



HAL
open science

Contribution au développement d'outils d'analyse de séquences d'images infrarouges : Application au contrôle non destructif de structures de Génie Civil

Antoine Crinière

► To cite this version:

Antoine Crinière. Contribution au développement d'outils d'analyse de séquences d'images infrarouges : Application au contrôle non destructif de structures de Génie Civil. Infrastructures de transport. Centrale nantes, 2014. Français. NNT: . tel-01111166

HAL Id: tel-01111166

<https://hal.science/tel-01111166>

Submitted on 29 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de Doctorat

Antoine CRINIÈRE

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'École centrale de Nantes
sous le label de l'Université de Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture

Discipline : Sciences pour l'ingénieur

Unité de recherche : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

Soutenue le 28 octobre 2014

Contribution au développement d'outils d'analyse de séquences d'images infrarouges Application au contrôle non destructif de structures de Génie Civil

JURY

Président : **M. Olivier FUDYM**, Professeur des universités, ENSTIMAC -RAPSODEE - Albi
Rapporteurs : **M. Jean-Christophe BATSALE**, Professeur des universités, ENSAM - I2M - Bordeaux
M. Yves CANDAU, Professeur des universités, UPEC - CERTES - Créteil
Examineurs : **M. Agustín SALAZAR**, Professeur des universités, UPV \ EHU- PTL - Bilbao
M^{me} Laetitia PEREZ, Maître de Conférences , IUT - LTN - Nantes (encadrante)
M. Sebastien BOURGUIGNON, Maître de Conférences, ECN - IRCCyN - Nantes
Invité : **M. Jean DUMOULIN**, Chargé de Recherche, IFSTTAR- COSYS \ SII - Nantes (encadrant)
Directeur de thèse : **M. Frédéric BOURQUIN**, Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et des Forêts - HDR, IFSTTAR - COSYS - Marne la Vallée
Co-directeur de thèse : **M. Pierre HORNYCH**, Ingénieur Divisionnaire des Travaux Publics de l'État - HDR, IFSTTAR - MAST - Nantes

« We choose to go to the Moon in this decade and do the other things, not because they are easy, but because they are hard... »

Nous choisissons d'aller sur la Lune dans cette décennie et faire d'autres choses encore, non parce que c'est facile, mais bien parce que c'est difficile...

John Fitzgerald Kennedy le 12 septembre 1962

Remerciements

J'aimerais adresser mes remerciements à l'ensemble de l'encadrement de cette thèse qui m'a accompagné durant cette aventure de trois ans.

Ainsi, je remercie chaleureusement Mr Frédéric Bourquin qui a dirigé ces travaux. Ses conseils et remarques constructives, malgré un emploi du temps chargé ont été plus qu'utiles à la réalisation de cette thèse. Je dois aussi beaucoup à Mr Pierre Hornych qui a co-dirigé ces travaux et sans qui la dernière ligne droite aurait posé un certain nombre de problèmes dont je vous passerai le détail.

Je tiens à remercier tout particulièrement, Jean Dumoulin et Laetitia Perez pour m'avoir suivi et encadré, même si la communication à distance n'est pas ma plus grande qualité (Désolé Laetitia ;)). À base de remerciement spécial à Jean, qui en plus de m'avoir encadré m'a supporté au jour le jour sans broncher.

Je remercie l'IFSTTAR, et plus particulièrement le laboratoire SII et l'équipe MeThOm pour m'avoir accueilli pendant ces trois ans. Je tiens aussi à saluer la région Pays de la Loire pour sa participation au financement de ces travaux.

J'adresse un clin d'œil amical à Laurent Autrique, Bertrand Lascoup et encore une fois Laetitia Perez pour m'avoir fait confiance et guidé au sein du monde de la recherche à la fin de mes études d'ingénieur.

Je remercie Mr Olivier Fudym d'avoir bien voulu présider mon jury. Une attention toute particulière pour messieurs Jean-Christophe Batsale et Yves Candau qui ont rapporté cette thèse, ainsi que messieurs Sébastien Bourguignon et Agustín Salazar qui ont accepté de faire partie du jury. Merci pour vos conseils et remarques de qualité.

Comment ne pas citer dans ces remerciements ceux qui m'ont accompagné au cours de ces trois ans.

Je remercie les tauliers du bâtiment Darcy, Louis-Marie, les deux Vincent et les deux William (Marconi et Bénamou), Jean-Luc, Mathieu, Laurent mi-vendeen, mi-breton, mi-basque, 100 % licorne, Ivan le terrible, Jean-Noël, Jean-Philippe qui va pourvoir ranger ses boules Quies, Alain, Fabrice, Sophie, Valérie, Miguel, David the coffee prince, Christophe, ne lâche pas c'est bientôt ton tour, François, Nicolas à qui appartient la chèvre, Alexandre qui souffre de phobie administrative et bien sur la race féline pour l'ensemble de son œuvre et ses contributions au développement d'Internet.

J'adresse un remerciement tout spécial aux membres du bureau n°11, à savoir Jordan et Louis-daniel. Merci pour ces trois ans passés dans la bonne humeur. Jordan t'est presque au

bout tien le coup bolos et s'il te plait appelle la Leia. L-D n'oublie pas, *chess bra chess bra dos... bra bra bra chess* et bon retour au pays. Il faudra quand même effacer nos mails et nos historiques, et penser à repeindre le bureau... Je dis ça, je dis rien.

Je remercie tous ceux qui m'ont fait oublier la thèse le temps d'un instant.

Les Ecomméens avec qui l'histoire a commencée il y a fort longtemps, Joé, Adou, JB et Mela, père Francis et Dodo, la Plote, DD, Mimi, Pico, Vivi, tous les petits bous et tous ceux que j'oublie. Merci les gens !

Je n'oublie pas la schouague team d'Angers éparpillé aux quatre coins de la France. J-Lo qui sera en concert à Port-Barcarès tout l'été, Jerem et Flo qui eux dormiront à Port-Barcarès, Boobs pour l'ensemble de son œuvre capillaire, Nawf et Momo dit Noniouf et b3\$ta pour les intimes, Mag et Alex pour le nougat, on oublie trop souvent le rôle du nougat, Hélo sosie officiel de Celine Dion en un peu plus petit, Nanou photographe de l'extrême en milieu nocturne, ainsi que le moustique tigre pour sa participation. Pensez-y, cela fait sept ans les amis... Adrien dit le breton ou Britannicus, Alban futur docteur Banban. Marie pour la mousse au chocolat. Yann et Chacha pour les rondins de bois, Nuth'ella et oncle ben's pour mon arcade sourcilière ainsi que Mike et Hélo *qué viva américa latina*. Et enfin les veilleurs de nuit Nantais : Jean-Jean et son nez pour leurs travaux communs, ainsi que Xavier pour son pas-de-porte.

Je ne peux pas oublier, ici, les contributions de Jack O'Neill, Teal'c, des docteurs Carter et Jackson ainsi que de l'ensemble du SGC. Merci les gars. Tout est vrai.

Je remercie tout particulièrement ma famille qui m'a soutenu durant ces trois ans. Mes parents, merci d'avoir cru en moi et de m'avoir laissé choisir ma voix. Merci frangin pour mes cartons et bon courage pour la suite. Enfin, une pensée particulière à Bernard mon grand-père.

La thèse est une étape joyeuse, douloureuse, enivrante et marquante. Mais ce n'est qu'une étape, et j'espère bien vivre les prochaines avec vous qui remplissez ces lignes.

Bonne lecture

Contribution au développement d'outils d'analyse de séquences d'images infrarouges *Application au contrôle non destructif de structures de Génie Civil*

Le vieillissement du parc d'infrastructures de transport ainsi que l'augmentation du trafic durant les dernières décennies rendent nécessaire le contrôle santé des structures de génie civil. Les travaux conduits dans le cadre de cette thèse portent sur le développement et l'étude de méthodes de diagnostic *pré* et *post* endommagement de structures de génie civil couplées à la mise en œuvre de systèmes de Thermographie infrarouge. Le manuscrit s'articule autour de deux axes. La partie **I** présente le développement d'un ensemble de méthodes, basées sur l'utilisation de la thermographie infrarouge active, permettant le contrôle non destructif d'ouvrages réparés par collage de matériaux composites. Les différentes méthodes étudiées ont permis l'établissement des cartographies de propriétés thermophysiques de ces matériaux renforcés. En complément, une discussion sur l'optimalité du temps de chauffe pour ce type de diagnostic est proposée. La partie **II** présente la conception et l'utilisation d'une architecture dédiée à la surveillance thermique long terme des structures par thermographie infrarouge. Le système étudié permet le suivi des paramètres météorologiques et thermiques sur de grandes échelles de temps et d'espace. Ce dispositif de mesure est d'abord appliqué au suivi thermique d'un tablier de pont sous trafic. La cartographie de sa structure interne a été reconstruite. Enfin une analyse du comportement d'éléments de structures, sain et endommagé, soumis aux aléas climatiques pendant un an est proposée et discutée.

Mots Clés : Transfert Thermique, Contrôle non destructif, Surveillance thermique, Modélisation, Problèmes Inverses, Conception de systèmes d'information, Génie Civil, TIC

Tools for InfraRed sequences analysis

Application to the non destructive testing of civil engineering structural elements

Constant increase of road traffic coupled with ageing transport infrastructures implies the need of non destructive diagnostic for civil engineering structures. The work presented in this Ph.D. thesis focuses on the development of *pre* and *post* damage diagnostic strategies, paired with the implementation of infrared thermography systems. This manuscript is structured into two main axes. Part **I** presents the conception of a set of methods for the non destructive evaluation of civil engineering structures repaired by CFRP bonding using active infrared thermography. The different methods led to the thermophysical properties mapping of repaired materials by CFRP bonding. A complementary discussion about the optimality of the heating time is also carried out. Part **II** details the conception and use of a software architecture dedicated to the long term thermal monitoring of structures by infrared thermography. The system allows the monitoring of meteorological and thermal parameters over large scales of time and space. It has been used for the thermal monitoring of a bridge deck open to traffic. Mapping of the internal structure thermal properties have been calculated. Finally, thermal behaviour of damaged and sound structural elements submitted to climatic perturbations over a year has been followed by infrared thermography. Results obtained are presented and discussed.

Table des matières

Introduction Générale	1
I CND & END de structures de génie civil	5
1 Introduction au contrôle non destructif par ThIr	7
1.1 Principe de la thermographie infrarouge	7
1.2 Contrôle non destructif par thermographie infrarouge	13
1.3 Synthèse	20
2 Caractérisation thermophysique de multi-couches épais	23
2.1 Modélisation thermique	23
2.2 Analyse du modèle thermique	28
2.3 Conditions de validité de l'hypothèse unidimensionnelle	33
2.4 Analyse de sensibilité	39
2.5 Procédure d'estimation de paramètres	52
2.6 Systèmes étudiés et banc expérimental	60
2.7 Résultats de la procédure d'estimation de paramètres	65
2.8 Extension de la procédure à la cartographie de propriétés	71
2.9 Synthèse	77
3 Estimation de champs de propriétés	85
3.1 Description de l'étude et modélisation	85
3.2 Formulation du problème inverse	87
3.3 Méthode de résolution	88
3.4 Résultats	90
3.5 Méthode alternative	93
3.6 Résultats avec la méthode alternative	93
3.7 Étude sur d'autres formes de défaut	96
3.8 Synthèse	100
4 Sur l'optimisation du temps de chauffe	103
4.1 Observations et formulation de l'indicateur I_{ph}	103
4.2 Comportement vis-à-vis de la sensibilité aux paramètres du modèle	108
4.3 Comportement vis-à-vis de la procédure d'estimation de paramètres	111
4.4 Synthèse	114

II	Surveillance thermique en environnement naturel	117
5	Introduction au <i>structural health monitoring</i>	119
5.1	Le <i>structural health monitoring</i> SHM	119
5.2	La thermographie infrarouge : méthode de suivi des effets environnementaux sur les structures de génie civil	120
5.3	Synthèse	121
6	De l'évaluation non destructive au SHM	123
6.1	Système de mesure : IrLaW	123
6.2	Mise en place du système de mesure	130
6.3	Modélisation thermique	132
6.4	Procédure d'estimation paramétrique	136
6.5	Reconstruction des conditions limites du système	137
6.6	Résultats de la procédure d'estimation	142
6.7	Synthèse	146
7	Mise en place d'une expérience long terme	149
7.1	Système de mesure	149
7.2	Éléments structurels et benchmark expérimental	151
7.3	Analyse de données expérimentales	154
7.4	Analyse qualitative	160
7.5	Synthèse	160
III	Conclusion	165
	Bibliographie	171
IV	Annexes	i
	Sigles infrarouges	iii
	Les matériaux composites	v
	Liste de matériaux	vii
	Comportement de la procédure d'estimation en présence de bruit	ix
	Évolution du maximum de sensibilité et de son temps d'arrivée	xiii
	IRIASPOT	xvii
	Liste de publications	xix

Nomenclature

Exposants

$\hat{}$	Estimateur
$\tilde{}$	transformée d'une fonction
T	Transposée de matrice

Lettres Grecques

α	Diffusivité thermique en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ΔT	Contraste thermique absolu en K
ϵ	Émissivité
γ	Paramètre de régularisation de Tikhonov
λ	Longueur d'onde en μm
\mathcal{T}	Espace des éléments finis
μ	Paramètre d'amortissement de Levenberg-Marquardt
ω	Pulsation en rad.s^{-1}
ϕ	Flux de chaleur en W
ψ	Fonction de base des éléments finis
σ	Écart type
τ	Temps partie I. Amplitude complexe de la température en K partie II
τ	Transmission
θ	Transformée de Laplace de la température en K
φ	Densité de flux de chaleur en W.m^{-2}

Lettres Latines

\mathcal{F}	Fonctionnelle en K^2
\mathcal{L}	Opérateur transformée de Laplace

\mathcal{M}	Mesures
\mathcal{P}^n	Polynôme des éléments finis
\mathcal{R}	Espace de régularisation
b	Effusivité thermique $\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
C	Capacité thermique $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
e	Épaisseur en mm
f	fonction quelconque
h	Coefficient d'échange à la paroi $\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$
I_{ph}	Indicateur temps de chauffe
J	Matrice de sensibilité
j	Nombre imaginaire
k	Conductivité thermique en $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$
P	Vecteur de Paramètres
p	Variable de Laplace
R	Résistance thermique W.K^{-1}
S	Matrice de sensibilité réduite K
T	Température en K
t	Variable temporelle en s
x, y, z	Variable d'espace en m

Notations

CND	Contrôle non destructif
END	Évaluation non destructive
FFT	Fast Fourier Transform
SHM	Structural health monitoring
ThIr	Thermographie infrarouge

Introduction Générale

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein de l'équipe Méthodes Thermiques et Optiques Multicomposantes (MeThoM) du laboratoire Structures et Instrumentation Intégrée (SII). Le laboratoire (SII) fait partie du département Composants et Systèmes (COSYS) de l'Institut Français des Sciences et Technologies, des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR).*

Ce manuscrit introduit des techniques permettant le diagnostic quantitatif de structures de génie civil à l'aide de la thermographie infrarouge. Une première étude traitant de l'estimation des propriétés thermophysiques de zones défectueuses réparées par collage de matériaux composites est détaillée. Dans une seconde étude, le développement d'un système de mesure basé sur l'utilisation d'une caméra thermique pour la surveillance thermique des structures au cours du temps est exposé et les premiers outils d'analyse présentés et discutés.

Cette introduction présente le contexte et les résultats de ces travaux. Les problématiques et objectifs sont présentés plus en détail dans les chapitres introductifs des parties [I](#) et [II](#).

Nécessité de contrôle des structures

L'augmentation du trafic et le vieillissement du parc d'infrastructures routières [[IFSTTAR, 2010](#), [CGDD, 2012](#)] rendent nécessaire le contrôle santé des structures de génie civil. Confronté à ces observations, l'ensemble des exploitants se retrouve face à deux problématiques. Premièrement les différentes actions post-endommagement : comment quantifier la qualité du renforcement d'une structure vieillissante et de la réparation d'une structure dégradée. Deuxièmement les actions pré-endommagement : comment assurer le contrôle de l'état de santé des structures au cours du temps. C'est autour de ces deux axes que s'articule ce manuscrit.

La thermographie infrarouge comme méthode unique

La méthode de mesure commune à ces deux axes est la thermographie infrarouge (ThIr), c-à-d l'utilisation de caméras thermiques. L'objectif est ici d'étudier la faisabilité d'un diagnostic quantitatif à l'aide de la ThIr seule. Ce choix est notamment motivé par la récente diffusion de méthodes de mesure ThIr à un large public. Que ce soit pour une utilisation personnelle ou un usage professionnel, une large gamme de produits "All-in-one" est en train de voir le jour [[FLIR, 2014a](#), [FLIR, 2014b](#), [Optris, 2014](#)]. Du point de vue économique cette récente diffusion des techniques de mesure par infrarouge tend à rendre de plus en plus abordable des caméras de laboratoire (utilisées en R&D) proposant des capteurs à haute sensibilité et ayant une résolution accrue. D'un point de vue scientifique et technique, outre la possibilité de détection de défaut, la ThIr offre l'opportunité d'appliquer un modèle physique à chaque pixel de la séquence d'images thermiques et donc de fournir des informations qualitatives et quantitatives sur le système étudié. Le chapitre [1](#) présente des rappels sur le principe de fonctionnement de

*Bouguenais, Loire-Atlantique, France

la thermographie infrarouge.

Action post-endommagement : Le contrôle de structures réparées

Une partie des infrastructures existantes a déjà subi des dommages dus au vieillissement, la fatigue mécanique ou tout autre facteur. Dans ce cas, des techniques de réparations et/ou renforcements existent. Parmi celles-ci le renforcement par collage de matériaux composites est utilisé depuis une vingtaine d'années [Tang et Podolony, 1998, Afgc, 2011]. Ces techniques (détaillée chapitre 1) consistent, par exemple, à alterner des couches de colle (époxy, mortier, etc.) et de matériaux composites (CFRP, GFRP, annexe IV) en surface de la zone défectueuse. La tenue de la réparation est assurée par les caractéristiques mécaniques de la colle et le renforcement par les caractéristiques mécaniques des matériaux composites. Ces systèmes multi-couches ont notamment besoin d'être diagnostiqués pour attester de la qualité du collage. En effet un défaut de collage altère significativement le comportement mécanique de la réparation et sa durabilité [Büyüköztürk et Tzu-Yang, 2006, Houhou *et al.*, 2014]. La partie I présente une étude qui a permis le développement d'une méthode de diagnostic quantitatif des réparations par thermographie infrarouge. Bien que de multiples méthodes existent pour évaluer la qualité de collage des matériaux composites [Ehrhart *et al.*, 2010], il apparaît dans l'étude présentée chapitre 2 que la thermographie infrarouge permet le diagnostic en profondeur, indépendamment des propriétés élastiques des matériaux composites, de défauts n'influant pas encore sur le comportement mécanique de la réparation (*a contrario* des méthodes ultrasoniques par exemple).

L'objectif de la méthode d'analyse étudiée au chapitre 2 vise à étendre l'utilisation d'un modèle inverse de transfert thermique à chaque pixel de la séquence d'images infrarouges, générant ainsi une cartographie des propriétés thermophysiques de la zone diagnostiquée. Un large échantillon de défauts (annexe IV) a été utilisé à toutes les étapes de l'étude. À savoir, la validation de l'hypothèse unidimensionnelle du modèle thermique quadripolaire (autorisant l'application à chaque pixel), l'analyse de sensibilité et la conception d'une procédure d'estimation paramétrique. La procédure développée a permis de cartographier l'évolution des propriétés thermophysiques d'échantillons comportant un certain nombre de défauts connus, ce diagnostic est réalisé à l'aide d'un modèle unique permettant à l'expérimentateur de ne pas avoir à segmenter au préalable la zone d'inspection. Une seconde procédure d'estimation de paramètres basée sur une modélisation par éléments finis et utilisant la méthode de l'état adjoint (ainsi que du gradient conjugué) est proposée. Cette seconde procédure d'estimation permet le diagnostic et l'estimation du volume de zones défectueuses considérées au sein de la matrice du matériau ausculté. Enfin, au chapitre 4, une discussion est proposée sur la conception optimale d'expérience par le dimensionnement d'un temps de chauffe suffisant

L'ensemble des travaux détaillés dans la première partie de cette thèse ont été publiés au cours de celle-ci : [Crinière *et al.*, 2012, Crinière *et al.*, 2014a, Brouns *et al.*, 2014].

Action pré-endommagement : Le monitoring ou surveillance des infrastructures au cours du temps

Un autre aspect du diagnostic de structures de génie civil est la surveillance (monitoring) au cours du temps des propriétés de la structure. Ces méthodes doivent être capables de suivre l'apparition d'endommagements et informer les exploitants sur l'état de la structure. Le *Structural Health Monitoring* (SHM) est un domaine de recherche étudié depuis plusieurs années, et de nombreuses techniques de diagnostic sont actuellement utilisées pour effectuer le contrôle santé des structures au cours du temps [Hoon *et al.*, 2004, Balageas *et al.*, 2006]. La partie II de ce manuscrit s'inscrit dans la suite du projet européen ISTIMES [Proto *et al.*, 2010, ISTIMES, 2014]

dont l'objectif était d'évaluer la capacité de différentes méthodes de mesure électromagnétiques (infrarouge, Radar, etc.) à "monitorer" les infrastructures de génie civil. Le projet ISTIMES était basé sur une approche multi-méthodes, ici, l'objectif des chapitres 6 à 7 est d'étudier la capacité de la thermographie infrarouge sur le long terme à fournir des informations quantitatives sur les infrastructures soumises à l'ensemble des perturbations environnementales, ainsi que de concevoir un système de mesure autonome.

Le chapitre 6 présente un système de mesure [Dumoulin et Averty, 2012b] intégrant la gestion d'une caméra thermique et d'une station météo (suivi de paramètres environnementaux) et détaille une étude utilisant ce système. Au cours de cette étude, trois jours de données thermiques et environnementales ont été acquises sur le pont de Musmeci (Viadotto dell'Industria), situé sur la commune de Potenza en Italie[†]. Une procédure d'estimation similaire à celle développée chapitre 2 a été utilisée pour cartographier la répartition spatiale de propriétés thermophysiques au sein du tablier du pont. Cette cartographie laisse apparaître la structure interne du tablier, notamment les caissons de béton formant l'infrastructure du pont. Après avoir démontré la faisabilité du monitoring thermique des infrastructures sur quelques jours, le système de mesure a été renforcé et rendu pleinement autonome afin d'effectuer la surveillance à très long terme des structures de génie civil (plus d'un an). Le chapitre 7 détaille les améliorations apportées au système de mesure et présente une première analyse des données acquises durant un an. L'ensemble des travaux détaillés dans la seconde partie de cette thèse ont été publiés au cours de celle-ci : [Crinière *et al.*, 2013, Dumoulin *et al.*, 2013, Crinière *et al.*, 2014c, Crinière *et al.*, 2014b].

Finalement, des conclusions et perspectives tant sur les méthodes de diagnostic de réparations par collage composite par ThIr active que sur la surveillance thermique long terme des ouvrages d'art sont proposées et discutées.

[†]Conçu par l'architecte Sergio Musmeci (1926-1981). Sa construction a été achevée en 1975



CND & END de structures de génie civil

Introduction au contrôle non destructif par thermographie infrarouge

Ce chapitre rappelle les principes de la thermographie infrarouge (ThIr) et introduit le contrôle non destructif de structures de génie civil réparées par collage de matériaux composites.

Dans un premier temps, nous introduisons la notion de thermographie infrarouge comme méthode de mesure du champ de température de surface d'un objet étudié. Les différentes méthodes de contrôle non destructif par thermographie infrarouge sont alors présentées, enfin l'application de ces méthodes au diagnostic non destructif de structures de génie civil renforcées par collage de matériaux composites est détaillée.

1.1 Principe de la thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est un principe de mesure du rayonnement thermique émis par un objet. À partir de cette mesure du flux électromagnétique reçu il est possible de remonter à la température de surface de l'objet. Cette section établit un rappel quant à la définition du rayonnement infrarouge.

1.1.1 Généralités sur le rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est une forme de transfert d'énergie entre corps solides, liquides et gazeux qui émettent un rayonnement fonction de leur température, [Planck, 1901]. D'après le principe de dualité onde-particule, le rayonnement électromagnétique peut être décrit comme une propagation de photons (vecteur des interactions électromagnétiques) ou comme une onde électromagnétique (figure 1.1).

Dans les domaines scientifiques et techniques, on distingue trois bandes dans l'infrarouge [ISO, 2010], tableau 1.1.

Cette classification permet de distinguer les longueurs d'onde du rayonnement infrarouge utiles généralement considérées dans diverses applications. Les sigles correspondants sont détaillés en annexe IV.

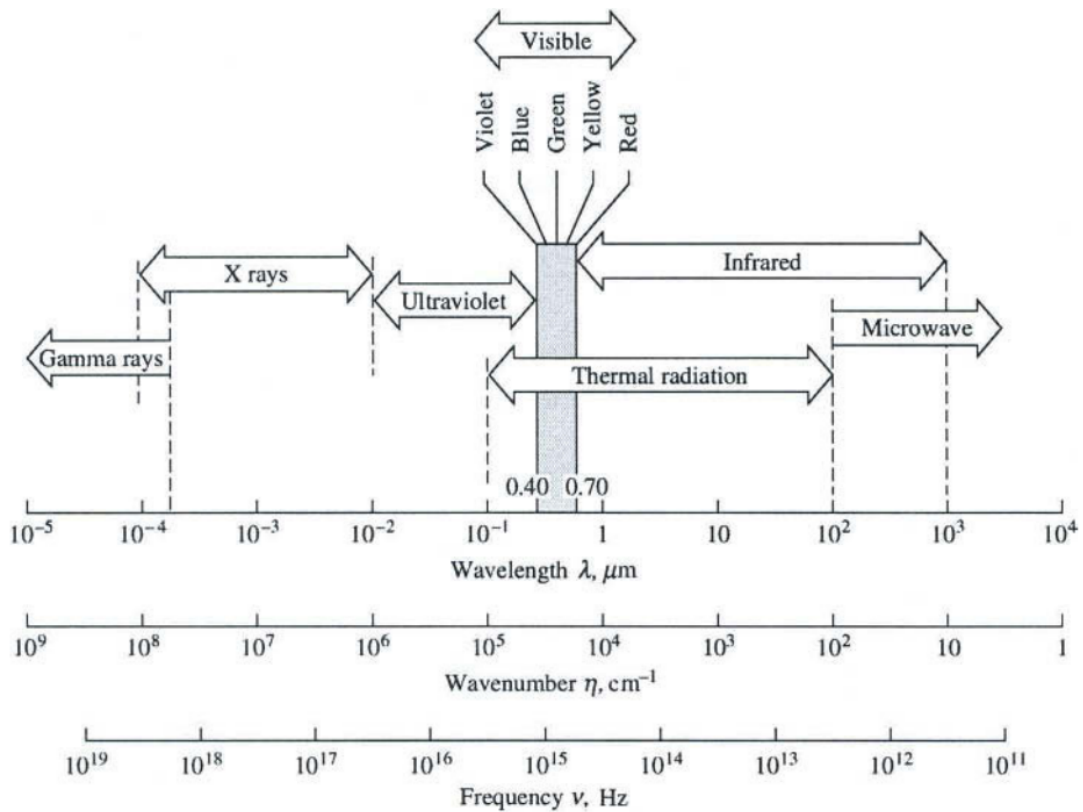


FIGURE 1.1 – Spectre électromagnétique complet - Crédit [Modest, 1993]

Classement	Longueur d'onde	Utilisation \ définition
Infrarouge proche (PIR, IR-A, NIR)	0.7 – 3 μm	Rayonnement solaire réfléchi
Infrarouge moyen (MIR, IR-B)	3 – 50 μm	Infrarouge thermique
Infrarouge lointain (LIR, IR-C, FIR)	50 – 1000 μm	Astronomie

TABLE 1.1 – Classement des longueurs d'ondes infrarouges selon la norme ISO 20473 :2007

Rayonnement des corps

Il est possible de caractériser le rayonnement électromagnétique à l'aide de différentes grandeurs énergétiques. Ces quantités, définies tableau 1.2, sont exprimées de façon totale ou monochromatique. Une grandeur est dite totale lorsqu'elle est calculée pour l'ensemble du spectre électromagnétique, si elle est exprimée pour une longueur d'onde λ donnée, elle est dite monochromatique [Modest, 1993]. En outre, si la grandeur considérée ne dépend pas de la direction, elle est dite hémisphérique (par opposition à directionnelle).

Dans le tableau 1.2 une distinction entre deux catégories est faite. La luminance et l'intensité appartiennent aux grandeurs directionnelles alors que l'émittance et le flux appartiennent, eux, aux grandeurs hémisphériques (c.-à-d. intégrées sur l'espace). L'éclairement est aussi une quantité non directionnelle, en revanche il ne caractérise pas un phénomène d'émission, mais de réception.

Dans le cas où l'émission d'un corps est constante quelle que soit la direction (émission hémisphérique/diffuse) il existe alors une relation entre émittance et luminance appelée loi de Lambert :

Grandeur	Expression monochromatique	Expression totale	Définition
Flux rayonné	ϕ_λ	$\phi = \int_0^\infty \phi_\lambda d\lambda$	Flux total émis par un corps dans tout l'espace, noté ϕ en W. Exprimé pour chaque longueur d'onde. On note alors ϕ_λ en $W.\mu m^{-1}$
Intensité	$I_{Ox,\lambda} = \frac{d\Phi_{Ox,\lambda}}{d\Omega}$	$I_{Ox} = \int_0^\infty I_{Ox,\lambda} d\lambda$	Représente le flux rayonné par un corps dans une direction Ox donné en $W.sr^{-1}$. Elle s'exprime en fonction d'un angle solide élémentaire $d\Omega$.
Emittance	$M_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{dS}$	$M = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda$	Flux total émis par un corps par rapport à un élément de surface dS en $W.m^{-2}$.
Éclairement	$E_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{dS}$	$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$	L'éclairement correspond au flux total reçu par unité de surface
Luminance	$L_{Ox,\lambda} = \frac{d^2\Phi_\lambda}{dS d\Omega \cos\theta}$	$L_{Ox} = \int_0^\infty L_{Ox,\lambda} d\lambda$	Correspond au rapport du flux total émis par une surface dS dans une direction Ox , pour un angle solide $d\Omega$ avec θ l'angle entre Ox et la normale à la surface. Elle permet entre autre de caractériser la perception d'un rayonnement par un observateur.

TABLE 1.2 – Grandeurs énergétiques du rayonnement électromagnétique

$$M = \pi L_{Ox} \quad (1.1)$$

La loi de Lambert permet de poser

$$I_{Ox} = L_{Ox} dS \cos(\cos\theta)$$

Ces différentes grandeurs dépendent aussi de la température de l'objet et de la longueur d'onde considérée tel que décrit par la loi de Planck [Planck, 1901].

Loi de Planck et rayonnement du corps noir

La loi de Planck, établie par Max Planck en 1901 [Planck, 1901], permet d'analyser la distribution de l'énergie du corps noir en fonction de la longueur d'onde*. Le corps noir est un objet théorique faisant office "d'émetteur idéal de rayonnement". Il est défini comme le corps qui émet et absorbe tout le flux énergétique à une température donnée :

$$M_{\lambda,T}^o = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1.2)$$

avec λ la longueur d'onde en m et T la température en Kelvin. Les constantes C_1 et C_2 , respectivement en $kg.m^4.s^{-3}$ et m.K sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} C_1 &= 2hc^2\pi \\ C_2 &= h\frac{c}{k} \end{aligned}$$

*Par convention les grandeurs énergétiques du corps noir sont notées avec l'exposant o .

avec

- c la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu (dans le vide : c =vitesse de la lumière en m.s^{-1}).
- $k = 1.381e^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ la constante de Boltzmann, introduite par Ludwig Boltzmann en 1873 dans sa définition de l'entropie d'un système. Elle peut être interprétée comme un facteur de proportionnalité reliant la température d'un système à son énergie thermique.
- $h \approx 6,62606957e^{-34} \text{ J.s}$ la constante de Planck. Introduite en 1900 par Max Planck dans sa théorie des quanta d'énergie. Elle relie l'énergie des photons à leur fréquence d'oscillation.

La figure 1.2 présente le tracé de cette loi pour un corps noir à différentes températures.

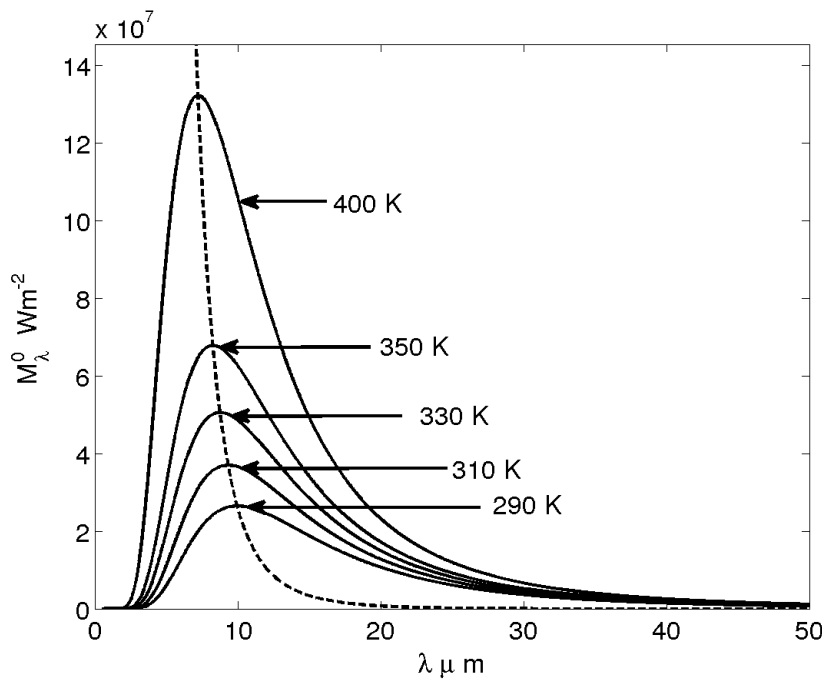


FIGURE 1.2 – Distribution spectrale de l'émittance du corps noir pour différentes températures

La loi du déplacement de Wien est aussi indiquée sur cette figure (courbe en pointillés). Exprimée pour la première fois en 1896 par Wilhelm Wien elle permet d'identifier la longueur d'onde à laquelle un corps noir émet le plus de flux énergétique pour une température donnée. Améliorée par Planck en 1901, elle se déduit de la loi du même nom en cherchant une longueur d'onde λ vérifiant $\frac{\partial M_{\lambda}^o(T)}{\partial \lambda} = 0$ et $\lambda_{max}T = 2898 \mu.\text{m.K}$.

La loi de Stefan Boltzmann démontrée entre 1879 et 1884 par Joseph Stefan et Ludwig Boltzmann, permet d'exprimer l'émittance totale du corps noir en W.m^{-2} en fonction de sa température [Siegel *et al.*, 2010] :

$$M^o = \int_0^{\infty} M_{\lambda,T}^o = \sigma_s T^4 \quad (1.3)$$

avec $\sigma_s = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ la constante de Stephan. Grâce à la loi de Stephan-Boltzmann ainsi qu'au théorème de Lambert, il est possible de calculer le flux énergétique échangé entre deux corps noirs.

Ainsi [De Vriendt, 1984, Modest, 1993], les échanges entre un corps noir à une température T_1 et son environnement (une enceinte fermée considérée noire) à température T_2 par unité de surface prend pour expression :

$$\varphi = \sigma_s (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.4)$$

Dans la suite de ce chapitre, le principe d'échange radiatif est appliqué aux corps réels.

Rayonnement des corps gris et réels

Dans la section précédente, nous avons présenté les grandeurs élémentaires définissant le rayonnement d'un corps parfait. Dans ce qui suit ces définitions permettront de caractériser le rayonnement d'objets réels. Dans un premier temps, il apparaît nécessaire de rappeler que, conformément au premier principe de la thermodynamique, l'ensemble des composantes du flux électromagnétique respecte la notion de conservation de l'énergie, figure 1.3 et équation 1.5, avec, φ_i , φ_r , φ_a et φ_t , les densités de flux thermique incidentes, réfléchies, absorbées et transmises.

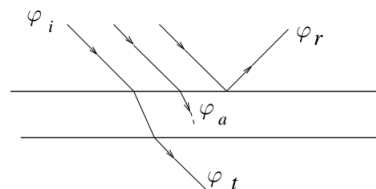


FIGURE 1.3 – Rayonnement reçu par un corps quelconque

$$\varphi_i = \varphi_a + \varphi_r + \varphi_t \quad (1.5)$$

À partir de l'équation 1.5, il est possible de définir les coefficients suivants :

$$\begin{aligned} \text{Le coefficient de réflexion} \quad \rho &= \frac{\varphi_r}{\varphi_i} \\ \text{Le coefficient d'absorption} \quad \alpha &= \frac{\varphi_a}{\varphi_i} \\ \text{Le coefficient de transmission} \quad \tau &= \frac{\varphi_t}{\varphi_i} \end{aligned} \quad (1.6)$$

La conservation de l'énergie à l'équilibre impose $\alpha + \tau + \rho = 1$, ce à quoi on peut ajouter les observations suivantes :

- $\alpha = 1$ pour les corps noirs.
- $\tau = 0$ pour les corps opaques.

Dans cette thèse, la propriété d'émission des corps est utilisée pour mesurer la température via l'utilisation d'une caméra thermique. La figure 1.4 introduit la notion de corps gris et réels.

Un corps gris a un comportement vis-a-vis du rayonnement similaire au corps noir à un facteur de proportionnalité près. Ce facteur, appelé émissivité est défini de manière totale et

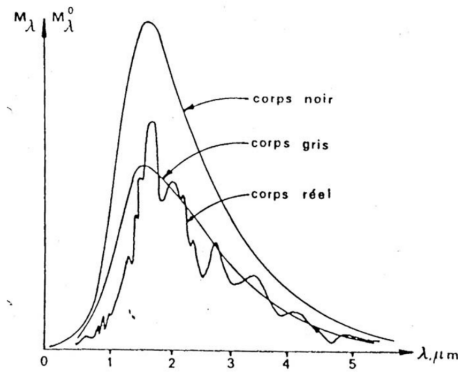


FIGURE 1.4 – Distribution énergétique des corps réels, gris et noirs

monochromatique (voire directionnelle mais ce principe n'est pas abordé ici) :

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{M_{\lambda}^o}$$

$$\epsilon = \frac{M}{M^o} = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} M_{\lambda}^o d\lambda}{\sigma_s T^4} \quad (1.7)$$

La loi du rayonnement de Kirchhoff, formulée en 1859 par Gustav Robert Kirchhoff, définit à l'équilibre thermique l'égalité entre l'absorptivité monochromatique, directionnelle, à température donnée $\alpha_{\lambda, O_x, T}$ et l'émissivité monochromatique, directionnelle, à température donnée $\epsilon_{\lambda, O_x, T}$:

$$\epsilon_{\lambda, O_x, T} = \alpha_{\lambda, O_x, T} \quad (1.8)$$

Cette loi implique qu'un bon émetteur est un bon absorbeur. Dans le cas du corps gris, l'émissivité ne variant pas avec la longueur d'onde $\epsilon_{\lambda} = \epsilon$, la relation de Kirchhoff s'exprime alors pour l'émissivité totale $\epsilon = \alpha$. Ainsi, le flux électromagnétique émis par un corps gris s'exprime :

$$\varphi = \epsilon \sigma_s T^4 \quad (1.9)$$

À l'image de l'équation 1.4, il est possible de calculer le bilan radiatif de surface d'un corps gris "éclairé" par un corps noir, et donc le flux net à la surface du corps gris :

$$\varphi = \underbrace{\sigma_s T_o^4}_{\text{émission corps noir}} - \overbrace{\left[\underbrace{\epsilon \sigma_s T^4}_{\text{émission}} - \underbrace{(1 - \epsilon) \sigma_s T_o^4}_{\text{réflexion}} \right]}^{\text{Radiosité du corps gris}}$$

$$\varphi = \epsilon \sigma_s (T_o^4 - T^4) \quad (1.10)$$

Pour les corps réels, la loi de Kirchhoff n'est applicable que pour les facteurs monochromatiques, en revanche l'étude du rayonnement d'un corps réel peut être effectuée sur une partie du spectre où l'hypothèse du corps gris est vérifiée. Ainsi pour une bande spectrale donnée, lorsque la loi du rayonnement diffus est respectée (cf loi de Lambert, équation 1.1), il est possible de poser $\epsilon(T) \approx a(T)$. L'équation 1.10 devient alors applicable dans le domaine infrarouge pour différentes applications. Elle est notamment utilisée pour traduire le flux net de rayonnement

infrarouge échangé entre un objet et son environnement.

