones humides et/ou avec moisissures. En plus de pouvoir fournir un diagnostic qualitatif, nous allons voir que la thermographie infrarouge peut être utilisée pour caractériser les matériaux. Meola *et al* [23] emploient la thermographie modulée à détection synchrone pour différencier les matériaux via

leur angle de phase. N. Ludwig et al [24] montrent qu'il est possible d'évaluer la densité de la couche extérieure *via* une mesure d'effusivité thermique. Ceci permet de distinguer les différentes couches de finition sur des œuvres d'art. Nous verrons dans la suite de ce mémoire de thèse que la thermographie permet aussi d'estimer d'autres paramètres thermophysiques telle que la diffusivité thermique de certains matériaux.

Cette étude bibliographique non exhaustive montre l'intérêt que porte la communauté scientifique internationale pour la thermographie infrarouge appliqué au patrimoine culturel. En France, l'aptitude de la thermographie infrarouge stimulée en matière d'aide à la restauration d'œuvres d'art est étudiée par le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) depuis les années 80. Toutefois, la technique ne s'est pas vraiment implantée dans le monde des restaurateurs. Avec l'évolution des technologies et surtout la baisse du coût des instruments, un regain d'intérêt des restaurateurs est perceptible. Cela explique que l'Institut National du Patrimoine (INP) ait souhaité, avec le GRESPI/ECATHERM de Reims, développer une collaboration de recherche visant à étudier les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière d'aide à la restauration du Saint-Christophe de la collection Campana du Louvre. Cette collaboration s'est concrétisée autour du projet de Melle Gabriela Szatanik. Le « Saint-Christophe portant l'Enfant Jésus » est une œuvre florentine de la fin du XIV^e siècle, attribuée à Tommaso del Mazza de la collection Campana du Louvre (Figure I.4). Cette peinture présentait des altérations importantes de couche picturale qui conduisaient à des pertes de matière et nuisaient à la lisibilité de l'œuvre. Par ailleurs, de nombreuses interventions de restauration avaient mal vieilli et donnaient à la peinture un aspect hétérogène. Enfin des interrogations existaient sur l'état de conservation du support de la peinture. Le travail de recherche technico-scientifique mené par Gabriela Szatanik et assisté scientifiquement par M. Jean-Luc Bodnar (Université de Reims) visait à étudier les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection de ces altérations.

Avant d'étudier le Saint-Christophe, une étude préliminaire [1-25-26-27-28] a été menée sur une réplique partielle de celui-ci. Cette réplique a été réalisée selon la technique des primitifs italiens. Elle est composée d'un substrat en plâtre recouvert d'un enduit de chaux et de sable sur lequel sont déposés les pigments avant séchage. Elle représente le visage de l'enfant Jésus du Saint-Christophe. Afin de tester les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection de défauts. Cinq inclusions de plastazote ont été

introduites dans la fresque lors de sa fabrication (Figure I.5). Elles ont été positionnées comme le montre la Figure I.6 aux quatre coins de la fresque à des profondeurs différentes.

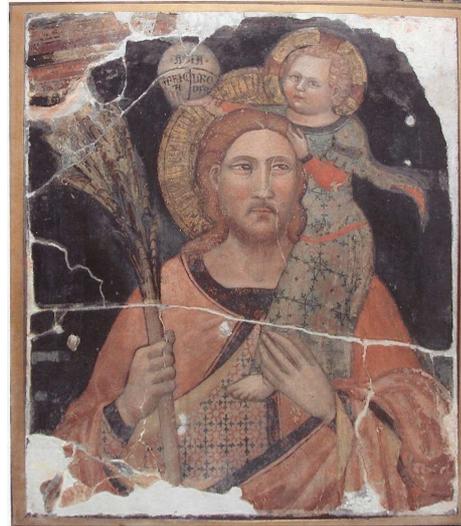


Figure I.4 : A gauche, la fresque étudiée. A droite, la fresque du Saint-Christophe

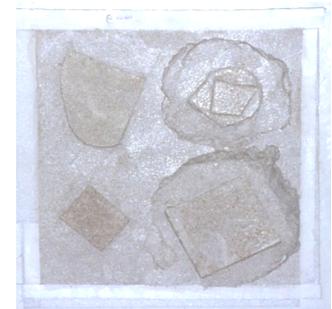
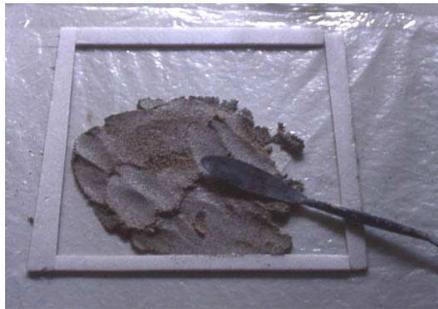


Figure I.5 : Fabrication du support de la fresque

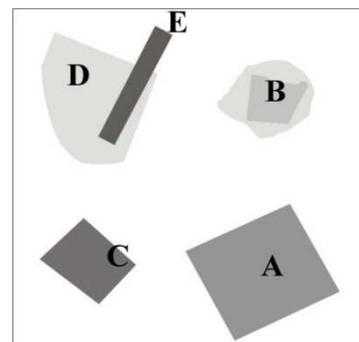


Figure I.6 : disposition des défauts dans la fresque

Le défaut A est incliné, la profondeur à laquelle il se situe varie de 3 à 10 mm, le défaut B est à une profondeur de 5 mm, les défauts C et D sont situés à une profondeur de 3 mm et le défaut E à une profondeur de 10 mm.

Cette copie a alors été analysée par thermographie infrarouge pulsée. Les conditions expérimentales retenues étaient les suivantes : La fresque a été chauffée avec une lampe infrarouge d'une puissance de 250W pendant 120 secondes (excitation créneau). L'évolution de la température superficielle a été enregistrée avec une caméra Cedip « Ondes Longues » de type JADE 2 à une fréquence de 25 images/seconde. La durée totale de l'analyse est de 300 secondes.

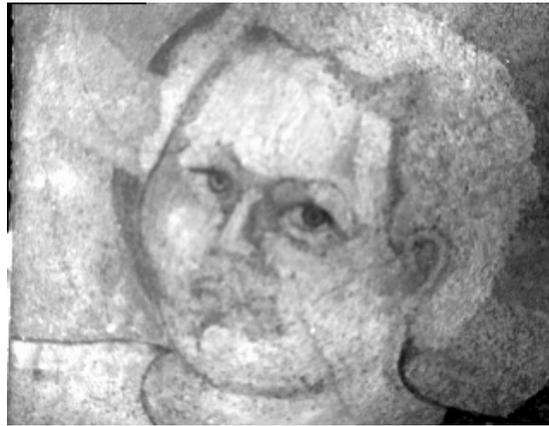


Figure I.7 : Image infrarouge de la fresque avant excitation thermique

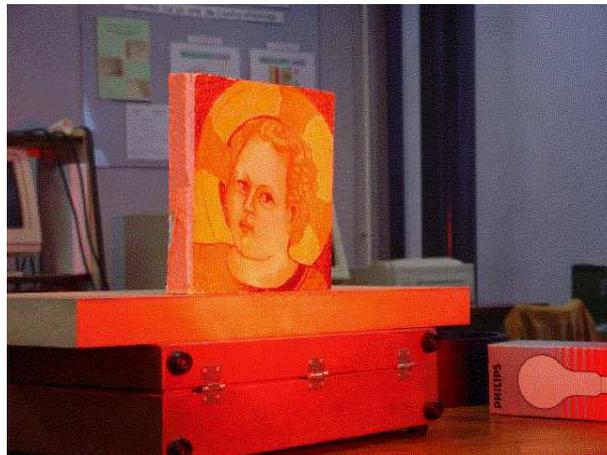


Figure I.8 : Photographie de la fresque pendant la phase de chauffage

La Figure I.9 montre le thermogramme obtenu 190 secondes après la fin de l'excitation thermique. Elle fait clairement apparaître des signaux photothermiques plus importants à l'endroit des défauts, ce qui montre les possibilités de la thermographie infrarouge stimulées en matière de détection de défauts situés dans des œuvres d'art. Par

ailleurs, cette pré-étude a permis de vérifier que la méthode était bien peu perturbatrice pour l'œuvre d'art.

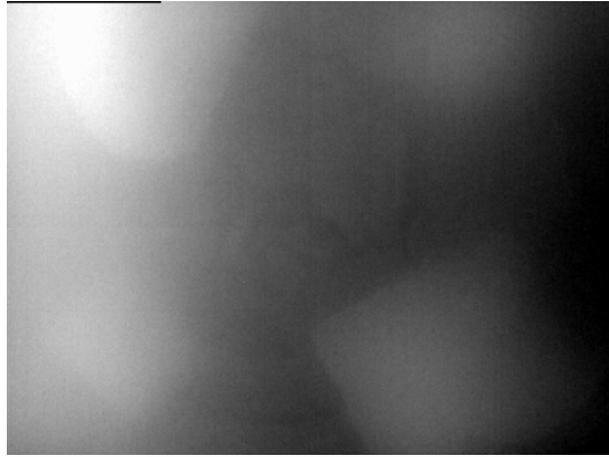


Figure I.9 : Image infrarouge de la fresque 190 secondes après la fin de l'excitation thermique

A la suite de cette pré-étude plutôt positive, l'analyse du Saint-Christophe (Figure I.10) a pu être réalisée.

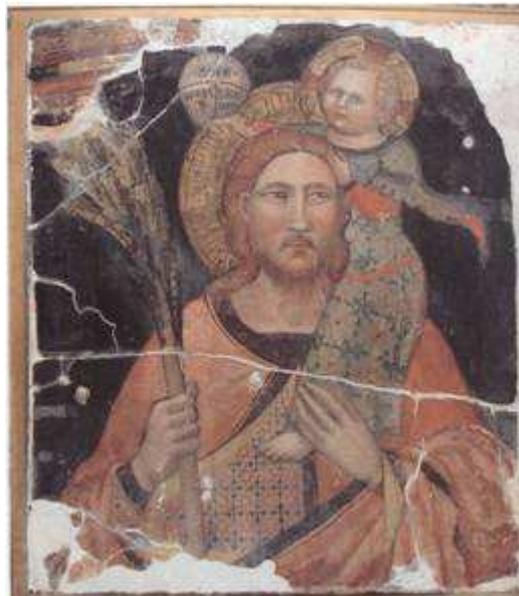


Figure I.10 : La fresque du Saint Christophe étudiée

Cette fresque a d'abord été analysée de façon acoustique par Gabriella Szatanick. Elle a ensuite été analysée par radiométrie photothermique pulsée, zone par zone, afin d'obtenir une résolution optique suffisante pour chaque image. Deux exemples de résultats obtenus

dans ce cadre sont présentés sur les Figures I.11 et I.12. Le résultat présenté sur la Figure I.11 concerne l'analyse de la zone proche de la main droite du Saint Christophe. Cette figure fait apparaître une tache rouge orangé, au niveau de la main droite du Saint Christophe, qui est caractéristique de la présence d'un défaut. Le résultat présenté sur la Figure I.12 concerne quant à lui, l'analyse de la zone proche du bâton du Saint Christophe. Cette figure fait apparaître, dans sa partie inférieure gauche, une signature photothermique plus importante, elle aussi caractéristique de la présence d'un défaut.

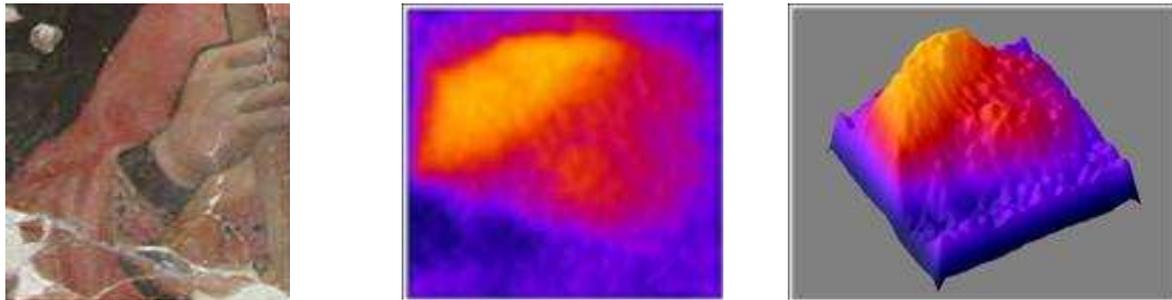


Figure I.11 : Détection d'un délaminage par radiométrie photothermique situé à côté de la main du Saint Christophe

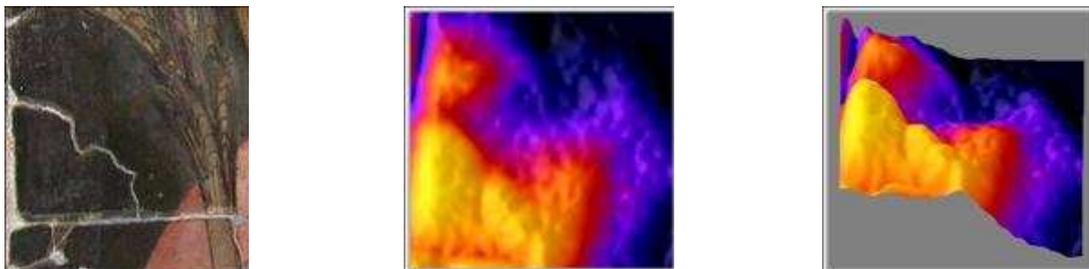


Figure I.12 : Détection d'un délaminage par radiométrie photothermique situé à côté du bâton du Saint Christophe

Dans le but de valider les résultats obtenus sur l'ensemble de la fresque à l'aide de la méthode photothermique, Gabriela Szatanik et Jean-Luc Bodnar les ont ensuite comparé à ceux obtenus par analyse acoustique (Figure I.13). Cette figure montre que les signatures caractéristiques de défauts visibles par radiométrie photothermique (zones vertes et jaunes) correspondent à des zones de décollement détectées par la méthode acoustique (zones grises), ce qui confirme les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière d'aide à la restauration d'œuvre d'art. Comme l'indiquaient Gabriela Szatanik et Jean-Luc Bodnar, cette étude demandait à être confirmée *via* l'étude d'autres peintures murales et complétée *via* l'étude d'autres types d'œuvres d'art ou la caractérisation dimensionnelle des défauts. Ceci

précise ainsi le sujet de cette thèse. L'analyse photothermique semble donc ouvrir la voie à une caractérisation dimensionnelle des défauts, difficile par voie acoustique. Enfin, nous avons vérifié que l'acquisition d'informations par radiométrie photothermique est effectivement bien plus rapide et certainement plus objective que l'analyse acoustique.

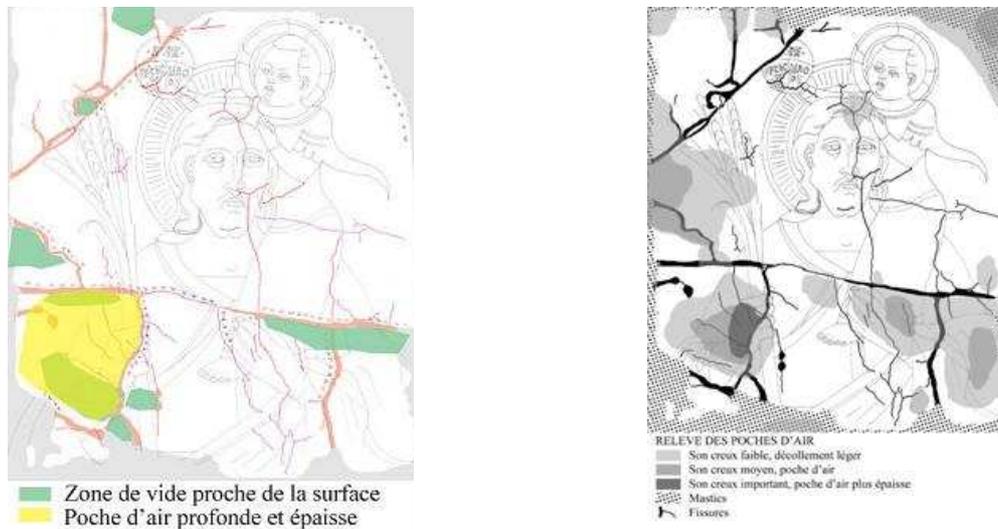


Figure I.13 : Comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus lors de l'analyse photothermique (à gauche) et acoustique (à droite) du Saint Christophe

II- Principe de la thermographie infrarouge stimulée

Dans le domaine du contrôle non destructif, deux méthodologies de thermographie sont utilisées : la thermographie active et la thermographie passive [2]. La thermographie passive est utilisée pour contrôler les matériaux et structure qui sont naturellement à une température différente de la température ambiante, alors que dans le cas de la thermographie active, il est nécessaire de recourir à une excitation externe afin de produire un contraste thermique significatif. La thermographie infrarouge stimulée consiste à chauffer la surface du matériau inspecté au moyen d'une source lumineuse (ou autre) et à observer l'élévation de température résultante à l'aide d'une caméra infrarouge (Figure I.14). La présence d'un défaut se manifeste localement sur les images de thermographie par un retour anormalement lent à la température ambiante.

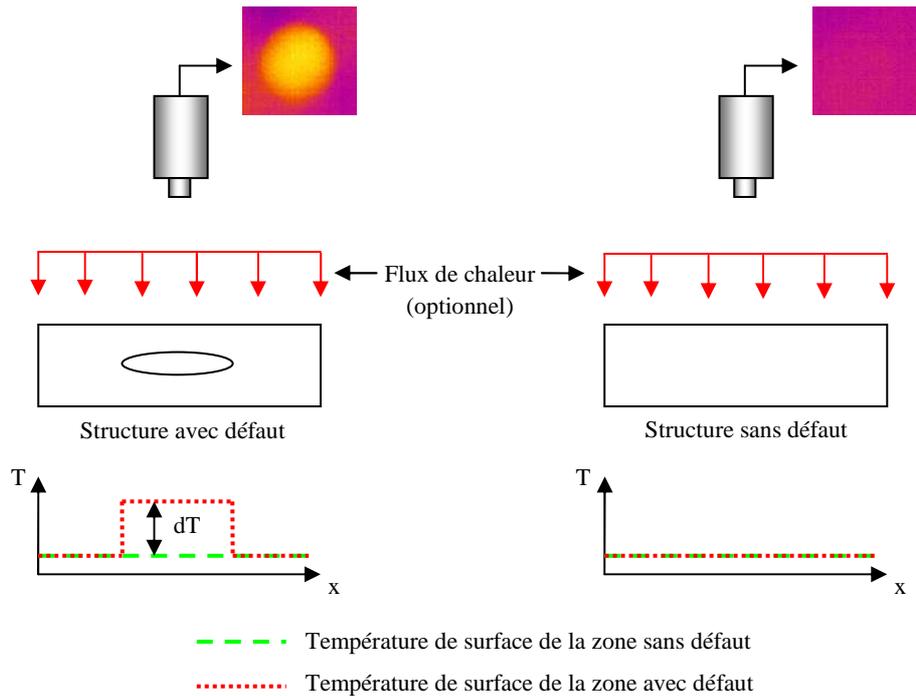


Figure I.14 : Principe de la détection de défaut par thermographie infrarouge active

Comme chaque technique de contrôle non destructif, la thermographie a ses avantages et ses inconvénients : les principaux avantages sont une inspection pouvant être rapide, un contrôle non destructif sans contact, à distance et enfin l'obtention de résultats objectifs. Les principaux inconvénients de cette technique sont : la difficulté de déposer uniformément l'énergie sur une large surface, les effets des pertes thermiques qui perturbent le contraste, les inconnues sur le paramètre d'émissivité de surface.

Dans les études que nous avons menées, nous avons utilisé la thermographie infrarouge stimulée. Nous avons été confrontés aux mêmes problèmes cités précédemment, nous verrons dans la suite de ce document comment nous avons pu nous en affranchir en partie.

En ce qui concerne l'excitation, plusieurs modes sont possibles. Les méthodes les plus classiques sont l'excitation pulsée (flash ou créneau) ou l'excitation sinusoïdale. L'excitation aléatoire déjà mise en œuvre en analyse ponctuelle - mais jamais pour des analyses étendues - présente aussi, de part ses aptitudes de travail sous contrainte énergétique moindre, un intérêt potentiel pour l'aide à la restauration d'œuvres d'art du patrimoine.

Dans notre étude, nous avons choisi de mettre en œuvre une excitation pulsée classique et d'étudier les possibilités d'une excitation aléatoire afin de permettre éventuellement de travailler sous contrainte énergétique.

II-1- Principe général de la radiométrie photothermique

Le principe de cette technique est relativement simple. Il consiste à soumettre l'échantillon à analyser à un flux lumineux dont l'absorption produit une élévation locale de température au voisinage du point d'impact du faisceau, puis à observer les variations d'émissions du matériau à l'aide d'une chaîne de détection optique infrarouge. Les phénomènes thermophysiques mis principalement en œuvre par cette méthode de contrôle sont la conduction et le rayonnement thermique. Le signal photothermique recueilli par le radiomètre infrarouge dépend donc des paramètres gouvernant ces phénomènes physiques (conductivité thermique, diffusivité thermique, émissivité, température, chaleur spécifique, masse volumique,...), mais aussi de tous les paramètres pouvant être corrélés à ces derniers (aspect de surface, présence de délaminage, présence de fissure, structure interne du matériau, avancement d'une transformation physico-chimique, séchage, sédimentation, épaisseur d'une couche de revêtement,...). La radiométrie photothermique offre alors aux ingénieurs un nouveau moyen de caractérisation de ces différents paramètres.

Cette méthode est, de par son principe même, non destructive, sans contact, modulable, facilement personnalisable en fonction des besoins et enfin elle permet l'étude dans la profondeur des matériaux sur environ les 100 premiers micromètres (ce qui n'est pas toujours possible avec les autres méthodes de contrôle non destructif). La méthode est limitée à l'étude des matériaux minces (jusqu'à quelques centimètres d'épaisseur) et elle peut être dépendante des propriétés radiatives de la surface.

II-2- Principe de l'analyse pulsée

Le principe de la thermographie pulsée s'apparente à la méthode « Flash » [3]. Il consiste à chauffer brièvement l'échantillon à analyser à l'aide d'un créneau d'énergie et à enregistrer la réponse photothermique obtenue.

Plusieurs configurations géométriques d'excitation thermique sont possibles, on peut réaliser une excitation ponctuelle (laser) ou étendue (lampe halogène, lampe flash...), les détections peuvent être faites en « face avant » (la source thermique et le détecteur sont situés

du même côté de l'échantillon) ou en « face arrière » (la source thermique et le détecteur sont situés de chaque côté de l'échantillon).

II-3- Principe de l'analyse aléatoire

Le principe classique de l'analyse aléatoire consiste à exciter le matériau à étudier à l'aide d'une excitation s'approchant d'un bruit blanc, puis à reconstruire la réponse impulsionnelle et/ou la réponse harmonique de l'échantillon par une analyse corrélatoire, simple ou complexe [4], ou par une analyse paramétrique [5], de la réponse photothermique obtenue. Elle offre à l'expérimentateur trois types de signaux à analyser : la réponse photothermique brute, la réponse impulsionnelle et la réponse harmonique multifréquentielle. Elle offre alors surtout la possibilité de travailler sous contrainte énergétique moindre.

II-3-1 Principe de la création d'un bruit blanc

Tant pour l'analyse corrélatoire que pour l'analyse paramétrique, il est nécessaire de mettre en œuvre un signal d'excitation ayant des caractéristiques proches de celles d'un bruit blanc théorique, c'est à dire un produit d'autocorrélation s'approchant d'une fonction delta de Dirac (Figure I.15) et un spectre parfaitement plat (Figure I.16). Ces caractéristiques permettent en effet pour la première de simplifier le calcul de corrélation lors d'une analyse corrélatoire et pour la seconde de bâtir un modèle de comportement le plus fin possible, lors de l'analyse paramétrique.

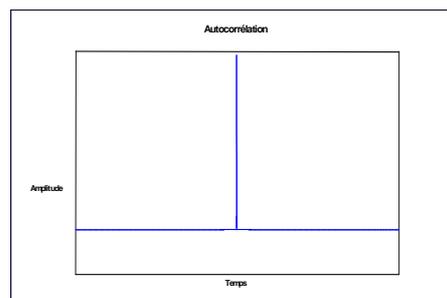


Figure I.15 : Auto corrélation du bruit blanc théorique

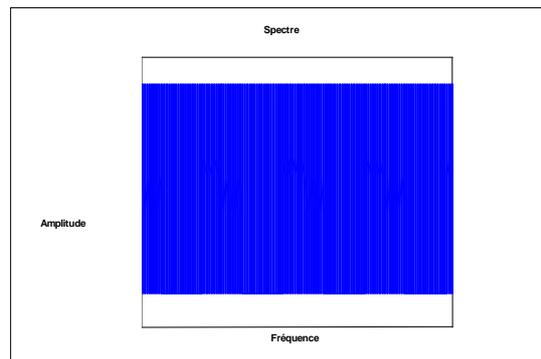


Figure I.16 : Spectre du bruit blanc théorique

Pour cela, nous utilisons une des procédures de construction de bruit blanc proposées par J. Auvray [6]. Examinons plus en détail celle concernant la construction d'un signal binaire pseudo aléatoire.

Cette procédure de construction de séquences binaires pseudo aléatoires consiste à recueillir le signal délivré à la sortie d'un registre à décalage composé de bascule D, bouclé sur lui-même via une addition modulo 2 (Figure I.4) ; les sorties des bascules D prises en compte au cours de cette addition étant celles définies par le polynôme primitif dont le degré détermine la façon dont le câblage est disposé et détermine le nombre de termes de la séquence générée. Pour un polynôme de degré n , la longueur de la séquence est $2^n - 1$. Ce polynôme primitif (défini dans $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$) est associé à la procédure de création (Figure I.18).

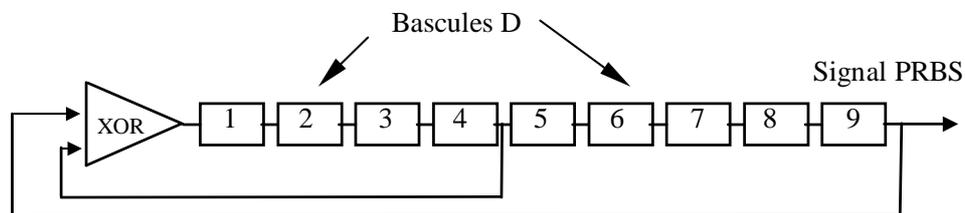


Figure I.17 : Principe de la génération d'une séquence binaire pseudo-aléatoire

Degré	Polynôme primitif sur $Z/2Z$
2	$x^2 + x + 1$
3	$x^3 + x^2 + 1$
4	$x^4 + x + 1$
5	$x^5 + x^2 + 1$
6	$x^6 + x + 1$
7	$x^7 + x^3 + 1$
8	$x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
10	$x^{10} + x^3 + 1$
12	$x^{12} + x^6 + x^3 + x + 1$

Figure I.18 : Table de polynômes primitifs utilisables pour générer une séquence binaire pseudo-aléatoire

Un exemple de signal binaire pseudo-aléatoire est présenté sur la Figure I.19.

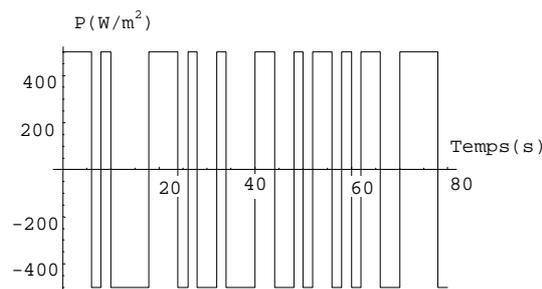


Figure I.19 : Exemple de séquence binaire pseudo-aléatoire

L'autocorrélation de ce type de signal est, comme dans le cas du bruit blanc, proche d'une fonction delta de Dirac (Figure I.20). Il peut donc être mis en œuvre pour les analyses corrélatoires. Son spectre ne peut par contre, être assimilé à celui d'un bruit blanc que pour les fréquences comprises dans son premier lobe. C'est donc dans cette bande de fréquence que ce type de signal pourra être utilisé pour l'analyse paramétrique. Enfin on notera que les signaux binaires pseudo aléatoires sont très simples à construire et à mettre en œuvre et que, surtout, ce sont ceux qui engendrent le moins de contraintes thermiques. Cela explique le choix de leur mise en œuvre.

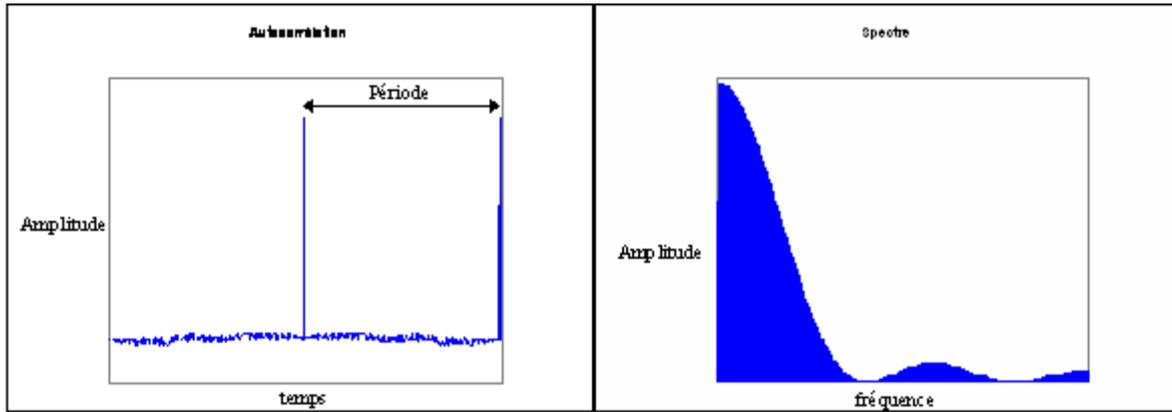


Figure I.20 : Auto Corrélation et spectre d'une séquence binaire pseudo aléatoire

II-3-2- Principe de l'analyse corrélatrice

II-3-2-1- Principe de l'analyse corrélatrice simple

L'analyse corrélatrice simple est un mode d'analyse purement statistique. Elle consiste à identifier la réponse impulsionnelle du matériau étudié à partir du produit d'intercorrélation calculé entre la réponse du système étudié $s(t)$ et la séquence d'excitation $e(t)$ utilisée (Figure I.21).

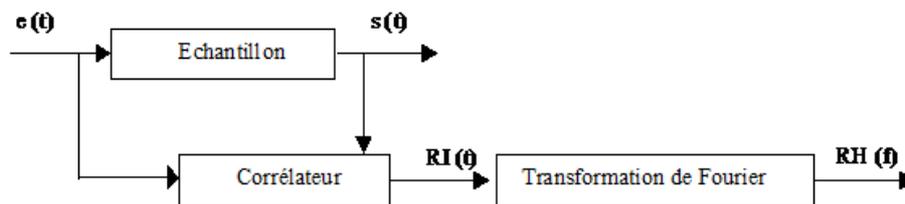


Figure I.21 : Principe d'une analyse corrélatrice

En effet, si cette dernière s'approche d'un bruit blanc, son autocorrélation est très proche d'une fonction delta de Dirac et donc la réponse impulsionnelle recherchée est directement égale, à la variance du bruit près, au produit d'intercorrélation évoqué ci dessus.

$$RI(t) = [s(t) \odot e(t)] \sigma^2(t)$$

La réponse harmonique photothermique multifréquentielle du matériau est ensuite calculée par transformée de Fourier de cette réponse impulsionnelle

$$RH(f) = TF [RI(t)]$$

II-3-2-2- Principe de l'analyse corrélatoire « complexe »

Une variante à l'analyse corrélatoire "simple" est l'analyse corrélatoire "complexe". Cette technique fait appel aux notions d'inter spectre et d'auto spectre, pour corriger en partie les imperfections temporelles et spectrales du signal d'excitation (qui doit être le plus proche possible du bruit blanc théorique). Elle consiste à déduire la réponse impulsionnelle recherchée à partir de la transformée de Fourier inverse du rapport entre le produit d'inter spectre entre la transformée de Fourier de la réponse du système étudié $S(F)$ par la transformée de Fourier du signal d'excitation $E(F)$, et le produit d'autospectre de cette même sollicitation.

$$RI(t) = TF^{-1} [(S(F).E(F)) / (E(F).E(F))]$$

Notons enfin que comme précédemment, la méthode permet une analyse harmonique multifréquentielle, par l'intermédiaire du calcul de la transformée de Fourier, de la réponse impulsionnelle identifiée

$$RH(f) = TF [RI(t)].$$

Dans notre étude, c'est plutôt cette variante d'analyse corrélatoire, plus performante, que nous avons mise en œuvre

II-3-3- Principe de l'analyse paramétrique

La seconde technique d'identification de système que nous avons utilisée est l'analyse paramétrique : le principe de cette méthode consiste à reconstruire théoriquement les réponses impulsionnelle et harmonique du système physique étudié, à partir d'un modèle de comportement paramétrique de ce dernier. Ce modèle est bâti à partir de l'analyse de la réponse photothermique de l'échantillon étudié face à une sollicitation énergétique la plus blanche possible (plus la séquence d'excitation contiendra de fréquences, plus la réponse

photothermique contiendra d'informations et donc plus le modèle de comportement sera fin) (Figure I.22).

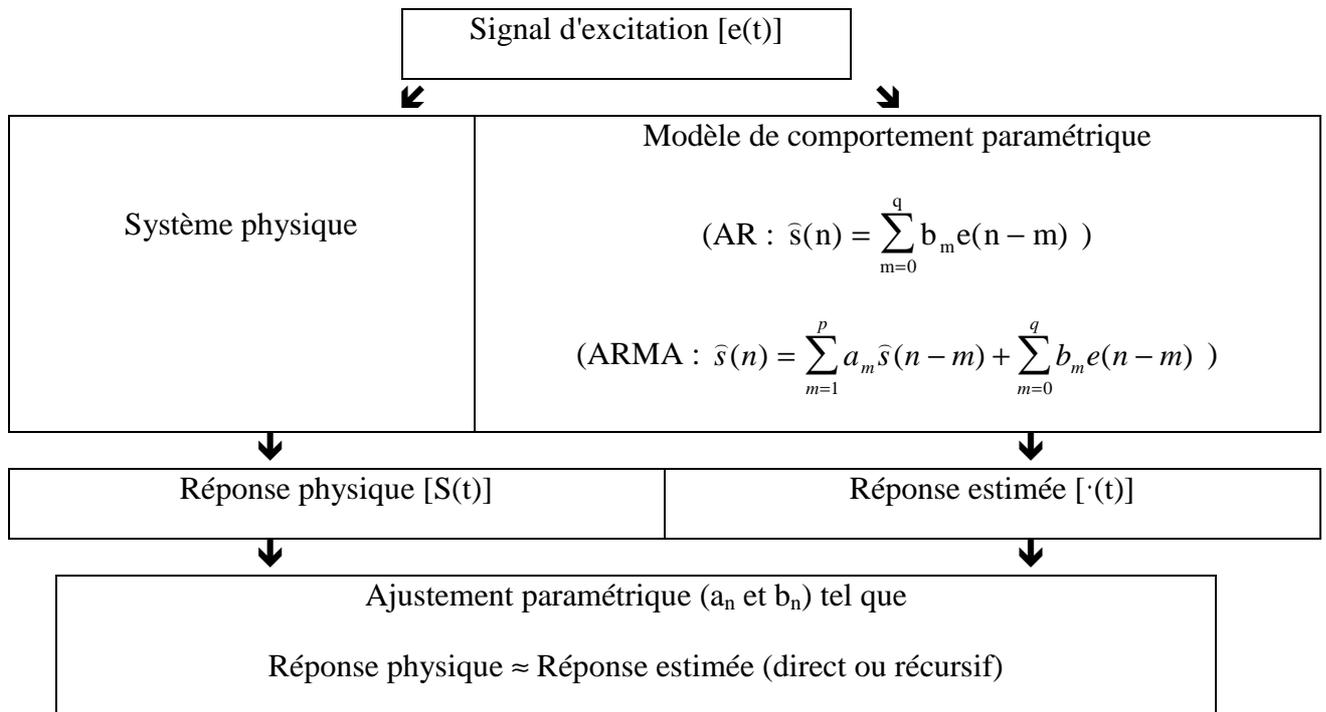
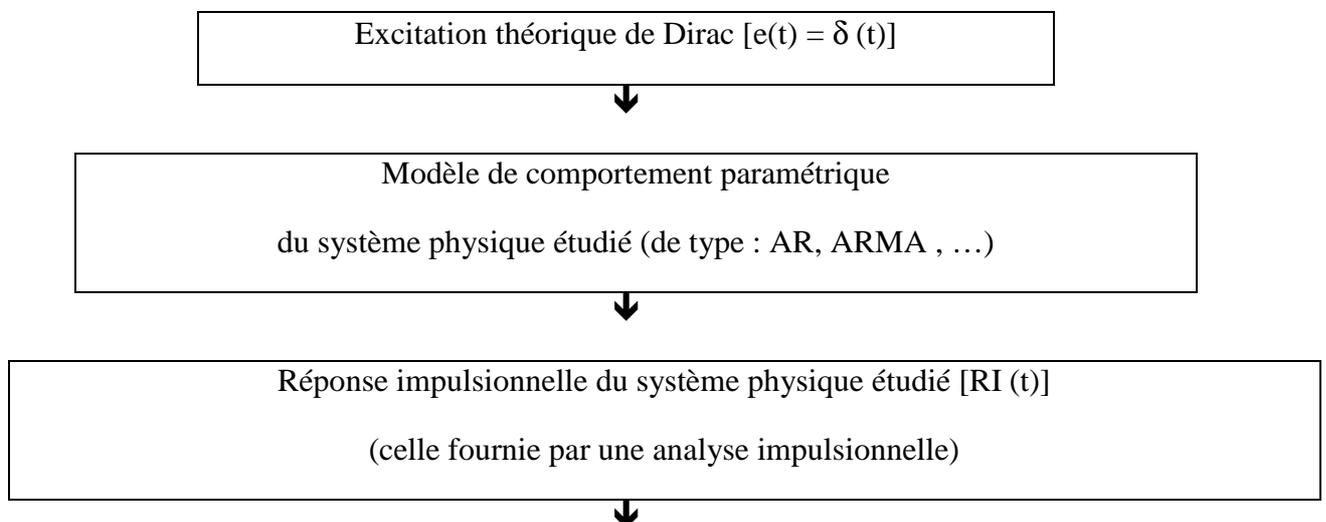


Figure I.22 : Principe de la construction d'un modèle de comportement par analyse paramétrique

La construction de la réponse impulsionnelle se fait alors en calculant la réponse du modèle de comportement face à une impulsion de Dirac. La construction de la réponse harmonique se fait, quant à elle, en calculant la transformée de Fourier de cette réponse impulsionnelle (Figure I.23).



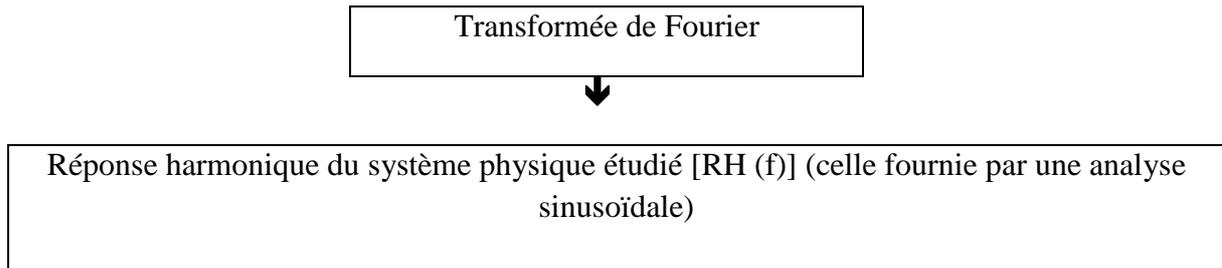


Figure I.23 : Principe de l'identification paramétrique d'un système physique

II-3-3-1- Les modèles paramétriques utilisables

Parmi tous les types de modèles de comportement d'emploi possible en analyse paramétrique, deux sont plus particulièrement mis en œuvre pour l'identification de systèmes physiques. Le premier, qui est aussi le plus connu et le plus utilisé, est le modèle à moyenne ajustée (modèle MA) ou modèle convolutif. Il considère que le signal de sortie du filtre, auquel est assimilé le système physique à identifier, est lié de façon linéaire aux différents états antérieurs du signal d'entrée du filtre ainsi qu'aux différents paramètres intrinsèques au filtre :

$$\widehat{s}(n) = \sum_{m=0}^q b_m e(n-m)$$

Le second est le modèle Auto Régressif à Moyenne Ajustée (modèle ARMA). Il considère quant à lui que le signal de sortie du filtre électronique, auquel est assimilé le système physique à identifier, est lié de façon linéaire aux différents états du signal d'entrée du filtre, aux différents paramètres intrinsèques du filtre, mais aussi aux différents états antérieurs du signal de sortie lui-même.

$$\widehat{s}(n) = \sum_{m=1}^p a_m \widehat{s}(n-m) + \sum_{m=0}^q b_m e(n-m)$$

Il est donc plus complet que le modèle convolutif, puisque pouvant prendre en compte une éventuelle rémanence du signal de sortie. C'est donc celui-ci que nous avons utilisé dans notre thèse.

