Master Systèmes Dynamiques et Signaux

Mémoire de master

Détection de défauts par méthode photothermique

Auteur :
Mme. Mélissa Pinon

Jury :
Pr. L. Autrique
Pr. B. Castanier
Pr. A. Heurtier
Dr. L. Perez
Dr. P. Richard

Président :
Pr. L. Hardouin

Version du
1er juillet 2021

Remerciements

J'aimerai remercier plusieurs personnes pour avoir rendu ce stage possible mais également pour m'avoir aidée durant cette période.

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants Mme PEREZ et M. AUTRIQUE pour leur aide et le partage de leurs travaux ces derniers mois.

Je tiens également à remercier M. MERCIER Franck et Mme GERARD Marie-Françoise pour avoir pris le temps de répondre à mes questions mais également pour leur bonne humeur.

Je remercie également M. BIGAUD David de m'avoir accueilli au sein du LARIS durant ce stage.

À mes amis, et particulièrement à M. BLAIN Paul et M. RETIF Martin pour avoir partagé leurs connaissances et leur passion dans les domaines de l'ébénisterie et de la lutherie, je leur souhaite de réussir dans leurs projets à venir.

Je remercie également toute l'équipe du master SDS ainsi que l'équipe SAGI pour leurs enseignements lors de ces dernières années à Polytech' Angers.

Enfin, j'adresse une pensée particulière à mes parents pour leur relecture, leurs corrections et leur soutien durant ces dernières années.

Table des matières

Introduction **1**

1 Principe de la méthode et éléments de mise en oeuvre **3**

1.1 Généralités et mise en équation 3

1.2 Présentation du banc de test 6

1.3 Caméra thermique et logiciel d'acquisition 8

1.4 Traitement d'images et analyse des résultats 10

2 Application de la méthode aux échantillons en bois **11**

2.1 Rappel bibliographique 11

2.2 Création des échantillons 15

2.3 Phase d'expérimentation et interprétations des résultats 17

2.3.1 Paramètres influençant les températures observées. 17

2.3.2 Détection de défaut par méthode photo-thermique pour les échantillons en bois. 20

3 Application de la méthode aux peintures sur toile **25**

3.1 Rappel bibliographique 25

3.2 Création des échantillons 28

3.3 Phase d'expérimentation et interprétations des résultats 29

3.3.1 Détection de défaut par méthode photo-thermique pour les peintures sur toile. 33

Conclusion et perspectives **37**

A Échange autour de l'ébénisterie et de la lutherie **39**

B Caractérisation des défauts dans les collages. **43**

Table des figures

1 Logo du LARIS. 1

1.1 Principe de la méthode. 4
1.2 Exemple d'évolution thermique d'un matériau chauffé périodiquement. . . 5
1.3 Ampoule et montage de Köhler. 6
1.4 Montage en transmission. 7
1.5 Alimentation et pilotage. 7
1.6 Caméra OPTRIS PI 640. 8
1.7 Capture d'écran de PI OPTRIS Connect. 8
1.8 Configuration pour l'enregistement. 9

2.1 Matrice du bois. 12
2.2 érable ondé (Epiphone)à gauche pommelé à droite(Les Paul). 13
2.3 Collage à plat (source image :lutherie-guitare.org). 13
2.4 Assemblage, ici queue d'aronde(source image :Cray Birkenwald). 14
2.5 Guitare à gauche(source image : clicmusic), violon à droite(source image : violon.com). 14
2.6 Création des échantillons en bois. 16
2.7 Liste des échantillons de bois disponibles(densité : wikipedia). 16
2.8 Visuel des échantillons de bois disponibles. 16
2.9 Effet de la puissance sur les températures mesurées à l'extinction de la chauffe. 17
2.10 Effet de l'épaisseur sur les températures mesurées à l'extinction de la chauffe. 18
2.11 Effet de la période sur les températures mesurées à l'extinction de la chauffe. 19
2.12 Résultats obtenus pour différentes essences. 20
2.13 Cartographie IR : à gauche le noyer , à droite le verre. 21

2.14 Cartographie de module : à gauche l'acajou, à droite le sapin. 22
2.15 Distribution des modules selon l'axe vertical et l'axe horizontal. 22
2.16 Cartographie de module : Amplitude des oscillations. 23
2.17 Détection d'un défaut dans l'échantillon de noyer. 24

3.1 A gauche l'œuvre originale, à droite l'œuvre avec les esquisses visibles. *Détails de l'oeuvre de Gérard de Saint-Jean intitulée "Adoration des rois mages" 1490.* 26
3.2 Applications à des fresques murales. 27
3.3 Échantillons de peinture sur toile. 28
3.4 Deuxième série des échantillons de peinture sur toile. 29
3.5 Observations pour les échantillons de couleurs différentes. 30
3.6 Effet de l'épaisseur sur les mesures en infrarouge. 31
3.7 Effet de la puissance sur les mesures en infrarouge. 31
3.8 Effet du type de peinture sur les observations dans l'infrarouge. 32
3.9 Impact de la période sur les températures observées. 33
3.10 Exemple de distribution de température. 34
3.11 Cartographie de module pour la peinture sur toile. 35
3.12 Détection d'un défaut dans la peinture sur toile. 36

B.1 Collage entre le manche et les touches. 43
B.2 Collage entre le manche et la tête. 44
B.3 Collage entre les éclisses et les contres-éclisses. 44
B.4 Barrage concert à gauche et V à droite (source image : guitareconcert.com et les-grandes-guitares-acoustiques.com) 44

Liste des acronymes

LARIS	*Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes*
SDS	*Systèmes Dynamiques et Signaux*
SAGI	*Systèmes Automatisés et Génie Informatique*
CND	*Contrôle non destructif*
UV	*Ultra violet*
IR	*Infra-rouge*
CIRAM	*Centre d'Innovation et de Recherche pour l'Analyse et le Marquage*

Introduction

Ce rapport est rédigé suite au stage de quatre mois effectué dans le cadre du Master en Systèmes Dynamiques et Signaux (SDS) et de la dernière année d'école d'ingénieurs en Systèmes Automatisés et Génie Informatique (SAGI) à Polytech' Angers. Ce stage s'est déroulé au Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS). Il fait suite à une première étude bibliographique portant sur la mise en oeuvre d'une sollicitation thermique pour la détection de défauts et à son application au domaine de la lutherie et de la peinture sur toile.

FIGURE 1 – Logo du LARIS.

Le LARIS regroupe des chercheurs de 4 composantes de l'université d'Angers (Polytech' Angers, IUT, UFR Sciences, UFR ESTHUA), du CHU et de l'Université Catholique de l'Ouest (UCO). Des travaux y sont menés depuis plusieurs années sur la détection de défauts dans des matériaux composites. Au cours de ce stage et lors des recherches bibliographiques, j'ai été encadrée par Laetitia PEREZ et Laurent AUTRIQUE, enseignants-chercheurs au LARIS.

L'objectif principal de cette période est de mettre en oeuvre une méthode de détection de défauts utilisant la photothermie. Cette méthode doit être non destructive car elle sera à terme appliquée à la recherche de défauts (structuraux ou endommagements) sur des peintures sur toile et des instruments de musique en bois collés. Le contexte d'un tel diagnostic est original car il s'agit d'objets qui peuvent être rares et précieux aussi bien par leur prix que par leurs intérêts artistiques et historiques. Ces deux domaines ont été choisis car ils correspondaient bien aux caractéristiques de la méthode (non destructive et pouvant être faiblement intrusive). Dans le domaine de la restauration d'oeuvres d'art, qu'il s'agisse

de peinture, de mobilier ou d'instrument de musique, il est demandé de limiter autant que faire se peut l'impact sur les pièces d'origine. Le protocole expérimental a été mis en oeuvre à partir d'un banc de test qui permet l'observation locale (zone de petite dimension) des pièces à tester. Des campagnes expérimentales préliminaires ont été effectuées sur des échantillons connus afin de déterminer les paramètres opératoires à considérer lors des expérimentations sur les échantillons plus *précieux*.

Le rapport sera constitué de trois grandes parties. La première portera sur la méthode photo-thermique modulée. Son principe, le fonctionnement du banc de test, de la caméra thermique utilisée ainsi que du programme de post-traitement des données seront brièvement exposés. Dans une seconde partie, cette méthode sera mise en oeuvre pour différents échantillons de bois afin de s'approcher du contexte des instruments en bois collés. Cette partie permettra d'évoquer les propriétés des composants (bois, colle, vernis) des instruments et de leurs impacts sur le son et la structure de ceux-ci. Nous finirons avec une troisième partie similaire à la précédente portant sur les peintures sur toile. Chacune des deux parties sera composée d'une partie théorique puis d'une partie expérimentation permettant de confirmer ou non certaines hypothèses émises. Enfin, quelques remarques clôtureront ce rapport et quelques perspectives seront proposées.

Chapitre 1

Principe de la méthode et éléments de mise en oeuvre

Dans cette première partie, la méthode utilisée pour la détection de défauts est présentée. En plus des principes physiques liés à la technologie mise en oeuvre, le banc de test et le rôle de chacun de ses éléments seront exposés. Nous nous attarderons ensuite sur les possibilités offertes par la caméra thermique utilisée et sur les informations que nous souhaitons collecter. Nous verrons que cette partie a motivé certains choix expérimentaux et influé le post-traitement des données collectées.

1.1 Généralités et mise en équation

La détermination d'un défaut au sein d'un matériau est souvent effectuée à partir de techniques acoustiques nécessitant un vecteur fluide pouvant détériorer le dit matériau. Pour pallier cette éventuelle limitation, il est possible de considérer des techniques différentes basées sur l'observation du comportement thermique du matériau consécutif à un échelon de chauffe. L'observation à l'aide d'une caméra infrarouge permet alors de révéler des défauts (éventuellement profonds). Toutefois, ces approches nécessitent en général un apport d'énergie conséquent et peuvent, elles aussi, entraîner une détérioration du matériau. Ainsi, il est attrayant de développer une méthode de diagnostic basée sur l'analyse de données fréquentielles induites par une excitation photothermique périodique, méthode qui a été utilisée dans l'article « On the use of periodic photothermal methods for materials diagnosis » de [Autrique et al., 2009] [1]. Dans cet article, une méthodologie pour l'observation et l'analyse de matériaux grâce à ces méthodes photothermiques est proposée. Cette méthodologie permet de réaliser des analyses sans détruire ou abîmer la structure que l'on souhaite observer. Ce type de détection peut toutefois s'avérer extrêmement complexe pour certains matériaux (méthode impossible sur des liquides en mouvement comme des bains

de soudure) ou lorsque l'état de surface est très dégradé (si les propriétés radiatives de la surface sont très hétérogènes).

La méthode consiste à chauffer la surface d'un matériau sur une zone de quelques millimètres carrés et à observer puis analyser la propagation des ondes thermiques au sein du matériau. Les mesures peuvent être effectuées sur la même face que la face chauffée (en réflexion) ou alors de l'autre coté de l'échantillon (en transmission).

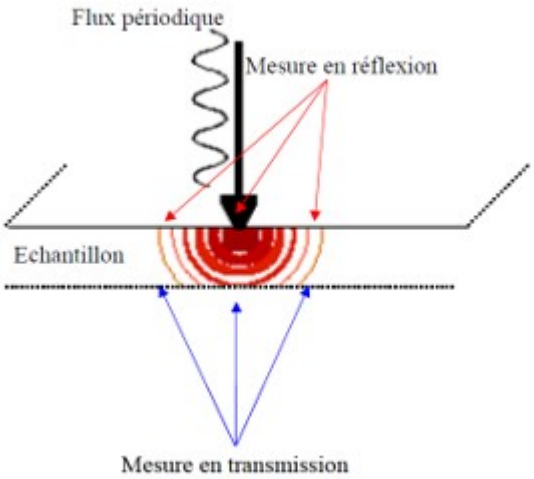

FIGURE 1.1 – Principe de la méthode.

Afin d'analyser la propagation de la chaleur, il est possible d'étudier les amplitudes et le déphasage des thermogrammes en fonction de la distance à l'excitation (balayage spatial) ou bien en faisant varier la fréquence d'excitation (vobulation).
Considérons les notations suivantes :

- Ω le domaine spatial correspondant à l'échantillon étudié,
- $\partial\Omega$ la frontière de Ω, $\vec{n}$ le vecteur normal à $\partial\Omega$ et dirigé vers l'extérieur,
- $X = (x, y, z) \in \Omega \subset \mathbb{R}^3$ la variable d'espace en m,
- $t \in T = [0, t_f]$ la variable de temps en s,
- $\theta(X, t)$ la température au point X à l'instant t (en K),
- ρC la chaleur volumique en $J.m^{-3}.K^{-1}$,
- $\overset{\Rightarrow}{\lambda}$ le tenseur de conductivité thermique en $W.m^{-1}.K^{-1}$,
- h le coefficient d'échange convectif en $W.m^{-2}.K^{-1}$,
- $\Phi(X, t)$ le flux de chauffe en $W.m^{-2}$; en pratique le flux de chauffe ne sera appliqué que sur un sous espace de $\partial\Omega$ (de petite dimension).

Dans le cas d'un matériau isotrope, $\overset{\Rightarrow}{\lambda} = \lambda \in \mathbb{R}^+$ alors que pour un matériau orthotrope :

$\overset{\Rightarrow}{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{pmatrix}$.

L'élévation de température à partir d'une température initiale, constante et égale à la température ambiante satisfait les équations suivantes :

$$\begin{cases} \rho C \dfrac{\partial \theta}{\partial t} - div(\overset{\Rightarrow}{\lambda} \overrightarrow{grad\theta}) = 0 & \forall (X,t) \in \Omega \times T \\ -\lambda_z \dfrac{\partial \theta}{\partial \vec{n}} = h\theta - \Phi & \forall (X,t) \in \partial\Omega \times T \\ \theta(X,0) = 0 & \forall X \in \Omega \end{cases} \tag{1.1}$$

Lorsque le flux de chauffe est périodique (de pulsation ω en $rad.s^{-1}$) les oscillations de température se stabilisent après un régime transitoire.

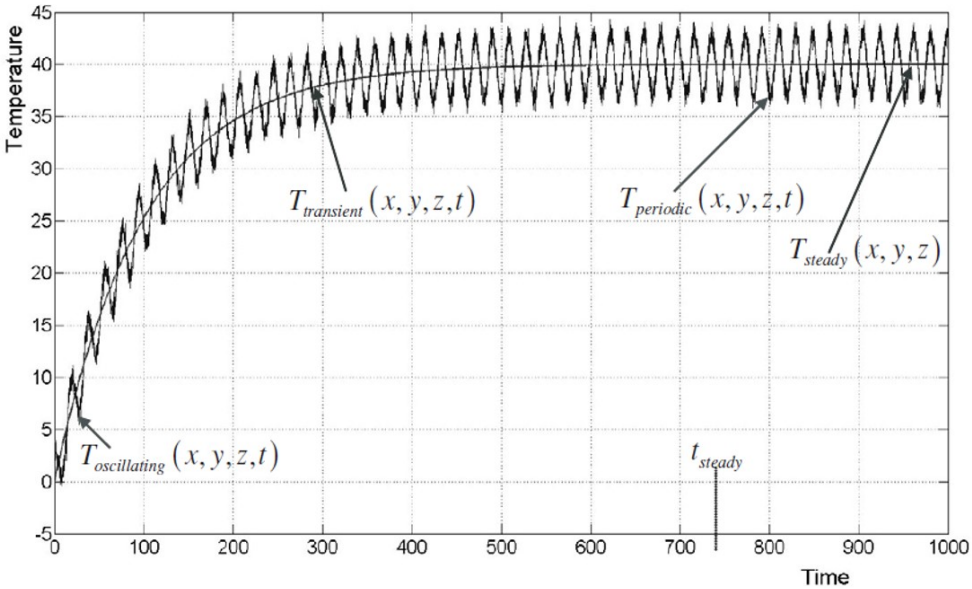

FIGURE 1.2 – Exemple d'évolution thermique d'un matériau chauffé périodiquement.