Dans la section suivante, la méthode de mesure du rayonnement émis par un objet est présentée.

1.1.2 Mesure du rayonnement

Les sections précédentes ont permis d'introduire la notion de flux électromagnétique. Ce type d'échange énergétique peut être relié à la température par l'intermédiaire de l'équation 1.10. Pour un corps réel approché par un corps gris dans un intervalle de longueurs d'ondes infrarouges (bandes spectrales), la mesure de la radiosité, ou de la luminance apparente, de l'objet considéré permet alors d'exprimer la température de surface de ce même objet.

Différents types de capteurs permettent la mesure du rayonnement. Le tableau 1.3 présente une illustration par bandes spectrales des différents types de capteurs permettant la mesure du rayonnement dans le domaine infrarouge [Miller, 1994, Friedman et Miller, 2004]. Ces différents cap-

Classement	Longueur d'onde	Capteur utilisé
Infrarouge proche	$0.7 - 1\mu m$	fin de réponse de l'œil humain, détecteurs d'arséniure d'indium-gallium (InGaAs)
Infrarouge ondes courtes SWIR\Bande I	$1 - 3\mu m$	détecteurs au germanium et In-GaAs
Infrarouge ondes moyennes MWIR\Bande II	$3 - 5\mu m$	détecteurs au tellurure de mercure-cadmium (HgCdTe), Séléniure de plomb (PbSe) et InSb
Infrarouge ondes longues LWIR\Bande III	$7 - 14\mu m$	détecteurs microbolometre (VOx) et HgCdTe
Infrarouge très longues ondes	$12 - 30\mu m$	détecteurs en silicium

TABLE 1.3 – Type de capteur infrarouge

teurs permettent la mesure du rayonnement électromagnétique dans une bande spectrale donnée. L'équation 1.10 implique que la mesure est moins perturbée par la réflexion lorsque l'objet a une émissivité élevée. Les phénomènes observés dans cette thèse sont mesurés à l'aide de caméras thermiques à capteurs microbolométriques (caméras situées bandes III dans le tableau 1.3).

1.2 Contrôle non destructif par thermographie infrarouge

1.2.1 Rappels sur la conduction thermique au sein des corps

Le contrôle non destructif (CND) par thermographie infrarouge active repose sur la mesure de la température au cours du temps sur la surface de l'objet étudié (cf. rayonnement thermique). Le CND par ThIr repose sur la détermination de zones ayant un comportement non homogène au sein du système étudié au cours du temps. Dans le cas de matériaux opaques, la température de surface est en partie conditionnée par la conduction thermique, l'équation de la chaleur 1.11

permet de modéliser le phénomène de diffusion thermique au sein d'un domaine cartésien Ω au cours du temps et en l'absence de changement d'état :

$$\rho C \frac{\partial T(X, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + P \quad X \in \Omega \quad (1.11)$$

avec C la capacité thermique massique en $\text{J.kg}^{-1}.\text{°K}^{-1}$, ρ la masse volumique en kg.m^{-3} , k la conductivité thermique en $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, X la variable spatiale $X = \{x, y, z\}$ et P une éventuelle production interne de chaleur en W.m^{-3} . Les équations 1.12 et 1.13 présentent respectivement l'opérateur gradient et divergence apparaissant dans l'équation 1.11. Dans le cas où les propriétés ne dépendent pas de l'espace il est possible d'exprimer l'équation 1.11 à l'aide de l'opérateur laplacien défini équation 1.14 .

$$\nabla(.) = \begin{pmatrix} \frac{\partial.}{\partial x} \\ \frac{\partial.}{\partial y} \\ \frac{\partial.}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + \frac{\partial A}{\partial z} \quad (1.13)$$

$$\nabla \cdot \nabla(.) = \nabla^2 = \frac{\partial^2.}{\partial x^2} + \frac{\partial^2.}{\partial y^2} + \frac{\partial^2.}{\partial z^2} \quad (1.14)$$

Mise en évidence en 1811 par Joseph Fourier [Fourier, 1822], l'équation de la chaleur 1.11 rend compte de l'évolution de la température au sein d'un corps par conduction thermique, elle traduit la loi de conservation de l'énergie (cf. premier principe de la thermodynamique). La conduction thermique caractérise le transport d'énergie dans un milieu par vibration des porteurs élémentaires, ici les atomes et molécules [Taine *et al.*, 2008]. Dans le cas où le système Ω est solide et non transparent, la conduction thermique est le seul mode de transfert de chaleur au sein du milieu. L'expression différentielle de l'équation 1.11 découle des travaux de Jean Baptiste Biot qui en 1804 formule mathématiquement la densité de flux thermique de conduction, équation 1.15.

$$\varphi = k \nabla T \quad X \in \Omega \quad (1.15)$$

L'application du premier principe et un bilan d'énergie conduisent à la formulation générale du transfert thermique par conduction au sein d'un milieu, équation 1.11. Bien qu'établie mathématiquement par Jean Baptiste Biot l'équation 1.15 est démontrée expérimentalement par Joseph Fourier en 1821, cette relation est alors nommée loi de Fourier. Cette loi met en évidence la proportionnalité entre la densité flux de chaleur φ en Wm^{-2} et le gradient de température au sein du milieu, elle traduit l'irréversibilité du phénomène de transfert thermique (cf. second principe de la thermodynamique), et la propension du transfert thermique par conduction à s'effectuer d'une zone chaude vers une zone froide.

La loi de Fourier permet d'exprimer le flux de conduction en tout point du corps Ω . Le flux thermique de conduction peut être exprimé sur la frontière $\partial\Omega$ prenant en compte l'ensemble des perturbations extérieures au système, suivant :

$$\varphi = k\nabla T \cdot n = \underbrace{h(T_{fluide} - T_{paroi})}_{\text{Flux Convectif à la paroi}} + \underbrace{\epsilon\sigma_s(T_{environnement}^4 - T_{paroi}^4)}_{\text{Flux rayonnant à la paroi}} + \varphi_0 \quad X \in \partial\Omega \quad (1.16)$$

où n est la normale sortante du domaine, cette équation représente la condition limite de Robin à la paroi $\partial\Omega$ du système. Le flux convecto-radiatif peut se décomposer en terme de transfert par rayonnement entre cette même surface et l'environnement et en terme de transfert par convection entre un fluide et la surface de l'objet solide [Taine *et al.*, 2008]. Dans le cas d'un fluide ou d'un gaz, la présence d'un gradient thermique implique une différence de masse volumique, et donc une différence de la poussée d'Archimède amenant à l'apparition d'un phénomène de transport. La vibration thermique microscopique (conduction) devient alors négligeable devant le transport de matière à l'échelle macroscopique. Ce phénomène est traduit à la surface du système par le coefficient d'échange convectif h en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Le flux φ_0 est lui l'expression d'un apport direct d'énergie à la surface du système. Si ce flux est émis de manière artificielle et contrôlée on parle alors de thermographie active. Dans le cas contraire (*eg.* flux solaire), on parle de thermographie passive.

1.2.2 Méthodes de contrôle non destructif par thermographie infrarouge

Après avoir posé les bases théoriques du principe de mesure et du transfert thermique au sein des corps solides, un état de l'art sur les différentes méthodes de contrôle non destructif par thermographie infrarouge est proposé. Ces méthodes consistent en l'étude de l'évolution de la température d'un système soumis à une excitation thermique connue. Il en résulte la détection et/ou la caractérisation de zones où un changement de propriétés induit une variation du champ de température en surface au cours du temps.

Les méthodes de contrôle non destructif ont évolué avec l'avènement des matériaux composites modernes (cf annexe IV). Comme nous le verrons plus tard, ces matériaux offrent de nombreux avantages d'un point de vue mécanique. En revanche ces gains ne sont obtenus que par l'intermédiaire d'un processus de fabrication "*en une fois*" rendant difficile la détection de défauts dus à de tels procédés de fabrication (par exemple la pultrusion ou production par autoclave peuvent induire des délaminations au sein du matériau). Les pièces fabriquées pouvant être de tailles imposantes, il est rapidement devenu nécessaire de pouvoir contrôler la bonne facture du matériau sans pour autant le détériorer. Dans le cadre des méthodes thermiques, c'est la propriété qu'a un éventuel défaut à modifier localement ou globalement la température de l'objet qui est utilisée pour le caractériser. Plus précisément, la thermographie infrarouge comme méthode de mesure étudie l'impact du défaut sur l'évolution temporelle de la température de surface du système. Les méthodes de CND-ThIr peuvent être réparties en fonction de la configuration de mesure ainsi que de la nature et la forme de l'excitation utilisée. Lorsque l'excitation thermique du système (active ou non) est normale à une des surfaces du système, il est alors possible de différencier deux méthodes de mesure, la transmission et la réflexion[†], figure 1.5. Le choix de la méthode est guidé aussi bien par l'objectif de la mesure que par les conditions expérimentales. La mesure par transmission permet l'évaluation directe du temps caractéristique de diffusion thermique dans la matière, $t_{diff} = \frac{L^2}{\alpha}$ en s qui peut être utilisé pour remonter aux propriétés thermiques de l'échantillon [Maldague, 2001, Lascoup *et al.*, 2011]. En revanche, dans le cas de matériaux épais pour lesquels le temps de mesure raisonnable est

[†]la notion de réflexion n'a ici aucun rapport avec la réflexion du rayonnement infrarouge

plus faible que le temps caractéristique de diffusion on lui préférera la mesure par réflexion, de même lorsque les conditions expérimentales ne permettent pas de placer le dispositif de mesure sur la face opposée à l'excitation.

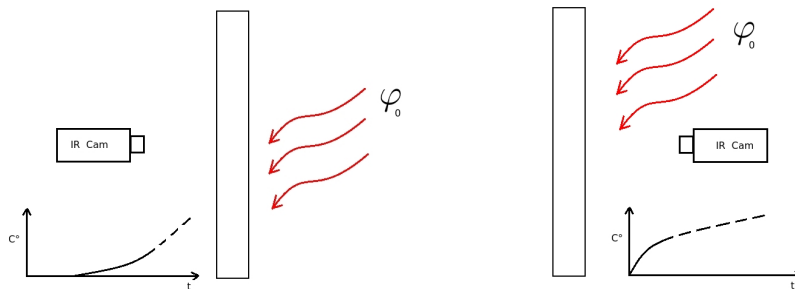


FIGURE 1.5 – Méthodes de mesure - Transmission à gauche et Réflexion à droite

La détection et caractérisation du défaut peuvent être basées sur l'analyse des thermogrammes ainsi que sur la différence entre une zone considérée saine de l'échantillon et une zone défectueuse (ie. contraste thermique) [Maldague, 2001, Krapez *et al.*, 1994]. Tout comme la méthode de mesure, le choix de l'excitation est intimement lié aux conditions expérimentales et aux paramètres recherchés. On peut identifier dans la communauté du CND-ThIr un ensemble d'excitations différentes, aussi bien sur la forme que sur la méthode de chauffage du spécimen [Czarnetzki et Roetzel, 1995, Ibarra-Castanedo *et al.*, 2009]. L'éventail non exhaustif d'excitations possibles via le pilotage en forme de chauffage par rayonnement infrarouge, tableau 1.5, fait apparaître des méthodes impulsionnelles, échelons, créneaux ou encore la modulation thermique. Utilisant une distribution de Dirac comme excitation [Parker *et al.*, 1961, Degiovani, 1986, Balageas *et al.*, 1987], la méthode impulsionnelle permet un diagnostic rapide, et est notamment adaptée aux matériaux fins [Mayr et Hendorfer, 2010]. En revanche, la résolution de la méthode est dépendante de l'énergie appliquée au spécimen [Maldague, 2001], cette particularité pouvant engendrer des détériorations du matériau cible. La modulation thermique utilise la formulation harmonique de l'équation 1.11, [Carslaw. et Jaeger, 1959]. La profondeur de pénétration du flux thermique de surface dépendant uniquement de la fréquence d'excitation, cette méthode a l'avantage de modérer la quantité d'énergie déposée à la surface du spécimen [Busse, 1980, Lascoup *et al.*, 2013, Perez et Autrique, 2009, Autrique *et al.*, 2009]. La formulation harmonique de l'équation 1.11 impose que le système soit observé en régime établi (composante continue stabilisée). Le temps de montée en régime étant proportionnel à la profondeur et à la fréquence il peut alors être un frein expérimental. Permettant d'obtenir un faible ratio signal sur bruit [Vavilov *et al.*, 1998], l'excitation créneau permet d'étudier à la fois la montée en régime et la relaxation thermique [Plotnikov et Winfree, 2000, Ibos *et al.*, 2006, Feuillet *et al.*, 2012]. Des profondeurs importantes de défauts peuvent alors être soumises au diagnostic bien que le temps de chauffe ait des effets significatifs sur la résolution de la méthode et l'énergie déposée à la surface de l'échantillon. Les tableaux 1.5 et 1.4 dressent une liste non exhaustive des fonctions et sources d'excitation utilisées par la communauté du contrôle non-destructif par ThIr.

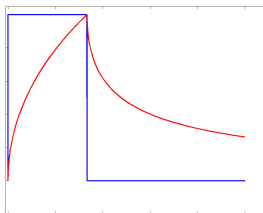
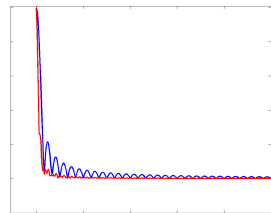
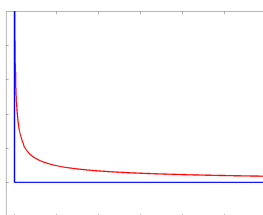
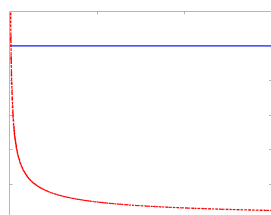
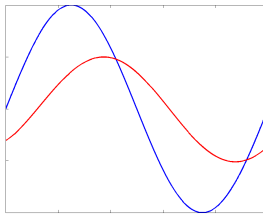
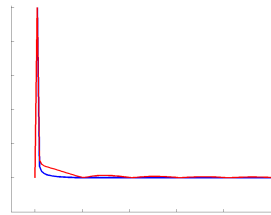
Fonctions	Caractéristiques	Domaine temporel Excitation Réponse modèle 1D	Domaine fréquentiel Excitation Réponse modèle 1D
Créneau	<p><i>Avantages</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Étude de la montée en température ainsi que de la relaxation thermique – Apte au diagnostic de systèmes épais <p><i>Inconvénient</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – $t_{chauffe} \gg$ temps caractéristiques du système (effets de diffusion 3D) 		
Dirac	<p><i>Avantages</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Excitation sur toute la bande fréquentielle – Diagnostic rapide – Relaxation thermique seule <p><i>Inconvénient</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Énergie pouvant détériorer l'intégrité du système 		
Périodique	<p><i>Avantages</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Apte au diagnostic de systèmes épais – Faible énergie <p><i>Inconvénient</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Mesure en régime établi (durée de la mesure) 		

TABLE 1.4 – Exemple de fonctions utilisées en contrôle non destructif par thermographie active – La réponse 1D est calculée pour un modèle semi-infini


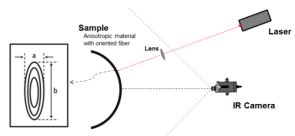


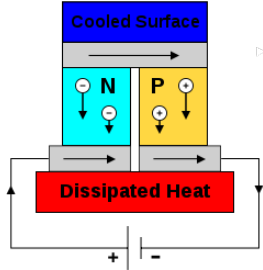
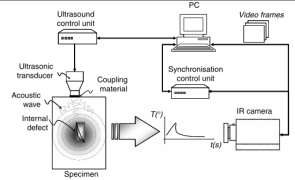
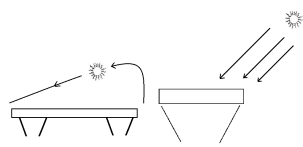
Méthodes	Caractéristiques	
Rayonnement thermique	<ul style="list-style-type: none"> – Excitation par flux thermique – Application à la surface – Large gamme de puissance – Alimentation électrique [Ibos <i>et al.</i> , 2006, Lascoup <i>et al.</i> , 2013, Feuillet <i>et al.</i> , 2012, Crinière <i>et al.</i> , 2014a, Theroux <i>et al.</i> , 2014]	
Laser	<ul style="list-style-type: none"> – Similaire à l'excitation par spot – Faible zone de contrôle – Large gamme de puissance et modulation en longueur d'onde – Sécurité problématique [Autrique <i>et al.</i> , 2007, Schlichting <i>et al.</i> , 2012, Fernandes et Maldague, 2014]	
Induction	<ul style="list-style-type: none"> – Courant induit par champ magnétique – Chauffe l'ensemble de l'échantillon – Échantillons ferromagnétiques seuls [Davies, 2007, Renil <i>et al.</i> , 2014]	
Micro-ondes	<ul style="list-style-type: none"> – Excite parties conductrices d'un échantillon – Localisation de barres d'aciers – Sécurité problématique – Dégradation du matériel de mesure possible [Brachelet <i>et al.</i> , 2014]	
Effet Pelletier	<ul style="list-style-type: none"> – Basée sur la thermoélectricité – Contrôle précis du refroidissement thermique – Nécessité de contact [Czarnetzki et Roetzel, 1995]	
Vibro-Thermographie	<ul style="list-style-type: none"> – Transfert de chaleur induit mécaniquement – Contact nécessaire [Piau <i>et al.</i> , 2008]	
Solaire	<ul style="list-style-type: none"> – Utilisation de l'excitation thermique naturelle – Aléas climatiques et perturbations – Constantes de temps longues – Permet le diagnostic de structures imposantes [Grinzato <i>et al.</i> , 1998, Obràn, 2009, Duffie et Beckman, 1991, Dumoulin <i>et al.</i> , 2013]	

TABLE 1.5 – Exemple de méthodes d'excitation en contrôle non destructif par thermographie active et passive

Le contrôle non destructif appliqué aux matériaux composites est un domaine largement étudié. Ces dernières années les matériaux composites ont été majoritairement utilisés dans les domaines du transport et du génie civil [Strong, 2002]. Naturellement les méthodes de CND-ThIr font face ici à de nouveaux domaines d'application. La section suivante introduit la méthode de réparation de structures de génie civil par collage de matériaux composites, puis expose le besoin d'une méthode de CND pour le diagnostic de ces réparations.

1.2.3 Méthodes de contrôle non destructif des structures réparées par collage composite

Avec l'augmentation du trafic routier et le vieillissement des infrastructures de transport, l'entretien de ces dernières est primordial [IFSTTAR, 2010]. Différentes méthodes de renforcement et réparation, par exemple la projection de béton, sont actuellement utilisées pour augmenter la capacité et la durabilité des infrastructures. Parmi celles-ci, le renforcement des structures béton par collage de matériaux composites suscite l'intérêt depuis presque deux décennies [Tang et Podolony, 1998]. Cette technique consiste à alterner les couches de matériaux composites (annexe IV) et de colle industrielle à la surface d'une zone définie. Bien que son utilité et sa mise en œuvre aient été démontrées, les différents matériaux composites (GFRP, CFRP) doivent être collés suivant une procédure rigoureuse [Aci, 2008, Afgc, 2011, FTG, 2001]. Cela implique que les opérateurs sur site soient formés pour assurer la durabilité et la qualité de la réparation. Garantir une épaisseur de colle constante sur de grandes longueurs, malgré des conditions de travail souvent difficiles, figure 1.6, est nécessaire à la bonne tenue des réparations effectuées.



FIGURE 1.6 – Collage du composite, vue en détail de la colle et aspect final - Crédit LRPC Autun France

Dans le cas où l'application de la couche de colle servant à fixer le composite sur la structure n'est pas parfaite, les délaminations résultantes sont alors instables et peuvent altérer le comportement mécanique de la réparation [Büyüköztürk et Tzu-Yang, 2006, Houhou *et al.*, 2014]. De plus, à la connaissance de l'auteur, aucune étude n'indique clairement la proportion de délaminage pouvant être considérée comme bénigne. Une procédure de suivi et contrôle des réparations est donc justifiée.

Entre les différentes techniques de contrôle de structures béton réparées par collage composite, plusieurs méthodes de contrôle qualitatif sont d'ores et déjà utilisées *in situ* [Manjunath, 2007, Ehrhart *et al.*, 2010], figure 1.7. On peut citer par exemple le sondage acoustique, l'utilisation du contraste thermique pour localiser les différents défauts [Maldague, 2001], ou encore

des méthodes de traitement d'images appliquées aux séquences infrarouges, par exemple l'analyse en composantes principales [Rajic, 2002, Ibarra-Castanedo *et al.*, 2009]. Ces différentes méthodes permettent de localiser des défauts, figure 1.7, elles sont cependant difficilement utilisables pour estimer par exemple le degré d'adhésion, ou encore caractériser finement l'éventuel défaut. L'obtention d'informations quantitatives sur les propriétés d'un éventuel défaut de collage apparaît être une nécessité. Le contrôle non destructif par ThIr de chaussées routières a déjà fait l'objet d'études [Dumoulin *et al.*, 2010b, Dumoulin *et al.*, 2011b] tandis que [Rhazi et Naar, 2005, Maierhofer *et al.*, 2006] analysent la faisabilité du contrôle de structures béton par thermographie infrarouge. D'autres études ont, quant à elles, permis des avancées dans le contrôle de structures réparées [Valluzzi *et al.*, 2009, Dumoulin *et al.*, 2010a, Dumoulin *et al.*, 2011c, Taillade *et al.*, 2012]. Enfin, les différentes méthodes de contrôle par ThIr sont sans contact et permettent un diagnostic en profondeur de défauts non débouchants.



FIGURE 1.7 – Sondage acoustique et contraste thermique - Crédit images LRPC Autun France

1.3 Synthèse

Ce chapitre a introduit le principe de la mesure de température par thermographie infrarouge ainsi que la diffusion thermique au sein des corps. Un état de l'art non exhaustif des méthodes de contrôle non destructif par thermographie infrarouge a aussi été réalisé. Enfin, le diagnostic de structures réparées par collage composite a été introduit, et après des premières analyses la thermographie infrarouge apparaît être une méthode permettant le diagnostic qualitatif et quantitatif des zones réparées. Ces systèmes multi-couches ont notamment besoin d'être diagnostiqués pour attester de la qualité du collage. En effet un défaut de collage altère significativement le comportement mécanique de la réparation et sa durabilité [Büyükoztürk et Tzu-Yang, 2006, Houhou *et al.*, 2014]. Bien que de multiples méthodes existent pour évaluer la qualité de collage des matériaux composites [Ehrhart *et al.*, 2010], l'état de l'art présenté dans ce chapitre montre que le CND par thermographie infrarouge autorise le diagnostic de matériaux épais, indépendamment des propriétés élastiques et mécaniques des matériaux composites (a contrario des méthodes ultra-sonores par ex.). De plus, la ThIr offre l'opportunité d'appliquer un modèle physique à chaque pixel de la séquence d'images thermiques et donc de fournir des informations qualitatives et quantitatives sur le système étudié. Il apparaît ainsi possible d'utiliser la ThIr pour la détection et la caractérisation de défauts n'influant pas encore sur le comportement mécanique de la réparation. Il est nécessaire de prendre aussi en compte les conditions dans lesquelles le diagnostic est effectué, les récentes évolutions des caméras thermiques permettent d'envisager l'utilisation de celles-ci ainsi que de leur dispositif de chauffage *in situ*.

La partie I de ce manuscrit (chapitres 2 à 4), expose différents travaux réalisés dans le cadre de cette thèse de doctorat [Crinière *et al.*, 2012, Crinière *et al.*, 2014a, Brouns *et al.*, 2014]. Une

première étude ayant abouti à la cartographie des propriétés thermophysiques d'un échantillon représentant un élément de structure réparée est présentée. La cartographie des propriétés est réalisée à l'aide d'une modélisation inverse basée sur un modèle de transfert thermique quadripolaire [Maillet *et al.*, 2000]. Une approche numérique utilisant les éléments finis ainsi que la méthode de l'état adjoint pour l'estimation de propriétés est également détaillée, cette dernière a conduit à l'estimation du volume défectueux au sein d'une matrice saine. Enfin, une discussion sur le dimensionnement du temps de chauffe est ensuite proposée.

Caractérisation thermophysique de systèmes multi-couches épais : De la détection à l'estimation de paramètres par approche quadripolaire

Ce chapitre est basé sur de récentes études [Valluzzi *et al.*, 2009, Dumoulin *et al.*, 2010a, Dumoulin *et al.*, 2011c, Taillade *et al.*, 2012, Crinière *et al.*, 2012, Crinière *et al.*, 2014a]. Il présente le développement de méthodes permettant d'assurer le contrôle non destructif de structures de génie civil réparées par collage composite, à l'aide d'une modélisation thermique quadripolaire [Maillet *et al.*, 2000]. Ce type de réparation donne naissance à des multi-couches épais à la surface de l'ouvrage. Il est important pour l'exploitant de la structure de fournir un diagnostic quantitatif de la réparation, ce diagnostic passe par la caractérisation de l'épaisseur de la couche de colle ainsi que des propriétés physiques d'un éventuel défaut (ie bulle d'air). Les systèmes considérés sont en régime transitoire. Ce régime de transfert thermique implique que le système est hors équilibre. Comme introduit au chapitre 1, l'objectif de cette section est le développement d'une procédure d'estimation de paramètres applicable en tous points de la séquence d'images infrarouges.

Les modèles utilisés sont détaillés et analysés, enfin des techniques d'inversion de modèles [Levenberg, 1944, Marquardt, 1963, Moré, 1977, Beck et Arnold, 1977] sont utilisées afin d'obtenir un contrôle quantitatif des structures de génie civil renforcées par collage de matériaux composites.

2.1 Modélisation thermique

2.1.1 Les quadripôles thermiques

Dans l'étude des systèmes multi-couches, l'équation de la chaleur, équation 1.11, peut se décomposer sur chacune des couches du système. Un phénomène de transfert thermique par conduction dans un domaine Ω unidimensionnel, composé de n couches d'épaisseurs e_i , aura

pour formulation à chaque couche i :

$$\frac{\partial T_i(x_i, t)}{\partial t} = \alpha_i \frac{\partial^2 T_i(x_i, t)}{\partial x_i^2}, \quad \alpha_i = \frac{k_i}{\rho_i C_i}, \quad x_i \in [0; e_i] \in \Omega \quad (2.1)$$

où α_i et x_i sont respectivement la diffusivité thermique et la variable spatiale de chaque couche i en m.s^{-2} et m . Le couplage entre les couches est réalisé par continuité de flux et égalité de température d'interface, l'équation 2.2 indique les conditions limites et initiales du système. Notez que dans cette partie le système est considéré à l'équilibre thermique et à une température initiale constante en tout point du système lorsque $t = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{ll} -k_i \frac{\partial T_i(0, t)}{\partial x_i} = \varphi_1(t) & i = 1 \\ -k_i \frac{\partial T_i(0, t)}{\partial x_i} = -k_{i-1} \frac{\partial T_{i-1}(e_{i-1}, t)}{\partial x_{i-1}} & \forall i \in \llbracket 2; n \rrbracket \\ T_i(0, t) = T_{i-1}(e_{i-1}, t) & \forall i \in \llbracket 2; n \rrbracket \\ -k_i \frac{\partial T_i(e_n, t)}{\partial x_i} = \varphi_{e_n}(t) & i = n \\ T_i(x_i, 0) = T_{init} & \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket, x_i \in [0, e_i] \end{array} \right. \quad (2.2)$$

avec k_i la conductivité thermique de la couche i , φ_1 et φ_{e_n} les densités de flux thermiques aux frontières du système et T_{init} la température initiale du système. Il existe de nombreuses méthodes numériques et analytiques pour résoudre ce type de système. Les solutions analytiques permettent d'obtenir une solution continue du problème, de plus l'analyse du système permet l'étude des grandeurs physiques propres au domaine d'étude. En revanche, l'étude des multi-couches peut faire apparaître des solutions analytiques denses et peu flexibles vis-à-vis du nombre de couche [Araki *et al.*, 1992, Osiander, 1998]. La problématique détaillée chapitre 1 expose la nécessité de l'utilisation d'une méthode flexible et rapidement adaptable aux caractéristiques du domaine. En outre, la thermographie infrarouge comme méthode de mesure implique le découpage en un nombre conséquent de pixels. Pour résumer la méthode se doit d'être aisément adaptable aux caractéristiques du système, rapide et si possible applicable indépendamment à chaque pixel de la zone de mesure.

Ainsi afin de répondre à la problématique, une approche par modèle thermique quadripolaire [Maillet *et al.*, 2000] est étudiée. Issus des travaux du mathématicien allemand Franz Belevitch dans les années 1920 [Belevitch, 1962], et généralisés aux problèmes de transfert thermique dans les années 1960 [Carslaw. et Jaeger, 1959], les quadripôles permettent de formaliser un problème de transfert thermique de façon explicite et de le résoudre à l'aide de transformées intégrales ; transformées qui ont l'avantage de simplifier l'équation aux dérivées partielles (EDP), équation 2.1, en une équation différentielle ordinaire (EDO), équation 2.5. Dans cette étude la transformée de Laplace est utilisée [Laplace, 1814], introduite en 1814 par Pierre Simon de Laplace, elle permet entre autres de traiter les fonctions non intégrables telles que l'échelon. L'intérêt de la méthode quadripolaire est qu'elle formalise analytiquement des problèmes multi-couches. Avant tout, il est nécessaire de définir θ la température dans le domaine de Laplace, équation 2.3 et $\tilde{\varphi}$ transformée de la densité de flux équation 2.4.

$$\theta(x, p) = \int_0^\infty (T(x, t) - T_{init}) \exp^{-pt} dt \quad (2.3)$$

$$\tilde{\varphi}(x, p) = \int_0^{\infty} \varphi(x, t) \exp^{-pt} dt \quad (2.4)$$

où p est la variable de Laplace. La transformée de Laplace \mathcal{L} d'une dérivée fait apparaître la condition initiale de la variable transformée $\mathcal{L}\left\{\frac{dT}{dt}\right\} = p\theta(p) - T_{init}$. Pour éviter l'ajout d'un terme dans le système à résoudre, θ est donc la transformée de Laplace de la température à laquelle est soustraite la valeur initiale. Après transformation l'équation 2.1 transformée devient l'équation 2.5

$$p\theta_i = \alpha_i \frac{d^2\theta_i}{dx_i^2} \quad (2.5)$$

et les conditions limites et initiales, équation 2.2, sont transformées :

$$\left\{ \begin{array}{ll} -k_i \frac{d\theta_i(0, p)}{dx_i} = \tilde{\varphi}_1(p) & i = 1 \\ -k_i \frac{d\theta_i(0, p)}{dx_i} = -k_{i-1} \frac{d\theta_{i-1}(e_{i-1}, p)}{dx_{i-1}} & \forall i \in \llbracket 2; n \rrbracket \\ \theta_i(0, p) = \theta_{i-1}(e_{i-1}, p) & \forall i \in \llbracket 2; n \rrbracket \\ -k_i \frac{d\theta_i(e_i, p)}{dx_i} = \tilde{\varphi}_{e_n}(p) & i = n \\ \theta_{init} = 0 & \end{array} \right. \quad (2.6)$$

L'équation 2.5 admet pour solution à chaque couche i l'équation

$$\theta(x_i, p) = C_1 \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} x_i + C_2 \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} x_i \quad \forall i \quad x_i \in [0; e_i], p \in \mathbb{C} \quad (2.7)$$

où C_1 et C_2 sont des constantes définies à l'aide des conditions limites, équation 2.6. Après développement [Carslaw. et Jaeger, 1959, Maillat *et al.*, 2000] il est possible de définir chaque couche $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$ comme un quadripôle prenant en entrée le couple $\llbracket \theta_{e_0}; \tilde{\varphi}_{e_0} \rrbracket$, respectivement la température et la densité de flux en $x_i = 0$ et en sortie $\llbracket \theta_{e_i}; \tilde{\varphi}_{e_i} \rrbracket$ la température et la densité de flux en $x_i = e_i$:

$$\begin{pmatrix} \theta_{e_0} \\ \tilde{\varphi}_{e_0} \end{pmatrix} = M_i \begin{pmatrix} \theta_{e_i} \\ \tilde{\varphi}_{e_i} \end{pmatrix}$$

$$M_i = \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i & \frac{1}{\sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} k_i} \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i \\ \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} k_i \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i & \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

il est possible de représenter une couche avec l'analogie quadripolaire, figure 2.1.

Une des propriétés remarquables des quadripôles est que la représentation de n systèmes mis bout à bout (ici la présence de plusieurs couches) consiste en une formulation quadripolaire composée de n multiplications matricielles. L'équation 2.5 et ses conditions limites, équation 2.6, deviennent en formulation quadripolaire l'équation 2.9.

$$\begin{pmatrix} \theta_{e_0} \\ \tilde{\varphi}_{e_0} \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^{i=n} M_i \begin{pmatrix} \theta_{x_{e_n}} \\ \tilde{\varphi}_{x_{e_n}} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

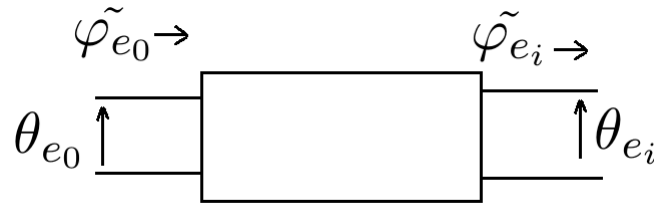


FIGURE 2.1 – Schématisation du système quadripolaire

Bien qu'utile pour la modélisation de systèmes multi-couches, la formulation quadripolaire n'en reste pas moins exprimée dans le domaine de Laplace. Pour les besoins de l'étude, le modèle est exprimé dans le domaine temporel. Une autre voie de recherche qui consisterait à résoudre le système dans le domaine de Laplace n'est pas abordé dans ce manuscrit. La section suivante rappelle le principe de l'inversion de la transformée de Laplace.

2.1.2 Inversion de la transformée de Laplace

Les transformations intégrales quelles qu'elles soient ont la propriété de pouvoir transformer une équation aux dérivées partielles (EDP) en une équation différentielle ordinaire (EDO). En revanche, elles doivent être inversées pour revenir dans le domaine d'origine. Si certaines transformées intégrales peuvent être inversées par intégration (cf. transformation de Fourier), l'inversion analytique de la transformée de Laplace s'effectue dans le plan complexe et nécessite la définition de borne γ :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma-j\infty}^{\gamma+j\infty} \tilde{f}(p) \exp^{pt} dp \quad (2.10)$$

où γ est choisi de sorte que l'intégrale soit convergente et doit être supérieur aux parties réelles de toutes les singularités de $\tilde{f}(p)$. Bien qu'il n'existe pas de forme générale pour l'inversion de la transformée de Laplace, des tables recensent pour un certain nombre de fonctions usuelles les expressions analytiques de leurs transformations et inverses [Erdelyi, 1954]. Ainsi, l'inversion d'une fonction exprimée dans le domaine de Laplace peut se réaliser en décomposant la fonction en produits et/ou sommes de fonctions inversibles par les tables. Les multiplications des matrices quadripolaires font apparaître, après développement, des expressions complexes où l'inversion dans le domaine temporel par décomposition en fonctions simples peut être difficile en particulier dans le cas d'un système présentant un nombre de couches élevé. Pour inverser de telles fonctions sans utiliser les tables de transformées ou l'intégration dans le plan complexe, il existe différents algorithmes d'inversion numérique de la transformée de Laplace [Davies et Martin, 1979, Honig et Jirdes, 1984, Taiwo *et al.*, 1995]. Deux d'entre eux sont détaillés ici.

Méthode de Stehfest : À l'aide d'une somme finie de coefficients, l'algorithme de Stehfest fournit une bonne approximation de la transformée inverse de Laplace [Stehfest, 1970] :

$$f(t) = \frac{\ln(2)}{t} \sum_{i=1}^N V_i \tilde{f}(p) \quad (2.11)$$

où $p = \frac{i \ln(2)}{t}$ et V_i représente les coefficients de Stehfest. Le nombre de coefficients varie de 10 à 20 pour une valeur en simple ou double précision, le tableau 2.1 présente les coefficients simple précision.

$V_1 = 0.0833333333$	$V_6 = -236957.5129$
$V_2 = -32.08333333$	$V_7 = 375911.6923$
$V_3 = 1279.000076$	$V_8 = -340071.6923$
$V_4 = -15623.66689$	$V_9 = 164062.5128$
$V_5 = 84244.16946$	$V_{10} = -32812.50256$

TABLE 2.1 – Coefficients de Stehfest simple précision

L'algorithme d'inversion numérique de Stehfest a l'avantage d'être simple à mettre en place. Par contre, outre son temps d'exécution assez long, cet algorithme ne peut être utilisé que sur des fonctions monotones.

Méthode de DeHoog : L'algorithme de DeHoog [Dehoog *et al.*, 1982] est basé sur la transformée de Fourier.