III- Mesure de diffusivité

Souhaitant, dans notre étude, aboutir à la caractérisation dimensionnelle d'éventuels défauts présents dans les peintures murales, nous aurons à alimenter la technique de mesure de profondeur par les propriétés thermophysiques de la peinture murale étudiée. Cela explique pourquoi nous avons aussi développé une étude bibliographique visant à faire le point les techniques de mesure de diffusivité thermique utilisables.

Après avoir rappelé le principe de la technique « historique » de Parker, nous présentons le principe de la méthode flash face arrière qui nous servira à calibrer nos échantillons étalons et la méthode par transformées intégrales face arrière de laquelle dérive la technique de mesure que nous avons mise en œuvre dans cette thèse.

III-1- Méthodes flash classiques

III-1-1- Principe de la méthode « historique » de Parker face avant

La méthode « historique » de Parker date de 1961 [3]. Elle consiste à soumettre l'échantillon à analyser à une impulsion lumineuse la plus intense et la plus courte possible (idéalement une fonction delta de Dirac), puis à déduire la diffusivité thermique recherchée de l'évolution temporelle de la température surfacique de l'échantillon analysé. Deux variantes de mesure existent : la mesure de température peut être effectuée du côté de l'excitation, on parlera alors d'analyse « face avant » ; elle peut être aussi effectuée du côté opposé à l'excitation, on parlera alors d'analyse « face arrière ». Dans tous les cas, pour aboutir au paramètre diffusivité thermique, Parker *et al*, considèrent le modèle thermique de l'expérience le plus simple possible : 1D, adiabatique. En face avant, le modèle conduit à une expression de l'évolution de la température qui s'écrit :

$$T(0, t) = T_m \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 a t}{L^2} \right) \right]$$

Et à des équations asymptotiques qui s'écrivent :

$$\text{Aux temps courts : } T(0, t) = \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}} \quad (1)$$

$$\text{Aux temps longs : } T_{lim} = \frac{Q}{\rho C e} \quad (2)$$

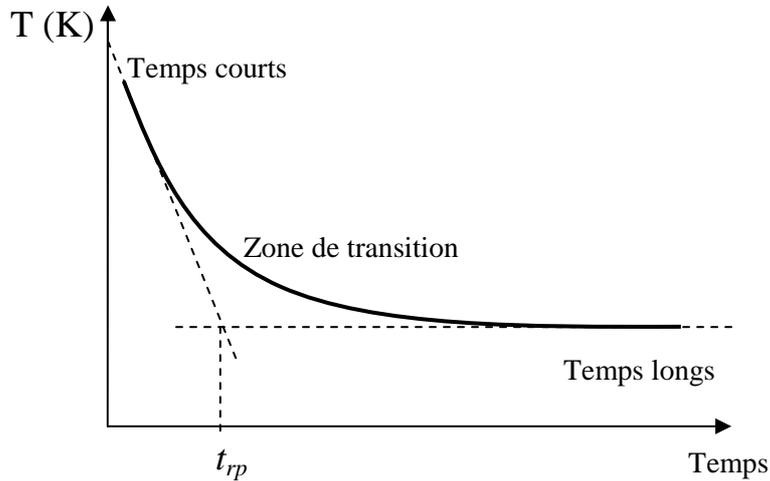


Figure I.24 : temps de rupture de pente

Parker *et al* proposent alors de déterminer la diffusivité thermique recherchée à partir du temps d'intersection de ces deux asymptotes :

$$a = \frac{e^2}{\pi \cdot t_{rp}}$$

(Avec t_{rp} : temps de rupture de pente ou temps de Parker)

III-1-2- Principe de la méthode flash de Parker face arrière

La modélisation de l'analyse flash face arrière conduit à l'équation suivante :

$$T(e, t) = \frac{Q}{\rho C e} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2 a t}{e^2} \right) \right]$$

La procédure « historique » de Parker consiste alors à déterminer la diffusivité thermique recherchée à partir du temps de demi-montée de la température.

$$a = \frac{1,38 L^2}{\pi^2 t_{1/2}}$$

Le principal inconvénient de ces techniques historiques est de ne pas prendre en compte les pertes thermiques auxquelles est soumis l'échantillon durant l'analyse. Aujourd'hui, par exemple, la méthode des quadripôles thermiques [29] permet de résoudre l'équation de la chaleur prenant en compte ces pertes. Appliquée au cas d'étude précédent, cette méthode conduit aux expressions de températures suivantes :

$$\theta_{face\ avant}(p) = \frac{(A + hSB)Q}{C + 2hSA + (hS)^2B} = \frac{Q \left(\text{Cosh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + hS \frac{\text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}} \text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + 2hS \text{Cosh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + (hS)^2 \frac{\text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}}}}$$

$$\theta_{face\ arri\ere}(p) = \frac{Q}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}} \text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + 2hS \text{Cosh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + (hS)^2 \frac{\text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}}}}$$

La détermination du paramètre diffusivité thermique se fait alors par ajustement théorie/expérience à l'aide de techniques inverses de type Levenberg-Marquardt.

III-2- Mesure de diffusivité thermique longitudinale par thermographie infrarouge

Une autre approche pour aboutir à la mesure du paramètre diffusivité thermique consiste à faire une mesure longitudinale (dans le champ) et non plus transverse. Dans le cas d'une excitation non uniforme, uniquement concentrée sur un des bords de l'échantillon ou effectuée grâce à un balayage au cours du temps, il est possible d'accéder à des propriétés du matériau dans le sens longitudinal. Philippi [30] puis Krapez [31] ont développé des méthodes

pour mesurer la diffusivité thermique de matériaux composites anisotropes. B. Remy *et al* [32] ont repris la méthode développée par Philippi et l'ont complétée. Ils proposent (de soumettre la face avant d'un échantillon anisotrope à une excitation impulsionnelle de forme quelconque en espace. Une caméra infrarouge observe la face arrière de l'échantillon et mesure le champ de température. A partir de son évolution temporelle, B. Remy *et al* remontent aux propriétés thermiques du matériau selon ses directions d'anisotropie. Pour déterminer le champ de température, ils utilisent une transformation intégrale, c'est-à-dire une transformée de Laplace en temps et une transformée de Fourier en espace. Ils appliquent alors cette transformation intégrale à l'équation de la chaleur et aux conditions aux limites. Ils montrent alors théoriquement et expérimentalement la possibilité de mesurer la diffusivité thermique longitudinale à partir de l'étude de l'évolution temporelle des rapports des coefficients de Fourier.

IV- Approche de la mesure de la profondeur à laquelle se situe le défaut

Comme nous l'avons montré précédemment, l'objectif de ce travail de thèse était d'essayer de détecter mais aussi de caractériser un éventuel défaut de déplacement situé dans une œuvre d'art. Dans ce but, nous avons là aussi consulté les travaux proposés par la communauté scientifique pour aboutir à la mesure de profondeur de défaut. Deux méthodes sont alors classiquement utilisés ; La méthode du temps de maximum de contraste et la méthode de détection précoce [33-34-35]. Les deux méthodes sont basées sur le fait qu'un défaut interne ralentit le refroidissement d'un échantillon d'autant plus tôt que ce défaut est proche de la surface (Figure I.25 et I.26).

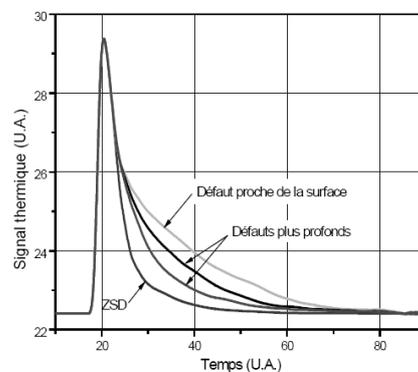


Figure I.25 : Evolution de la température pour différents défauts dans un matériau

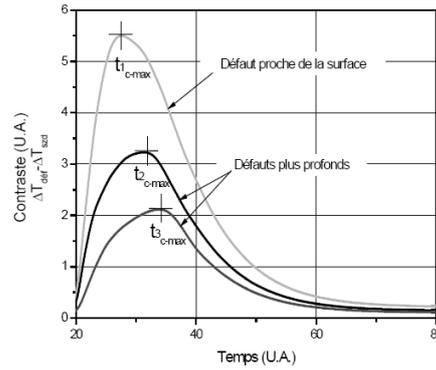


Figure I.26 : Evolution du contraste pour différents défauts dans un matériau

La méthode du maximum de contraste consiste alors à tirer la profondeur du défaut à partir de la formule :

$$P = \sqrt{t_{\max \text{ contraste}} \cdot a}$$

Selon ses auteurs cette méthode donne une bonne approximation de la profondeur à laquelle se situe le défaut. Toutefois, elle peut souffrir d'imprécision pour l'étude de défauts profonds pour lesquels l'hypothèse d'un modèle à une dimension peut être trop restrictive.

La méthode du contraste naissant consiste ici à tirer la profondeur à laquelle se situe le défaut à partir du contraste *naissant*, c'est-à-dire le premier instant pour lequel les réponses obtenues sur une partie saine de l'échantillon et à l'aplomb du défaut sont différentes. Comme ce temps peut être très court, l'hypothèse du modèle une dimension peut être conservée plus facilement que dans la technique du maximum de contraste. La profondeur recherchée est alors donnée par la formule suivante :

$$p = \sqrt{t_0 a \ln\left(\frac{2}{DT}\right)}$$

où p est la profondeur du défaut, DT le seuil de détection, t_0 le temps où le seuil de détection est atteint et a la diffusivité thermique du matériau.

Enfin, d'autres auteurs utilisent des ajustements théorie/expérience pour aboutir à la mesure de profondeur à laquelle se situe le défaut.

V- Conclusion

Ce premier chapitre a été consacré à l'étude bibliographique.

Dans le premier paragraphe, nous avons présenté le principe de la thermographie infrarouge stimulée, le principe de la radiométrie photothermique et deux différents modes de mises en œuvre (analyse sous excitation pulsée ou aléatoire).

Dans le second paragraphe, nous avons présenté la thermographie infrarouge et ses applications dans le domaine des œuvres d'art. Nous avons présenté dans un premier temps les problèmes de conservation que peuvent rencontrer les œuvres d'art, et dans un deuxième temps les travaux qui ont été réalisés par la communauté scientifique dans ce domaine à l'aide de cette technique. Le travail de Grinzato *et al*, sur la chapelle *Scrovegni* décrit à notre sens la plupart des travaux et applications de la thermographie infrarouge appliquée aux œuvres d'art.

Dans le troisième paragraphe, nous avons présenté des techniques de mesure de diffusivité thermique. Tout d'abord, nous avons présenté la méthode flash historique de Parker, puis une méthode faisant appel à un ajustement théorie/expérience en mettant en œuvre les quadripôles thermiques pour résoudre l'équation de la chaleur. Nous avons enfin présenté une méthode de champ face arrière intéressante de par son évolution possible vers une méthode d'analyse face avant utilisable *in situ*.

Dans le dernier paragraphe nous avons présenté trois méthodes de mesure de profondeur à laquelle se situe un défaut : la méthode du temps de maximum de contraste, la méthode de détection précoce et enfin la méthode utilisant un ajustement théorie/expérience.

CHAPITRE II : APPROCHE DE LA DETECTION DE DEFAUTS SITUES DANS LES ŒUVRES D'ART PAR THERMOGRAPHIE INFRA-ROUGE STIMULEE

Après l'étude bibliographique, nous abordons l'étude des possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection de défauts situés dans les œuvres d'art. Tout d'abord, il fallait développer un dispositif expérimental permettant ces analyses. Sa présentation fait l'objet de la première partie de ce chapitre.

Ensuite, nous avons testé la méthode photothermique (pulsée et aléatoire) sur une peinture murale académique (réplique partielle de fresque). Cela nous a permis de vérifier la faisabilité de la méthode, de nous familiariser avec les différents réglages expérimentaux et enfin de proposer différents outils de post-traitement et d'aide à la décision. Ce travail est proposé en seconde partie de ce chapitre.

Puis, dans une troisième étape, nous avons ouvert l'étude à l'analyse d'autres types d'œuvres d'art que des peintures murales.

Enfin, la dernière partie du chapitre est consacrée aux résultats obtenus à l'occasion d'analyses *in situ* de peintures murales.

I- Le Système d'Analyse des Matériaux Minces par Thermographie InfraRouge développé pour l'étude

Afin de développer une étude des possibilités de la thermographie infrarouge stimulée, sous excitation pulsée ou aléatoire, en matière de détection de défauts situés dans des œuvres d'art, nous avons développé un système complet d'analyse : il s'agit du Système d'Analyse des Matériaux Minces par THERMOGRAPHIE INFRA-ROUGE (Figure II.1). Examinons en détail ce système. SAMMTHIR est d'abord composé d'une source d'excitation radiative classique (lampe halogène, radiant de chantier ou autre). Cette source d'excitation est pilotée électroniquement et peut délivrer aussi bien une excitation flash ou créneau qu'une excitation

pseudo aléatoire (PRBS, Gaussien ou sweep). SAMMTHIR est ensuite composé d'une caméra de thermographie infrarouge classique, fonctionnant de façon synchrone avec l'excitation, à une cadence contrôlée informatiquement. Dans le cas d'une analyse aléatoire, la reconstruction par analyse corrélatoire ou paramétrique des réponses impulsionnelles et harmoniques multi fréquentielles est effectuée en post traitement des séquences d'excitation et de réponses infrarouges. Enfin, un module de dépouillement des résultats complète le tout (image 3D, tracé de profils, temps de vol, contraste,...).

Au cours de la thèse, SAMMTHIR a évolué. Au début, il fut développé autour d'une caméra à balayage Agema 780. En milieu de thèse, il a été modifié afin de mettre en œuvre une caméra à matrice de bolomètre A20 de chez Flir Systems. Dans ce mémoire, nous nous limiterons à présenter cette dernière version du système. Examinons en ensemble les différents éléments.



Figure II.1 : Dispositif expérimental développé pour l'étude

I-1- Pilotage de l'excitation

Le pilotage de l'excitation se fait *via* un logiciel développé au laboratoire durant la thèse (Figure II.2). Il utilise le progiciel Labview. Associé à une électronique de commande basée sur l'utilisation d'un relais statique (Figure II.3), il permet la création de tout type de signaux d'excitation : pulsé, prbs... . Les paramètres des réglages pris en compte sont le type du signal d'excitation, son amplitude ainsi que la fréquence d'excitation.

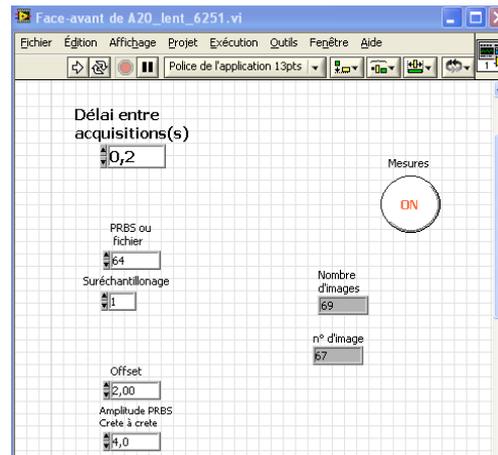


Figure II.2 : interface du logiciel développé pour l'étude

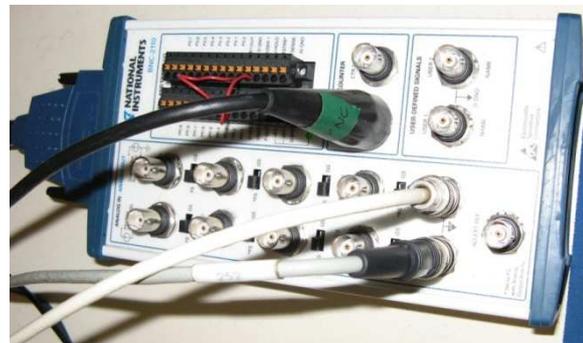


Figure II.3 : Boîtier de commande et boîtier d'asservissement de tout type de source lumineuse alimentée par une tension de 220V

I-2- La chaîne optique de détection

Afin de rendre SAMMTHIR le plus convivial mais aussi le plus universel possible, nous avons décidé d'utiliser tels quels la caméra de thermographie infrarouge A20 et le logiciel Thermacam Researcher développé par Flir Systems (Figure II.4). Nous bénéficions donc de toute la panoplie de commande et de dépouillement apportée par ce progiciel. Afin de synchroniser la détection avec l'excitation lumineuse, la caméra fonctionne toutefois en maître/esclave avec le signal d'excitation.

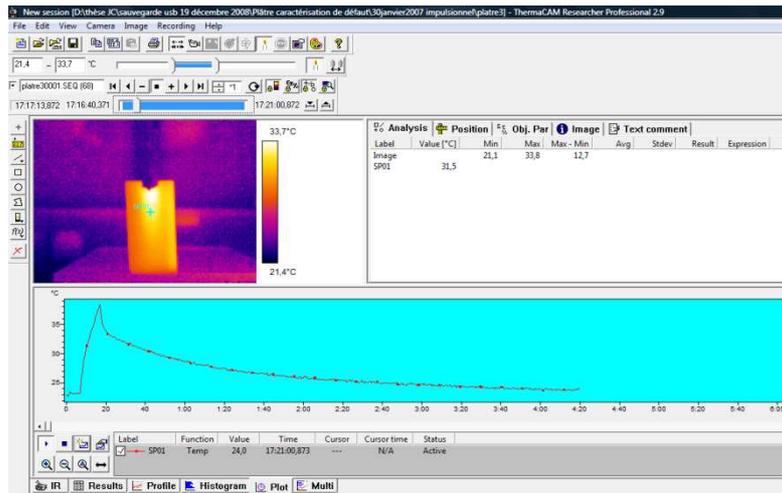


Figure II.4 : Logiciel Thermacam Researcher

I-3- Logiciel de post-traitement développé pour l'étude

Malgré l'offre de post-traitement offerte par le progiciel Thermacam Researcher, il manquait bien sûr à ce programme des modules de dépouillement propres à une analyse photothermique. Examinons maintenant les outils informatiques de post-traitement développés pour l'étude : sur la Figure II.5, nous présentons dans un premier temps le panneau de commande de ce logiciel de traitement. Ce dernier fait apparaître différents menus déroulants (jaune) ainsi que différents types de présentations des résultats obtenus. Il montre d'autre part la possibilité de traiter des films issus de différents types de caméra infrarouge.

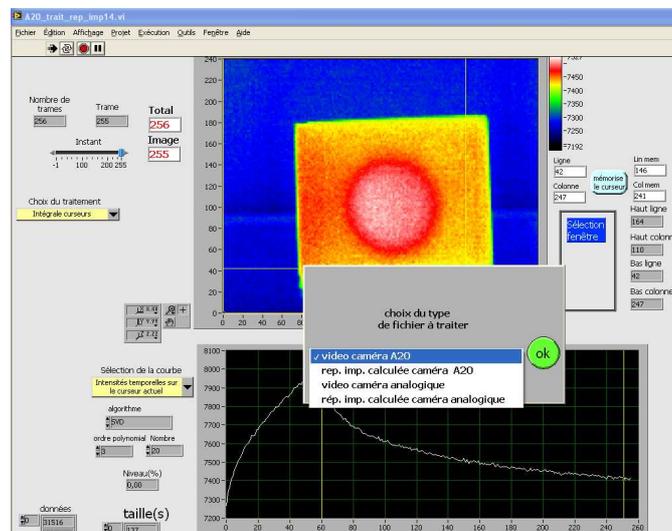


Figure II.5 : Interface logiciel

Examinons point par point les possibilités et le mode de fonctionnement de ce logiciel de traitement (Figure II.6).

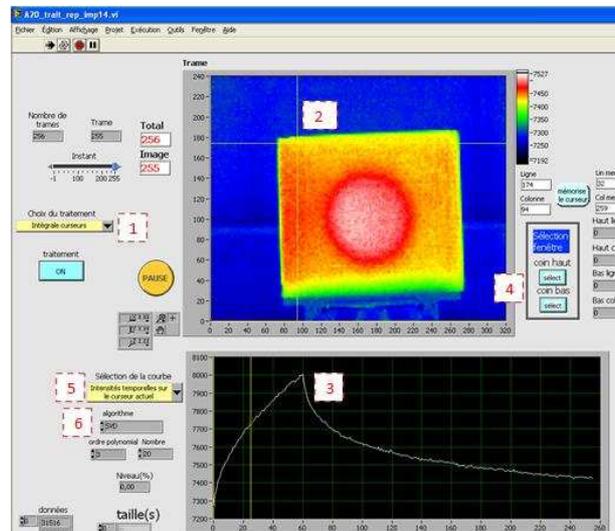


Figure II.6 : Fonctionnalités du logiciel

Le logiciel offre la possibilité de choisir différents types de post-traitement. La Figure II.7 indique la liste des traitements possibles.

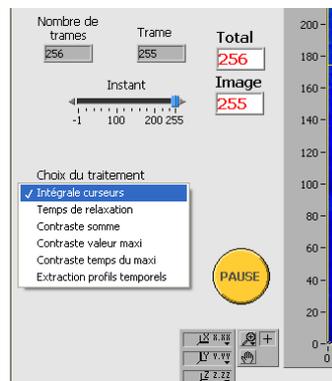


Figure II.7 : Choix des traitements

Ces traitements sont au nombre de six :

- Intégrales curseurs :

Le premier post-traitement proposé a été appelé « intégrale curseur ». Il vise à regrouper en une seule image synthétique toutes les informations comprises dans une succession d'images. Pour cela, le logiciel calcule l'aire comprise sous l'évolution temporelle de la réponse photothermique de l'échantillon entre deux instants définis par des curseurs

supérieur et inférieur. L'intérêt de ce traitement, de type filtre « passe bas » est de permettre d'augmenter le rapport signal sur bruit.

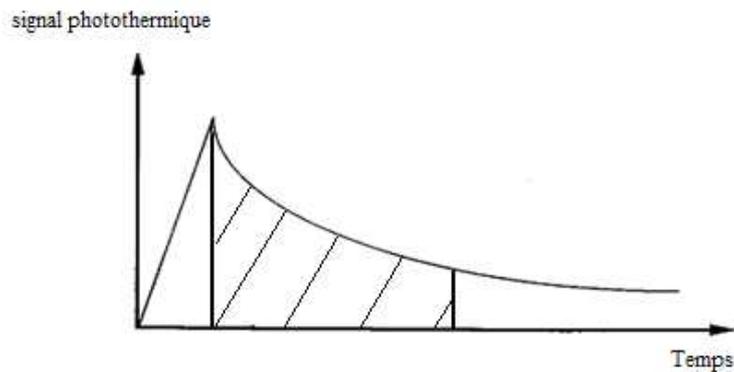


Figure II.8 : Calcul du paramètre « aire sous la réponse photothermique » (zone hachurée)

- Temps de vol :

Le second post-traitement proposé a été appelé « temps de vol ». Il consiste à calculer, pour tous les points de l'image, le temps mis par le signal photothermique pour passer d'un niveau donné de la réponse photothermique à un second niveau de cette même réponse (Figure II.9). Le résultat obtenu étant à connotation temporelle, il est potentiellement indépendant d'inhomogénéité de dépôt d'énergie, ou de variation d'émissivité de surface, ce qui en fait son intérêt.

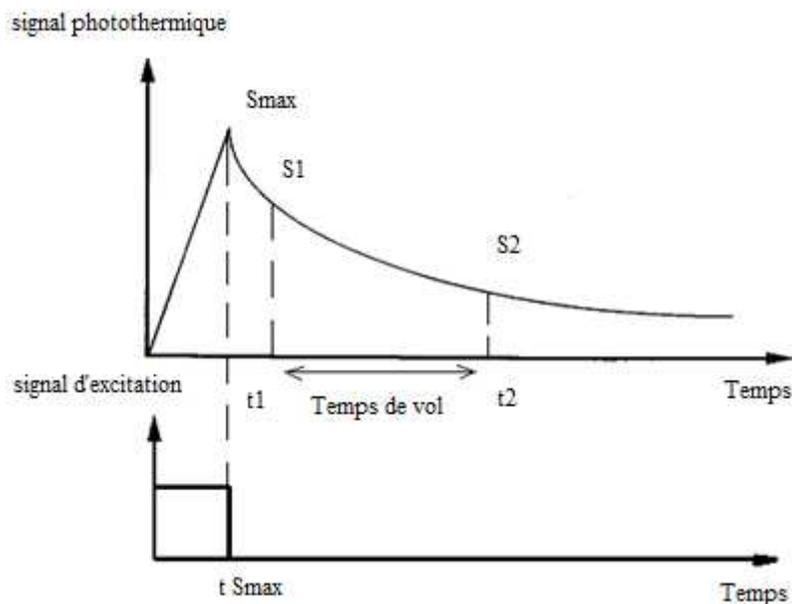


Figure II.9 : définition du temps de vol

- Contraste somme :

Le troisième post-traitement proposé a été appelé « contraste somme ». Il consiste à regrouper en une seule image synthétique toutes les informations comprises dans une succession d'images de contraste. Il s'agit dans ce cas de calculer l'aire comprise sous l'évolution temporelle de la différence de la réponse photothermique obtenue à l'aplomb d'un défaut et de la réponse photothermique obtenue dans une zone saine (Figure II.10). Pour cela, le logiciel calcule l'aire se trouvant sous la courbe de contraste entre deux instants définis par des curseurs supérieur et inférieur. L'intérêt d'un tel calcul, de type filtre passe haut est de rehausser la signature du défaut.

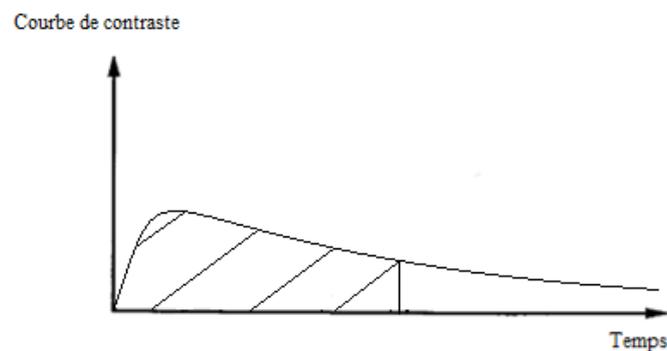


Figure II.10 : Calcul du paramètre « aire sous la courbe de contraste » (zone hachurée)

- Contraste valeur maxi :

Le quatrième post-traitement proposé a été appelé « contraste valeur maxi » (Figure II.11).

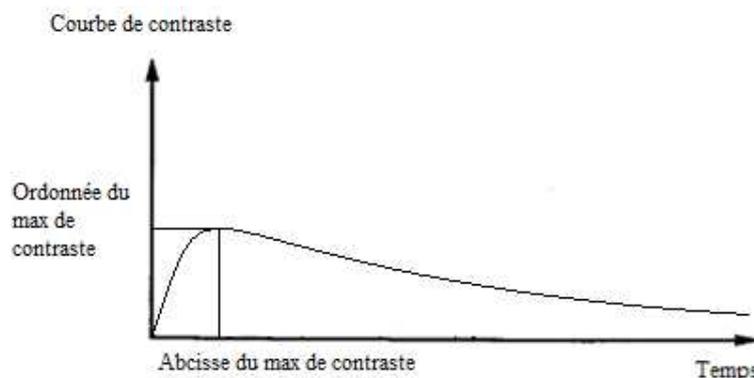


Figure II.11 : Définition de l'abscisse et de l'ordonnée du maximum de la courbe de contraste »

Il consiste à construire une image synthétique avec les différentes valeurs maximales de contraste déterminées pour chaque pixel. L'intérêt d'une telle représentation est que pour une excitation flash la position du maximum de contraste est liée au temps caractéristique de diffusion de la chaleur et donc potentiellement à la profondeur du défaut

- Contraste temps du maxi :

Le cinquième post-traitement proposé a été appelé « contraste temps du maxi ». Il consiste à construire une image synthétique, à connotation temporelle, avec les différentes valeurs du temps du maximum de contraste, déterminés pour chaque pixel. Comme pour le temps de vol, ce type de post-traitement permet de s'affranchir d'une inhomogénéité de dépôt d'énergie ou d'une variation d'émissivité de surface

- Extraction profils temporels :

Enfin le sixième post-traitement consiste, à partir du film thermographique, à extraire des profils temporels que l'on récupère sous des fichiers de format texte.

D'autres fonctionnalités sont offertes par le logiciel de post-traitement. Ainsi :

- Afin d'accélérer les post-traitements, une option de fenêtrage (Figure II.12) a été ajoutée au logiciel. Le réticule jaune présent sur la fenêtre 2 et les boutons de sélection 4 permettent de définir les dimensions de la fenêtre d'analyse, qui peut être bien plus petite que l'analyse initiale.

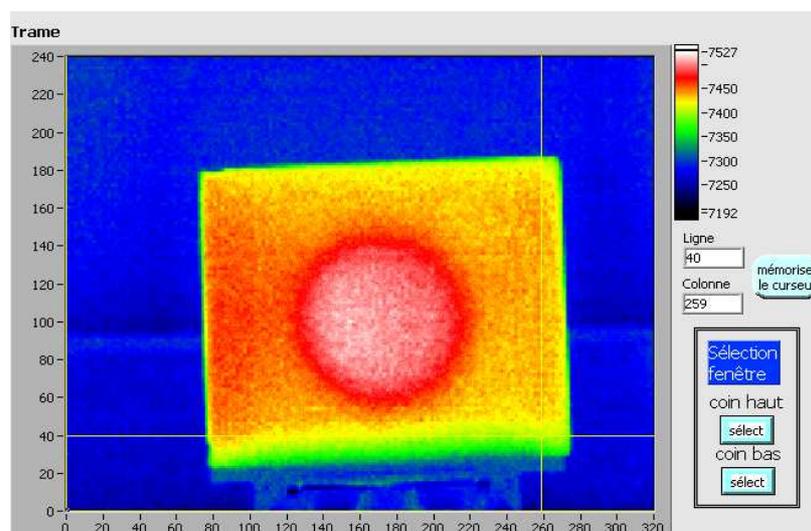


Figure II.12 : Exemple de fenêtrage

- Afin de lire plus facilement les informations présentes sur les images infrarouges, différents tracés de profils ont été introduits dans le logiciel de post-traitement. Les résultats sont présentés au niveau du point de repère numéro 3 et les choix de profils sont effectués au niveau du point de repère numéro 5. Le logiciel permet de tracer les profils spatiaux ou temporels des résultats présents sur l'image infrarouge.

Enfin et bien entendu, le logiciel de post-traitement permet la sauvegarde de tous les types de résultats obtenus (image ou profil).

II- Echantillons étudiés au laboratoire.

II-1- Réplique partielle de fresque

Le premier échantillon que nous avons étudié est une copie de peinture murale (Figure II.13). Cette étude visait d'abord à retrouver les résultats obtenus par Gabriela Szatanik avec le nouveau système SAMMTHIR. Elle visait ensuite à vérifier la faisabilité de la méthode aléatoire en matière d'aide à la restauration de peintures murales. Elle visait enfin à nous familiariser avec les différents réglages de l'instrumentation.



Figure II.13 : La mini fresque étudiée et la position des défauts internes

II-1-1- « Vérification » des résultats obtenus par Gabriela Szatanik : étude de la minifresque par thermographie infrarouge pulsée

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'objectif de cette étude étant de retrouver, avec la nouvelle instrumentation SAMMTHIR, les résultats obtenus par Gabriela Szatanik au cours de sa thèse. Nous avons alors étudié la copie partielle du Saint-Christophe

par thermographie infrarouge pulsée. Les conditions expérimentales retenues sont une excitation créneau d'une durée de 184 secondes et d'une puissance de 500 watts. Une durée totale d'analyse de 7 minutes. Une caméra de thermographie infrarouge et une lampe à halogènes placées à 50 cm de l'échantillon étudié. Quelques résultats obtenus avec cette méthode sont présentés sur la Figure II.14.

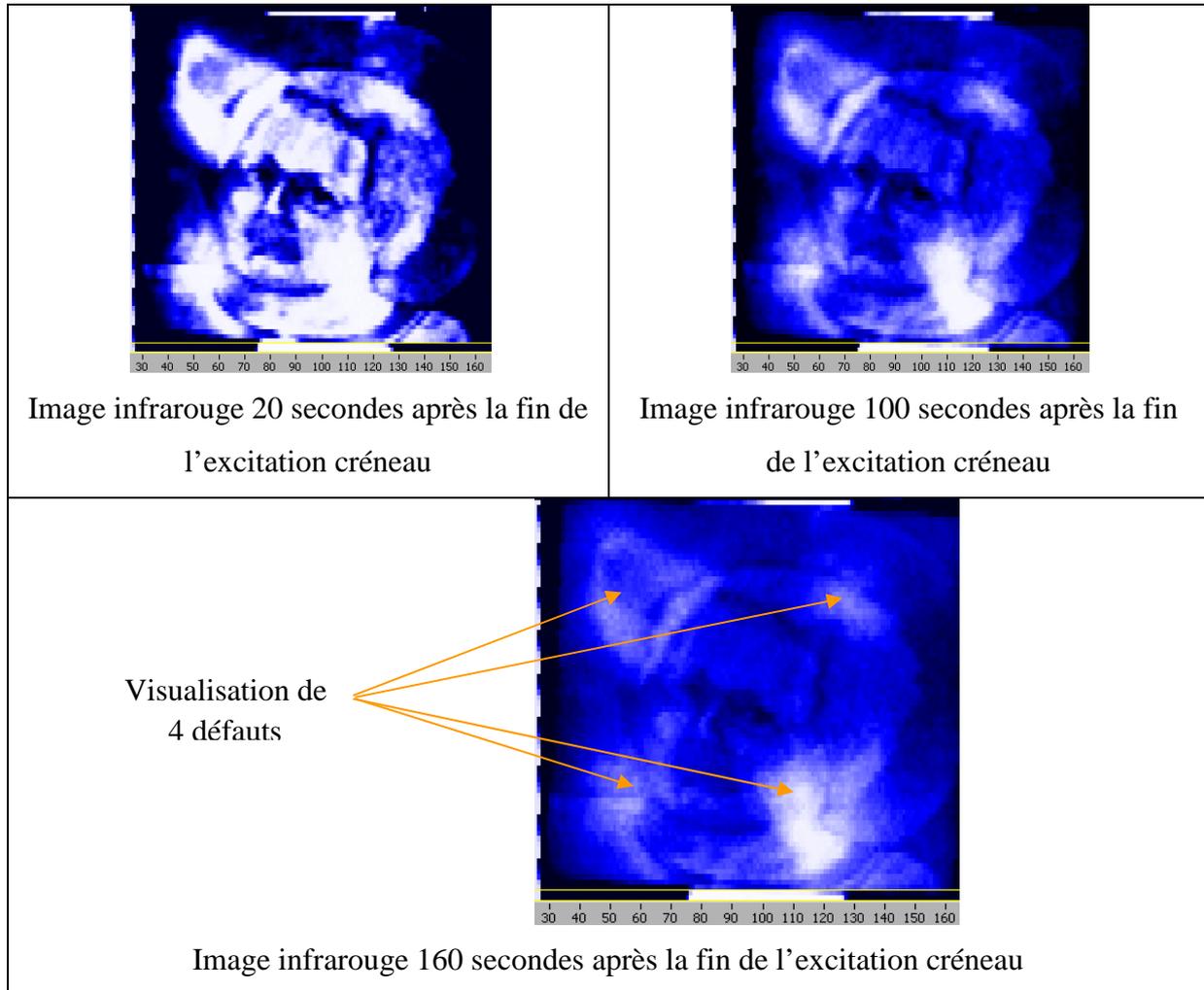


Figure II.14 : Images infrarouges obtenues avec la méthode pulsée

Ils montrent d'abord que la méthode pulsée permet bien, comme l'avait montré Gabriela Szatanik, de détecter les quatre inclusions de plastazote présentes dans la copie. Ils montrent ensuite que le nouveau système SAMMTHIR semble fonctionner et permet la détection de défaut. Ils montrent enfin que l'élévation de température de surface, dans ces conditions de manipulation est proche de $19,6^{\circ}\text{C}$, ce qui est important. Afin d'essayer de réduire cette élévation de température, nous avons essayé dans une seconde étape d'analyser

cette fresque académique par thermographie infrarouge aléatoire. En effet, cette variante d'excitation permet une analyse sous excitation moindre de l'échantillon étudié.

II-1-2- Etude en aléatoire

Si le laboratoire avait une certaine expérience dans le cas d'une analyse photothermique aléatoire ponctuelle, c'était la première fois qu'était essayé ce type de traitement pour une analyse étendue. Les paramètres expérimentaux retenus dans ce cadre sont : une excitation PRBS d'une longueur de 256 termes avec un temps d'analyse entre chaque terme de 10,08 secondes et une puissance de 500 watts. Le type d'identification retenu a été l'identification paramétrique. Le type de modèle de comportement retenu est le modèle ARMA. Le nombre de paramètres d'entrée et de sortie considérés sont égaux à 40.

La Figure II.15 représente les images infrarouges reconstruites par analyse paramétrique et post-traitées avec la méthode « intégrales ». Elles sont présentées pour l'une, en codage fausses couleurs et, pour l'autre, en vue tridimensionnelle. Elles font toutes les deux clairement apparaître une signature infrarouge plus importante à l'endroit des défauts : apparition de quatre rectangles bleus dans le premier cas et de quatre bosses dans le second cas. Ceci rend manifeste la possibilité de la thermographie infrarouge aléatoire en matière de détection de défaut situés dans des œuvres d'art.

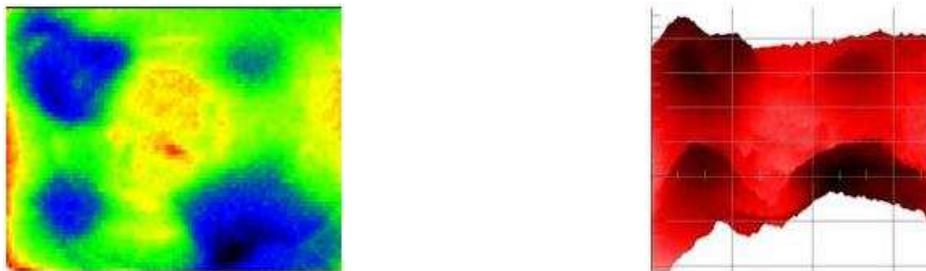


Figure II.15 : Image photothermique infrarouge codée en « fausses couleurs » (à gauche) et tridimensionnelle (à droite) de la mini fresque étudiée

Suite à cette confirmation, nous nous sommes intéressés à l'élévation de température induite par cette méthode. En considérant le même point de mesure que pour l'analyse pulsée, l'élévation de température n'était plus que de 8,2°C (au lieu de 19,6°C). Ce gain notable en température semble alors confirmer l'intérêt d'une analyse aléatoire.

II-1-3- Post-traitement d'image

Afin d'aider les restaurateurs à établir un diagnostic, à la suite de ces études plutôt positives, nous nous sommes intéressés, toujours en analysant cette minifresque, au post-traitement d'image. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel Imagej et essayé d'appliquer différents post-traitements classiques en traitement d'images, avec pour but de mieux faire ressortir les défauts. Dans l'étude que nous présentons ici, nous sommes partis de l'image synthétique obtenue après analyse photothermique de la minifresque et un traitement de type temps de vol (Figure II.16). Cette image fait apparaître les quatre défauts, mais pas vraiment de façon évidente.

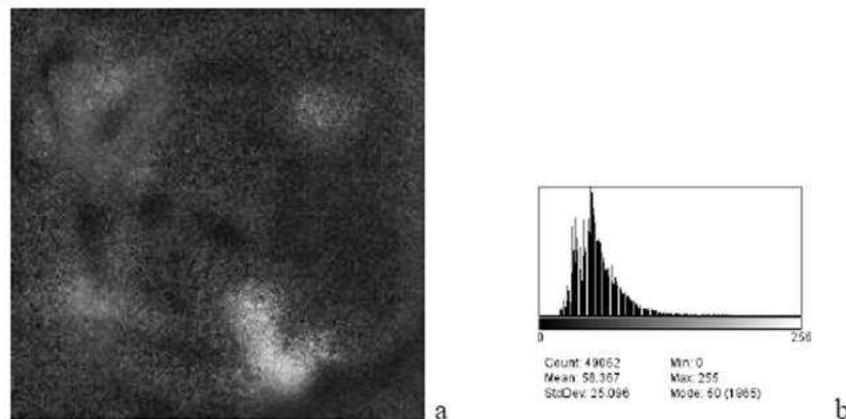


Figure II.16 : Image du temps de vol

Afin d'améliorer leur détection, nous avons d'abord modifié la « table d'allocation des couleurs » de l'image (Look Up Table). Le résultat obtenu est présenté sur la Figure II.17. Il montre clairement qu'un tel traitement peut permettre d'améliorer la détection visuelle des défauts.

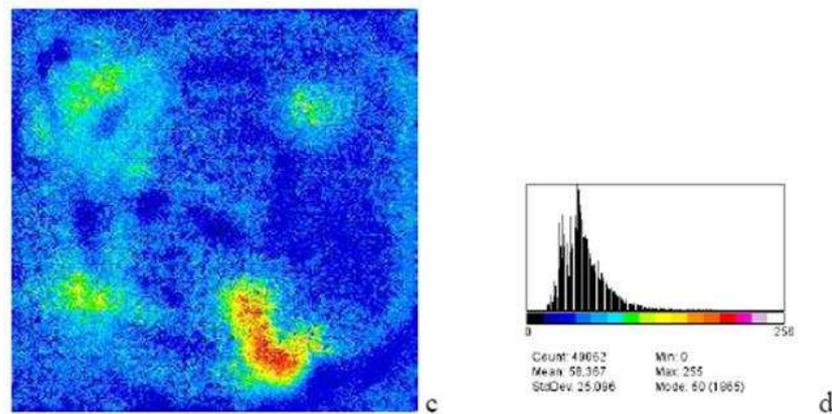


Figure II.17 : Image du temps de vol

La seconde série de post-traitement d'image que nous avons effectué visait à détecter les contours des défauts [36], d'une part pour aider à la prise de décision, d'autre part pour aboutir à une évaluation quantitative de l'étendue du défaut.