En régime établi, l'introduction des températures complexes $\overline{\theta(X)}$ permet d'exprimer l'amplitude des oscillations (module $|\overline{\theta(X)}|$) et le déphasage $arg(\overline{\theta(X)})$ par rapport à une référence. Pour ce faire le système suivant doit être résolu :

$$\begin{cases} div(\overset{\Rightarrow}{\lambda} \overrightarrow{grad\overline{\theta(X)}}) = j\rho C\omega\overline{\theta(X)} & \forall X \in \Omega \\ -\lambda_z \dfrac{\partial \overline{\theta(X)}}{\partial \vec{n}} = h\overline{\theta(X)} - \overline{\Phi(X)} & \forall X \in \partial\Omega \end{cases} \tag{1.2}$$

La résolution numérique du système précédent permet de prédire (en régime établi) la propagation des ondes thermiques dans le matériau en s'affranchissant de la variable temporelle. Dans le paragraphe suivant, le banc expérimental est brièvement décrit.

1.2 Présentation du banc de test

Le montage utilisé pour réaliser les observations est composé d'une source chauffante (ampoule), d'un montage optique de Köhler, d'une alimentation stabilisée, d'un dispositif de pilotage et d'une caméra thermique. Le montage de Köhler a pour objectif de créer un éclairage uniforme sur un disque de petite taille (quelques mm^2) . Il est constitué de trois grandes parties : un illuminateur, un condenseur et un microscope. Dans notre cas, ce montage a également l'avantage de ne pas laisser l'image du filament de l'ampoule dans l'éclairage final. Le diaphragme présent sur le montage nous permet de faire varier la dimension du cercle éclairé.

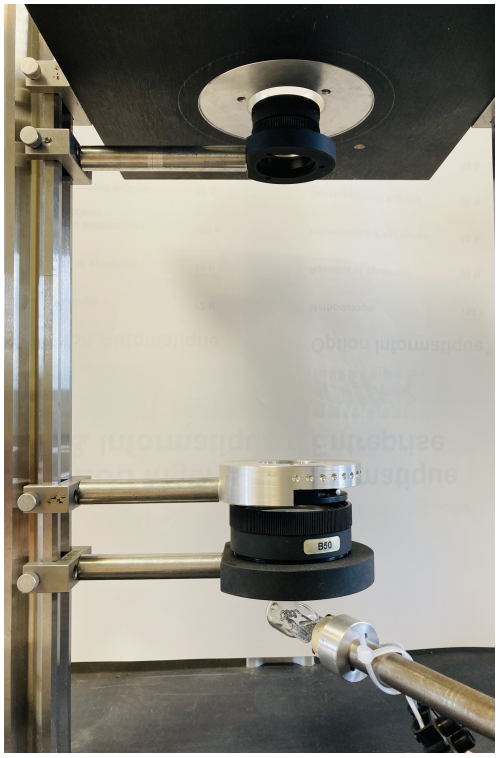

FIGURE 1.3 – Ampoule et montage de Köhler.

Le banc expérimental développé dans la salle 321 n'est utilisable pour le moment qu'en transmission. Toutefois, pour les instruments de musique l'accès aux deux faces n'est pas toujours possible. De plus lors des observations en transmission, la température mesurée sur la face non chauffée est inférieure à celle de la face chauffée. Les matériaux expertisés étant des isolants thermiques, les mesures de températures sont sous estimées. Les surfaces que l'on souhaite observer étant sensible à des chaleurs même peu élevées un montage en réflexion sera probablement à privilégier à l'avenir.

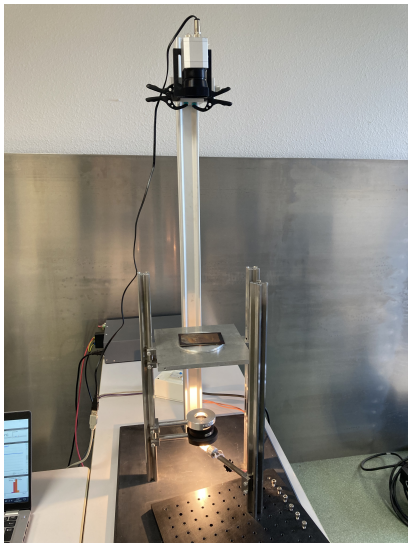

FIGURE 1.4 – Montage en transmission.

L'ampoule utilisée est une ampoule halogène (LAMPE EVD 36V 400W OSRAM XENOPHOT HLX 64664) qui permet une chauffe radiative. En effet son spectre d'émission est important dans l'infrarouge mais faible dans les UV (il est important de préciser que les peintures sont en général affectées par les ultra violets). Une alimentation (Delta Electronika SM 70-AR-24) permet de choisir la puissance de l'ampoule : une plage comprise entre 50 Watt et 120 Watt sera considérée. La puissance minimale de 50 W permet d'allumer l'ampoule. Afin d'éviter tout endommagement du matériau à expertiser, la puissance maximale est limitée à 100 W. L'alimentation est associée à un contacteur (Merlin Gerin multi9 CT 15380). Il effectue le travail d'un interrupteur en suivant les informations que lui donne le timer (Crouzet MUR3). Celui-ci dispose de sa propre alimentation externe.

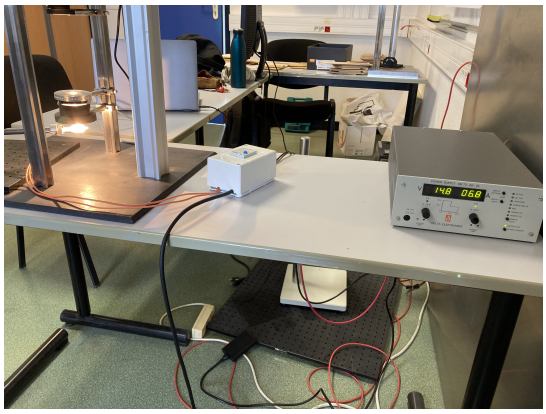

FIGURE 1.5 – Alimentation et pilotage.

Dans le cadre des campagnes expérimentales un signal carré est utilisé. La période pour le signal chauffant périodique n'est pas fixée de manière précise mais elle est calculée a posteriori avec précision en traitant les thermogrammes obtenus. L'ensemble du montage demande un certain temps avant de quitter le régime transitoire et d'atteindre le régime permanent. Cette durée dépend de la période des excitations, des propriétés du matériau et de la puissance de chauffe. Divers paramètres peuvent affecter les expérimentations : la température de la pièce, l'humidité, le matériel utilisé, la position des éléments du montage optique (les lentilles du montage ne sont pas parfaitement alignées) ...

1.3 Caméra thermique et logiciel d'acquisition

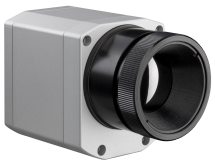

FIGURE 1.6 – Caméra OPTRIS PI 640.

La caméra optris PI 640 est une caméra thermique de petite dimension (46x56x90 mm ; 320 grammes). Elle offre une résolution optique de 640 x 480 pixels et permet une fréquence d'acquisition de 32 Hz pour des températures comprises entre -20°C et 900°C. Le logiciel Optris PI Connect fourni avec la caméra permet d'obtenir les images thermographiques en temps réel, de tracer des courbes, d'afficher les variations de la valeur maximum ou de la moyenne des températures.

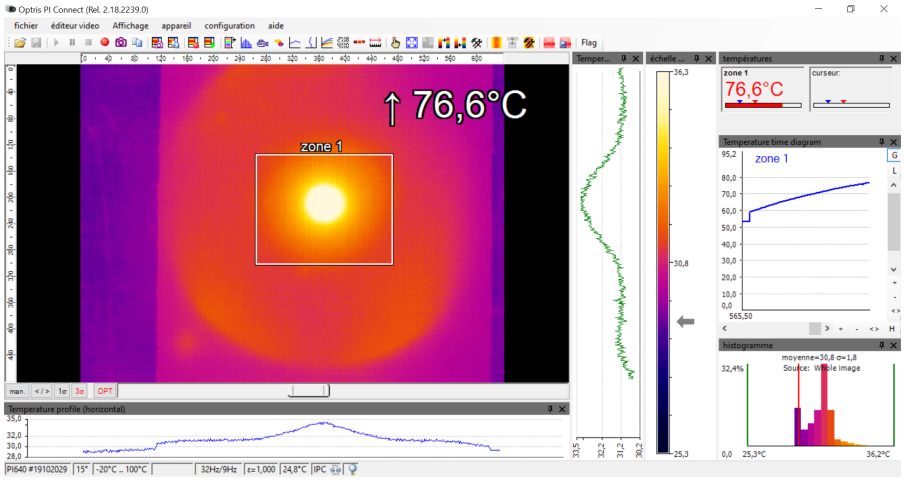

FIGURE 1.7 – Capture d'écran de PI OPTRIS Connect.

On peut également créer une zone sur notre image et obtenir les informations sur cette partie seule. Dans notre cas cela s'avère utile pour pouvoir centrer l'attention sur la zone chauffée. Enfin il est possible d'enregistrer des images ou des données à une fréquence donnée. Les vidéos sont disponibles en .ravi. Cette extension permet d'enregistrer pour chaque pixel de chaque image la valeur de température. Ce type de vidéo est particulièrement lourde et non modifiable. Il est également possible de générer des images en .tiff et des fichiers .csv. Les images ont l'avantage de donner un rendu visuel des variations de température mais ne permettent pas de conserver les températures. Le fichier .csv qui prend la forme d'un tableur conserve les valeurs et nécessite un traitement pour obtenir un rendu visuel des données. Ce dernier format sera pris en compte par la suite.

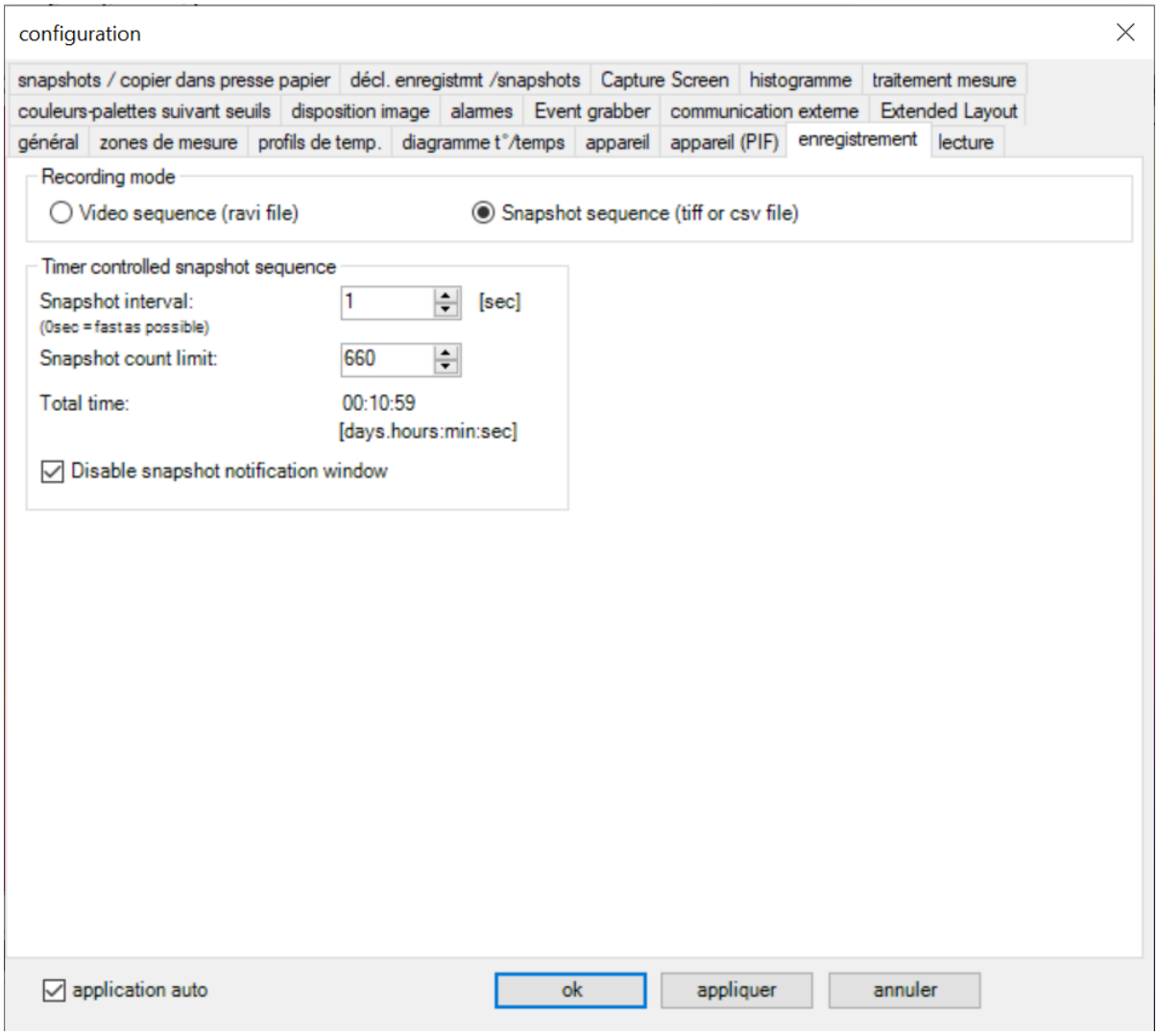

FIGURE 1.8 – Configuration pour l'enregistement.

1.4 Traitement d'images et analyse des résultats

Les campagnes expérimentales se déroulent en général de la matière suivante :

— Choix de la puissance de chauffe : on commence par des puissances faibles et on augmente peu à peu jusqu'à observer un signal de température exploitable en face non chauffée (transmission). Attention toutefois à ne pas endommager le matériau en face chauffée (surtout si le matériau est épais et isolant car dans ce cas la différence de température entre les deux faces peut atteindre plusieurs dizaines de degrés).

— Choix de la période (pour un matériau isolant, une fréquence entre 0.05 Hz et 0.01 Hz est envisageable : une période trop petite conduit à des oscillations de faible amplitude et peu exploitables alors qu'une période trop grande risque d'endommager le matériau en chauffant trop longtemps).

— Visualisation à l'aide de la caméra IR des évolutions de température en différents points pour être certain d'avoir quitté le régime transitoire et atteint le régime établi.

— Enregistrement d'au moins 10 périodes avec au moins 50 images IR par période.

— Récupération des données (matrices de 640x480 pixels) et traitement sous matlab pour déterminer précisément la période de chauffe, les cartographies de module et de déphasage.

— Traitement des cartographies représentant la propagation de l'onde thermique dans le matériau afin de révéler d'éventuels défauts.

Chapitre 2

Application de la méthode aux échantillons en bois

Lors des recherches bibliographiques sur les instruments en bois collé, l'exemple du violon avait été considéré. Il avait été choisi pour sa structure particulière qui le soumet à de fortes contraintes structurelles, sa longue durée de vie et son éventuelle rareté qui peut revêtir un caractère crucial. Cet exemple nous avait permis d'appréhender les différentes phases de construction, allant du choix du bois à la pose du vernis. Une question était restée sans réponse : un défaut dans les collages peut-il avoir une influence sur le son et/ou sur la structure de l'instrument et qu'en est-il des défauts dans le bois ? Ce chapitre permettra d'apporter des éléments de réponse et de tester des échantillons en fonction des différentes caractéristiques abordées.