Dans un premier temps, la méthode d'inversion de la transformée de Laplace à l'aide des séries de Fourier est présentée :

$$f(t) = \frac{\exp^{ct}}{t_{max}} \left[\frac{\tilde{f}(c)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\operatorname{Re} \left[\tilde{f}(c + j\omega_k) \right] \cos(\omega_k t) - \operatorname{Im} \left[\tilde{f}(c + j\omega_k) \right] \sin(\omega_k t) \right) \right] \quad (2.12)$$

En pratique, la somme infinie est calculée pour un minimum de 100 termes. De plus, deux paramètres doivent être fixés pour chaque inversion, c et t_{max} . Ces paramètres doivent respecter :

$$\exp^{-2ct_{max}} \tilde{f}(2t_{max}) \approx 0$$

Cette méthode bien que coûteuse en temps de calcul, a donné naissance à un ensemble de méthodes basées sur la transformée de Fourier :

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \exp^{\gamma t} \int_0^{\infty} \operatorname{Re}\{\tilde{f}(p)\} \exp^{j\omega t} d\omega \quad (2.13)$$

avec $p = \gamma + j\omega$. Applicable sur des fonctions monotones, l'algorithme de DeHoog [Dehoog *et al.*, 1982] est basé la transformée de Fourier rapide (FFT) [Cooley et Tukey, 1965] en utilisant une règle trapézoïdale [Sheng *et al.*, 2011]. Cette propriété fait de l'algorithme de DeHoog une méthode d'inversion rapide de la transformée de Laplace. En revanche, étant basée sur les séries de Fourier la méthode génère des oscillations de Gibbs si la fonction n'est pas dérivable en tout point. Cette observation sera discutée dans la suite de ce chapitre.

Ces deux méthodes sont communément utilisées, la méthode de Stehfest [Stehfest, 1970] pour sa facilité d'emploi et la méthode de DeHoog [Dehoog *et al.*, 1982] pour sa rapidité.

Cette étude porte sur l'analyse du transfert thermique au sein d'un système multi-couches en régime transitoire, où les fonctions d'excitations peuvent être non monotones. De plus, afin d'obtenir des informations quantitatives sur le système, un modèle inverse [Beck et Arnold, 1977] est utilisé. Ceci implique l'utilisation de méthodes itératives où le modèle quadripolaire est résolu un grand nombre de fois. Compte tenu de ces informations, l'algorithme de DeHoog sera utilisé dans la suite des travaux présentés.

Les bases de la modélisation thermique ont été exposées. La section suivante introduit la procédure de contrôle non destructif de systèmes multi-couches épais. Un premier modèle thermique est détaillé et analysé.

2.2 Analyse du modèle thermique

L'étude porte ici sur le modèle quadripolaire direct présenté équation 2.9, exprimé dans le domaine temporel à l'aide de l'inversion numérique de la transformée de Laplace. Un des objectifs de ce chapitre est de comparer le comportement de la procédure de contrôle vis-à-vis de deux excitations transitoires, la distribution de Dirac et l'excitation créneau. Dans cette section l'étude porte sur la comparaison du modèle quadripolaire avec des solutions empiriques [Carslaw. et Jaeger, 1959], l'impact de l'algorithme de DeHoog [Dehoog *et al.*, 1982] sur les fonctions non monotones et les possibles reformulations de ce problème de transfert thermique.

2.2.1 Solutions semi-infinies et correction de l'erreur numérique

Dans un premier temps, le modèle est confronté aux solutions analytiques semi-infinies existantes [Carslaw. et Jaeger, 1959]. Les équations 2.14 et 2.15 présentent les solutions analytiques 1D, exprimées à la surface d'un solide semi-infini et soumis à une densité de flux direct $\varphi_0(t)$ représentant une excitation échelon et une distribution de Dirac.

$$T_{ech}(t) = \frac{\varphi_0}{b} \left(2\sqrt{\frac{t}{\pi}} \right) + T_{init} \quad (2.14)$$

$$T_{dirac}(t) = \frac{Q_0}{b\sqrt{\pi t}} + T_{init} \quad (2.15)$$

avec b l'effusivité thermique, Q_0 l'énergie du Dirac et φ_0 la fonction échelon. La solution semi-infinie d'un système soumis à une excitation créneau n'est ici pas présentée. La linéarité en flux de l'équation 1.11 autorise l'utilisation du principe de superposition*, ainsi l'étude d'un système soumis à un un créneau se déduit des solutions précédentes. Afin de comparer les solutions, le modèle quadripolaire, redéfini équations 2.16 et 2.17, est résolu pour $n = 1$, $\varphi_1 = \varphi_0$ et e_n suffisamment grand devant le temps d'observation (cf chapitre 1). De plus une condition adiabatique $\varphi_{e_n} = 0$ est appliquée.

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^{i=n} M_i \begin{pmatrix} \theta_{e_n} \\ \tilde{\varphi}_{e_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{e_n} \\ \tilde{\varphi}_{e_n} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

$$T(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{A\tilde{\varphi}_1 - D\tilde{\varphi}_{e_n}}{C} + B\tilde{\varphi}_{e_n} \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{A\tilde{\varphi}_1}{C} \right\} \quad (2.17)$$

Les modèles présentés équations 2.14-2.17 sont soumis à une densité de flux surfacique $\varphi = 2000 \text{ W.m}^{-2}$ pour l'échelon et une énergie de $Q_0 = 640000 \text{ J}$ pour le Dirac. La figure 2.2 présente les écarts entre le modèle quadripolaire et les solutions analytiques.

L'analyse de la figure 2.2 montre que l'erreur entre le modèle et les solutions analytiques tend vers une constante faible. Une étude aux temps courts apparaît nécessaire pour proposer une correction du modèle quadripolaire. Le théorème de la valeur initiale et finale, présenté

*Principe de superposition : « Diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre » René Descartes, *Discours de la méthode*, 1637

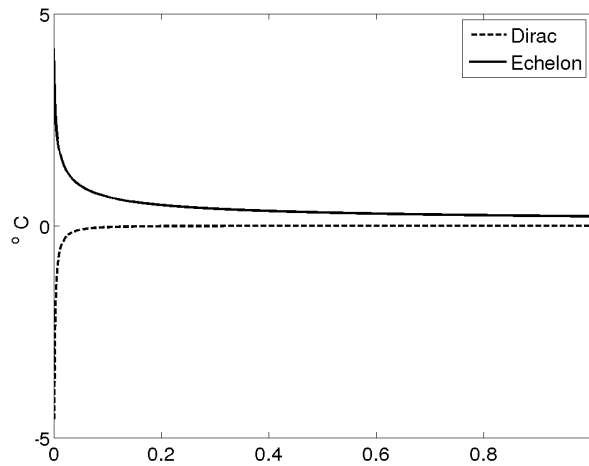


FIGURE 2.2 – Erreur entre les solutions semi-infinies et le modèle quadripolaire

équation 2.18 indique que l'étude aux temps courts d'une fonction temporelle peut être réalisée sur sa transformée de Laplace quand $p \rightarrow \infty$.

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) &= \lim_{p \rightarrow 0} p \tilde{f}(p) \\ \lim_{t \rightarrow 0} f(t) &= \lim_{p \rightarrow \infty} p \tilde{f}(p) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Grâce à ce théorème et en admettant que le modèle vérifie :

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) \approx \lim_{t \rightarrow 0} \int_0^t f(u) du \quad (2.19)$$

la solution aux temps courts du modèle quadripolaire [Maillet *et al.*, 2000] est :

$$\theta_1|_{p \rightarrow \infty} \simeq \frac{\varphi_m}{b\sqrt{p}} \implies \mathcal{L}(g(t)) \quad (2.20)$$

où $g(t)$ est la solution analytique présentée, équation 2.14. Le modèle et la solution analytique convergent mathématiquement aux temps courts, bien qu'une erreur soit tout de même présente, figure 2.2. En étudiant le comportement au temps court dans le domaine de Laplace des fonctions hyperboliques qui constituent les matrices du modèle quadripolaire, équation 2.21, il apparaît alors un problème numérique. En effet, le logiciel de calcul utilisé (Matlab®) ainsi que l'ordinateur ne peuvent pas traiter les grands nombres, encore moins une valeur infinie :

$$\begin{aligned} \lim_{p \rightarrow \infty} \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}e\right) &= \infty \\ \lim_{p \rightarrow \infty} \sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}e\right) &= \infty \end{aligned} \quad (2.21)$$

de plus l'algorithme de Dehoog fait génère lui aussi des erreurs numériques. Le modèle fait donc apparaître des valeurs très grandes pour les faibles pas de temps couplés à de grandes épaisseurs. $\theta(p)$ prend donc une valeur infinie. Cette erreur est fortement dépendante de l'échantillonnage temporel utilisé ainsi que des épaisseurs des couches traitées. Pour y remédier il est nécessaire de définir t_{en} le temps à partir duquel l'erreur numérique aux temps courts n'affecte plus le modèle. Prenant en compte l'équation 2.20 et le fait qu'en pratique t_{en} est inférieur au temps de diffusion de la première couche du modèle quadripolaire, il est alors possible de corriger aux temps courts le modèle quadripolaire à l'aide des solutions analytiques. L'équation 2.22 illustre cette méthode de correction pour l'excitation créneau.

$$T(t) = \frac{\varphi_0}{b} \left(2\sqrt{\frac{t}{\pi}} \right) + T_{init} \quad t \leq t_{en} \quad (2.22)$$

$$T(t) = \mathcal{L}^{-1} [\theta_1(p)] \quad t > t_{en}$$

Une fois la correction appliquée, l'erreur entre le modèle et les solutions analytiques est alors équivalente au seul bruit numérique, figure 2.3.

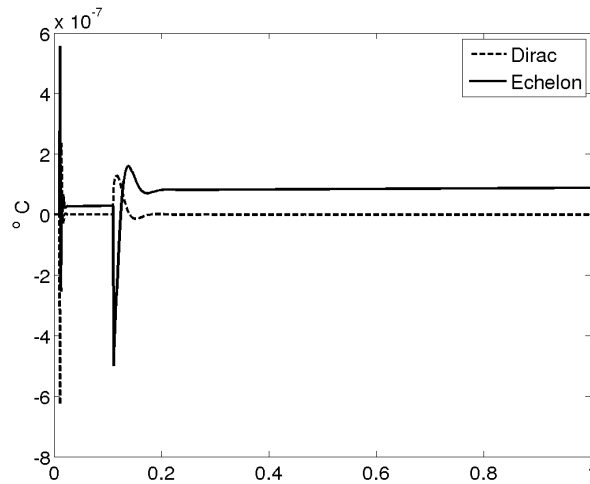


FIGURE 2.3 – Erreur entre les solutions semi-infinies et le modèle quadripolaire, après correction

La correction de l'erreur numérique due aux fonctions hyperboliques a fait l'objet de plusieurs études ces dernières années [Pailhes *et al.*, 2012, Krapez et Dohou, 2014]. La plupart d'entre elles sont basées sur la simplification et la factorisation en exponentielles des fonctions hyperboliques (notamment pour des problèmes de sources thermiques internes). Dans cette étude, les couches étant épaisses, la période de temps affectée par l'erreur numérique est alors faible devant le temps de diffusion de la première couche. La correction au temps court à l'aide de solutions semi-infinies sera retenue dans la suite des travaux présentés.

2.2.2 Comportement vis-à-vis de l'inversion de DeHoog

Le modèle est donc valide vis-à-vis des solutions analytiques. Le choix de l'inversion de DeHoog permet de prendre en compte des fonctions non monotones, typiquement la réponse du modèle à une excitation créneau. Par contre, étant donné que l'algorithme d'inversion de DeHoog est basé sur la transformée de Fourier, des phénomènes de Gibbs apparaissent peu avant le début de la relaxation thermique. C'est pourquoi la réponse du modèle à une excitation créneau est calculée à l'aide du principe de superposition (Somme de deux échelons). La figure 2.4 gauche présente les oscillations de Gibbs observées et leur correction à l'aide du théorème de superposition figure 2.4 droite.

2.2.3 Groupements de paramètres

L'équation de la chaleur en une dimension est originellement exprimée en d'une variable spatiale x , de la conductivité thermique k et de la diffusivité thermique α , équation 2.1. L'équation 2.23 présente la formulation quadripolaire d'un système mono-couche :

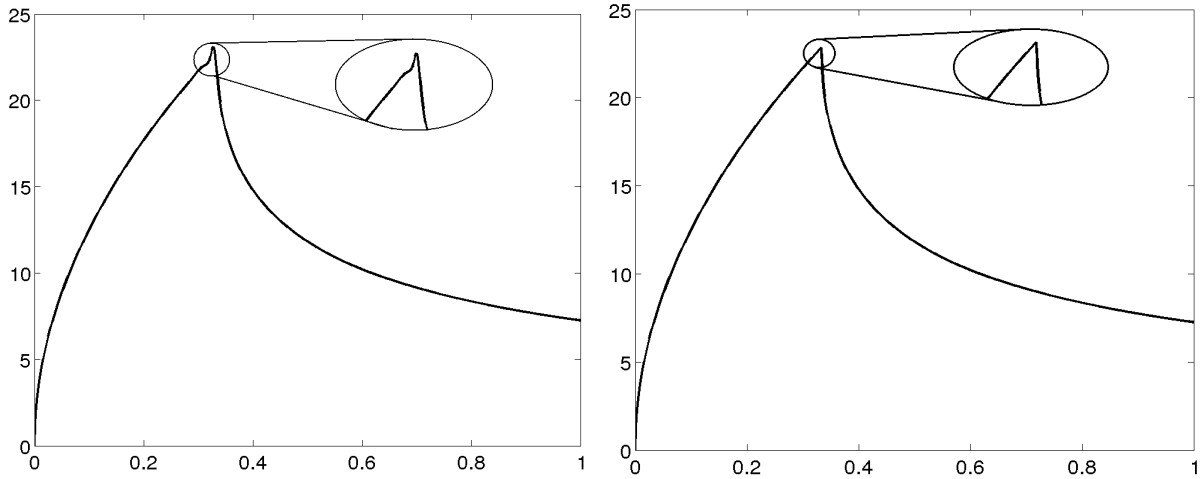


FIGURE 2.4 – Phénomène de Gibbs (gauche), principe de superposition (droite)

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \forall x \\ -k \frac{\partial T}{\partial x} = \varphi_1 \quad x = 0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial x} = \varphi_2 \quad x = e \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{pmatrix} \theta_{x=0} \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha}} e & \frac{1}{\sqrt{\frac{p}{\alpha}}} \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha}} e \\ \sqrt{\frac{p}{\alpha}} k \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha}} e & \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha}} e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{x=e} \\ \tilde{\varphi}_2 \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Cette formulation n'est pas figée. Le théorème de Vaschy-Buckingham [Vaschy, 1892, Buckingham, 1914] ou théorème Π , précédemment démontré en 1878 par le mathématicien français Joseph Bertrand [Bertrand, 1878], stipule qu'un système de n paramètres exprimés dans k unités fondamentales (SI) peut s'écrire avec $n - k$ paramètres adimensionnés. Ici les paramètres adimensionnés ne sont pas présentés, mais l'objectif est d'utiliser des groupements de paramètres permettant d'exprimer le modèle en au plus $n - 1$ variables. Le tableau 2.2 dresse l'ensemble des paramètres composés à partir du modèle 2.23 pour différents changements de variable spatiale, avec b l'effusivité thermique, R la résistance thermique et τ le temps de diffusion.

Variables	e	k	α
$\tau = \frac{\times 10^2}{\alpha}$	X		X
$b = \sqrt{\frac{\alpha}{k\rho C}}$		X	=
$R = \frac{e}{k}$	X	X	

TABLE 2.2 – Relations entre groupes de variables

Une lecture verticale du tableau 2.2 indique que suivant la propriété utilisée pour effectuer le changement de variable spatiale, deux groupes de paramètres apparaissent dans l'équation, ainsi pour tout changement de variable $x^* = f(\cdot)$, les groupements de paramètres restant dans l'équation sont présentés tableau 2.3

À partir du tableau 2.3 il est possible de représenter graphiquement les changements de variables possibles, figure 2.5.

Opérations sur x	Groupements
$x^* = f(x, e)$	$[\tau; R]$
$x^* = f(x, k)$	$[b; R]$
$x^* = f(x, \alpha)$	$[\tau; b]$

TABLE 2.3 – Groupements résultants d’un changement de variable spatiale

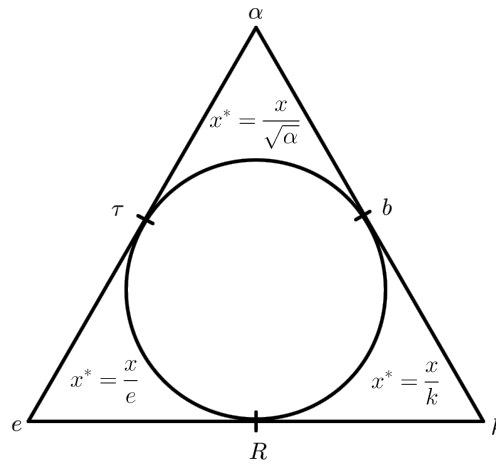


FIGURE 2.5 – Représentation graphique des changements de variable spatiale possibles

Le triangle (figure 2.5) représente les variables de base présentes en chacun des sommets. Les groupements de paramètres sont disposés sur un cercle unitaire. Ce cercle représente le fait qu’une fois un modèle exprimé à l’aide des groupements de paramètres, il n’est plus possible d’exprimer les variables initiales sans connaissance a priori. Les points tangents entre le triangle et le cercle représentent les paramètres qui apparaissent dans l’équation après un changement de variable utilisant la propriété située au sommet correspondant. Noter que l’utilisation du théorème \square aurait fait apparaître $f(\alpha, e, k) \rightarrow F(\pi_1)$, c-à-d l’expression d’un modèle avec un seul paramètre adimensionné, bien que ce ne soit pas l’objet de l’étude il est possible de supposer que le cercle unitaire présenté figure 2.5 représente ce paramètre adimensionné.

Après calculs il est possible d’exprimer trois nouvelles matrices quadripolaires, à commencer par l’équation 2.24 où $x^* = \frac{x}{k}$:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{b^2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^{*2}} \quad \forall x \\ -\frac{\partial T}{\partial x^*} = \varphi_1 \quad x^* = 0 \\ -\frac{\partial T}{\partial x^*} = \varphi_2 \quad x^* = R \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{pmatrix} \theta_{x^*=0} \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{p}bR & \frac{1}{b\sqrt{p}} \sinh \sqrt{p}bR \\ b\sqrt{p} \sinh \sqrt{p}bR & \cosh \sqrt{p}bR \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{x^*=R} \\ \tilde{\varphi}_2 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

l’équation 2.25 où $x^* = \frac{x}{e}$:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \frac{\partial^2 T}{\partial x^{*2}} \quad \forall x^* \\ -R \frac{\partial T}{\partial x^*} = \varphi_1 \quad x^* = 0 \\ -R \frac{\partial T}{\partial x^*} = \varphi_2 \quad x^* = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{pmatrix} \theta_{x^*=0} \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{p\tau} & \frac{1}{\sqrt{p\tau}R} \sinh \sqrt{p\tau} \\ \sqrt{p\tau}R \sinh \sqrt{p\tau} & \cosh \sqrt{p\tau} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{x^*=1} \\ \tilde{\varphi}_2 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

et l'équation 2.26 où $x^* = \frac{e}{\sqrt{\alpha}}$:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^{*2}} \quad \forall x^* \\ -b \frac{\partial T}{\partial x^*} = \varphi_1 \quad x^* = 0 \\ -b \frac{\partial T}{\partial x^*} = \varphi_2 \quad x^* = \sqrt{\tau} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{pmatrix} \theta_{x^*=0} \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{p\tau} & \frac{1}{b\sqrt{p}} \sinh \sqrt{p\tau} \\ b\sqrt{p} \sinh \sqrt{p\tau} & \cosh \sqrt{p\tau} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{x^*=\sqrt{\tau}} \\ \tilde{\varphi}_2 \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

La flexibilité de la modélisation quadripolaire face aux systèmes multi-couches autorise des formulations différentes à chaque couche. Le choix de telle ou telle formulation s'effectue alors en fonction de l'application choisie.

Dans la prochaine section la validité de l'hypothèse unidimensionnelle multi-couches est étudiée et une méthode d'analyse proposée.

2.3 Conditions de validité de l'hypothèse unidimensionnelle

Comme il a été détaillé au début de ce chapitre, un des objectifs de l'étude est de proposer un modèle applicable indépendamment à chaque pixel de la séquence d'images infrarouges. Cet objectif explique le choix d'une modélisation thermique unidimensionnelle. Cette section analyse la validité de cette hypothèse.

Les transferts thermiques au sein de systèmes multi-couches défectueux donnent lieu à un phénomène de propagation latérale de la chaleur aux abords du défaut. De fait, certaines études utilisent cette propriété à des fins de caractérisation du milieu et du défaut [Tralshawala *et al.*, 2007]. L'objectif n'est pas ici de proposer une méthode équivalente, mais de vérifier le domaine de validité d'un modèle thermique unidimensionnel utilisé pour caractériser un système tri-dimensionnel. Il existe une méthode permettant d'analyser la validité de l'hypothèse unidimensionnelle en fonction de la géométrie d'un défaut contenu au sein d'une matrice [Vavilov, 2010]. Cette méthode consiste à utiliser un indicateur défini par :

$$indicator = \frac{\max(\Delta T(\frac{r}{l}, t_o))}{\max(\Delta T(\frac{r}{l} \rightarrow \infty, t_o))} \quad (2.27)$$

où ΔT est le contraste thermique [Maldague, 2001] à la surface pour un ratio $\frac{r}{l}$ rayon/profondeur du défaut et un temps d'observation t_o , ici 90 s. Cet indicateur est utilisé pour définir la propension d'un défaut à générer un phénomène de conduction latéral [Vavilov, 2010], $\frac{r}{l} \rightarrow \infty$ correspond à une géométrie de défaut suffisamment imposante pour ne pas générer d'effets latéraux mesurables sur la durée du temps d'observation t_o . Par définition si l'indicateur atteint une

valeur de 90% pour un système donné, l'hypothèse unidimensionnelle est validée. Dans l'étude originale, l'indicateur de Vavilov est calculé à l'aide de mesures effectuées en laboratoire. De plus, il a été développé pour des systèmes fins et monolithiques excités thermiquement à l'aide d'une distribution de Dirac. Or, cette analyse se positionne vis-à-vis de l'étude de systèmes multi-couches épais comportant des défauts en profondeur et utilise deux types d'excitations thermiques : une distribution de Dirac et une excitation créneau de 30 s. Par conséquent il a été décidé d'utiliser un modèle thermique aux éléments finis 2D afin d'étudier deux configurations (présentées figure 2.6). Elles correspondent à des systèmes multi-couches qu'il est possible de rencontrer lors de la réparation de structures béton, à savoir une couche de matériau composite (CFRP) une couche de colle pouvant être partiellement défectueuse et un support béton épais. Les paramètres du système sont présentés tableau 2.4. Afin d'élargir le domaine couvert par cette analyse, l'étude est étendue à différents types de matériaux. L'indicateur de Vavilov, équation 2.27, a été calculé pour chaque défaut, chaque excitation dans chaque configuration. Les figures 2.7 et 2.8 présentent l'indicateur de Vavilov pour un ratio $\frac{r}{l} \in [0.2; 13]$ avec l fixé. Le tableau 2.5 résume les résultats de l'étude.

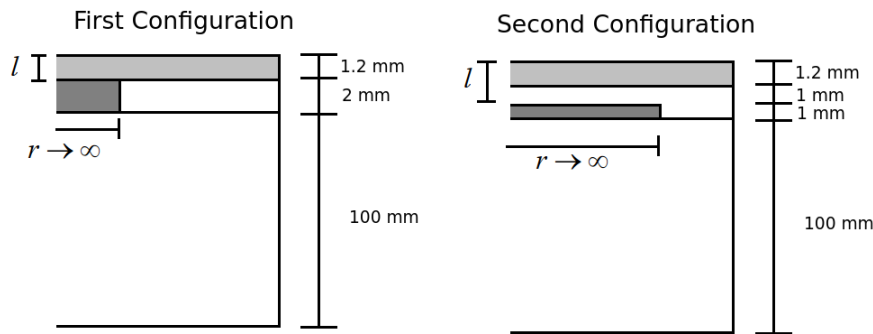


FIGURE 2.6 – Configurations utilisées pour l'étude

Matériaux	k W/m.K	ρ kg/m ³	C J/kg.K	R W/K	b W. \sqrt{s} /m ² .K	b_{cfrrp}/b	b_{epoxy}/b
Première couche							
CFRP	0.7	1530	840	0.0017	948.5	1	0.57
Deuxième couche							
Résine époxy	0.2	1200	1220	0.0050	542.5	1.75	1
Troisième couche							
Béton	1.8	2300	920	∞	1951	0.48	0.27
Défauts considérés							
Bois	0.15	600	1900	0.0067	413.5	2.29	1.31
Acier	15.1	8055	480	$6.62e^{-5}$	7640.9	0.12	0.07
PTFE (Téflon®)	0.235	2200	1050	0.0043	736.8	1.29	0.74
Liège	0.039	120	1800	0.0256	91.8	10.33	5.91
Eau	0.6	1000	4185	0.0017	1582.6	0.60	0.34
Air	0.0242	1.225	1006	0.0413	5.5	173.6	99.31

TABLE 2.4 – Propriétés physiques utilisées

Ces résultats indiquent que pour l'éventail de défauts étudiés la limite de validité du modèle se situe dans un intervalle de 0.5 à 2.5 cm de diamètre, la configuration choisie influant large-

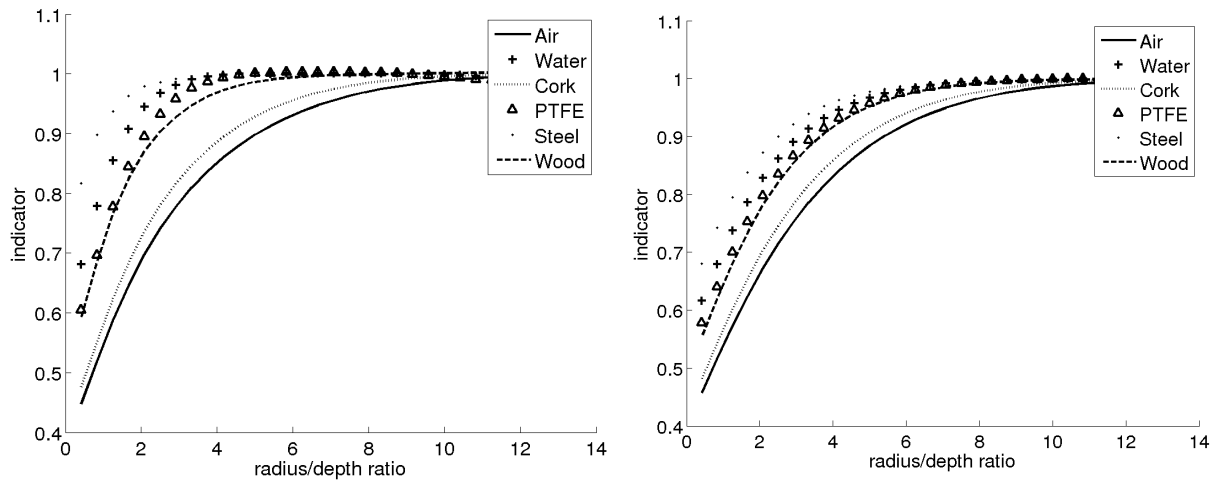


FIGURE 2.7 – Indicateur de Vavilov, excitation Dirac, configuration n°1 (gauche) et n°2 (droite)

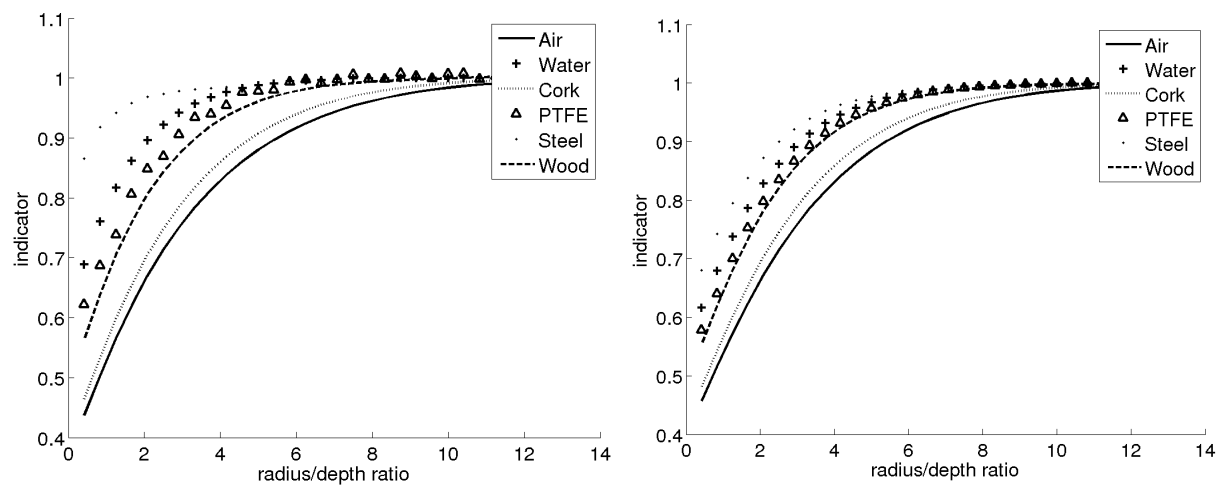


FIGURE 2.8 – Indicateur de Vavilov, excitation Créneau, configuration n°1 (gauche) et n°2 (droite)

Excitations	Dirac		Créneau	
	Première	Deuxième	Première	Deuxième
Bois	3	7.2	3.9	8.2
Acier	0.9	5.5	1.1	5.5
PTFE (Téflon®)	2.4	6.3	3.4	7.3
Liège	5.4	11	6	11
Eau	1.9	6.38	2.4	7.2
Air	6	11	6.4	12

TABLE 2.5 – Rayon minimum du défaut (en mm) pour la validité de l'hypothèse 1D

ment sur le diamètre minimum du défaut. Il est intéressant de noter que la valeur de l'indicateur de Vavilov est inversement proportionnelle au ratio d'effusivité entre la matrice et le défaut. Cette inversion peut être expliquée par le fait que les effets de bords étudiés sont ceux induits par le défaut sur son environnement, ici la colle époxy. Un autre point de l'étude est le faible écart entre les résultats obtenus pour des excitations avec une distribution de Dirac ou de forme

créneau, laissant entrevoir la validité de l'indicateur pour cette dernière. À ce stade de l'étude aucun des résultats ne permet d'indiquer qui de la profondeur, et donc du nombre de couches, ou du diamètre du défaut est le plus influant sur le calcul de l'indicateur. Pour compléter l'analyse il est nécessaire d'étudier la différence entre les thermogrammes acquis en surface du modèle 2D pour $\frac{r}{l} \rightarrow \infty$ et le modèle quadripolaire, les courbes sont présentées figures 2.9, pour la distribution de Dirac, et 2.10 pour le créneau.

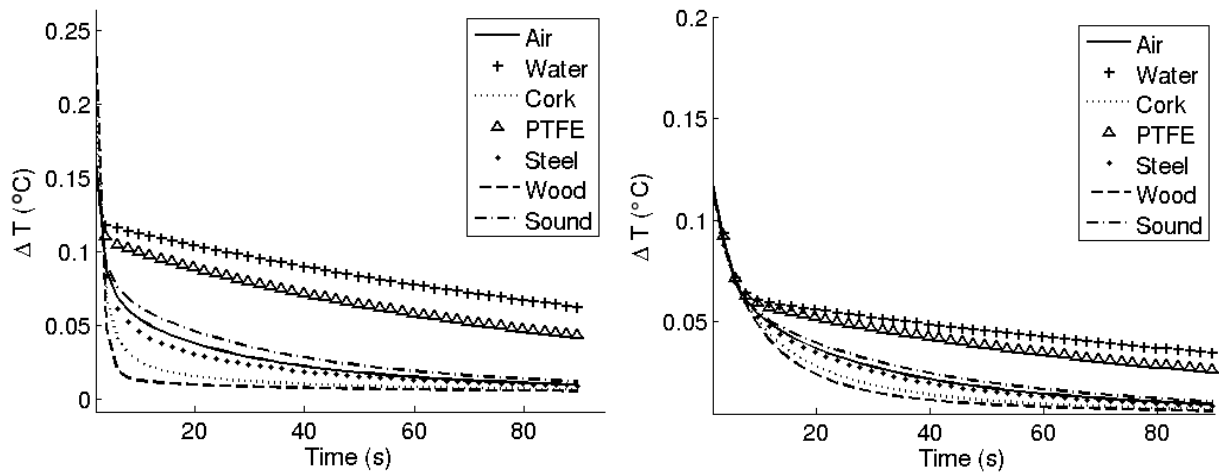


FIGURE 2.9 – Différences entre le modèle quadripolaire et le modèle 2D, excitation Dirac, configuration n°1 (gauche) et n°2 (droite)

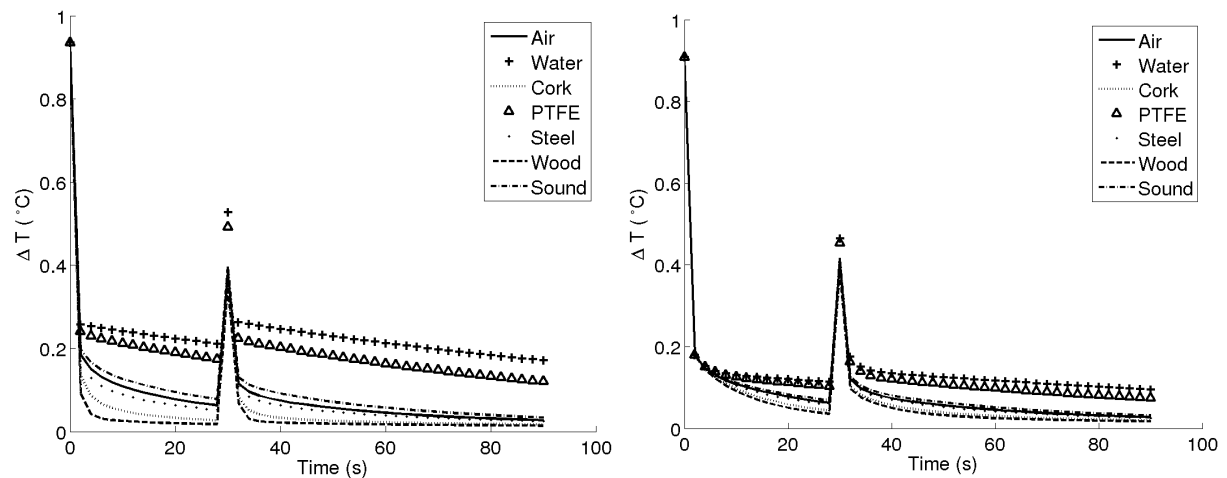


FIGURE 2.10 – Différences entre le modèle quadripolaire et le modèle 2D, excitation Créneau, configuration n°1 (gauche) et n°2 (droite)

L'analyse de ces courbes fait apparaître une erreur 1D/2D inférieure à 0.5°C dans la plupart des cas. Cet écart peut être assimilé à du bruit de mesure. En revanche les figures 2.11 et 2.12 présentent, elles, le contraste thermique observé pour chaque défaut. Ainsi même si l'erreur 1D/2D peut, dans un premier temps, apparaître négligeable elle n'en reste pas moins proportionnellement importante pour les matériaux à faible ratio d'effusivité. Cette observation implique que la définition de l'indicateur de Vavilov n'est, ici, pas adaptée pour ce type de matériaux.

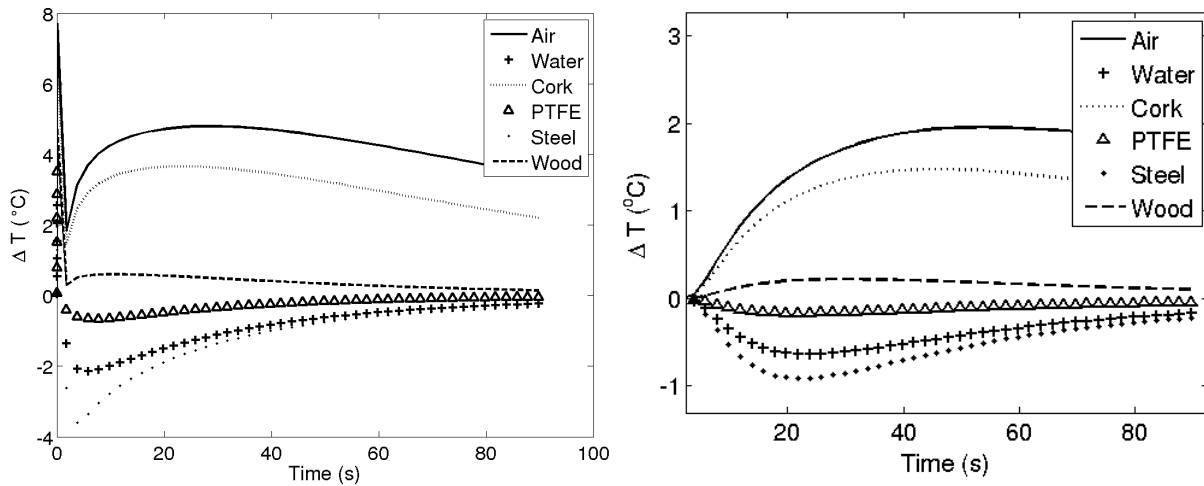


FIGURE 2.11 – Contraste thermique, excitation Dirac, configuration n°1 (gauche) et n°2 (droite)

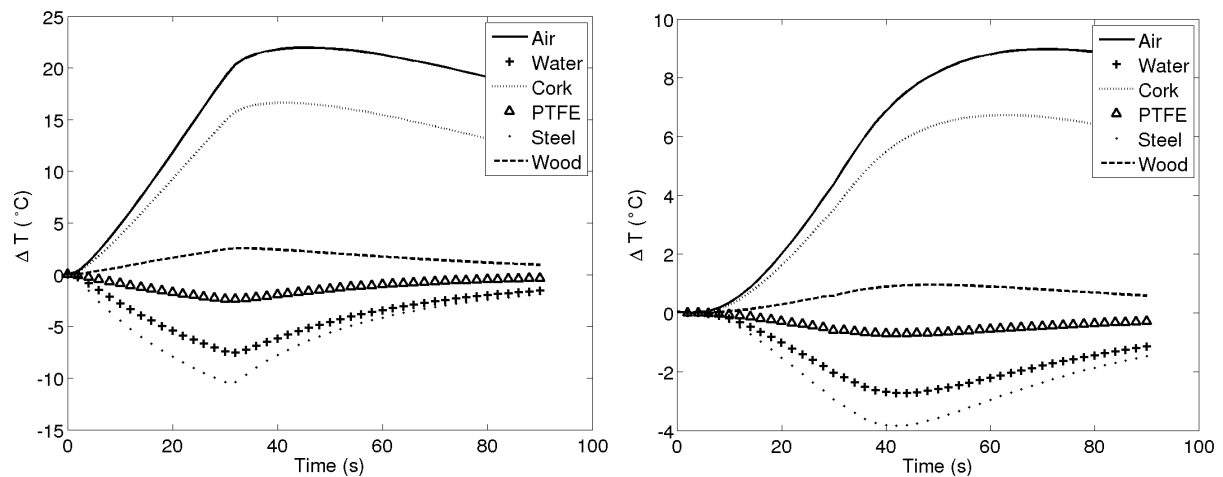


FIGURE 2.12 – Contraste thermique, excitation Créneau, configuration n°1 (gauche) et n°2 (droite)

Afin de prendre en compte l'impact de l'erreur entre le modèle 2D et la modélisation quadrupolaire, l'indicateur de Vavilov doit être redéfini. Un nouvel indicateur applicable dans le cadre de cette étude est proposé :

$$indicator_{1D2D} = \frac{\max(T_{1D}^{zonesaine}(t_o) - T_{2D}(\frac{r}{l}, t_o))}{\max(T_{1D}^{zonesaine}(t_o) - T_{1D}^{defaut}(t_o))} \quad (2.28)$$

Suivant la même logique que celle mise en œuvre pour l'équation 2.27, si ce nouvel indicateur atteint une valeur de 90% pour un ratio $\frac{r}{l}$ donné, l'hypothèse unidimensionnelle est validée. Les figures 2.13 et 2.14 présentent les valeurs de ce nouvel indicateur pour un ratio $\frac{r}{l}$ croissant.