Pour cela, nous avons d'abord effectué un seuillage par histogramme de la Figure II.16 et gardé les signatures photothermiques les plus importantes (celles correspondant aux défauts). Afin de réduire le bruit, nous avons procédé à une morphologie mathématique, une ouverture puis une fermeture. Dans une troisième étape, nous avons procédé à une détection de contour (filtre de Sobel). Enfin, pour rendre l'image plus lisible, nous avons procédé à un remplissage. L'image finale obtenue est présentée sur la Figure II.18. Elle fait apparaître clairement les quatre défauts et montre clairement l'intérêt d'un tel post-traitement.

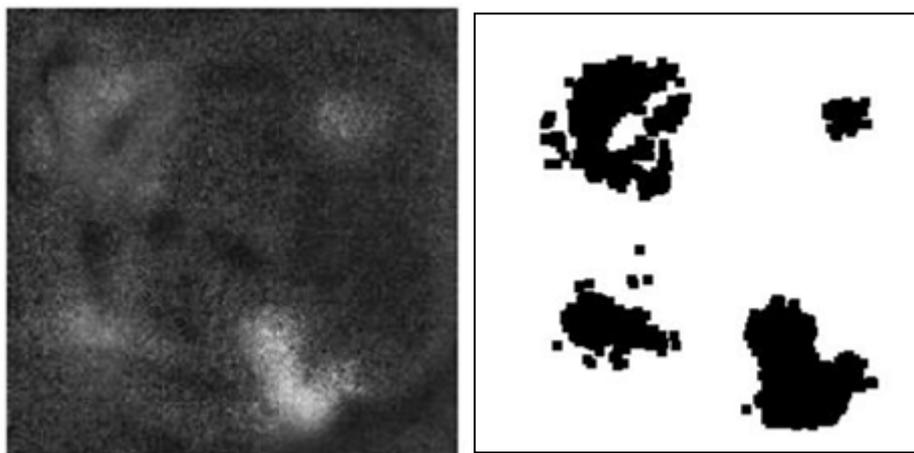


Figure II.18 : Image du temps de vol initiale (à gauche) et image finale obtenue après traitement (à droite)

III- Analyses des possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière d'aide à la restauration d'autres types d'œuvres d'art

Les résultats obtenus lors de l'étude de la minifresque étant positifs, nous avons cherché ensuite à ouvrir l'étude à d'autres types d'œuvres d'art et à d'autres configurations expérimentales. Voyons ensemble les études portant sur d'autres types d'œuvres d'art.

III-1- Analyse de marqueteries

D'autres types d'œuvres d'art peuvent présenter des défauts de décollement ou déplacement, similaires à ceux présents dans la minifresque étudiée précédemment. Les marqueteries entrent dans ce cadre. Là aussi, un décollement d'un morceau de la fine couche de bois de placage constituant la couche picturale, conduit à l'apparition d'une fine lame d'air et donc d'une barrière thermique potentiellement détectable par thermographie infrarouge stimulée. Ce type d'œuvre d'art peut, par ailleurs, être le siège de galeries d'insectes, défauts qu'il est aussi souhaitable de détecter. Pour illustrer ces cas de figure, nous présentons ici les résultats obtenus lors de l'étude de trois types de marqueteries différentes : un échiquier, les échantillons du programme européen LASERACT et le couvercle d'une boîte malgache.

III-1-1- Analyse d'un échiquier académique

Comme dans le cas des peintures murales, avec la réalisation de la copie partielle du Saint-Christophe, nous avons réalisé de toute pièce un échantillon académique afin de développer une étude préliminaire en laboratoire (Figure II.19). Cet échantillon est constitué d'une plaque de contre-plaqué dans laquelle nous avons supprimé localement une feuille de bois. Cela a conduit à la réalisation d'inclusions d'air rectangulaires de différentes étendues surfaciques (8 défauts) et d'inclusions d'air « sinusoïdales » visant à représenter des galeries d'insectes (3 défauts).

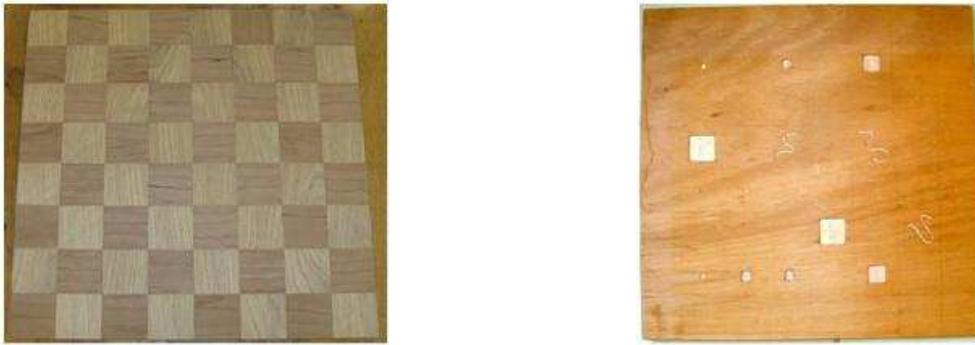


Figure II.19 : L'échiquier analysé et le positionnement des défauts

Cet échiquier a été analysé par thermographie infrarouge pulsée à l'aide du dispositif SAMMTHIR. La durée du créneau était de 31 secondes, la puissance d'excitation lumineuse était de 1000 watts. La durée totale de l'analyse était de 512 secondes.

Un exemple de résultat obtenu sur cet échiquier est présenté sur la Figure II.20. Cette figure montre clairement un signal photothermique plus important du fait de l'effet de barrière thermique à l'endroit des différents types de défauts présents dans la marqueterie.

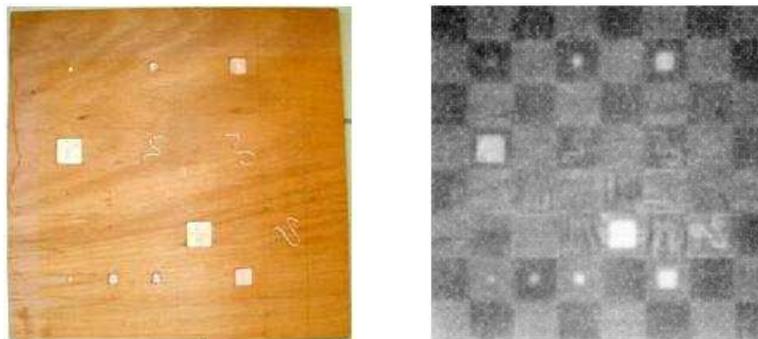


Figure II.20 : Image photothermique infrarouge de type temps de vol (à droite) de l'échiquier analysé

III-1-2- Analyse des échantillons du programme européen LASERACT

Le second type d'échantillons de marqueterie que nous avons analysés correspond à des échantillons fournis par la Laboratoire de Recherche sur les Monuments Historiques au programme Européen LASERACT (Figure II.21). Une inspection acoustique, une inspection visuelle et les documents du programme LASERACT montrent que ces échantillons

présentent trois types de défauts : des décollements de marqueterie (zones rouges), des fissures (traits verts) et des galeries de vers (pointées par des flèches).

Ces échantillons ont été analysés par thermographie infrarouge pulsée à l'aide de SAMMTHIR. Les conditions expérimentales retenues sont une excitation créneau de 30 secondes, une puissance d'excitation de 1000 watts et enfin une durée d'analyse totale de 300 secondes.

Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la Figure II.21. Celle-ci montre d'abord que la méthode permet bien la détection de défaut de type décollement de marqueterie. Elle montre ensuite que la méthode étendue mise en œuvre pour l'étude (SAMMTHIR) n'est pas assez résolutive spatialement pour détecter les défauts fins du type fissure et galerie d'insecte. Elle montre enfin que les résultats photothermiques obtenus sont sensibles au dessin présent sur la marqueterie, ce qui est pénalisant.

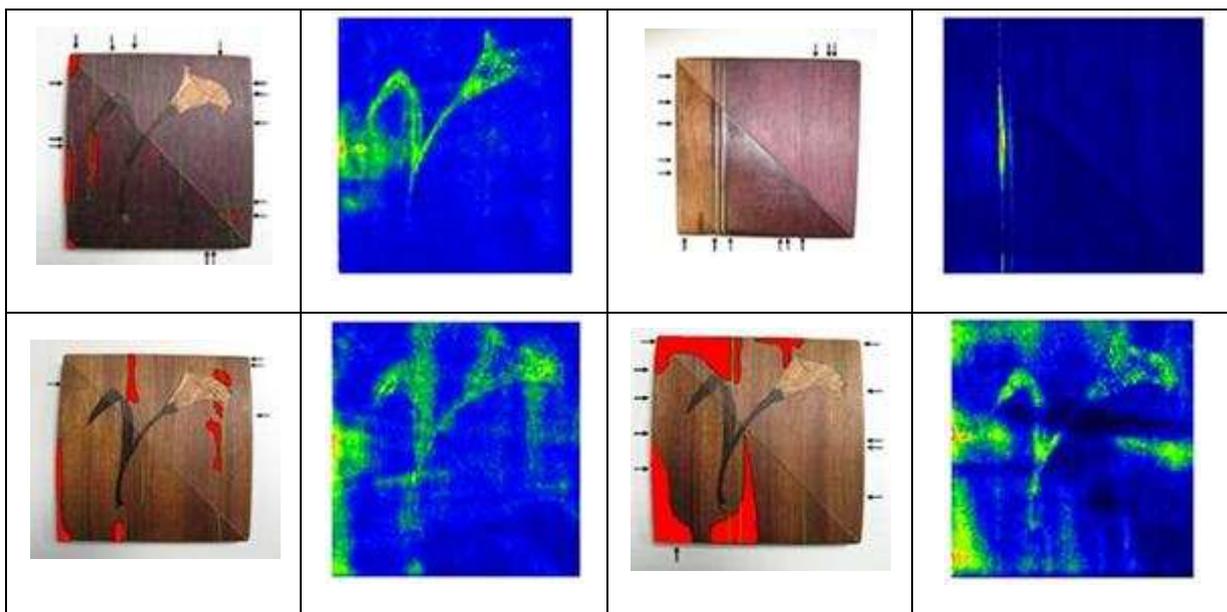


Figure II.21 : Les échantillons de marqueterie du programme LASERACT étudiés et les résultats photothermique obtenus

III-1-3- Analyse d'un couvercle de boîte malgache

Enfin, la troisième œuvre d'art analysée dans ce cadre est une boîte de rangement malgache recouverte de marqueterie. Cette couche de revêtement est, comme le montre la Figure II.22, décollée sur les bords gauche et droit.



Figure II.22 : La boîte malgache recouverte de marqueterie analysée

Là aussi, cette marqueterie a été analysée par thermographie infrarouge pulsée. Les conditions expérimentales sont une excitation créneau de 30 secondes, une puissance d'excitation de 1000 watts et une durée totale d'analyse de 300 secondes. Un exemple de résultat photothermique obtenu dans ce cadre est présenté sur la Figure II.23. Elle montre un signal photothermique plus important sur les bords de la boîte (traits rouges pour le codage en « fausses couleurs » et bosses pour l'image 3D), ce qui est bien significatif de la présence d'un décollement.

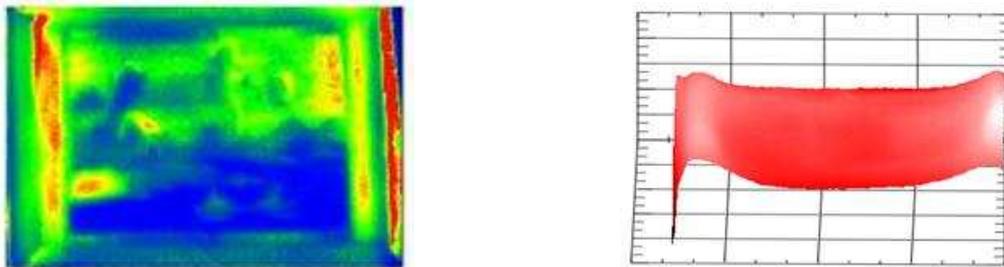


Figure II.23 : Image photothermique infrarouge codée en « fausses couleurs » (à gauche) et tridimensionnelle (à droite) de la boîte malgache étudiée

III-2- Analyse de vitraux

Les vitraux peuvent eux aussi présenter des problèmes de déplacements potentiellement analysables par thermographie infrarouge stimulée.

En effet, un vitrail contient généralement des panneaux de verre coloré assemblés avec des baguettes de plomb. Afin d'affiner la couche picturale, ces panneaux de verre coloré peuvent être recouverts d'une peinture vitrifiable composée de fondant et d'oxydes métalliques (la grisaille), donnant le motif voulu. Cette grisaille est déposée sur le verre ; pour

qu'il y ait une bonne adhérence ce procédé nécessite une étape de cuisson autour de 620°C. Cependant, avec les années, ce type de revêtement peut aussi se décoller ou donner naissance à des bouillonnements, défauts qui sont proches, du point de vue de la radiométrie photothermique, de ceux rencontrés dans les peintures murales et dans les marqueteries. Leur détection est alors due, comme dans les cas précédents, à la modification des flux conductifs internes par la lame d'air qui apparaît au niveau du décollement.

Deux vitraux ont été étudiés au cours de notre travail : le premier est un échantillon académique réalisé par le LRMH, le second est un morceau de vitrail de la cathédrale de Chartres.

III-2-1- Etude du vitrail réalisé au LRMH

Le premier vitrail fourni et réalisé par le LRMH est une éprouvette de verre jaune peinte à la grisaille brune. Le verre est sain et légèrement déformé par la cuisson de la grisaille. La grisaille est en bon état de conservation. L'aspect ponctuellement bouillonné de la grisaille est lié à une application en surépaisseur suivie d'une cuisson à température trop élevée. Les bouillonnements de grisaille correspondent à des bulles d'air emprisonnées dans la peinture. Ce sont des défauts que nous avons cherché à détecter par thermographie infrarouge stimulée. L'analyse photothermique a été développée sur la partie supérieure droite de ce vitrail (Figure II.24).

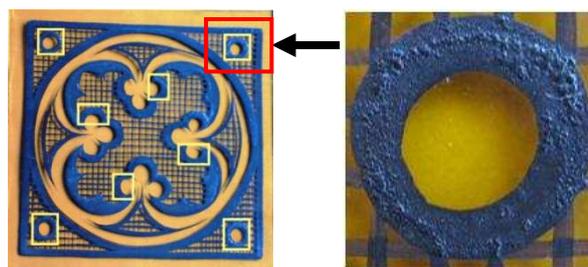


Figure II.24 : Le vitrail et la zone analysés

Le système expérimental mis en œuvre pour cette étude est une adaptation de SAMMTHIR, développée pour la thèse. Par rapport à SAMMTHIR, un effort particulier a été fait pour augmenter la résolution spatiale de l'analyse photothermique. Ainsi, nous nous sommes procuré un dispositif de macro thermographie infrarouge dont nous avons équipé la caméra. Par ailleurs, nous avons installé des sources lumineuses directionnelles afin d'éclairer

suffisamment la petite zone à analyser. Enfin, nous avons développé une nouvelle mécanique permettant la mise en œuvre de l'ensemble (Figure II.25).



Figure II.25 : système expérimental développé pour l'analyse de vitraux

Ce vitrail académique a été analysé par thermographie infrarouge pulsée. Les conditions expérimentales retenues sont une excitation créneau de 1 seconde, une puissance d'excitation de 100 watts et une durée totale d'analyse de 64 secondes.

Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la Figure II.26. Elle fait apparaître des points chauds, du fait de l'effet de barrière thermique à l'endroit d'aspérités de grisailles, lieu, par construction, de décollements et de bouillonnements.

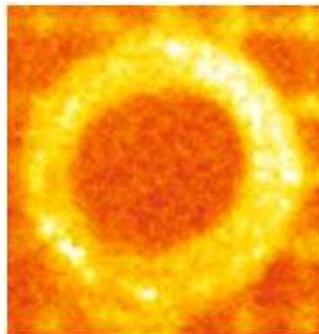


Figure II.26 : Image photothermique infrarouge codée en « fausses couleurs »

III-2-2- Vitrail de la cathédrale de Chartres

Le second vitrail que nous avons analysé est un morceau de vitrail de la cathédrale Saint-Pierre de Chartres (Figure II.27). Cet échantillon est une éprouvette de verre verdâtre (XIIIème siècle) peint à la grisaille brune. Le verre est altéré par piqûres, cratères, corrosion

uniforme opacifiante. On peut y trouver également des dépôts de poussières, des mastics et des micro-organismes. Cet échantillon est recouvert en partie centrale d'une bande de grisaille. Cette grisaille est altérée principalement par écaillage et pulvérulence. Le décollement de grisaille est localisé. Ce cas est intéressant car il s'agit d'un vitrail qui a subi des aléas climatiques (vent, pluie, pollution). Une inspection menée en lumière réfléchiée par le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques a fait apparaître un décollement de grisaille dans la partie supérieure de cette bande d'oxyde (Figure II.27).



Figure II.27 : Morceau de vitrail de la cathédrale de Chartres

L'analyse photothermique de ce vitrail a d'abord consisté à l'étudier à l'aide de SAMMTHIR « macro ». Les conditions expérimentales retenues pour l'étude sont une excitation créneau de 1 seconde, une puissance d'excitation de 100 watts et une durée totale d'analyse de 64 secondes.

Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la Figure II.28. Elle fait d'abord apparaître une signature photothermique plus importante à l'endroit du défaut détecté par les spécialistes du LRMH. Elle fait ensuite apparaître d'autres signatures photothermiques pouvant être liées à la présence de défauts. Elle fait ensuite apparaître clairement la bande de grisaille, ce qui, comme nous l'avons souligné lors de l'étude des marqueteries du programme européen LASERACT, est un handicap.

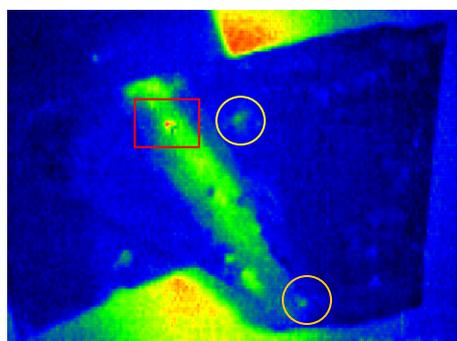


Figure II.28 : Images photothermiques infrarouges codée en « fausses couleurs »

Afin d'essayer de nous affranchir de cette signature parasite nous avons, dans une seconde étape, analysé ce morceau de vitrail de la cathédrale de Chartres en mettant en œuvre un nouveau protocole expérimental : au lieu de chauffer l'échantillon de façon optique, nous l'avons chauffé à l'aide d'un flux d'air chaud. Cette modification nous permet de nous affranchir des problèmes radiatifs de surface et donc potentiellement de la signature de la bande de grisaille. Le dispositif expérimental utilisé est SAMMTHIR « macro », seule a changé la source d'excitation qui est maintenant un sèche-cheveux. Les conditions expérimentales sont une excitation d'une dizaine de secondes et une analyse d'une durée totale d'une minute.

Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la Figure II.29. Elle fait apparaître d'une part des signatures photothermiques plus importantes aux endroits repérés précédemment par radiométrie photothermique ce qui confirme ces résultats. Elle montre d'autre part, ce qui était attendu, la disparition de la signature thermique de la bande de grisaille. Ces résultats photothermiques confirment d'abord le relevé optique effectué par les spécialistes du LRMH. Ils montrent ensuite l'intérêt de coupler les deux variantes de la méthode photothermique : excitation optique et excitation utilisant un flux d'air chaud.

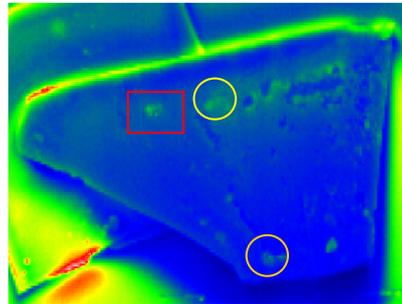


Figure II.29 : Images photothermiques infrarouges codée en « fausses couleurs »

III-3- Analyse de céramiques

Le dernier type d'œuvre d'art que nous avons analysé est une céramique. A la suite d'un séminaire de M. J-L. Bodnar au C2RMF (Louvre), Mme Véronique Milande, responsable du service de restauration du Musée National de la Céramique de Sèvres, nous a demandé de tester, pendant une journée, les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée pour l'analyse de céramiques. Deux types d'échantillons ont été analysés : une amphore panathénaique et une potiche ovoïde.

III-3-1- Analyse d'une amphore panathénaïque (MNC 7230, 332 avant Jésus Christ) du Musée National de la Céramique de Sèvres

En ce qui concerne l'amphore panathénaïque, ce sont des informations sur la structure interne de l'œuvre d'art (et donc sur les restaurations antérieures) que cherche à trouver le restaurateur du patrimoine. La première étude que nous présentons concerne l'analyse du corps de l'amphore. Une analyse aux rayons X du corps montre un assemblage de tessons datant d'une restauration antérieure (Figure II.30).

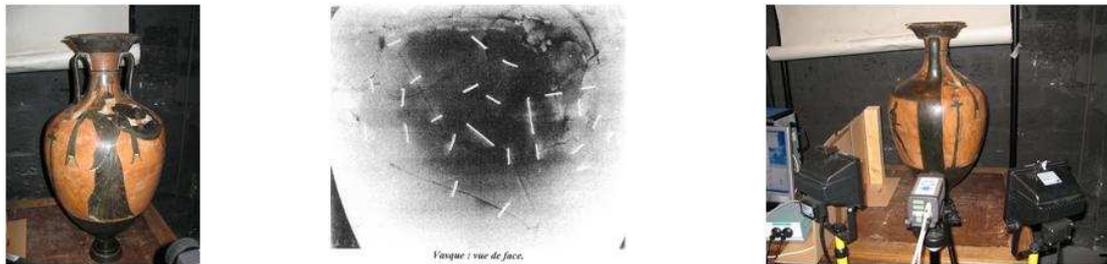


Figure II.30 : L'amphore panathénaïque étudiée (à gauche), sa structure interne (au centre, radiographie X) et la face étudiée par radiométrie photothermique (à droite)

Mme Milande souhaitait savoir si la thermographie infrarouge stimulée permet, tout comme l'analyse aux rayons X, la détection de l'existence de tessons. Les tessons, la colle et les agrafes les reliant sont des matériaux de natures différentes, donc potentiellement détectables par thermographie infrarouge. L'avantage serait d'utiliser une méthode moins perturbatrice que l'analyse X.

Les conditions expérimentales retenues pour cette étude sont une excitation créneau de 2 minutes, une puissance d'excitation de 1000 watts et une durée totale d'analyse de 15 minutes.

Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la Figure II.31. Il montre effectivement que les images infrarouges peuvent être sensibles à la présence de tessons dans l'amphore.

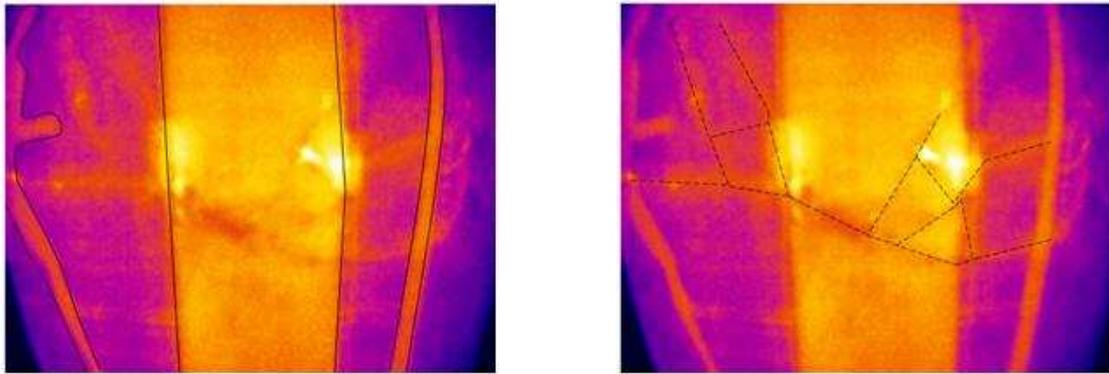


Figure II.31 : Image photothermique obtenue lors de l'analyse photothermique d'une face de l'amphore panathénaïque MNC 7230 (à gauche sont soulignées les réponses photothermiques de la couche picturale et à droite sont soulignés les emplacements possibles des tessons)

La seconde étude que nous avons effectuée, concerne l'étude du pied de l'amphore panathénaïque. Cette étude a été menée afin de comprendre comment une amphore si volumineuse pouvait reposer de façon stable sur un pied de si petite dimension. Les conditions expérimentales retenues pour cette étude sont une excitation créneau de 2 minutes, une puissance d'excitation de 1000 watts et une durée totale d'analyse de 15 minutes.

Les résultats correspondants sont présentés sur la Figure II.32. Ils montrent la présence d'un corps inhomogène dans le pied de l'amphore (typiquement un lest métallique), ce que confirme ensuite l'analyse X.

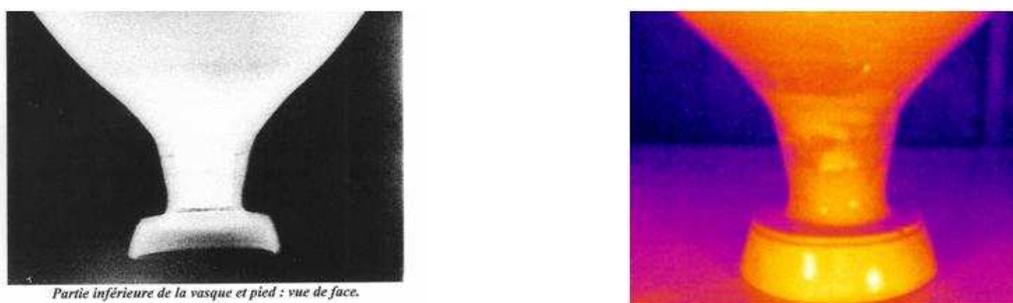


Figure II.32 : Détection par imagerie X (à gauche) et par radiométrie photothermique (à droite) d'une inclusion métallique dans le pied de l'amphore panathénaïque MNC 7230

Enfin la troisième étude que nous présentons concerne l'analyse du positionnement des agrafes de liaisons des tessons constituant l'amphore panathénaïque. Dans ce cas, si la

radiographie X permet de détecter les agrafes de liaisons (Figure II.30), elle est incapable de préciser leur mode de mise en place de l'intérieur ou de l'extérieur de l'amphore. Or, pour les restaurateurs du patrimoine, une telle information a beaucoup d'importance, car elle peut situer chronologiquement la période de restauration.

L'analyse photothermique a été développée au droit d'agrafes préalablement repérées par le restaurateur. Les conditions expérimentales retenues pour cette étude sont une excitation créneau de 1 minute, une puissance d'excitation de 1000 watts et une durée totale d'analyse de 10 minutes. Un exemple de résultat obtenu est présenté sur la Figure II.33.

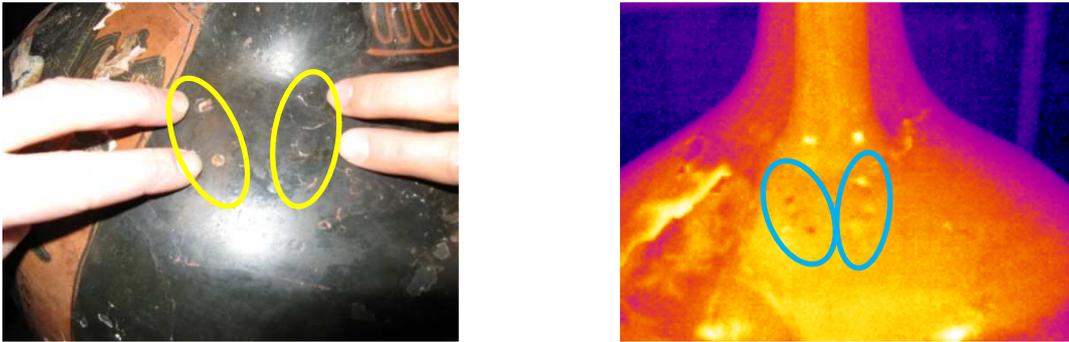


Figure II.33 : exemple de détection d'agrafes

Elle fait apparaître des signatures thermiques très locales, typiquement semblables à celles que fourniraient celles de pointes d'agrafes. Les résultats semblent montrer que les agrafes ont été positionnées par l'intérieur de l'œuvre d'art, ce que ne pourrait préciser une analyse X. La thermographie infrarouge stimulée semble alors capable, par rapport aux méthodes d'analyses traditionnelles, de fournir une information nouvelle aux restaurateurs du patrimoine.

III-3-2- Analyse d'une potiche ovoïde (MNC 7235, 1883) du Musée National de la Céramique de Sèvres

La seconde céramique que nous avons analysée dans cette thèse est une potiche ovoïde fissurée, datant de 1883 (Figure II.34). Une fissure constituant une zone de fragilité dans une céramique, nous avons essayé de vérifier les possibilités de la méthode photothermique en

matière de détection de ce type de défaut. La figure II.34 (à droite) présente la zone de la potiche analysée.



Figure II.34 : La potiche ovoïde MNC 7235 fissuré du National de la Céramique étudié

Afin de tirer pleinement partie de la barrière thermique naturelle jouée par la fissure, nous n'avons pas excité uniformément toute la face de la potiche, contrairement à ce qui a été fait dans les autres cas. Nous avons préféré utiliser une excitation dissymétrique. Malheureusement, le jour de l'étude, nous n'avons pas de laser disponible afin de créer une excitation locale, par exemple de type Flying spot [37-38-39]. Nous avons alors utilisé un sèche-cheveux afin d'exciter notre échantillon. Les conditions expérimentales retenues sont l'utilisation d'une excitation créneau d'une durée de 30 secondes, une puissance de 2000 watts électriques et une durée d'analyse de 3 minutes. Un exemple de résultat est présenté sur la Figure II.35. Elle représente la réponse photothermique de l'échantillon à différents instants : 30 s, 50 s et 80 s. Elle fait apparaître clairement un blocage de la chaleur à l'endroit de la fissure, dû au phénomène de barrière thermique joué par cette dernière ; ceci confirme la possibilité de détecter ce type de défaut par analyse photothermique.

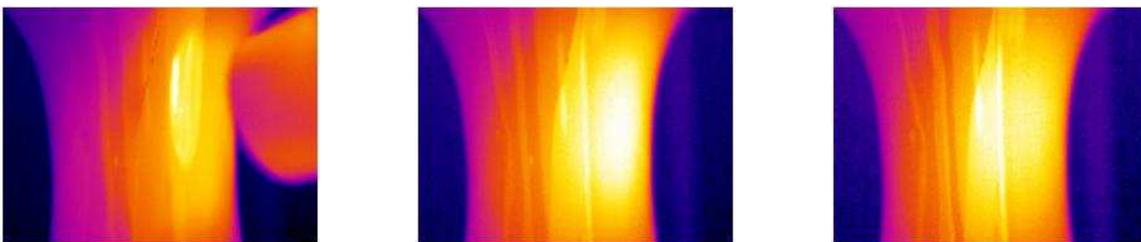


Figure II.35 : Détection d'une fissure dans la potiche MNC 7235 par analyse photothermique

IV- Etude des possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière d'analyse de peintures murales *in situ*

Après cette série d'analyses plutôt positives développées en laboratoire, nous avons cherché à tester les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée sur site, dans des conditions réelles de restauration.

IV-1- Analyse de peintures murales à l'église Saint-Florentin de Bonnet

IV-1-1- Analyse de la scène « Saint-Florentin alité »

La première peinture murale que nous avons analysée *in situ* est une fresque de l'église Saint Florentin de Bonnet (55) (Figure II.36). Les fresques des murs latéraux de cette église, datent du XIII^{ème} et du XIV^{ème} siècle et sont en cours de restauration. Nous avons pu obtenir, grâce à l'aide de l'ANDRA et du conseil municipal du village de Bonnet, quelques heures pour procéder à une analyse photothermique *in situ*. La fresque que nous avons étudiée représente Saint Florentin alité (Figure II.38).



Figure II.36 : La fresque murale « Saint Florentin alité » étudiée

Cette fresque a d'abord été analysée par voie acoustique par Madame Taillefer, restauratrice du patrimoine, chargée de la mission de restauration des peintures murales de l'église. Comme le montre la Figure II.37, elle détecte un décollement de la couche picturale dans la partie basse de la fresque.

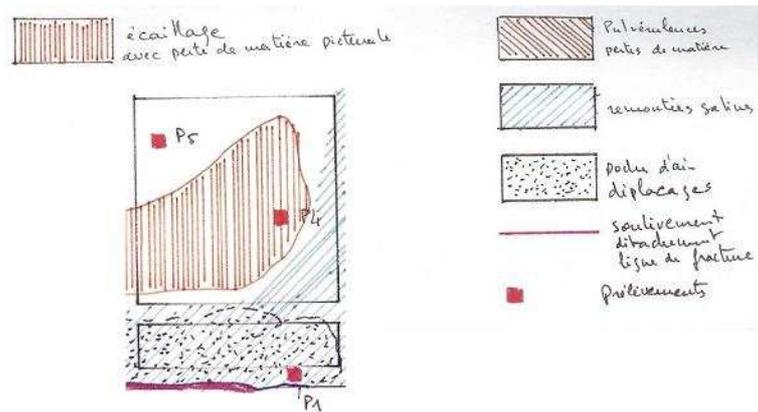


Figure II.37 : Résultats du relevé acoustique effectué sur la peinture murale du « Saint Florentin alité » de l'église Saint Florentin de Bonnet

Suite à cette analyse acoustique, nous avons analysé la même zone de la fresque par voie photothermique grâce à SAMMTHIR. Les conditions expérimentales retenues pour cette analyse sont une excitation pulsée de 300 secondes, une puissance de 500 watts et un temps d'analyse total de 900 secondes. Le résultat alors obtenu est présenté sur la Figure II.38. Il montre clairement une signature photothermique particulière dans le bas du thermogramme post traité significatif de la présence d'un décollement de la couche picturale. Cette première étude menée sur site, malheureusement seulement sur une durée d'une journée (durée accordée par la restauratrice pour notre intervention), semble montrer les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection *in situ* de déplacements situés dans des peintures murales.

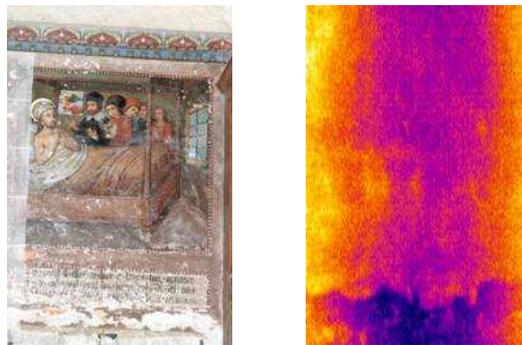


Figure II.38 : La peinture murale du « Saint Florentin alité » de l'église Saint Florentin de Bonnet et un exemple de résultat photothermique obtenu

IV-1-2- Analyse de la peinture sur toile marouflée représentant « Saint-Martin »

A la suite de cette première analyse de la peinture murale représentant « Saint Florentin alité », le maire de la commune et l'ANDRA ont souhaité que nous analysions ensuite, les peintures sur toile marouflées, datant du 19^{ième} siècle, placées dans l'abside de l'église (Figure II.39) et plus particulièrement celle représentant le « Saint-Martin ». Pour cela, l'église nous a été ouverte, là aussi, le temps d'une journée.



Figure II.39 : La peinture sur toile marouflée représentant « Saint Martin », de l'église Saint Florentin de Bonnet

Nous avons tout d'abord analysé cette peinture sur toile marouflée de façon acoustique. Le relevé correspondant fait apparaître une multitude de sonorités « creuses » significatives de la présence de défauts, repartis plutôt en périphérie de l'œuvre d'art (Figure II.40).



Figure II.40 : Analyse acoustique de la peinture sur toile marouflée représentant « Saint Martin » de l'église Saint Florentin de Bonnet

Nous avons ensuite analysé cette peinture sur toile par thermographie infrarouge stimulée à l'aide de SAMMTHIR, d'une part sous excitation pulsée et détection continue

(excitation de 5 minutes et durée d'analyse totale de 20 minutes), d'autre part sous excitation aléatoire et analyse paramétrique (excitation binaire pseudo aléatoire de 256 termes, modèle auto récuratif à moyenne ajustée prenant en compte 40 paramètres d'entrée et de sortie, période d'analyse égale à 15 s). Les résultats photothermiques obtenus sont présentés sur la Figure II.41, à gauche pour l'analyse pulsée et à droite pour l'analyse aléatoire. Il s'agit dans le premier cas de l'image infrarouge de la peinture obtenue en fin d'excitation. Il s'agit dans le second cas d'une image de la réponse impulsionnelle reconstruite par analyse paramétrique. Ces deux images font d'abord apparaître des signatures photothermiques plus importantes, significatives de la présence de défauts, aux endroits référencés par l'analyse acoustique. Cela confirme alors les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection *in situ* de défauts situés dans les œuvres d'art. Elles montrent aussi que l'image obtenue par analyse aléatoire semble plus fine et plus résolue, que celle obtenue par analyse pulsée ; car la localisation des défauts y semble meilleure (y compris lorsqu'ils sont très proches les uns des autres : zone rouge en haut à droite des thermogrammes). Ce constat, s'il était confirmé par la suite, serait un nouvel atout de la méthode aléatoire.

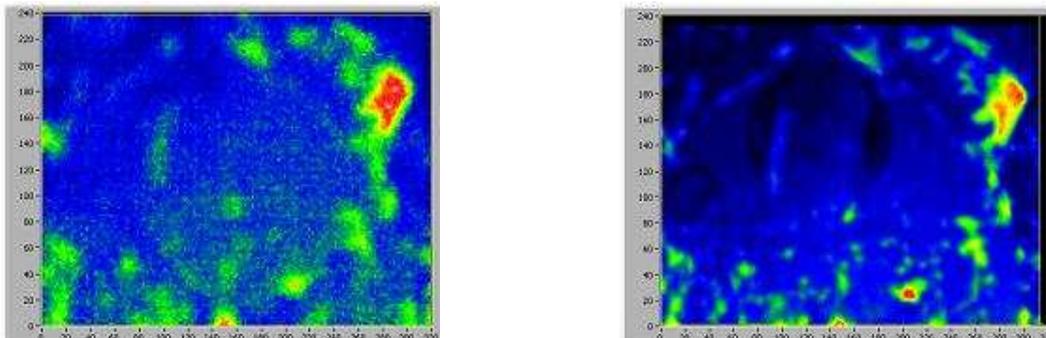


Figure II.41 : Analyse photothermique pulsée et aléatoire de la peinture sur toile marouflée représentant « Saint Martin » de l'église Saint Florentin de Bonnet

IV-2- Analyse de peintures murales à l'église abbatiale de Saint-Savin sur Gartempe

La troisième peinture murale que nous avons analysée *in situ* fait partie des peintures de la nef de l'Abbaye de Saint Savin sur Gartempe. Cette Abbatale est classée depuis 1984, du fait de la qualité exceptionnelle des peintures murales qu'elle contient, au patrimoine mondial de l'UNESCO (Figure II.42). La plupart de ces peintures ont été réalisées à la fin du

XI^{ème} siècle et sont caractéristiques de la période romane. Elles représentent des thèmes religieux inspirés de la Bible, source majeure pour l'art du Moyen Age: ce sont l'Apocalypse, la Passion, la Résurrection du Christ et bien d'autres du Nouveau ou de l'Ancien Testament. Le berceau de la nef, long de plus de 40 mètres, est entièrement recouvert de peintures sur une surface d'environ 500 m². Elles illustrent la Genèse et l'Exode.



Figure II.42 : l'Abbaye de Saint-Savin sur Gartempe, classée au patrimoine mondial de l'UNESCO et les peintures murales exceptionnelles qu'elle contient

Plusieurs campagnes de restauration des peintures murales ont eu lieu. La première fut développée par Prosper Mérimée en 1835. En 1967 une seconde campagne de restauration s'est attachée aux peintures du narthex, des voûtes de la nef et des deux cryptes. Enfin, depuis 2005, une nouvelle campagne de restauration des peintures de la nef a débuté. C'est dans ce cadre et en complément des relevés acoustiques effectués par l'équipe de restaurateurs travaillant sur le chantier (Brice Moulinier, Emmanuelle Cante) qu'intervient notre étude. Cette dernière, outre le fait qu'elle visait à confirmer, voire compléter les relevés des restaurateurs, avait aussi comme objectif de tester les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en conditions réelles de restauration (sur un échafaudage, à la poussière, au froid, parallèlement à d'autres types d'analyses, parallèlement à des travaux de restauration, dans un laps de temps limité, ...). La peinture murale que nous avons étudiée est une partie de la fresque de la « traversée du désert », plus particulièrement la zone entourant la roue arrière du chariot (Figure II.43). Le relevé des restaurateurs effectué par analyse acoustique indique la présence de deux défauts au niveau du chariot dessiné sur la fresque. L'un est situé en partie supérieure de la roue et l'autre dans la partie inférieure de cette roue. L'analyse photothermique développée lors de l'étude *in situ* de cette peinture murale s'est décomposée en deux temps. Nous avons d'abord étudié cette fresque sous radiométrie photothermique pulsée, puis sous radiométrie photothermique aléatoire. Les conditions

expérimentales retenues pour cette analyse sont : Une distance entre la scène observée et la caméra de thermographie de 110 cm et les lampes à halogène sont disposées de part et d'autre de la caméra à une distance de 50 cm de celle-ci. L'analyse pulsée a été réalisée en mettant en œuvre un créneau d'excitation de 300 secondes, le temps d'observation total est de 720 secondes. L'analyse sous excitation thermique aléatoire a été réalisée avec une séquence binaire pseudo-aléatoire d'une longueur de 256 termes et une période d'analyse de 15 secondes.