2.1 Rappel bibliographique

Lors des recherches bibliographiques nous avions pu observer que peu d'études avaient été réalisées sur les défauts présents sur des instruments de musique et ce peu importe leurs origines ou les méthodes utilisées. Nous avions donc suivi les étapes de construction d'un violon afin d'en mieux comprendre les éléments-clé. Parmi ces éléments nous avions évoqué la matrice du bois qui est constituée de deux éléments le fil et la maille.2.1

Le fil suit un plan vertical et la matrice un plan horizontal. La régularité de cette matrice est liée à la croissance de l'arbre. La matrice du bois, au sein d'un instrument a pour rôle la bonne transmission du son. Pour que celle-ci soit optimale, les arbres avec une pousse lente, les plus droits et les plus réguliers possible sont privilégiés. Le bois communément utilisé est l'épicéa car il correspond bien aux besoins. Les arbres sont coupés en hiver lorsque la sève est la moins présente. En effet, cela permet d'éviter que la sève ne sèche dans le bois car celle-ci obstrue les fibres et limite la propagation du son.

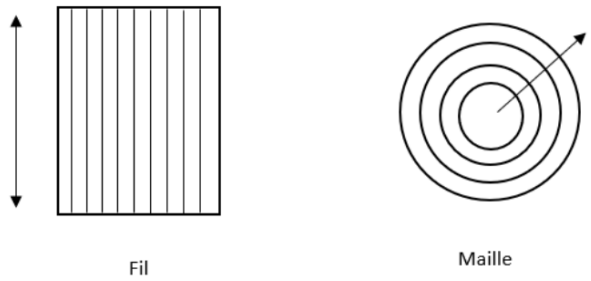

FIGURE 2.1 – Matrice du bois.

La recherche bibliographique n'ayant pas répondu à toutes nos questions nous avons décidé d'approfondir nos recherches en nous appuyant sur les réponses de deux ébénistes de profession : M. Martin Rétif et M. Paul Blain. M. Rétif est spécialisé dans la conception de mobilier contemporain et a été amené à travailler sur plusieurs chantiers de restauration. M. Blain est lui spécialisé dans la réalisation de pièces destinées aux bateaux. Il réalise et restaure également des instruments de musique en tant qu'amateur. Ils ont donc chacun des spécialités et une expérience différente qui nous permettra d'obtenir des réponses plus complètes. Les paragraphes suivants sont un résumé de nos échanges mais également des informations extraites de certaines œuvres qui nous ont été conseillées [5]. Les questions et réponses complètes sont disponibles en annexes.

Deux questions restent en suspend concernant tout d'abord la capacité d'un défaut à modifier de manière audible le son d'un instrument et si cela peut poser problème sur la structure de cet instrument. En ce qui concerne les défauts provenant du bois, la qualité de celui-ci dépend du budget attribué à la fabrication. Dans le domaine de l'ébénisterie il sera davantage possible de jouer sur ce paramètre. Le bois utilisé en lutherie doit être choisi avec rigueur pour permettre aux instruments d'avoir une bonne sonorité. Ceci étant, la qualité du bois peut varier d'un instrument à un autre et entre un instrument produit à l'unité et un autre produit en grande série. Le bois bien qu'étant choisi avec soin peut cacher des défauts dans les pièces les plus épaisses comme le manche ou la tête d'un instrument. Ceux ci seront potentiellement visibles dans lors des différentes phases du processus de création de l'instrument telles que lors de la première découpe du bois, ou bien lors de la phase de recoupe / finition. Si le défaut est visible il risque de déformer la pièce et sera donc placé au rebut. S'il n'est pas visible alors il peut rester présent sur l'instrument et éventuellement l'affecter. Sur les parties plus fines de l'instrument (environ 2 mm) les défauts sont directement visibles. Les conditions de stockage des instruments vont aussi influencer sur l'état du bois et provoquer des défauts. Ainsi, par exemple, un bois sans défauts peut gercer à cause de variations de température et d'humidité. Les gerces dans le bois peuvent entraîner des fentes qui vont influencer le son de l'instrument.

Si le choix du bois est particulièrement rigoureux il n'est pour autant pas impossible de

voir des essences plus atypiques comme l'érable pommelé ou ondé. Ce bois a la particularité de présenter une matrice déformée qui lui donne un attrait esthétique. On peut le retrouver sur différents instruments comme les violons, guitares ou bien encore des luths pour certaines pièces. Il apporte un ajout esthétique et n'impacte pas le son de l'instrument.

FIGURE 2.2 – érable ondé (Epiphone)à gauche pommelé à droite(Les Paul).

Un autre élément peut être à l'origine de défauts sur les instruments : les collages. Les colles utilisées en lutherie diffèrent d'un instrument à un autre. Sur les violons on retrouvera des colles dites naturelles alors que sur les guitares on retrouvera davantage des colles Aliphatiques. Ce choix est dû à plusieurs paramètres. La colle Aliphatique est plus utilisée sur des collages à plat, c'est à dire de deux surfaces planes l'une avec l'autre que sur des assemblages. Sur l'exemple ci-dessous la partie bleue représente la colle entre deux éléments.

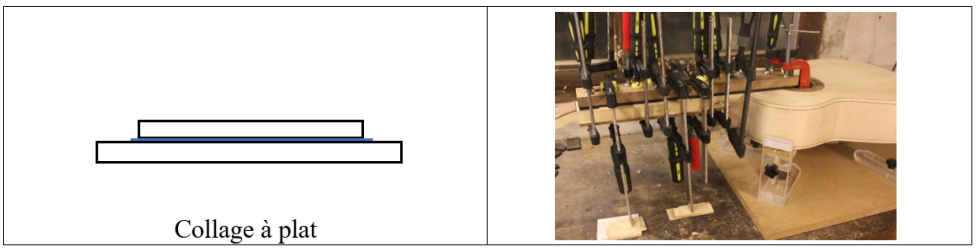

FIGURE 2.3 – Collage à plat (source image :lutherie-guitare.org).

La colle Aliphatique est plus facile à utiliser et moins sensible que la colle naturelle mais elle est également beaucoup plus compliquée à retirer en cas de restauration. Elle est donc couramment utilisée sur les instruments modernes produits en série.

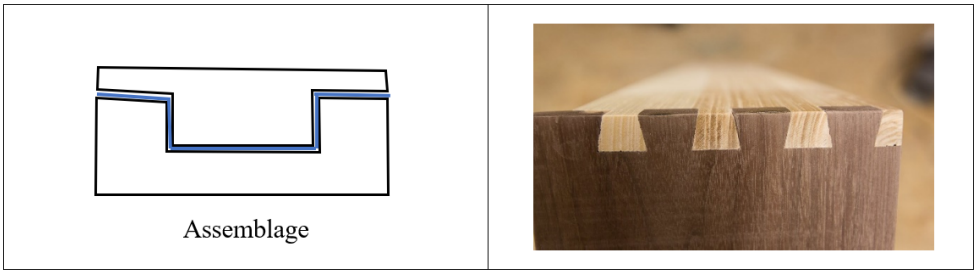

FIGURE 2.4 – Assemblage, ici queue d'aronde(source image :Cray Birkenwald).

Un défaut dans l'un des collages peut être à l'origine d'un bruit parasite. Il peut également briser la transmission du son. Il est donc important de les surveiller pour s'assurer du bon état de son instrument. Les collages sont sensibles à de nombreux paramètres et encore plus lorsqu'ils ont été réalisés avec des colles naturelles. La chaleur, l'humidité et le choc sont autant d'éléments pouvant les altérer. Chaque instrument possède une morphologie qui lui est propre. Il serait long et peu utile de réaliser une liste exhaustive des collages à risques. Ceci étant pour la plupart des instruments en bois collés à cordes, il est possible de transposer les collages à risques. En prenant l'exemple du violon et de la guitare acoustique, il est possible de l'observer.

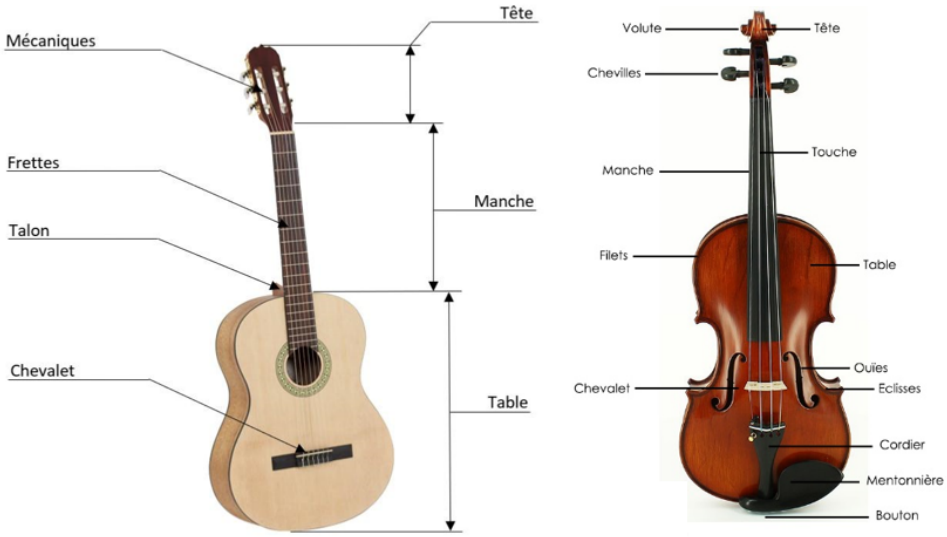

FIGURE 2.5 – Guitare à gauche(source image : clicmusic), violon à droite(source image : violon.com).

Sur le violon la jonction entre la tête et le manche ainsi qu'entre le manche et le corps se retrouve également sur la guitare bien qu'ils ne prennent pas exactement la même forme. Les collages qui ont le plus de risques de jouer sur le son et la structure de l'instrument sont de manière non exhaustive pour un violon, la jonction entre la tête et le manche,

celle entre le manche et le corps, mais également au niveau des éclisse et contre-éclisse et barre d'harmonie. Certains de ces collages ont un impact plus important sur la structure de l'instrument comme la jonction entre le manche et la tête d'un violon qui est soumis à des forces importantes et qui peut aller jusqu'à la rupture. De même pour le chevalet et la table d'harmonie des guitares acoustiques.

Dans le cadre de notre méthode de détection non destructive vis à vis des instruments il est important de souligner quelques points. Nous l'avons dit plus haut la température altère les collages de même elle peut détériorer les vernis et enfin le bois. Les vernis que l'on retrouve sur les violons sont des vernis aux tampons qui sont particulièrement sensibles à la chaleur et que l'on peut également retrouver en ébénisterie sur certains meubles. Il ne va pas donc être possible de se contenter d'augmenter la puissance émise par la source de chaleur pour pouvoir faire des observations sur des épaisseurs de bois plus importante au risque de détériorer les vernis ou les collages voir de marquer le bois. La restauration qu'elle soit dans le domaine de la lutherie ou de l'ébénisterie a pour objectif de réparer, d'éviter les dégâts en chaîne et ce en changeant le moins d'éléments possible.

L'utilisation de la méthode pourrait dans le cas de la lutherie être utile aux musées dans le maintien en état d'instruments mais également pour des conservatoires ou autres institutions ayant des instruments très sollicités.Il serait également possible d'élargir l'utilisation de la méthode au domaine de l'ébénisterie en proposant une méthode d'observation des marqueteries et plaquages présents sur certains meubles. Cela pourrait s'avérer utile dans la restauration de meubles anciens.

2.2 Création des échantillons

Après avoir abordé les éléments qui pouvaient influencer le son d'un instrument, la création des échantillons à tester est décrite ci après. Ceux ci ont pour objectif de tester l'impact de différents paramètres sur les températures observées. Parmi les paramètres qui pourraient être intéressants de tester nous retrouverons l'épaisseur, le vernis, le type de colle, l'essence du bois et l'impact de différents défauts. Observer les différentes épaisseurs de bois permettra notamment d'appréhender les réglages nécessaires pour observer des collages.

Les échantillons de bois dont nous disposons ont été réalisés avec différentes essences de bois : chêne, charme, acajou, sapin rouge, noyer. Le tableau suivant donne l'ensemble des épaisseurs disponibles par essence de bois.

Certains échantillons contiennent naturellement des défauts comme des noeuds et des fentes. Ils permettront de déterminer si il est possible d'observer un défaut grâce au module et au déphasage de l'onde thermique par rapport à l'excitation.

FIGURE 2.6 – Création des échantillons en bois.

Essence	0,6 mm	1 mm	2 mm	3mm	5mm	Densité
Acajoux kosipo				x	x	0,69
Acajoux inconnu				x	x	> 0,69
Cèdre européen					x	0,49
Charme				x	x	0,82
Chêne Français		x			x	0,69
Noyer	x			x	x	0,66
Sapin rouge du nord			x		x	0,47
Epicéa						0,46

FIGURE 2.7 – Liste des échantillons de bois disponibles(densité : wikipedia).

FIGURE 2.8 – Visuel des échantillons de bois disponibles.

Plusieurs types d'échantillons n'ont pas pu être réalisés sur la période de stage par faute de temps en particulier ceux sur l'impact d'un vernis sur les observations. Réaliser un vernis aux tampons demande du temps car il nécessite de nombreuses étapes. De plus les résultats pourraient être grandement influencés par la composition du vernis. Les différents assemblages collés n'ont pas pu être testés.

2.3 Phase d'expérimentation et interprétations des résultats

2.3.1 Paramètres influençant les températures observées.

Lors de la phase d'expérimentation nous allons chercher à déterminer l'impact de plusieurs paramètres. Le premier de ces paramètres est la valeur de la puissance de chauffe. Nous observerons également l'impact de l'épaisseur, de la densité, de la durée de la période d'exposition et de défauts sur les températures observées. Toutes les observations suivantes ont été réalisées en transmission. La face observée est donc à une température bien moins élevée que celle de la face exposée.

Commençons avec l'effet de la puissance. Les observations suivantes ont été réalisées à 70 et 100 Watt sur une période d'environ 1 minute (30s éteint & 30s allumé) sur des essences de charme et d'acajou kosipo d'une épaisseur de 3mm chacun.

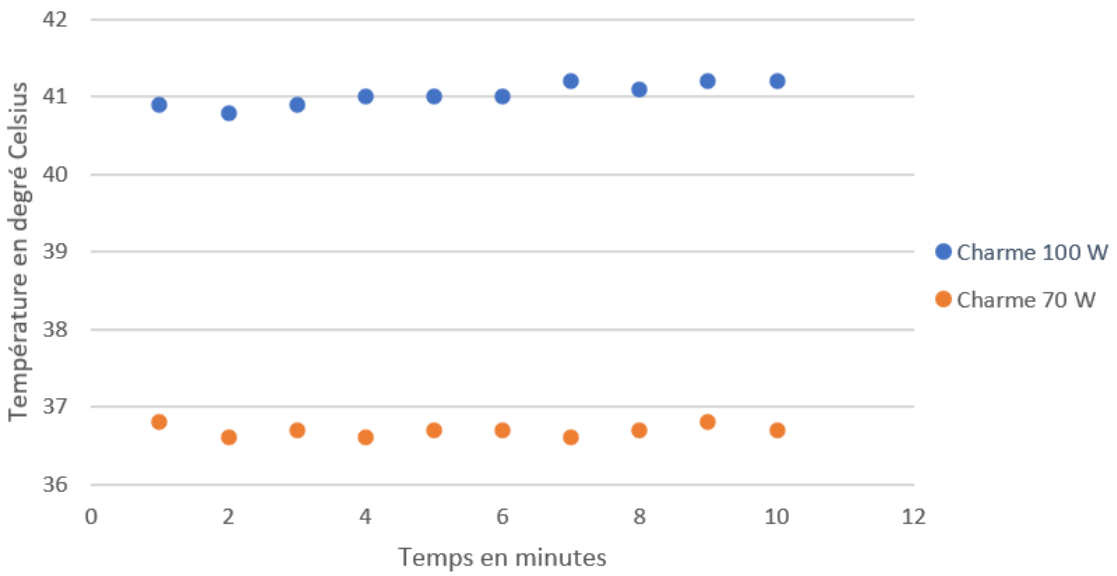

FIGURE 2.9 – Effet de la puissance sur les températures mesurées à l'extinction de la chauffe.