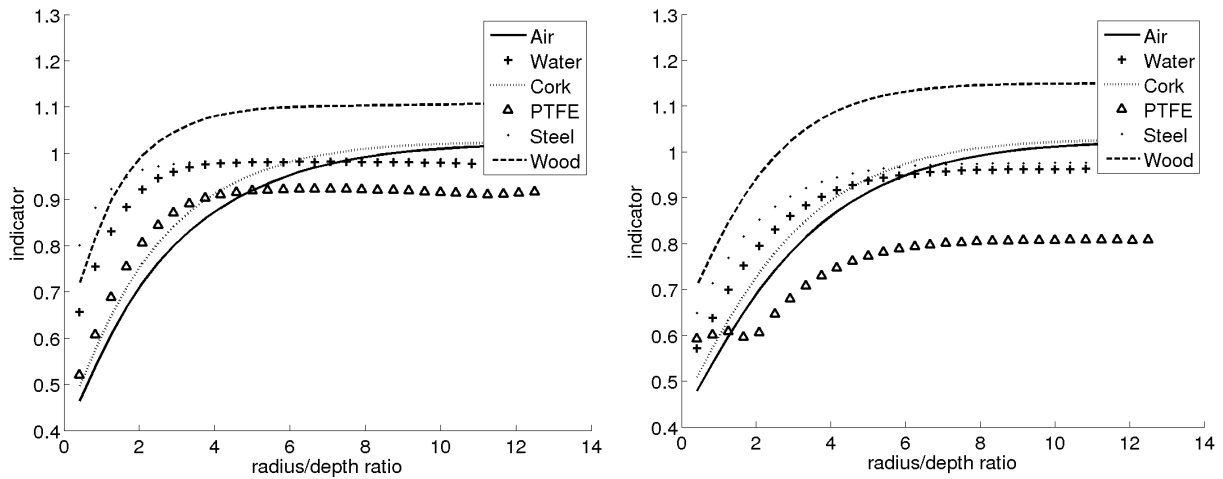


FIGURE 2.13 – Indicateur de Vavilov redéfini, excitation Dirac, configuration n°1 (gauche) et n°2 (droite)

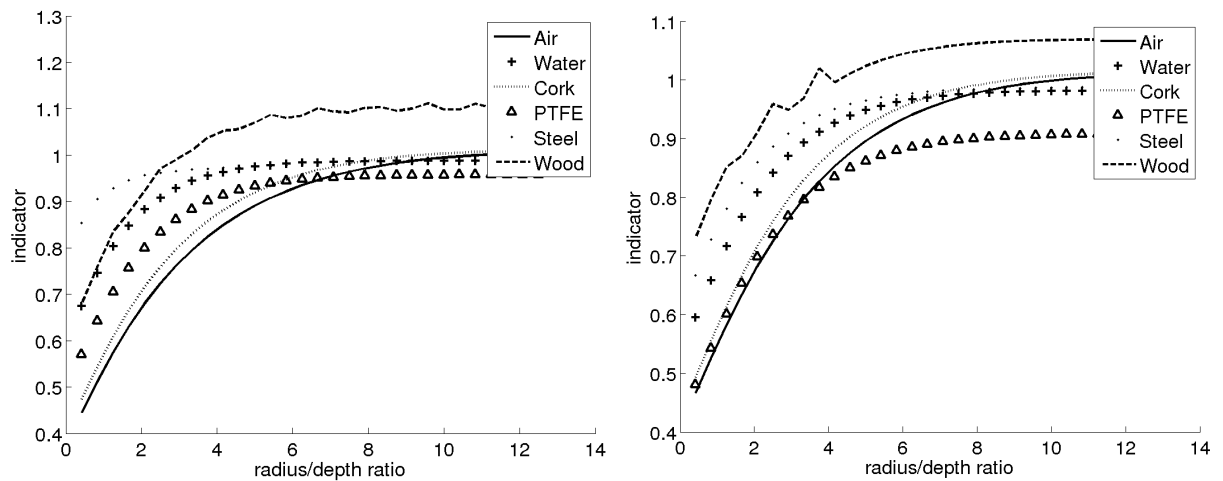


FIGURE 2.14 – Indicateur de Vavilov redéfini, excitation Créneau, configuration n°1 (gauche) et n°2 (droite)

Excitations	Dirac		Créneau	
	Première	Deuxième	Première	Deuxième
Bois	1.7	3.7	2	4.2
Acier	1.2	6.6	1.1	4.8
PTFE (Téflon®)	3.8	∅	3.8	1.7
Liège	4.2	8.4	5	9.2
Eau	2.4	8.4	2.4	7
Air	5.3	8.8	6.6	11

TABLE 2.6 – Rayon minimum du défaut (en mm) pour la validité de l’hypothèse 1D - indicateur redéfini

Le tableau 2.6 résume les résultats. Il est possible d’observer par comparaison, que le nouvel indicateur affiche des ratios $\frac{r}{l}$ pour les matériaux à fort ratio d’effusivité en accord avec ceux identifiés figures 2.7 et 2.8. En revanche il apparaît que le PTFE et le bois sont fortement

influencés par l'erreur entre 1D et 2D, bien que faible, elle est proportionnellement importante vis-à-vis leurs contrastes thermiques respectifs. Les figures 2.13 et 2.14 mettent en lumière le fait qu'une modélisation 1D a des difficultés à représenter correctement les défauts présentant un ratio d'effusivité unitaire, ceci est d'autant plus observable lorsque la distribution de Dirac est utilisée. L'excitation créneau affiche des résultats plus encourageants, à part le PTFE, l'ensemble des défauts y compris en profondeur, présente une valeur maximale de l'indicateur comprise dans une bande de $\pm 10\%$ autour de la valeur optimale.

Cette analyse de la validité de l'hypothèse unidimensionnelle a permis l'identification de points singuliers dans le comportement du modèle quadripolaire, notamment grâce à la redéfinition de l'indicateur de Vavilov [Vavilov, 2010] permettant de prendre en compte les faibles contrastes thermiques. Ainsi, les matériaux présentant un ratio d'effusivité unitaire vis-à-vis de la colle époxy apparaissent problématiques, du moins pour l'excitation par distribution de Dirac, en particulier le PTFE. Notez que pour ce matériau la barrière moléculaire entre lui et son environnement n'a pas été modélisée ici par l'introduction d'une résistance de contact au sein du modèle. L'étude fait aussi ressortir la nécessité d'étudier le contraste thermique [Maldague, 2001] parallèlement à l'indicateur, ceci est d'autant plus vrai pour les matériaux avec un faible ratio d'effusivité. Pour ces matériaux le seuil de 90% perd, ici, de son sens vu leur faible niveau de contraste thermique.

Dans la suite de ce chapitre la sensibilité du modèle quadripolaire à ses paramètres est étudiée en fonction des ratios d'effusivité présentés tableau 2.4.

2.4 Analyse de sensibilité

Dans cette partie la sensibilité locale du modèle à ses paramètres est étudiée. Utile pour l'estimation de paramètres, l'analyse de sensibilité permet une étude du comportement du modèle vis-à-vis de ses paramètres mais aussi l'identification de corrélations potentielles entre ceux-ci [Saltelli *et al.*, 2000, Jacques, 2005].

2.4.1 Sensibilité aux paramètres de la couche de colle

Afin de concevoir une procédure capable d'estimer l'épaisseur de la couche de colle utilisée dans le cadre d'une réparation par collage composite ainsi que d'identifier les caractéristiques d'un éventuel défaut, l'étude de sensibilité se concentre sur un modèle quadripolaire représentant un système tri-couches où une quatrième couche peut-être présente, figure 2.15.

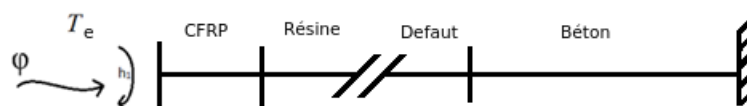


FIGURE 2.15 – Système 1D étudié

La sensibilité locale est définie par l'étude de l'influence de variations infinitésimales de paramètres sur la sortie du modèle analysé. Ainsi la sensibilité du modèle à un vecteur de paramètres P est défini par la matrice de sensibilité J , équation 2.29

$$J(P) = \left[\frac{\partial T^T(P)}{\partial P} \right]^T \quad (2.29)$$

où $J(P)$ est la sensibilité du modèle au vecteur de paramètre P au cours du temps. Cette matrice de sensibilité a un rôle important dans l'estimation de paramètres [Beck et Arnold, 1977, Ozisik, 2000]. Les paramètres composant le vecteur P n'étant pas toujours exprimés dans les mêmes unités, il est courant et plus maniable pour l'analyse de définir S la sensibilité réduite locale aux paramètres exprimée ici en $^{\circ}C$, équation 2.30.

$$S(P) = PJ(P) \quad (2.30)$$

La sensibilité réduite locale traduisant l'influence d'un paramètre sur la réponse du modèle, il est admis que si un modèle est peu sensible à l'un de ses paramètres alors l'estimation future de celui-ci peut s'avérer difficile, a contrario une erreur dans la connaissance de ce paramètre est alors peu préjudiciable. Dans les faits, la sensibilité réduite locale étant exprimée dans la même unité que le modèle, il est alors possible de fixer un seuil en dessous duquel le modèle est considéré comme insensible aux paramètres. Il est fait mention dans la littérature que la sensibilité réduite à un paramètre doit être supérieure à 1% de la réponse du modèle pour être significative [Faugeroux, 2004]. Dans un premier temps la sensibilité du modèle quadripolaire, redéfini équations 2.31 à 2.33, est étudiée pour une configuration tri-couches ($n = 3$) correspondant à l'analyse d'une zone saine :

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^{i=n} M_i \begin{pmatrix} \theta_{e_n} \\ \tilde{\varphi}_{e_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{e_n} \\ \tilde{\varphi}_{e_n} \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

$$M_i = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i & \frac{1}{\sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} k_i} \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i \\ \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} k_i \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i & \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

$$T(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{A\tilde{\varphi}_1 - D\tilde{\varphi}_{e_n}}{C} + B\tilde{\varphi}_{e_n} \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{A\tilde{\varphi}_1}{C} \right\} \quad (2.33)$$

où $\varphi_1 = h(T_{ext} - T_1) + \varphi_0$, $h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ étant le coefficient d'échange thermique et $\varphi_{e_n} = 0$ une condition adiabatique en face arrière. Le tableau 2.7 recense les caractéristiques du modèle.

La figure 2.16 présente les courbes de sensibilité locale réduite $S(P_i)$ pour $P = [\varphi_0, \alpha_2, k_2, \rho_2, C_2, e_2, h]$. Les valeurs initiales de P sont présentés tableau 2.7, pour une variation $\delta P = P \cdot 10^{-3}$. Pour se rapprocher des conditions expérimentales, l'énergie de l'excitation Dirac a été fixée à $Q_0 = 6400 \text{ J}$ et la densité de flux du créneau a elle été fixée à $\varphi_0 = 2000 \text{ Wm}^{-2}$ pendant 30 s. Pour cette première analyse l'intérêt d'étudier une large gamme de paramètres, aussi bien à la frontière $[h, \varphi_0]$ qu'au sein de la deuxième couche $[\alpha_2, k_2, \rho C_2, e_2]$ est d'identifier les relations possibles entre l'ensemble des paramètres d'une couche dans le cas où aucune connaissance *a priori* n'est disponible.

Dans un premier temps, l'analyse des paramètres surfaciques $[h, \varphi_0]$ donne une information sur les futures mesures en conditions expérimentales. Ainsi la sensibilité au coefficient d'échange thermique h apparaît peu importante, notamment si celui-ci a une valeur faible

Matériaux	k W/m.K	ρ kg/m ³	C J/kg.K	R W/K	b W. \sqrt{s} /m ² .K	b_{cfrrp}/b	b_{epoxy}/b	e mm
Première couche								
CFRP	0.7	1530	840	0.0017	948.5	1	0.57	1.2
Deuxième couche								
Résine époxy	0.2	1200	1220	0.0050	542.5	1.75	1	2
Troisième couche								
Béton	1.8	2300	920	∞	1951	0.48	0.27	100

TABLE 2.7 – Propriétés physiques utilisées

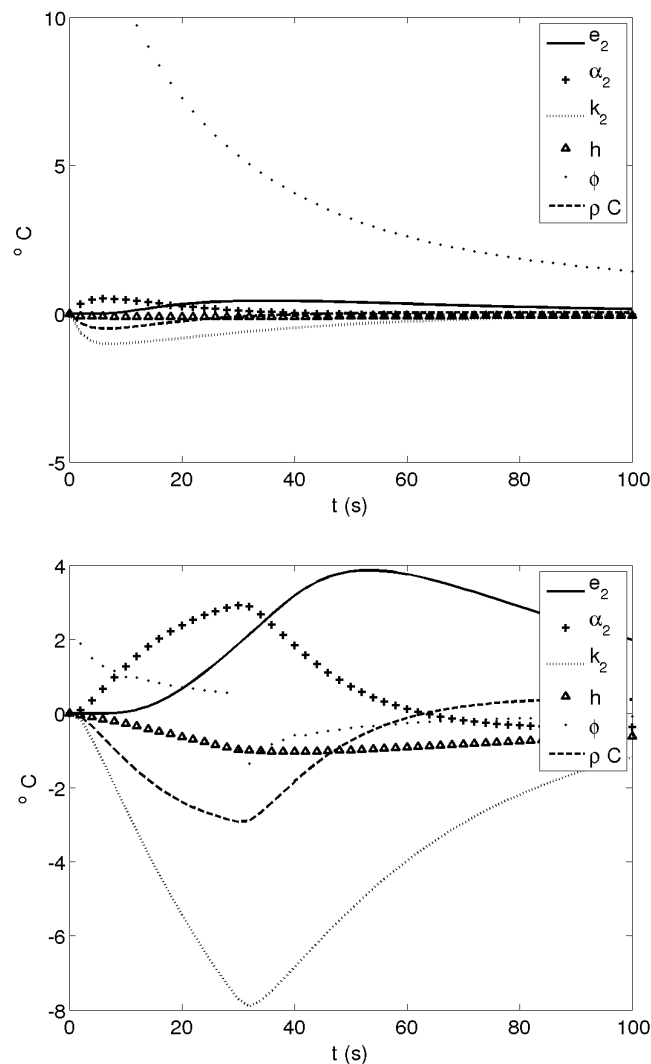


FIGURE 2.16 – Sensibilités réduites du modèle aux paramètres de la deuxième couche dans le cas d'une zone saine. Haut : Dirac, Bas : Créneau

$h = 10 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ (i.e. conditions de laboratoire). Pour ce qui est de la densité de flux thermique directe φ_0 , dans le cas de l'excitation par distribution de Dirac, une erreur sur sa déter-

mination induirait une dérive non négligeable de la réponse du modèle, $S(\varphi_0) \gg S(P \setminus \varphi_0)^\dagger$, ce phénomène pourrait s'avérer problématique en conditions expérimentales. À contrario pour l'excitation créneau, les paramètres surfaciques apparaissent moins problématiques.

L'ensemble des paramètres de la deuxième couche a aussi été analysé : $[\alpha_2, k_2, \rho C_2, e_2]$. Bien que l'excitation créneau implique de par sa nature des niveaux de sensibilité plus élevés, pour les deux excitations le modèle apparaît sensible aux paramètres de sa deuxième couche. En revanche après une première analyse visuelle des courbes de sensibilité [Beck et Arnold, 1977], il apparaît que l'ensemble des paramètres est corrélé. Ce n'est pas une surprise, en effet le tableau 2.2 présentait déjà les liens existants entre les différents paramètres de l'équation de la chaleur. Bien que cela ait été prévisible, cela n'en reste pas moins un problème à lever lorsqu'aucune connaissance *a priori* des propriétés thermiques n'est disponible.

2.4.2 Sensibilité aux paramètres d'un éventuel défaut

Dans le cadre du contrôle non destructif de structures de génie civil réparées par collage de lamelles composites, la procédure développée ici doit être capable de caractériser l'épaisseur de la couche de colle utilisée ainsi que les propriétés d'un éventuel défaut situé en troisième couche, figure 2.15, et ce, en tout point de la mesure. Les propriétés thermiques de la colle époxy ainsi que du CFRP étant supposées connues (i.e. éléments manufacturés), l'estimation de l'épaisseur de la deuxième couche paraît réalisable, figure 2.16. En revanche la caractérisation d'un défaut inconnu semble compromise si aucune amélioration n'est apportée au modèle quadripolaire (nombre d'inconnues trop élevé et couplage de paramètres).

Afin de proposer une méthode permettant la caractérisation de l'épaisseur de colle utilisée ainsi que d'un défaut présent en troisième couche le modèle quadripolaire, équation 2.32, doit être redéfini.

L'analyse de sensibilité présentée auparavant a fait apparaître de hauts niveaux de sensibilité pour la conductivité thermique k ainsi que pour l'épaisseur e , de plus ces paramètres présentent un fort couplage. En s'appuyant sur l'analyse de la figure 2.5, qui répertorie les formulations possibles de l'équation de la chaleur, il apparaît que la troisième couche du modèle (le défaut) présenterait des sensibilités optimisées si la résistance thermique $R = \frac{e}{k}$ et l'effusivité $b = \sqrt{k\rho C}$ étaient utilisées. Ainsi, la troisième couche du modèle, équation 2.32, a été redéfinie en prenant en compte les observations précédentes. Le modèle quadripolaire s'écrit alors :

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^{i=n} M_i \begin{pmatrix} \theta_{x_n=e_n} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \forall i$$

$$M_i = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i & \frac{1}{\sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} k_i} \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i \\ \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} k_i \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i & \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i \end{pmatrix} \quad i \in \llbracket 1, 2, 4 \rrbracket \quad (2.34)$$

$$M_i = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{pb_i} R_i & \frac{1}{b_i \sqrt{p}} \sinh \sqrt{pb_i} R_i \\ b_i \sqrt{p} \sinh \sqrt{pb_i} R_i & \cosh \sqrt{pb_i} R_i \end{pmatrix} \quad i = 3$$

[†] où $P \setminus \varphi_0$ est le vecteur P sans le paramètre φ_0

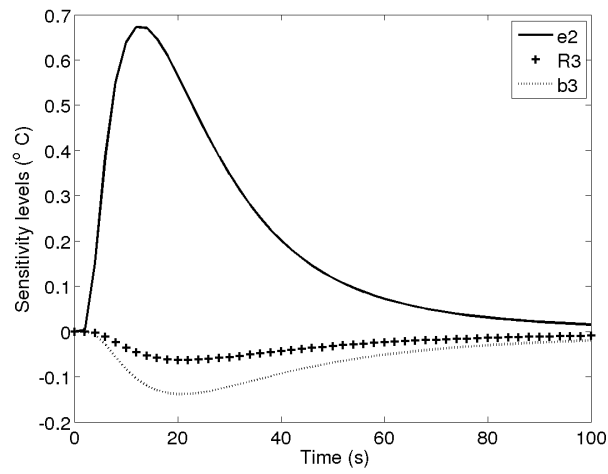
Sensibilité au ratio d'effusivité

Il a été observé dans la section 2.3, que le modèle présentait des comportements différents suivant le ratio d'effusivité présent entre la résine époxy et le défaut (le ratio d'effusivité caractérisant entre autres la température d'interface). Dans un souci de simplification de l'analyse, les résultats sont présentés ici en fonction de trois ratios d'effusivité représentant trois comportements thermiques différents $\frac{b_2}{b_3} \in [0; 1[$, $\frac{b_2}{b_3} \approx 1$ et $\frac{b_2}{b_3} \in]1; \infty]$. Les matériaux utilisés pour réaliser cette nouvelle étude de sensibilité sont présentés tableau 2.8.

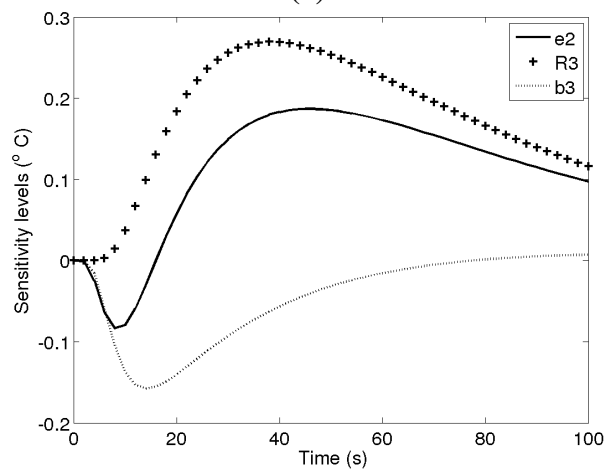
Matériaux	k W/m.K	ρ kg/m ³	C J/kg.K	R W/K	b W. \sqrt{s} /m ² .K	b_{cfrrp}/b	b_{epoxy}/b
Bois	0.15	600	1900	0.0067	413.5	2.29	1.31
Acier	15.1	8055	480	$6.62e^{-5}$	7640.9	0.12	0.07
Liège	0.039	120	1800	0.0256	91.8	10.33	5.91

TABLE 2.8 – Propriétés physiques utilisées

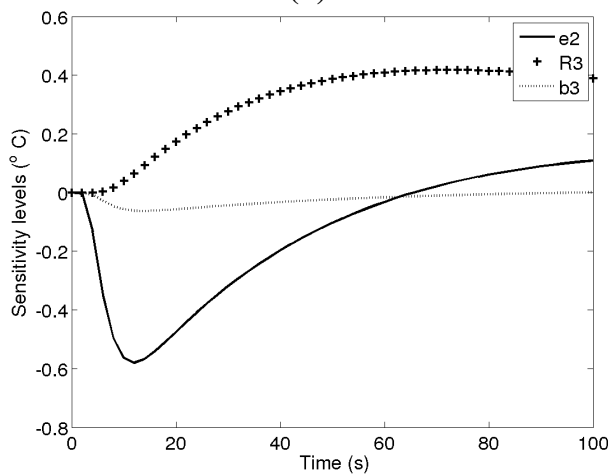
Les figures 2.17 et 2.18 présentent les résultats de l'étude de sensibilité du modèle quadripolaire vis-à-vis de l'épaisseur de la deuxième couche e_2 , ainsi que de la résistance thermique et l'effusivité de la troisième couche, R_3 et b_3 . Il est à noter que dans la configuration choisie $e_2 = e_3 = 1mm$.



(a)

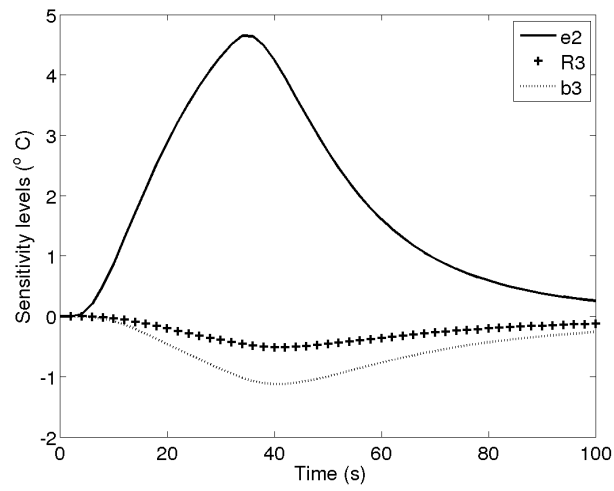


(b)

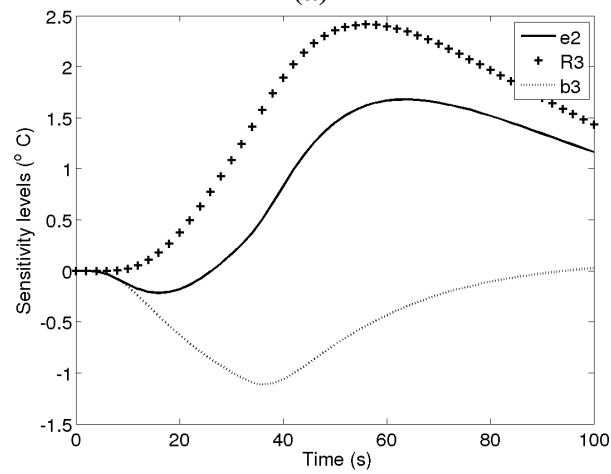


(c)

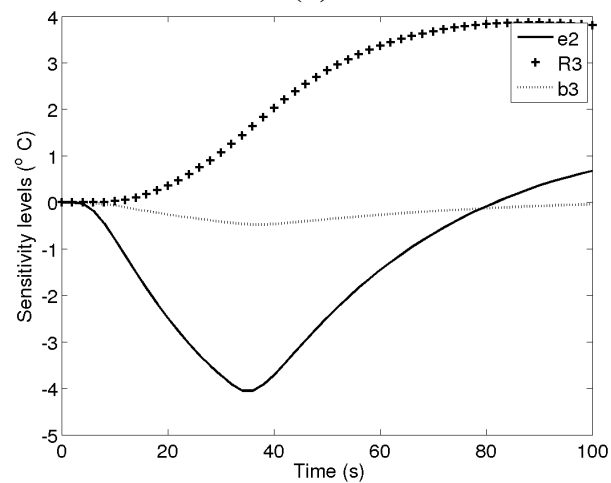
FIGURE 2.17 – Courbes de sensibilité pour différents matériaux dans le cas d’une excitation Dirac : (a) Acier, (b) Bois, (c) Liège



(a)



(b)

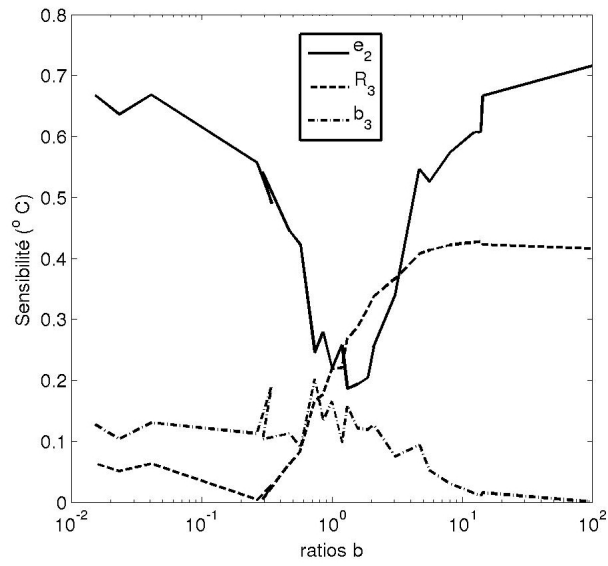


(c)

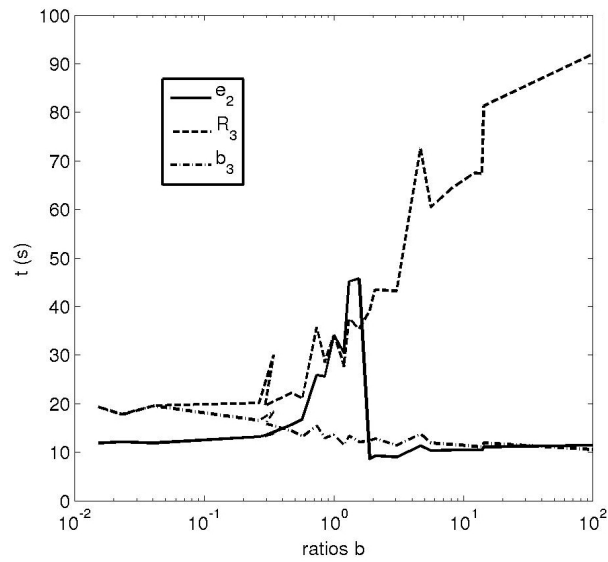
FIGURE 2.18 – Courbes de sensibilité pour différents matériaux dans le cas d'une excitation créneau : (a) Acier, (b) Bois, (c) Liège

Comme pour la précédente étude, les niveaux de sensibilités présentés sont plus élevés avec l'excitation créneau. Un point important de l'étude est ici l'impact du ratio des effusivité sur la sensibilité réduite du modèle. Ainsi, pour les défauts présentant un faible ratio d'effusivité, la sensibilité à l'épaisseur e_2 est importante alors que le modèle apparaît peu sensible aux paramètres du défaut contrairement aux matériaux présentant un fort ratio d'effusivité où la sensibilité aux deux couches est satisfaisante. Il est important de remarquer que dans ces deux cas d'étude, la sensibilité à l'effusivité b_3 est faible. La définition de l'effusivité ainsi que l'étude précédente, figure 2.16, l'expliquent par l'effet de compensation entre la sensibilité à la capacité thermique volumique ρC et la conductivité thermique k . Il peut être remarqué que dans le cas du liège, les sensibilités à e_2 et R_3 apparaissent décalées dans le temps, R_3 atteignant son niveau maximum longtemps après le début de la relaxation thermique, $t > 30s$ pour le créneau. Ce décalage tend à montrer que la corrélation entre l'épaisseur de la deuxième couche et les paramètres d'un défaut est inversement proportionnelle au ratio d'effusivité. La corrélation entre paramètres sera analysée plus tard dans ce chapitre. Les défauts avec un ratio d'effusivité unitaire représentent un cas particulier de l'étude, ils apparaissent comme un pivot où les signes des courbes de sensibilités s'inversent et oscillent autour de zéro, en d'autres termes le modèle apparaît ici aveugle à ce type de matériaux.

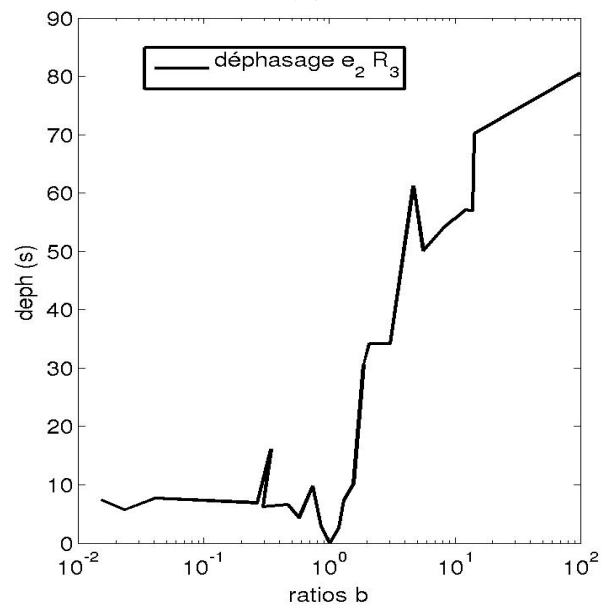
À titre de complément, l'annexe IV figure 1 présente un tableau regroupant une vingtaine de matériaux auxquels ont été ajoutés les matériaux déjà présentés tableau 2.4. Ces données ont ensuite été utilisées pour étudier le comportement de la sensibilité du modèle à ses paramètres en fonction du ratio des effusivité. Les figures 2.19 et 2.20 présentent les résultats de l'étude pour les deux types d'excitation considérés. À noter que l'ensemble des données présentées figures 2.19 et 2.20 le sont en valeurs absolues, l'étude ne porte pas ici sur l'inversion du signe de la sensibilité aux paramètres.



(a)

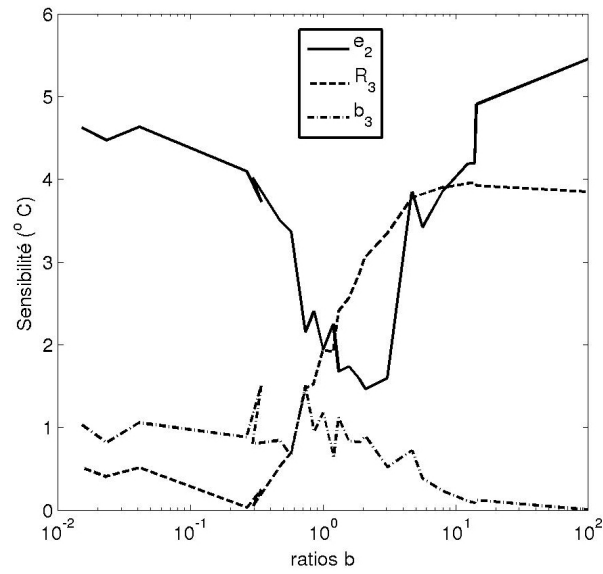


(b)

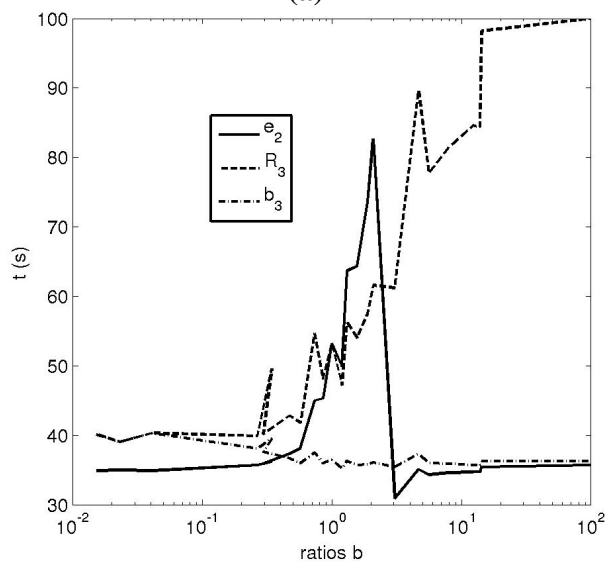


(c)

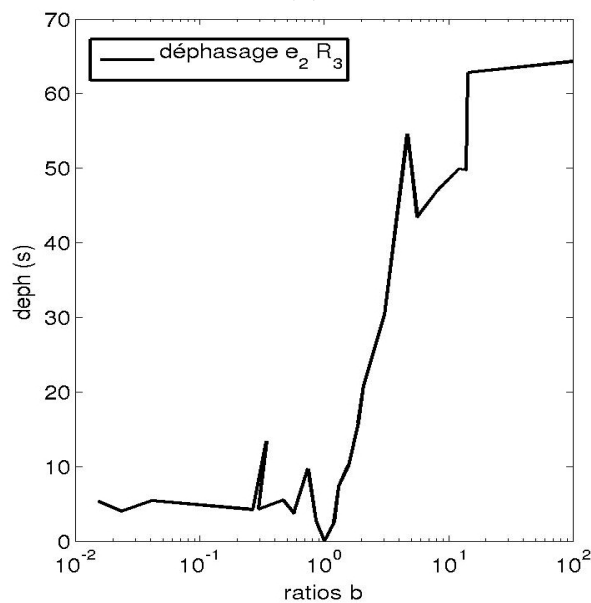
FIGURE 2.19 – Étude sur un panel de matériaux. Pour une excitation de type excitation Dirac, (a) Maximum de sensibilité en fonction du ratio d'effusivité, (b) Temps d'arrivée du maximum, (c) Décalage entre R_2 et e_2



(a)



(b)



(c)

FIGURE 2.20 – Étude sur un panel de matériaux. Pour une excitation de type excitation Créneau, (a) Maximum de sensibilité en fonction du ratio d'effusivité, (b) Temps d'arrivée du maximum, (c) Décalage entre R_2 et e_2

L'analyse de ces nouveaux résultats confirme l'influence du ratio d'effusivité entre la couche époxy et le défaut sur le comportement de la sensibilité aux paramètres. Il peut être observé que le comportement du maximum de sensibilité ainsi que de son temps d'apparition est au coefficient multiplicateur près le même pour les deux excitations. Le maximum de sensibilité aux paramètres du défaut, notamment R_3 , ainsi que son temps d'apparition paraissent suivre une tendance similaire à une fonction de répartition d'une loi probabiliste de Cauchy ou encore à la fonction d'erreur. En revanche le modèle apparaît réellement insensible à l'effusivité du défaut, et ce, quel que soit le ratio d'effusivité considéré. Dans la formulation du modèle quadripolaire, équation 2.34, l'effusivité caractérise le phénomène de diffusion au sein du système, ainsi la faible épaisseur des défauts considérés induit un comportement résistif prenant le pas sur l'effet thermique capacitif.

Ce phénomène étant intrinsèquement lié au volume considéré, la formulation unidimensionnelle du problème présenté ici paraît être responsable de la faible sensibilité à ce paramètre. Il est aussi observé que l'épaisseur e_2 présente une sensibilité quasi-constante exceptée autour du ratio d'effusivité unitaire. Cette observation tend à indiquer que le modèle serait capable de caractériser l'épaisseur de la couche de colle quel que soit le défaut sous-jacent.

Étude des corrélations entre paramètres

Afin de confirmer ces observations, il est nécessaire d'étudier les corrélations entre paramètres notamment entre ceux de la deuxième et de la troisième couche. Une première indication est donnée, figures 2.19 et 2.20. L'analyse du déphasage entre le temps d'apparition du maximum de sensibilité de e_2 et R_3 fait apparaître un déphasage croissant avec le ratio d'effusivité, ce qui laisse entrevoir qu'avec l'augmentation du ratio d'effusivité, les paramètres tendent à se décorrélérer. Cette observation du déphasage n'est pas suffisante pour conclure à la décorrélation des paramètres, pour cela l'étude doit se pencher sur les outils d'analyse statistique tels que les coefficients de corrélation [Walker, 1958, Spearman, 1904].

Les coefficients de corrélation, C_{ZY} permettent d'étudier le lien existant entre deux variables, ces quantités normées $C_{ZY} \in [-1; 1]$ sont définis par rapport aux variances et covariances des variables aléatoires Z et Y [Walker, 1958] :

$$C_{ZY} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} (Z_j - \bar{Z})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{j=n} (Z_j - \bar{Z})^2 \sum_{j=1}^{j=n} (Y_j - \bar{Y})^2}} = \frac{\sigma_{ZY}}{\sigma_Z \sigma_Y} \quad (2.35)$$

avec \bar{Z} et \bar{Y} les valeurs moyennes des variables aléatoire Z et Y et n le nombre d'échantillon.

Ces coefficients, définis équation 2.35, sont appelés coefficients linéaires de Pearson ou Bravais-Pearson. Ils permettent, à travers l'étude de la variance ainsi que de la covariance entre deux variables aléatoires, de mettre en évidence les liens (corrélations) linéaires entre ces mêmes variables. Ils ont l'avantage de ne pas prendre en compte les unités des variables utilisées. Deux types de corrélations sont distinguables, la première $|C_{XY}| \in]0; 0.5]$ est appelée corrélation faible, la seconde $|C_{XY}| \in]0.5; 1]$ fait apparaître de fortes corrélations entre les paramètres, $|C_{XY}| = 0$ est un cas particulier indiquant une absence de corrélation. La plus grande rigueur est requise pour l'analyse de tels coefficients, en effet il convient de préciser par exemple l'ensemble des conditions qui ont permis l'acquisition des valeurs des variables aléatoires. En 1934 le mathématicien français René Maurice Fréchet met en garde la communauté scientifique sur l'usage de tels coefficients [Fréchet, 1934]. En 1973 le statisticien Francis Anscombe [Anscombe, 1973] met en place le test dit du *Quartet d'Anscombe*, où quatre jeux de données présentent une corrélation linéaire identique alors que leur représentation graphique (courbes paramétrées) est, elle, complètement différente. Edward Tufte se servira en 2001 des

conclusions d'Anscombe, dans le premier chapitre de son ouvrage [Tufté, 2001], pour illustrer la nécessité de visualiser les données avant de conclure à une quelconque corrélation. La figure 2.21 présente le tracé de la sensibilité à e_2 en fonction de la sensibilité à R_3 pour les deux excitations considérées.