Figure II.43 : La peinture murale étudiée et le relevé acoustique des restaurateurs

Sur la Figure II.44, nous présentons un exemple de résultat obtenu dans ce cadre par analyse photothermique pulsée (à gauche) et aléatoire (à droite).

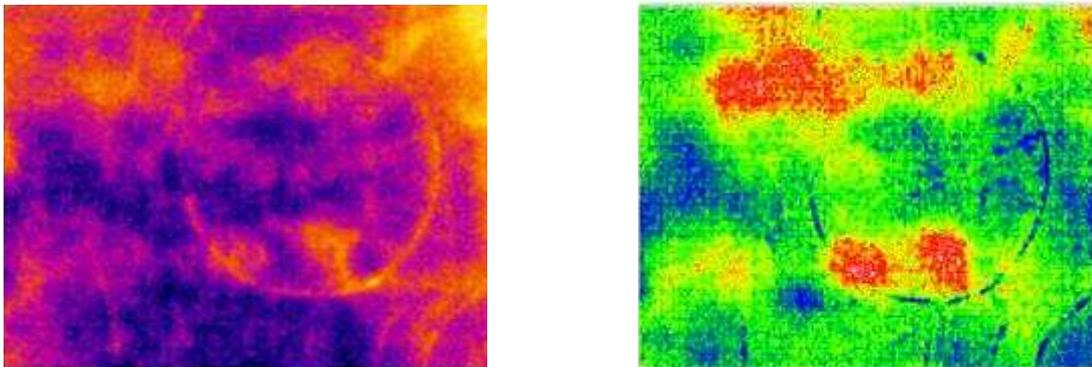


Figure II.44 : Analyse photothermique pulsée (à gauche) et aléatoire (à droite) de la peinture murale de la «traversée du désert » de l'Abbaye de Saint Savin sur Gartempe

Ces images font d'abord apparaître des signatures photothermiques plus importantes, significatives de la présence de défaut, aux endroits référencés par l'analyse acoustique. Il y a donc bien corrélation entre les résultats fournis par les deux méthodes physiques.

Ces images font ensuite apparaître surtout dans la partie basse de la roue du chariot, deux signatures photothermiques disjointes, significatives de la présence de deux défauts disjoints, alors que l'analyse acoustique n'en avait détecté qu'un. Il y avait là, et c'était la première fois, une divergence entre les résultats obtenus par analyse acoustique et ceux obtenus par analyse photothermique. Comme l'analyse photothermique, développée sous deux configurations différentes, avait conduit aux mêmes résultats, nous avons demandé aux restaurateurs, présents sur le site au moment de nos analyses, de réexaminer la partie basse de la roue du chariot. Ce nouveau relevé acoustique a alors confirmé la présence de deux défauts disjoints.

Comme l'analyse de ces fresques classées au patrimoine mondial de l'UNESCO sont importantes et rares, au moment de nos analyses était présente l'équipe de Vivi Tornari, venue spécialement de Grèce pour analyser, par interférométrie holographique, ces mêmes peintures murales. Nous avons alors saisi l'occasion de cette présence pour lui demander d'analyser avec sa méthode la partie basse de la roue du chariot de la fresque « La traversée du désert ». Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la Figure II.45.

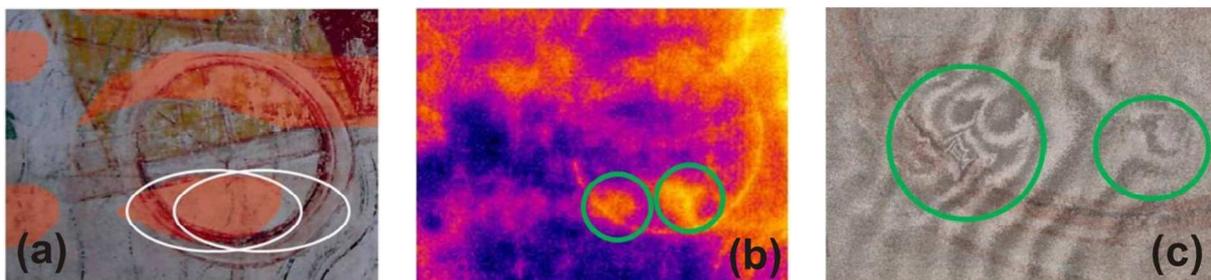


Figure II.45 : (a) relevé des restaurateurs, (b) image infrarouge, (c) recouvrement de l'interférogramme et de la zone analysée

Elle fait apparaître clairement deux séries de franges d'interférences dans la partie basse de la roue ce qui confirme le relevé photothermique.

A l'issue de cette étude, il semble possible de dire que la thermographie infrarouge stimulée peut être mise en œuvre dans des conditions réelles de restauration, pour aider à la restauration de peinture murale.

Par ailleurs, la méthode semble résolutive, puisqu'elle a permis de détecter deux défauts proches alors que l'analyse acoustique initiale n'avait pas séparés.

IV-3- Analyse de peintures murales de la Chapelle Saint-Pierre de Villefranche-sur-Mer

La quatrième série de peintures murales que nous avons analysée *in situ* est une partie des fresques de la chapelle Saint-Pierre de Villefranche-sur-Mer (Figure II.46). Elles ont été réalisées par Jean Cocteau en 1956 et en 1957. Bien que relativement récentes, elles subissent déjà les effets induits par leur environnement et le comportement des visiteurs. Elles sont déjà largement dégradées, ce qui explique les travaux de restauration mis en place. Lors de notre étude, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à deux peintures murales : La première s'intitule « Hommage aux pêcheurs de Sainte-Marie » et la seconde « Saint-Pierre livré aux soldats de Pilate »



Figure II.46 : L'église Saint Pierre de Villefranche sur Mer et les peintures murales réalisées par Jean Cocteau

IV-3-1- Analyse de la peinture murale « Hommage aux pêcheurs de Sainte Marie »

La première peinture murale que nous avons étudiée est la fresque « Hommage aux pêcheurs de Sainte Marie » (Figure II.47).



Figure II.47 : « Hommage aux pêcheurs de Sainte Marie »

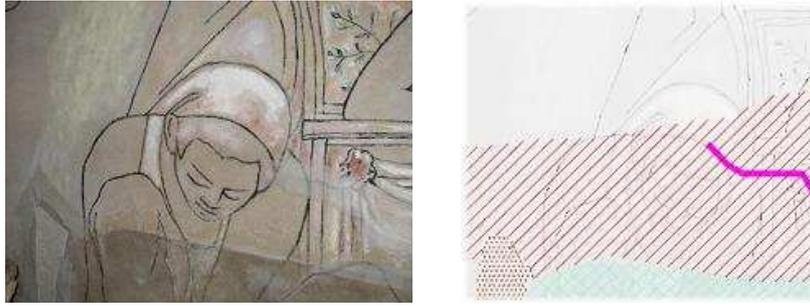


Figure II.48 : La peinture murale étudiée et le relevé acoustique des restaurateurs

Cette fresque est particulièrement dégradée surtout dans sa partie basse. Ce qui explique pourquoi nous avons porté notre étude sur la zone entourant le pêcheur à genoux. Le relevé acoustique effectué dans cette zone par Antoinette Sinigaglia, restauratrice du patrimoine, montre un important déplacement. En partie centrale de la fresque (hachures rouges), une chute de l'enduit supportant la couche picturale en bas à gauche de l'œuvre d'art (points violets) et enfin sur la partie droite du dessin, une bande de papier japon visant à consolider ce même enduit certainement plus altéré à cet endroit (trait violet) (Figure II.48).

L'analyse photothermique s'est décomposée en deux étapes. Nous avons d'abord étudié cette fresque par thermographie infrarouge pulsée puis par thermographie infrarouge aléatoire.

Les conditions expérimentales de cette étude sont :

Pour l'étude par thermographie infrarouge pulsée : une excitation créneau d'une durée de 5 minutes, une puissance de 800 watts, une durée d'analyse totale de 15 minutes, la caméra était placée à 1,3 mètre de la scène observée, les halogènes disposés à 0,65 mètre de la scène observée et à 0,4 mètre de part et d'autre de la caméra.

Pour l'étude par thermographie infrarouge aléatoire : une excitation PRBS de 256 termes, un temps d'analyse de 10 secondes entre terme, une puissance de 800 watts, la caméra était placée à 1,3 mètre de la scène observée, les halogènes disposés à 0,65 mètre de la scène observée et à 0,4 mètre de part et d'autre de la caméra.

Un exemple de résultat obtenu est présenté sur la Figure II.49, à gauche pour la variante pulsée et à droite pour la variante aléatoire.

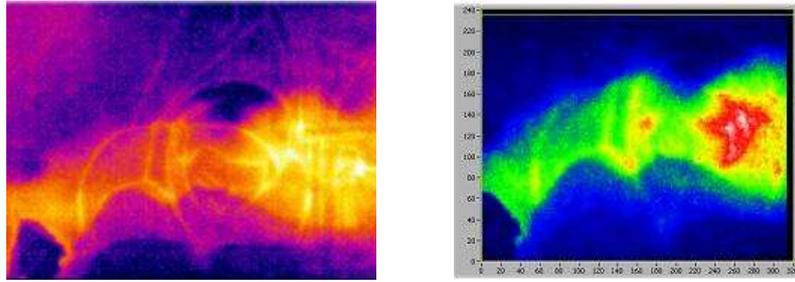


Figure II.49 : Analyse photothermique pulsée (à gauche) et aléatoire (à droite) de la peinture murale « Hommage aux pêcheurs de Sainte Marie » de la chapelle Saint Pierre de Villefranche sur Mer

Cette figure montre une signature photothermique plus importante en partie centrale de la fresque, correspondant au déplacement relevé par analyse acoustique. Elle montre aussi un faible signal photothermique en bas à gauche de l'œuvre d'art, lieu du manque d'enduit. Elle montre encore une réponse photothermique très importante dans la partie centrale droite de l'image infrarouge, lieu consolidé par du papier japon. Elle montre enfin que la variante aléatoire semble offrir, comme nous l'avons remarqué lors de l'analyse du « Saint-Martin » de l'église de Bonnet, une détection plus résolutive des défauts. En conclusion de cette analyse, il est possible de dire que les résultats obtenus par thermographie infrarouge stimulée sont là encore corrélés à ceux obtenus par sondage acoustique, confirmant ainsi les possibilités de la méthode photothermique en matière d'aide *in situ* à la restauration de peintures murale.

IV-3-2- Analyse de la scène « Saint Pierre livré aux soldats de Pilate »

La seconde peinture murale de la chapelle Saint Pierre de Villefranche sur Mer que nous avons étudié est intitulée « Saint-Pierre livré aux soldats de Pilate » (Figure II.50).



Figure II.50 : La peinture murale intitulée « Saint Pierre livré aux pilâtes» réalisée par Jean Cocteau

Comme le montre la Figure II.51, cette fresque est soumise à des remontées capillaires salines et à des cristallisations de sels. D'où l'idée de l'étude d'approcher les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière d'étude de sels situés dans des peintures murales.

La partie de la peinture murale que nous avons étudiée est celle qui est la plus endommagée par les sels. Elle correspond à la zone représentant le torse de la porteuse d'eau. Un relevé effectué par Vincent Detalle et Jean-Marc Vallet, spécialistes des peintures murales, fait apparaître dans cette zone des efflorescences de sels (en rouge), des boursoufflures (en bleu), des lacunes (en vert) (Figure II.51).

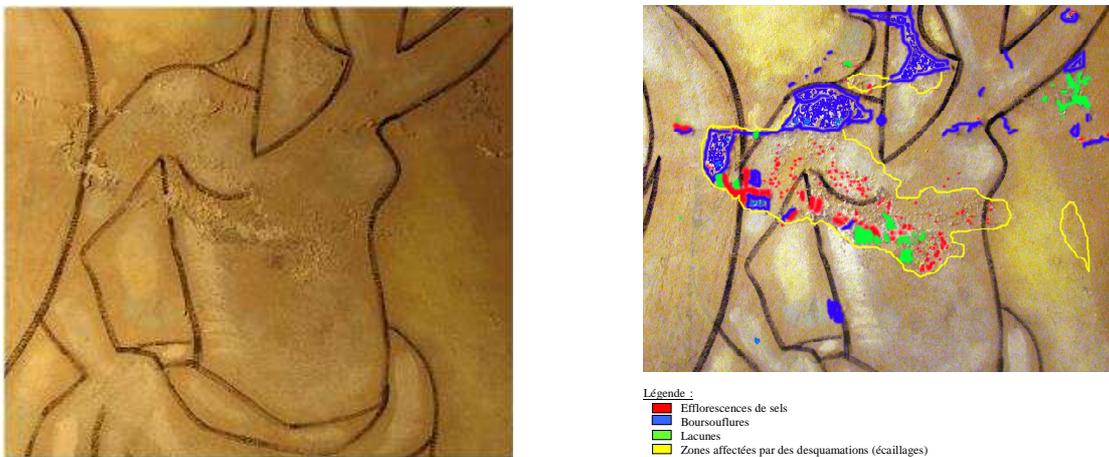


Figure II.51 : La zone de la peinture murale intitulée « Saint Pierre livré aux soldats de Pilate » analysée et le relevé visuel et acoustique des restaurateurs

L'analyse photothermique que nous avons développée s'est déroulée là aussi en deux étapes. Nous avons d'abord étudié cette fresque par thermographie infrarouge pulsée puis par thermographie infrarouge aléatoire.

Les conditions expérimentales de cette étude sont les suivantes :

La caméra était placée à 1 mètre de la scène observée, les halogènes sont disposés à 1 mètre de la scène observée et à 0,4 mètre de part et d'autre de la caméra.

Pour l'étude par thermographie infrarouge pulsée : Une excitation créneau d'une durée de 1 minute, une puissance de 800 watts, une durée d'analyse totale de 3 minutes.

Pour l'étude par thermographie infrarouge aléatoire : Une excitation PRBS de 256 termes, un temps d'analyse de 10 secondes entre terme, une puissance de 800 watts.

Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la Figure II.52 ; le thermogramme de gauche correspond à l'analyse pulsé, le thermogramme de droite correspond à l'analyse aléatoire.

Ces deux thermogrammes montrent d'abord que la méthode photothermique semble permettre la détection des trois types de défauts évoqués précédemment : efflorescences de sels, boursouflures, lacunes. Ceci paraît intéressant en termes d'aide à la restauration de ce nouveau type de défaut.

Ils montrent aussi, comme nous l'avons déjà souligné précédemment, que la méthode aléatoire semble permettre une localisation plus fine et plus précise des défauts et de leurs contours. Par ailleurs, et c'était déjà le cas sur la Figure II.49, la méthode aléatoire semble aussi permettre une localisation plus aisée des défauts car elle fait apparaître dans les deux cas, « en filigranne » le motif présent sur la couche picturale.

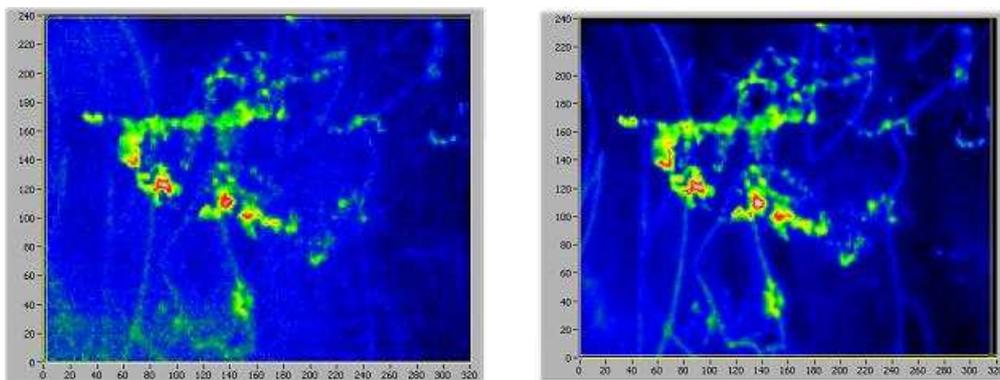


Figure II.52 : Analyse photothermique pulsée (à gauche) et aléatoire (à droite) de la peinture murale « Saint Pierre livré aux soldats de Pilate » de l'église Saint Pierre de Villefranche sur Mer

IV-4- Analyse de peintures murales à la Villa Kerylos de Beaulieu sur Mer

La dernière peinture murale que nous avons analysée *in situ* est une peinture murale antique (II^{ème} siècle avant J.C.) de style pompéien, provenant de *Boscoreale* (Italie), déposée *a strappo* vers 1910 et exposée sur la partie interne des murs Nord, Est et Sud d'une exèdre la villa Kerylos de Beaulieu sur Mer (Figure II.53).



Figure II.53 : Les peintures murales antiques (II^e siècle avant J.C.) de style Pompéien, provenant de *Boscoreale* (Italie), exposées dans la villa Kerylos de Beaulieu sur Mer

Cette œuvre d'art a d'abord été analysée par plusieurs équipes de restaurateurs du patrimoine. Monsieur et Madame Morisse-Marini indiquent d'abord que cette peinture murale possède un support en plâtre consolidé par une armature en bois (ce que semble confirmer une analyse visuelle au niveau de la base dégradée de l'œuvre d'art, Figure II.54).



Figure II.54 : La peinture murale antique étudiée

L'équipe d'Antoinette Sinegaglia (Sinopia) après une inspection visuelle et acoustique détecte des fissures et des interventions anciennes (bouchage de lacune à l'aide de « mastic » marron à gris). Elle indique de plus que les peintures montrent un aspect blanchi, translucide et luisant (présence de cire en surface ? Figure II.55).

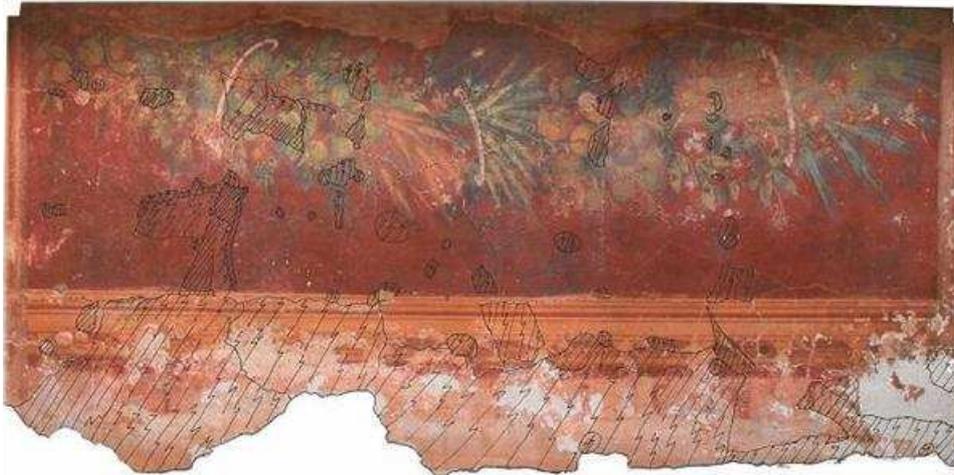


Figure II.55 : Le relevé des restaurateurs

Les résultats que nous présentons ici concernent l'étude photothermique de la partie haute de la fresque située dans le troisième quart droit de cette dernière. Les restaurateurs ont détecté dans cette zone, un bouchage de lacune, 2 cavités (hachures), 1 fissure (entourée en rouge), 1 bouchage de point d'ancrage (entouré en jaune) (ou attribué comme tel, Figure II.56)



Figure II.56 : La zone de la peinture murale analysée et le relevé des restaurateurs correspondants

Le premier type d'inspection photothermique que nous avons développé était de nature radiométrique. Comme dans les différents cas précédents, l'excitation de l'œuvre d'art était fournie par une source lumineuse à halogène. Toutefois, la nature particulière de la surface de la peinture murale (présence de cire) associée aux propriétés thermiques particulières de cette œuvre d'art font apparaître de façon prépondérante la signature des sources d'excitation (cercle noir), ce qui a pour effet de masquer les signatures thermiques éventuelles des défauts (cercle blanc Figure II.57).

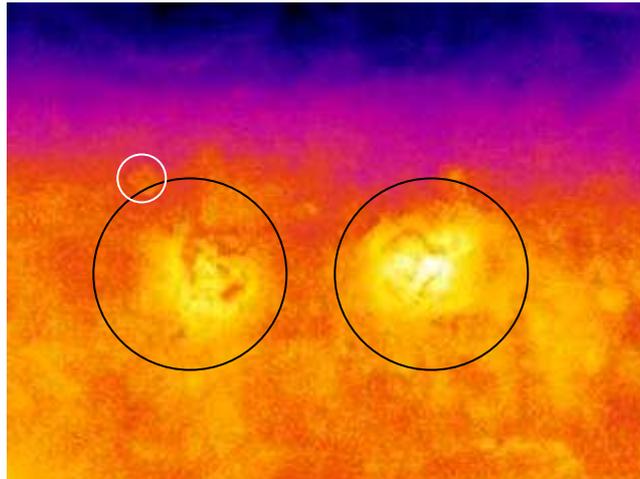


Figure II.57 : Exemple de résultats obtenus par thermographie photothermique infrarouge

Pour palier ce problème, nous avons essayé d'éclairer de façon rasante la peinture murale (utilisation des lois de Descartes afin de placer la caméra de thermographie infrarouge en dehors du trajet des rayons lumineux excitateurs réfléchis), sans véritablement rencontrer un franc succès. En effet, les images infrarouges font toujours apparaître une partie, même infime de la signature thermique des lampes d'excitation, ce qui, comme précédemment, écrase la dynamique de l'image (une grande partie de la dynamique étant concentrée au niveau de la signature thermique des lampes).

Nous avons ensuite essayé de palier ce problème optique en mettant en œuvre des outils de post traitement du film infrarouge. Nous avons essayé de procéder à des soustractions d'images. Nous avons par exemple soustrait la première image faisant apparaître la signature thermique des spots à tout le film infrarouge. Cette signature évoluant au cours du temps, ce type de post traitement n'a pas donné de résultats probants (on observe toujours une partie de l'excitation qui écrase, comme précédemment, la dynamique de l'image).

Nous avons alors évoqué la possibilité d'utiliser comme en optique visible, un filtre polarisant, ou bien des écrans diffusants à placer devant les spots à halogènes. Nous avons aussi pensé à demander à l'équipe de restauration présente sur place de procéder à un nettoyage de l'œuvre d'art, de façon à supprimer la couche de cire gênant notre analyse. Nous avons enfin évoqué la possibilité de mettre en œuvre un cube optique ou une optique de Köhler pour l'excitation. Pour des raisons de temps, de non disponibilité du matériel ou tout simplement de non faisabilité, aucune de ces solutions n'a été mise en œuvre au moment de l'étude.

En définitive, la solution que nous avons trouvée, a consisté en l'utilisation d'un autre type d'excitation : un flux d'air chaud déjà mis en œuvre lors d'analyses précédentes. Celui-ci a en effet pour avantage de ne pas dépendre des propriétés optiques de l'œuvre d'art (de la couche de cire) et donc de permettre l'analyse de cette fresque antique (Figure II.58). Les conditions expérimentales retenues pour l'étude sont : un balayage de la zone à analyser avec un sèche-cheveux d'une puissance électrique de 2000 watts pendant une durée de 85 secondes.



Figure II.58 : Le dispositif expérimental utilisé

Les résultats obtenus dans ce cadre sont présentés sur la Figure II.59. Il s'agit d'un thermogramme infrarouge de la scène visée obtenue en fin d'excitation (du balayage d'excitation). Ce thermogramme fait apparaître une série de signaux photothermiques plus importants, situés pour la majeure partie d'entre eux à l'endroit des défauts détectés par analyse visuelle et acoustique par les restaurateurs professionnels : A l'aplomb du bouchage

de lacune, à l'aplomb du bouchage du point d'ancrage, à l'aplomb des deux cavités et à l'aplomb de la fissure.

Ce thermogramme fait aussi apparaître une signature plus importante en haut à gauche de la partie analysée. A cet endroit, les restaurateurs n'avaient pas vu de défaut. Nous avons alors demandé à Antoinette Sinigaglia, restauratrice professionnelle présente sur le site au moment des analyses, de procéder à une nouvelle inspection de l'œuvre à cet endroit particulier. Cette inspection a alors confirmé la présence d'un défaut.

Ces résultats montrent qu'une méthode photothermique mettant en œuvre une excitation par flux d'air chaud peut aussi être un outil d'aide à la restauration du patrimoine, complémentaire des méthodes classiques existantes mais aussi de la thermographie infrarouge stimulée optiquement dans les cas où des problèmes optiques d'excitation existent.

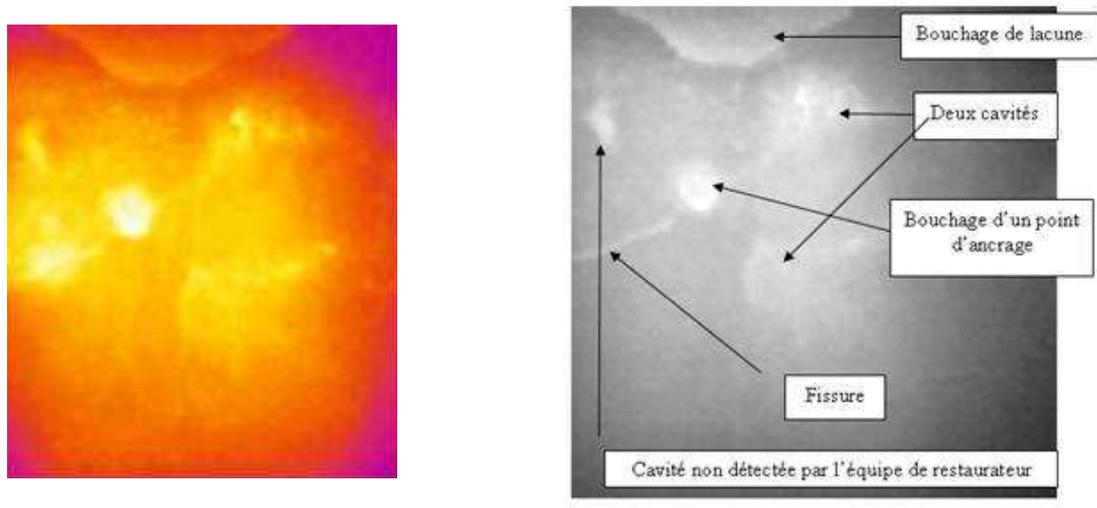


Figure II.59 : Analyse photothermique d'une peinture murale antique (IIe siècle avant J.C.) exposées dans la villa Kerylos de Beaulieu sur Mer

VI- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection de défauts situés dans les œuvres d'art.

Dans le premier paragraphe, nous avons présenté le Système d'Analyse des Matériaux Minces par Thermographie InfraRouge (SAMMTHIR) développé pour l'étude. C'est le premier système d'analyse étendue permettant une analyse aléatoire.

Dans le second paragraphe, nous avons présenté les différentes études menées sur un échantillon de laboratoire : une réplique partielle de fresque. Nous avons présenté les résultats obtenus lors des études pulsée et aléatoire ainsi que des post-traitements développés pour aider à la détection des défauts et à la prise de décision. La technique permet bien la détection de quatre défauts situés dans la réplique de fresque.

Dans le troisième paragraphe, nous avons étendu ces méthodes à l'analyse de la détection de défaut situé dans d'autres types d'œuvres d'art telles que des marqueteries (échiquier, échantillons du programme européen LASERACT, couvercle de boîte malgache), des vitraux et des céramiques. Même s'il a fallu parfois l'adapter, la technique donne là aussi de bons résultats qualitatifs quant à la détection de décollement dans les marqueteries, la détection de décollement de grisaille sur les vitraux et la détection d'agrafes et de fissures sur les céramiques.

Dans le dernier paragraphe, nous avons montré les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection de défaut dans les peintures murales *in situ*. Il était important de pouvoir éprouver le système expérimental dans les conditions réelles d'un chantier de restauration. Le système a donc été testé sur différents sites tels que l'église Saint-Florentin de Bonnet, pour la détection de défaut dans différents types de peintures murales (fresque et toile marouflée), à Saint-Savin où les résultats obtenus par thermographie infrarouge stimulée sont corrélés aux résultats obtenus par interférométrie holographique et par sondage acoustique, à Villefranche-sur-Mer pour l'analyse de peintures murales de Jean Cocteau ainsi qu'à la villa Kerylos pour l'analyse d'une fresque déposée. Ces résultats montrent d'abord que la méthode photothermique permet bien de détecter *in situ* des défauts situés dans des peintures murales et dans des conditions réelles de restauration. Ils montrent ensuite que les résultats obtenus par analyse photothermique infrarouge sont

toujours corrélés à ceux obtenus par analyse acoustique. Ils montrent encore que la méthode photothermique semble, par rapport à la méthode acoustique, permettre une détection plus précise, plus rapide et plus objective de ces défauts (voire même moins destructive en ce qui concerne les défauts situés à proximité immédiate de la surface de la peinture murale, qu'une analyse acoustique pourrait détériorer). Ils montrent enfin que la variante aléatoire de la thermographie infrarouge stimulée, en plus de permettre une analyse sous contraintes énergétiques moindres, semble donner accès à des images plus résolues que la variante pulsée de cette méthode.

CHAPITRE III : MESURE DE DIFFUSIVITE THERMIQUE LONGITUDINALE

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la radiométrie photothermique permettait bien la détection de défauts situés dans différents types œuvres d'art. Dans ce chapitre, nous approchons maintenant ses possibilités en matière de caractérisation géométrique des défauts. L'objectif à terme est d'estimer la profondeur à laquelle se situent les défauts. Pour cela nous envisageons de déterminer ce paramètre à partir d'un ajustement entre la théorie et l'expérience et à partir de l'utilisation de méthodes de techniques inverses du type Levenberg-Marquardt [40]. Pour alimenter ce modèle, il faut connaître les propriétés thermophysiques des matériaux étudiés et en particulier leur diffusivité thermique. Nous avons alors le choix d'utiliser des valeurs bibliographiques ou de procéder à une mesure *in situ* de ce paramètre thermophysique. Nous avons choisi la seconde solution. Ce choix est motivé par deux raisons : la première est que la diffusivité réelle du matériau analysé peut être éloignée des valeurs théoriques du fait du vieillissement, des aléas climatiques, de l'environnement dans lequel il est conservé et de différents procédés de fabrication selon les époques. La deuxième raison est qu'il faut pouvoir donner les informations aux restaurateurs sur place et de manière assez rapide car les interventions sur un chantier de restauration sont aussi limitées dans le temps.

Pour mesurer la diffusivité thermique d'un matériau sur site, nous avons là aussi plusieurs solutions. Nous pouvons prélever un échantillon de l'œuvre d'art et mettre en œuvre une méthode classique de mesure de ce paramètre thermophysique, cependant cette méthode s'avère destructrice pour l'œuvre d'art. Pour respecter l'intégrité de cette dernière, nous avons donc développé une méthode utilisable *in situ* et non destructive pour la peinture murale étudiée. L'épaisseur du couple enduit – mur composant la peinture murale étant souvent de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur, une mesure de diffusivité thermique transverse est souvent impossible. Nous avons donc choisi de développer une méthode de mesure de diffusivité thermique longitudinale de l'œuvre d'art. C'est la présentation de cette dernière et des résultats obtenus avec cette méthode que nous présentons dans ce chapitre. Il se décompose en trois parties

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation du principe de cette nouvelle technique de mesure de diffusivité thermique.

La seconde partie de ce chapitre visera à valider cette technique de mesure à partir de simulation de l'expérience photothermique.

La dernière partie de ce chapitre présentera les résultats expérimentaux de mesure de diffusivité thermique obtenus à l'aide de cette méthode.

I- Principe de la méthode de mesure de diffusivité thermique longitudinale utilisée

I-1-Présentation du principe de la technique de mesure de diffusivité thermique longitudinale retenue

Afin d'aboutir à une mesure *in situ* de diffusivité thermique, nous nous sommes tournés vers une mesure longitudinale de ce paramètre thermophysique. Parmi toutes les techniques proposées par la littérature, celle mise en œuvre en « face arrière » par le LEMTA de Nancy semblait la plus prometteuse. Nous avons donc essayé, avec l'aide de Benjamin Remy de la mettre en place pour des analyses « face avant ». C'est ce travail que nous présentons ici.

I-2-Modélisation thermique de la technique de mesure retenue

Comme pour la méthode « face arrière », le principe de la méthode « face avant » consiste à éclairer l'échantillon à analyser avec un spot lumineux pendant un bref instant, puis à trouver la diffusivité thermique recherchée à partir de l'analyse spectrale des thermogrammes fournis par une caméra de thermographie infrarouge filmant l'expérience. Examinons ensemble la technique de mesure de diffusivité adaptée :

Soit un échantillon anisotrope soumis sur sa face avant à une excitation laser flash $\delta(t)$, pouvant être de forme quelconque en espace $f(x,y)$.

Soient λ_x , λ_y et λ_z les conductivités thermiques de l'échantillon, ces conductivités thermiques seront supposées constantes dans le temps et avec la température.

Soient h_0 et h_e les coefficients d'échange des faces avant et arrière, h_l le coefficient d'échange des surfaces latérales.

Soit e l'épaisseur du matériau analysé. Cette épaisseur est considérée très faible devant la longueur L et la largeur l de l'échantillon analysé, de façon à nous permettre de négliger les pertes latérales.

Soit T_{ext} , la température initiale de l'échantillon étudié, supposé initialement en équilibre avec l'environnement

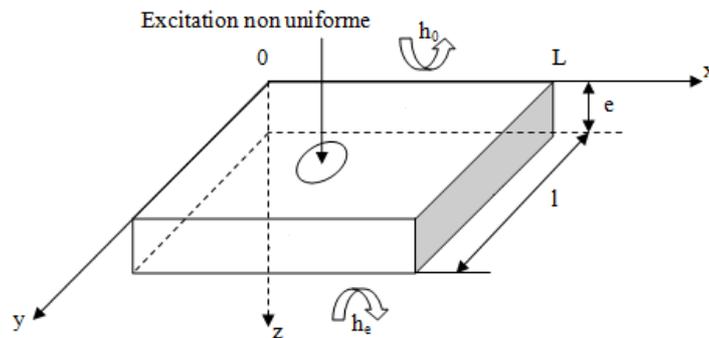


Figure III.1 : Principe de l'expérience

Ces hypothèses conduisent au système différentiel suivant :

Equation de la chaleur :

$$\lambda_x (\partial^2 T / \partial x^2) + \lambda_y (\partial^2 T / \partial y^2) + \lambda_z (\partial^2 T / \partial z^2) = 0 = \rho c (\partial T / \partial t) \quad (1)$$

$$\text{En } z = 0 \quad \lambda_z (\partial T / \partial z)_{z=0} = h_0 (T(z=0) - T_{ext}) - f(x, y) \delta(t)$$

$$\text{En } z = e \quad \lambda_z (\partial T / \partial z)_{z=e} = -h_e (T(z=e) - T_{ext})$$

$$\text{En } x = 0 \text{ et } x = L_x \quad \partial T / \partial x = 0$$

$$\text{En } y = 0 \text{ et } y = L_y \quad \partial T / \partial y = 0$$

$$\text{A } t = 0 \quad T = T_{ext} \quad (2)$$

Afin de résoudre ce système différentiel, nous allons utiliser trois transformées intégrales ; une transformée de Laplace en temps et deux transformées de Fourier en cosinus en espace (formule 3) :

$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, z, p) = \int_{t=0}^{\infty} \int_{y=0}^{L_y} \int_{x=0}^{L_x} T(x, y, z, t) \cos(\alpha_n x) \cos(\beta_m y) \exp(-pt) dx dy dt \quad (3)$$

Avec $\alpha_n = n\pi/L_x$ et $\beta_m = m\pi/L_y$

En appliquant cette transformation intégrale au système différentiel précédent, l'équation différentielle à résoudre ne dépend plus que de z et peut aisément être résolue grâce à la méthode des quadripôles thermiques. On obtient alors :

$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, z=0, p) = \frac{F(\alpha_n, \beta_m)(ch(\gamma_{n,m}e) + h_e sh(\gamma_{n,m}e)/(\lambda_z \gamma_{n,m}))}{\lambda_z \gamma_{n,m} sh(\gamma_{n,m}e) + (h_0 + h_e)ch(\gamma_{n,m}e) + h_0 h_e sh(\gamma_{n,m}e)/(\lambda_z \gamma_{n,m})} \quad (4)$$

Avec $F(\alpha_n, \beta_m)$ la transformée de Fourier-Laplace de $f(x, y)\delta(t)$.

$$\text{Et } \gamma_{n,m} = \sqrt{p/a_z + (\lambda_x/\lambda_z)\alpha_n^2 + (\lambda_y/\lambda_z)\beta_m^2} = \sqrt{p/a_z + (a_x/a_z)\alpha_n^2 + (a_y/a_z)\beta_m^2}$$

$$\text{Or } a_x = \frac{\lambda_x}{e_c}, a_y = \frac{\lambda_y}{e_c} \text{ et } a_z = \frac{\lambda_z}{e_c}$$

D'où $\gamma_{n,m}$ peut se réécrire :

$$\gamma_{n,m} = \sqrt{p/a_z + (a_x/a_z)\alpha_n^2 + (a_y/a_z)\beta_m^2}$$

Et en mettant $\frac{1}{a_z}$ en facteur

$$\gamma_{n,m} = \sqrt{(p + a_x \alpha_n^2 + a_y \beta_m^2)/a_z}$$

On remarque alors que $a_x \alpha_n^2 + a_y \beta_m^2 = cte$ d'où la nouvelle expression de $\gamma_{n,m}$:

$$\gamma_{n,m} = \sqrt{(p + cte)/a_z}$$

On peut alors effectuer un changement de variable $p' = p + cte$, d'où :

$$\gamma_{n,m} = \sqrt{p'/a_z}$$

Calculons maintenant la transformée de Laplace inverse de l'expression de la température obtenue en face avant, ce en prenant en compte le changement de variable ($p = p' - cte$), on obtient :

$$\theta(\alpha_n, \beta_m, z = 0, t) = \int_{cte}^{\infty} \Theta(\alpha_n, \beta_m, z = 0, p' - cte) \exp(+ (p' - cte)t) dp' \quad (5)$$

Le terme $\exp((-cte)t)$ ne dépend pas de p' , il peut donc sortir de l'intégrale, d'où :

$$\theta(\alpha_n, \beta_m, z = 0, t) = \exp(+(-cte)t) \int_0^{\infty} \Theta(\alpha_n, \beta_m, z = 0, p') \exp(+p't) dp'$$

En utilisant maintenant les propriétés de changement d'échelle de la transformée de Laplace inverse, on obtient :

$$L^{-1}[f(kp)] = \frac{1}{k} F\left(\frac{t}{k}\right)$$

$$\theta(\alpha_n, \beta_m, z = 0, t) = \exp(-cte \cdot t) \cdot \int_0^{\infty} \theta(0, 0, t = 0, p') \cdot \exp(p' \cdot t) dp' \cdot \frac{F(\alpha_n, \beta_m)}{F(0, 0)}$$

D'où, après calcul de la transformée de Laplace :

$$\theta(\alpha_n, \beta_m, z = 0, t) = \exp(-cte \cdot t) \cdot \theta(0, 0, z = 0, t) \cdot \frac{F(\alpha_n, \beta_m)}{F(0, 0)}$$

D'où

$$\frac{\theta(\alpha_n, \beta_m, z = 0, t)}{\theta(0, 0, z = 0, t)} = \exp(-cte \cdot t) \cdot \frac{F(\alpha_n, \beta_m)}{F(0, 0)}$$

En utilisant les propriétés de la fonction logarithme, on obtient :

$$\ln \frac{\theta(\alpha_n, \beta_m, z = 0, t)}{\theta(0, 0, z = 0, t)} = -cte \cdot t + \ln \frac{F(\alpha_n, \beta_m)}{F(0, 0)}$$

On remarque alors que ce rapport est décrit par une droite de pente $-(a_x \alpha_n^2 + a_y \beta_m^2) = cte$

Cela signifie que les diffusivités thermiques a_x et a_y peuvent être déduites simplement de la pente de la courbe représentant le rapport du logarithme des coefficients de Fourier d'ordre n par rapport à un ordre 0 tracée par rapport au temps.

II- Simulation numérique et validation du programme d'estimation de diffusivité thermique

Afin de tester cette procédure de mesure longitudinale de diffusivité thermique, nous avons d'abord entrepris une série de simulations, basées sur l'utilisation du progiciel de résolution de l'équation de la chaleur COMSOL.

Notre travail de simulation s'est décomposé en deux étapes. Dans un premier temps, afin de valider notre logiciel de dépouillement, nous avons d'abord développé une mesure de diffusivité longitudinale par analyse photothermique face arrière. Cette technique a déjà été validée par l'équipe du LEMTA de Nancy. Nous avons alors essayé de retrouver leurs résultats.