Sur la figure précédente, on remarque que les températures mesurées ont été recueillies alors que le régime établi était atteint. Évidemment, plus la puissance est importante plus les températures observés sont élevées. Il s'agit d'un paramètre clé qu'il faudra soigneusement fixer en fonction de l'épaisseur du bois et du type d'assemblage sur lequel on souhaite travailler.

En ce qui concerne l'effet de l'épaisseur, plusieurs épaisseurs de noyer 0,6 ; 3 et 5 mm ont été comparées (pour une puissance de 100W et une période de 1 minute).

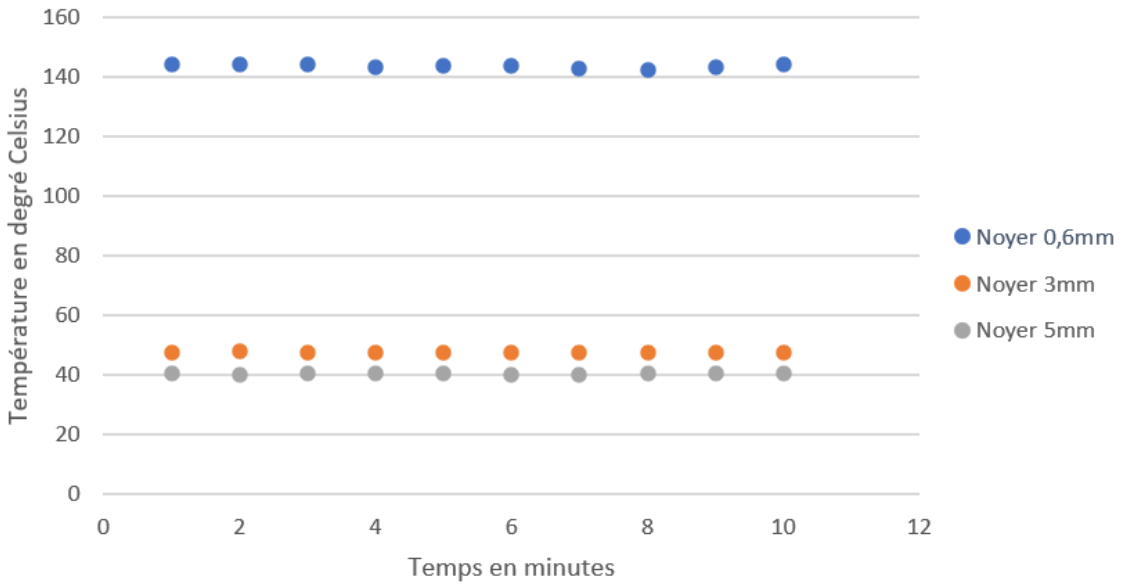

FIGURE 2.10 – Effet de l'épaisseur sur les températures mesurées à l'extinction de la chauffe.

Comme nous pouvons le voir, l'épaisseur influence la température mesurée sur la face non chauffée. Plus l'échantillon est fin, plus la température observée est importante. En effet, plus l'épaisseur est importante et plus le gradient de température entre les deux faces de l'échantillon est important. Sur une épaisseur très fine la température augmente dès que l'ampoule est allumée et la chaleur se diffuse latéralement dans le matériau. Ainsi, dès que l'ampoule s'éteint, la température diminue sur la face non chauffée. Sur les échantillons de bois de 5 mm les températures mesurées varient moins et les temps de réponse sont plus importants. Le retard entre le signal d'entrée (source chauffante) et la sortie (thermogramme) est accentué par l'épaisseur du bois. Travailler en transmission sur des bois épais est donc assez délicat car la température sur la surface chauffée du matériau est beaucoup plus importante que celle relevée en face non chauffée et le bois risque d'être brûlé (l'état de surface sera endommagée).

Le choix de la période d'excitation a aussi un effet sur les évolutions de température. Sur un échantillon de charme de 3mm d'épaisseur une puissance de 100 W a été appliquée lors de deux campagnes expérimentales. Pour la première une période d'environ 1 minute a été considérée alors que pour la seconde la période était de 40 secondes.

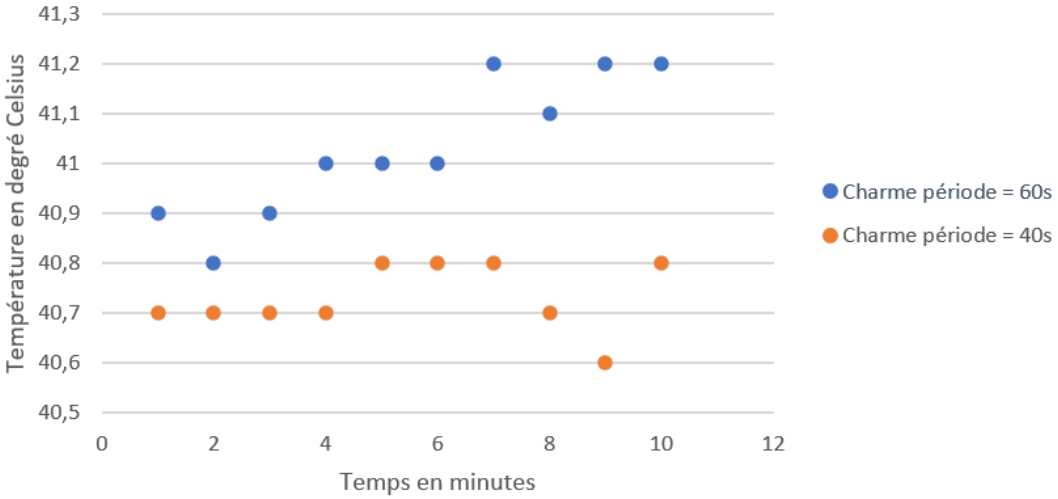

FIGURE 2.11 – Effet de la période sur les températures mesurées à l'extinction de la chauffe.

En ce qui concerne la figure 2.11, le régime établi ne semble pas atteint pour la période de 1 minute mais il est nécessaire de prêter attention à l'échelle des températures qui pour une période de 60 secondes montre des températures comprises entre 40.8°C et 41.2 °C. Ces écarts sont encore plus faibles pour une période de 40 secondes. L'effet du bruit de mesure et des paramètres de nuisance (conditions expérimentales) est à remarquer. Enfin, on peut noter qu'en régime établi, les différences de températures ne seront pas très importantes que l'on chauffe avec une période de 40 secondes ou de 60 secondes : l'ordre de grandeur est similaire. En pratique, lorsqu'un balayage fréquentiel (vobulation) est réalisé on essaie de solliciter thermiquement le matériau sur une décade : sur moins d'une décade, le nombre de valeurs est trop faible pour réaliser une analyse fréquentielle alors que sur plus d'une décade, il est difficile d'avoir suffisamment de signal pour toutes les fréquences. En général, la fréquence d'excitation et la puissance de chauffe sont les deux paramètres permettant de calibrer l'excitation périodique compte tenu des objectifs : avoir suffisamment de signal (onde de chaleur), suffisamment loin, sans endommager le matériau.

Selon l'essence de bois considérée, les transferts thermiques sont différents. Cela peut être mis en évidence sur les bois suivants : le charme, le noyer et l'acajou qui présentent des densités différentes (0,82 pour le charme, 0,66 pour le noyer et 0,69 pour l'acajou). Les deux échantillons ont une épaisseur de 3 mm , les expérimentations ont été réalisées à une puissance de 100 W et pour une période 1 minute.

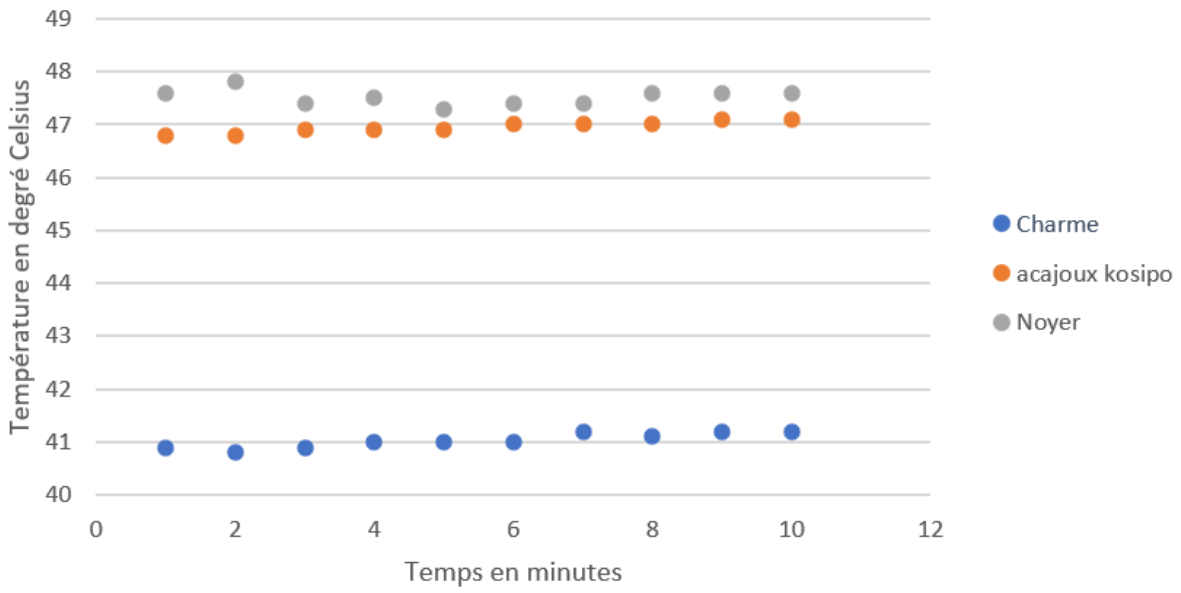

FIGURE 2.12 – Résultats obtenus pour différentes essences.

Sur la figure 2.12, on peut noter que les essences réagissent différemment à une sollicitation chauffante périodique. En première approche, il est facile de considérer que les transferts thermiques sont liés à la densité des essences. En effet, la densité des bois est une donnée normalisée qui est très représentative de son séchage et donc de sa teneur en eau. Dans le cas des instruments de musique en bois, la plupart des essences ont des densités assez proches et le séchage des matériaux utilisés fait partie des paramètres clés qui doivent être maîtrisés par un fabricant d'instrument. Dans le domaine de l'ébénisterie et particulièrement pour les marqueteries on pourrait par contre être amené à utiliser des essences aux propriétés assez diverses (le séchage étant toujours un paramètre clé).

2.3.2 Détection de défaut par méthode photo-thermique pour les échantillons en bois.

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux observations réalisées grâce à la méthode photo-thermique. Dans un premier temps, une essence de bois (le noyer) est comparée à un matériau isotrope : le verre. Pour cette partie, la période d'excitation était d'environ 60 secondes. Après avoir identifié les coordonnées du pixel qui correspondait au point le plus chaud à chaque période, nous avons tracé pour une zone de ± 50 pixels autour de ce point les températures obtenues pour une cartographie infrarouge qui présentait suffisamment de signal.

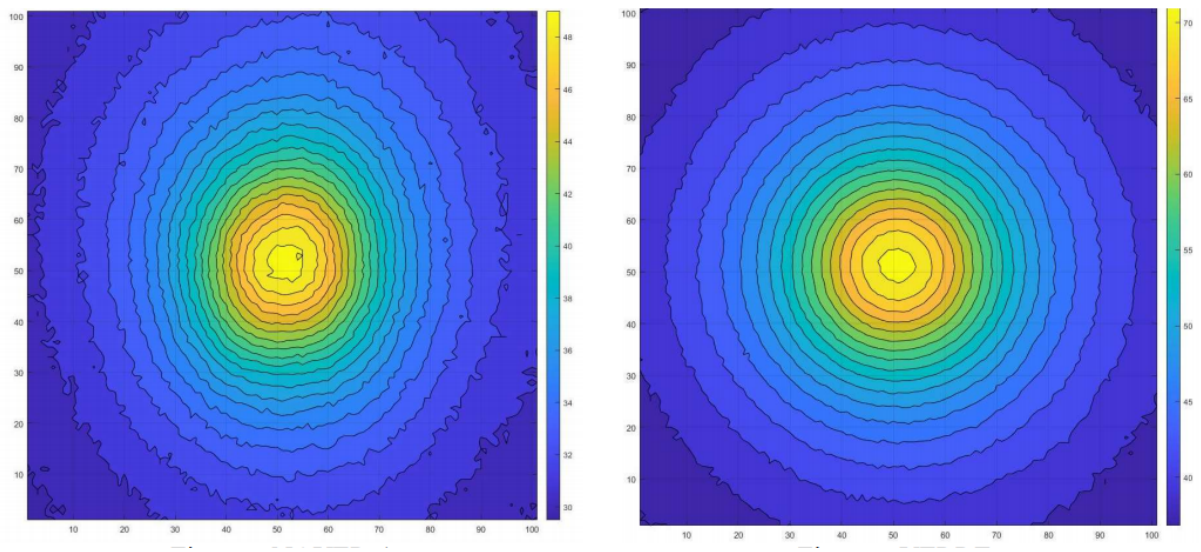

FIGURE 2.13 – Cartographie IR : à gauche le noyer , à droite le verre.

On remarque sur la figure 2.13 que les ellipses (à gauche) montrent le caractère orthotrope du noyer. Ce comportement provient de l'alignement des fibres du bois qui induit une direction préférentielle pour la propagation de la chaleur. On obtient le même résultat lorqu'on teste des matériaux comportant des fibres longues dans une résine (fibres de carbone par exemple). Sur la figure de droite, pour l'échantillon en verre, le matériau étant isotrope, la chaleur se propage de manière identique dans toutes les directions. C'est aussi le cas pour les métaux, les plastiques usuels ...

Chaque essence de bois possède une structure qui lui est propre et qui va modifier les transferts de chaleur dans l'échantillon. La propagation des ondes thermiques dans deux échantillons a été analysée : un résineux (sapin) et un non-résineux (acajou). Les deux échantillons ont une épaisseur de 5mm. Le protocole opératoire suivant a été adopté (voir chapitre précédent) :

— Choix de la puissance de chauffe : 100 Watt.
— Choix de la période : environ 62 secondes (0.016 Hz).
— Attente de l'obtention du régime établi.
— Enregistrement de 10 périodes avec une image par seconde.
— Récupération des données (matrices de 640x480 pixels) et traitement sous matlab pour déterminer précisément la période de chauffe, les cartographies de module et de déphasage.