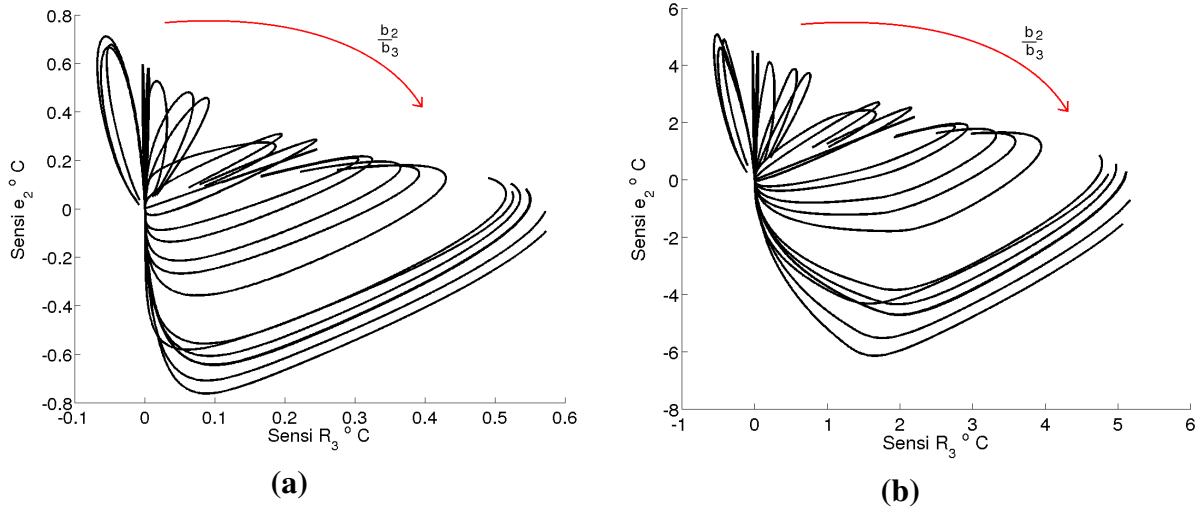


FIGURE 2.21 – Graphique d'Anscombe entre e_2 et R_3 , (a) Excitation Dirac, (b) Excitation Créneau

La distorsion des courbes représente la possible présence d'une corrélation non linéaire entre les variables étudiées, ces graphiques font d'ailleurs directement écho à un des cas illustrés dans le *Quartet d'Anscombe*.

Le coefficient de corrélation de Pearson est un coefficient linéaire basé sur la définition de la loi normale. Au regard des figures 2.17, 2.18 et 2.21, il apparaît que les liens entre variables sont non-linéaires [Beck et Arnold, 1977, Anscombe, 1973]. Afin d'étudier les relations non-linéaires entre variables, le coefficient de Pearson a été redéfini. Le coefficient de corrélation de Spearman [Spearman, 1904] permet d'étudier non pas les valeurs prises par les variables aléatoires, mais leurs rangs (*Ranking correlation*) ce qui autorise la caractérisation de corrélations non-linéaires :

$$C_{ZY} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} (z_j - \bar{z})(y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{j=n} (z_j - \bar{z})^2 \sum_{j=1}^{j=n} (y_j - \bar{y})^2}} \quad (2.36)$$

où z_i, y_i sont les rangs (ordre) des valeurs Z_i, Y_i . L'interprétation de ce coefficient est similaire à celui de Pearson, ce qui implique la même rigueur dans son étude. Ainsi, reprenant le tableau 2.8, l'étude analyse ici les corrélations non linéaires entre variables pour les trois ratios d'effusivité précédemment étudiés. Les corrélations entre courbes de sensibilité sont étudiées pour un système soumis à deux excitations différentes, et observé pendant 100 s. La durée de l'observation conditionne grandement les valeurs des coefficients de corrélations, ainsi $t_{observe} = 100$ s a été choisi d'un pour sa faisabilité expérimentale et d'autre part pour le fait que dans le cas des deux excitations étudiées, 100 s représente une borne à partir de laquelle la relaxation thermique tend vers une forme asymptotique. Un temps d'observation plus long aurait conduit à l'analyse des corrélations au sein d'un système à l'équilibre ou proche de l'équilibre thermique, ce qui n'a ici aucun sens. Le tableau 2.9 présente les coefficients de Spearman pour les trois matériaux choisis.

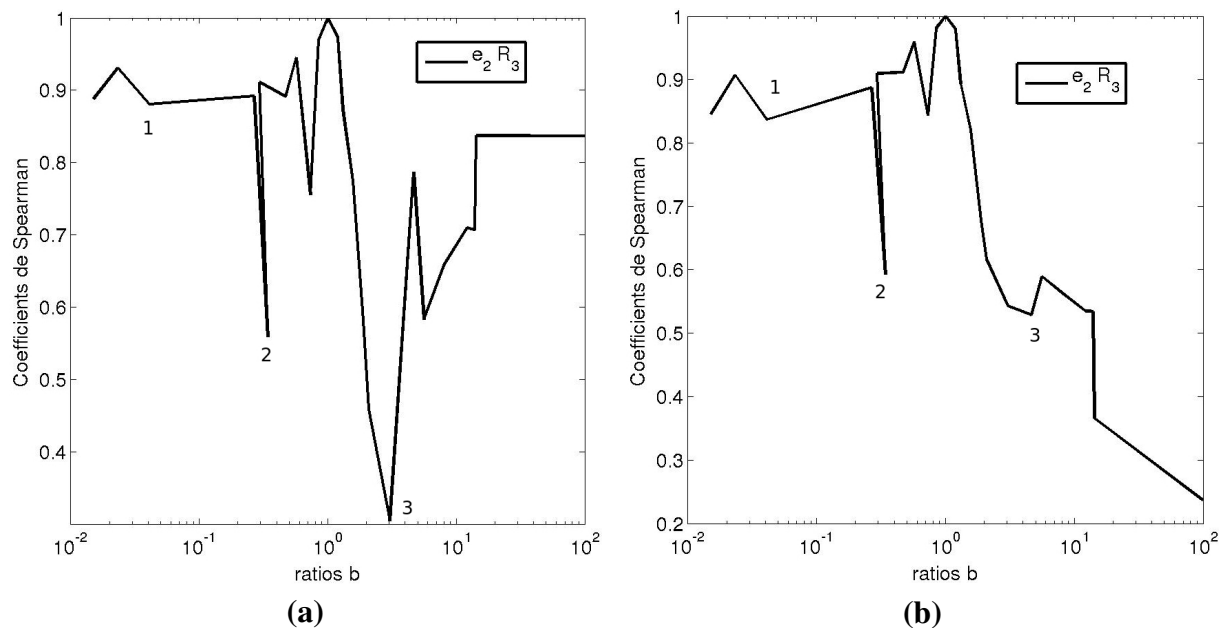
Les corrélations avec l'effusivité b_3 sont ici affichées, mais ne présentent pas d'intérêt immédiat. En effet, le modèle étant peu sensible à ce paramètre cela revient à rechercher une

P	Défaut d'acier		défaut de bois		défaut de liège	
	Impulsionnelle	Créneau	Impulsionnelle	Créneau	Impulsionnelle	Créneau
R_3/e_2	-0.86	-0.80	0.87	0.89	0.75	0.52
b_3/e_2	-0.87	-0.82	0.07	0.013	0.96	0.92
R_3/b_3	0.99	0.99	-0.28	-0.2	0.59	0.17

TABLE 2.9 – Coefficients de corrélation non linéaires de Spearman

corrélation non-linéaire entre une droite et une courbe, en d'autres termes la corrélation n'a ici pas lieu d'être calculée.

Par contre les corrélations entre e_2 et R_3 sont intéressantes, elles indiquent l'influence d'une erreur sur e_2 dans la détermination de R_3 , ce qui est le cœur du problème traité dans ce chapitre. L'excitation créneau tend à réduire la corrélation entre ces deux paramètres pour les matériaux avec un fort ratio d'effusivité. Comme précédemment, afin d'extraire une tendance, les coefficients de Spearman ont été calculés pour l'ensemble des matériaux présentés annexe IV tableau 1, les résultats pour les deux excitations sont présentés figure 2.22.

FIGURE 2.22 – Corrélation entre e_2 et R_3 : (a) Excitation Dirac , (b) Excitation Créneau

Ainsi la tendance à minimiser la corrélation $e_2 R_3$ pour les matériaux à fort ratio d'effusivité dans le cadre de l'excitation créneau est ici confirmée. Comme expliqué précédemment les "trop" faibles ratios d'effusivité $0 \ll \frac{b_2}{b_3} \approx 10^{-1}$ sont difficiles à prendre en compte en raison de leur sensibilité à R_3 . Les trois repères 1, 2, 3 sur la figure 2.22, correspondent respectivement à un défaut d'acier, d'eau et de laine de bois. Ces repères indiquent la présence de minima locaux, présents aussi dans les courbes de déphasage entre R_3 et e_2 figures 2.19 et 2.20. Après étude des matériaux annexe IV tableau 1 il est difficile de conclure à l'impact de tel où tel paramètre, même si à première vue une augmentation locale de ρC paraît expliquer le phénomène [Ashby, 2004]. En revanche, l'analyse de la figure 2.22 tend à montrer l'effet de lissage de l'excitation créneau sur le comportement des coefficients de corrélations en fonction

du ratio d'effusivité.

Cette section a détaillé l'analyse de sensibilité [Saltelli *et al.*, 2000] du modèle quadripolaire défini section 2.1.1. La modélisation porte sur un système tri-couches, tableau 2.7, où la seconde couche peut être partiellement défectueuse. Une première analyse a montré la nécessité de redéfinir la couche défectueuse à l'aide de groupements de paramètres présentés figure 2.5. Cette redéfinition en terme de résistance thermique, équation 2.34, a permis la réduction des paramètres d'intérêts ainsi que l'optimisation de la sensibilité aux propriétés du défaut [Beck et Arnold, 1977]. Puis la sensibilité du modèle a été étudiée en fonction des ratios d'effusivité entre la résine époxy et la couche défectueuse. L'étude a porté dans un premier temps sur les matériaux présentés tableau 2.8 puis afin d'analyser la tendance générale du modèle l'étude a été étendue à un panel de 26 matériaux présentés annexe IV, tableaux 1.

L'influence des matériaux à faible ratio d'effusivité a été démontrée et l'étude de la corrélation [Spearman, 1904, Anscombe, 1973] entre l'épaisseur de la deuxième couche et les propriétés du défaut permet d'indiquer que les matériaux à fort ratio d'effusivité et l'excitation créneau tendent à rendre indépendants les paramètres étudiés. Enfin, l'analyse des résultats obtenus montre que la modélisation unidimensionnelle, bien que validée section 2.3, n'est ici pas sensible aux matériaux à faibles ratios d'effusivité. Pour finir le modèle étudié présente une sensibilité à l'épaisseur de la couche de colle constante à travers le ratio d'effusivité.

La section suivante introduit la procédure d'estimation de paramètres, cette méthode consiste à minimiser la différence entre un modèle thermique et des mesures effectuées sur un système afin de remonter aux propriétés de ce même système. Après une introduction sur l'inversion de modèle [Beck et Arnold, 1977, Ozisik, 2000], la procédure d'estimation de paramètres est détaillée et les conclusions de l'analyse de sensibilité du modèle sont à nouveaux observées.

2.5 Procédure d'estimation de paramètres

2.5.1 La modélisation inverse : Le cas linéaire

Parmi les différentes méthodes disponibles pour l'estimation des propriétés d'un système, les méthodes dites inverses ont fait l'objet d'un certain nombre d'études [Beck et Arnold, 1977, Ozisik, 2000, Orlande *et al.*, 2011]. Pour estimer les paramètres d'un modèle, la méthode des moindres carrés consiste à minimiser l'écart quadratique entre des mesures et le résultat d'un modèle dit direct, ici la modélisation quadripolaire. La minimisation de cet écart s'effectue en faisant varier les paramètres du modèle direct utilisé. L'équation 2.37 présente un modèle quelconque A , avec pour paramètres le vecteur P et pour résultat le vecteur b .

$$AP = b \quad (2.37)$$

avec A de taille $nt \times np$, où nt taille de \mathcal{M} , np taille de P et préférentiellement $nt \gg np$. La résolution du modèle inverse consiste à trouver le vecteur P qui satisfait l'équation 2.37, cette résolution s'effectue à l'aide d'une inversion matricielle 2.38.

$$P = A^{-1}b \quad (2.38)$$

La résolution d'un modèle direct ou inverse n'est possible que si trois critères sont respectés :

- Une solution existe.
- La solution est unique.

- La solution dépend de façon continue des données.

Ces trois critères, exposés par Jacques Hadamard en 1902 [Hadamard, 1902], définissent le caractère *bien posé* d'un problème à résoudre. Dans le cas de l'estimation de paramètres d'un système, il est admis que la solution AP recherchée est celle qui s'approche le plus de la mesure d'un système réel \mathcal{M} , équation 2.39.

$$AP \approx \mathcal{M} \quad (2.39)$$

Malheureusement dans ce cas l'existence de la solution ainsi que son unicité ne sont plus assurées. Ainsi, la méthode des moindres carrés [Legendre, 1805] peut être utilisée. Elle consiste, non plus à inverser la matrice A , mais à minimiser l'écart quadratique entre le modèle direct et une mesure \mathcal{M} , équation 2.40.

$$\min_P (\|AP - \mathcal{M}\|^2) = \min_P (\mathcal{F}) \quad (2.40)$$

où \mathcal{F} est appelée la fonction coût, ou fonctionnelle du problème inverse. D'un point de vue matriciel, l'équation 2.40, peut s'écrire sous forme d'une multiplication de vecteurs transposés, équation 2.41.

$$\mathcal{F} = [AP - \mathcal{M}]^T [AP - \mathcal{M}] \quad (2.41)$$

La paternité (contestée) de cette méthode est attribuée à deux astrophysiciens. Il est admis que la première formulation claire de la méthode a été publiée en 1805 par Adrien-Marie Legendre [Legendre, 1805] bien qu'en 1809 Carl Friedrich Gauss publie un manuscrit dans lequel il revendique l'utilisation ancienne de cette méthode [Gauss, 1809]. Outre cette *gentille querelle*, il existe des cas où le dernier critère d'Hadamard n'est pas encore vérifié pour le problème linéaire présenté, notamment pour les problèmes discrétisés présentant une dimension finie. Dans ces cas il est nécessaire de régulariser le problème. En 1963 Andrey Tikhonov proposa une méthode de régularisation [Tikhonov, 1963] permettant d'assurer la continuité de la solution, équation 2.42.

$$\mathcal{F} = \|AP - \mathcal{M}\|_M^2 + \|\gamma(P - P_0)\|_{\mathcal{R}}^2 \quad (2.42)$$

où \mathcal{R} est l'espace de régularisation, M l'espace des mesures, P_0 un estimé *a priori* et γ est le paramètre de régularisation de Tikhonov, de faible valeur absolue il peut être calculé à l'aide d'un estimé *a priori* du vecteur de paramètre P . La régularisation de Tikhonov est transposable au cas non linéaire $A(P)$.

L'estimation de paramètres consiste alors à trouver le jeu de paramètres qui minimise la fonctionnelle \mathcal{F} . Dans cet objectif la méthode brute consiste à calculer \mathcal{F} à chaque pas ΔP jusqu'à sa minimisation. Il est aussi possible d'utiliser une méthode plus élégante et moins coûteuse en temps de calcul, par exemple la descente de gradient [Ozisik, 2000]. Cette méthode consiste à minimiser $\nabla \mathcal{F}$ le gradient de \mathcal{F} . L'équation 2.43 présente l'expression du gradient à partir de l'équation 2.41 :

$$\nabla \mathcal{F}(P) = 2 \left[-\frac{\partial AP^T}{\partial P} \right] [AP - \mathcal{M}] \quad (2.43)$$

Il apparaît alors dans l'équation 2.43 la matrice de sensibilité, ou matrice Jacobienne, équation 2.29, du modèle :

$$\nabla \mathcal{F}(P) = 2J(P)^T [AP - \mathcal{M}] \quad (2.44)$$

L'importance de la matrice de sensibilité du modèle prend alors tout son sens. À partir de l'équation 2.44 et dans le cas où le modèle est linéaire, il est possible de formuler directement le modèle inverse [Beck et Arnold, 1977]. La formulation explicite du problème inverse est présentée équation 2.45.

$$P = [A^T A]^{-1} A^T \mathcal{M} \quad (2.45)$$

avec $A = J$. Noter qu'à partir de l'équation 2.45 il est possible de définir la matrice de covariance de l'estimateur des paramètres \hat{P} [Beck et Arnold, 1977]

$$\text{cov}(\hat{P}) = [J^T J]^{-1} \sigma_b^2 \quad (2.46)$$

où σ_b^2 est la variance du bruit de mesure. Les termes non-diagonaux de la matrice $\text{cov}(\hat{P})$ représentent la covariance entre chacun des paramètres, ils fournissent une image des corrélations existantes au sein du vecteur \hat{P} et sont difficilement exploitables lorsque les unités des paramètres recherchés diffèrent. Les termes diagonaux fournissent eux directement la variance et donc l'écart type de chacun des éléments du vecteur \hat{P} . Le rôle de l'analyse de sensibilité transparait ici, $[J^T J]^{-1}$ apparaît comme un coefficient multiplicateur du bruit de mesure. Une forte valeur de $\det [J^T J]$ permet de minimiser l'effet du bruit de mesure. Il est à noter que cette relation n'est valide que si le bruit est une variable aléatoire :

- additive,
- de moyenne nulle,
- σ_b constant,
- non corrélé.

2.5.2 La modélisation inverse : Le cas non linéaire

Dans le cas où le modèle direct est non-linéaire vis-à-vis du vecteur de paramètre P , noté $A(P)$, l'identification de paramètres doit se faire par une méthode itérative [Beck et Arnold, 1977, Ozisik, 2000]. Le principe consiste, ici, à linéariser le modèle $A(P)$ à chaque boucle pour pouvoir appliquer un algorithme de gradient similaire à l'équation 2.44. Pour chaque itération k le modèle est linéarisé par rapport à P à l'aide des séries de Taylor :

$$A(P) = A(P^k) + J^k(P - P^k) \quad (2.47)$$

En notant J^k la matrice de sensibilité à l'itération k et $\Delta P = P - P^k$, la variation du jeu de paramètres P , il est possible de redéfinir l'équation 2.41 pour chaque itération :

$$\mathcal{F}(\Delta P) = [J(\Delta P) - (\mathcal{M} - A(P^k))]^T [J(\Delta P) - (\mathcal{M} - A(P^k))] \quad (2.48)$$

La solution du problème à chaque itération k est donc :

$$P^{k+1} = P^k + [(J^k)^T J^k]^{-1} (J^k)^T [\mathcal{M} - A(P^k)] \quad (2.49)$$

L'équation 2.49 est appelée *algorithme de Gauss-Newton*. Encore une fois il convient de remarquer l'importance de la matrice de sensibilité à travers le terme $[J^T J]^{-1}$ impliquant d'ailleurs que le déterminant de ce terme soit largement supérieur à 0, sous peine d'avoir à

traiter des problèmes de conditionnement de matrice. Pour parer à des problèmes de stabilité de l'*algorithme de Gauss-Newton* il convient d'utiliser un algorithme alliant la méthode de descente de gradient exprimée équation 2.49 et l'*algorithme du gradient* [Cauchy, 1847]. Exposé en 1944 par Kenneth Levenberg et publié en 1963 par Donald Marquardt, l'*algorithme de Levenberg-Marquardt* décrit une méthode plus robuste que l'*algorithme de Gauss-Newton* [Levenberg, 1944, Marquardt, 1963] :

$$P^{k+1} = P^k + [(J^k)^T J^k + \mu^k \Omega^k]^{-1} (J^k)^T [\mathcal{M} - A(P^k)] \quad (2.50)$$

où le paramètre μ^k est appelé paramètre d'amortissement et Ω^k est une matrice diagonale, originellement $\Omega^k = \text{diag} [(J^k)^T J^k]$. Si le pas $\Delta P = P^{k+1} - P^k$ est faible alors le paramètre d'amortissement est augmenté et fait tendre l'équation vers l'*algorithme du gradient*. Si le pas est grand alors la méthode se rapproche de l'équation 2.49. Noter que le terme $\mu^k \Omega^k$ est présent pour amortir les grandes valeurs de $J^T J$ lorsque le problème est mal conditionné pour un jeu de paramètres donné (i.e $\det ([J^T J])$ faible). Plusieurs critères d'arrêt sont utilisables [Ozisik, 2000], et pour son application numérique il est conseillé de définir un critère d'arrêt k_{max} . En 1977 Jorge Moré développe une nouvelle implémentation de l'*algorithme de Levenberg-Marquardt* où la matrice Ω^k est la matrice identité [Moré, 1977], c'est cette version de l'*algorithme de Levenberg-Marquardt* qui est souvent mise en œuvre dans les différents logiciels de calcul tel Matlab ®.

Dans le cas d'un problème *mal posé* [Hadamard, 1902] la question de la régularisation du problème pour en assurer la continuité et l'unicité se pose. Il apparaît après développement que l'*algorithme de Levenberg-Marquardt* implémente une régularisation non pas autour d'un estimé *a priori* P_0 , mais autour de la variable linéarisée ΔP [Marquardt, 1963]. Une discussion autour de la propriété de "régularisation" de l'*algorithme de Levenberg-Marquardt* vis-à-vis de la régularisation de Tikhonov est d'ailleurs proposée dans [Fang, 2004]. Ici, et dans un certain nombre de procédures de contrôle non destructif, l'absence de connaissance *a priori* peut rendre difficile l'utilisation de la régularisation de Tikhonov. Il est cependant possible d'utiliser la régularisation de Tikhonov et l'*algorithme de Levenberg-Marquardt*.

Tout comme pour la minimisation d'un modèle linéaire, il est possible de définir à partir de l'équation 2.50 la matrice des covariances de l'estimateur des paramètres \hat{P} , à la différence près qu'il est nécessaire de prendre en compte les résidus d'estimation présents même sans bruit de mesure, $A(P_{reels}) - A(\hat{P}) \neq 0$. Ces résidus d'estimation trahissent la présence d'un modèle non-linéaire lorsqu'ils sont dit signés [Beck et Arnold, 1977]. Ainsi, l'équation 2.46 devient :

$$\text{cov}(\hat{P}) = [J^T J]^{-1} MSQR \quad (2.51)$$

où $MSQR$ est la moyenne quadratique de la somme des résidus défini par :

$$MSQR = \frac{\sum_{i=1}^{NbMesures} (A(\hat{P})_i - \mathcal{M}_i)^2}{NbMesures} \quad (2.52)$$

Dans le cas d'un modèle inverse linéaire ou présentant de faibles résidus alors, $MSQR$ tends vers σ_b^2 . Dans les cas où le bruit ne satisfait pas les conditions présentées précédemment un certain nombre de techniques existent pour calculer le biais de la méthode d'estimation. L'estimateur de Gauss-Markov est l'une d'entre elles [Orlande et al., 2011].

2.5.3 Étude de l'inversion du modèle quadripolaire

Après avoir introduit le principe de modèle inverse ainsi que les méthodes de résolution, cette partie présente le développement d'une méthode inverse permettant le contrôle non destructif d'un système multi-couches épais. Le modèle inverse est ensuite analysé selon la méthode dite du "crime inverse"[‡], en prenant en considération des défauts présentant des comportements caractéristiques identifiés par l'analyse de sensibilité, pour caractériser le biais de la méthode d'estimation.

Tout d'abord le modèle direct quadripolaire et le système étudié section 2.4, sont rappelés équation 2.53 et figure 2.23.

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^{i=n} M_i \begin{pmatrix} \theta_{x_n=e_n} \\ \tilde{\varphi}_{x_n=e_n} \end{pmatrix} \quad \forall i$$

$$M_i = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i & \frac{1}{\sqrt{\frac{p}{\alpha_i}}} \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i \\ \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} k_i \sinh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i & \cosh \sqrt{\frac{p}{\alpha_i}} e_i \end{pmatrix} \quad i \in \llbracket 1, 2, 4 \rrbracket \quad (2.53)$$

$$M_i = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{p} b_i R_i & \frac{1}{b_i \sqrt{p}} \sinh \sqrt{p} b_i R_i \\ b_i \sqrt{p} \sinh \sqrt{p} b_i R_i & \cosh \sqrt{p} b_i R_i \end{pmatrix} \quad i = 3$$

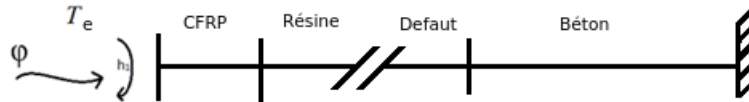


FIGURE 2.23 – Système 1D étudié

Les conditions limites du modèle quadripolaire sont définies par :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= h (T_{ext} - T_1) + \varphi_0 \\ \varphi_{x_n=e_n} &= 0 \end{aligned} \quad (2.54)$$

où $h = 10 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ est le coefficient d'échange convectif traduisant une condition de convection naturelle à la surface du système et φ_0 est la densité de flux d'excitation direct. Comme précédemment deux excitations différentes sont étudiées, dans un premier temps le système est soumis à une excitation par distribution de Dirac où $Q_0 = 6400 \text{ J}$. La deuxième excitation est un créneau d'une durée de $t_c = 30 \text{ s}$ avec $\varphi_0 = 2000 \text{ W.m}^{-2}$. Dans les deux cas le système est observé durant un temps $t_o = 100 \text{ s}$.

Dans le cas du contrôle non destructif de structures de génie civil réparées par collage composite, il est nécessaire d'estimer l'épaisseur de la deuxième couche ainsi que les propriétés d'un éventuel défaut. Ainsi, le vecteur de paramètres à estimer est constitué de trois éléments

[‡]Cas particulier de l'estimation de paramètres où le modèle est utilisé pour générer les mesures

$P = [e_2, R_3, b_3]$. Cette section propose d'étudier le biais de la méthode d'estimation ; dans cet objectif le modèle présenté équation 2.53, est utilisé pour générer des mesures, le reste de l'analyse porte sur le vecteur estimé \hat{P} ainsi que sur les résidus d'estimation. Les mesures sont générées pour un ensemble de matériaux présentés tableau 2.10.

Matériaux	k W/m.K	ρ kg/m ³	C J/kg.K	R W/K	b W.√s/m ² .K	b_{cfrrp}/b	b_{epoxy}/b	e mm
Première couche								
CFRP	0.7	1530	840	0.0017	948.5	1	0.57	1.2
Deuxième couche								
Résine époxy	0.2	1200	1220	0.0050	542.5	1.75	1	1
Troisième couche								
Béton	1.8	2300	920	∞	1951	0.48	0.27	100
Défauts considérés								
Bois	0.15	600	1900	0.0067	413.5	2.29	1.31	1
Acier	15.1	8055	480	6.62e ⁻⁵	7640.9	0.12	0.07	"
Liège	0.039	120	1800	0.0256	91.8	10.33	5.91	"
Eau	0.6	1000	4185	0.0017	1582.6	0.60	0.34	"
Air	0.0242	1.225	1006	0.0413	5.5	173.6	99.31	"

TABLE 2.10 – Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés

Les matériaux ont été choisis suivant leur ratio d'effusivité vis-à-vis de la couche époxy ainsi que pour leur comportement singulier étudié lors de l'analyse de sensibilité (c.f. l'eau). Un cas d'étude supplémentaire a été analysé, il consiste à estimer le vecteur des paramètres P dans une zone saine (défaut → époxy). Il convient de vérifier ce que l'étude de sensibilité tend à montrer :

$$\hat{P}_{zonesaine} = [\hat{e}_2 \rightarrow 2e_2, \hat{R}_3 \rightarrow 0, \hat{b}_3 \rightarrow 0]$$

avec $2e_2 = e_2 + e_3$.

L'algorithme de *Levenberg-Marquardt*, défini équation 2.50, est utilisé pour minimiser la fonctionnelle $\mathcal{F}(P)$ du modèle inverse. Les figures 2.24 et 2.25 présentent les mesures non bruitées générées par le modèle pour chacun des matériaux ainsi que les résidus de la procédure d'estimation pour les deux excitations considérées.

Noter que l'algorithme de *Levenberg-Marquardt* a été initialisé avec un vecteur de paramètres $P_{init} = [0.001, 0.01, 0.1]$. Les résidus d'estimation présentés figure 2.25 indiquent le comportement non-linéaire du modèle inverse [Beck et Arnold, 1977]. Il est également intéressant de remarquer que bien que les résidus soient *signés*, leur propension à osciller autour de 0 tend à s'amortir avec l'augmentation du ratio d'effusivité, indiquant par là même que le biais de la méthode d'estimation est inversement proportionnel au ratio d'effusivité. La présence d'un biais signifie qu'il est possible de calculer la matrice de covariance de l'estimateur des paramètres \hat{P} donnant ainsi accès à l'écart type de cet estimateur, équation 2.51. Bien qu'il ne soit pas prouvé que le biais seul du modèle respecte les conditions d'utilisation de l'équation 2.51 le calcul de l'écart type de l'estimateur des paramètres sans bruit de mesure donne l'ordre de grandeur du biais de la procédure seule. Les tableaux 2.11 et 2.12 présentent les résultats de la procédure d'estimation, à savoir l'estimateur \hat{P} , l'écart type de l'estimateur σ et l'erreur relative sur l'estimation en %.

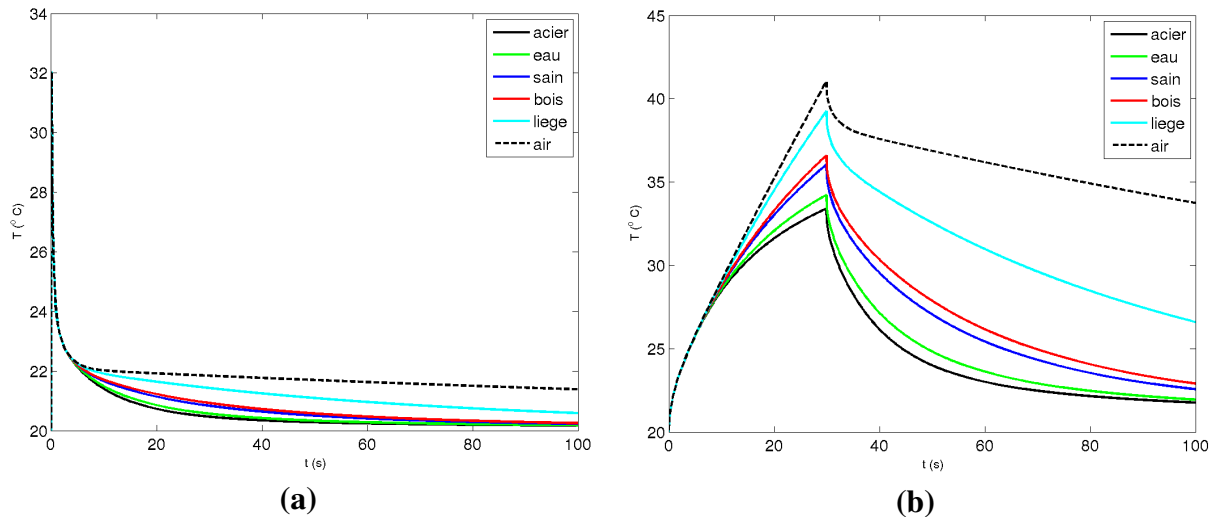


FIGURE 2.24 – Thermogrammes, (a) Dirac , (b) Créneau

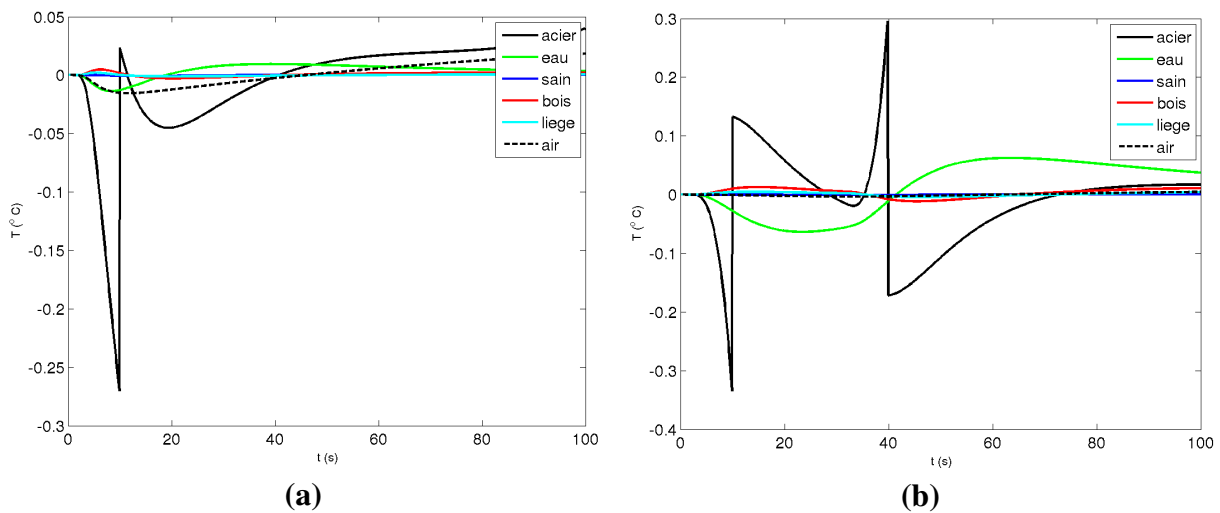


FIGURE 2.25 – Résidus de la procédure d'estimation, (a) Dirac , (b) Créneau

Conformément aux conclusions de l'analyse de sensibilité, l'estimation de l'effusivité b_3 est erronée et ce quand bien même l'initialisation de l'algorithme de minimisation est proche de la valeur optimale. Il apparaît dans ces résultats que le créneau tend à réduire l'écart type et l'erreur relative sur l'estimateur des paramètres \hat{P} . Les matériaux à faible ratio d'effusivité présentent une forte erreur relative sur l'estimateur de la résistance thermique R_3 tout en ayant un faible écart-type, cette observation traduit la faible sensibilité (et donc la faible influence d'une erreur d'estimation) du modèle à ce type de défaut. Enfin, il est encourageant pour la suite d'observer que l'erreur relative sur l'épaisseur de la couche de colle époxy tend vers 100%, démontrant ainsi que la configuration quatre couches du modèle quadripolaire est apte à caractériser un système sain tri-couches, confirmant les observations de l'analyse de sensibilité, $\hat{P}_{zonesaine} = [\hat{e}_2 \rightarrow 2e_2, \hat{R}_3 \rightarrow 0, \hat{b}_3 \rightarrow 0]$. Cette observation est d'autant plus valide avec l'excitation créneau. En revanche les matériaux à faible ratio d'effusivité présentent un comportement similaire ce qui confirme que la procédure d'estimation est mise en défaut en présence d'un défaut de type acier. L'eau dont l'étude des corrélations, section 2.4, avait mis en lumière un comportement particulier est à exclure de cette dernière observation. La présence d'un écart type d'estimation dénote le biais de la méthode, il est intéressant d'étudier l'évolution

Matériaux	\hat{e}_2		\hat{R}_3		\hat{b}_3	
	$\hat{P} \pm \sigma$ mm	err %	$\hat{P} \pm \sigma$ w/K	err %	$\hat{P} \pm \sigma$ w. $\sqrt{s/m^2.K}$	err %
Acier	$0.0024 \pm 8.67 \times 10^{-6}$	140	≈ 0	\approx	0.1129 ± 2.8	> 100%
Eau	$0.0011 \pm 3.99 \times 10^{-6}$	10	≈ 0	\approx	0.1172 ± 0.66	> 100%
Époxy (sain)	$0.0018 \pm 2.48 \times 10^{-6}$	80	$7.3 \times 10^{-4} \pm 1.11 \times 10^{-5}$	85	0.107 ± 0.013	> 100%
Bois	$0.0014 \pm 1.09 \times 10^{-6}$	40	$0.0046 \pm 4.58 \times 10^{-6}$	31	0.1043 ± 0.020	> 100%
Liège	$0.0011 \pm 9.15 \times 10^{-8}$	10	$0.0252 \pm 1.75 \times 10^{-6}$	1	0.0841 ± 0.032	> 100%
Air	$0.001 \pm 1.19 \times 10^{-10}$	0	$0.0413 \pm 5.54 \times 10^{-6}$	0	$0.0807 \pm 5.40 \times 10^{-5}$	> 100%

TABLE 2.11 – Résultats de la procédure d'estimation excitation Dirac

Matériaux	\hat{e}_2		\hat{R}_3		\hat{b}_3	
	$\hat{P} \pm \sigma$ mm	err %	$\hat{P} \pm \sigma$ w/K	err %	$\hat{P} \pm \sigma$ w. $\sqrt{s/m^2.K}$	err %
Acier	$0.0018 \pm 1.52 \times 10^{-5}$	80	≈ 0	\approx	0.1129 ± 2.05	> 100%
Eau	$0.0011 \pm 9.19 \times 10^{-6}$	10	$5.11 \times 10^{-6} \pm 4.19 \times 10^{-5}$	99	0.1172 ± 1.12	> 100%
Époxy (sain)	$0.0019 \pm 1.03 \times 10^{-6}$	90	$3.24 \times 10^{-4} \pm 4.71 \times 10^{-6}$	93	0.107 ± 0.002	> 100%
Bois	$0.0014 \pm 6.65 \times 10^{-7}$	40	$0.0046 \pm 2.66 \times 10^{-6}$	32	0.1043 ± 0.06	> 100%
Liège	$0.0011 \pm 4.91 \times 10^{-8}$	10	$0.0252 \pm 9.28 \times 10^{-7}$	1.56	0.0841 ± 0.12	> 100%
Air	$0.001 \pm 8.23 \times 10^{-11}$	0	$0.0413 \pm 4.06 \times 10^{-9}$	0	$0.0909 \pm 8 \times 10^{-5}$	> 100%

TABLE 2.12 – Résultats de la procédure d'estimation excitation Créneau

du biais lorsque la procédure est appliquée sur des mesures elles-mêmes biaisées.