Dans une seconde étape, nous avons développé une série de simulations visant à étudier les possibilités de la méthode lors d'une analyse face avant, ce qui est alors, à notre connaissance, totalement nouveau.

II-1-Les conditions de simulation retenues

Que ce soit pour l'analyse face arrière ou pour l'analyse face avant, les conditions de simulation retenues pour l'étude sont identiques (sauf bien sûr en ce qui concerne l'endroit du dépôt d'énergie).

Tout d'abord, nous nous sommes placés en géométrie 2D afin de mettre en œuvre des calculs numériques relativement légers. Cela signifie alors que l'énergie laser est déposée sur une bande d'une longueur de 1 mètre. La longueur d'excitation a été fixée à 1 millimètre (dimension proche du diamètre du laser utilisé pour la partie expérimentale). La durée d'excitation a été fixée à 3 millisecondes de façon à s'approcher d'une fonction delta de Dirac. Selon le type d'analyse, elle a été déposée du côté de l'observateur ou du côté opposé.

En ce qui concerne l'échantillon étudié, il s'agit d'un bloc de plâtre de 1 mètre de longueur (géométrie 2D), de 6 centimètres de largeur et de 2 millimètres d'épaisseur.

Les propriétés thermophysiques du plâtre prises en compte sont :

- Conductivité thermique : $k=0.4 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Masse volumique : $\rho=1100 \text{ Kg.m}^{-3}$
- Chaleur spécifique : $C_p=830 \text{ J.Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Diffusivité thermique théorique : $a=4,38.10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

Des échanges convectifs sont considérés sur les faces supérieure et inférieure de l'échantillon (coefficient d'échange convectif $h=10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), conformément aux hypothèses retenues pour aboutir à la technique de mesure de diffusivité thermique longitudinale. Enfin, un maillage plus fin a été réalisé à l'endroit de l'excitation et le pas du temps d'étude est de 0,25 secondes.

Comme indiqué précédemment, la procédure de détermination de la diffusivité longitudinale consiste d'abord à extraire à partir des résultats de simulations COMSOL, à chaque instant, le profil spatial de température, tracé perpendiculairement à la ligne d'excitation.

Ensuite on calcule la transformée en cosinus de ces différents profils, de façon à calculer les coefficients de Fourier à tous les ordres pairs.

Il consiste, dans une troisième étape, à calculer pour chaque image le rapport de ces coefficients de Fourier à celui obtenu à l'ordre 0.

Dans une quatrième étape l'on trace l'évolution de ce rapport au cours du temps.

Finalement la pente de la droite obtenue est calculée, puis la diffusivité recherchée en est déduite à l'aide de la formule :

$$a = \frac{\text{Pente de la courbe} \cdot \text{Dimension de la zone analysée}^2}{\text{Ordre de Fourier}^2 \cdot \pi^2}$$

II-1-1- Exemple de résultats obtenus lors d'une analyse face arrière de l'échantillon étudié

A partir des conditions de simulation décrites précédemment, le logiciel COMSOL conduit à des profils de température, mesurés en face arrière de l'échantillon qui évoluent au cours du temps. A titre d'exemple, nous avons tracé sur la Figure III.2 des profils obtenus pour des temps de 0 s à 10 s par pas de 0,5 s. Ces profils montrent que la signature thermique de l'excitation laser est d'autant plus large et d'autant moins intense que le temps s'écoule.

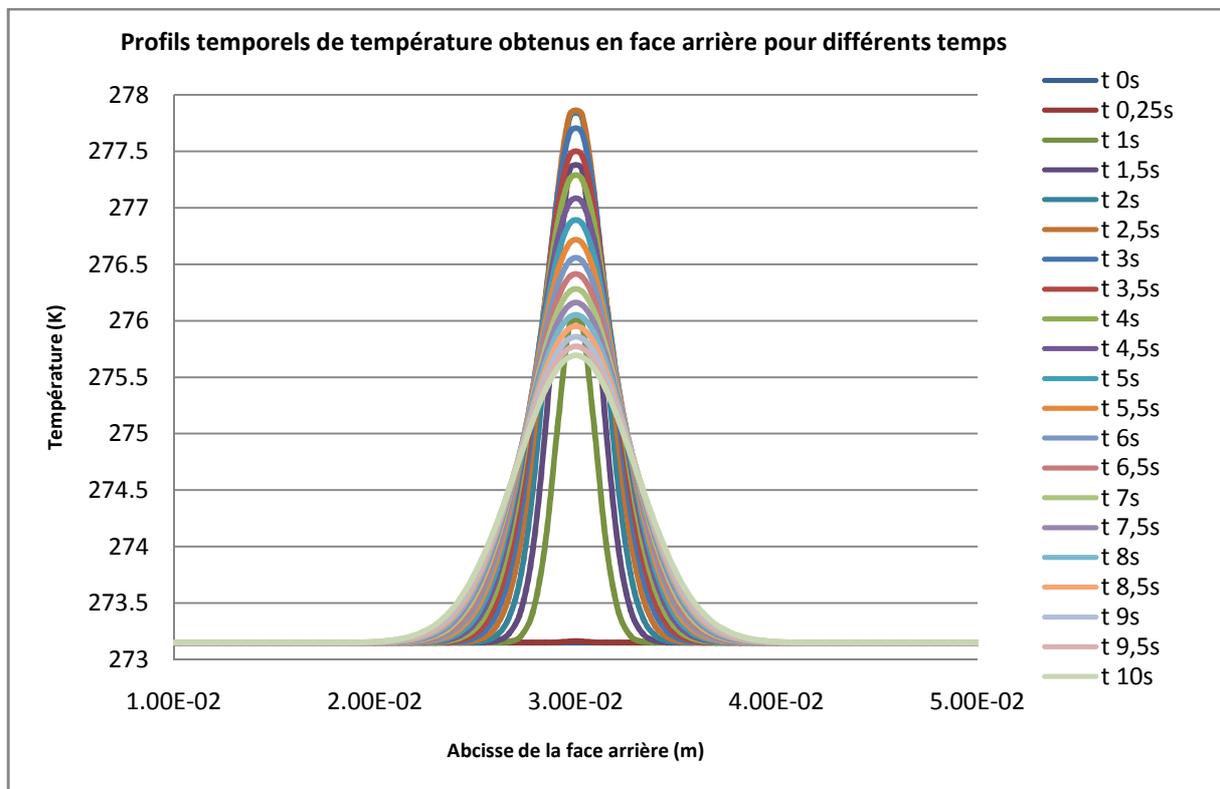


Figure III.2 : Profils temporels de température obtenus en face arrière pour différents temps

Sur la Figure III.3, nous avons ensuite tracé l'évolution du rapport des coefficients de Fourier à l'ordre 2, au cours du temps. Cette figure montre, comme le prévoit la théorie, une droite de pente négative.

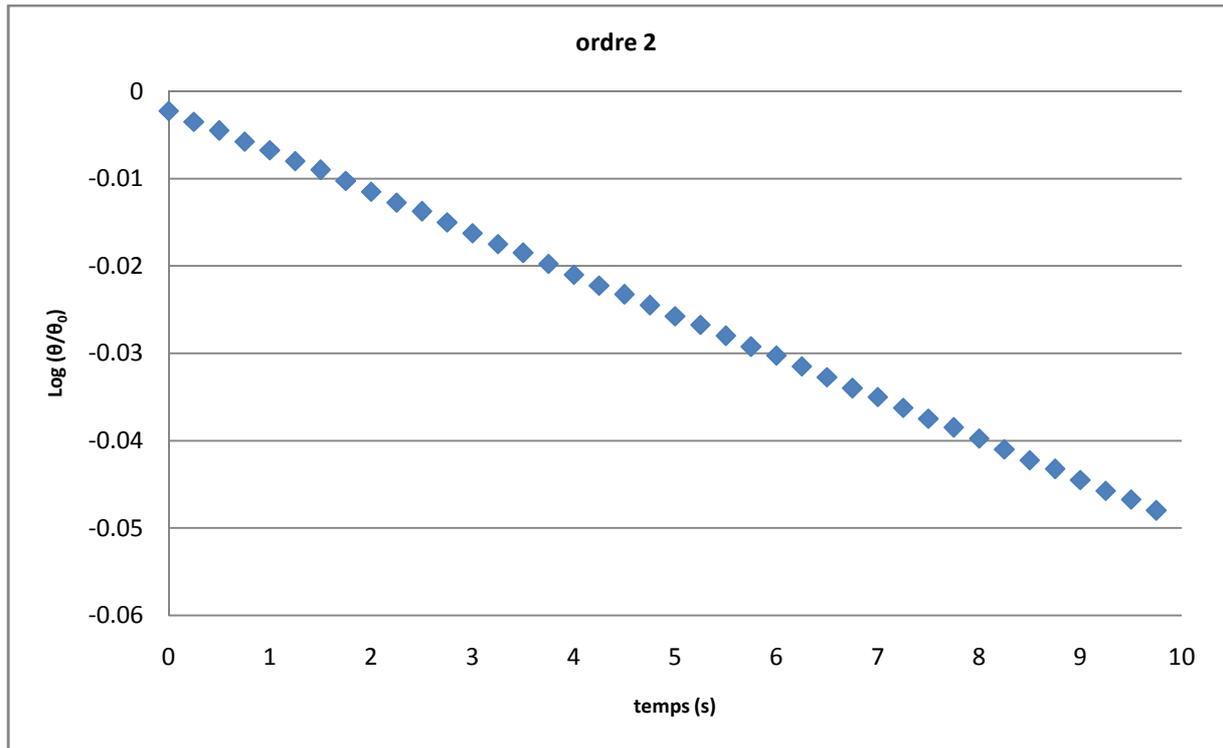


Figure III.3 : Rapport des coefficients de Fourier à l'ordre 2

Nous avons alors mesuré cette pente et trouvé une valeur de $-4,71 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Sachant que la longueur de la zone analysée est de 6 centimètres, nous aboutissons à une valeur de diffusivité thermique de $4,30 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour une valeur théorique de $4,38 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Ces valeurs sont très proches, au bruit numérique de simulation près, ce qui montre bien la faisabilité de la méthode.

Afin de tester les limites de la méthode, nous avons ensuite considéré les ordres 4, 6, 8, 10, 20, 30 des coefficients de Fourier. Les résultats obtenus sont présentés Figure III.4 et dans le tableau, Figure III.5. Ils montrent que la méthode donne des résultats cohérents jusqu'à un ordre égal à 10, voire même égal à 20, ensuite le calcul de la pente de la droite obtenu devient plus délicat, ce qui engendre une incertitude dans la détermination de la diffusivité thermique longitudinale.

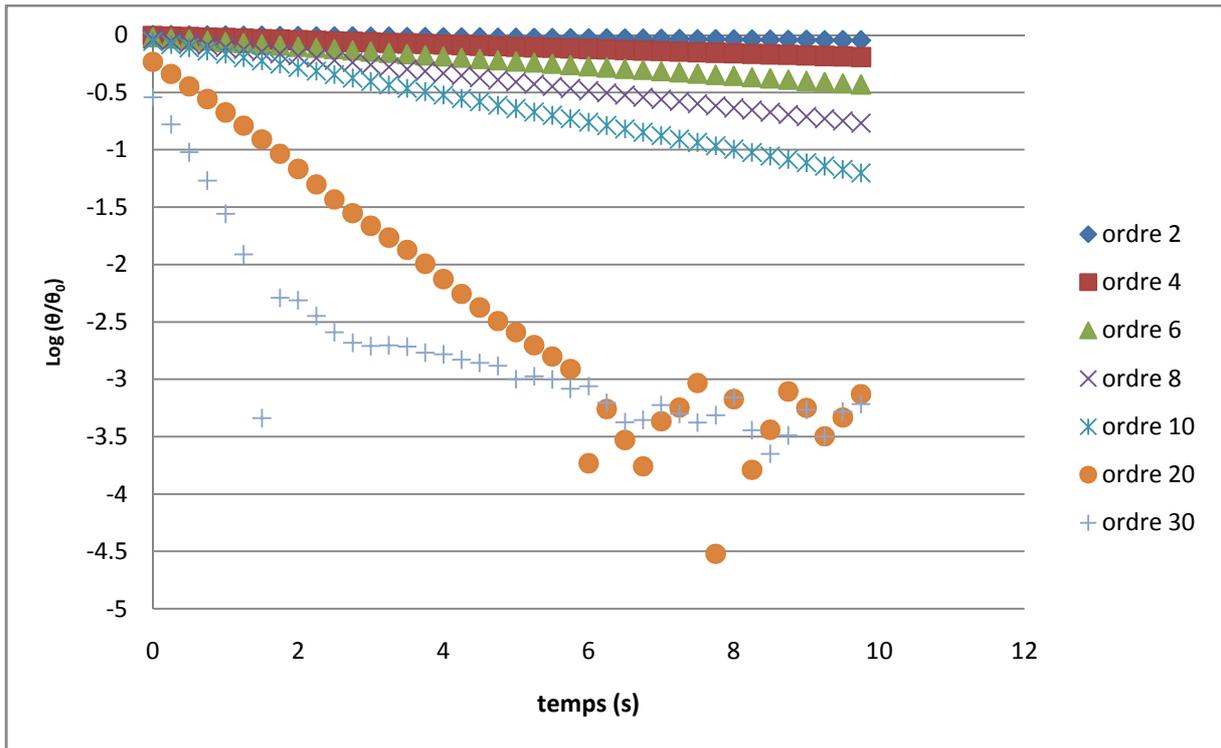


Figure III.4 : Graphique récapitulatif des courbes calculées à différents ordres

	Diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$)	Erreur relative (%)
Ordre 2	$4,295.10^{-7}$	1,9
Ordre 4	$4,296.10^{-7}$	1,9
Ordre 6	$4,296.10^{-7}$	1,9
Ordre 8	$4,298.10^{-7}$	1,9
Ordre 10	$4,301.10^{-7}$	1,8
Ordre 20	$4,367.10^{-7}$	0,3
Ordre 30	$4,883.10^{-7}$	11,5

Figure III.5 : Tableau récapitulatif de la diffusivité estimée grâce aux simulations numériques

II-1-2- Exemple de résultats obtenus lors d'une analyse face avant de l'échantillon

Après avoir validé notre outil de dépouillement lors d'une étude face arrière et retrouvé les résultats obtenus par le LEMTA de Nancy, nous avons abordé l'étude face avant. Les conditions expérimentales sont, comme nous l'avons déjà vu (sauf bien sûr le lieu de l'excitation), identiques pour les deux variantes.

Comme dans le cas de l'analyse face arrière, nous avons d'abord tracé sur la Figure III.6 l'évolution des profils de température au cours du temps. De la même façon qu'en face arrière, ces profils deviennent moins hauts et plus larges au fur et à mesure que le temps s'écoule.

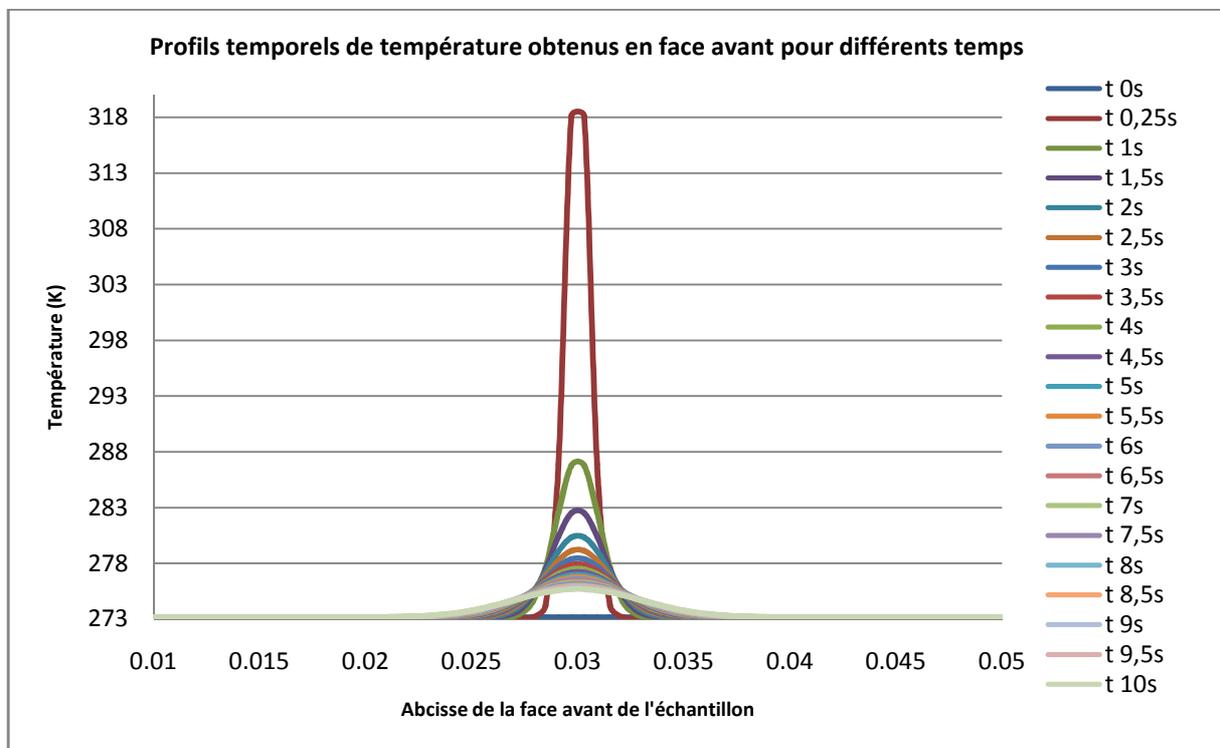


Figure III.6 : Profils temporels de température obtenus en face avant pour différents temps

Sur la figure III.7, nous avons tracé l'évolution du rapport des coefficients de Fourier, à l'ordre 2 du temps. Cette figure montre, là aussi, comme attendu une droite de pente négative.

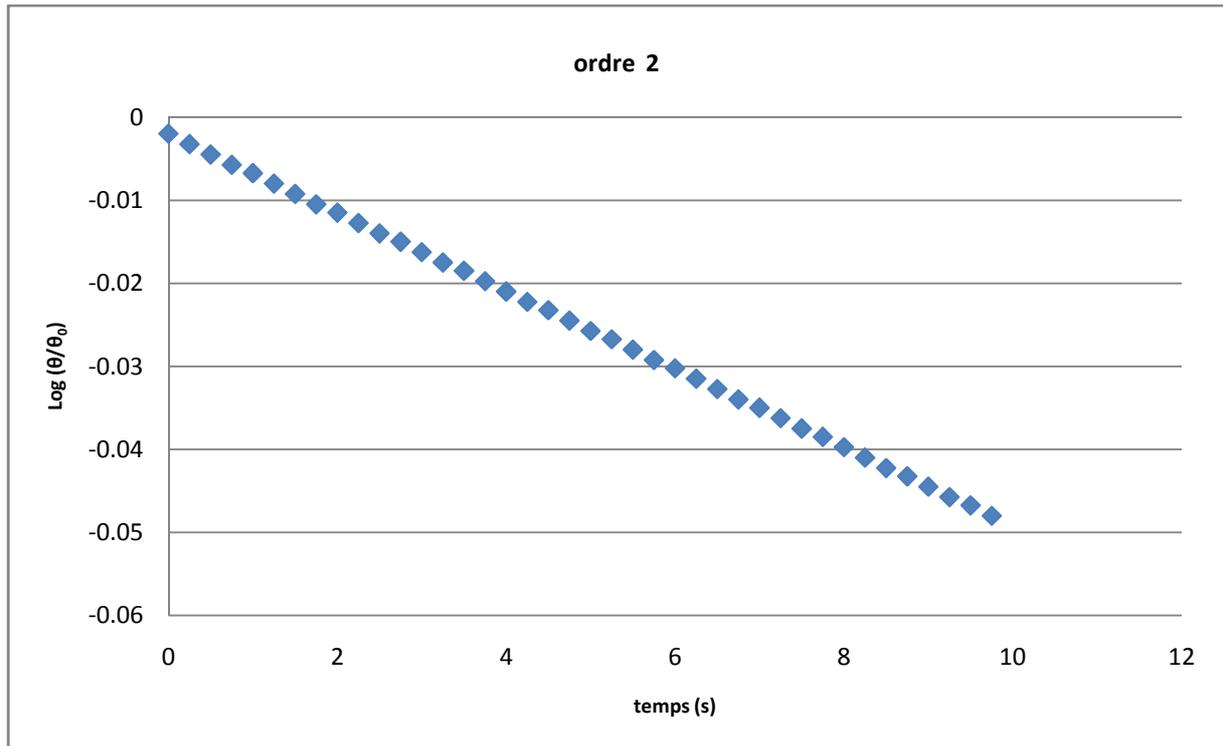


Figure III.7 : Rapport des coefficients de Fourier à l'ordre 2

Nous avons alors mesuré cette pente et trouvé une valeur de $-4,70 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Sachant que la longueur de la zone analysée est de 6 centimètres, nous aboutissons à une valeur de diffusivité thermique de $4,29 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Cette valeur est très proche, aux erreurs numériques près, de la valeur théorique égale à $4,38 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Cela montre la faisabilité de la méthode.

Nous avons ensuite considéré les ordres 4, 6, 8, 10, 20, 30 des coefficients de Fourier, à fin de fixer les limites de la méthode. La figure III.8 et le tableau, Figure III.9 montrent que la méthode semble encore utilisable jusqu'à un ordre de 20.

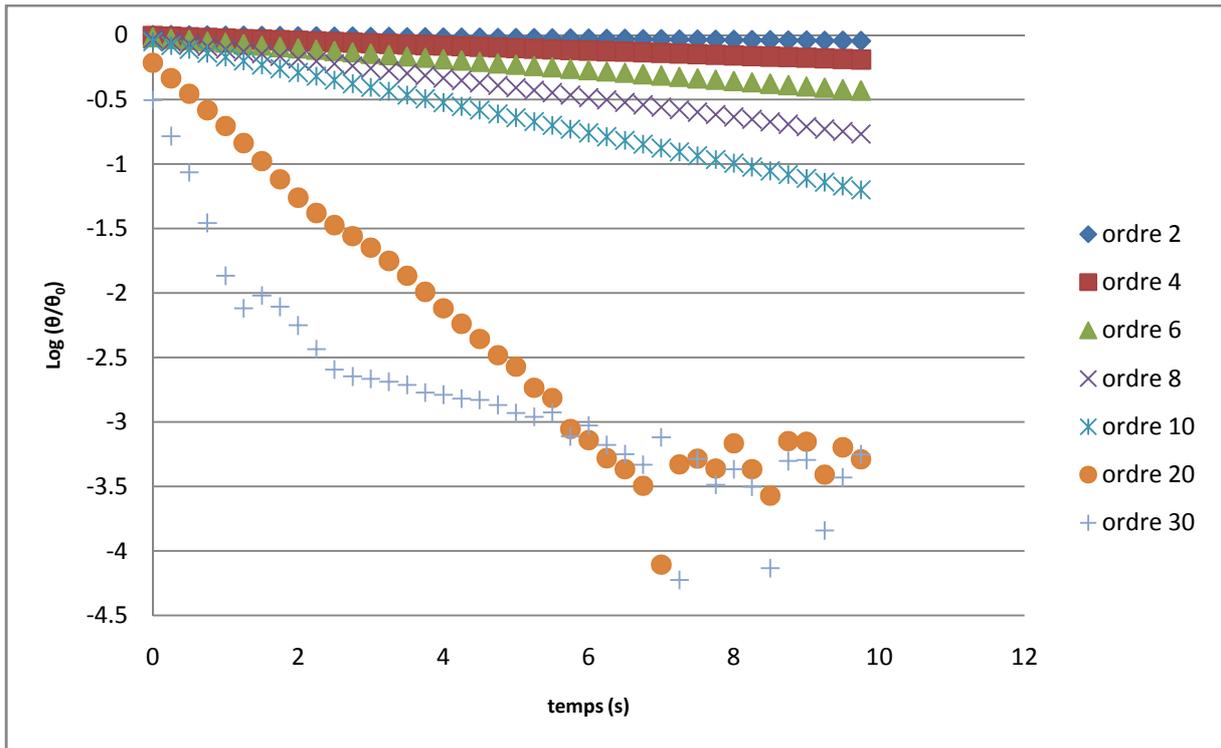


Figure III.8 : Graphique récapitulatif des courbes calculées à différents ordres

Ordre	Diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$)	Erreur relative (%)
Ordre 2	$4,289.10^{-7}$	2
Ordre 4	$4,289.10^{-7}$	2
Ordre 6	$4,288.10^{-7}$	2,1
Ordre 8	$4,288.10^{-7}$	2,1
Ordre 10	$4,289.10^{-7}$	2
Ordre 20	$4,318.10^{-7}$	1,4
Ordre 30	$4,524.10^{-7}$	3,28

Figure III.9 : Tableau récapitulatif des valeurs de diffusivité thermique

III- Mesure de diffusivité thermique longitudinale : les résultats expérimentaux

III-1- Dispositif expérimental mis en œuvre

Suite à ces résultats théoriques positifs, nous sommes passés à une analyse expérimentale. Le nouveau dispositif expérimental est dérivé de SAMMTHIR du laboratoire. Il est constitué d'une diode laser émettant à 810 nm associée à une optique de collimation et focalisation. L'optique d'acquisition infrarouge est constituée d'une caméra « ondes longues » à bolomètres, travaillant en mode macro (pour avoir une résolution spatiale suffisante). Cette dernière est placée perpendiculairement à l'échantillon, à une distance d'environ 5 cm. Le faisceau lumineux issu de la diode laser est, du fait de l'encombrement de la caméra, envoyé de façon inclinée sur l'échantillon à analyser. Sa forme est de ce fait légèrement elliptique. La diode laser est pilotée en courant de façon à lui faire émettre une puissance de 2 W pendant une durée de 20 ms. La fréquence d'acquisition de la caméra thermographie infrarouge est de 50 Hz. (Figure III.10).

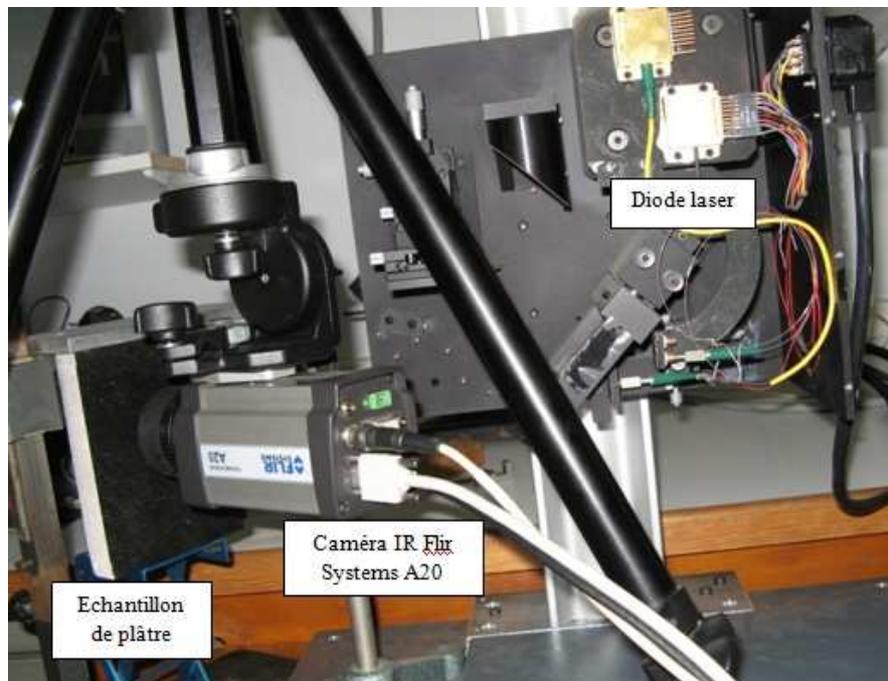


Figure III.10 : Dispositif expérimental

A ce dispositif expérimental, nous avons joint un nouveau logiciel de dépouillement des données prenant en compte le protocole de mesure décrit précédemment.

Dans un premier temps, ce logiciel permet de lire le film thermographique fourni par la caméra de thermographie infrarouge (Figure III.11).

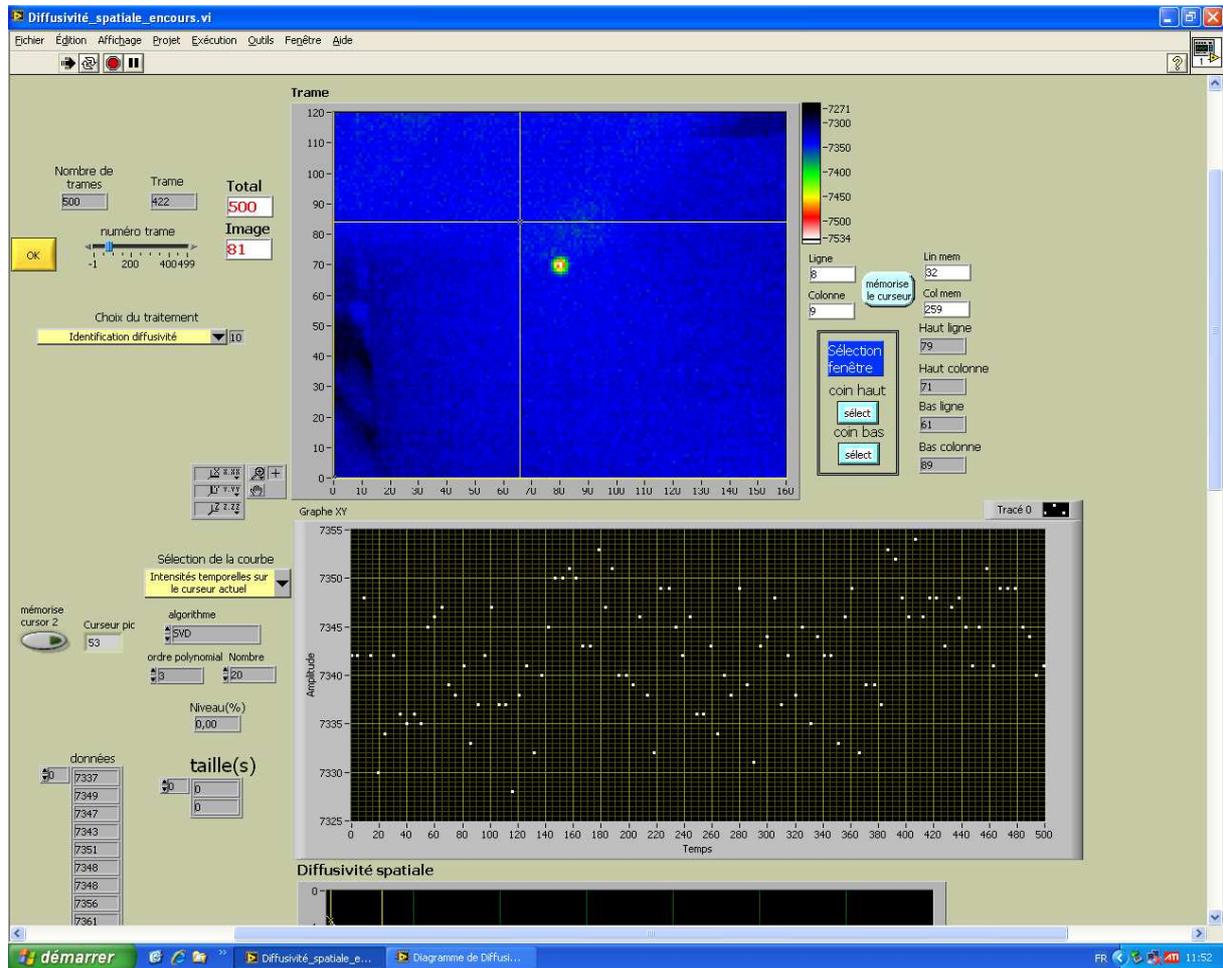


Figure III.11 : interface du logiciel de mesure de diffusivité spatiale

Dans un deuxième temps, afin de réduire les temps de calcul, le logiciel permet de fenêtrer la zone « utile » au traitement. Cela consiste à choisir une zone entourant la réponse thermique à l'excitation laser qui soit assez large pour que l'on puisse la considérer adiabatique sur les limites externes. Cette sélection de zone s'effectue à l'aide des curseurs qui définissent le coin supérieur gauche et le coin inférieur droit. Dans un troisième temps, comme cela est présenté dans la théorie, le logiciel calcule la moyenne de chaque colonne de la zone sélectionnée de façon à obtenir un profil unique. Cette opération est renouvelée pour chaque image. Le logiciel calcule ensuite la transformée de Fourier en cosinus de chacun de ces profils (une par image), puis le rapport des coefficients de Fourier. Le logiciel permet alors de tracer l'évolution de ces rapports en fonction du temps pour tous les ordres de calcul.

Enfin, le logiciel, à partir d'informations comme la fréquence d'analyse ou la dimension de la zone analysée, permet le calcul de la pente de la droite obtenue et par conséquent de la diffusivité longitudinale. (Ce pour tous les ordres de calcul).

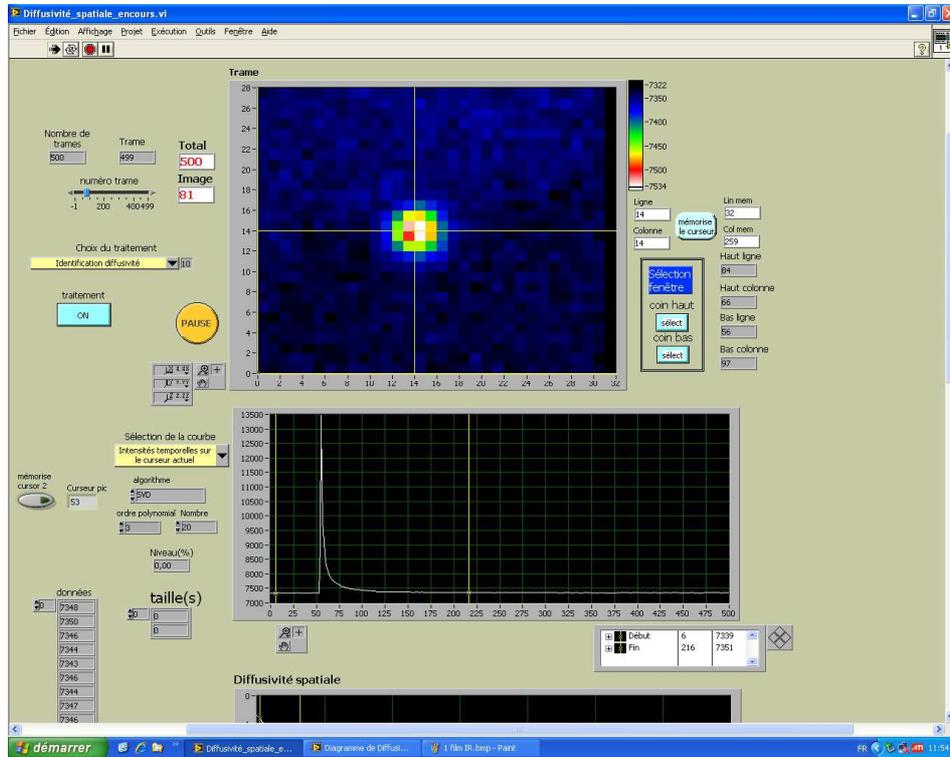


Figure III.12 : choix de la zone à traiter

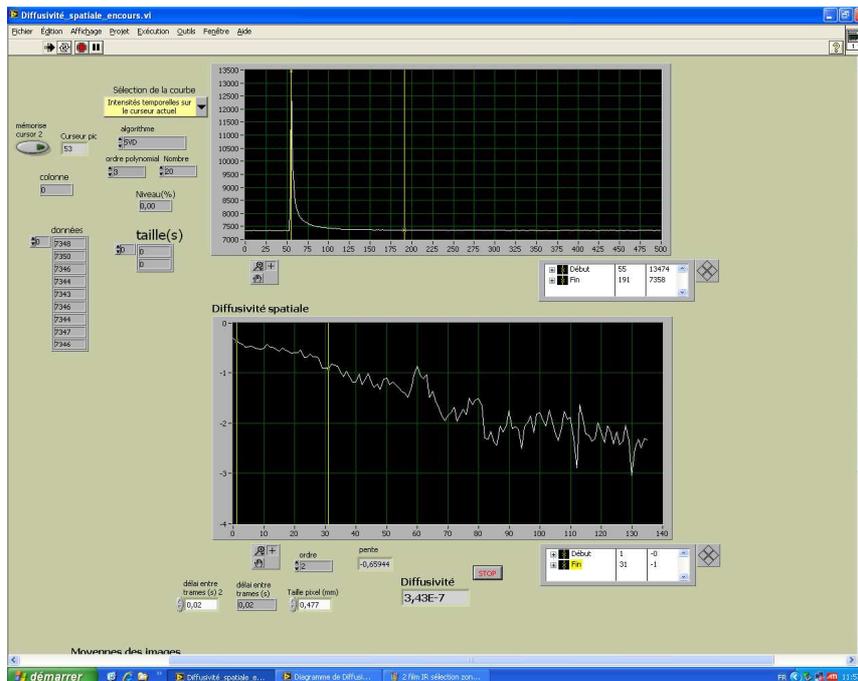


Figure III.13 : Réponse de l'échantillon et courbe obtenue par traitement

$3,53 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, à l'aide de la méthode des moments temporels et $3,49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à l'aide d'un ajustement théorie / expérience.

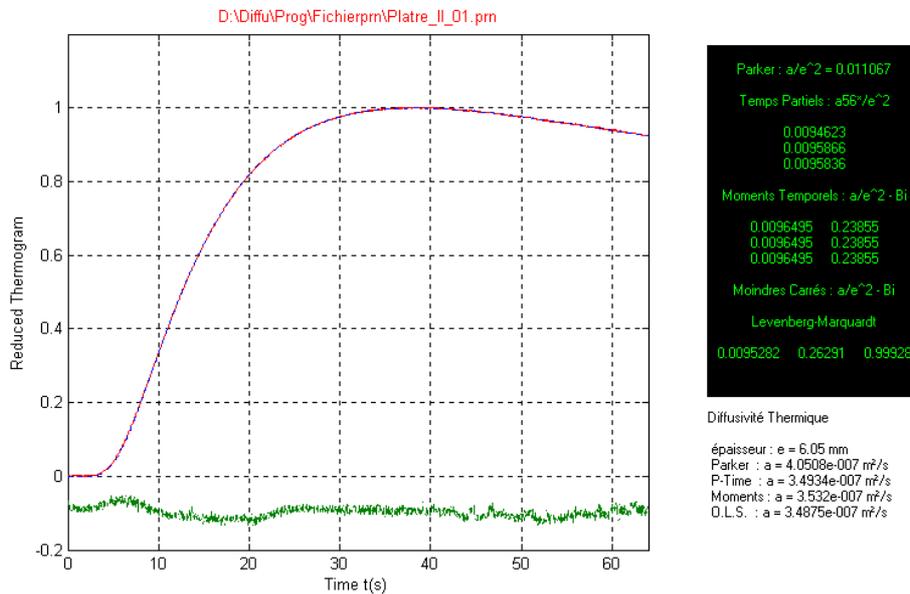


Figure III.14 : Interface du programme « Diffu » développé au LEMTA

III-3- Présentation des résultats obtenus lors de l'étude du bloc de plâtre

Comme le prévoit notre protocole expérimental, le bloc de plâtre étudié a tout d'abord été d'une part éclairé localement par un flash laser d'une puissance de 2 watts pendant 20 millisecondes. Il a ensuite été filmé par une caméra de thermographie infrarouge en synchronisation avec l'excitation. Un exemple d'image infrarouge obtenue est présenté sur la Figure III.15 présentant quatre thermogrammes à des instants différents. On remarque bien que l'évolution temporelle de la tache laser devient plus étendue et moins intense au fur et à mesure que le temps s'écoule.

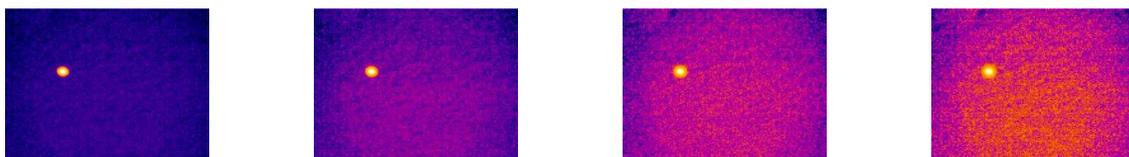


Figure III.15 : Evolution de la signature infrarouge de l'échauffement laser avec le temps

Le film infrarouge est ensuite traité avec un logiciel de mesure de diffusivité bidimensionnelle présenté précédemment. A l'ordre 2, il conduit au résultat présenté sur la Figure III.16. Cette figure fait apparaître, comme attendu, une droite de pente négative

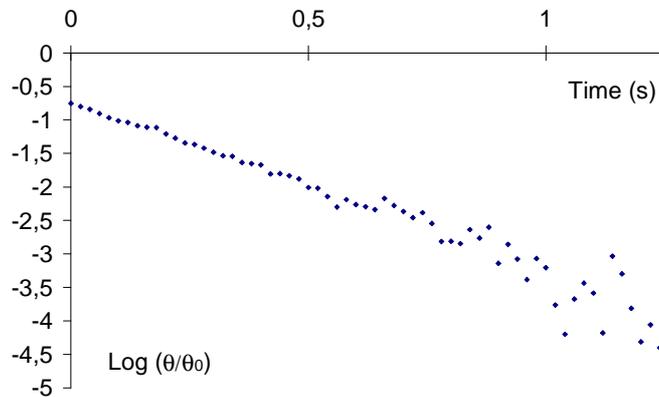


Figure III.16 : Evolution du rapport des logarithmes des coefficients de Fourier, calculés à l'ordre 2 et pour chaque image infrarouge en fonction du temps

Pour aboutir, à une mesure de diffusivité longitudinale, nous avons alors étalonné spatialement notre dispositif expérimental. Pour cela, nous avons placé une cale étalon en surface de l'objet étudié et déduit, de l'image infrarouge obtenue, une dimension spatiale du pixel égale à 116 μm . nous avons ensuite déterminé la pente de la droite obtenue, nous mesurons $-2,558 \text{ s}^{-1}$. Enfin, nous avons déterminé le nombre de pixels formant la zone analysée. Nous comptons 20 pixels. Compte tenu de toutes ces données, nous calculons la valeur de la diffusivité thermique longitudinale du bloc de plâtre étudié, nous trouvons :

$$a = \frac{\text{Pente} \cdot \text{Longueur caractéristique}^2}{\text{Ordre}^2 \cdot \pi^2}$$

$$a = \frac{2,558 \cdot (20 \cdot 116 \cdot 10^{-6})^2}{2^2 \cdot \pi^2} = 3,49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Nous trouvons une valeur égale à $3,49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette valeur est très proche de celles obtenues classiquement avec la méthode flash, ce qui montre les possibilités de la méthode de mesure en face avant, permettant donc la mesure *in situ* de ce paramètre thermophysique.