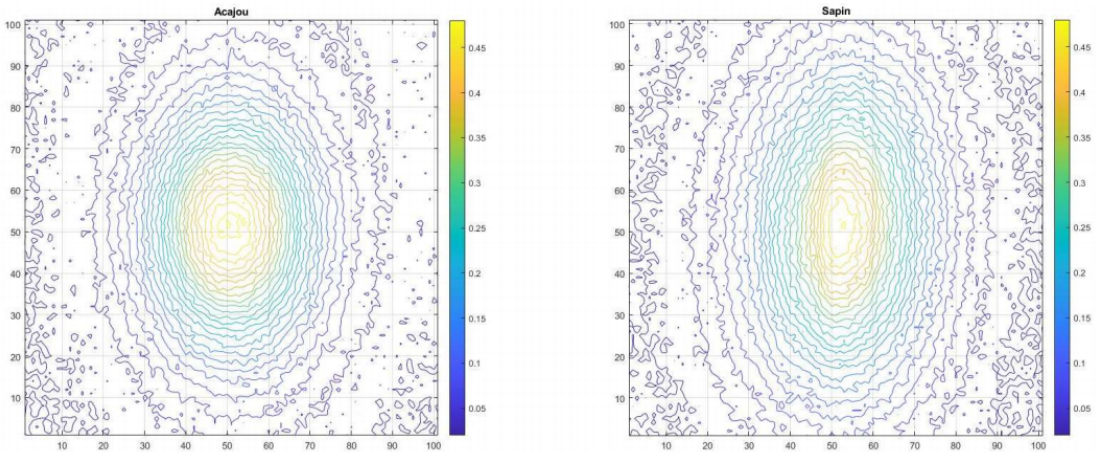

FIGURE 2.14 – Cartographie de module : à gauche l'acajou, à droite le sapin.

En comparant sur la figure 2.14 les cartographies de module pour l'échantillon d'acajou et de sapin, il est clair que la chaleur se propage de manière différente au sein des matériaux. Les ellipses caractéristiques d'un comportement orthotrope sont suffisamment différentes pour pouvoir différencier un résineux comme le sapin d'un non-résineux comme l'acajou. Cela peut être visualisé sur la figure suivante pour laquelle on représente le module selon l'axe horizontal et selon l'axe vertical pour les deux matériaux. Les différences de modules sont plus importantes sur l'axe vertical.

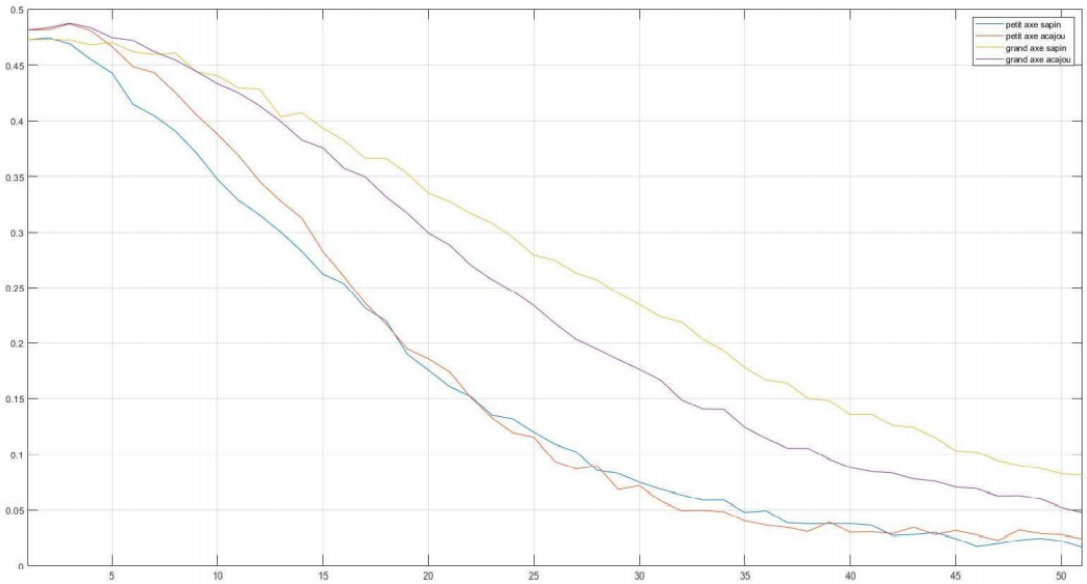

FIGURE 2.15 – Distribution des modules selon l'axe vertical et l'axe horizontal.

Considérons la campagne expérimentale réalisée sur l'échantillon en noyer d'épaisseur 3mm :

— Choix de la puissance de chauffe : 100 Watt
— Choix de la période : environ 65 secondes (0.015 Hz)
— Attente de l'obtention du régime établi
— Enregistrement de 9 périodes avec une image par seconde.
— Récupération des données (matrices de 640x480 pixels) et traitement sous matlab pour déterminer précisément la période de chauffe, les cartographies de module et de déphasage.
— Traitement des cartographies représentant la propagation de l'onde thermique dans le matériau afin de révéler d'éventuels défauts.

Voici la distribution des modules (amplitude des oscillations) pour des pixels autour du point le plus chaud du matériau.

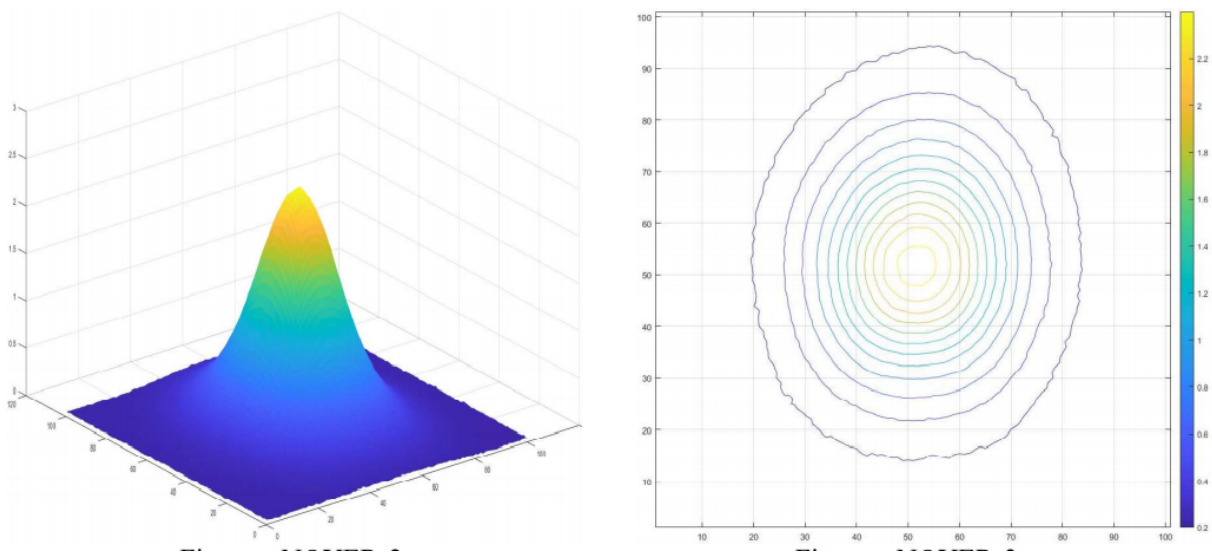

FIGURE 2.16 – Cartographie de module : Amplitude des oscillations.

La présence d'un défaut n'est pas décelable à l'œil nu. Afin d'effectuer la recherche d'un défaut, il est nécessaire de comparer les amplitudes obtenues pour une zone saine (sans défaut) avec les amplitudes pour une zone avec défaut. Sur la figure suivante, la différence entre les amplitudes obtenues en deux points diamétralement opposés est montrée. En effet dans le cas d'un matériau sain, la distribution de cette différence de module devrait être presque nulle (seul l'effet du bruit de mesure étant perceptible).

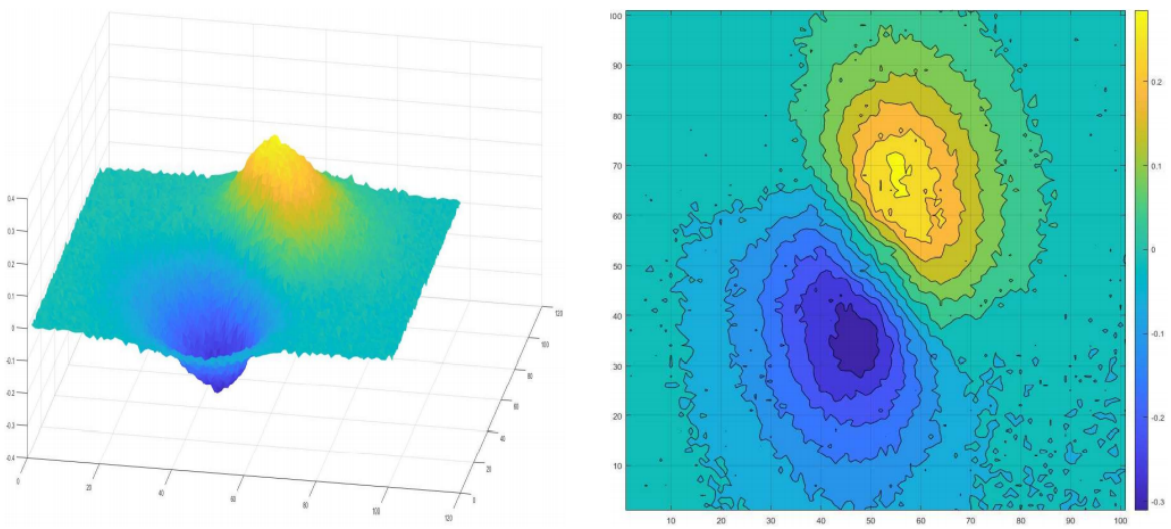

FIGURE 2.17 – Détection d'un défaut dans l'échantillon de noyer.

Sur la figure 2.17, on note une différence de module qui caractérise la présence d'un défaut. Alors que le centre de la chauffe est au pixel de coordonnées (51,51) le maximum de contraste est obtenu au pixel (56,70) ou en son symétrique au pixel (46,32). Cela permet de localiser le défaut. Compte tenu des contours tracés sur la figure 2.16, il semble plus vraisemblable que le défaut soit positionné sur le quadrant en haut à droite.

Chapitre 3

Application de la méthode aux peintures sur toile

Dans le milieu de l'art, de nouvelles méthodes non destructives sont continuellement développées pour aider à la conservation des pièces rares. Dans ce contexte notre méthode pourrait être appliquée dans des cas très spécifiques. Chaque objet étant unique et précieux, l'endommagement et même de légères modifications sont proscrits. Il est donc nécessaire de réaliser une série de campagnes exploratoires permettant de connaître les paramètres les plus impactant sur les températures obtenues. Nous chercherons également à observer si des défauts peu profonds peuvent être localisés à l'aide de l'approche photothermique périodique.

3.1 Rappel bibliographique

Dans le domaine de la peinture d'art, de nombreuses méthodes existent déjà, utilisant différents domaines du spectre électromagnétique (infra-rouge, ...). Elles permettent chacune de mettre en lumière différentes informations sur les œuvres. Ces informations permettent de connaître l'état de l'œuvre et ainsi, si cela est possible, de les restaurer. Les produits utilisés pour peindre et restaurer les œuvres ont beaucoup évolué avec les époques et ont une influence sur la durabilité des toiles et les résultats obtenus avec certaines techniques. Le CIRAM (Centre d'Innovation et de Recherche pour l'Analyse et le Marquage) a, en 2013, publié un document proposant un tour d'horizon des principales méthodes utilisées dans ce domaine de la peinture sur toile [4]. On y retrouve une panoplie de méthodes utilisant nombre de technologies différentes parmi lesquels l'imagerie InfraRouge.

Une méthode permettant de visualiser les traits des croquis présents sous la peinture y est présentée . On trouve également des articles scientifiques portant sur ces recherches. L'article « Infrared Reflectography : a Method for the Examination of Paintings » [6] met

en avant des recherches à ce sujet. Il y est expliqué que les traits de croquis peuvent être retrouvés car la longueur d'onde de réponse émise par le graphite des crayons de bois est différente de celle émise par le reste de la couche picturale. Ici l'intérêt n'est pas tant de pouvoir restaurer les toiles mais plutôt de mieux comprendre les méthodes utilisées par les peintres pour réaliser leurs œuvres, méthodes qui, en fonction des continents et des pays, peuvent fortement varier. On serait donc davantage dans le domaine de l'histoire de l'art que sur de potentielles détections de défauts et restaurations.

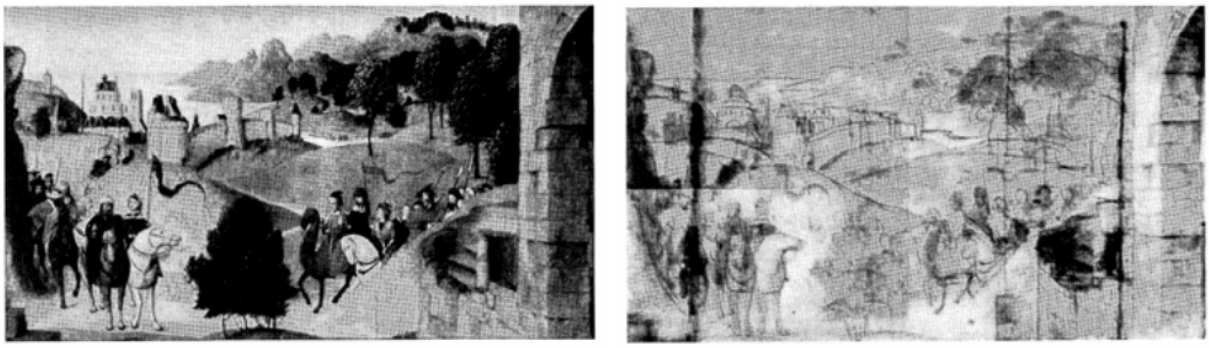

FIGURE 3.1 – A gauche l'œuvre originale, à droite l'œuvre avec les esquisses visibles. *Détails de l'oeuvre de Gérard de Saint-Jean intitulée "Adoration des rois mages" 1490.*

Depuis plusieurs années, avec le développement de caméras thermiques plus performantes et moins chères, de nouvelles recherches ont été réalisées. On a commencé à s'intéresser à la thermographie infrarouge pour détecter des défauts non visibles, en profondeur. Ainsi des travaux portant sur des fresques ont été réalisés. « Contribution to the improvement of heritage mural painting non-destructive testing by stimulated infrared thermography » [3] décrit certains problèmes rencontrés dans le contexte de l'imagerie thermique appliquée aux peintures. On y retrouve des informations intéressantes sur l'impact des pigments utilisés dans la couche picturale sur les observations thermiques. Ces informations ont été prises en compte lors de la fabrication de nos échantillons.

Dans [2] cette méthode a également été utilisée sur plusieurs fresques murales et des informations sont fournies concernant la mise en place du matériel et les cartographies réalisées sur les œuvres. Sur l'exemple de la figure 3.2 on peut observer la fresque Saint-Christophe, partie de la collection du Louvre, qui était alors en cours de restauration. Deux méthodes de détection de défauts ont été appliquées sur cette fresque : la méthode thermique au centre et une méthode par tapotage à droite (méthode de sonnage par ultrasons). Cette méthode consiste à tapoter la fresque au doigt pour entendre sa résonance et ainsi déterminer les lieux où se situent les défauts. Cette méthode a fait ses preuves mais elle risque cependant d'être plus destructrice que la méthode thermique. Les résultats obtenus par tapotage semblent meilleurs : certains défauts visibles sur la cartographie de droite ne sont pas présents sur celle du milieu.

FIGURE 3.2 – Applications à des fresques murales.