Une étude sur le comportement de la procédure d'estimation de paramètres sur des mesures bruitées $\sigma_b \in [0; 0.45]$ par pas de $0.5^\circ C$ est présentée annexe IV figures 27 et 28. Cette mosaïque de figures permet de résumer graphiquement les tableaux de résultats 2.11 et 2.12, et de répéter l'opération pour un bruit de mesure d'écart type croissant. Le comportement des différentes erreurs relatives ainsi que des écarts types d'estimation peut être analysé en fonction du ratio d'effusivité et du bruit de mesure. Après analyse il peut être remarqué que l'erreur relative de l'estimateur \hat{P} identifié avec l'excitation créneau présente un certaine régularité vis-à-vis du

bruit, contrairement à la procédure utilisant l'excitation par distribution de Dirac. Pour cette dernière il apparaît que l'ordre de grandeur de $\sigma_{\hat{P}}$ est équivalent à \hat{P} en présence de bruit, c-à-d autour de 10^{-3} pour e_2 et 10^{-2} pour R_3 . En revanche, le comportement du biais de la procédure pour l'excitation créneau vis-à-vis du bruit de mesure, par exemple $\sigma_{\hat{R}_3}^i(\sigma_b)$ où i est un ratio d'effusivité donné, apparaît suivre une loi affine du moins lorsque $\frac{b_2}{b_3} > 1$.

La figure 2.26 présente l'évolution de l'augmentation du biais de la méthode en fonction du bruit de mesure dans le cas du créneau :

$$\Delta\sigma_{\hat{P}}(\sigma_{b_{n+1}}) = \sigma_{\hat{P}}(\sigma_{b_{n+1}}) - \sigma_{\hat{P}}(\sigma_{b_n}) \quad (2.55)$$

où $n \in \llbracket 1; N-1 \rrbracket$ et N le nombre de pas de bruit étudié.

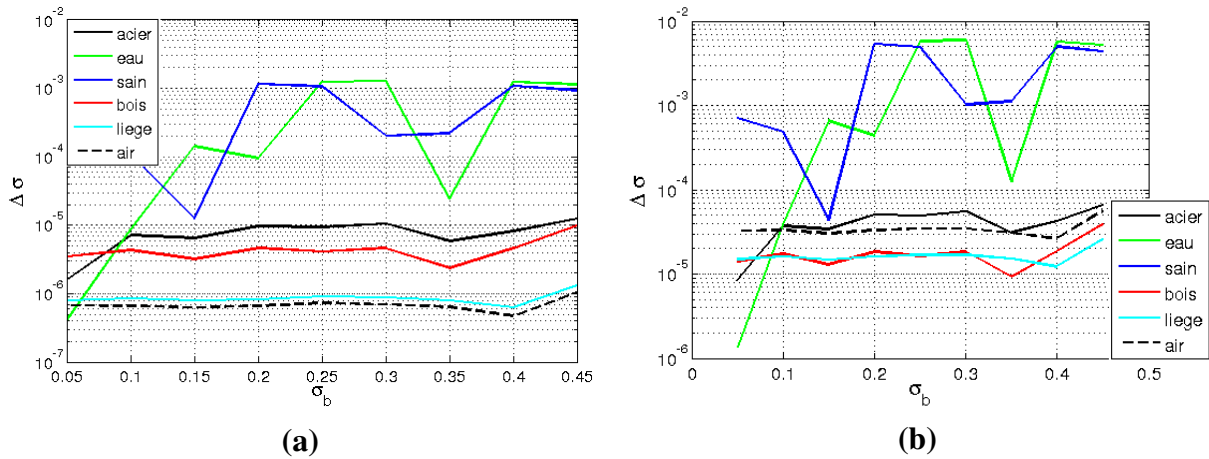


FIGURE 2.26 – Excitation Créneau : (a) Évolution de $\Delta\sigma_{\hat{e}_2}(\sigma_b)$ (b) Évolution $\Delta\sigma_{\hat{R}_3}(\sigma_b)$

Dans cette section les bases de l'inversion de modèle pour l'estimation de paramètre ont été rappelées. Une procédure d'estimation utilisant un modèle inverse basé sur un modèle direct quadripolaire a été développée et analysée. L'analyse des résultats confirme ceux obtenus lors de l'analyse de sensibilité précédente.

La validité de l'hypothèse $\hat{P}_{zonesaine} = [\hat{e}_2 \rightarrow 2e_2, \hat{R}_3 \rightarrow 0, \hat{b}_3 \rightarrow 0]$ indique qu'un modèle quadri-couches est apte à caractériser des systèmes tri-couches, ce qui est un résultat important au regard du contexte d'application. Enfin l'excitation créneau présente une erreur relative et un écart-type de l'estimateur des paramètres stable vis-à-vis du bruit, l'étude a également montré le comportement linéaire $\hat{\sigma}_{\hat{P}}$ en fonction du bruit de mesure, toujours dans le cadre de l'excitation créneau. L'analyse a montré que pour ce type de systèmes l'excitation créneau apparaît plus justifiée, contrairement à ce qui a pu être observé sur les systèmes fins et monolithiques [Balageas et Roche, 2014, Roche et Balageas, 2014]. pour des niveaux d'énergie raisonnable.

La section suivante introduit le dispositif expérimental destiné à valider les observations précédentes, et détaille les résultats de la procédure d'estimation appliquée à des mesures obtenues par ThIr sur des échantillons.

2.6 Systèmes étudiés et banc expérimental

La réparation des structures de génie civil par collage de matériaux composites fait apparaître des systèmes multi-couches épais. Pour les besoins de l'étude deux échantillons ont été réalisés. Les échantillons *Car I* et *Car II* ont été fabriqués dans le cadre d'une coopération de recherche

avec le MIVIM (Multipolar Infrared Vision Infrarouge Multipolaire)[§] de l'université de Laval Québec (Canada). La figure 2.27 présente les deux échantillons *Car I* et *Car II*. D'autres échantillons, non présentés ici, ont été réalisés dans le cadre d'autres projets, dont le projet MAREO [Schoefs *et al.*, 2011].

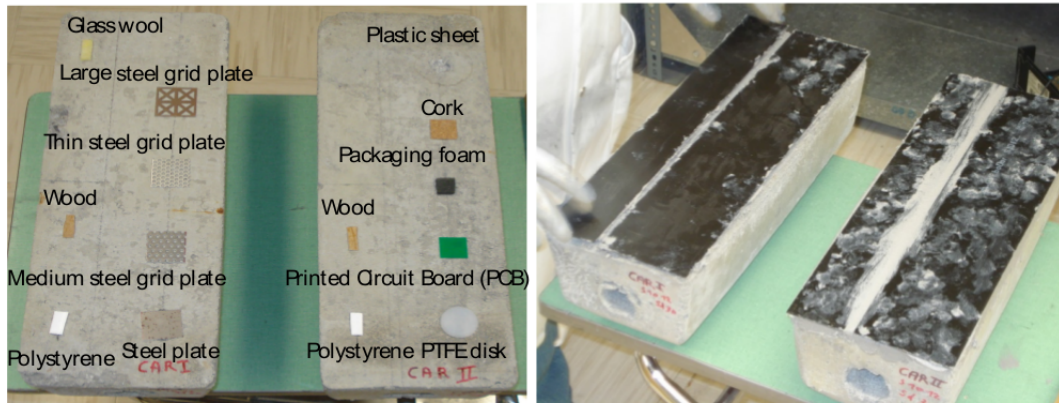


FIGURE 2.27 – Échantillons *Car I* et *Car II*

La zone saine des échantillons *Car I* et *Car II* constitue un système tri-couche, à savoir une couche de matériaux composite (CFRP) fourni par SIKA-Canada[¶], une couche de colle et un support béton épais, les propriétés des couches du système sont présentées tableau 2.13.

	k W/m.K	ρ kg/m ³	C J/kg.K	R W/K	b W.√s/m ² .K	b_{cfrrp}/b	b_{epoxy}/b	e mm
Première couche								
CFRP	0.7	1530	840	0.0017	948.5	1	0.57	1.2
Deuxième couche								
Résine époxy	0.2	1200	1220	0.0050	542.5	1.75	1	≈ 2
Troisième couche								
Béton	1.8	2300	920	∞	1951	0.48	0.27	100

TABLE 2.13 – Propriétés thermophysiques utilisées

Les échantillons réalisés ont une épaisseur de colle variable, due aux conditions de fabrication et à l'inclusion de défauts. Ces variations sont d'ordre millimétrique et présentent une distribution irrégulière. Étant donné le manque de connaissances *a priori*, un modèle numérique 3D, figure 2.33, a été élaboré pour valider la méthode en amont, ce modèle sera présenté plus tard dans l'étude. Les propriétés thermophysiques des différents défauts sont présentées dans le tableau 2.4.

2.6.1 Banc expérimental

En raison de la forte épaisseur du support béton, la mesure par réflexion a été choisie (c.f. chapitre 1), figure 2.28

[§]<http://mivim.gel.ulaval.ca/> - consulté juillet 2014

[¶]<http://can.sika.com/> - consulté juillet 2014

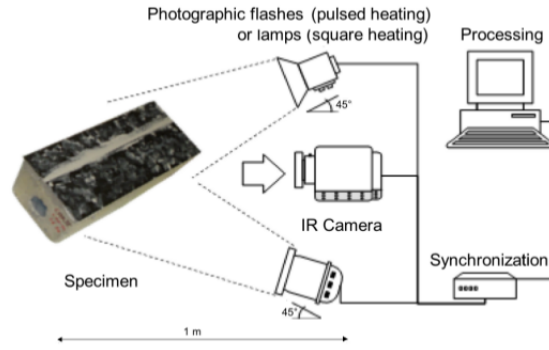
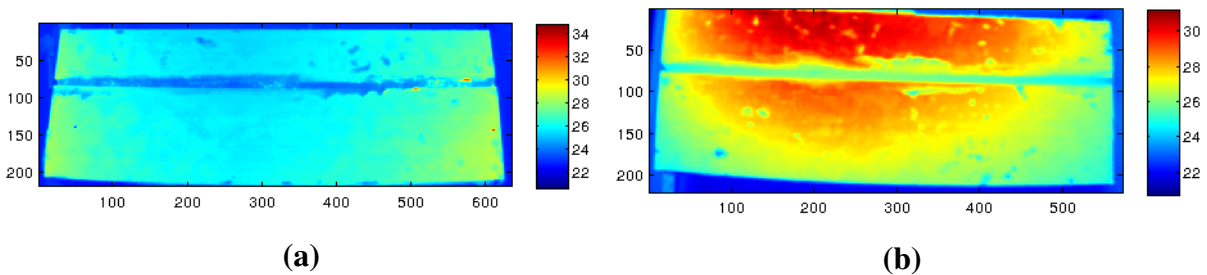


FIGURE 2.28 – Schéma du procédé de mesure

Conformément à l'ensemble de l'étude conduite jusqu'à présent deux formes d'excitation sont choisies. La première, dite impulsionnelle, correspond à une excitation par distribution de Dirac. Cette distribution est un objet théorique non transposable expérimentalement, elle est réalisée en utilisant deux spots BALCAR de 6400 J chacun, avec une durée d'illumination d'environ 10 ms. La seconde est l'excitation créneau où deux spots halogènes de 1000 W chacun chauffent les échantillons durant 30 s. Pour chacune des excitations le système de chauffage utilisé est incliné à 45° et situé à 1 m des échantillons. La mesure de la température de surface est effectuée par une Camera FLIR MWIR IRFPA Phœnix disposant d'une résolution de 640×512 pixels. La fréquence d'acquisition a été fixée à 22 Hz pour l'excitation impulsionnelle et 5.5 Hz pour le créneau. Ces fréquences ont été choisies afin d'optimiser le volume de donnée acquis. Enfin, la durée d'observation est de $t_o = 100s$. Les figures 2.29 et 2.30 présentent le champ thermique de surface au début de la relaxation thermique pour chacune des excitations, tandis que les figures 2.31 et 2.32 présentent les thermogrammes acquis en différents points de la surface de chaque échantillon.

FIGURE 2.29 – Champ de température de surface $t \approx 1s$ pour l'excitation impulsionnelle : (a) Car I. (b) Car II

L'état de surface des échantillons apparaît ici fortement dégradé. Cela est notamment dû au résidus de colle visibles figure 2.27

Il apparaît sur les figures 2.31 et 2.32 que les thermogrammes pris au dessus de zones défectueuses s'organisent en fonction de leur ratio d'effusivité autour du thermogramme en zone saine. Un comportement équivalent a été mis en lumière au cours des analyses présentées dans les paragraphes précédents.

2.6.2 Simulation Numérique

Le modèle numérique 3D, réalisé sous COMSOL®, est constitué de 133383 tétraèdres [Dumoulin *et al.*, 2010a]. Cette simulation servira à valider la procédure d'estimation sur un système

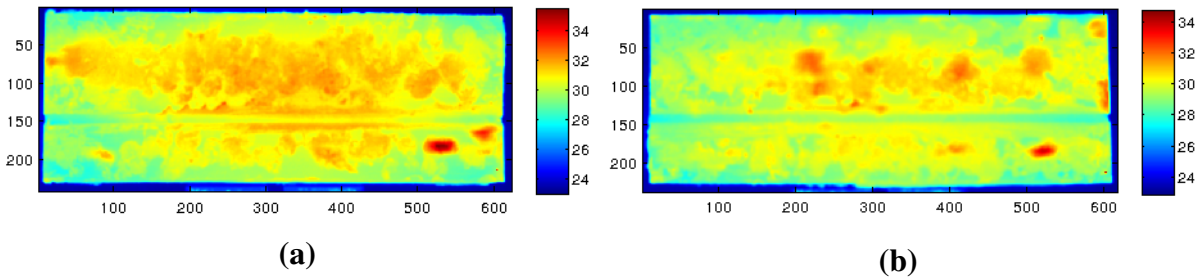


FIGURE 2.30 – Champ de température de surface $t \approx 31s$ pour l'excitation créneau : (a) *Car I*. (b) *Car II*

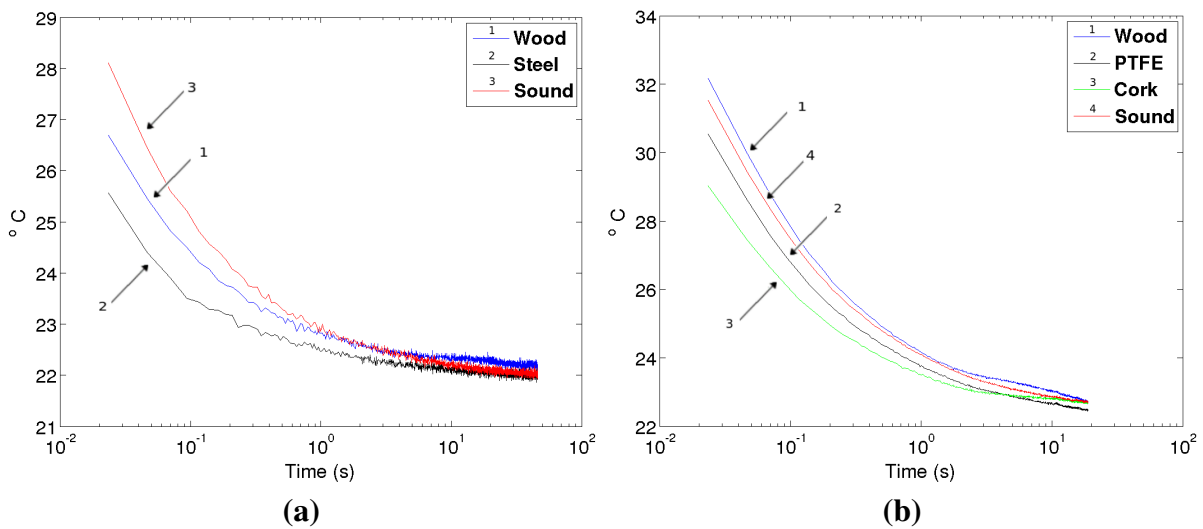


FIGURE 2.31 – Thermogrammes pour l'excitation impulsionnelle : (a) *Car I*. (b) *Car II*

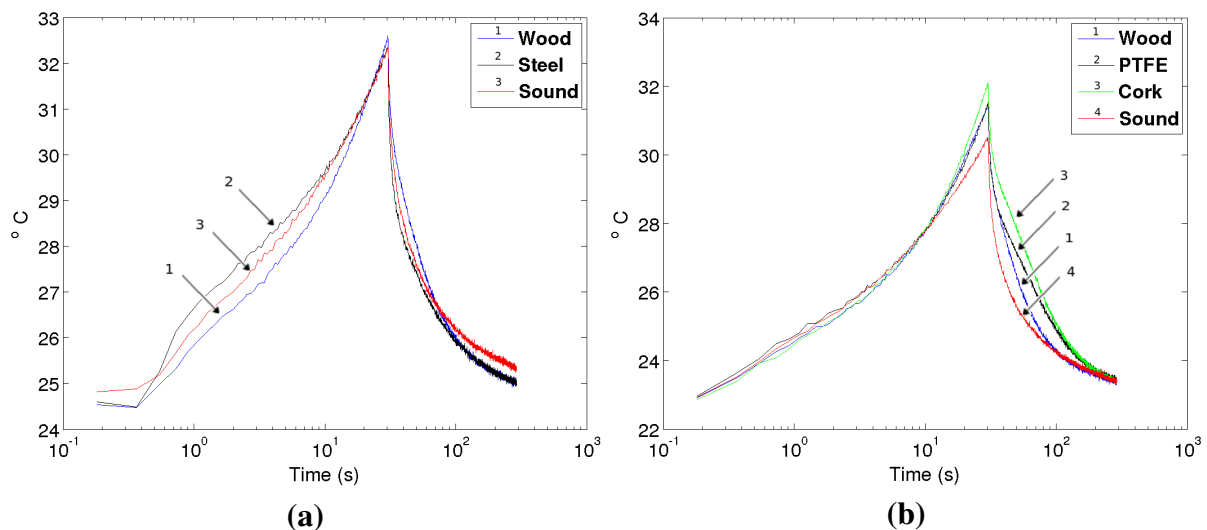


FIGURE 2.32 – Thermogrammes pour l'excitation créneau : (a) *Car I*. (b) *Car II*

tri-dimensionnel contrôlé, pour ensuite l'appliquer aux échantillons *Car I* et *Car II*.

Les matériaux utilisés dans le modèle numérique et les échantillons sont présentés tableau 2.10. La figure 2.34 présente l'agencement des couches de matériaux au sein du modèle numé-

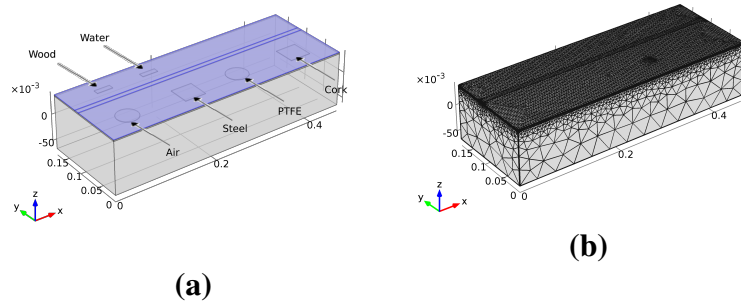


FIGURE 2.33 – Modèle numérique aux éléments finis

rique.

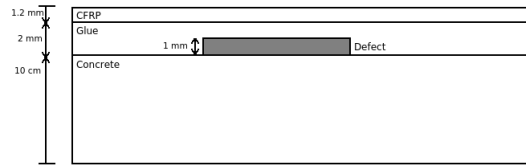


FIGURE 2.34 – Schéma du système étudié

Cette organisation des couches du modèle numérique a été choisie conformément au procédé de fabrication des échantillons *Car I* et *Car II*. Les mesures sont générées numériquement par extraction de la température en tout point de la surface, $\partial\Omega$ du modèle. Une condition de flux nul est appliquée sur toutes les autres surfaces $\Gamma\Omega$ du modèle, équation 2.57.

$$\begin{aligned} nk \frac{\partial T}{\partial x} &= h (T_{ext} - T_{\partial\Omega}) \varphi_0(t) \quad \forall x \in \partial\Omega; t > 0 \\ nk \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 \quad \forall x \in \Gamma\Omega; t > 0 \\ T_{init} &= 20^\circ C \quad \forall x; t = 0 \end{aligned} \quad (2.56)$$

où $T_{ext} = 20^\circ C$ est la température extérieure et $h = 10 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ est le coefficient d'échange à la paroi. Afin de se rapprocher des conditions expérimentales, figure 2.28, les moyens de chauffage sont aussi simulés. Les spots BALCAR utilisés pour l'excitation impulsionnelle sont modélisés par l'équation 2.58

$$\begin{aligned} f(t) &= 1 - \exp\left(\frac{-t}{0.0001}\right) \quad \forall t < 0.01s \\ f(t) &= 1 - \exp\left(\frac{-t-0.01}{0.0001}\right) \quad \forall t > 0.01s \\ \varphi_0(t) &= 6400 \times f(t) \quad \forall t \end{aligned} \quad (2.57)$$

Ainsi, la densité de flux thermique apportée à la frontière du modèle numérique par l'excitation Dirac est $\varphi_0 = 640000 \text{ Wm}^{-2}$ quand $t \leq 0.01s$. L'excitation créneau est, elle, modélisée par une densité de flux $\varphi_0 = 2000 \text{ W.m}^{-2}$ appliquée durant 30 s à la frontière du modèle numérique. Les figures 2.35 et 2.36 présentent le champ de température de surface au début de la phase de relaxation et les thermogrammes acquis à la frontière du modèle pour les deux excitations considérées.

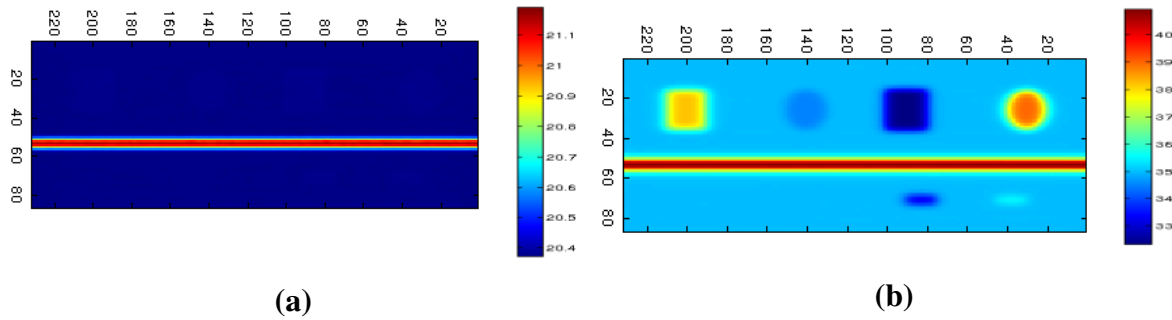


FIGURE 2.35 – Champ de température de surface durant la relaxation thermique, axes en pixel : (a) Excitation impulsionnelle. (b) Excitation créneau

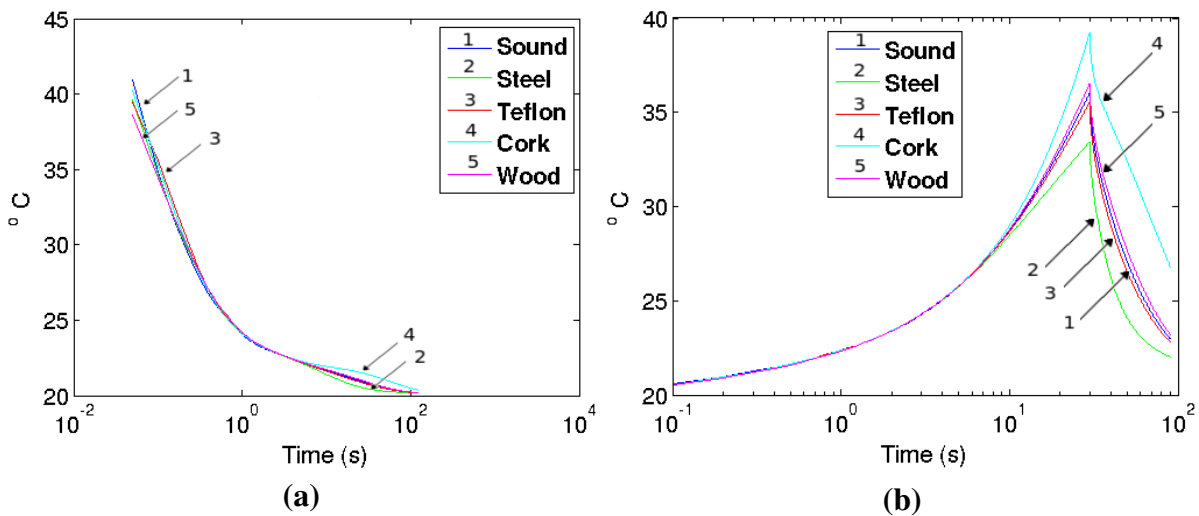


FIGURE 2.36 – Thermogrammes à la surface du modèle numérique : (a) Excitation impulsionnelle. (b) Excitation créneau

2.7 Résultats de la procédure d'estimation de paramètres

2.7.1 Résultats sur les données simulées

Dans un premier temps afin de valider les précédentes observations, l'étude porte sur l'analyse du modèle inverse présenté section 2.5 sur les données issues du modèle numérique présenté figure 2.33. Cette simulation doit permettre d'étudier dans des conditions se rapprochant de mesures réelles, les conclusions obtenues section 2.1.1, 2.3 et 2.4. Les mesures utiles à la procédure d'estimation de paramètres sont extraites au centre de chaque zone défectueuse, ceci afin de respecter les conditions de validité du modèle présentées section 2.3. Les figures 2.37 et 2.38 affichent les résidus de la procédure d'estimation pour chaque excitation avec et sans bruit de mesure. Le bruit de mesure ajouté numériquement aux simulations est un bruit blanc de moyenne nulle et d'écart type $\sigma_b = 0.5$ °C.

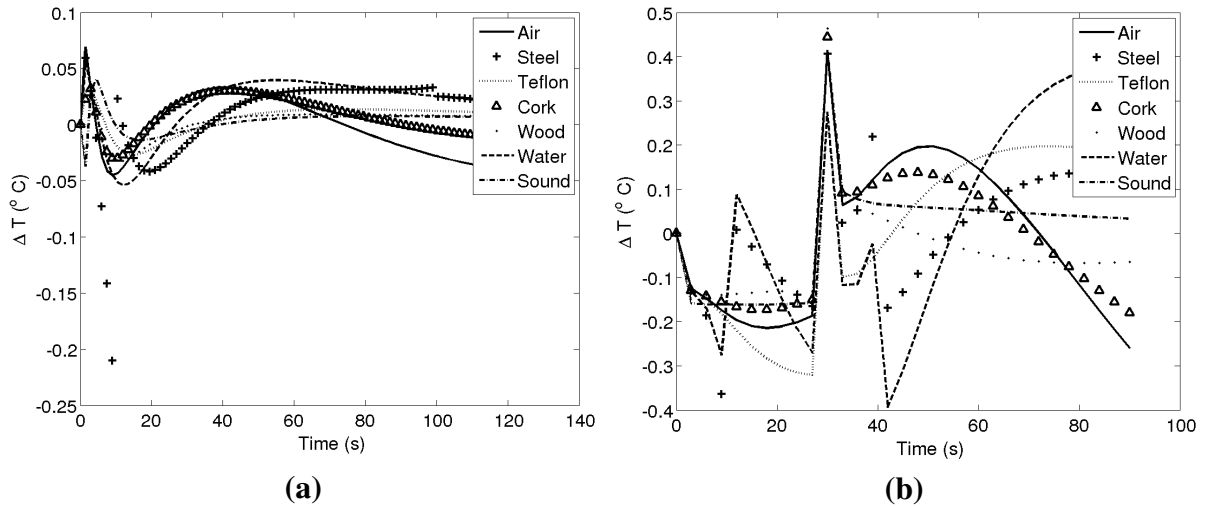


FIGURE 2.37 – Résidus de la procédure d'estimation : (a) excitation impulsionnelle (b) excitation créneau

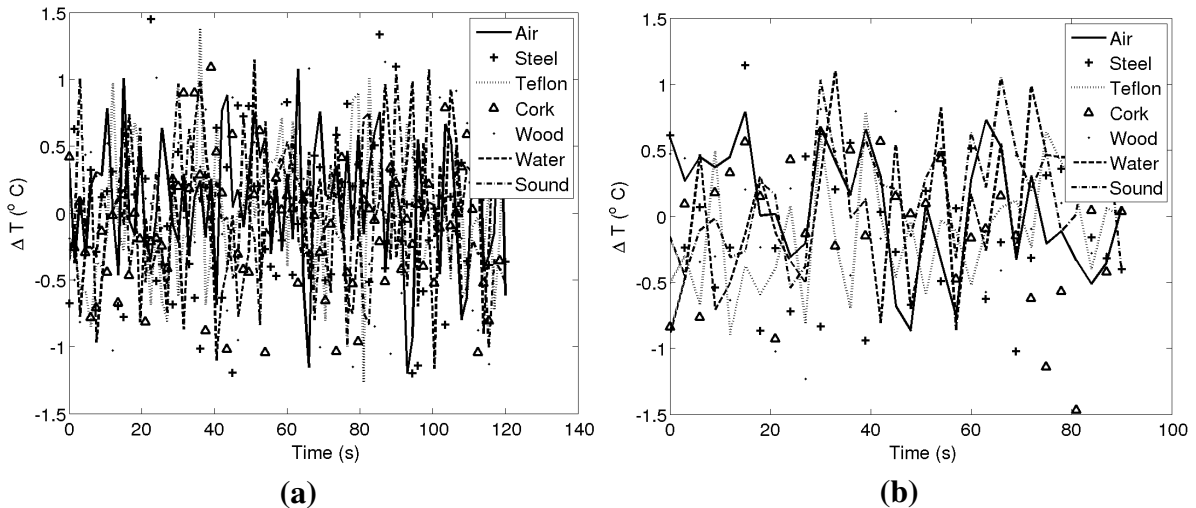


FIGURE 2.38 – Résidus de la procédure d'estimation en présence de bruit de mesure : (a) excitation impulsionnelle (b) excitation créneau

Les résidus, bien qu'ils présentent les mêmes caractéristiques que ceux étudiés section 2.5, disposent ici d'une dynamique plus forte. Ce changement de comportement transcrit ici l'erreur intrinsèque du modèle appliqué sur des données issues d'une modélisation tri-dimensionnel, section 2.3. Le tableau 2.14 présente les résultats de la procédure d'estimation.

Dé-fauts	Données brutes		Données bruités $\sigma_b = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$R_3 \pm \sigma$ W.K ⁻¹	$e_2 \pm \sigma$ mm	$R_3 \pm \sigma$ W.K ⁻¹	$e_2 \pm \sigma$ mm
Excitation impulsionnelle				
Air	$0.032 \pm 1.7 \times 10^{-4}$ (21%)	$0.85 \pm 6.25 \times 10^{-6}$ (14%)	$0.034 \pm 9.1 \times 10^{-4}$ (17%)	$0.95 \pm 3.3 \times 10^{-5}$ (4.3%)
Acier	$0.0019 \pm 1.18 \times 10^{-4}$ (> 100%)	$0.43 \pm 2.75 \times 10^{-5}$ (56%)	$0.0032 \pm 2.56 \times 10^{-4}$ (> 100%)	$0.17 \pm 5.49 \times 10^{-5}$ (82%)
PTFE	$5.5 \times 10^{-6} \pm 3.03 \times 10^{-4}$ (99%)	$1.8 \pm 6.7 \times 10^{-5}$ (83%)	$9.8 \times 10^{-5} \pm 0.0097$ (97%)	1.69 ± 0.0021 (69%)
Liège	$0.0226 \pm 1.55 \times 10^{-4}$ (11%)	$0.97 \pm 9.7 \times 10^{-6}$ (3%)	$0.0232 \pm 7.19 \times 10^{-4}$ (9%)	$0.98 \pm 4.53 \times 10^{-5}$ (1.08%)
Bois	$0.0051 \pm 1.20 \times 10^{-4}$ (22%)	$1.15 \pm 2.77 \times 10^{-5}$ (15%)	$0.005 \pm 5.52 \times 10^{-4}$ (18.6%)	$0.97 \pm 1.22 \times 10^{-4}$ (2.07%)
Eau	$1.15 \times 10^{-4} \pm 0.00134$ (93%)	$1.33 \pm 2.89 \times 10^{-4}$ (33%)	$5.6 \times 10^{-5} \pm 0.0026$ (96%)	$1.25 \pm 5.59 \times 10^{-4}$ (25.8%)
Zone saine	0.0031 (37%)	1.34 (34%)	0.0034 (31%)	1.31 (31%)
Excitation créneau				
Air	$0.032 \pm 8.05 \times 10^{-5}$ (20%)	$0.94 \pm 2.3 \times 10^{-6}$ (5.8%)	$0.0324 \pm 2.4 \times 10^{-4}$ (20%)	$0.94 \pm 7.62 \times 10^{-6}$ (5%)
Acier	$2.75 \times 10^{-5} \pm 0.0021$ (58%)	$0.8 \pm 4.46 \times 10^{-4}$ (16%)	$1.3 \times 10^{-5} \pm 0.0104$ (80%)	0.85 ± 0.0023 (14%)
PTFE	$3.6 \times 10^{-6} \pm 2.45 \times 10^{-4}$ (100%)	$1.7 \pm 5.36 \times 10^{-5}$ (74%)	$8.2 \times 10^{-7} \pm 3.75 \times 10^{-4}$ (100%)	$1.8 \pm 8.08 \times 10^{-5}$ (75%)
Liège	$0.00225 \pm 3.8 \times 10^{-5}$ (12%)	$1.01 \pm 2.29 \times 10^{-6}$ (1%)	$0.0226 \pm 1.54 \times 10^{-4}$ (11%)	$1.01 \pm 9.2 \times 10^{-6}$ (1%)
Bois	$0.004 \pm 3.6 \times 10^{-5}$ (40%)	$1.4 \pm 9.08 \times 10^{-6}$ (38%)	$0.0039 \pm 1.83 \times 10^{-4}$ (41%)	$1.2 \pm 4.63 \times 10^{-5}$ (24%)
Eau	$6 \times 10^{-7} \pm 9.2 \times 10^{-5}$ (100%)	$1.2 \pm 2 \times 10^{-5}$ (24%)	$9.8 \times 10^{-6} \pm 2.04 \times 10^{-4}$ (99%)	$1.2 \pm 4.62 \times 10^{-5}$ (24%)
Zone saine	≈ 0	$2 \pm \times 10^{-4}$ (100%)	≈ 0	2 (100%)

TABLE 2.14 – Résultats de la procédure d'estimation appliquée aux données issues du modèle numérique

Comme observé sur les résultats de l'analyse précédente, il apparaît que l'erreur relative et l'écart-type de l'estimateur des paramètres \hat{P} est inversement proportionnelle au ratio d'effusivité. De plus, l'excitation créneau présente la même stabilité vis-à-vis du bruit de mesure. Afin de simplifier l'analyse, les résultats de la procédure d'estimation sont compilés figure 2.39, les écarts-type des estimateurs des paramètres \hat{e}_2 et \hat{R}_3 ont été reportés sur l'erreur relative d'estimation. Pour l'analyse il est nécessaire de garder à l'esprit qu'une forte erreur relative sur \hat{R}_3 n'a pas le même impact sur un défaut avec un fort ratio d'effusivité, $R_3 \approx 10^{-2}$, et sur un défaut à faible ratio d'effusivité $\hat{R}_3 < 10^{-3}$. Sans visualisation du contraste thermique, il est difficile de discriminer la présence d'un défaut à faible ratio d'effusivité de l'absence total de défaut.

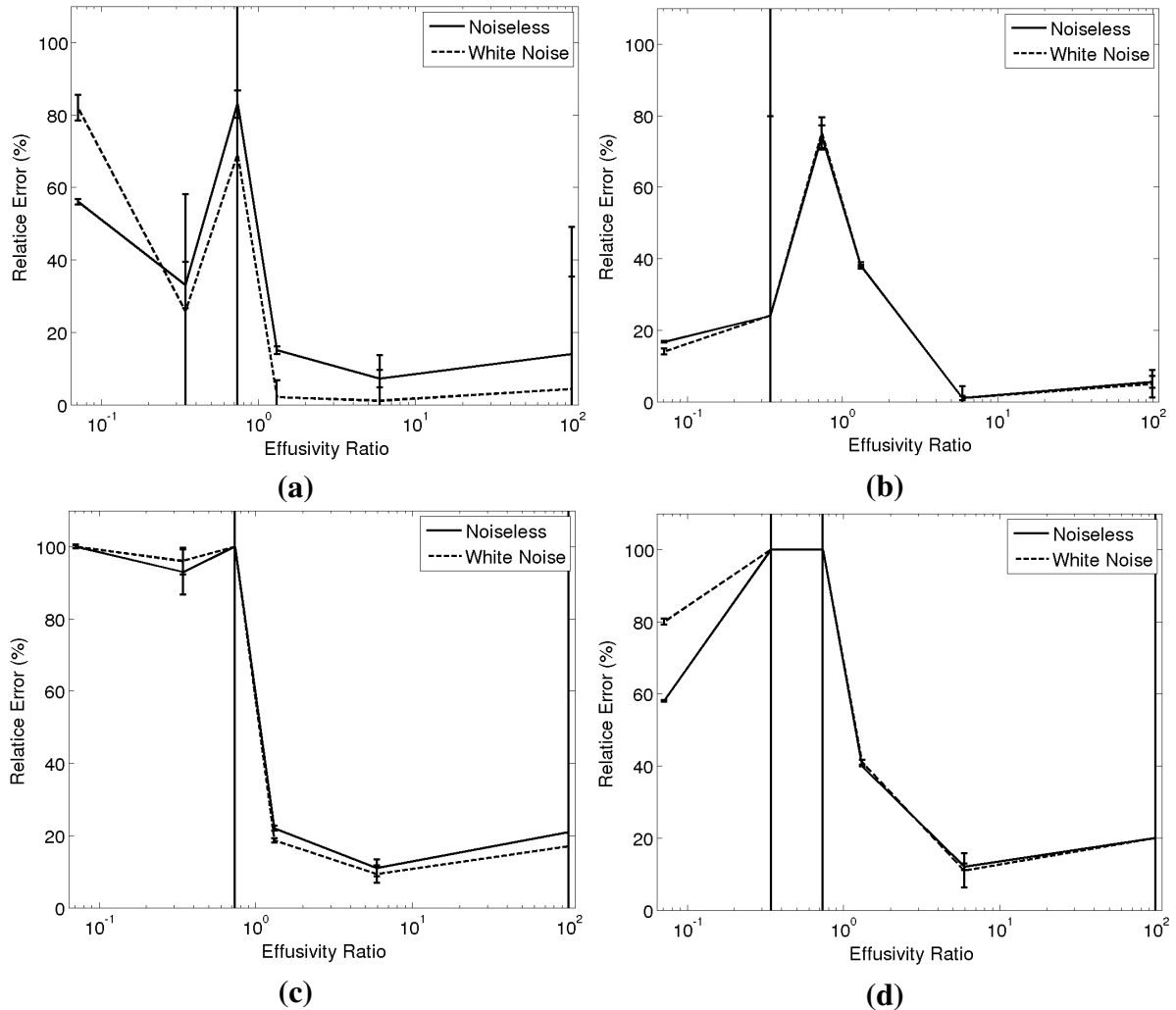


FIGURE 2.39 – Résultats de la procédure d'estimation

Excitation impulsionnelle : (a) \hat{e}_2 (c) \hat{R}_3

Excitation créneau : (b) \hat{e}_2 (d) \hat{R}_3

Les courbes présentent un comportement similaire à celui étudié section 2.5. Le fort écart type observé pour l'estimation de la résistance thermique d'un défaut d'air (extremum du ratio d'effusivité), peut s'expliquer par la faible valeur de R_3 qui conduit pour un faible écart à une erreur relative importante. La stabilité de l'excitation créneau vis-à-vis du bruit de mesure apparaît encore une fois ici. De plus, l'estimation de l'épaisseur de colle pour une excitation créneau conduit à des valeurs cohérentes y compris pour les défauts à faible ratio d'effusivité. Remarquer que l'eau et l'air affichent un comportement atypique, la variation locale de ρC permettrait de l'expliquer, mais le modèle utilisé n'est pas adapté à cette analyse.