III-4- Mesure de la diffusivité thermique du mélange chaux/plâtre constituant la réplique partielle du Saint-Christophe

Après avoir montré que la thermographie infrarouge stimulée avait permis de détecter les défauts situés dans la réplique partielle du Saint-Christophe, nous visons à déterminer la profondeur à laquelle se situent ces défauts. Pour cela nous avons à mesurer la diffusivité thermique de l'enduit supportant la couche picturale. Nous avons alors mis en œuvre la méthode de mesure longitudinale pour aboutir à cet objectif.

Pour cela le mode opératoire expérimental suivi est identique à celui mis en œuvre pour l'étude de l'échantillon de plâtre. Ainsi, nous avons éclairé la mini fresque à l'aide d'un flash laser et observé la réponse thermique à l'aide d'une caméra de thermographie infrarouge équipé d'un objectif macro. Les réglages expérimentaux sont identiques à ceux retenus lors de l'étude du bloc de plâtre, à savoir une puissance laser de 2 watts délivrée pendant 20 ms, une fréquence d'analyse infrarouge de 50 Hz, un ordre d'analyse de 2 et enfin une analyse dans une zone de la fresque recouverte de peinture noire : yeux gauche et droit de l'enfant Jésus, coin supérieur et inférieur droit de la fresque (Figure III.17).



Figure III.17 : Mini fresque et zones étudiées pour la mesure de diffusivité thermique

Sur les Figures III.18 à III.21, nous présentons l'évolution temporelle du rapport des coefficients de Fourier. Comme le prévoit la théorie, ces figures font apparaître des droites de pente négative.

Manipulation 1 : œil gauche (pente = $-2,6s^{-1}$)

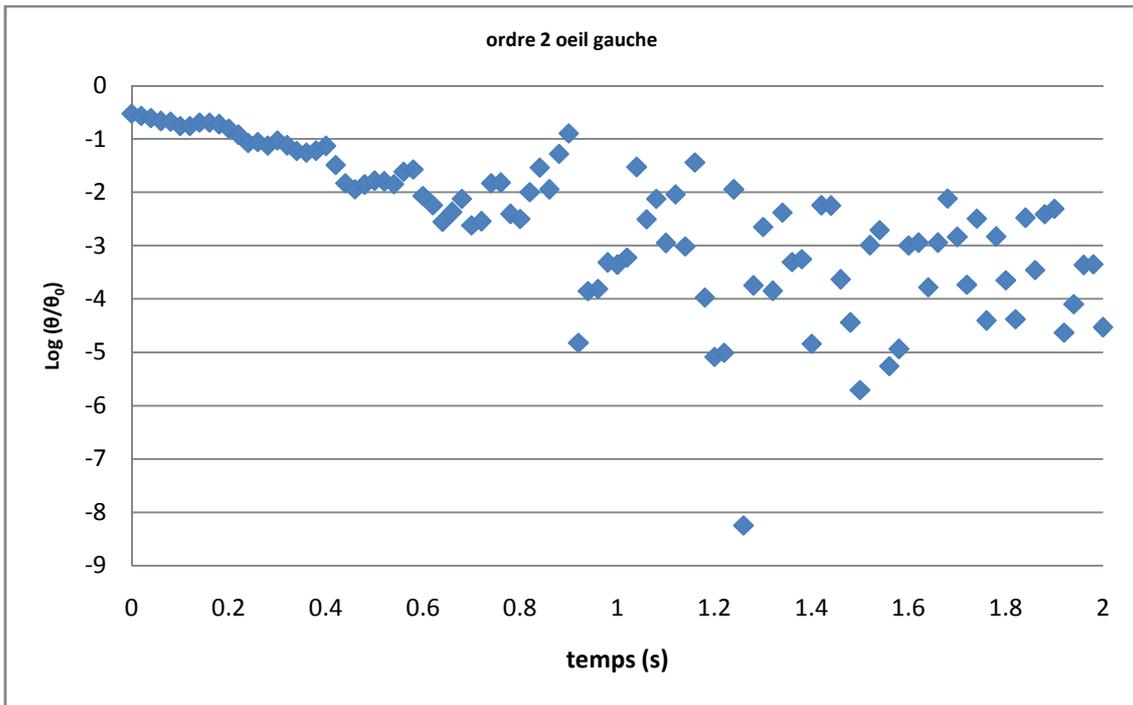


Figure III.18 : Estimation de la diffusivité thermique, œil gauche

Manipulation 2 : œil droit (pente = $-3,186s^{-1}$)

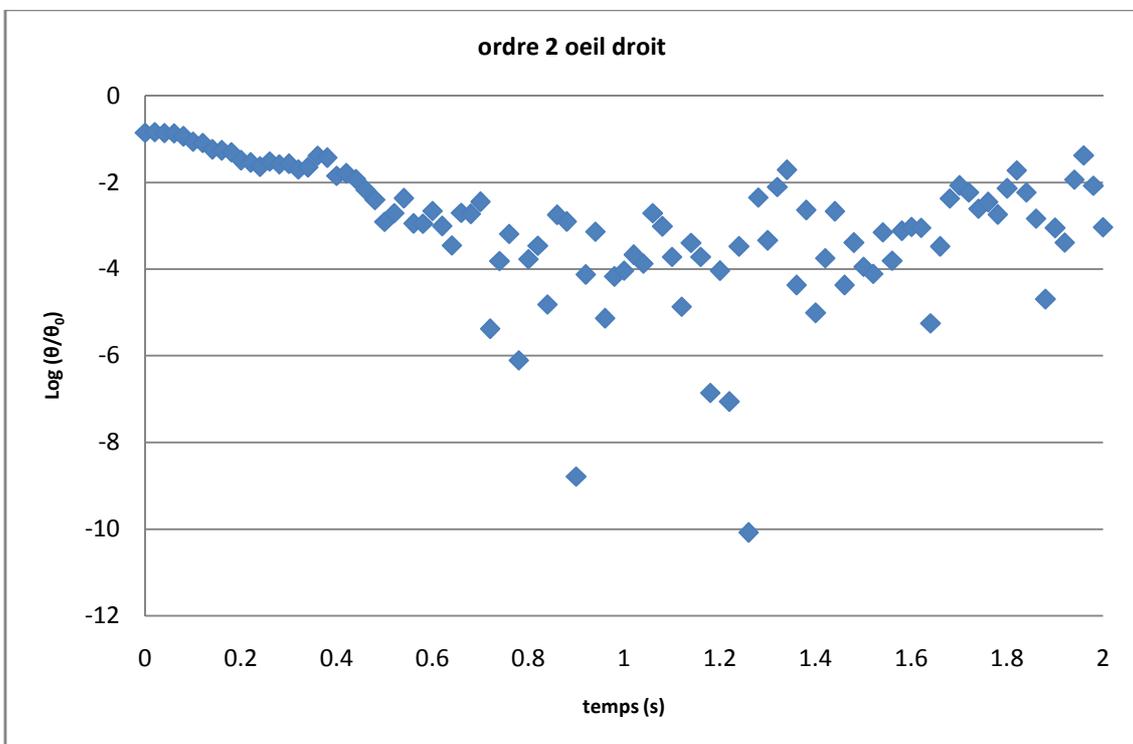


Figure III.19 : Estimation de la diffusivité thermique, œil droit

Manipulation 3 : coin supérieur droit (pente = $-3,642s^{-1}$)

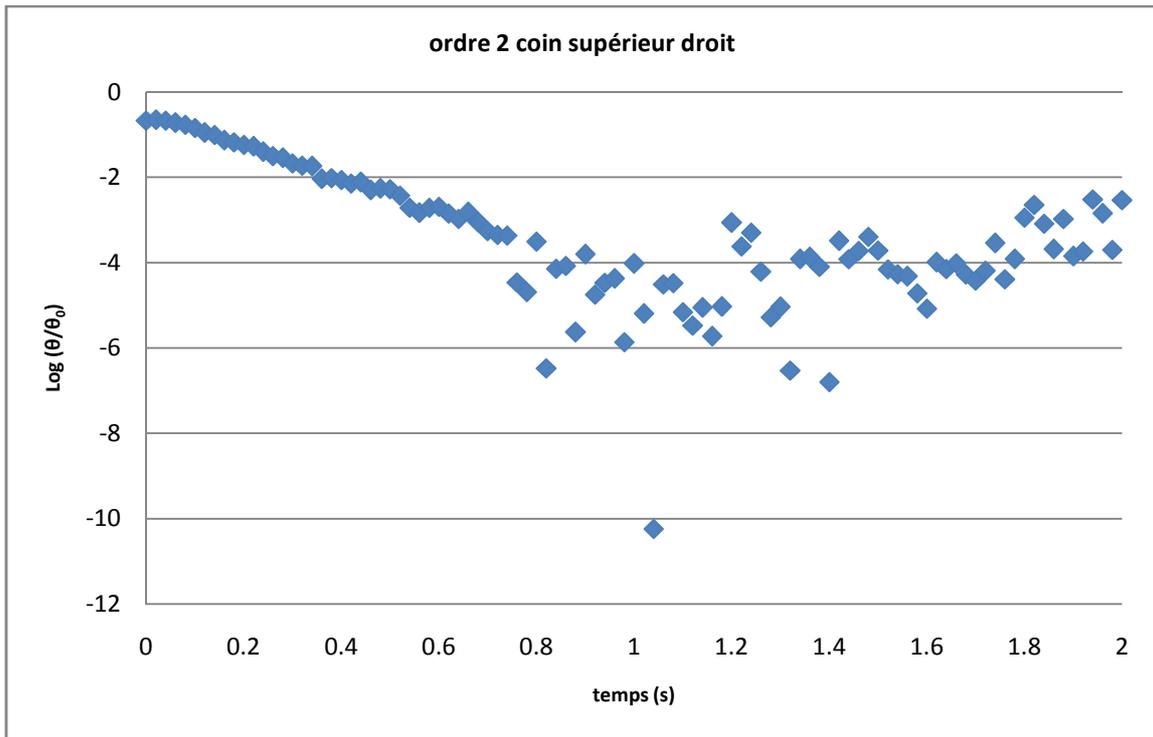


Figure III.20 : Estimation de la diffusivité thermique, coin supérieur droit

Manipulation 4 : coin inférieur droit (pente = $-4,735s^{-1}$)

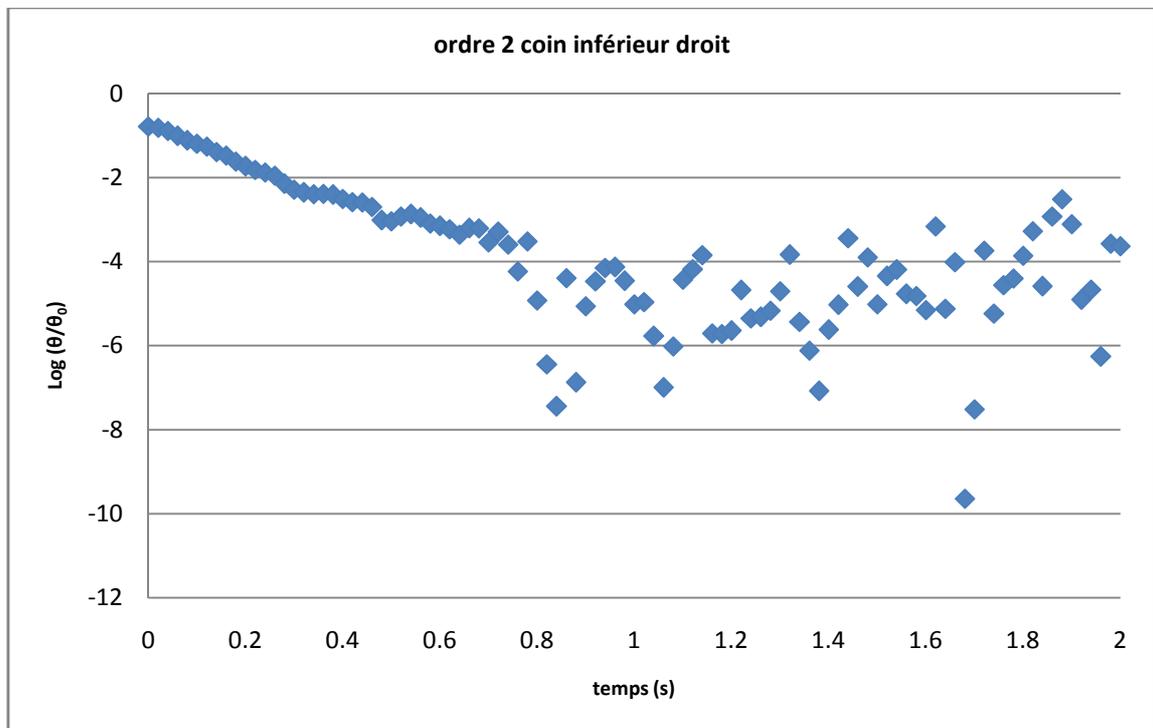


Figure III.21 : Estimation de la diffusivité thermique, coin inférieur droit

Afin d'aboutir à des mesures de diffusivités thermiques, nous avons étalonné spatialement nos analyses. Cet étalonnage des zones d'analyse conduit à des largeurs de pixels de 147 μm pour l'analyse de la zone située à coté de l'œil gauche, de 147 μm pour l'analyse de la zone située à coté de l'œil droit, de 113,5 μm pour l'analyse de la zone située dans la partie supérieure droite de la fresque et de 108,5 μm pour l'analyse de la zone située dans la partie inférieure droite de la fresque. Les longueurs caractéristiques dépendent du nombre de pixels de la zone fenêtrée.

Ces valeurs permettent alors de calculer les diffusivités thermiques longitudinales recherchées. Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau Figure III.22. Le calcul est fait pour un ordre égal à 2. Il montre que la diffusivité thermique du mélange chaux/plâtre constituant l'enduit de la fresque est comprise entre 5.10^{-7} et $5,3.10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

Manipulation	Pente s^{-1}	Nombre de pixels dans la largeur de la zone fenêtrée	Largeur d'un pixel (μm)	Diffusivité thermique estimée (m^2s^{-1})
1 : Œil gauche	-2,6	19	147	$5,14.10^{-7}$
2 : Œil droit	-3,186	17	147	$5,04.10^{-7}$
3 : Coin supérieur droit	-3,642	21	113,5	$5,24.10^{-7}$
4 : Coin inférieur droit	-4,735	19	108,5	$5,1.10^{-7}$

Figure III.22 : tableau récapitulatif

La diffusivité moyenne obtenue sur les quatre expériences est donc de $5,13.10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Dans le prochain chapitre, nous prendrons cette valeur afin d'estimer les profondeurs auxquelles se situent les défauts détectés dans cette réplique partielle de fresque.

IV- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouvel outil de mesure « in situ » de diffusivité thermique longitudinale.

Dans le premier paragraphe, nous avons d'abord présenté le principe de cette méthode de mesure dérivée de celle utilisée en face arrière du LEMTA Nancy

Dans le second paragraphe, nous avons ensuite présenté les simulations numériques qui ont servi à valider notre programme d'estimation de diffusivité thermique.

Dans le troisième paragraphe, nous avons ensuite étudié les possibilités nouvelles de la méthode en matière de mesure de diffusivité thermique en face avant de l'échantillon. Les résultats obtenus montrent clairement la possibilité de la méthode, pour des ordres d'analyse pouvant être élevés.

Dans la dernière partie du chapitre, nous sommes alors passés à l'étude expérimentale. Nous avons alors montré que la méthode longitudinale permet de retrouver avec une bonne précision la diffusivité thermique d'un échantillon de plâtre, préalablement analysé par méthode flash classique. Cela montre la faisabilité de notre approche, nous avons ensuite mesuré la diffusivité thermique locale de la fresque académique étudiée au chapitre II et réaliser une analyse quantitative de ses défauts. cette analyse fait l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION DE DEFAUT

Après avoir montré au chapitre II que la thermographie infrarouge stimulée pouvait permettre de détecter les défauts situés dans des peintures murales, nous nous intéressons maintenant à ses possibilités en matière de caractérisation dimensionnelle. En effet, connaître la profondeur ou les profondeurs auxquelles se situe un défaut est une information utile à la phase de restauration.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de caractérisation dimensionnelle de défaut.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux possibilités d'imagerie tomographique offerte par la thermographie infrarouge stimulée. L'objectif était alors de créer des thermogrammes synthétiques faisant apparaître une éventuelle évolution de la profondeur du défaut (cas d'un défaut incliné) par rapport à la surface de l'œuvre d'art.

A partir des paramètres caractéristiques ayant servis à construire les images synthétiques précédentes, nous avons ensuite cherché à déterminer de façon empirique la profondeur à laquelle se situe le défaut analysé.

Enfin, dans un troisième temps, nous déterminerons la profondeur inconnue à partir d'une confrontation théorie/expérience.

Ce sont chacune de ces études que nous présentons maintenant.

I- Image tomographique de défaut

Comme nous venons de le dire, la première information que souhaitent acquérir les restaurateurs du patrimoine après avoir détecté le défaut, est la position de ce défaut : est-il parallèle à la surface, est-il incliné ? En d'autres termes, sa profondeur est-elle constante ou évolue-t-elle ?

D'une façon générale, il est possible d'analyser sur le film thermographique l'instant d'apparition des défauts pour obtenir ce type d'informations. En effet, plus l'instant d'apparition des défauts est tardif, plus le défaut est profond. Il est alors possible de bâtir un thermogramme synthétique dans lequel figure pour chaque pixel l'instant d'apparition du défaut. Ainsi, en une seule image synthétique, il est possible d'obtenir une représentation « tomographique » de la profondeur à laquelle se situe le défaut.

Dans notre étude, nous avons voulu généraliser ce concept de création de thermogramme synthétique en considérant d'autres paramètres caractéristiques de la réponse photothermique de l'échantillon. Ainsi, nous avons essayé de corréler la profondeur à laquelle se situe un défaut à 5 paramètres caractéristiques différents :

- l'aire sous la réponse photothermique
- le temps de vol
- l'aire sous la courbe de contraste
- la valeur du maximum de contraste
- le temps du maximum de contraste

Ces cinq grandeurs ont été définies au chapitre II, paragraphe I-3.

II- Etude expérimentale des paramètres caractéristiques des réponses thermiques ; sont-ils corrélés à la profondeur du défaut ?

Pour étudier la corrélation potentielle entre ces paramètres caractéristiques et la profondeur d'un défaut, nous avons réalisé une étude sur deux échantillons.

Le premier échantillon est un revêtement de chaux et de sable, déposé sur un substrat en plâtre et recouvert d'une couche picturale. Il a été réalisé comme la copie partielle du Saint-Christophe, par Gabriela Szatanik, selon la technique des primitifs italiens. Il comporte un défaut en plastazote simulant une inclusion d'air (les propriétés thermophysiques du plastazote sont proches de celles de l'air), incliné par rapport à la surface et situé à l'interface chaux-sable / plâtre. Les dimensions de cet échantillon sont une longueur de 137 mm, une largeur de 58 mm et une hauteur de 62 mm (Figure IV.1). Le défaut en plastazote a une

longueur de 137 mm, une largeur de 25 mm et une épaisseur de 5 mm. Son inclinaison par rapport à la surface de l'échantillon est d'environ 5 degrés. Sa profondeur varie donc de 2 mm à 14 mm sur la longueur de l'échantillon. La surface analysée est recouverte de deux bandes de peintures, verte et noire.

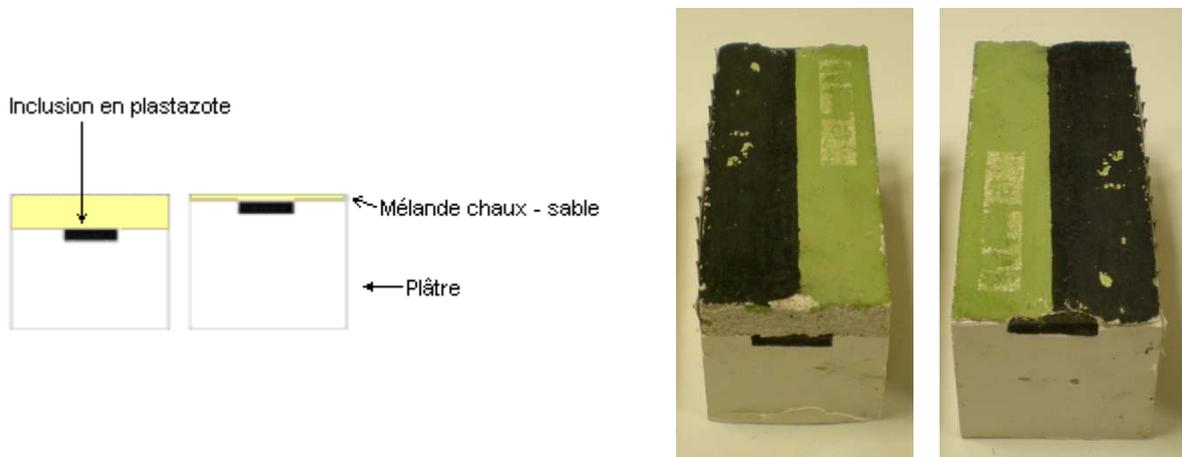


Figure IV.1 : Vues de côté du premier échantillon étudié

Cet échantillon a été analysé avec la première version de SAMMTHIR (Figure IV.2). Par rapport à la version finale du système, la source d'excitation n'était composée que d'une seule lampe halogène et le détecteur infrarouge était une caméra de type AGEMA 780.



Figure IV.2 : Le premier Système d'Analyse des Matériaux Minces par Thermographie InfraRouge du Laboratoire d'Énergétique et d'Optique de la Faculté des Sciences de Reims

Les conditions expérimentales de l'étude du premier échantillon sont les suivantes : L'échantillon étudié a été placé 70 cm face à la source d'excitation. Nous l'avons excité

pendant 44,96 secondes et avons observé sa réponse en température à l'aide de la caméra de thermographie infrarouge AGEMA 780 « ondes courtes », placée approximativement au même niveau que le système d'excitation, mais légèrement décalé par rapport à la normale à la surface à l'échantillon étudié (d'environ 10 degrés). L'optique de la caméra est composée d'un objectif AGA 750 de 20 degrés. L'ouverture de cet objectif a été choisie à 1,8. La fréquence d'acquisition des images a été fixée à 6,25 Hertz. La durée de l'analyse a été fixée à 655,36 secondes. Le « thermal range » de la caméra a été fixé à 2 et le « thermal level » à 14.

Les premiers résultats expérimentaux que nous présentons sur la Figure IV.3 sont les réponses photothermiques impulsionnelles brutes obtenues lors de l'analyse de l'échantillon bicouche chaux/plâtre déposé sur de plâtre, pour des profondeurs de défauts de respectivement : 5 mm, 5,7 mm, 7 mm et 8,5 mm. Dans la phase de refroidissement, cette figure montre clairement des courbes disjointes et classées selon la profondeur à laquelle se situe le défaut.

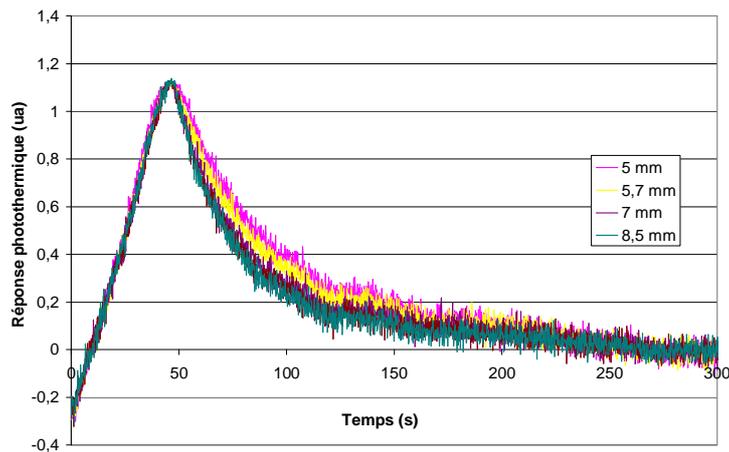


Figure IV.3 : Les réponses photothermiques impulsionnelles brutes obtenues

Nous avons ensuite étudié la corrélation pouvant exister entre les points caractéristiques cités précédemment de ces réponses impulsionnelles et ce paramètre profondeur.

La figure IV.4 présente l'évolution de l'aire présente sous la réponse photothermique en fonction de la profondeur du défaut. La courbe obtenue est monotone et décroissante. Elle montre donc bien qu'il existe une corrélation entre ces deux paramètres ; ceci met en lumière

la possibilité d'aboutir à une mesure de profondeur de défauts par une mesure intégrale de la réponse photothermique.

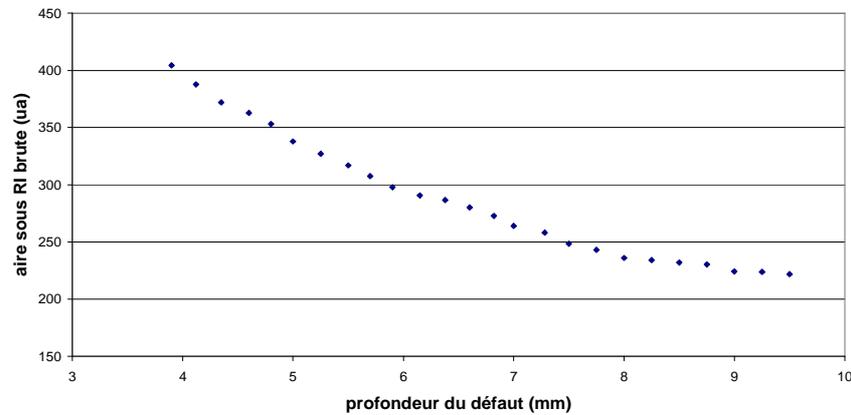


Figure IV.4 : Corrélation entre l'aire contenue sous la réponse impulsionnelle brute et la profondeur à laquelle se situe le défaut

Cependant une telle mesure révèle la particularité d'être dépendante d'une variation du signal exciteur et du facteur émissivité. Pour essayer de nous affranchir de ces dépendances (très classiques en radiométrie infrarouge, mais aussi souvent très perturbatrices), nous avons considéré un paramètre caractéristique de nature temporelle qui serait indépendant des problèmes énergétiques. La Figure IV.5 présente la relation existant entre le temps de vol du signal photothermique et la profondeur du défaut que nous avons étudiée. La courbe obtenue est là aussi monotone décroissante. Ainsi est démontrée clairement la corrélation existant entre les deux paramètres et donc la possibilité d'aboutir à une mesure de profondeur à travers une mesure de temps de vol (et, ce, de façon indépendante aux éventuelles fluctuations énergétiques de dépôt d'énergie).

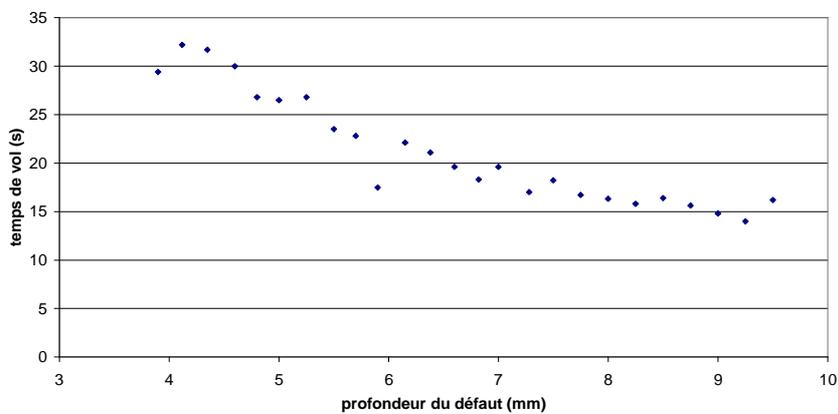


Figure IV.5 : Corrélation entre le temps de vol (100 % - 60 %) de la réponse impulsionnelle et la profondeur du défaut

En contrôle non destructif et donc en radiométrie photothermique, il est classique d'exploiter aussi les courbes de contrastes (différences entre une réponse obtenue sur une partie endommagée de l'échantillon étudié et une réponse obtenue sur une partie saine de ce dernier), ceci afin d'aboutir à une détection ou à une caractérisation de défaut. En effet travailler sur ce type de courbes conduit à rehausser le contraste des résultats obtenus, puisqu'il s'agit en fait d'un filtrage passe haut de ces résultats. C'est donc tout naturellement que nous avons étudié aussi les possibilités de caractérisation de profondeur de défaut à partir de ce type de signal.

Sur la Figure IV.6, nous avons d'abord tracé des courbes de contrastes calculées pour différentes profondeurs de défauts : 3,9 mm, 4,8 mm, 5,7 mm, 6,6 mm et 8,5 mm. Elles montrent d'abord que le contraste est d'autant plus prononcé que le défaut est proche de la surface. Elles montrent ensuite que le maximum de contraste se produit d'autant plus tôt que le défaut est proche de la surface. Elles montrent enfin que les paramètres, abscisse et ordonnée du maximum de contraste et aire sous la courbe semblent corrélés à la profondeur du défaut.

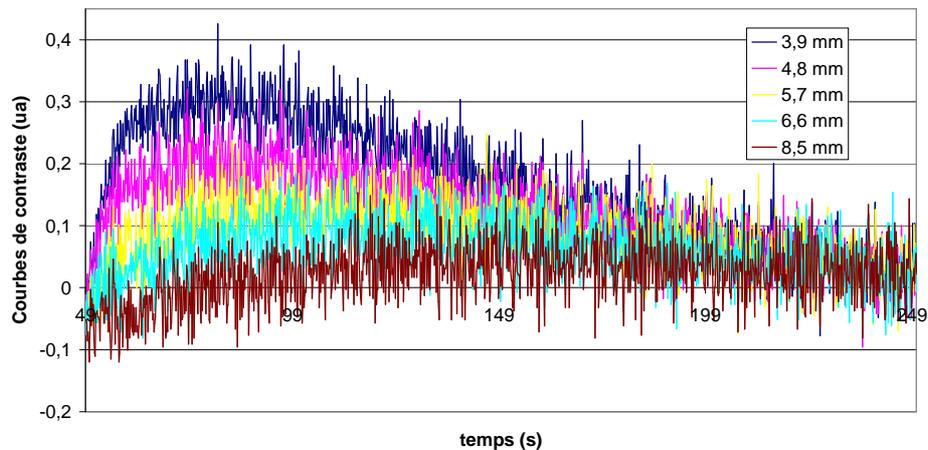


Figure IV.6 : Comparaison entre les contrastes obtenus à l'aplomb du défaut incliné

Les courbes des Figures IV.7 à IV.9 représentent l'évolution de ces trois paramètres en fonction de la profondeur à laquelle se situe le défaut. Ces trois courbes montrent respectivement une variation monotone croissante, décroissante et enfin décroissante entre ces paramètres et la profondeur du défaut. Ceci confirme donc bien l'existence d'une corrélation entre chacun de ces paramètres et la profondeur du défaut et par conséquent la possibilité de mesurer ce paramètre géométrique par l'intermédiaire de la mesure de l'un de ces trois

paramètres caractéristiques (on notera ici que l'abscisse du maximum de la courbe de contraste est aussi de nature temporelle et donc indépendant de fluctuations énergétiques).

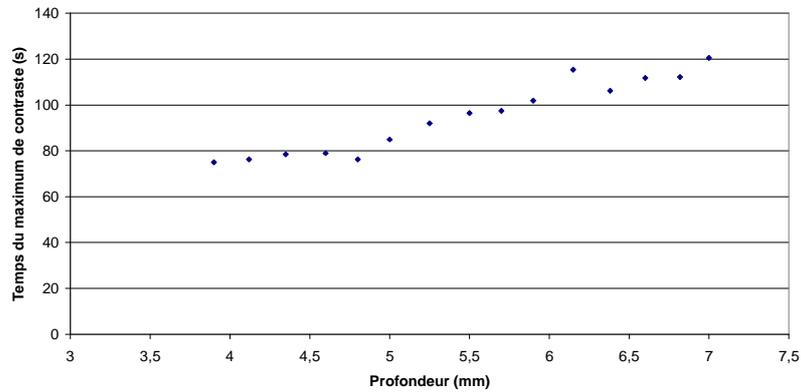


Figure IV.7 : Evolution de la valeur de l'abscisse du contraste maximal en fonction de la profondeur à laquelle se situe le défaut

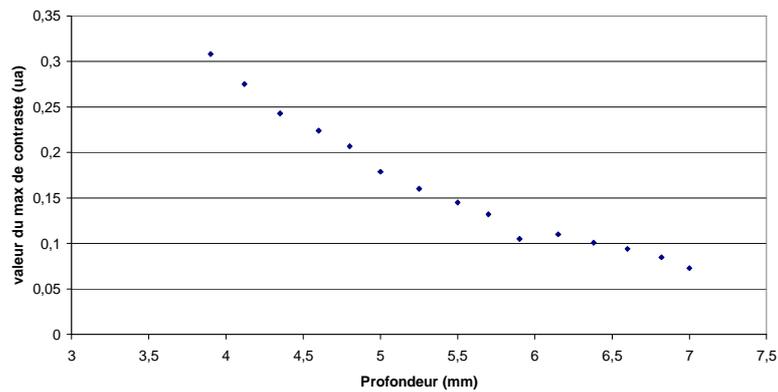


Figure IV.8 : Evolution de la valeur de l'ordonnée du contraste maximal en fonction de la profondeur à laquelle se situe le défaut

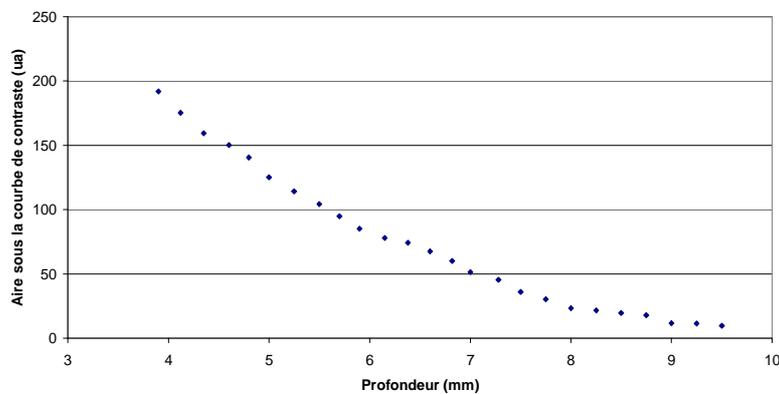


Figure IV.9 : Evolution de la valeur de l'aire sous la courbe de contraste en fonction de la profondeur à laquelle se situe le défaut

Cette première étude « quantitative », nous a donc montré d'une part que plusieurs paramètres caractéristiques de la réponse photothermique recueillie sont corrélés à la profondeur du défaut analysé. D'autre part, nous avons souligné que les paramètres - Aire sous la réponse photothermique, aire sous la courbe de contraste ou ordonnée du maximum de contraste - peuvent présenter une dépendance à l'énergie déposée par la source photothermique ou aux propriétés radiatives de surface ; alors que les paramètres temps de vol et abscisse du maximum de contraste, à connotation temporelle, ne présentent pas cette dépendance, ce qui représente un atout notable.

Il nous restait alors à bâtir d'une part des images synthétiques de ces paramètres et d'autre part à essayer d'utiliser ces paramètres pour aboutir à la détermination de la profondeur recherchée. Ces deux travaux font l'objet des deux prochains paragraphes.

III- Images « tomographiques » de défaut : thermogrammes synthétiques de paramètres caractéristiques

Après avoir montré que certains paramètres caractéristiques de la réponse photothermique étaient corrélés à la profondeur du défaut, nous avons voulu étudier la possibilité d'établir des thermogrammes synthétiques de ces paramètres afin de permettre l'obtention d'images tomographiques par les restaurateurs du patrimoine. Pour cela, il nous a été nécessaire de réaliser un nouvel échantillon pour l'étude.

Ce nouvel échantillon est un bloc de plâtre. Sa face supérieure a été recouverte d'une couche de peinture noire afin de simuler une couche picturale (Figure IV.10). Ses dimensions sont une longueur de 6 cm de longueur, une largeur de 3 cm de largeur et enfin une épaisseur de 1,8 cm d'épaisseur. Il comprend dans sa partie centrale un défaut incliné (manque de plâtre), simulant un délaminage dans une peinture murale, dont la profondeur varie linéairement tout au long de l'échantillon de 1 mm à 4 mm.

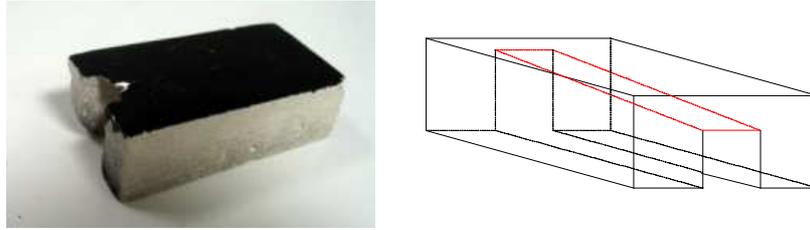


Figure IV.10 : L'échantillon étudié

L'instrumentation mise en œuvre pour l'étude est la seconde version de SAMMTHIR. Ce système d'analyse comprend deux lampes à halogène d'une puissance de 500 W, une caméra de thermographie infrarouge FLIR SYSTEM A20, une électronique et une informatique permettant une analyse photothermique impulsionnelle (Figure IV.11).



Figure IV.11 : Le dispositif expérimental utilisé

Les conditions expérimentales retenues ici sont une excitation de Heavyside d'une durée de 10 secondes. La durée de l'analyse est de 256 secondes. La caméra infrarouge est placée à environ 20 cm de l'échantillon, normalement à celui-ci. Les deux lampes à halogènes du système d'excitation sont placées symétriquement de part et d'autre de la caméra afin d'assurer un éclairage le plus uniforme possible. L'objectif de la caméra mise en œuvre possède un angle de $34^\circ \times 25^\circ$. La fréquence d'échantillonnage utilisée est de 2 Hz (Figure IV.11).

Les résultats expérimentaux sont présentés sur les Figures IV.12 à IV.14.

La Figure IV.12 représente tout d'abord une image photothermique à un instant donné (au cours de la phase de refroidissement) de l'échantillon analysé. Elle représente d'autre part les réponses photothermiques impulsionnelles brutes obtenues pour des profondeurs de défauts de respectivement 1,2 mm, 1,6 mm, 1,9 mm et 2,4 mm. Cette figure montre clairement, en phase de refroidissement, des courbes disjointes et classées selon la profondeur à laquelle se situe le défaut.

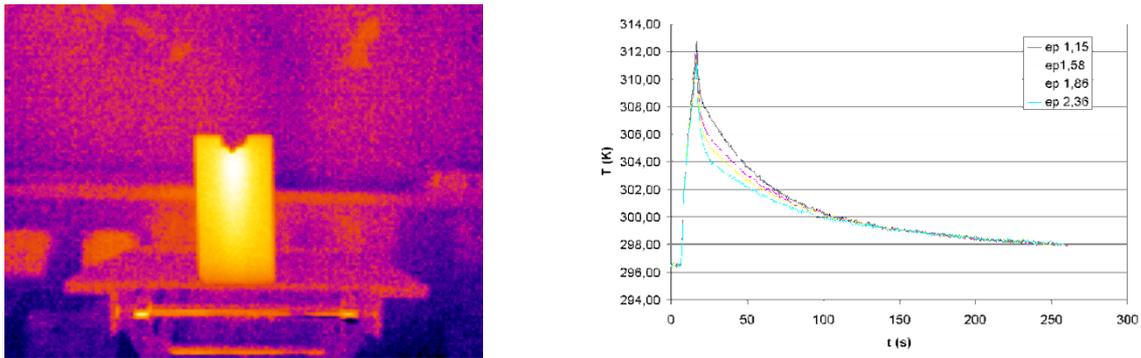


Figure IV.12 : Réponses photothermiques brutes obtenues

Sur la figure IV.13, les images, codées en « fausses couleurs » et tridimensionnelles présentent l'aire contenue sous les réponses impulsionnelles brutes obtenues en tous points de la surface de la fresque étudiée. Elles montrent d'une part des valeurs intégrales plus importantes au centre de l'échantillon que sur ses bords, valeurs significatives de la présence d'un défaut. Elles montrent d'autre part que cette importance varie d'un bout à l'autre de l'échantillon. Cette importance est d'autant plus faible que la profondeur du défaut est grande. Ces images synthétiques sont donc porteuses d'informations, simples à lire, sur l'évolution de la profondeur du défaut. Elles pourraient devenir de ce fait un nouvel outil d'aide à la restauration des œuvres d'art.