Il en a été conclu que le temps d'exposition à la chaleur avait été trop court pour permettre de détecter l'ensemble des défauts. Pour la méthode utilisée dans [2] ce n'est pas une approche périodique qui avait été mise en oeuvre mais une méthode qui consiste à faire un échelon de température pendant un temps conséquent puis d'observer la phase de refroidissement. Bien évidemment plus la chauffe est puissante et plus le temps doit être court pour éviter l'endommagement. La méthode périodique peut être plus adaptée car les apports d'énergie sont plus faibles qu'une méthode flash tout en conservant un signal de mesure exploitable.

Les défauts sur les toiles peuvent avoir diverses origines qui vont déterminer leurs formes, leurs caractéristiques et leurs effets. Par exemple, un coup donné dans une toile va créer des craquelures concentriques autour du point d'impact. D'autres causes de défauts peuvent être, une toile qui a été roulée, de trop fortes pressions sur la toile ou bien encore de mauvaises conditions de conservation (humidité, cycle thermique, courants d'air, luminosité, ...). Cela peut générer des défauts visibles ou bien cachés sous la surface de l'oeuvre (semi profond). Il pourra donc être intéressant de tenter de reproduire certains de ces défauts.

Il est envisageable d'utiliser la méthode basée sur une excitation chauffante périodique et une analyse en imagerie infrarouge pour expertiser certaines oeuvres d'art et tenter de cartographier des défauts peu profonds. Cela pourrait également permettre d'effectuer un suivi de la dégradation dans le temps d'une même oeuvre (en conditions environnementales défavorables) en réalisant à intervalle régulier des campagnes expérimentales.

3.2 Création des échantillons

Comme pour les instruments en bois collé, nous avons travaillé sur des échantillons afin de déterminer les paramètres qui influent fortement sur les températures observées. Dans ce cadre, plusieurs échantillons de peintures sur toiles ont été créés. Ils sont réalisés sur un tissu synthétique blanc. Une première série de quatre échantillons a été réalisée à base de peinture acrylique (composée de pigments mélangés à une émulsion aqueuse de résines synthétiques) avec des variations selon chaque configuration :

— une seule couche de peinture (1)
— quatre couches de peinture (2)
— une couche + défaut en colle textile (3)
— une couche + défaut en colle textile, vernis, colle à chaud dissimulé sous une chute de tissus en coton(gris) (4)

Dans les quatre configurations, les six couleurs sont disposées de la même manière. Le premier et le deuxième échantillon sont considérés comme les échantillons types, les échantillons 3 et 4 avec défauts le premier simulant l'ajout d'une substance sur une toile et le second un rajout sur une toile / décollement (espace entre les deux épaisseurs de tissus du à l'épaisseur de colle).

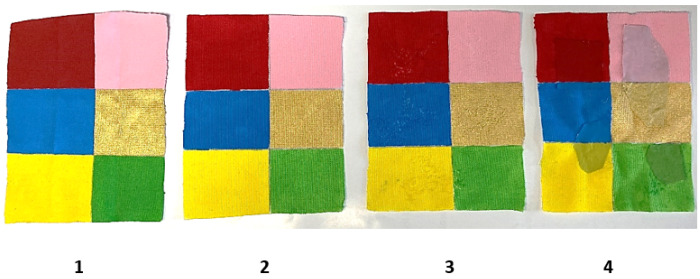

FIGURE 3.3 – Échantillons de peinture sur toile.

Une deuxième version des échantillons a également été réalisée en fonction des résultats obtenus avec les premiers échantillons. Cette série de 6 échantillons reprend le principe de l'échantillon 2, soit 4 couches de peinture acrylique. Ces échantillons ont une surface peinte plus importante et ne sont pas entourés de d'autres couleurs. On compte également un nouvel échantillon bleu réalisé à la peinture à l'huile (composée de pigments qui forment la matière colorée et d'un liant composé d'huile de lin) pour observer d'éventuelles différences. Cet échantillon est une simple couche de peinture sans ajout de produits tiers.

Les échantillons avec les différentes épaisseurs de peinture ainsi que les différents types de peinture (acrylique, huile) ont pour objectif de déterminer l'effet des ces paramètres sur la température observée. Il pourrait être intéressant de réaliser des échantillons avec des vernis de protection ou des bases pour voir les modifications que cela pourrait éventuellement apporter.

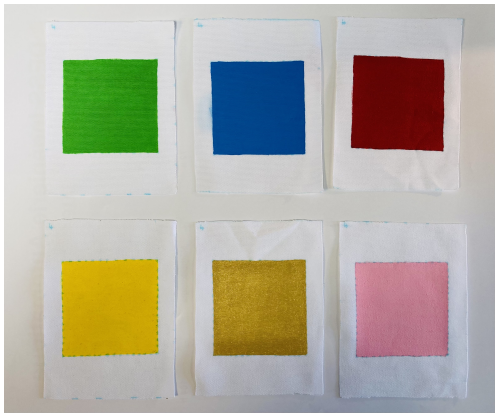

FIGURE 3.4 – Deuxième série des échantillons de peinture sur toile.

L'objectif est d'observer l'effet des épaisseurs et des matières utilisées car ce sont les deux éléments sur lesquels les artistes travaillent beaucoup. Dans le cas des échantillons avec défauts, il s'agit de les détecter avec un post-traitement. Dans ce cadre, il pourrait être intéressant de développer d'autres échantillons avec des défauts similaires à des craquelures ou des soulèvements.

3.3 Phase d'expérimentation et interprétations des résultats

De la même façon que pour la partie sur les instruments en bois collé, la phase d'expérimentation a pour objet de déterminer l'effet de plusieurs paramètres. Le premier de ces paramètres est la puissance de la source chauffante. Nous observerons également l'effet de l'épaisseur en jouant sur le nombre de couches de peinture. Nous testerons également l'influence du type de peinture, ainsi que de la durée de la période d'exposition. Un des échantillons comprenant des défauts va également être observé pour voir si la méthode fonctionne également sur des toiles. Toutes les observations suivantes ont été réalisées en transmission. La face observée est donc à une température moins élevée que celle de la face exposée.

Comme décrit précédemment nous disposons d'échantillons de peinture acrylique de plusieurs couleurs : bleu, jaune, vert, rose, or, rouge. La première campagne expérimentale consiste à observer à puissance et épaisseurs similaires des échantillons de peinture de différentes couleurs tous peints à l'acrylique. Ces expériences ont été réalisées sur des échantillons d'une épaisseur correspondante à 4 couches de peintures et pour une chauffe de puissance égale à 100 W (période d'environ 1 minutes). Les observations sont réalisées à l'extinction de la chauffe.

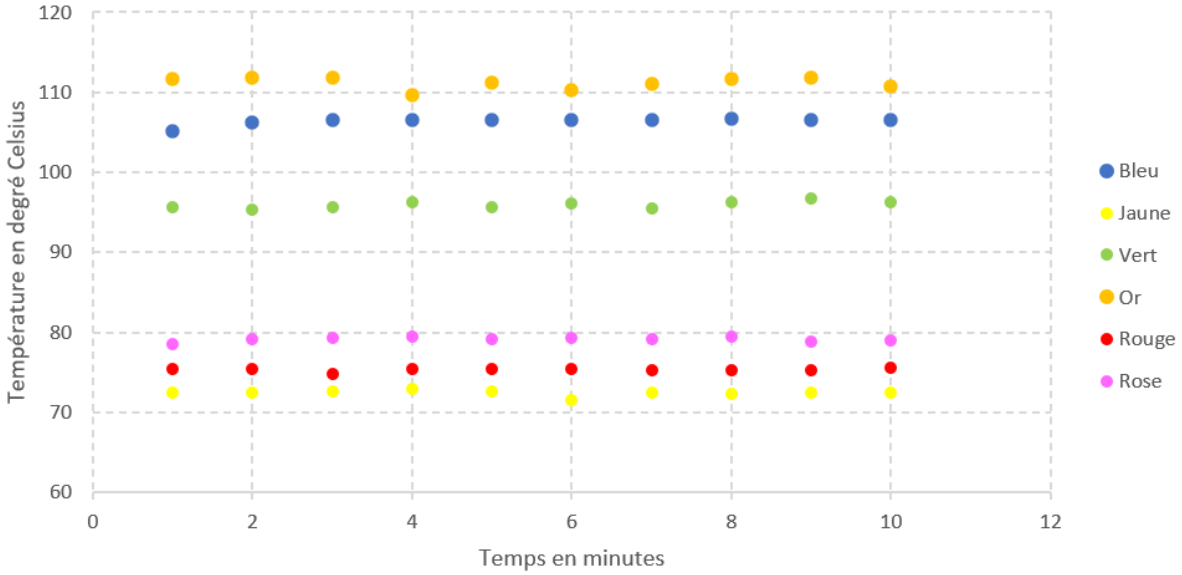

FIGURE 3.5 – Observations pour les échantillons de couleurs différentes.

Selon la couleur, les observations fournissent des résultats très différents. Le bleu et le doré donnent les valeurs les plus élevées alors que le jaune, rouge et rose retournent des valeurs plus basses. Le vert est à une valeur intermédiaire. On retrouve un élément qui ressortait également sur les travaux de Bodnar [3]. Cela montre que bien que le constituant majoritaire de la peinture acrylique soit une émulsion aqueuse, les pigments et les résines synthétiques affectent énormément les mesures en infrarouge. Aussi, dans le cas d'une peinture sur toile la cartographie thermique va très fortement dépendre des couleurs et nécessitera une attention particulière.

Pour réaliser des tests sur l'effet de l'épaisseur de peinture nous allons utiliser des échantillons avec 1 et 4 couches de peinture acrylique bleu et jaune. Les résultats obtenus pour une puissance de 100 W sont montrés figure 3.6.

Sur l'échantillon jaune on n'observe pas de modifications notables des observations pour 1 ou 4 couches de peinture. L'échantillon bleu par contre monte d'avantage en température lorsque l'épaisseur de peinture est plus importante. Ainsi, si une toile n'est pas homogène au niveau des épaisseurs de peintures (ce qui est souvent le cas) les observations en infrarouge sont affectées.

Reprenons les échantillons bleu et jaune comportant 4 couches de peinture pour pouvoir tester l'effet de la puissance. Pour cela nous allons réaliser un premier test à 70 W et un second à 100 W. Les résultats obtenus sont montrés figure 3.7.

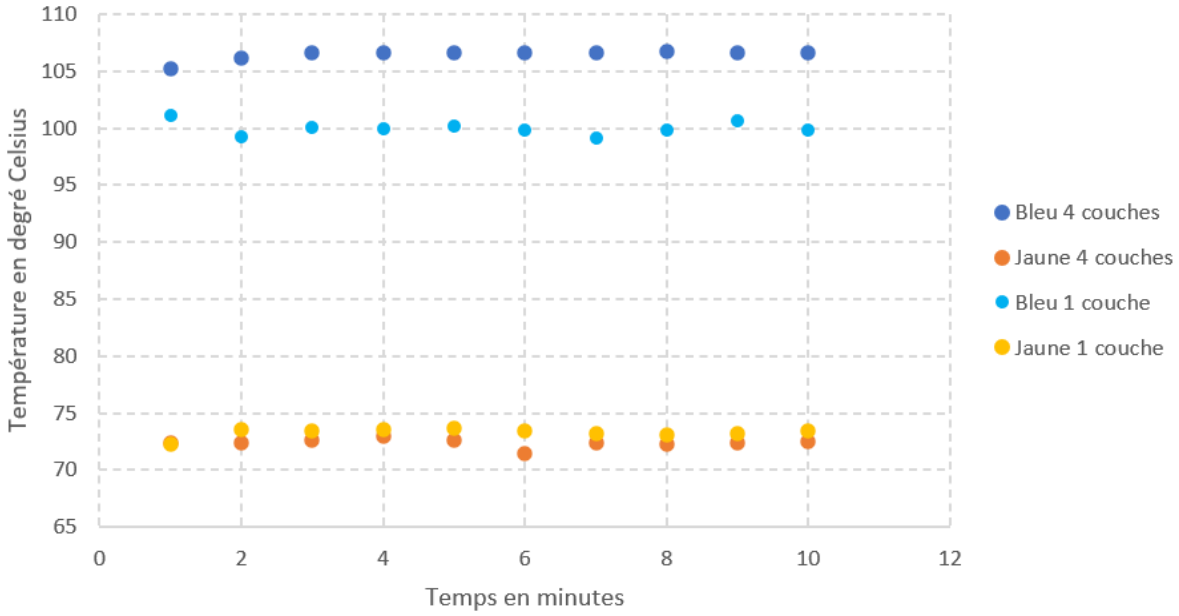

FIGURE 3.6 – Effet de l'épaisseur sur les mesures en infrarouge.

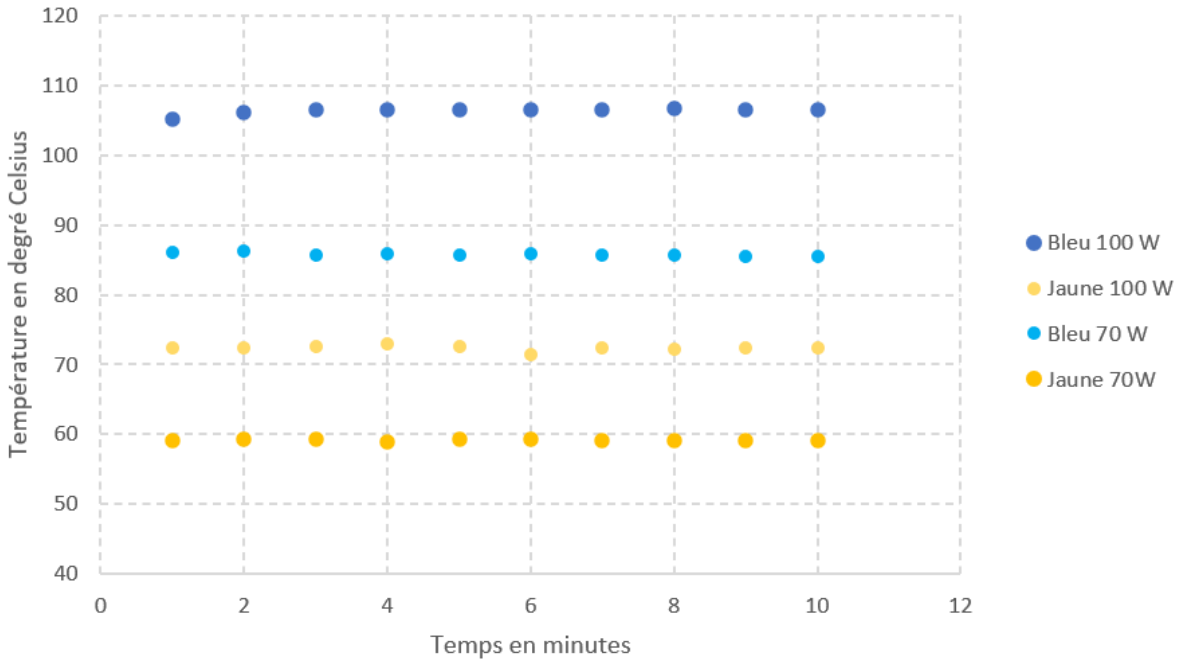

FIGURE 3.7 – Effet de la puissance sur les mesures en infrarouge.

Bien évidemment, plus la puissance est élevée plus la température est importante (voir figure 3.7). Sur les échantillons de toiles que nous avons observés nous pouvons voir que la différence de température liée à la réponse du signal périodique est suffisante à 70 W et pourrait probablement encore être diminuée pour limiter les dommages éventuels sur la toile.