2.7.2 Analyse des résultats obtenus lors d'expérimentations en laboratoire

La procédure d'estimation est appliquée aux échantillons présentés figure 2.27. Dans un premier temps, il est nécessaire de s'assurer des propriétés thermiques des différentes couches. Le tableau 2.15 présente les résultats de la procédure d'estimation de la conductivité thermique de la couche de colle et de CFRP. Cette estimation est réalisée aux temps courts avec l'excitation Dirac et un modèle semi-infini analytique [Carslaw. et Jaeger, 1959]. Pour la colle époxy, l'estimation est réalisée dans une zone non couverte par le CFRP. Notez que l'écart type, est ici un écart type dit *spatial*, il est calculé pour 20 estimations.

Couche	Conductivité moyenne $Wm^{-1}K^{-1}$	écart type de la conductivité moyenne $Wm^{-1}K^{-1}$
Glue époxy	0.75	0.13
CFRP	0.6	0.1

TABLE 2.15 – Estimation de la conductivité thermique de la colle et du CFRP

Le CFRP étant un matériau orthotrope il n'est pas surprenant d'estimer une conductivité différente de celle utilisée dans les simulations. En revanche, la valeur de la conductivité de la colle époxy est supérieure aux données indiquées dans la littérature. Toutefois, cette colle est dite chargée, c-à-d qu'elle a fait l'objet d'un ajout de particules fines qui tendent à augmenter ses propriétés thermophysiques. Grâce à ces estimations il est possible de déduire en un point l'épaisseur de colle en zone saine pour les échantillons *Car I* et *Car II*, tableau 2.16

Échantillon	Épaisseur de colle époxy mm
<i>Car I</i>	2.5
<i>Car II</i>	2.3

TABLE 2.16 – Épaisseur en *mm* de la colle époxy en un point de l'échantillon considéré

Les épaisseurs estimées tableau 2.16 apparaissent en accord avec le procédé de fabrication des échantillons. Les tableaux 2.17 et 2.18 présentent les résultats de la procédure d'estimation appliquée aux thermogrammes situés au centre d'une zone défectueuse.

Tout d'abord, après analyse des résultats il apparaît clairement que la procédure d'estimation utilisant l'excitation impulsionnelle n'est pas adaptée à la caractérisation de multi-couches réalisés en laboratoire. En effet les valeurs estimées de \hat{R}_3 et (en particulier) \hat{e}_2 sont largement surévaluées. Bien que les différentes étapes de l'étude du modèle (sections 2.3 à 2.5) aient montré des résultats similaires, ils n'étaient néanmoins pas de cet ordre de grandeur. Une explication tient peut être dans la conductivité plus élevée estimée pour la colle ainsi qu'à l'état de surface des échantillons. En effet la figure 2.27 montre que des résidus de colle sont présents à la surface des échantillons, de plus le CFRP apparaît être un matériau avec de fortes propriétés de réflexion. Ces observations impliquent que la densité de flux reçue à la surface de l'échantillon est plus faible que prévu ce qui est préjudiciable pour l'excitation impulsionnelle.

Défaut	\hat{R}_{defaut} WK ⁻¹	\hat{e}_{colle} mm
Car I		
Acier	0.68	31
Bois	0.48	38
Zone saine	0.63	41
Car II		
Liège	0.40	52
PTFE	0.43	14
Bois	0.56	31
Zone saine	0.62	86

TABLE 2.17 – Estimation de la conductivité thermique de la colle et du CFRP pour l'excitation impulsionnelle

Défaut	\hat{R}_{defaut} WK ⁻¹	\hat{e}_{colle} mm
Car I		
Acier	1.7×10^{-6}	1.3
Bois	0.0037	2.1
Zone saine	1.7×10^{-7}	3.4
Car II		
Liège	0.0083	2.2
PTFE	0.0055	3.2
Bois	0.003	2.1
Zone saine	1×10^{-5}	2.3

TABLE 2.18 – Estimation de la conductivité thermique de la colle et du CFRP pour l'excitation créneau

En revanche l'estimation de \hat{e}_2 avec l'excitation créneau, bien que faible pour le défaut d'acier, apparaît cohérente avec le procédé de fabrication. L'estimation de la résistance thermique \hat{R}_3 du défaut de bois est similaire pour les deux échantillons. Même si le bois présente un ratio d'effusivité quasi-unitaire il est intéressant et encourageant de voir que la méthode converge vers des valeurs similaires pour les deux échantillons. Cette information permet d'être confiant en l'estimation du défaut de liège. Néanmoins, la résistance thermique estimée en zone saine et en présence d'acier apparaît équivalente. S'il est connu que l'acier dispose d'une faible résistance thermique, il faut aussi prendre en compte la présence d'une résistance de contact [Abdulhay *et al.*, 2011] incluse dans l'estimation de \hat{R}_3 . La modélisation quadripolaire choisie n'implémentant pas de résistance thermique de contact la différentiation, autre que sur les thermogrammes, d'une zone saine et d'un défaut d'acier reste délicate.

Cette section a présenté les résultats de la procédure d'estimation sur les données simulées et les thermogrammes de surface des échantillons. Dans la suite, et conformément aux objectifs définis section 2.1.1, la procédure d'estimation sera appliquée en chaque point de la séquence d'images infrarouges afin de fournir une cartographie des propriétés physiques du

ystème considéré.

2.8 Extension de la procédure à la cartographie de propriétés sur des séquences d'images infrarouges

Dans cette section la procédure d'estimation est appliquée à chaque pixel de la séquence d'images infrarouges obtenues pour une excitation créneau de $t_c = 30s$. Dans un premier temps, la procédure est appliquée sur les données simulées, figure 2.33, pour plusieurs niveaux de bruit blanc gaussien. Ensuite la même procédure est appliquée sur l'échantillon *CarII*, figure 2.27. L'échantillon a été choisi conformément aux résultats de l'étude précédente, ainsi *CarII* est le seul des deux échantillons à contenir des défauts présentant des ratios d'effusivité conformes au domaine de validité de la méthode exposée sections 2.3 à 2.5. Les différents calculs ont été effectués sur un ordinateur grand public (RAM : 8G, Proc : Intel®Core™i7 – 2860QM @2.50GHz, OS : Ubuntu 12.04), étudiant ainsi la possibilité d'appliquer la méthode en temps masqué avec un matériel non spécialisé. À l'avenir le code de calcul devra être compatible avec la technologie *General Purpose processing on Graphic processing Units (GPGPU)* [NVIDIA, 2014], notamment en tirant bénéfice récentes avancées en parallélisme dynamique [NVIDIA, 2012]. Dans un premier temps, les données numériques et issues de l'échantillon sont traitées par une analyse en composante principale afin de localiser les défauts.

2.8.1 Cartographies par l'analyse en composante principale

L'analyse en composantes principales, ou PCT (Principal Component Thermography), est une méthode statistique permettant, quand elle est appliquée sur des thermogrammes, de détecter des zones défectueuses au sein du système étudié. Basée sur la décomposition en valeur singulière, la PCT est déjà fortement étudiée et documentée [Rajic, 2002, Marinetti *et al.*, 2004]. Elle est utilisée ici afin de fournir une cartographie de base des défauts étudiés. La figure 2.40 présente les cartes PCT de la simulation numérique et de l'échantillon *CarII*.

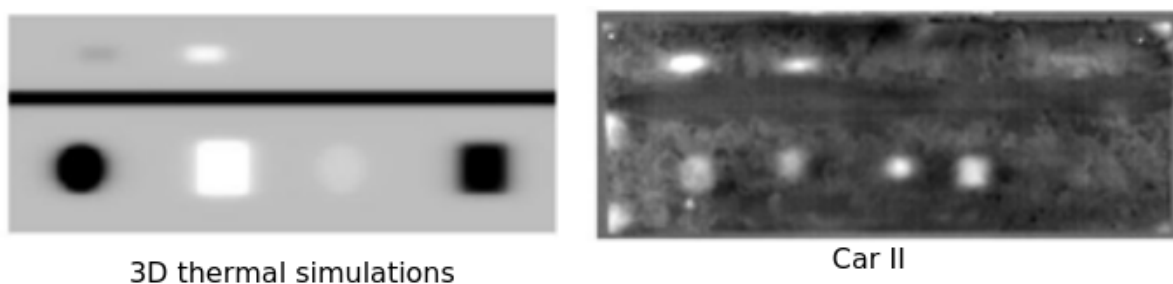


FIGURE 2.40 – Résultats de l'analyse en composantes principales (PCT) pour l'excitation créneau : EOF

Contrairement à la méthode développée, la PCT apparaît ici sensible à l'ensemble des matériaux présentant un ratio d'effusivité différent du ratio unitaire. Pour ce qui est de l'échantillon *CarII* la méthode n'a pas l'air affectée par l'état de surface. Notez la présence d'une *impureté* sous le défaut de PTFE au sein de l'échantillon *CarII*. Ce défaut non présent lors de la fabrication de l'échantillon pourrait être une bulle d'air représentative des difficultés rencontrées *in-situ*. En revanche il apparaît que la fine feuille de plastique alimentaire présente dans l'échantillon n'est pas détectée.

2.8.2 Cartographies des données simulées

Afin de tester la méthode, elle est dans un premier temps appliquée sur les données issues des simulations numériques. Les figures 2.41 et 2.42 présentent les résultats de la procédure pour trois niveaux de bruit blanc $\sigma_b = \llbracket 0; 0.25; 0.5 \rrbracket$ °C. Chacune des cartographies de $230 \times 85 = 19550px$ représentant $690cm^2$ a été obtenue en quelques heures (moins de trois heures pour les cartographies seules, cinq heures avec l'analyse des matrices de sensibilité, cf équation 2.52). Ce temps peut encore être réduit en optimisant le code de calcul et en relâchant les critères d'arrêt de la procédure d'estimation.

Une première analyse des cartographies indique que les défauts présentant un faible ratio d'effusivité, tableau 2.4 et figure 2.33 présentent toujours des comportements singuliers, en revanche les cartographies d'épaisseurs permettent leur détection. Ces premiers résultats apparaissent cohérents avec le reste de l'analyse, il est ainsi possible de retrouver une allure correspondant à l'indicateur de Vavilov [Vavilov, 2010] autour des frontières d'une zone défectueuse. Le comportement à l'interface colle/défaut n'est pas le même pour \hat{R}_3 et \hat{e}_2 , ceci peut être expliqué par la différence de profondeur (section 2.3), mais mériterait une étude approfondie, non conduite ici par faute de temps.

La mesure de l'épaisseur de la seconde couche du système, lorsque $\sigma_b = 0$, est juste, mais dispersée et mal résolue (au sens des incertitudes) [Rouaud, 2013]. En revanche la présence de bruit blanc, supérieur au biais de la méthode d'estimation (section 2.5), fait apparaître un biais fidèle et peu résolu dans la mesure de l'épaisseur. L'étude a montré, figure 2.26, que le biais d'estimation était proportionnel au bruit de mesure. En revanche, ces conclusions n'expliquent pas la dispersion quand $\sigma_b = 0$, l'expression d'un modèle quatre couches au lieu des trois réellement présentes fait probablement se propager une erreur numérique *aléatoire* affectant la dispersion de la méthode. Le bruit de mesure est traduit dans la cartographie comme un biais sur \hat{e}_2 et \hat{R}_3 , ainsi l'apparition d'une *résistance de contact purement numérique* tendrait à réduire la dispersion de la mesure, cette observation est encourageante pour la cartographie de *CarII*.

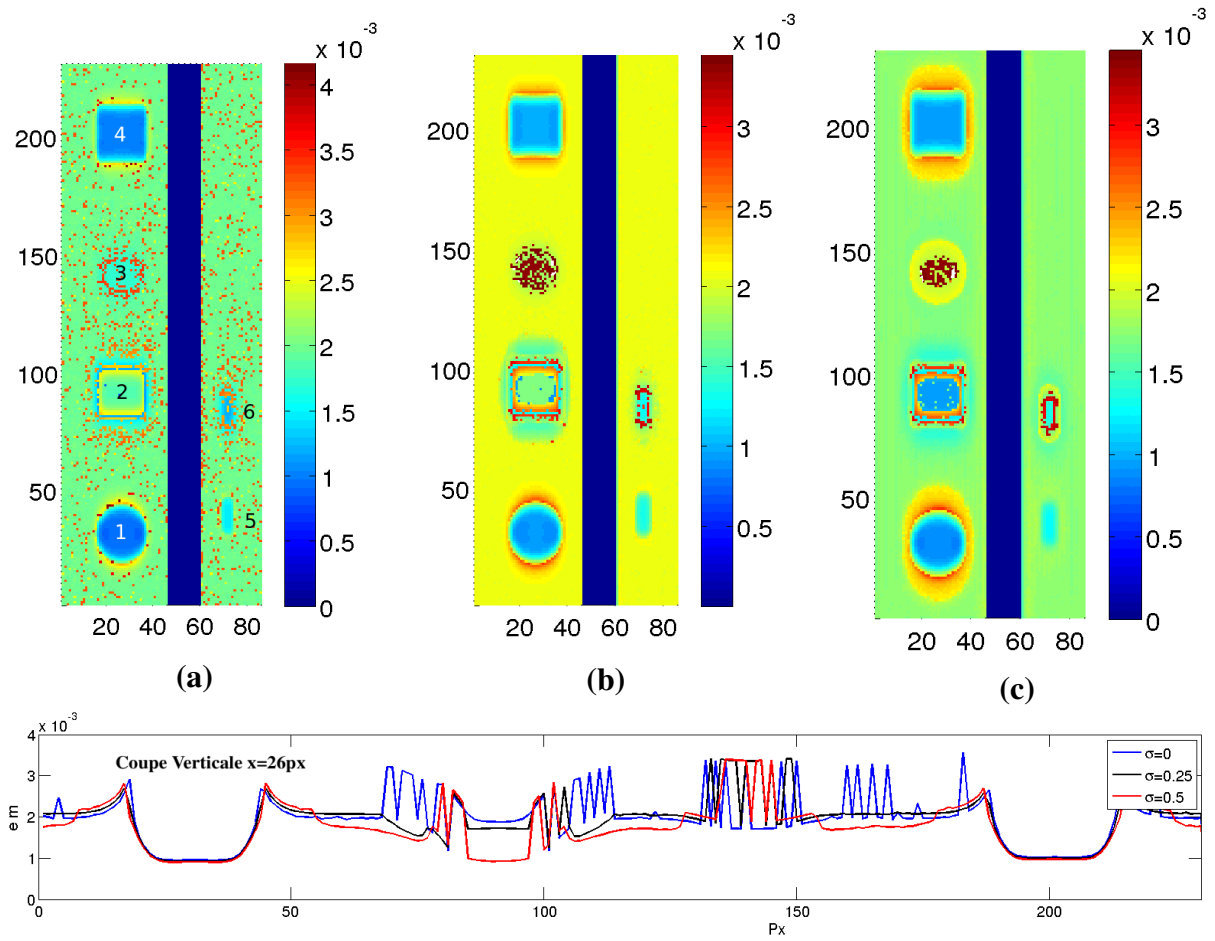


FIGURE 2.41 – Cartographie de l'épaisseur de colle des données simulées, pour $\sigma_b \in [0; 0.25; 0.5]$ ((a-c))
 (1) Air (2) Acier (3) PTFE (4) Liège (5) Bois (6) Eau

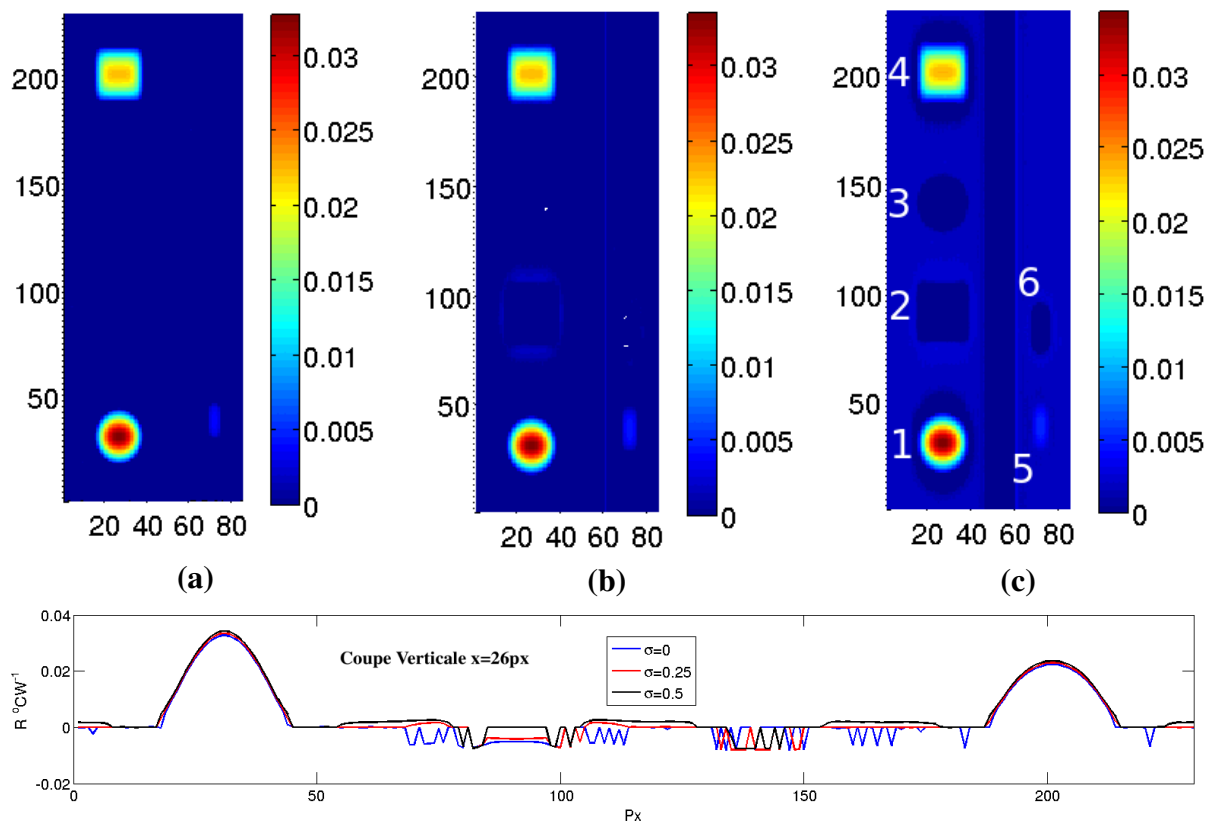


FIGURE 2.42 – Cartographie de résistance thermique en troisième couche des données simulées, pour $\sigma_b \in [0; 0.25; 0.5]$ ((a-c))
 (1) Air (2) Acier (3) PTFE (4) Liège (5) Bois (6) Eau

La cartographie d'épaisseur, figure 2.41, permet la localisation de chacun des défauts quelles que soient leurs propriétés, la cartographie de la troisième couche permet, elle, la caractérisation des défauts de liège et d'air. Le bruit de mesure ajouté numériquement fait apparaître un biais dans la méthode cohérent avec les observations de la section 2.5. La section suivante présente les résultats obtenus en appliquant la méthode sur l'échantillon de laboratoire *CarII*.

2.8.3 Cartographies de l'échantillon CarII

Dans cette section la procédure d'estimation détaillée au long de ce chapitre est appliquée à l'échantillon *CarII*. Cet échantillon a été choisi vis-à-vis du ratio d'effusivité que présentent certains défauts en son sein. Il a déjà été fait mention des problèmes posés par l'état de surface des échantillons (non uniformité du flux, présence de résidus à la surface, etc.), c'est pourquoi un pré-traitement est appliqué sur les données issues des échantillons. Ce traitement consiste en l'application d'un filtre spatial à chaque pas de temps des séquences acquises. Le filtre utilisé est un filtre *bicubic* d'un noyau de $4 \times 4px$ [Keys, 1981]. De plus un facteur d'échelle de 50% est appliqué afin de réduire le nombre de données à traiter. Ce filtrage tend à uniformiser l'état de surface du système au détriment de la résolution spatial. Avant toute action, il est nécessaire de caractériser la densité de flux reçue à la surface de l'échantillon en tout point. Pour ce faire, le flux est estimé durant les premières secondes de chauffe à l'aide de la solution semi-infinie de l'équation de la chaleur soumise à une excitation échelon, équation 2.14 [Carslaw. et Jaeger, 1959]. La figure 2.43 présente la cartographie de la densité de flux à la surface de l'échantillon. Cette cartographie fait apparaître, malgré le filtrage spatial, des disparités dans la densité de flux dues à l'état de surface. Il n'est pas impossible que ces disparités induisent des phénomènes de diffusion tri-dimensionnels mettant en défaut la méthode appliquée.

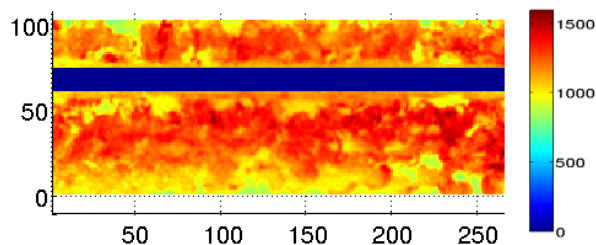
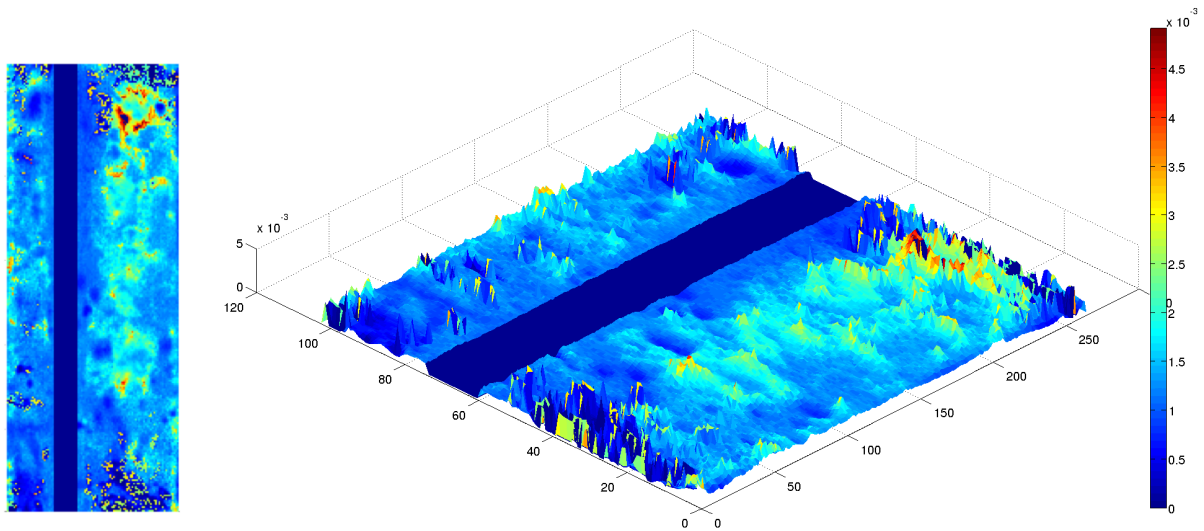
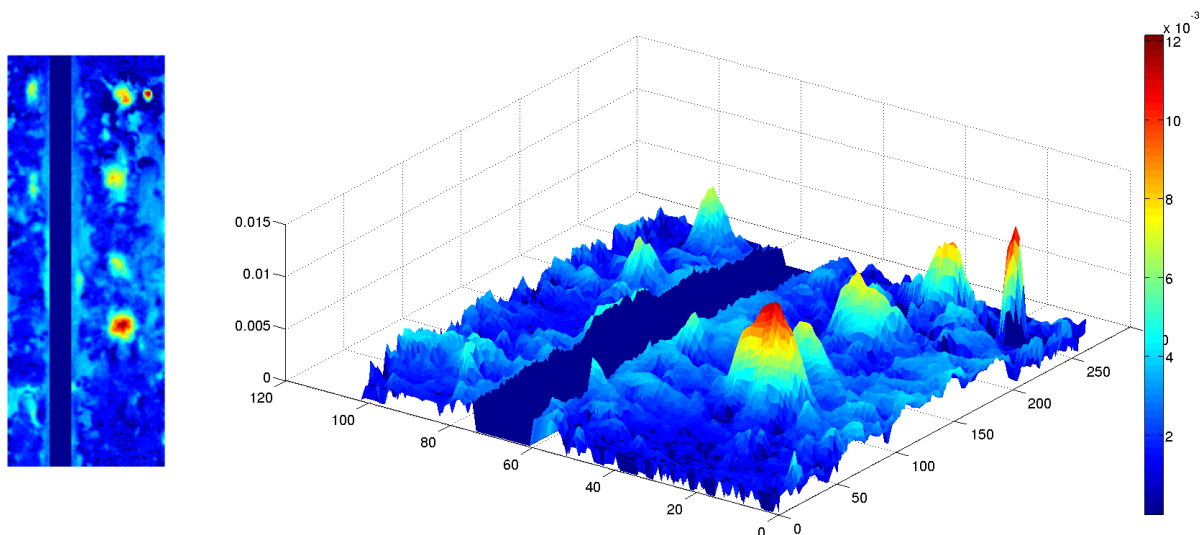


FIGURE 2.43 – Cartographie de la densité de flux à la surface en $W.m^{-2}$

Les figures 2.44 et 2.45 présentent les cartographies d'épaisseur de colle et de résistance thermique de la troisième couche obtenues sur les données issues de l'échantillon *CarII*, figure 2.27. La figure 2.46 résume l'étude et nomme les défauts détectés et caractérisés. La cartographie de \hat{e}_2 fait apparaître une légère dispersion notamment au-dessus des défauts PTFE et film plastique, ce comportement a déjà été observé sur les cartographies précédentes. En revanche la valeur moyenne identifiée est de $e_{2moy} = 1.4$ mm, ce qui correspond à l'ordre de grandeur estimé tableau 2.18. Il est intéressant de remarquer que l'estimation de l'épaisseur apparaît fortement corrélée à la distribution du flux surfacique, contrairement à l'estimation de \hat{R}_3 où une grande partie des défauts présents ont été caractérisés malgré l'état de surface de l'échantillon.

La figure 2.46 identifie (en pointillés orange) les différents défauts sur les cartographies précédentes. Il est intéressant de remarquer qu'une forte résistance thermique est estimée en lieu et place du défaut de PTFE. Ce comportement n'était pas apparu sur la cartographie des données simulées. La barrière moléculaire que représente le défaut PTFE induit une forte résistance de contact que la méthode apparaît capable de caractériser en identifiant une propriété équivalente. Dans une tout autre mesure bien que la cartographie d'épaisseur ne détecte pas un

FIGURE 2.44 – Cartographie de propriété de CarbII - e_2 en mm FIGURE 2.45 – Cartographie de propriété de CarbII - R_3 en $W.K^{-1}$

certain nombre de défauts, le polystyrène et le bois font apparaître un *plateau* stable dans l'estimation conformément aux observations précédentes. Les cercles rouges font apparaître des zones non identifiées comme défectueuses en première analyse. Ainsi *l'impureté* détectée avec la PCT est détectée et caractérisée par la méthode proposée. Mieux l'épaisseur apparaît nulle à cet endroit précis, indiquant que l'hypothétique bulle d'air remplacerait l'ensemble de la couche de colle. Des développements futurs devront étudier la répétabilité et la fiabilité de la méthode pour la cartographie et la qualification de zones défectueuses à partir d'une séquence d'images infrarouges.

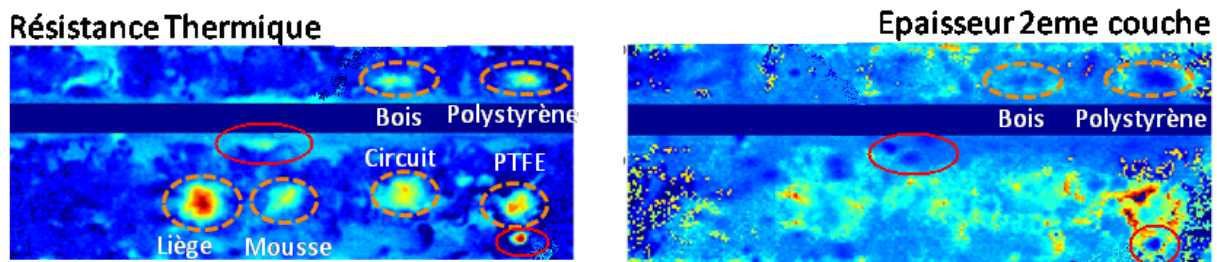


FIGURE 2.46 – Désignation des différents défauts

2.9 Synthèse

Résumé et principaux résultats

Dans ce chapitre, le développement d'une procédure d'estimation permettant, à partir d'une séquence d'images infrarouges, le contrôle non destructif et le calcul de cartes de propriétés thermophysiques d'une structure de génie civil réparée par collage composite a été présenté. Ce type de réparation donne naissance à des multi-couches épais à la surface de l'ouvrage. Il est important pour l'exploitant de la structure de fournir un diagnostic quantitatif de la réparation, ce diagnostic passe par la caractérisation de l'épaisseur de la couche de colle ainsi que des propriétés physiques d'un éventuel défaut (ie. bulle d'air). L'étude présentée a pour but le développement d'une méthode de diagnostic par ThIr. La modélisation quadripolaire unidimensionnelle est introduite ainsi que différentes méthodes d'inversion numériques de la transformée de Laplace. L'erreur numérique due à la modélisation quadripolaire et à l'algorithme d'inversion de la transformée de Laplace est analysée et corrigée. Les différents groupements de paramètres pouvant être exprimés dans le modèle sont présentés. Dans la suite de l'étude, la validité de la modélisation unidimensionnelle et la sensibilité du modèle à ses paramètres sont étudiées en fonction des ratios d'effusivité engendrés par la nature du défaut. Les techniques d'inversion de modèle pour la caractérisation sont détaillées, puis la procédure d'estimation paramétrique développée est appliquée à des simulations numériques et différents échantillons de laboratoire, permettant ainsi la cartographie des propriétés thermophysiques du système considéré.

La méthode développée n'utilise qu'un seul modèle pour caractériser à la fois les zones saines (épaisseur de colle) et les zones défectueuses (épaisseur de colle + propriétés du défaut).

Synthèse des différentes sections

La section 2.1 présente la formulation multi-couches de l'équation de la chaleur. Cette formulation fait apparaître des solutions analytiques denses et peu flexibles [Araki *et al.*, 1992, Osiander, 1998]. L'objectif de l'étude est le développement d'une procédure d'estimation paramétrique applicable sur des multi-couches épais. Le choix de modélisation s'oriente vers les quadripôles thermiques [Carslaw. et Jaeger, 1959, Belevitch, 1962, Maillet *et al.*, 2000]. Avec cette méthode, la modélisation d'un multi-couches revient à effectuer une multiplication matricielle, ce qui la rend flexible vis-à-vis du nombre de couches. La formulation quadripolaire est obtenue après que l'équation du système ait été exprimée au sein du domaine de Laplace [Laplace, 1814]. Cette transformation, appliquée sur la variable temporelle, permet d'exprimer le système comme une *équation différentielle ordinaire* et non plus comme une *équation aux dérivées partielles*, ce qui permet l'expression d'une solution analytique dans le domaine de Laplace. Après résolution, la solution du système doit être exprimée dans le domaine temporel à l'aide de la

transformée inverse de Laplace. Analytiquement cette inversion s'effectue en intégrant la solution dans le plan complexe, elle nécessite l'expression des pôles complexes de la solution ce qui annule sa flexibilité vis-à-vis du nombre de couches. Pour les solutions s'exprimant à l'aide de fonctions simples, l'inversion de la transformée peut s'effectuer à l'aide de tables [Erdelyi, 1954]. En revanche, la multiplication matricielle des quadripôles thermiques fait apparaître des solutions complexes exprimées à l'aide de fonctions hyperboliques, dans ces cas l'inversion est effectuée numériquement à l'aide d'algorithmes spécifiques [Dehoog *et al.*, 1982].

La solution de l'équation de la chaleur dans le domaine de Laplace fait apparaître des exponentielles et/ou des fonctions hyperboliques, dans le cas des quadripôles thermiques les matrices correspondantes à chaque couche sont exprimées à l'aide de fonctions hyperboliques rapidement croissantes vers l'infini. La section 2.2 analyse le comportement du modèle vis-à-vis de solutions analytiques. Il apparaît alors une erreur numérique, les premiers pas de temps ne sont pas résolus et cela provoque un décalage de la solution temporelle. L'étude montre que les fortes épaisseurs des couches du système ainsi que les valeurs du paramètre de Laplace aux temps courts ($p \approx \frac{1}{t}$), font numériquement "exploser" les fonctions hyperboliques, amenant l'algorithme d'inversion à shunter ces valeurs. Ces effets, bien connus des utilisateurs des méthodes quadripolaires, font régulièrement l'objet d'études et de corrections [Pailhes *et al.*, 2012, Krapez et Dohou, 2014]. Dans l'étude présentée, l'expérience montre que la durée de l'erreur numérique est faible vis-à-vis du temps de diffusion dans la première couche du modèle, les premiers pas de temps sont donc corrigés à l'aide d'une solution analytique semi-infinie. Dans un deuxième temps, les différentes formulations des matrices quadripolaires sont détaillées et un schéma représentant les différents groupements de paramètres ainsi que leurs liens est proposé. Cette analyse est mise en perspective avec le théorème [Bertrand, 1878, Vaschy, 1892, Buckingham, 1914].

Une grande partie de l'étude est également axée sur la comparaison des méthodes d'excitation impulsionnelle et créneau pour le diagnostic non destructif de multi-couches épais. L'objectif final de l'étude est le développement d'une procédure de diagnostic non destructif applicable indépendamment à chaque pixel d'une séquence d'images infrarouges obtenue par ThIr. C'est dans cet objectif que le choix d'une modélisation quadripolaire unidimensionnelle a été fait. La section 2.3 analyse la validité de l'hypothèse unidimensionnelle utilisée pour la modélisation de systèmes tridimensionnels. L'étude est basée sur l'indicateur de Vavilov [Vavilov, 2010]. Cet indicateur a été développé expérimentalement en conditions de laboratoire sur des matériaux fins soumis à une excitation impulsionnelle. Il est basé sur l'analyse du contraste thermique et permet d'obtenir le ratio rayon sur profondeur du défaut à partir duquel les effets de transferts latéraux de chaleur sont négligeables. Dans l'étude présentée section 2.3, un modèle bidimensionnel aux éléments finis est utilisé pour générer numériquement l'indicateur de Vavilov, pour deux configurations multi-couches et les deux excitations étudiées. L'étude fait apparaître des résultats similaires pour les deux excitations, indiquant ainsi que l'indicateur est applicable dans le cadre d'une excitation créneau. Les résultats obtenus montrent que le diamètre minimal d'un défaut assurant la validité de l'hypothèse unidimensionnelle est compris entre 5mm et 25mm suivant la configuration choisie et le ratio d'effusivité du défaut. L'analyse est complétée par l'étude du contraste thermique ainsi que de l'erreur entre les modèles 2D et 1D. Ce complément fait apparaître un faible contraste thermique pour certains ratios d'effusivité, ces mêmes ratios présentent une faible erreur 1D/2D. Reportée sur les faibles contrastes cette erreur 1D/2D, bien qu'elle aussi faible, implique que l'indicateur de Vavilov est mis en défaut pour ces types de matériaux. Dans un deuxième temps, l'indicateur est redéfini de manière purement numérique, afin de prendre en compte les faibles contrastes thermiques ainsi que l'erreur 1D/2D. Ce nouvel indicateur présente des résultats similaires, mais l'analyse des courbes fait apparaître des

comportements singuliers, notamment pour les ratios d'effusivité unitaires. Ces constatations tendent à montrer que la modélisation et la caractérisation de défauts présentant des ratios d'effusivité unitaires peut s'avérer difficile.

La section 2.4 présente l'analyse de sensibilité locale du modèle à ses paramètres [Saltelli *et al.*, 2000, Jacques, 2005]. Dans un premier temps, l'analyse étudie la sensibilité locale du modèle aux paramètres de la couche de colle pour un système dit "sain", cette première analyse fait apparaître de fortes corrélations entre paramètres. Ces corrélations indiquent que si aucune connaissance *a priori* n'est disponible sur le système, alors il sera difficile pour la procédure d'estimation de conduire à la caractérisation du système. Dans le cas de systèmes réparés, la colle étant un produit manufacturé, seule l'épaisseur est inconnue, à la différence d'une éventuelle zone défectueuse où aucune connaissance *a priori* n'est disponible. Afin de réduire le nombre d'inconnues et le couplage des paramètres, le modèle quadripolaire est redéfini à l'aide des groupements de paramètres présentés section 2.2. La couche représentant un éventuel défaut au sein du modèle est alors formulée en terme de résistance thermique et d'effusivité thermique. Une seconde analyse est effectuée, elle étudie la sensibilité locale du modèle à l'épaisseur de la couche de colle et aux propriétés thermophysiques du défaut. Cette étude est développée pour trois ratios d'effusivité, faibles, unitaires et forts, ainsi que pour les deux excitations analysées. Pour chacun des matériaux étudiés l'excitation impulsionnelle présente de faibles niveaux de sensibilité, contrairement à l'excitation créneau qui de par son temps d'excitation augmente la sensibilité du modèle aux paramètres de systèmes épais. Un point important de l'étude est l'impact du ratio des effusivité sur la sensibilité réduite du modèle. Ainsi, pour les défauts présentant un faible ratio d'effusivité, la sensibilité à l'épaisseur de la couche de colle est importante alors que le modèle apparaît peu sensible aux paramètres du défaut contrairement aux matériaux présentant un fort ratio d'effusivité où la sensibilité aux deux couches est satisfaisante. Les défauts avec un ratio d'effusivité unitaire représentent un cas particulier de l'étude, ils apparaissent comme un pivot où le signe des sensibilités s'inversent et oscille autour de zéro, en d'autres termes le modèle apparaît ici aveugle à ce type de matériaux. Cette observation tend à montrer que le modèle quadri-couches peut être utilisé pour modéliser un système tri-couches. Dans le cas du liège, les sensibilités à la couche de colle et à la résistance thermique du défaut apparaissent décalées dans le temps. Ce décalage tend à montrer que la corrélation entre épaisseur de la deuxième couche et les paramètres d'un défaut est inversement proportionnelle au ratio d'effusivité. Une analyse de la corrélation entre la sensibilité à l'épaisseur de la couche de colle et la résistance thermique du défaut à l'aide des coefficients de corrélation non linéaire de Spearman [Spearman, 1904] confirme cette observation pour l'excitation créneaux. L'excitation impulsionnelle présentant de faibles niveaux de sensibilité, l'analyse des corrélations est plus difficile.