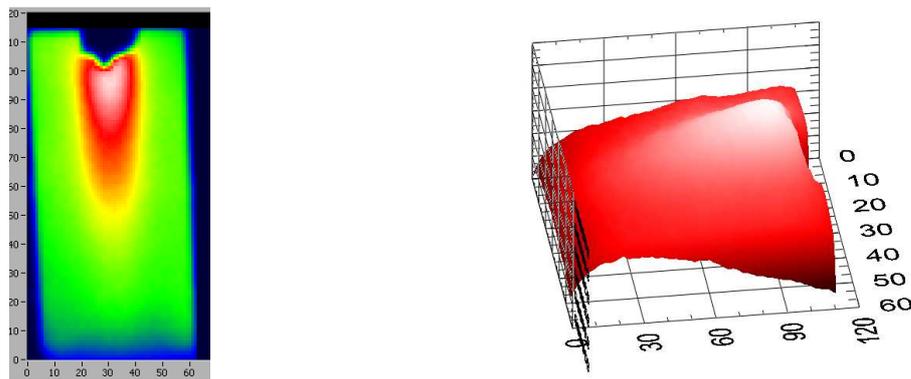


Figure IV.13 : Images, codées en « fausses couleurs » et tridimensionnelles de l'aire contenue sous les réponses photothermiques impulsionnelles brutes calculées en tous points de la surface de l'échantillon étudié

Comme nous l'avons déjà montré, une particularité de la carte de paramètres précédente est d'être dépendante des inhomogénéités de dépôt d'énergie ainsi que des variations des propriétés radiatives de l'échantillon étudié. Pour essayer de nous affranchir de ces dépendances gênantes, nous avons dans la suite essayé de considérer un paramètre caractéristique de nature temporelle et donc indépendant des problèmes énergétiques. Sur la Figure IV.14, deux images, codées en fausses couleurs ou en représentation 3D, du temps de vol du signal photothermique (temps mis par le signal pour passer d'un premier niveau donné à un second niveau donné du signal photothermique) ont été tracées, pour des niveaux limites de 100 % et de 40 %. Comme dans le cas précédent, elles montrent un signal photothermique post traité plus important au niveau du défaut et révèlent d'autre part que cette augmentation de signal est d'autant moins importante que le défaut est profond. Ainsi donc ce type de post traitement donne aussi accès à une idée de la configuration géométrique du défaut étudié.

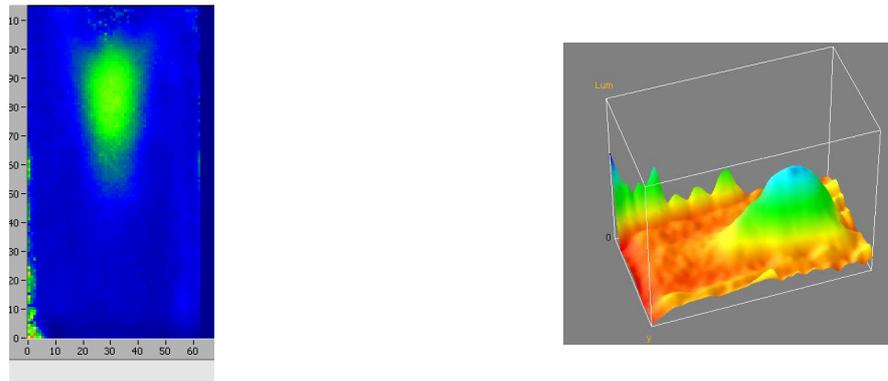


Figure IV.14 : images, codées en « fausses couleurs » et tridimensionnelles des temps de vol calculés pour toutes les réponses photothermiques impulsionnelles brutes obtenues en tous points de la surface de l'échantillon étudié (100% - 40 %)

Les Figures IV.15, IV.16 et IV.17 présentent les images synthétiques représentant l'aire sous la courbe de contraste, l'abscisse et l'ordonnée du maximum de contraste. Comme dans les deux cas précédents, elles font apparaître une signature centrale d'autant moins importante que le défaut est profond. Elles peuvent donc aussi fournir une information sur l'évolution de la profondeur du défaut.

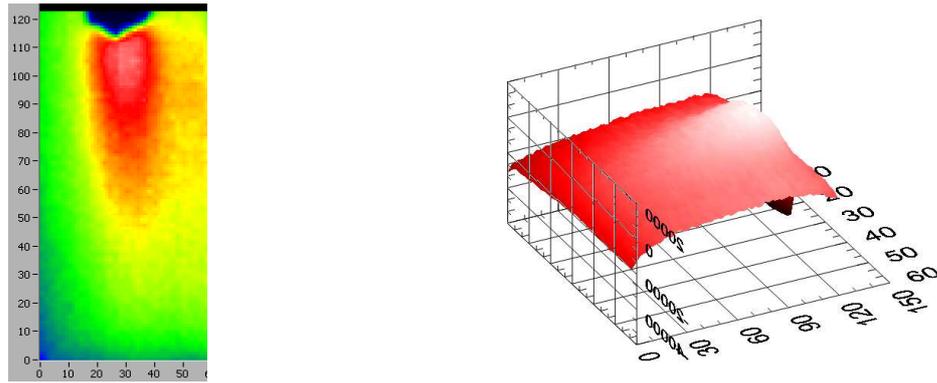


Figure IV.15 : Aire sous la courbe de contraste à gauche et sa représentation en 3D à droite

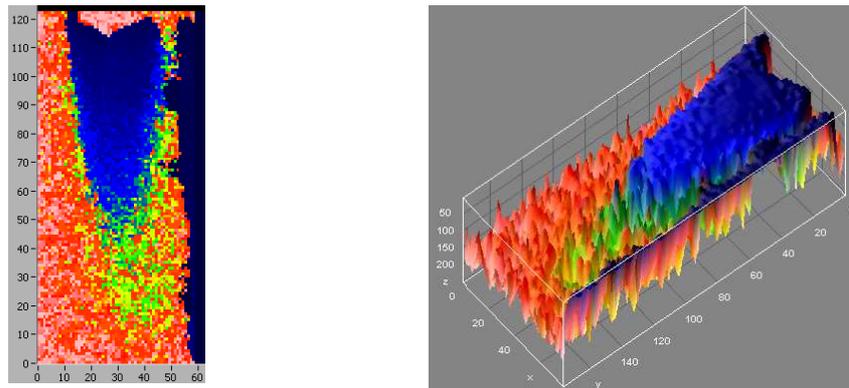


Figure IV.16 : Abscisse du maximum de contraste à gauche et sa représentation en 3D à droite

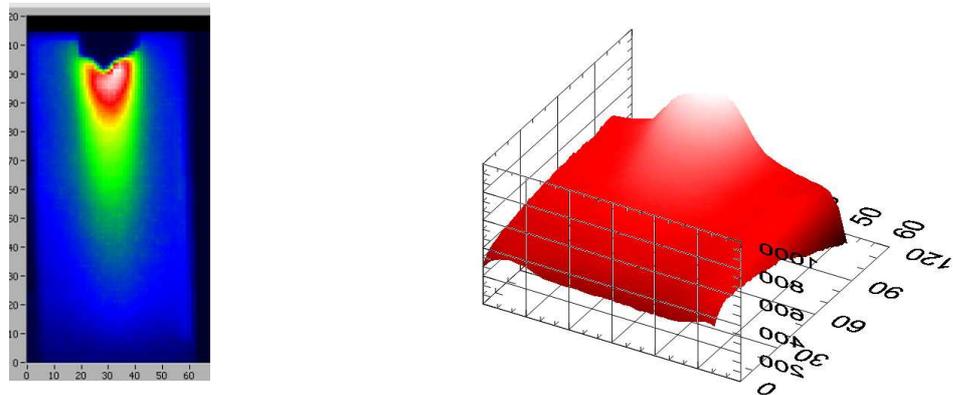


Figure IV.17 : Ordonnée du maximum de contraste (valeurs maximales des courbes de contraste) à gauche, représentation graphique en 3 dimensions à droite

IV- Première technique de mesure de la profondeur à laquelle se situe le défaut

Après avoir montré qu'il existait une corrélation entre les paramètres caractéristiques étudiés et la profondeur à laquelle se situe le défaut, il nous a semblé intéressant d'essayer de déterminer ce paramètre géométrique à partir de la mesure de l'un de ces paramètres caractéristiques.

Celui que nous avons choisi de mettre en œuvre ici est l'aire sous la courbe de contraste. En effet, au cours de l'étude précédente, c'est le paramètre qui a fourni la corrélation la moins bruitée avec la profondeur du défaut (Figure IV.15).

Le protocole de mesure a alors consisté à étudier par thermographie infrarouge stimulée, un second échantillon contenant un défaut de plastazote incliné par rapport à la surface d'un bloc de plâtre recouvert d'un mélange de chaux et de sable, et ce avec les mêmes réglages expérimentaux. Les dimensions de ce nouvel échantillon sont une longueur de 140 mm, une largeur de 60 mm et une hauteur de 61 mm. Le défaut en plastazote, situé à l'interface chaux -sable / plâtre, a une longueur de 138 mm, une largeur de 25 mm et une épaisseur de 5 mm. Son inclinaison par rapport à la surface de l'échantillon est d'environ 5,3 degrés. Sa profondeur varie donc de 2 mm à 15 mm sur la longueur de l'échantillon. La surface analysée est recouverte de deux bandes de peintures, bleue et noire. Les profondeurs de défauts étudiées variant d'environ 4 mm à environ 10 mm (Figure IV.18).



Figure IV.18 : Nouvel échantillon avec un défaut incliné en plastazote

Le protocole de mesure retenu consiste à calculer l'aire sous la courbe de contraste, puis la profondeur recherchée à partir de la courbe tracée sur la Figure IV.9 qui fait alors

office de courbe d'étalonnage. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure IV.19. Cette dernière représente la profondeur estimée à partir de l'aire sous la courbe de contraste en fonction de la profondeur réelle mesurée à l'aide d'une jauge de profondeur. Cette courbe est proche d'une droite inclinée à 45 degrés, mettant en évidence les possibilités de la méthode en matière de mesure empirique de profondeur de défaut.

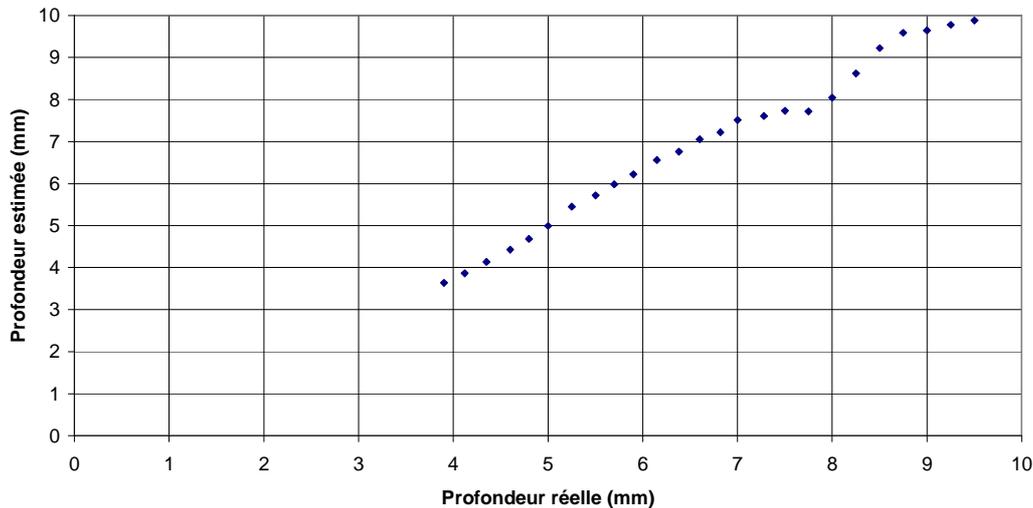


Figure IV.19 : Comparaison entre la profondeur réelle du défaut et sa profondeur estimée

V- Mesure de profondeur à l'aide de techniques inverses

Dans le travail que nous avons présenté précédemment, nous avons cherché à déterminer la profondeur à laquelle se situe un défaut à l'aide de paramètres caractéristiques de la réponse photothermique. Cette méthode est efficace puisqu'elle nous a permis d'obtenir la profondeur recherchée avec un bon ordre de grandeur. Toutefois il s'agissait d'une méthode empirique, liée à un étalonnage ponctuel (notons toutefois qu'elle fonctionne). Il fallait donc envisager de mettre en œuvre une méthode de caractérisation plus universelle.

Nous développons donc maintenant une autre approche permettant la détermination de la profondeur à laquelle se situe le défaut. Nous avons essayé de déterminer ce paramètre géométrique à l'aide d'un ajustement théorie/expérience couplé à des méthodes de techniques inverses du type Levenberg Marquardt. Deux modèles de résolution de l'équation de la chaleur ont été considérés : l'un faisant appel à des notions d'« ondes thermiques »

progressives utilisées au laboratoire, l'autre faisant appel aux quadripôles thermiques pour résoudre l'équation de la chaleur. Nous présentons ici les résultats obtenus avec ces deux modèles.

V-1- Modèle thermique faisant appel aux notions d'onde progressives et régressives

Le premier modèle que nous avons envisagé de mettre en œuvre dans notre étude utilise la notion d' « ondes » progressives et d' « ondes » régressives pour résoudre l'équation de la chaleur. C'est un modèle utilisé au laboratoire, s'avérant souple et rapide pour un grand nombre d'applications.

V-1-1- Présentation du modèle

Le modèle que nous avons développé visait à être le plus simple possible de façon à rendre les calculs d'identification les plus rapides possibles.

Ainsi, comme un déplacement d'enduit d'une peinture murale fait apparaître une lame d'air d'épaisseur souvent importante (de plusieurs centaines de micromètres, ce qui constitue une barrière thermique elle aussi importante), nous avons considéré dans une première approximation que déterminer la profondeur à laquelle se situe le défaut revenait uniquement à mesurer l'épaisseur de la couche d'enduit située au-dessus du défaut,. Le modèle de l'expérience photothermique que nous avons développé se limite à une géométrie 1D, négligeant dans un premier temps des effets de bords éventuels.

Plus précisément, nous avons donc considéré un échantillon plan, d'épaisseur L plongé dans l'air et soumis à des pertes de chaleur par convection et rayonnement sur ses faces avant et arrière. Cet échantillon est ensuite excité sur sa face avant par un dépôt d'énergie de type Heaviside. Ces hypothèses conduisent alors au système différentiel suivant :

* Equation de la chaleur :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

* Conditions aux limites :

$$\text{en } x=0 \text{ (flux)} \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = Q - h(T - T_\infty) \quad (2)$$

$$\text{en } x=L \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h(T_{x=L} - T_\infty) \quad (3)$$

Plaçons-nous maintenant dans l'espace de Fourier :

$$\tilde{T}(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(x, f) \cdot e^{2i\Pi f t} dt \quad (4)$$

Le système différentiel devient alors :

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}(x, f)}{\partial x^2} + \frac{1}{a} 2i\Pi f \tilde{T}(x, f) = 0$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} \right|_{x=0} = \tilde{Q} - h\tilde{T}_{x=0} \quad (5)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} \right|_{x=L} = h\tilde{T}_{x=L} \quad (6)$$

Considérons maintenant la solution de ce système différentiel. Elle s'écrit sous la forme suivante (somme d'une onde progressive et d'une onde régressive) :

$$\tilde{T}(x, f) = A e^{i\sqrt{\frac{2i\Pi f}{a}} x} + B e^{-i\sqrt{\frac{2i\Pi f}{a}} x}$$

ou encore écrit de façon simple :

$$\tilde{T} = A e^{ikx} + B e^{-ikx} \quad \text{avec } k^2 = \frac{i\omega}{a} \quad \text{et} \quad \omega = 2\pi f$$

Le calcul de la dérivée par rapport à x de la transformée de Fourier de la température donne :

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = A i k e^{ikx} + B (-i k e^{-ikx})$$

Ce qui, introduit dans les conditions aux limites exprimées dans l'espace de Fourier, permet de déterminer les constantes A et B

$$A = \frac{\tilde{Q}}{h \left(1 + \frac{(\lambda k i + h)}{(\lambda k i - h)} \cdot e^{2ikL}\right) - i \lambda k \left(1 - \frac{(\lambda k i + h)}{(\lambda k i - h)} \cdot e^{2ikL}\right)}$$

$$B = \frac{\tilde{Q} \cdot \frac{(\lambda k i + h)}{(\lambda k i - h)} \cdot e^{2ikL}}{h \left(1 + \frac{(\lambda k i + h)}{(\lambda k i - h)} \cdot e^{2ikL}\right) - i \lambda k \left(1 - \frac{(\lambda k i + h)}{(\lambda k i - h)} \cdot e^{2ikL}\right)}$$

La transformée de Fourier inverse permet ensuite de déterminer l'expression de la température dans l'espace temporel :

$$T(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A \cdot e^{ikx} + B \cdot e^{-ikx} \cdot e^{-i\omega t} d\omega$$

Cette solution, évaluée alors en l'abscisse $x = 0$, en face avant de l'échantillon, mène au signal photothermique recherché.

V-1-2- Mesure de la profondeur d'un défaut incliné situé dans un échantillon de plâtre

Un test expérimental permet d'étudier la validation de ce mode de dépouillement. Pour cela nous avons dépouillé les réponses photothermiques obtenues lors de l'étude de l'échantillon de plâtre contenant un défaut incliné par rapport à sa surface décrit au paragraphe III.

La phase de caractérisation de la profondeur à laquelle se trouve le défaut étudié s'est alors déroulées en trois étapes. Tout d'abord, nous avons tiré du film de l'expérience photothermique une quinzaine de réponses photothermiques brutes (Figure IV.21). Ces points de mesures sont régulièrement répartis à l'aplomb du défaut incliné (Figure IV.20)

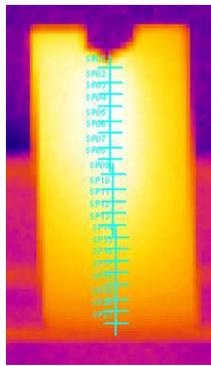


Figure IV.20 : Les points de mesure considérés

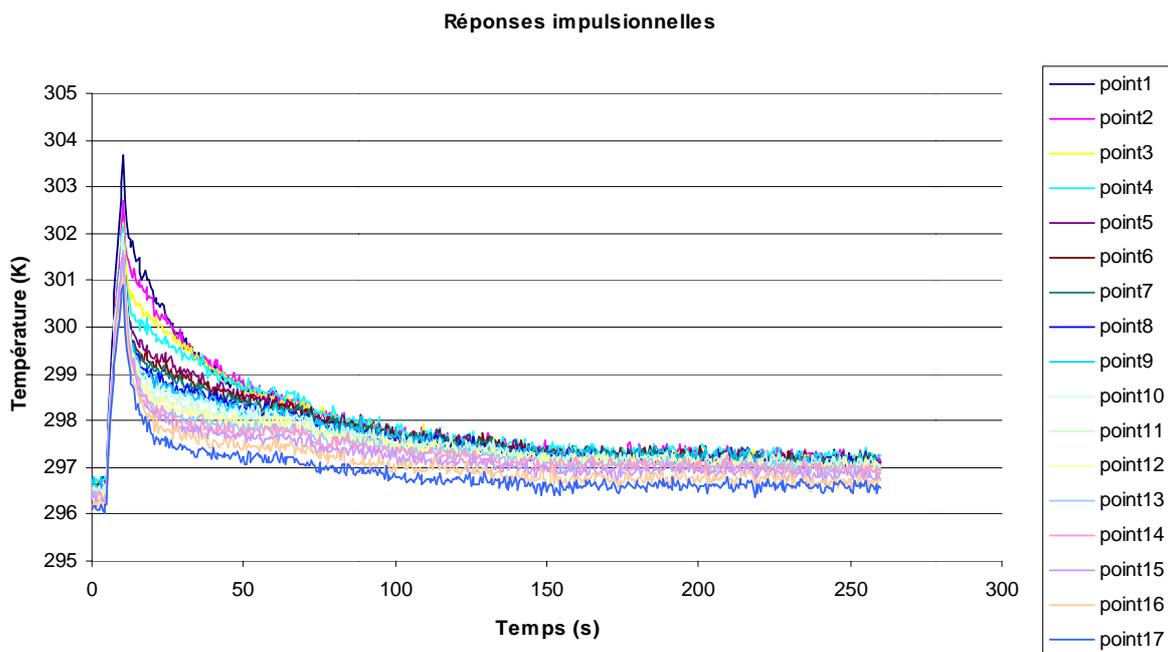


Figure IV.21 : Réponses photothermiques brutes

Dans un second temps, nous avons ajusté, pour chaque point de mesure et avec l'aide de la méthode de Gauss Newton, les paramètres du modèle photothermique développé pour l'étude (épaisseur de l'échantillon et coefficient de convection rayonnement) afin de faire coller au mieux les résultats théoriques et expérimentaux. Le résultat de cet ajustement donne accès, pour chaque point de mesure à l'épaisseur de plâtre placé à son endroit. C'est cette épaisseur que nous assimilons à la profondeur à laquelle se situe le défaut. Enfin, dans une dernière étape, nous avons mesuré l'épaisseur réelle de plâtre en chacun des points de mesure à l'aide d'une jauge de profondeur. La Figure IV.22 présente une comparaison entre les profondeurs de défaut mesurées par thermographie infrarouge stimulée et celles mesurées à l'aide d'une jauge de profondeur. Elle montre clairement que les valeurs obtenues par méthode photothermique sont très proches de celles mesurées à l'aide de la jauge de profondeur. La méthode photothermique apparaît permettre, pour une part, la caractérisation dimensionnelle de défauts.

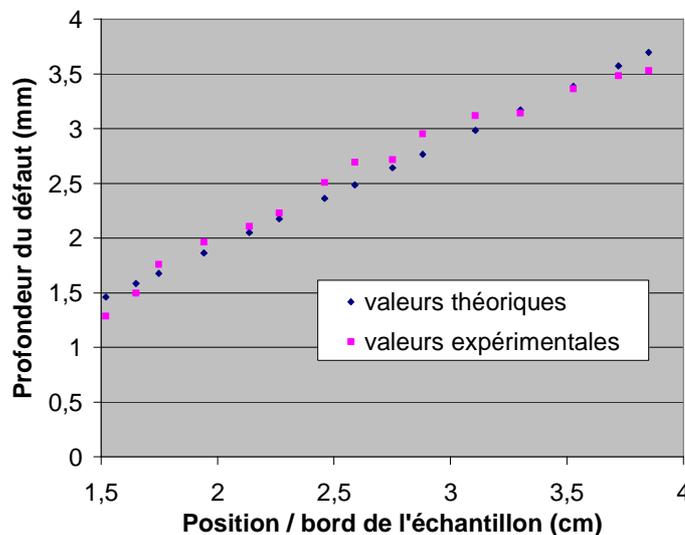


Figure IV.22 : Comparaison entre les profondeurs de défaut mesurées par thermographie infrarouge stimulée et celles obtenues à l'aide d'une jauge de profondeur

Confortés par ces résultats, nous avons ensuite cherché à l'appliquer à des expériences photothermiques mettant en œuvre non plus des excitations créneaux mais des excitations

flash puis aléatoires. Nous avons alors rencontré un problème pour décrire finement l'excitation à l'aide d'une somme de fonction sinusoïdale. Plus l'excitation était courte, plus le nombre de fonctions nécessaires était important et plus les temps de calculs étaient longs. La méthode n'était donc manifestement pas la mieux adaptée à l'étude de ce type d'excitation. Pour permettre leur étude, nous avons alors dans la suite du travail mis en œuvre, une méthode de convolution plus adaptée à ce type d'excitation : la méthode des quadripôles thermiques.

V-2- Modèle thermique utilisant la méthode des quadripôles thermiques

La méthode des quadripôles a été historiquement proposée par Carslaw [41] et développée dans de nombreuses configurations liées à la mesure de propriétés thermophysiques. Elle est bien adaptée à la modélisation de la méthode flash, car elle permet d'obtenir des expressions mathématiques compactes dans un espace transformé et des solutions approchées de forme simple. Elle permet de calculer la température des faces avant et arrière d'un échantillon.

V-2-1- Présentation générale du modèle

Le modèle retenu est identique au précédent : l'échantillon étudié est monodimensionnel, homogène et isotrope. L'impulsion est assimilée à un Dirac de flux. L'hypothèse de petites variations de température dues à l'impulsion thermique permet de considérer les propriétés thermiques comme indépendantes de la température. Des pertes thermiques sont considérées en face avant et en face arrière de l'échantillon :

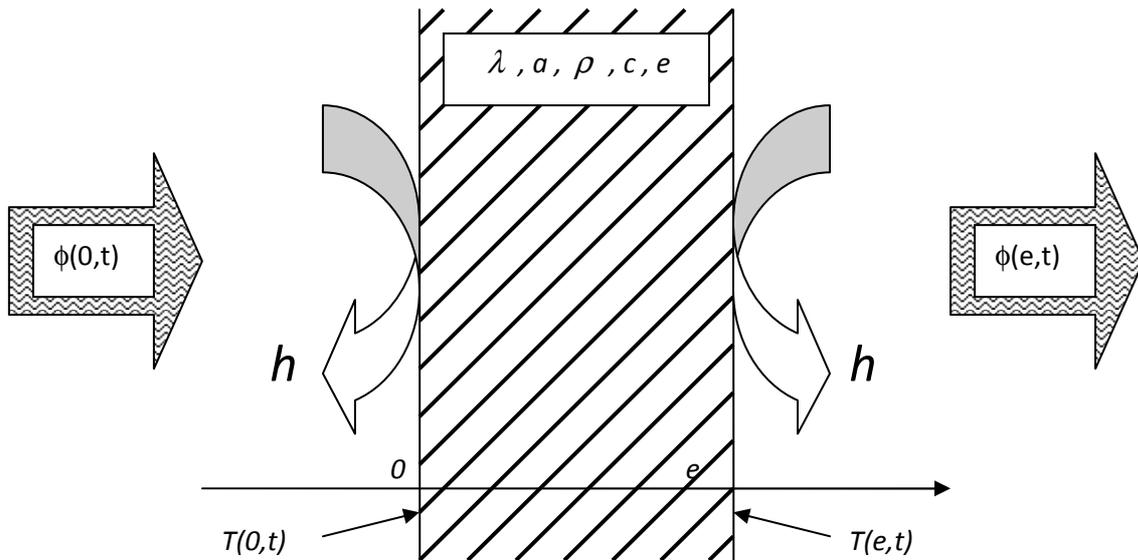


Figure IV.23 : Modèle monocouche avec pertes par convection

La représentation quadripolaire (Figure IV.24) de ce modèle fait donc intervenir trois matrices, l'une se rapportant à l'échantillon lui-même et les deux autres aux conditions aux limites.

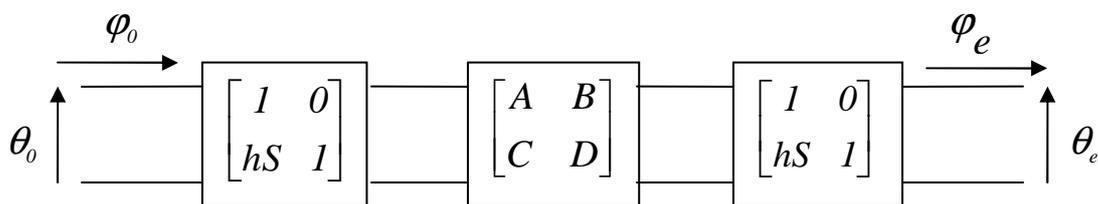


Figure IV.24 : Représentation quadripôle d'un mur passif avec convection naturelle

La représentation impédance du système étudié est quant à elle illustrer sur la Figure IV.25

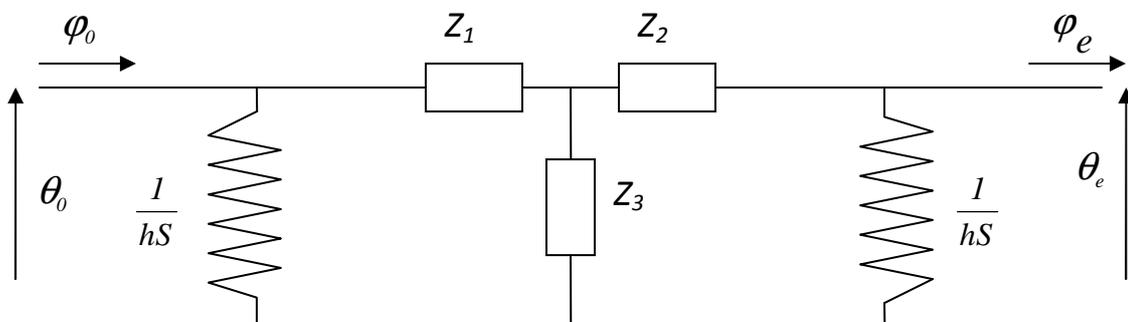


Figure IV.25 : Représentation de l'impédance d'un mur passif avec convection naturelle

Ce qui peut encore s'écrire :

$$\begin{bmatrix} \theta_o(p) \\ \varphi_o(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ hS & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ hS & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_e(p) \\ \varphi_e(p) \end{bmatrix}$$

En considérant que les flux entrant et sortant sont tous nuls à l'exception de l'apport du flash, la transformée de Laplace de la température en face avant est alors donnée par l'équation suivante :

$$\theta_o(p) = \frac{(A + hSB)Q}{C + 2hSA + (hS)^2B} = \frac{Q \left(\text{Cosh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + hS \frac{\text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}} \text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + 2hS \text{Cosh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + (hS)^2 \frac{\text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}}}}$$

L'emploi de la méthode de Stefest permet de retourner aisément dans l'espace temporel.

V-2-2- Simulation numérique à l'aide du logiciel COMSOL : application à la mesure de profondeur

Une fois précisé le modèle de l'expérience photothermique, nous avons voulu vérifier si notre approche permettait bien la mesure de la profondeur à laquelle se situe le défaut. Pour cela, nous avons développé une série de simulations, associant le progiciel COMSOL pour la construction de la réponse photothermique de l'échantillon étudié et notre méthode de dépouillement implémentée sur un programme Labview.

L'échantillon étudié est là aussi un bloc de plâtre contenant en son milieu, une lame d'air simulant un défaut de délaminage. Les dimensions géométriques du bloc de plâtre sont une longueur de 1 mètre (modélisation 2D), une largeur de 10 centimètres et une épaisseur de 2 centimètres. Les dimensions géométriques de la lame d'air sont une longueur de 1 mètre, une largeur de 9,9 centimètres et une épaisseur de 1 millimètre. Elle est située à une

profondeur que nous avons fait varier d'une simulation à l'autre. Nous avons considéré des profondeurs variant de 0,5 mm à 6 mm par pas de 0,5 mm. Les propriétés thermophysiques prises en compte sont : une conductivité thermique de $k=0.4 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, une masse volumique de $\rho=1600 \text{ Kg.m}^{-3}$, une chaleur massique de $C_p=830 \text{ J.Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, soit une diffusivité thermique de $a=6.10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ pour le bloc de plâtre et une conductivité thermique de $k=0.0259 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, une masse volumique de $\rho = 1.205 \text{ Kg.m}^{-3}$ et une chaleur massique de $C_p=1005 \text{ J.Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, soit une diffusivité thermique de $2,14.10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ pour la lame d'air.

Cet échantillon est éclairé par une excitation thermique d'une durée de 3 ms et d'une densité d'énergie de 10^6 W.m^{-2} . Des pertes par convection et rayonnement ($h=10 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$) sont considérées sur toutes les faces de l'échantillon (Figure IV.26).

Enfin, un maillage progressif de l'échantillon est utilisé (Figure IV.27), plus fin à l'endroit de l'excitation thermique et du défaut et plus large ailleurs et un pas de temps de 0,01s ont été considérés pour résoudre l'équation de la chaleur par la méthode des éléments finis.

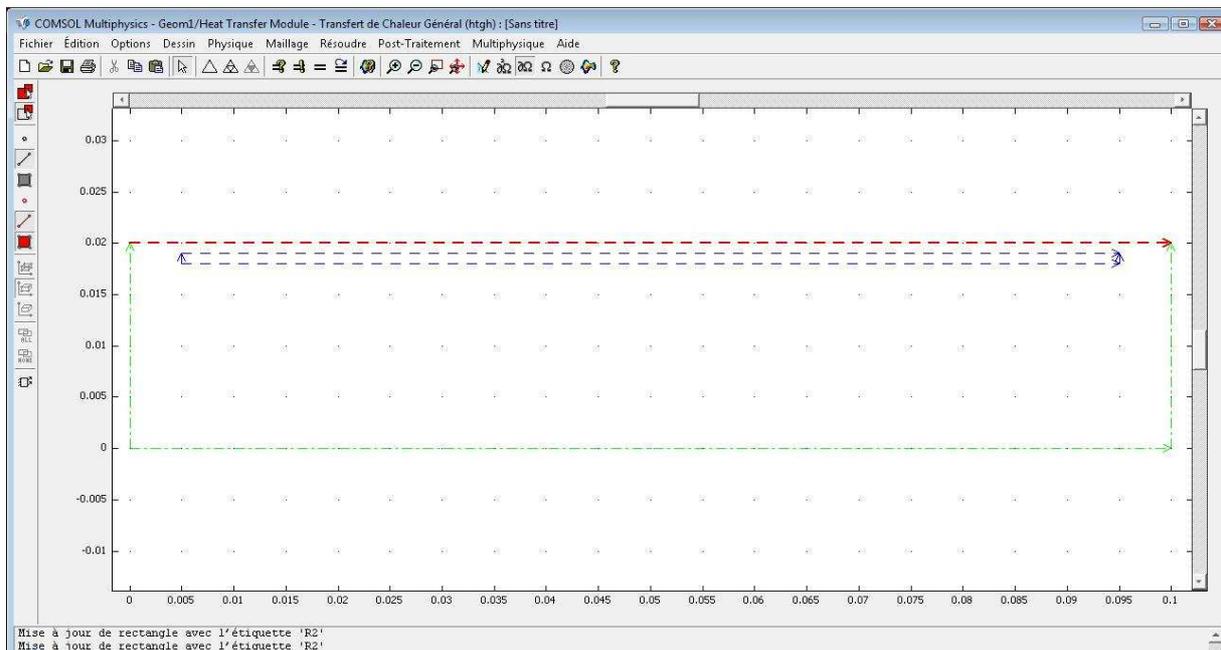


Figure IV.26 : Echantillon et conditions limites

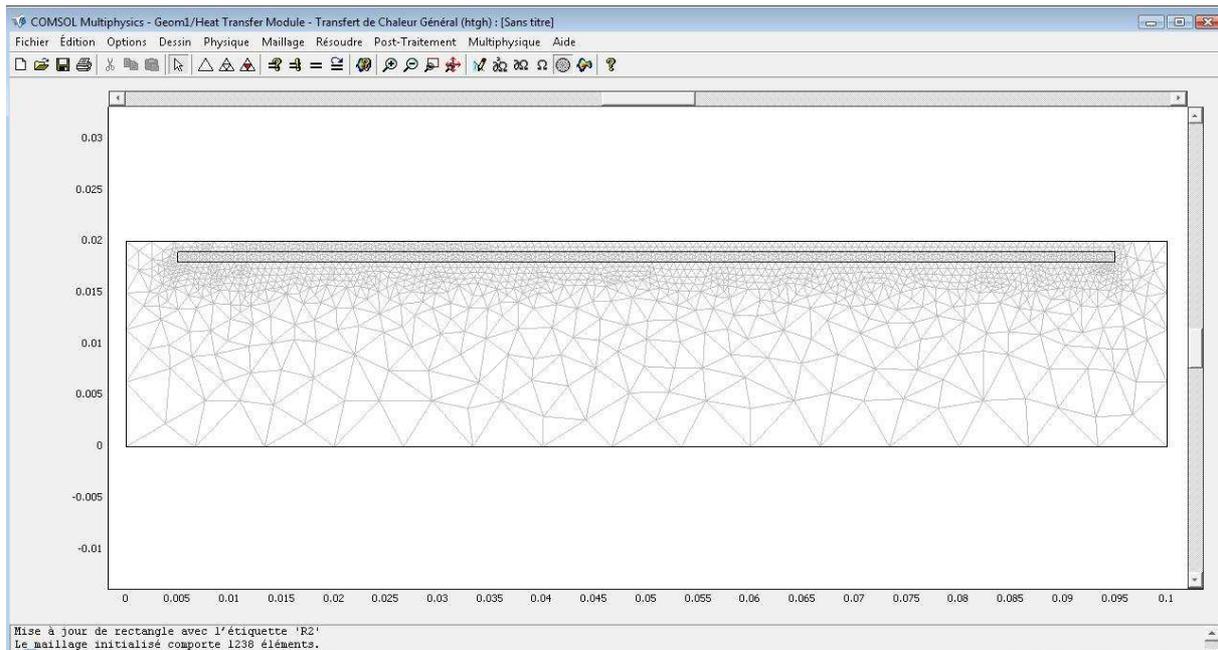


Figure IV.27 : Echantillon et maillage triangulaire

La Figure IV.28 présente un exemple de résultat de calcul COMSOL.

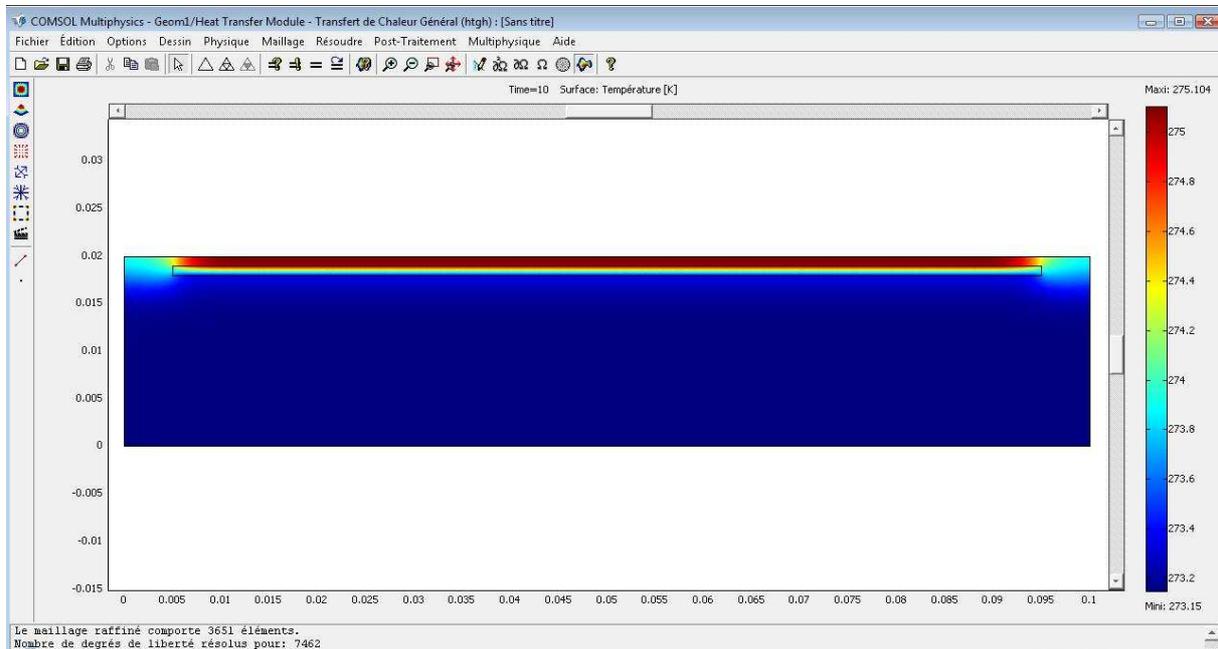


Figure IV.28 : Solution donnée par Comsol au temps 10 s

De ces simulations, nous tirons pour chaque profondeur de défaut un profil temporel de température, profil que nous ajustons à l'aide du modèle monocouche mettant en œuvre les quadripôles thermiques.

Un exemple de résultat obtenu est présenté sur la Figure IV.29. Il concerne l'étude d'un défaut situé à 1 mm de profondeur. Cette figure montre que le meilleur ajustement théorie/expérience est obtenu pour une épaisseur d'échantillon monocouche de 1,06 mm, ce qui est très proche de la valeur de référence.