Sur des échantillons de couleur bleu nous allons tester l'effet que peut avoir la composition de la peinture sur les mesures infrarouge. Nous disposons d'une part d'un échantillon de peinture acrylique et d'autre part d'un échantillon de peinture à l'huile. Les deux échantillons sont formés d'un seule couche de peinture et soumis à une puissance de 100 W (période d'environ 60 secondes).

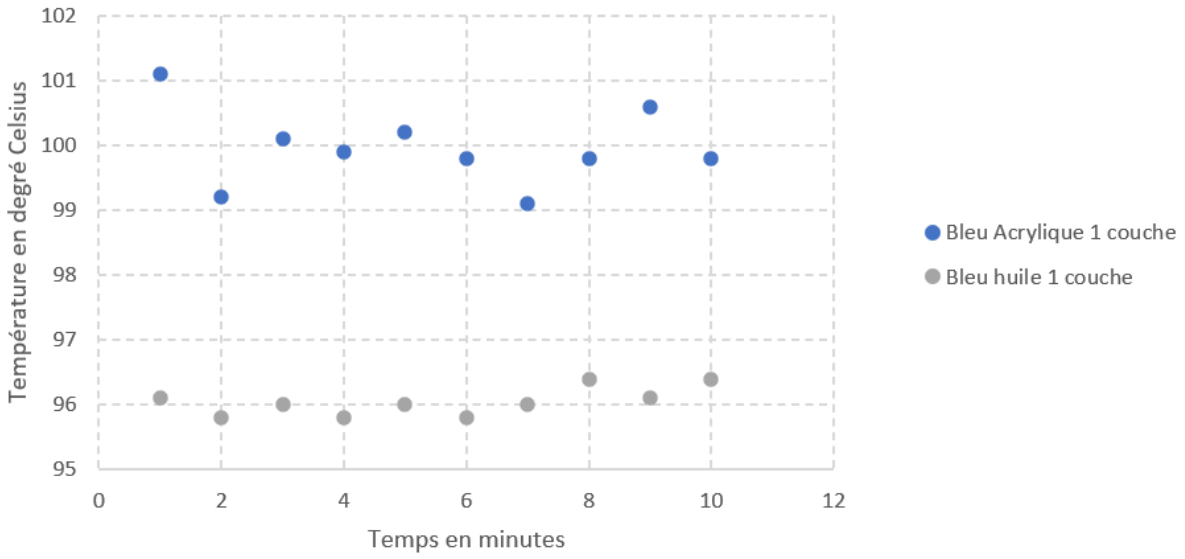

FIGURE 3.8 – Effet du type de peinture sur les observations dans l'infrarouge.

Ces résultats montrent que les observations en infrarouge ne dépendent pas que de la couleur mais aussi de la nature des peintures : acrylique ou à l'huile. Les deux échantillons de peinture ne sont pas exactement de la même couleur mais compte tenu des résultats observés avec la précédente expérimentation sur l'impact des couleurs on visualise assez simplement que cela n'est pas l'origine de l'écart de température visible ici.

La dernière expérimentation consiste à observer l'effet de la période d'exposition sur les résultats. Pour cela on observe à puissance égale (100 W) le comportement d'un échantillon de peinture acrylique avec 4 couches de peinture pour une période de 60 secondes puis pour une période de 40 secondes.

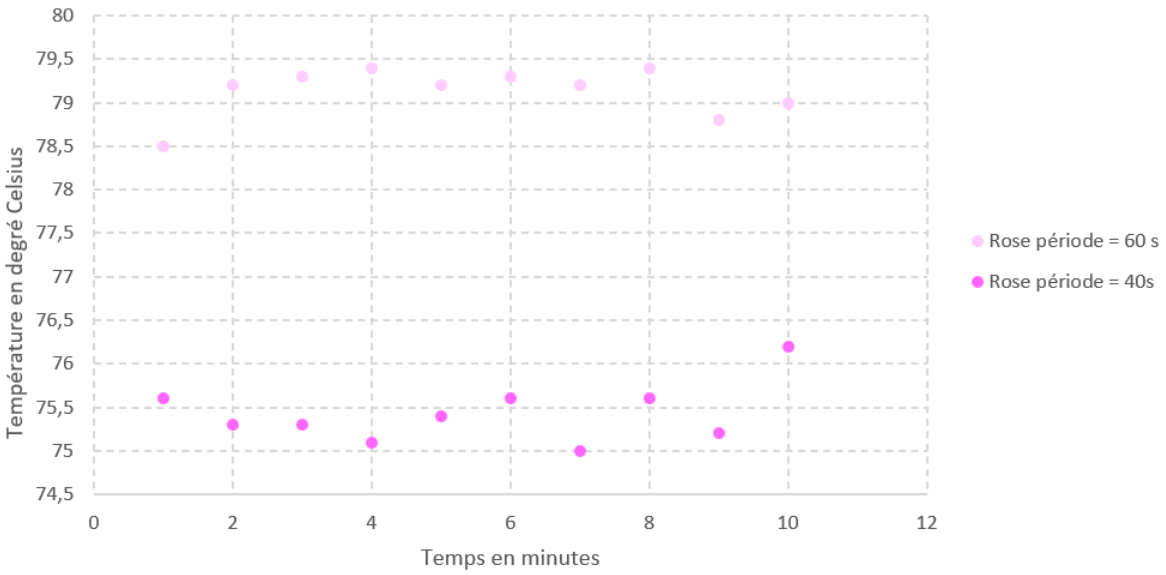

FIGURE 3.9 – Impact de la période sur les températures observées.

On peut voir que dans cette configuration une période plus longue permet d'obtenir une température plus haute. Dans notre cas et pour conserver une méthode non destructive il peut donc être intéressant de travailler avec des périodes assez courtes.

3.3.1 Détection de défaut par méthode photo-thermique pour les peintures sur toile.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la détection d'un défaut de type 4 pour la zone peinte en rose (voir figure 3.3). Pour cette partie, la période d'excitation était d'environ 60 secondes. Après avoir identifié les coordonnées du pixel qui correspondait au point le plus chaud à chaque période, nous avons tracé pour une zone de ± 50 pixels autour de ce point les températures obtenues pour une cartographie infrarouge qui présentait suffisamment de signal.

On remarque sur la figure 3.10 que les distributions de températures sont à peu près circulaires. La peinture sur toile réalisée présente donc un comportement isotrope : la chaleur se propage de manière identique dans toutes les directions.

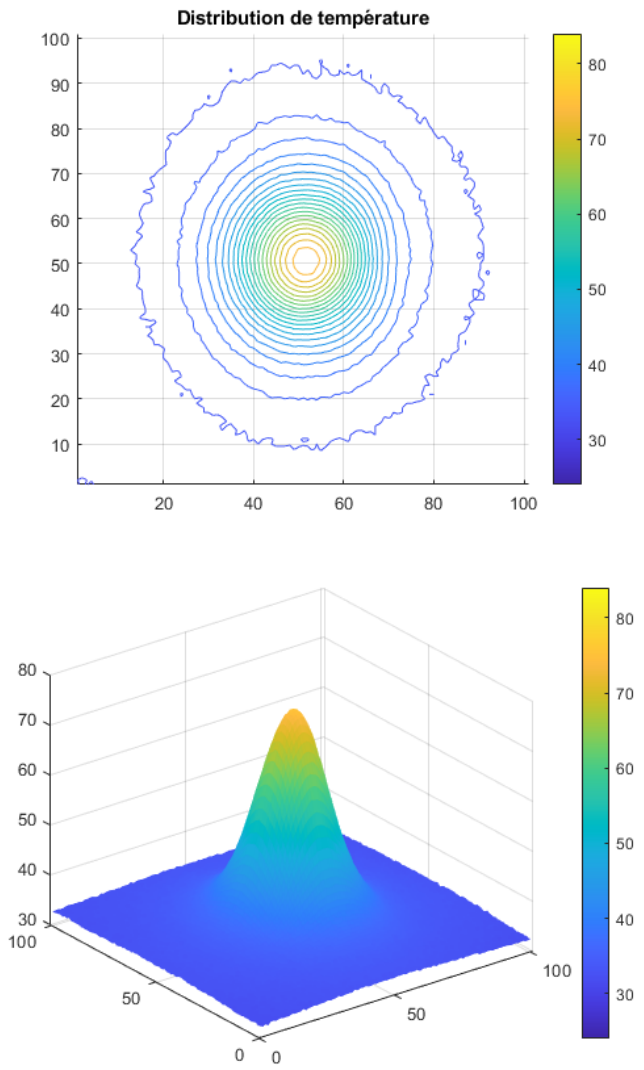

FIGURE 3.10 – Exemple de distribution de température.

Afin de visualiser l'effet d'un éventuel défaut la cartographie de module (amplitude des oscillations est représentée sur la figure 3.11.

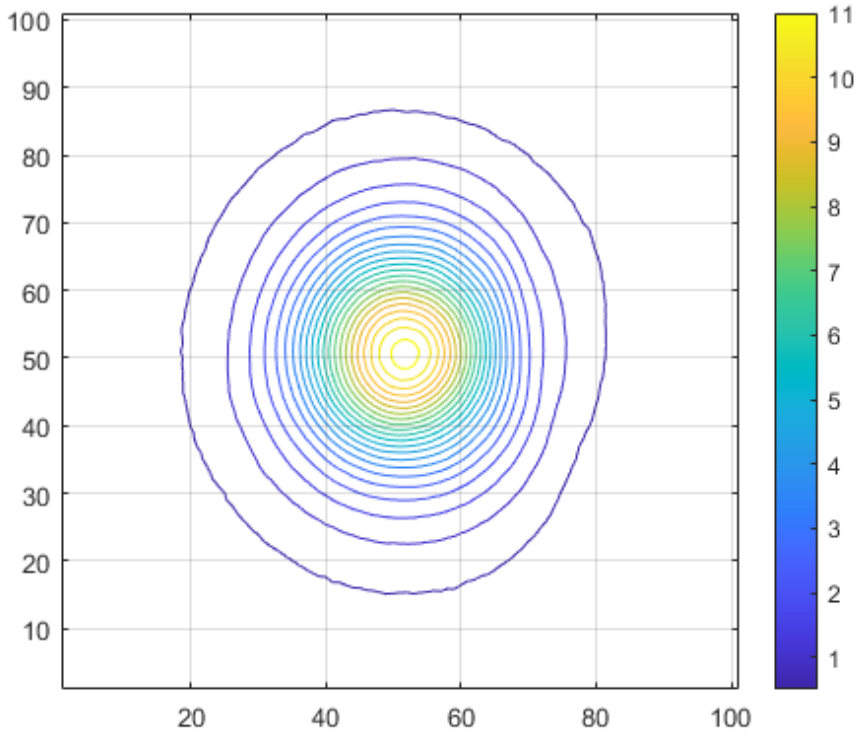

FIGURE 3.11 – Cartographie de module pour la peinture sur toile.

La dissymétrie de cette distribution montre qu'un défaut a affecté la propagation des ondes de chaleur dans l'échantillon. Comme précédemment, les amplitudes obtenues pour une zone saine (sans défaut) avec les amplitudes pour une zone avec défaut sont analysées. Sur la figure 3.12, la différence entre les amplitudes obtenues en deux points diamétralement opposés est montrée. En effet dans le cas d'un matériau sain, la distribution de cette différence de module devrait être presque nulle (seul l'effet du bruit de mesure étant perceptible).

Sur la figure 3.12, on note une différence de module qui caractérise la présence d'un défaut.

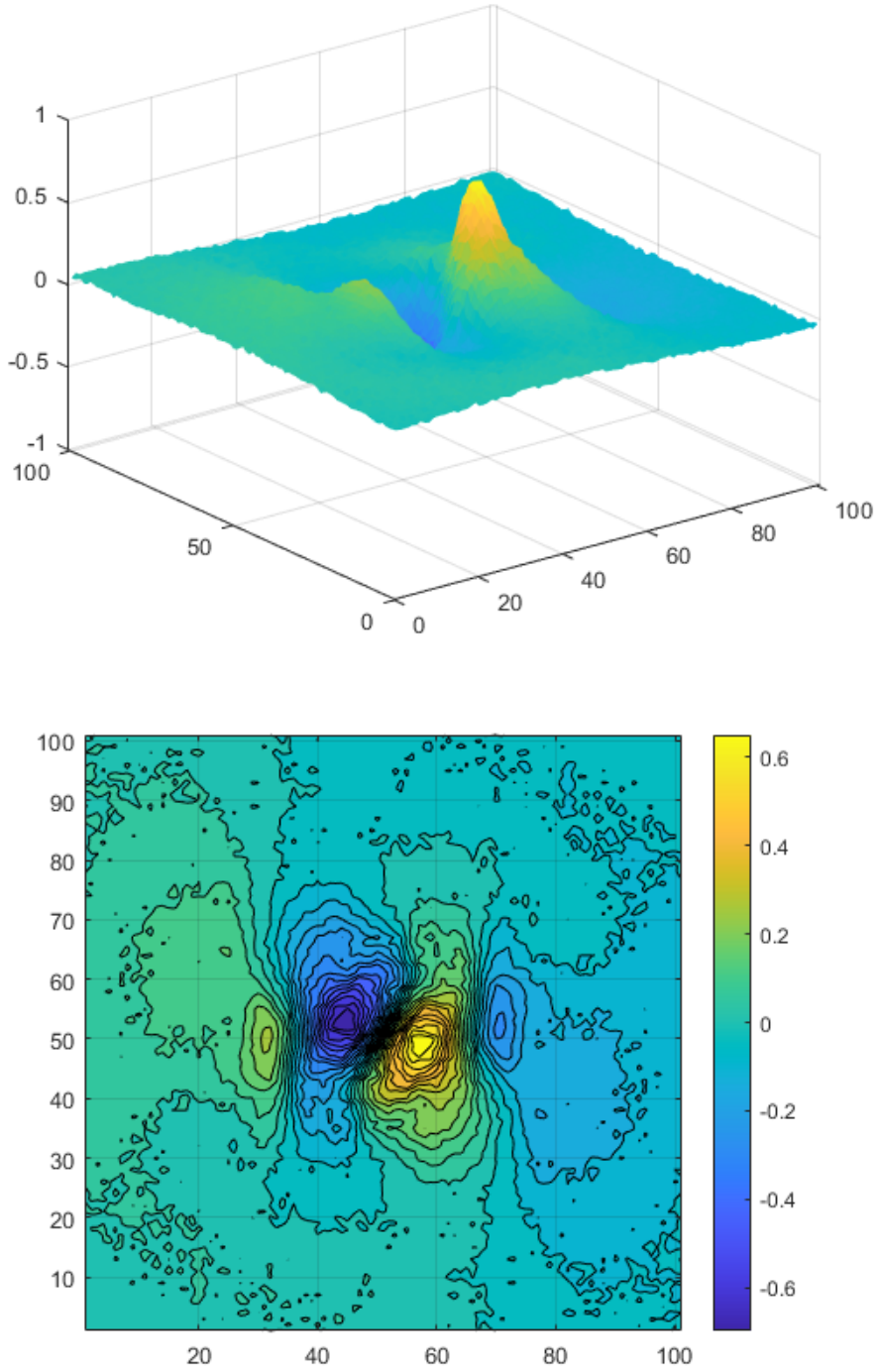

FIGURE 3.12 – Détection d'un défaut dans la peinture sur toile.

Conclusion et perspectives

Comme nous avons pu le voir précédemment, lors de cette période de stage, nous avons pu approfondir la compréhension de la méthode de détection par photothermie. Nous avons également listé les éléments du montage qui pouvaient influencer sur les observations et cherché à limiter leurs effets.

Nous avons fabriqué les premiers échantillons aussi bien dans le cas des instruments en bois collés ou bien dans celui des peintures sur toiles. Dans les deux cas ces échantillons nous ont permis de passer de la théorie à la pratique, de confirmer des hypothèses émises précédemment et de mettre en avant de nouvelles problématiques. Le problème principal reste la complexité à déterminer si la méthode produit des dommages sur les objets observés.

Grâce à ces échantillons nous avons commencé à générer une base de données des différents paramètres affectant les observations. Celle-ci reste à compléter et demandera probablement la création de nouveaux échantillons comportant par exemple des collage de bois. Il sera bon de rester ouvert à différentes possibilités et continuer à partager avec des professionnels aussi bien dans le domaine de la lutherie que de l'art mais également avec des musées et des conservatoires.

Pour ce qui est de mon retour d'expériences sur ce stage, la période de stage était assez courte. Le découpage du sujet entre peinture, instrument et traitement des données en fait un sujet complet et pluridisciplinaire. Si cela permet de ne pas être las de son sujet d'étude cela demande également de ne pas trop se désintéresser de l'un des domaines par rapport aux autres. La prise de contact dans ces domaines peut également être complexe sur des courtes périodes et dans les circonstances actuelles. La pluridisciplinarité du sujet m'a permis de toujours pouvoir avancer. Dans l'attente d'échantillons de bois j'ai réalisé des échantillons en toile peinte et lorsque j'ai rencontré des problèmes avec le banc de test j'ai pu travailler sur la partie de traitement des images infrarouge. Ce stage ma permis d'entrevoir une facette du milieu de la recherche en mêlant campagnes expérimentales et analyse de résultats.

Annexe A

Échange autour de l'ébénisterie et de la lutherie

L'objectif de ces questions est de mieux comprendre à quel type de défauts on peut faire face aussi bien dans le bois que dans les collages. Ainsi nous pourrons déterminer si les défauts dans les collages et/ou le bois peuvent avoir un impact sur le son et la structure des instruments.

Questions générales :
Pouvez-vous vous présenter (étude, métier, spécialités...) ?
Martin : Martin a réalisé un CAP en ébénisterie, un BTM et un BTMS spécialisé dans la conception de meubles contemporains. Il travaille actuellement aux Ateliers de la Chapelle sur divers travaux allant de la création à la restauration.

Paul : Paul a lui aussi réalisé un CAP et BTM en ébénisterie. Il a réalisé 5 ans en alternance lors de ces études. Il travaille actuellement à la conception de pièces pour le domaine naval. En parallèle, il réalise en amateur des travaux d'entretien et de restauration sur des instruments tel que des guitares électriques, acoustiques et des ukulélés.

Questions portant sur les défauts dans le bois :
Une exposition longue (quelques heures) à une température comprise entre 50°C et 100°C peut elle avoir un impact sur la structure du bois ?
Oui, on risque de créer des gerces, en particulier si le bois est fin. On peut également créer des déformations dans la structure du bois. Les vernis surtout s'ils sont anciens et/ou en matières d'origines naturels (type vernis au tampon) ont de grande chance d'être altérés.

Quels types de défauts rencontrez vous fréquemment sur le bois que vous travaillez ?
Des gerces, qui prennent la forme de fentes dans le bois et qui sont généralement dues à un séchage trop rapide. Le bois éclate alors plus facilement quand on l'usine. Des nœuds, qui peuvent être pleins, creux ou en pattes chattes. Les nœuds creux se caractérisent par l'absence de matière en leur centre et des bords foncés. Les pattes de chats sont de petits nœuds rapprochés. En plus des défauts cités en ébénisterie, on observe en lutherie la qualité de la matrice du bois : fil horizontal, régulier, avec une pousse lente. Les parties trop tendres du bois ne sont pas conservées. Sur la planche taillée pour les tables d'harmonie par exemple, on ne conserve pas le cœur. On sélectionne également le bois pour sa coupe, la table d'harmonie est tirée d'un débit sur quartier par exemple.

Si vous repérez un défaut dans le bois est-ce-que vous travaillez quand même avec ?
Cela dépend de la qualité de l'ouvrage et du type de finitions apportées. Certains sont rédhibitoires (insectes et champignons en général). Pour la lutherie, cela dépend du type de défauts et de la pièce que l'on souhaite réaliser avec. Sur les guitares électriques le corps de la guitare peut comporter des défauts sans que cela ne pose un problème sur le son. De même certains défauts peuvent être utilisés sur le manche comme l'érable ondé et pommelé. Le défaut est visuel mais pas structurel. Par opposition le bois utilisé pour les touches se doit d'être parfait et résistant. Comme il s'agit de la partie de l'instrument qui sera en contact directe avec la peau, la sueur et les cordes. Elle est généralement réalisée en palissandre ou en érable. Ces deux bois offrent une densité importante et une bonne résistance aux attaques extérieurs précédemment citées.

Sinon est-ce pour une raison esthétique ?
On peut également choisir de conserver des défauts pour leur ajout esthétique. C'est par exemple le cas pour les nœuds patte de chat. On peut également jouer sur les veinages du bois (ce qui n'est pas le cas en lutherie). S'il s'agit de malformations celles-ci peuvent également être utilisées à des fin esthétiques. De même avec le bois foudroyé.

Est qu'un arbre malade produit nécessairement un bois de mauvaise qualité. Si oui est-ce-que cela est visible directement ou lorsque le bois vieillit ?
Si un arbre est malade cela est visible lors du débit. Certaines maladies peuvent modifier la structure du bois cela ne veut pas pour autant dire qu'il est inutilisable mais davantage qu'il faut prendre en considération ses propriétés pour le travailler. Le chêne rouge est un chêne malade généralement âgé et qui développe un champignon. Son bois est plus résistant à l'eau mais également plus fragile, friable. Il peut être utilisé pour sa couleur mais il faudra respecter ses propriétés pour le travailler.

Connaissez-vous des défauts profonds / semi-profonds non visibles en surface (fentes, insecte, autre...) ? Si oui qu'elles en sont les causes et les impacts sur le bois ?
Oui les défauts peuvent se cacher dans des parties plus imposantes d'un instrument comme le manche ou la tête. On peut rencontrer des nœuds et des gerces qui ne deviennent visibles que lors de la fin de création de la pièce. Dans le cas des nœuds le défaut risque de déformer la pièce. En général on tapote les morceaux de bois pour écouter leur résonance et éviter les défauts.

Questions relatives aux collages. Quels sont les éléments importants lorsque vous réalisez un collage ?
La température (environ 20 degrés) le respect des temps de séchage, l'hydrométrie. Pour réaliser un collage propre, il faut éliminer les traces de colle, de graisse, de sciure de bois de bois et avoir un assemblage avec peu de jeu. La colle utilisée doit correspondre au type d'efforts auxquels le montage sera soumis. En lutherie on s'intéressera davantage à la planéité de la surface. L'assemblage rentre moins en compte dans les collages car il s'agit souvent de collage à plat. C'est-à-dire de collage entre deux surfaces planes. On peut également être amené à réaliser des traitements avant de réaliser les collages comme sur le tek qui est un bois naturellement gras.

Quel type de colle utilisez-vous (synthétique ou naturel) ? Pour quelles raisons ?

- Des colles synthétiques vinyliques pour la création de meubles.
- Dans le cadre de la restauration, de la colle naturelle de poisson ou colle à chaud (os/nerf).
- Sur les instruments modernes / de série vinylique et aliphatique car plus facile à utiliser.
- Sur les instruments anciens des colles naturelles plus fragiles et sensibles à l'humidité mais également plus facile à retirer et à restaurer.

Vous est-il arrivé de devoir refaire un collage et si oui pourquoi ?
Oui, si on ne respecte pas bien les éléments précédemment cités. En général Ce n'est pas le collage qui casse mais le bois avoisinant. Cela peut également être le cas si la colle utilisée est de mauvaise qualité. Dans le cas des colles vinyliques elles sont assez difficiles à retirer. Souvent on découpe entre la colle et le bois pour pouvoir retirer la colle.

Quels paramètres influencent la durée de vie / qualité d'un collage ?
La plus importante serait l'humidité. La qualité de l'assemblage (le jeu avant collage), le pressage et la colle utilisé. Mais également la chaleur, les chocs (peuvent également générer des gerces) et les UV (qui peuvent aussi influencer les vernis).

Question propre à la lutherie : des défauts dans les collages ont-ils un impact sur le son produit par l'instrument ?
Oui, ils peuvent briser la transmission et la propagation dans la caisse de résonance, créer des bruits parasites. Parmi les pièces pouvant avoir un impact sur le son le collage des touches, du manche avec le corps(transmission), les éclisse, les barrages (résonance et bruits parasites).

De manière plus générale, les défauts peuvent-ils avoir un impact sur la structure de l'instrument et le fragiliser ?
Les défauts dans le collage comportent plusieurs risques le premier étant de modifier le son car il ne permet pas une bonne transmission de celui-ci. Un deuxième car il peut créer des bruits parasites si deux pièces rentrent en résonance alors que cela ne devrait pas être le cas. Et enfin car elles peuvent fragiliser la structure jusqu'à la rupture (chevalet et tête). Dans le cas des défauts sur le bois, ils sont vus ou entendus avant même le travail de bois. Ils peuvent également être observés durant le travail du bois et dans ce cas ils vont au rebut également. Dans le cas de gerces et de fentes dans le bois sur instrument existant elles peuvent être réparées si elles sont vues à temps.

Conclusions de chacun :
Martin : Le bois est une matière vivante qui a de nombreuses propriétés et dont il est plus facile d'appréhender les réactions lorsque l'on a de l'expérience. Bien choisir son bois est donc quelque chose qui s'apprend et demande du temps. Beaucoup de choses qui sont possibles en ébénisterie ne le sont pas en lutherie. Jouer avec les veinages et les défauts du bois car cela ne permettrait pas une bonne circulation du son. En lutherie les défauts ne sont pas conservés et les défauts que l'on peut trouver viennent majoritairement des manipulations apportées au bois (différence d'épaisseur, collage). Le travail s'effectue sur les épaisseurs de bois très fin et les défauts sont généralement mis à nu.

Paul : La méthode pourrait intervenir de manière préventive sur le maintien d'instrument dans un bon état dans le cas d'instrument fortement sollicité (professionnel / conservatoire). Pour prévenir notamment la rupture entre la tête et le manche, la table d'harmonie et le chevalet, la table d'harmonie et les barrages. Mais également dans des musées pour permettre de vérifier l'état d'un instrument et en prévenir la dégradation (en tenant compte de l'impact sur le vernis).

Annexe B

Caractérisation des défauts dans les collages.

Cette annexe a pour objectif de mieux visualiser les différents collages qu'il pourrait être intéressant d'observer avec la méthode.

Collage des touches :
Ce collage relie les touches au manche de l'instrument. Les touches forment une épaisseur d'environ 5 mm. L'épaisseur du manche elle varie en fonction de la forme de celui-ci allant de quelques millimètres sur les bords à quelques centimètres au centre.

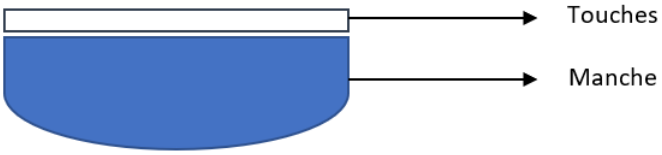

FIGURE B.1 – Collage entre le manche et les touches.

Jonction entre le manche et la tête :
Cette jonction se retrouve sur les instruments dont la tête est légèrement inclinée par rapport au manche. Les deux pièces font respectivement plusieurs centimètres d'épaisseur.

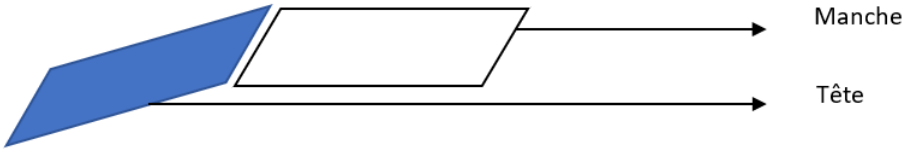

FIGURE B.2 – Collage entre le manche et la tête.

Collage des éclisses / contre-éclisses :
Les éclisses sont fines (environ 2 mm) et sont collées aux contre-éclisses plus sont-elles, plus épaisses. Ces collages sont généralement archées en fonction de leurs positions sur l'instrument.

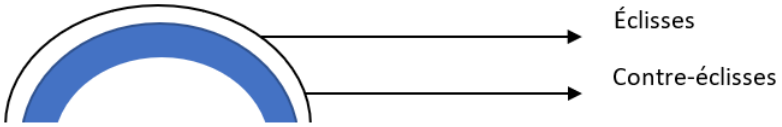

FIGURE B.3 – Collage entre les éclisses et les contres-éclisses.

Collages des barrages :
Les barrages peuvent fortement varier et ceux même sur un même instrument. Chaque barrage propose un placement des barres différents mais joue également sur la forme et l'épaisseur de celle-ci.

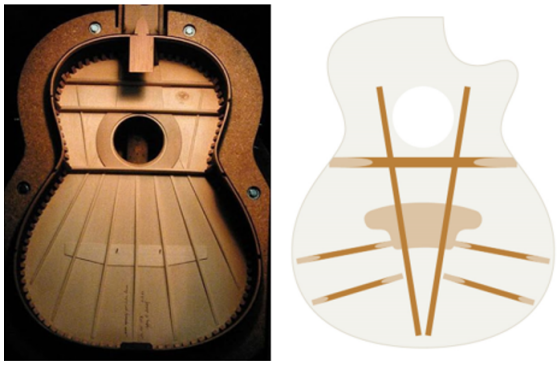

FIGURE B.4 – Barrage concert à gauche et V à droite (source image : guitareconcert.com et les-grandes-guitares-acoustiques.com)

Bibliographie

[1] L. Autrique, L. Perez, and E. Scheer. On the use of periodic photothermal methods for materials diagnosis. *Sensors and Actuators B.*, 135(2) :478– 487, 2009.

[2] J.L. Bodnar, J.C. Candoré, J.L. Nicolas, G. Szatanik, V. Detalle, and J.M. Vallet. Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings. *NDT E International*, 49 :40–46, 2012.

[3] J.L. Bodnar, J.C. Candoré, J.L. Nicolas, G. Szatanik, V. Detalle, and J.M. Vallet. Contribution to the improvement of heritage mural painting non-destructive testing by stimulated infrared thermography. *The European Physical Journal Applied Physics*, 64(1), 2013.

[4] CIRAM. Datation du support imagerie uv, ir, radiographie x analyse chimique des pigments. *Interne CIRAM*, 2013.

[5] Jean-Paul Coutrait. *Trucs et procédés du bois.* Editions d'art Charles Moreau, 2005.

[6] J. R. J. van Asperen de Boer. « infrared reflectography : a method for the examination of paintings. *Applied Optics*, 7 :1711–1714, 1968.

Résumé — In this document, a non-destructive method based on photothermal approach is presented. Considering that the main advantage of such a method is to bring a low-energy input in order to analyse the material behaviour without any damages, the domain of painting evaluation and violon characterization has been chosen for investigations. This document is in three parts. The first one is devoted to the presentation of default detection using a periodic heating source. How it's physicaly works ? How we are going to extract the informations ? In this first part the test bench and the infrared camera are also presented. In the second part, the method is applied to wooden samples and it is shown how defect is detected. This part is also dedicated to several defects which could modify the sound and the structure of an instrument. In the third part similar investigations are presented for canvas painting.

Mots clés : Default Detection, Wooden Instrument, Canvas Painting, Thermography, Image Processing

LARIS - Polytech Angers
62, avenue Notre Dame du Lac
49000 Angers