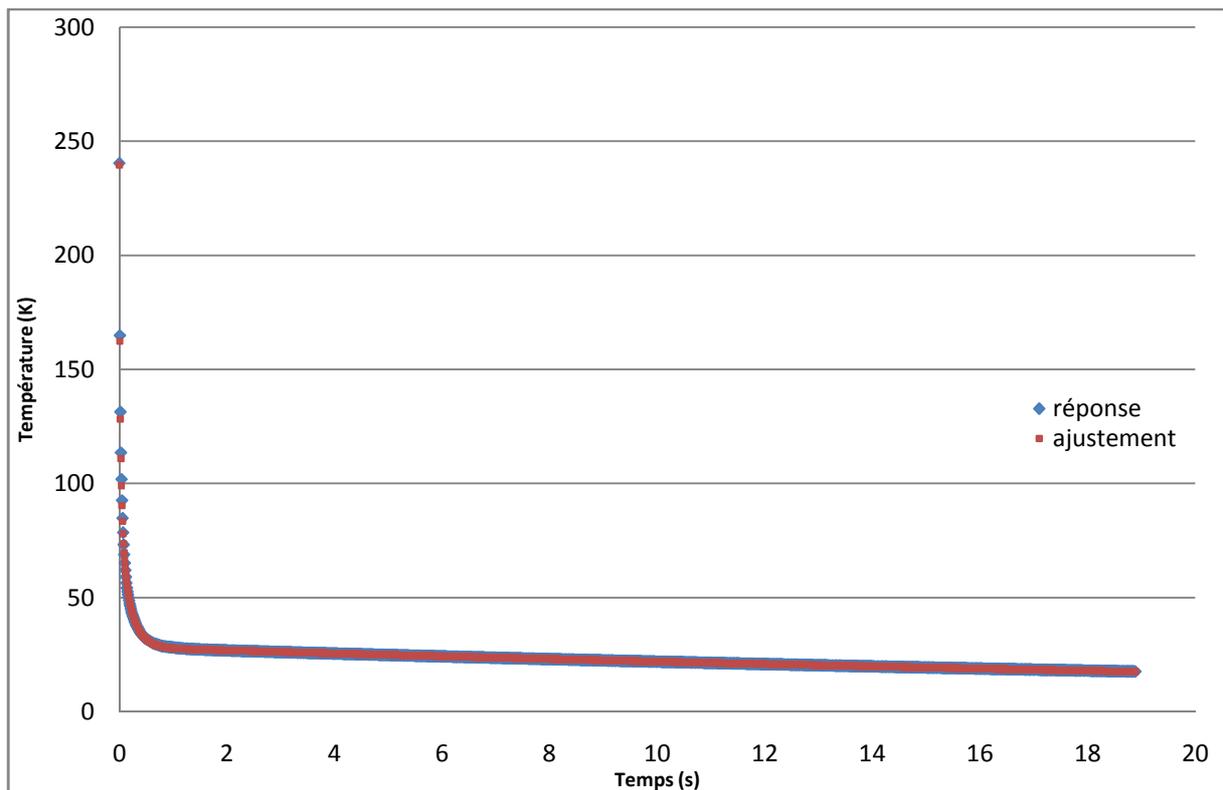


Figure IV.29 : Ajustement théorie-expérience pour un défaut situé à 1 mm

Nous avons répété cette étude pour les douze configurations expérimentales considérées. Les résultats obtenus par ajustement théorie/expérience sont confrontés, dans la Figure IV.30, aux valeurs théoriques retenues dans la simulation COMSOL. Cette confrontation montre des valeurs identifiées très proches des valeurs théoriques ce qui valide *a posteriori* notre approche de mesure de la profondeur de défaut

Profondeur du défaut fixée dans COMSOL (mm)	Profondeur estimée par le logiciel réalisé au laboratoire (mm)
0,5	0,523
1	1,06
1,5	1,54
2	2,09
2,5	2,46
3	2,92
3,5	3,59
4	3,93
4,5	4,43
5	5,03
5,5	5,49
6	5,96

Figure IV.30 : Comparaison entre la profondeur théorique et la profondeur trouvée via le logiciel

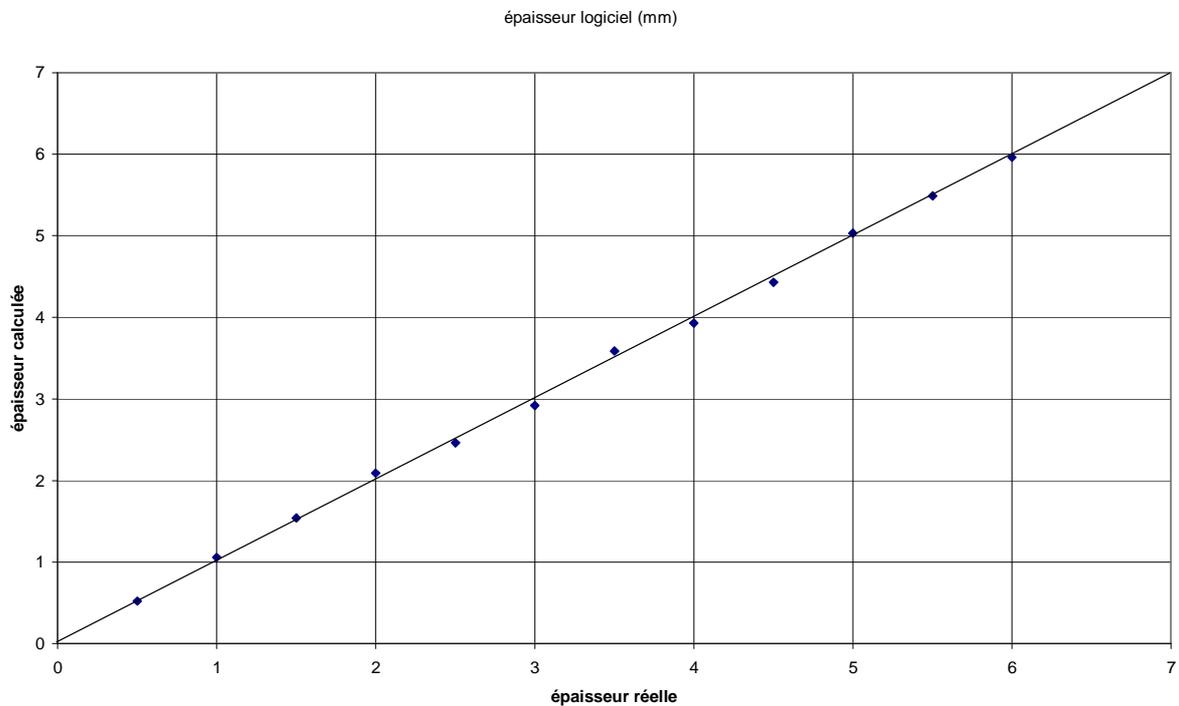
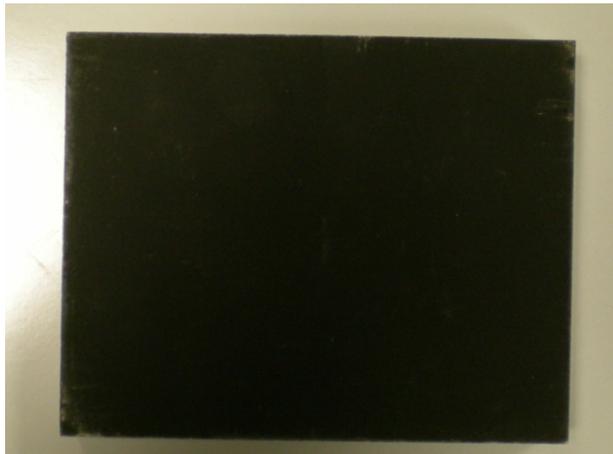


Figure IV.31 : Comparaison entre l'épaisseur réelle et l'épaisseur estimée

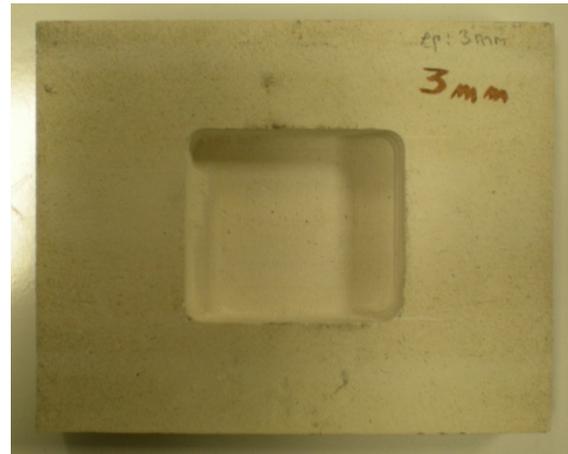
V-2-3- Mesure de profondeur de défaut : étude expérimentale sur un échantillon de laboratoire

A la suite de cette étude théorique concluante, nous sommes passés à une étude expérimentale. Avant d'analyser des défauts situés dans des peintures murales, nous avons testé la méthode sur des échantillons académiques.

Ces échantillons sont des blocs de plâtre de 15,3cm de longueur, de 12,3cm de largeur et de 2,3 cm d'épaisseur. Ils sont évidés en leur centre afin de simuler la présence d'un défaut. La dimension de ce défaut est de 6,7 cm de longueur, de 6,2 cm de largeur et est situé selon les échantillons à des profondeurs de 1,05mm (échantillon 1), 2,2mm (échantillon 2), 3,15mm (échantillon 3), 4,2mm (échantillon 4), 5,05mm (échantillon 5), 6,17mm (échantillon 6), 7,2mm (échantillon 7), 8,1mm (échantillon 8),



Face avant de l'échantillon



Face arrière de l'échantillon



Figure IV.32 : Echantillon étudié

Ces échantillons ont été analysés par radiométrie photothermique pulsée. Les uns après les autres, ils ont été éclairés pendant 10 s par un flux lumineux de 500 watts. Le détecteur est une caméra à bolomètre de type A20 Flir System. La fréquence d'acquisition retenue est de 50 Hz. Un exemple de thermogramme obtenu est présenté sur la Figure IV.33. Il fait clairement apparaître la position du défaut.

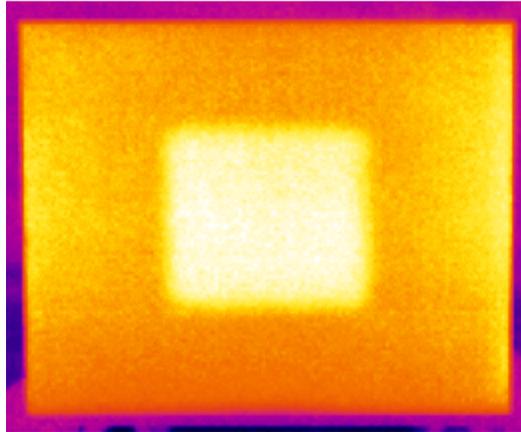


Figure IV.33 : Exemple d'image infrarouge obtenue

A partir des films photothermiques obtenus sont extraits les profils temporels de température à l'aplomb du défaut. Enfin, nous avons procédé à un ajustement théorie/expérience à l'aide du modèle photothermique monocouche mettant en œuvre les quadripôles thermiques afin de déterminer la profondeur inconnue. Pour cela, nous avons considéré une diffusivité thermique de $3,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (mesure effectuée à Nancy Chapitre III, paragraphe III.2).

Sur la Figure IV.34, nous présentons un exemple d'ajustement. Il s'agit de l'étude de l'échantillon 7. Cette figure montre que c'est pour une épaisseur d'échantillon de 7,26 mm que l'ajustement théorie/expérience est le meilleur. Cette valeur est très proche de la valeur de référence de 7,2 mm ; la méthode apparaît ainsi pertinente.

Nous avons ensuite répété cette procédure d'ajustement pour les échantillons étudiés et obtenu les résultats présentés dans le tableau Figure IV.35. Pour les 8 échantillons des estimations de profondeur de défaut mesurées par technique inverse le tableau révèle des valeurs proches de celles déterminées à l'aide d'une jauge de profondeur.

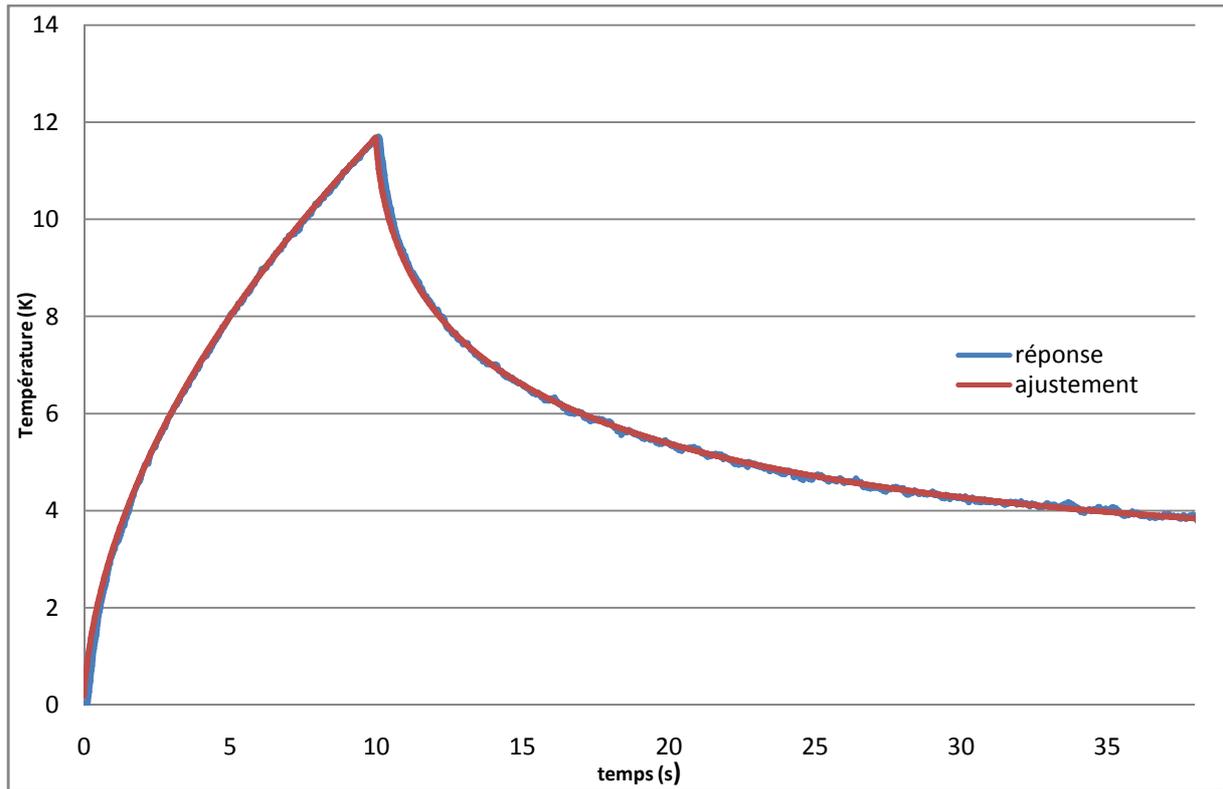


Figure IV.34 : Exemple d'ajustement pour l'échantillon 7

échantillon	Epaisseur de plâtre (mm)	Epaisseur estimée via le logiciel (mm)
1	1,05 (+- 0,04)	0,946
2	2,20 (+0,05 -0)	1,92
3	3,15 (+- 0,02)	3,39
4	4,20 (+-0,05)	4,64
5	5,05 (+-0,05)	5,56
6	6,17 (+-0,05)	6,43
7	7,20 (+- 0,04)	7,26
8	8,10 (+0,02 -0,05)	8,42

Figure IV.35 : Tableau récapitulatif des épaisseurs estimées *via* le logiciel pour chaque échantillon

V-2-4- Mesure de profondeur de défaut : Etude expérimentale sur une peinture murale

Les résultats précédents étant positifs, nous sommes passés à la détermination de la profondeur à laquelle se situe l'un des défauts de la réplique partielle du Saint-Christophe.

Ce défaut, une inclusion de plastazote, a été placé lors de la réalisation de la réplique par Gabriela Szatanik à une profondeur d'environ 3 mm, profondeur que nous nous proposons de retrouver par méthode photothermique.

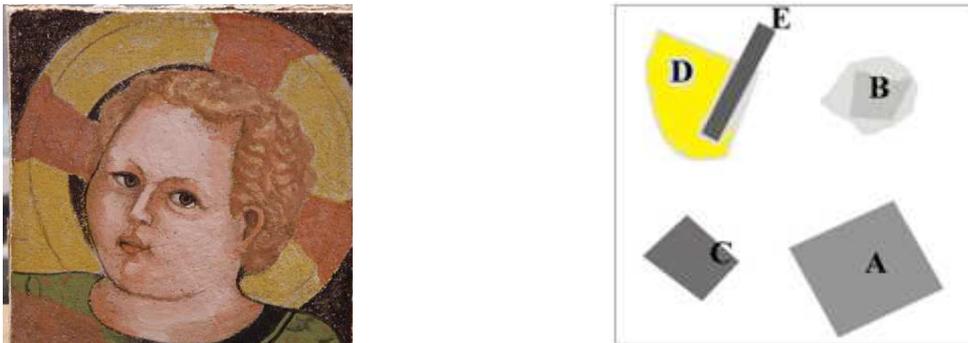


Figure IV.36 : fresque et défauts

Nous avons donc répété l'expérience photothermique sur la fresque. Le système mis en œuvre est la nouvelle version de SAMMTHIR. Les conditions expérimentales sont une durée d'éclairage de 10 secondes et une puissance excitatrice mise en œuvre de 2×500 watts.

A partir du film thermographique obtenu, nous avons extrait, à l'aplomb du défaut, 5 profils temporels de température. Nous avons ensuite procédé à un ajustement théorie/expérience de ces profils en prenant en compte une diffusivité thermique de $5,13 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (valeur mesurée au Chapitre III). Un exemple d'ajustement est présenté sur la Figure IV.37. Elle concerne la seconde expérience. Sur le tableau (Figure IV.38), nous avons ensuite regroupé l'ensemble des résultats obtenus. Ils sont toujours très proches de la valeur théorique de 3 mm ; le résultat s'avère donc satisfaisant.

Un exemple d'ajustement sur la réponse de la manipulation numéro 2 : 2,91 mm

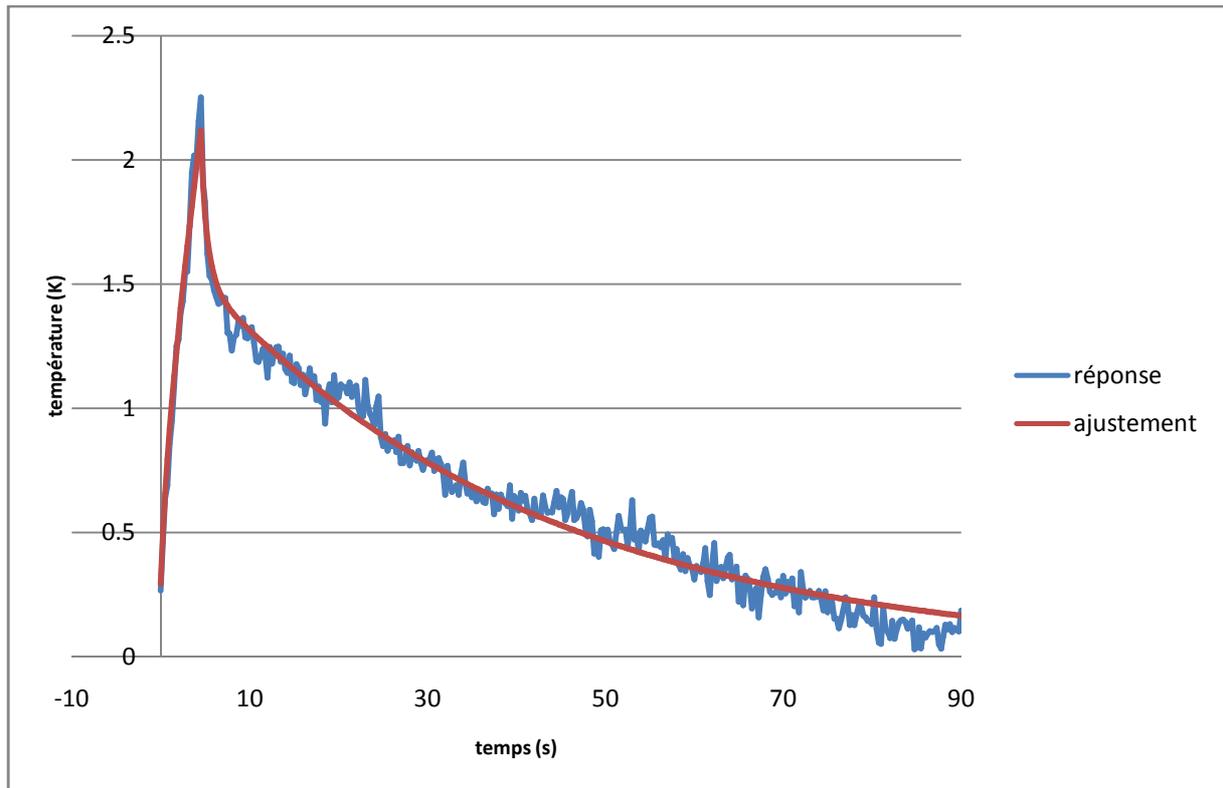


Figure IV.37 : Exemple d'ajustement pour la manipulation 2

Voici un tableau récapitulatif des valeurs de profondeur trouvée pour chacun des défauts :

Manipulation	Profondeur du défaut D (3mm)
1	2,72
2	2,91
3	3,28
4	2,71
5	3,01

Figure IV.38 : Tableau récapitulatif des profondeurs estimées pour le défaut D

VI- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vérifié la possibilité de la thermographie infrarouge stimulée en matière de mesure de profondeur à laquelle se situe un défaut.

Nous avons d'abord montré que différents paramètres caractéristiques de la réponse photothermique impulsionnelle obtenue étaient corrélés à ce paramètre géométrique.

Des thermogrammes synthétiques construits à partir de ces paramètres ont ensuite permis d'obtenir une image « tomographique » de l'évolution de la profondeur du défaut.

Dans un troisième temps, nous avons montré que l'étude de l'évolution de l'un de ces paramètres caractéristiques, l'aire sous la courbe de contraste, permettait une mesure convenable de la profondeur à laquelle se situait un défaut inconnu. Toutefois, cette méthode empirique n'est pas universelle car elle demande une étape d'étalonnage. Nous avons alors cherché à mesurer la profondeur inconnue à partir d'un ajustement théorie/expérience. Deux modèles ont été considérés, l'un faisant appel aux « ondes thermiques », l'autre aux quadripôles thermiques. Ils ont tous les deux permis une bonne mesure de la profondeur d'un défaut inconnu. La seconde méthode semble toutefois plus adaptée à une analyse flash. Enfin, nous avons montré que la méthode permettait de retrouver la profondeur à laquelle se situe le défaut étudié dans la fresque, réplique partielle du Saint-Christophe.

Conclusion générale

Dans ce travail de thèse, nous avons présenté une étude portant sur la détection et la caractérisation de défauts situés dans les œuvres d'art par thermographie infrarouge stimulée.

Le premier chapitre a été consacré à l'étude bibliographique. Il présente d'abord le principe général de la thermographie infrarouge stimulée. Il présente ensuite le principe de deux modes de mise en œuvre particulières : l'analyse sous excitation pulsée et l'analyse sous excitation aléatoire. Dans un troisième temps, nous avons présenté dans ce chapitre les problèmes de conservation que peuvent rencontrer les œuvres d'art et les travaux réalisés par la communauté scientifique des thermographes infrarouges pour essayer d'y remédier. Dans un quatrième temps et dans le but d'aboutir *in fine*, à la caractérisation des défauts, nous avons présenté différents outils de métrologie thermique :

En matière de mesure de diffusivité thermique, nous avons d'abord présenté la méthode flash de Parker. Nous avons ensuite présenté la méthode de mesure de diffusivité longitudinale face arrière mise en œuvre au LEMTA Nancy. Cette méthode a ensuite servi de base à celle que nous avons mise en œuvre pour l'analyse face avant des œuvres d'art.

Enfin, le dernier paragraphe de ce chapitre a été consacré à la présentation des méthodes classiques de mesure de profondeur de défaut par méthode photothermique.

Le second chapitre de cette thèse traite des possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection de défauts situés dans les œuvres d'art. Dans un premier temps, nous avons présenté le Système d'Analyse des Matériaux Minces par Thermographie InfraRouge (SAMMTHIR) développé pour la thèse. SAMMTHIR permet une analyse étendue, tant sous excitation pulsée que sous excitation aléatoire, ce qui est novateur.

Nous avons ensuite présenté les différentes études menées sur une peinture murale académique : une réplique partielle du Saint-Christophe de la collection Campana du Louvre. Nous avons alors montré que le dispositif SAMMTHIR, mis en œuvre sous excitation pulsée, permettait de retrouver les résultats obtenus par Gabriela Szatanik au cours de son mémoire de fin d'étude. Nous avons alors remarqué que cette méthode conduisait à une élévation de la température de l'échantillon étudié assez importante. Nous avons donc étudié cette œuvre d'art par thermographie infrarouge aléatoire. Nous avons alors montré que cette méthode, a

permis la détection de quatre défauts situés dans l'œuvre d'art. Nous avons aussi montré un gain notable en termes d'élévation de température de l'œuvre analysée : l'impact thermique apparaîtrait bien moindre.

Afin d'aider les restaurateurs dans leur phase de prise de décision, nous avons alors proposé quelques post-traitements, permettant de mieux faire ressortir la signature photothermique des défauts (changement de table d'allocation des couleurs ou seuillage par histogramme associés à des la morphologie mathématique). Dans une seconde étape, nous avons étudié les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée appliquée à la détection de défauts situés dans d'autres types d'œuvres d'art telles que des marqueteries (échiquier, échantillons du programme européen LASERACT, couvercle de boîte malgache), des vitraux et des céramiques. Là aussi, nous avons montré l'intérêt de la méthode photothermique, méthode qui permet en effet la détection des différents types de défauts recherchés. Enfin, dans une troisième étape, nous avons étudié les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection *in situ* de défaut dans les peintures murales. En effet, il était important de pouvoir éprouver le système expérimental dans les conditions réelles de restauration. Le système a donc été testé sur différents sites tels que l'église Saint-Florentin de Bonnet, l'abbaye de Saint-Savin sur Gartempe pour l'analyse de peintures murales du XI^{ème} siècle, la chapelle Saint-Pierre de Villefranche-sur-Mer pour l'analyse de peintures murales de Jean Cocteau ainsi qu'à la villa Kerylos pour l'analyse d'une fresque déposée. Les résultats obtenus lors de ces analyses *in situ* sont là aussi toujours positifs. Ils montrent d'abord que la méthode photothermique permet bien de détecter *in situ* des défauts situés dans des peintures murales et, ce, dans des conditions réelles de restauration. Les résultats obtenus par analyse photothermique infrarouge sont toujours corrélés à ceux obtenus par analyse acoustique (et à Saint-Savin à ceux obtenus par interférométrie holographique). Par ailleurs, la méthode photothermique semble permettre, par rapport à la méthode acoustique, une détection plus précise, plus rapide et plus objective de ces défauts (voire même moins destructive en ce qui concerne les défauts situés à proximité immédiate de la surface de la peinture murale, qu'une analyse acoustique pourrait détériorer). Ils montrent, dans un quatrième temps, que la variante aléatoire de la thermographie infrarouge stimulée, en plus de permettre une analyse sous contraintes énergétiques moindres, donne accès à des images plus résolues que la variante pulsée de cette méthode.

Dans le troisième chapitre, nous avons d'abord présenté le principe de la technique de mesure de diffusivité thermique longitudinale retenue pour l'étude. Nous avons présenté les

simulations numériques qui ont servi à valider notre programme d'estimation de diffusivité thermique. Ces simulations ont d'abord été réalisées pour des mesures en face arrière, déjà validées par le LEMTA Nancy, ensuite pour des mesures en face avant. Dans les deux cas la méthode donne accès à une bonne estimation du paramètre diffusivité thermique.

Suite à ces deux études théoriques positives, nous avons développé une étude expérimentale. Nous avons d'abord présenté le dispositif développé pour l'étude, les échantillons étudiés, le logiciel développé, ainsi que les résultats obtenus lors de l'étude d'un échantillon de plâtre. Ces dernières montrent alors que la méthode proposée dans la thèse permet de retrouver avec une bonne précision les valeurs de diffusivité mesurées avec le diffusivimètre flash classique du LEMTA Nancy.

Ces résultats expérimentaux étant positifs, nous avons ensuite mesuré la diffusivité thermique de la fresque académique étudiée au chapitre I.

Dans le dernier chapitre de la thèse, nous avons étudié les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de caractérisation de défauts. Tout d'abord, nous avons étudié une voie plutôt empirique basée sur l'étude de points caractéristiques des réponses photothermiques et d'une procédure d'étalonnage. Ces points caractéristiques sont, l'intégrale sous la réponse impulsionnelle, les temps de vol, les coordonnées du maximum de contraste et l'aire sous la courbe de contraste. Dans ce cadre, nous avons montré que chacun de ces paramètres étaient corrélés à la profondeur de défaut et donc qu'ils pouvaient être mis en œuvre pour aboutir à la détermination de ce paramètre thermophysique. Celui que nous avons étudié plus particulièrement dans cette thèse est l'aire sous la courbe de contraste. Nous avons montré d'autre part que des thermogrammes synthétiques bâtis à partir de ces paramètres caractéristiques permettaient d'aboutir à une image tomographique. Cette voie est donc intéressante mais présente l'inconvénient de ne pas être universelle à cause de la phase d'étalonnage. La seconde voie que nous avons étudiée est l'utilisation d'une modélisation de l'expérience photothermique associée à un ajustement entre théorie et expérience. Nous avons alors eu deux approches. La première consiste à faire appel aux notions d'ondes progressives et régressives. Dans le premier cas, nous avons montré la faisabilité de la méthode, mais aussi qu'elle était sous sa phase actuelle peu adaptée à l'analyse photothermique flash ou aléatoire. La seconde a consisté à faire appel aux quadripôles thermiques pour résoudre l'équation de la chaleur. Dans le second cas, nous avons d'abord montré la faisabilité théorique de la méthode puis sa faisabilité expérimentale à partir de l'étude d'échantillon de plâtre calibrés. Enfin la

dernière partie du chapitre était consacré à la caractérisation de la profondeur des défauts présents dans la fresque académique. Nous avons montré que notre approche permettait une bonne mesure de la profondeur recherchée.

A l'issue de cette thèse, il est possible de dire que la thermographie infrarouge stimulée peut être considérée comme un nouvel outil d'aide à la restauration du patrimoine. En effet, nous avons montré que cette technique permettait la détection et la caractérisation de défauts situés dans différents types d'œuvres d'art du patrimoine. Ce travail n'est bien sûr qu'une étape dans le développement de cette thématique. Il y aurait maintenant à définir la technique photothermique et le protocole de mise en œuvre les mieux adaptés à l'analyse des œuvres d'art ; c'est à dire celle qui sera la plus sensible tout en étant la moins perturbatrice. Il y aurait ensuite à optimiser le mode de dépôt d'énergie, afin que celui-ci soit le moins sensible possible à la couche picturale. Il faudrait encore optimiser la technique de mesure *in situ* de diffusivité thermique, à déterminer son domaine d'application et sa sensibilité. Dans ce cadre, d'autres techniques de mesure peuvent aussi être étudiées. Il y aurait à affiner la détermination de la profondeur de défaut, à étudier les limites de la méthode, voire à faire appel à des modèles plus raffinés, permettant entre autres la prise en compte des anisotropies des matériaux.

Améliorer SAMMTHIR, tant au niveau de ses performances intrinsèques (résolution spatiale et thermique) qu'au niveau de l'aide à la prise de décision ou de la restitution des résultats *in situ* est par ailleurs souhaitable.

Il y aurait enfin à aborder l'étude d'autres types de défauts tels que des sels ou des restaurations antérieures.

C'est donc une entreprise importante qui s'ouvre ici.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. Szatanik, *Etude et restauration d'une peinture murale représentant Saint Christophe* (collection Campana, Louvre). *Essai d'application de la thermographie infrarouge stimulée pour l'examen du support*. Institut national du patrimoine, département des restaurateurs, 2004
- [2] X. Maldague, *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography*, London, Springer-Verlag, 224 p., 1993
- [3] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler and G.L. Abbott, *Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity*, J. App. Phys., 32 (9) (1961) 1679-1684.
- [4] J.-C. Kueny, D. Maillart, J.-L. Bodnar, *Radiométrie photothermique sous excitation aléatoire et analyse corrélatoire : Approche théorique des possibilités de la méthode en matière d'identification de système thermique*, Actes du congrès de la Société Française de Thermique, Nantes, 29-31 mai 2001
- [5] S. Oblin, J.-L. Bodnar, *Radiométrie photothermique sous excitation aléatoire et analyse paramétrique : Approche théorique des possibilités de la méthode en matière d'identification de système thermique*, Actes du congrès de la Société Française de Thermique, Arcachon, 1999
- [6] J. Auvray, *Traitement du signal*, IST SETI-3, UPMC
- [7] P. Castellini, N. Paone, E. P. Tomasini : *A Laser Based Measurement Technique for the Diagnostic of Detachments in Frescoes and Wooden Works of Art*, LACONA II, 2nd International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks, Liverpool (UK), 1997
- [8] B. F. Miller : *The feasibility of using thermography to detect subsurface voids in painted wood panels*, JAIC 16 p 27-35, 1977.
- [9] E. Grinzato, C. Bressan, S. Marinetti, P. G. Bison, C. Bonacina : *Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography : Giotto at infrared*, in *Infrared Physics & Technology* 43 (2002) 165–169
- [10] C. Meola, R. Di Maio, N. Roberti, G.-M Carlomagno : *Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures*, *Engineering Failure Analysis* 12 (2005) 875–892
- [11] C. Meola : *Infrared thermography of masonry structures*, *Infrared Physics & Technology* 49 (2007) 228–233

-
- [12] N.-P. Avdelidis, A. Moropoulou : *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*, Journal of Cultural Heritage 5 (2004) 119–127
- [13] N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, E.T. Delegou : *A thermographic study for the assessment of historic structures*, Qirt 2004
- [14] E. Grinzato, P.-G. Bison, S. Marinetti : *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*, Journal of Cultural Heritage 3 (2002) 21–29
- [15] C. Ibarra-Castanedo, S. Sfarra, D. Ambrosini, D. Paoletti, A. Bendada, X. Maldague : *Subsurface defect characterization in artworks by quantitative PPT and holographic interferometry*, Qirt 2008
- [16] H. Berglinda, A. Dillenz : *Detecting glue deficiency in laminated wood—a thermography method comparison*, NDT&E International 36 (2003) 395–399
- [17] G. M. Revel, S. Rocchi : *Defect detection in ceramic materials by quantitative infrared thermography*. QIRT 2006
- [18] N. P. Avdelidis, E. T. Delegou, A. Moropoulou : *A thermographic survey for the monitoring of moisture in porous stone*. NDT.net
- [19] E. Rosina, G. Roche : *Analysis of Moisture for the Preservation of Frescoes at Malpaga Castle*, 15th WCNDT, 2000 ROMA.
- [20] N. Ludwig, V. Redaelli, E. Rosina, F. Augelli : *Moisture detection in wood and plaster by IR thermography*, Infrared Physics & Technology 46 (2004) 161–166
- [21] T. Tanaka : *Wood inspection by thermography*, 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood
- [22] P. Meinschmidt : *Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials* 14th international Symposium of nondestructive testing of wood, Hannover , Germany, May 2nd-4th 2005
- [23] C. Meola, G.-M. Carlomagno, L. Giorleo : *The use of infrared thermography for materials characterization*, Journal of Materials Processing Technology 155–156 (2004) 1132–1137
- [24] N. Ludwig, E. Rosina : *Restoration mortars at IRT: optical and hygroscopic properties of surfaces*, Qirt 2006
- [25] G. Szatanik, M. Gerard, J.-L Bodnar, M. Stefanaggi , V. Detalle, F. Pierron et A. Brandt-Grau, *Examen d'œuvres d'art par radiométrie photothermique*. Actes du colloque "mesures optiques pour l'industrie", 15-19 nov 2004, Saint Etienne.
- [26] G. Szatanick et Jean Luc Bodnar, *Contrôle d'œuvres d'art par thermographie*. Actes du congrès thermogram' 2005, 20-21 oct 2005, Senart, pp 163-174

- [27] G. Szatanik, M. Gerard, J.-L. Bodnar, Marcel Stefanaggi, Vincent Detalle, F. Pierron, R. Geoffroy, Jean-Charles Candoré et Astrid Brandt-Grau : *Contrôle non destructif du Saint Christophe par radiométrie photothermique*, Actes du colloque "mesures optiques pour l'industrie", 21 nov 2005, Marseille (puis Revue Supoptique Avenir, décembre 2005, pp 19 – 22 - recueil des meilleurs articles présenté au congrès CMOI 2005).
- [28] Gabriela Szatanik – Panaït, Mathieu Gerard et Jean-Luc Bodnar : *La thermographie infrarouge stimulée pour l'examen des enduits dans les peintures murales : Application au Saint Christophe portant l'enfant Jésus*, Journal Core, n°17, décembre 2006, pp 64 – 70
- [29] D. Maillet et al., Thermal Quadrupoles – *Solving the Heat Equation through Integral Transforms*, John Willey & Sons, Chichester, 2000.
- [30] I. Philippi, J.C. Batsale, D. Maillet et A. Degiovanni, *Traitements d'images infrarouges par transformation intégrale – Application à la mesure de diffusivité thermique de matériaux anisotropes par méthode Flash*, Rev. Gén. Therm., 392-393 (1994), 486-496.
- [31] J.C. Krapez, L. Spagnolo, M. Frieß, H.P. Maier, G. Neuer, *Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography*, International Journal of Thermal Sciences 43 (2004) 967–977, 2004
- [32] B. Remy, A. Degiovanni et D. Maillet, *Mesure de la diffusivité thermique de matériaux anisotropes de petites dimensions par thermographie infrarouge et transformations intégrales*, Congrès de la Société Française de Thermique, SFT 2007 "Thermique et Société", Île des Embiez, 29 mai – 01 juin 2007, p. 933-938
- [33] J.-C. Krapez, F. Lepoutre, D. Balageas, *Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated thermography*, 8th International Topical Meeting on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe, January 22-25, 1994
- [34] C. Meola, *A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography*, Materials Letters 61 747–750, 2007
- [35] X. MaIdague, Y. Largoutit, J.-P. Couturier : *A study of defects depth using neural networks in pulse phase thermography : modeling, noise, experiments*. Revue générale de thermique, 1998, vol. 37
- [36] J.-P. Cocquerez et S. Philipp, *Analyse d'images : filtrage et segmentation* Masson, France, 1995.
- [37] J.-L. Bodnar : *Radiométrie photothermique appliquée à la détection et à la caractérisation de fissures*. Thèse de doctorat, 21 septembre 1993.
- [38] J.-L. Bodnar, M. Egée, C. Menu, R. Besnard, A. Le Blanc, J.Y. Sellier : *Cracks Détection by photothermal mobile probe : theory and experimentation*. Proceeding of the 12th

international conference and exhibits of NDE in nuclear and pressure vessel industries, 10-13 octobre 1993, Philadelphie, USA.

- [39] J.L Bodnar, M. Egée, C. Menu, R. Besnard, A. Le Blanc, J.Y. Sellier : *Cracks Détection by a moving photothermal probe*. Journal de Physique IV, volume 4, juillet 1994, pp 591-594.
- [40] G. Tucker, S. Whittle, T. Wang, *On Numerical Recovery Methods for the Inverse problem*, 2006.
- [41] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, 2nd edition, Oxford University Press, New-York 1959

RESUME :

Ce travail apporte une contribution à l'étude de la détection et de la caractérisation des défauts situés dans les peintures murales par thermographie infrarouge stimulée.

Nous présentons d'abord le dispositif expérimental et les logiciels de traitement développés spécifiquement pour cette étude.

Nous montrons ensuite que la méthode photothermique permet bien la détection de délaminage situés dans des peintures murales académiques mais aussi dans des peintures murales analysées *in situ* comme par exemple à l'abbaye de Saint-Savin sur Gartempe classée au patrimoine mondial de l'Unesco.

Nous montrons encore que la méthode permet la détection de défauts situés dans d'autres types d'œuvres d'art (marqueteries, vitraux).

Dans la quatrième étape de ce travail, nous proposons et montrons la faisabilité d'une nouvelle méthode de mesure de diffusivité thermique longitudinale, utilisable pour l'analyse sur site d'œuvres d'art.

Enfin, dans une cinquième étape, cette thèse montre que la thermographie infrarouge stimulée, à partir d'études empiriques ou de confrontation théorie / expérience permet d'aboutir à la détermination de la profondeur à laquelle se situe une inclusion de plastazote dans une fresque académique.

MOTS CLES :

Thermographie infrarouge stimulée. Contrôle non destructif. Peintures murales. Œuvres d'art. Caractérisation thermophysique. Métrologie thermique. Diffusivité thermique. Caractérisation de défauts. Détection de défauts. Excitation pulsée. Excitation aléatoire.

ABSTRACT :

This work makes a contribution to the study of the detection and the characterization of the defects situated in mural paintings by stimulated infrared thermography.

First, we present the experimental device and software specifically developed for the study.

We show then that the photothermal method allows the detection of delaminated parts situated in academic mural paintings but also in mural paintings analyzed *in situ* as for example in the abbey of Saint-Savin sur Gartempe classified in the UNESCO world heritage.

We still show that the method allows the detection of defects situated in the other types of works of art (marquetries, stained glasses).

In the fourth stage of this work, we propose and show the feasibility of a new method of measure of longitudinal thermal diffusivity, useful for the *in situ* analysis of works of art.

Finally, in the fifth stage, this thesis shows that the stimulated infrared thermography, from empirical studies or from confrontation theory / experiment allows ending in the determination of the depth of an inclusion of plastazote situated in an academic fresco.

KEYWORDS :

Stimulated infrared thermography. Non-destructive testing. Mural paintings. Works of art. Thermophysical characterization. Thermal metrology. Thermal Diffusivity. Characterization of defects. Detection of defects. Pulsed excitation. Random excitation.