En résumé la section 2.4 amène plusieurs résultats. Premièrement l'excitation impulsionnelle présente de faibles niveaux de sensibilité indiquant qu'elle n'est pas utilisable pour le diagnostic de système épais, du moins pour le niveau d'énergie considéré. Dans un deuxième temps, les corrélations entre courbes de sensibilité ont amené à redéfinir la couche représentant le défaut du modèle quadripolaire en terme de résistance thermique afin de réduire l'effet des corrélations et de minimiser le nombre d'inconnues. Dans le cas de défauts à ratio d'effusivité unitaire (zone saine ou défaut thermiquement proche du comportement sain) la sensibilité aux paramètres de la couche défectueuse tend vers zéro, indiquant qu'un modèle quadri-couches peut être utilisé pour modéliser un système sain tri-couches. Enfin, l'analyse des corrélations entre les paramètres de la couche de colle et les paramètres du défaut montre que l'excitation créneau tend à réduire cette corrélation entre couches pour les défauts à fort ratio d'effusivité comme l'air.

Dans la suite de l'étude, la section 2.5 introduit la notion de modélisation inverse pour l'estimation paramétrique à travers des algorithmes spécifiques [Beck et Arnold, 1977, Orlande *et al.*, 2011]. Ces algorithmes sont basés sur la minimisation d'une fonctionnelle, cette même fonctionnelle représente l'écart entre les mesures et un modèle dit direct pour un jeu de paramètres donnés, ici le modèle quadripolaire développé dans les sections précédentes. Différentes méthodes de minimisation (et donc d'estimation paramétrique) sont introduites, de l'estimation linéaire [Legendre, 1805, Gauss, 1809, Cauchy, 1847] jusqu'aux principes de l'estimation non linéaire [Levenberg, 1944, Marquardt, 1963]. À partir de ces éléments l'objectif est de constituer une procédure d'estimation paramétrique permettant le diagnostic quantitatif de multi-couches épais. Dans la suite de l'étude, la procédure d'estimation est analysée à l'aide de la technique du *crime inverse*, en d'autres termes les mesures sont générées par le modèle quadripolaire. Cette méthode permet d'analyser le biais intrinsèque d'une procédure d'estimation non linéaire. L'étude porte sur la caractérisation de l'épaisseur de colle (deuxième couche) et des paramètres thermophysiques d'un éventuel défaut situé en troisième couche d'un système quadri-couches. Les mesures sont générées par le modèle quadripolaire pour un ensemble de 26 matériaux représentant une large gamme de ratios d'effusivité. La minimisation est assurée par l'algorithme de *Levenberg-Marquardt* et une analyse statistique est appliquée sur l'estimateur des paramètres [Beck et Arnold, 1977, Ozisik, 2000]. L'analyse des résidus d'estimation (différence entre mesure et modèle à la fin de la procédure) met en évidence le caractère non linéaire de la procédure d'estimation. L'erreur relative d'estimation tout comme l'écart type de l'estimateur des paramètres apparaissent inversement proportionnels au ratio d'effusivité des défauts considérés. La caractérisation d'une zone saine est assurée, l'épaisseur de colle est caractérisée et la résistance thermique estimée du défaut tend vers zéro. Les matériaux à forts ratios d'effusivité comme l'air présentent des erreurs relatives d'estimation inférieures au pourcent et de faibles écarts types. À la constante près ces résultats sont les mêmes en présence de bruit. Comme prévu par l'analyse de sensibilité l'excitation impulsionnelle présente des erreurs relatives et écarts-types plus importants qu'avec l'excitation créneau, de plus elle apparaît volatile en présence d'un bruit blanc gaussien de moyenne nulle. En complément, une étude sur le comportement de la procédure d'estimation en fonction de différentes valeurs de bruit de mesure est effectuée et les résultats détaillés en annexe IV. Cette dernière étude confirme que l'excitation impulsionnelle est plus affectée par le bruit de mesure et indique que dans le cadre de l'excitation créneau, l'écart-type de l'estimateur des paramètres pour des défauts à fort ratio d'effusivité apparaît augmenter linéairement avec le niveau de bruit.

Le section 2.6 présente les différents échantillons utilisés pour valider la méthode, ainsi que le dispositif expérimental. Un modèle aux éléments finis tri-dimensionnel d'un échantillon de béton réparé par collage composite et comportant un certain nombre de défaut a été développé. Dans un deuxième temps, deux échantillons de béton réparé ont été réalisés en partenariat avec le laboratoire MIVIM de l'université Laval à Québec. De nombreux types de défaut ont été volontairement inclus dans ces échantillons, outre leur localisation aucune connaissance *a priori* n'est disponible sur les défauts ainsi que sur l'épaisseur de colle. La simulation numérique 3D permet de tester la procédure d'estimation avant son utilisation sur les échantillons. L'acquisition de séquences d'images infrarouges en surface des échantillons a été réalisé à l'aide d'une camera thermique FLIR MWIR IRFPA. Pour la simulation numérique le champ de température en surface est extrait à chaque pas de temps. Une analyse des thermogrammes de surface des échantillons et de la simulation met en évidence l'impact des ratios d'effusivité présentés par les différents défauts.

La section 2.7 présente les résultats de la procédure d'estimation paramétrique, d'abord en plusieurs points de la simulation numérique avec et sans bruit de mesure. L'analyse des résidus fait encore une fois apparaître le comportement non linéaire de la procédure d'estimation. L'erreur relative d'estimation est similaire à celle obtenue par crime inverse dans la section 2.5. Dû à l'erreur intrinsèque entre la modélisation 1D et 3D l'écart type de l'estimateur de paramètre est légèrement plus élevé que dans les analyses précédentes. En revanche tout comme l'étude présentée section 2.5 lorsque la procédure d'estimation est appliquée sur des thermogrammes obtenus avec l'excitation impulsionnelle, les résultats apparaissent moins précis et plus volatile au bruit de mesure.

Dans un deuxième temps, la procédure d'estimation a été appliquée sur les thermogrammes mesurés par ThIr au dessus des zones défectueuses des échantillons. Avant tout, la conductivité thermique du matériau composite et celle de la colle sont estimées durant les premiers pas de temps à l'aide d'une solution semi-infinie. Dans les deux cas, une valeur légèrement plus élevée que la conductivité supposée est estimée. Le CFRP étant un matériau orthotrope, il n'est pas surprenant d'estimer une conductivité différente de celle utilisée dans les simulations. En revanche la valeur élevée de la conductivité de la colle époxy est plus surprenante, mais en accord avec l'ajout de fine particules dans la colle. Bien que les différentes étapes de l'étude du modèle aient indiqué que l'excitation impulsionnelle faisait apparaître des résultats moins précis, les résultats de la procédure d'estimation les échantillons soumis à ce type d'excitation sont largement surévalués, rendant impossible l'analyse. Une explication tient peut-être à l'état de surface des échantillons, changeant localement l'émissivité de la surface et donc la densité de flux effectivement reçu par l'échantillon. En revanche, l'estimation de l'épaisseur de la couche de colle avec l'excitation créneau apparaît cohérente avec le procédé de fabrication. L'estimation de la résistance thermique du défaut de bois est similaire pour les deux échantillons, même si le bois présente un ratio d'effusivité quasi-unitaire, il est intéressant et encourageant de voir que la méthode converge vers des valeurs similaires pour les deux échantillons. Néanmoins, la résistance thermique estimée en zone saine et en présence d'acier apparaît équivalente. S'il est connu que l'acier dispose d'une faible résistance thermique, il faut aussi prendre en compte la présence d'une résistance de contact [Abdulhay *et al.*, 2011]. La modélisation quadripolaire choisie n'implémentant pas de résistance thermique de contact la différentiation, autre que sur les thermogrammes, d'une zone saine et d'un défaut d'acier n'est pas évidente.

Dans la section 2.8, la procédure d'estimation est appliquée à chaque pixel de la séquence d'images infrarouges obtenue pour une excitation créneau de $t_c = 30s$. Dans un premier temps, la procédure est appliquée sur les données simulées pour plusieurs niveaux de bruit blanc gaussien. Une première analyse des cartographies indique que les défauts présentant un faible ratio d'effusivité présentent toujours des comportements singuliers, en revanche les cartographies d'épaisseur permettent leur détection. Ces premiers résultats apparaissent cohérents avec le reste de l'analyse.

Il est ainsi possible de retrouver une allure correspondant à l'indicateur de Vavilov [Vavilov, 2010] autour des frontières d'une zone défectueuse. La méthode permet la cartographie de l'épaisseur de colle avec une faible erreur relative, et la caractérisation de la résistance thermique du défaut est assurée pour les forts ratios d'effusivité.

Dans un deuxième temps, la procédure d'estimation est appliquée sur la séquence d'images infrarouges acquise à la surface d'un des échantillons de structure béton réparée. Afin de prendre en compte les variations spatiales de l'émissivité, dues à l'état de surface, la densité de flux thermique en surface est caractérisée à l'aide d'un modèle semi-infini [Carslaw. et Jaeger, 1959]. Après application de la procédure d'estimation paramétrique, une épaisseur de colle moyenne de $1.4mm$ est estimée sur l'ensemble de l'échantillon, ce qui apparaît cohérent avec le procédé

de fabrication. Contrairement à l'étude précédente, les cartographies de l'épaisseur de colle ne permettent plus d'assurer à elle seule la détection des zones défectueuses. La présence d'une résistance de contact et la faible épaisseur des défauts peuvent expliquer ce changement. En revanche, la cartographie de la résistance thermique de la troisième couche fournit une information quantitative sur la nature du défaut. De plus, contrairement à l'analyse numérique, le défaut de PTFE apparaît caractérisé. Dans les simulations numériques, seules les propriétés thermiques ont été utilisées, ainsi la barrière moléculaire induite par ce type de défaut n'était pas simulée. C'est cette forte résistance de contact qui apparaît caractérisée sur cette cartographie. Une analyse en composantes principales est proposée en complément, elle fait apparaître des défauts involontaires, due à la méthode de fabrication, au sein de l'échantillon. Il est encourageant de voir que ces mêmes défauts sont présents sur la cartographie de la résistance thermique de la troisième couche, indiquant que la méthode développée dans ce chapitre permet la caractérisation de défauts dus à la méthode de réparation elle-même.

Conclusion et perspectives

Ce chapitre a présenté l'étude et le développement d'un modèle thermique quadripolaire ainsi que d'une procédure d'estimation paramétrique permettant le diagnostic quantitatif de structures béton réparées par collage composite. L'estimation paramétrique est effectuée sur chaque pixel d'une séquence d'images infrarouges acquises par ThIr. Le chapitre introduit la modélisation quadripolaire, les algorithmes d'inversions de la transformée de Laplace, les indicateurs de validité de l'hypothèse 1D, l'analyse de sensibilité ainsi que les techniques d'estimation paramétrique.

À la suite de cette étude, un certain nombre de perspectives peuvent être énoncées. D'un point de vue implémentation, une version optimisée au sens algorithmique de la procédure d'estimation permettrait de profiter pleinement des nouvelles capacités de calcul scientifique disponibles [NVIDIA, 2014, NVIDIA, 2012], et ainsi réduire significativement les temps de calcul.

L'estimation des cartes de propriétés a montré l'influence de l'état de surface du système sur les résultats de la procédure d'estimation. Une réflexion sur la manière de prendre en compte cet état de surface (Condition limite dynamique [Carlaw. et Jaeger, 1959], estimation de flux, prise en compte de la variation d'émissivité, ajout d'une couche au modèle) doit être menée.

Durant l'étude, des matériaux tels que l'eau et l'air ont montré des comportements particuliers. Bien que l'effusivité soit le paramètre permettant d'analyser l'évolution de l'équation de la chaleur en multi-couches, ces matériaux font apparaître des *sauts* de capacité thermique massique et/ou de conductivité. Ces *sauts* sont visibles sur les abaques d'ingénierie des matériaux [Ashby, 2004] (annexe IV, figure 26). L'analyse doit alors se baser sur le couple effusivité et diffusivité définissant l'inertie thermique du matériau. Ces observations pourraient s'avérer utiles pour la caractérisation de défauts non solides.

Enfin la procédure d'estimation basée sur une modélisation unidimensionnelle certes applicable indépendamment sur chaque pixel de la mesure, pose néanmoins problème pour la caractérisation de matériaux à ratios d'effusivité faibles ou unitaires. Pour cela une étude utilisant une modélisation multidimensionnelle analytique [Maillet *et al.*, 1996, Bendada *et al.*, 1998, Maranzana *et al.*, 2002, Fudym *et al.*, 2004] ou numérique [Brouns *et al.*, 2014] serait à conduire en complément de la présente étude.

Le chapitre suivant traite de l'approche multidimensionnelle pour la caractérisation de multi-

couches épais. Afin de rester flexible vis-à-vis du nombre de couches, l'étude est basée sur le développement d'une procédure d'estimation de paramètres spatiaux à l'aide de la méthode de l'état adjoint [[Lions, 1968](#)].

Estimation de champs de propriétés

Ce chapitre présente le développement d'une méthode d'estimation de champs de propriétés spatiales. Ces travaux sont issus d'une collaboration entre la thèse ici présente et la thèse de Jordan Brouns [Brouns *et al.*, 2014, Brouns, 2014]. Le chapitre 2 a présenté une méthode d'estimation basée sur une modélisation thermique unidimensionnelle, l'analyse avait alors montré les limites de la méthode pour l'estimation des matériaux à ratios d'effusivité faibles et unitaires. Dans ce chapitre une méthode bidimensionnelle basée sur un modèle aux éléments finis est développée. L'étude analyse le comportement de la procédure vis-à-vis des ratios d'effusivité. La reconstruction du volume défectueux est aussi analysée.

3.1 Description de l'étude et modélisation

Le domaine d'étude Ω décrit un cube de 100 mm de côté, appelé *matrice*, cf figure 3.1, présentant un défaut cylindrique Δ en son sein. Situé à 5mm sous la surface Γ_{IR} , Δ présente un diamètre de 5cm pour une épaisseur de 5mm. Le défaut possède des caractéristiques thermiques différentes de celles de la matrice. L'objet d'étude est thermiquement excité par un flux φ_0 sur Γ_{IR} une des faces du cube. Les données sont obtenues en émulant l'acquisition de données par caméra infrarouge sur la face excitée Γ_{IR} afin de déterminer la température de surface.

Pour simplifier l'analyse, l'hypothèse de symétrie 2D/3D est émise, figure 3.2. Par souci de simplicité, et lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté, les notations Ω et Δ sont aussi utilisées pour le cas 2D.

Une densité de flux $\varphi_0 = 1000 \text{ W.m}^{-2}$ est appliquée durant un temps $t_c = 450 \text{ s}$ sur la frontière Γ_{IR} , tandis que le temps total d'observation vaut $t_a = 1000 \text{ s}$. La frontière restante est notée $\Gamma_0 = \partial\Omega \setminus \Gamma_{\text{IR}}$ et soumise à une condition de flux nul. L'évolution de la température T est modélisée à l'aide de l'équation aux dérivées partielles 3.1, avec ρc la capacité thermique, k la conductivité, T^0 le champ initial de température dans le domaine, et $\mathbf{1}_{t \leq t_c}$ la fonction indicatrice de $\{t \leq t_c\}$.

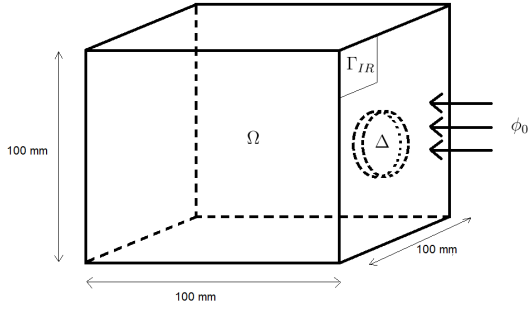


FIGURE 3.1 – Objet d'étude 3D

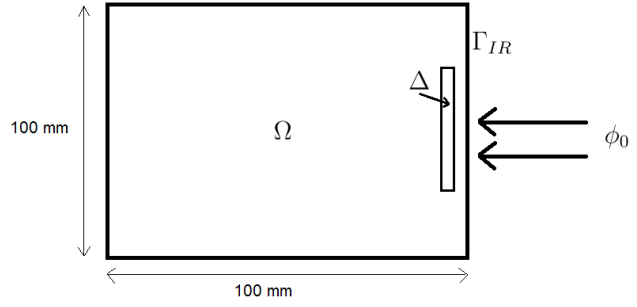


FIGURE 3.2 – Détails de la symétrie 2D

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 & t \in [0; t_a], x \in \Omega \\ k \nabla T \cdot n = \varphi_0 \mathbf{1}_{t \leq t_c} & t \in [0; t_a], x \in \Gamma_{IR} \\ k \nabla T \cdot n = 0 & t \in [0; t_a], x \in \Gamma_0 \\ T(x; 0) = T^0(x) & x \in \Omega \end{cases} \quad (3.1)$$

Le tableau 3.1 recense les propriétés thermiques de la matrice ainsi que des différents défauts étudiés. Le paramètre b est l'effusivité, et b_m/b est le ratio d'effusivité entre la matrice et le défaut considéré.

Matériaux	k W.m ⁻¹ .K ⁻¹	ρc J.m ⁻³ .K ⁻¹	b W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹	b_m/b
Matrice	0,2	1464000	542,5	1
Liège	0,039	216000	91,8	5,91
Bois	0,15	1140000	431,5	1,31
Acier	15,1	3866400	7640,9	0,07

TABLE 3.1 – Propriétés utilisées dans l'étude

Le modèle direct 3.1 est résolu, ici, par la méthode des éléments finis [Ciarlet, 2006, Nikishkov, 2010]. La résolution s'effectue à l'aide du solveur d'éléments finis \mathcal{P}^1 pdetool disponible sous MATLAB ®R2011b sur un maillage triangle \mathcal{T}^h , figure 3.3, constitué de 19968 éléments. L'approximation de l'opérateur différentiel temporel est effectuée par un schéma d'Euler implicite à pas constant $\Delta t = 5$ s.

Les figures 3.5 et 3.6 présentent, pour un défaut de bois au sein de la matrice, l'état du système en fin de chauffe $t = 450$ s et en fin de période d'observation $t = 1000$ s, respectivement. Dans les simulations, une température initiale de 20°C est appliquée sur tout le domaine. La figure 3.4 présente les thermogrammes en un point au dessus du défaut (au milieu de l'arête Γ_{IR}) pour chaque type de défaut, et pour le cas sans défaut. À l'image du chapitre 2 une corrélation entre la température maximale de chaque thermogramme et le ratio d'effusivité des matériaux est observable.

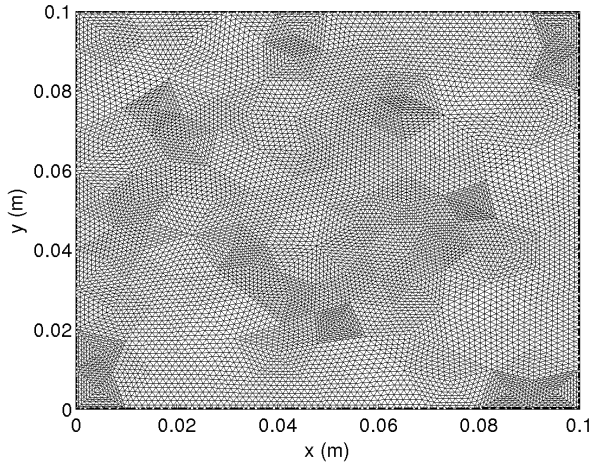


FIGURE 3.3 – Maillage utilisé

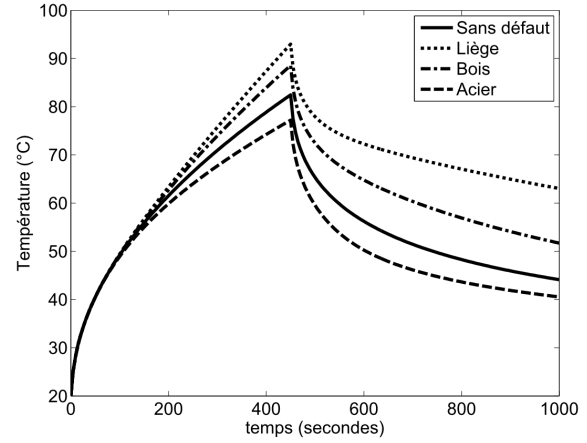
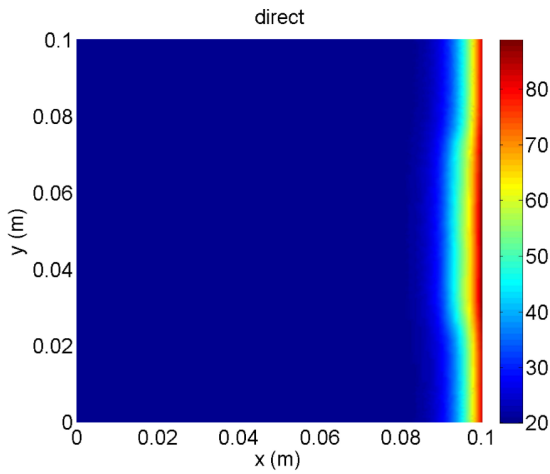
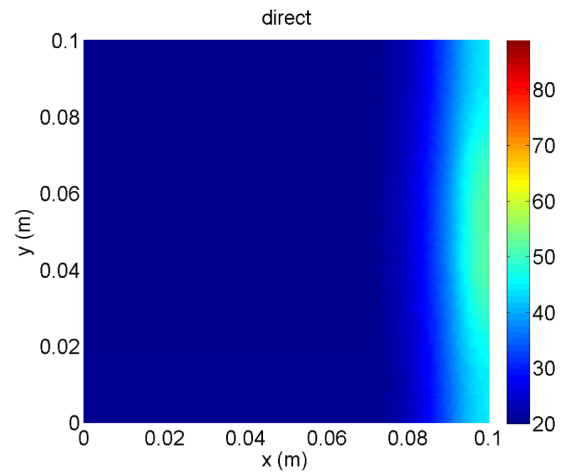


FIGURE 3.4 – Thermogrammes de surface

FIGURE 3.5 – État du système à
 $t_c = 450$ sFIGURE 3.6 – État du système à
 $t_a = 1000$ s

3.2 Formulation du problème inverse

La reconstruction de paramètres est un problème inverse dans lequel l'objectif est d'identifier les paramètres d'un modèle à l'origine d'observations (cf section 2.5). L'estimation de conductivité thermique a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, notamment dans le cas discontinu, [Lamm, 1987, Banks et Kunisch, 1989, Gutman, 1990, Keung et Zou, 1998b, Keung et Zou, 1998a, Luce et Perez, 1999, Coles et Murio, 2001, Tber et Talibi, 2007]

L'objectif à terme est d'utiliser des mesures de température de surface acquises par ThIr, dans cette étude les mesures non bruitées sont générées par le modèle. La durée d'observation est notée $t_a = 1000$ s. Soit \mathcal{U} l'espace des inconnues, [Briane et Pagès, 2006] :

$$\mathcal{U} = (L_+^\infty(\Omega))^2, \quad L_+^\infty(\Omega) = f \in L^\infty(\Omega), f > 0 \text{ p.p.} \quad (3.2)$$

Les inconnues s'écrivent alors $P = (k, \rho c) \in \mathcal{U}$. La notation T est surchargée par $T(u)$ la solution du modèle 3.1 avec les paramètres P . De plus, $\mathcal{M}(x; t)$ représente les mesures aux temps t des températures de surface en $x \in \Gamma_{\text{IR}}$, et M est l'espace des mesures :

$$M = L^2(\Gamma_{\text{IR}}; L^2(0; t_a)), \quad \|f\|_M^2 = \int_0^{t_a} \int_{\Gamma_{\text{IR}}} f^2(x; t) d\sigma dt \quad (3.3)$$

avec $d\sigma$ la mesure de frontière sur $\partial\Omega$.

L'étude porte sur la caractérisation de la zone défectueuse par reconstruction des champs de conductivité et de capacité thermiques $P = \llbracket k, \rho c \rrbracket \in \mathcal{U}$ à partir de la mesure des températures de surface, générées numériquement, sur la frontière Γ_{IR} . Conformément à la procédure de Tikhonov [Tikhonov, 1963] (cf section 2.5), la fonctionnelle \mathcal{F} est introduite équation 3.4. Notez qu'à la différence de l'équation 2.42, l'équation 3.4 fait apparaître un facteur $\frac{1}{2}$ afin de simplifier l'expression de son gradient \mathcal{F}'_u .

$$\mathcal{F}(P) = \frac{1}{2} \|T(P) - \mathcal{M}\|_M^2 + \frac{\gamma}{2} \|P - P^0\|_{\mathcal{R}}^2 \quad (3.4)$$

avec γ le paramètre de régularisation de Tikhonov, P^0 une ébauche des paramètres inconnus définis par les propriétés de la matrice, et $\mathcal{R} = (L^2(\Omega))^2$ l'espace de régularisation. Le premier terme de cette fonctionnelle est le terme de fidélité et mesure l'écart entre les données et la réponse du modèle aux paramètres p , tandis que le dernier est le terme de régularisation qui rend le problème bien posé au sens de Hadamard, [Hadamard, 1902, Beck et Arnold, 1977]. Le problème inverse consiste alors à trouver $P \in \mathcal{U}$ tel que :

$$P = \underset{v \in \mathcal{U}}{\operatorname{argmin}} \mathcal{F}(v) \quad (3.5)$$

Le nombre de pas de temps est ici inférieur au nombres de paramètres estimés, taille de P égale 2×19968 .

3.3 Méthode de résolution

Le modèle 3.1 est non linéaire par rapport aux inconnues. Pour résoudre ce problème l'algorithme *Levenberg-Marquardt* est utilisé (cf section 2.5). Il s'agit d'un algorithme itératif qui permet de minimiser une fonctionnelle définie sur un modèle non linéaire, [Moré, 1977] (cf section 2.5). Cet algorithme consiste à résoudre un problème inverse linéaire défini sur la différentielle du modèle direct.

Soit $\delta P \in \mathcal{U}$ une petite variation des paramètres recherchés, l'approximation consiste à écrire :

$$T(P + \delta P) \simeq T(P) + \delta T(P)\delta P \quad (3.6)$$

avec $\delta T(P)\delta P$ la dérivée de Gâteaux de T en P dans la direction δP [Saint Raymond, 2007], solution du modèle linéaire tangent autour de P décrit par :

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial \delta T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla \delta T) = -\delta \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\delta k \nabla T) & t \in [0; t_a], x \in \Omega \\ k \nabla \delta T \cdot n = -\delta k \nabla T \cdot n & t \in [0; t_a], x \in \partial\Omega \\ \delta T(x; 0) = 0 & x \in \Omega \end{cases} \quad (3.7)$$

En chaque point de linéarisation u , une nouvelle fonctionnelle est introduite :

$$\bar{\mathcal{F}}_P(\delta P) = \frac{1}{2} \|T(P) + \delta T(P)\delta P - \mathcal{M}\|_M^2 + \frac{\gamma}{2} \|P + \delta P - P^0\|_{\mathcal{R}}^2 + \frac{\mu}{2} \|\delta P\|_{\mathcal{R}}^2 \quad (3.8)$$

avec P^0 le paramètre *a priori* et μ le paramètre d'amortissement* de Marquardt, qui permet de définir un voisinage de confiance, [Nielsen, 1999, Hanke, 2010]. La solution s'obtient non

*En anglais, *damping parameter*

plus en cherchant le paramètre P optimal, mais plutôt l'accroissement local δP optimal qui permettra de calculer la linéarisation à l'itération suivante $P + \delta P$.

La minimisation de la fonctionnelle 3.8 est bien définie puisque $\bar{\mathcal{F}}_P$ est strictement convexe et coercive [Ekeland et Témam, 1999]. D'après l'équation d'Euler, le minimum est caractérisé par :

$$\delta P = \underset{\delta v \in \mathcal{U}}{\operatorname{argmin}} \bar{\mathcal{F}}_P(\delta v) \iff \bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P) = 0 \quad (3.9)$$

avec $\bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P) \in \mathcal{U}'$ la différentielle de $\bar{\mathcal{F}}_P$ en (δP) définie par :

$$\bar{\mathcal{F}}_P(\delta P + \delta \bar{P}) = \bar{\mathcal{F}}_P(\delta P) + \bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)\delta \bar{P} + o(\|\delta \bar{P}\|_{\mathcal{U}}) \quad (3.10)$$

où l'opérateur $o(\cdot)$ est la notation de Landau, ce terme contient les dérivées d'ordre supérieur. Pour résoudre le problème 3.9, la méthode du gradient conjugué est utilisée. Cette méthode itérative, développée en 1950 par Cornelius Lanczos et Magnus Hestenes [Hestenes, 1951], permet de minimiser la fonctionnelle d'un système linéaire, la convergence est assurée en un nombre d'itérations au plus égal au nombre d'inconnues du problème. Afin de minimiser le système linéaire il est nécessaire de calculer la différentielle de la fonctionnelle présentée équation 3.8. Pour cela, la méthode de l'état adjoint est développée. Cette méthode, issue de la théorie du contrôle optimal, propose une expression exacte de la différentielle $\bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)$. Introduite par Jacques Louis Lions en 1968 [Lions, 1968], la méthode de l'état adjoint devient intéressante dès que le nombre d'inconnues est important [Chavent, 2009]. Contrairement aux méthodes de type différences finies (cf Section 2.5), elle calcule le gradient en ne résolvant que trois modèles, le modèle direct, équation 3.1, le linéaire tangent, équation 3.7 et l'adjoint, équation 3.11.

L'opérateur adjoint δT^* de δT est introduit [Brezis, 2008]. Cet opérateur est solution du problème adjoint défini par :

$$\begin{cases} -\rho c \frac{\partial \delta T^*}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla \delta T^*) = 0 & t \in [0; t_a], x \in \Omega \\ k \nabla \delta T^* \cdot n = T + \delta T - \mathcal{M} & t \in [0; t_a], x \in \Gamma_{\text{IR}} \\ k \nabla \delta T^* \cdot n = 0 & t \in [0; t_a], x \in \Gamma_0 \\ \delta T^*(x; t_a) = 0 & x \in \Omega \end{cases} \quad (3.11)$$

Soit $\delta \bar{P} = (\delta \bar{k}, \delta \bar{\rho}c) \in \mathcal{U}$ une petite perturbation de δP . La théorie du contrôle optimal permet d'obtenir la différentielle de $\bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)$ en calculant :

$$\begin{aligned} \bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)\delta \bar{P} = & - \int_0^{t_a} \int_{\Omega} \delta \bar{k} \nabla T \cdot \nabla \delta T^* dx dt + \gamma \int_{\Omega} \delta \bar{k} (k + \delta k - k^0) + \mu \int_{\Omega} \delta \bar{k} \delta k \\ & - \int_0^{t_a} \int_{\Omega} \delta \bar{\rho}c \frac{\partial T}{\partial t} \delta T^* dx dt + \gamma \int_{\Omega} \delta \bar{\rho}c (\rho c + \delta \rho c - \rho c^0) + \mu \int_{\Omega} \delta \bar{\rho}c \delta \rho c \end{aligned} \quad (3.12)$$

Les états thermiques directs T et adjoint du linéarisé δT sont calculés à l'aide d'un solveur d'éléments finis \mathcal{P}^1 (cf section 3.1). Cela signifie que les gradients en espace apparaissant dans le premier terme du membre de droite de l'équation 3.12 sont constants sur chaque triangle. Afin de réduire les éventuelles erreurs numériques, c'est sur cette propriété qu'est basée l'estimation des paramètres k et ρc comme des éléments de $\mathcal{P}_{pm}^0(\mathcal{T}^h)$ (ie constants par élément), c-à-d des fonctions discontinues :

$$k^h(x) = \sum_{i=1}^{N_t} k_i \mathbf{1}_{\mathcal{T}_i}(x), \quad \rho c^h(x) = \sum_{i=1}^{N_t} \rho c_i \mathbf{1}_{\mathcal{T}_i}(x) \quad (3.13)$$

avec $\mathcal{T}^h = \{\mathcal{T}_i\}_i$ la triangulation du domaine, N_t le nombre de triangles et \mathcal{T}_i l'aire du triangle, h signifie que les paramètres sont discrétisés. Les paramètres k^0 , ρc^0 , δk , $\delta \rho c$, $\delta \bar{k}$ et $\delta \bar{\rho} c$ se décomposent de la même manière. Ceci permet d'écrire la différentielle $\bar{\mathcal{F}}'_u$ comme suit, $\forall i \in \llbracket 1; N_t \rrbracket$:

$$\bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)\delta \bar{k}_i = \delta \bar{k}_i |\mathcal{T}_i| \left[- \int_0^{t_a} (\nabla T \cdot \nabla \delta T^*)_i dt + \gamma(k_i + \delta k_i - k_i^0) + \mu \delta k_i \right] \quad (3.14)$$

$$\bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)\delta \bar{\rho} c_i = \delta \bar{\rho} c_i \left[- \int_0^{t_a} \int_{\mathcal{T}_i} \frac{\partial T}{\partial t} \delta T^* dx dt + \gamma |\mathcal{T}_i| (\rho c_i + \delta \rho c_i - \rho c_i^0) + \mu |\mathcal{T}_i| \delta \rho c_i \right] \quad (3.15)$$

Le système est résolu en environ une heure pour 15 itérations de *Levenberg-Marquardt* comportant 20 itérations de gradient conjugué.

3.4 Résultats

La méthode de résolution consiste à chercher des paramètres constants par élément du maillage. Dans ce contexte, les méthodes des moindres carrés présentent deux inconvénients majeurs : elles lissent les discontinuités, et des oscillations de Gibbs apparaissent aux voisinages des discontinuités, [Kunisch, 1988, Chavent, 2009]. Les champs de propriétés reconstruits possèdent donc une forme semblable à celle présentée dans la figure 3.7. Pour statuer sur l'appartenance d'un triangle au défaut, un seuil est défini. Pour cela, les oscillations de Gibbs (localisations et amplitudes) sont caractérisées de part et d'autre du défaut, bien entendu sans aucune information *a priori* sur le défaut, puis tous les points dont l'amplitude dépasse celle des oscillations de Gibbs sont sélectionnés, figure 3.7. Cette définition du seuil d'appartenance au défaut est indépendante du maillage, du type de défaut, et de la localisation de ce dernier. Puisque deux champs de propriétés thermophysiques sont reconstruits, k et ρc , l'application du seuil sur chacune des propriétés donne deux aires (différentes) reconstruites. Ensuite la reconstruction de l'aire du défaut est effectuée en choisissant l'intersection de ces deux aires.

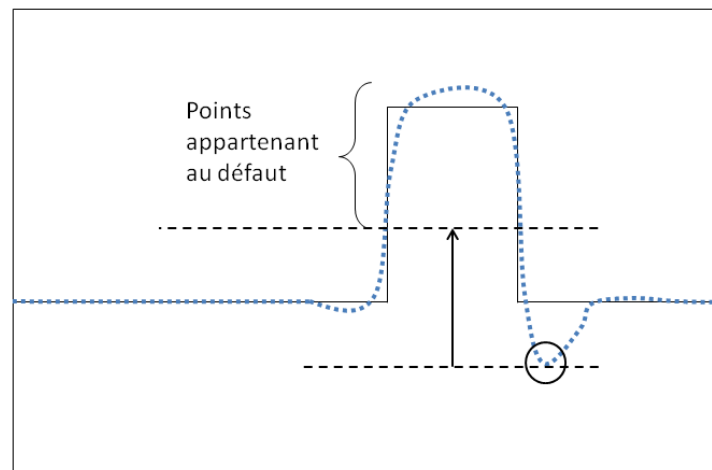


FIGURE 3.7 – Illustration du profil type des champs de propriétés reconstruits. En ligne continue noire, une vue en coupe du champ cible ; en pointillés bleus, une vue en coupe du champ reconstruit avec l'oscillation de Gibbs encerclée.

L'expérience montre que la méthode de résolution 3.13 génère de fortes instabilités numériques pour les défauts de liège et d'acier, figure 3.8, dont les ratios d'effusivité sont non

unitaires. Le problème vient principalement du calcul de la différentielle de la fonctionnelle présentée équations 3.14-3.15.

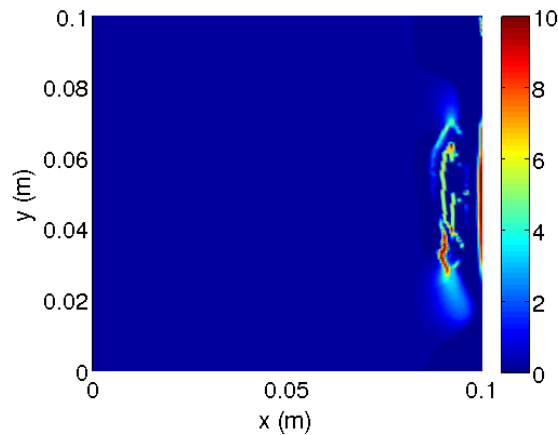


FIGURE 3.8 – Instabilités numériques sur les matériaux à ratios non unitaires - ici la conductivité du liège

En revanche les résultats d'estimation sur le bois sont analysables, la proximité des propriétés du bois et de la matrice diminuant les instabilités numériques. Les figures 3.9 et 3.10 présentent les champs reconstruits.

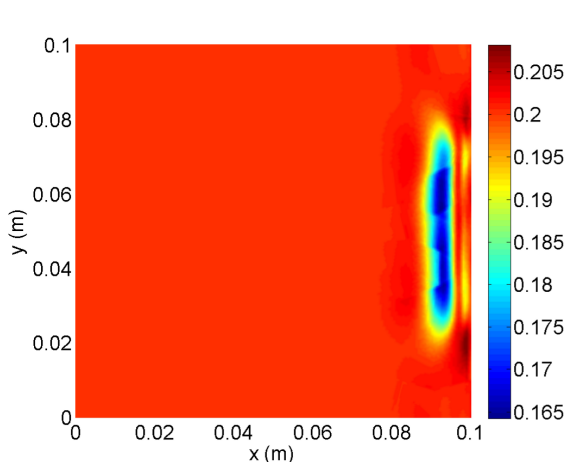


FIGURE 3.9 – Champ de conductivité k reconstruit pour le défaut de bois.

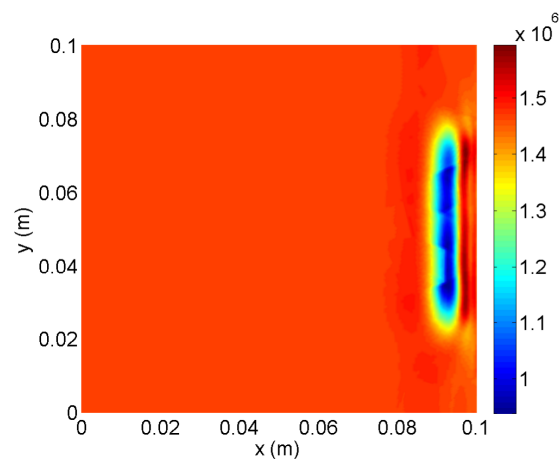


FIGURE 3.10 – Champ de capacité ρc reconstruit pour le défaut de bois.

Les résultats sont analysés suivant deux critères : la reconstruction de l'aire du défaut, et des paramètres physiques de celui-ci. La figure 3.11 présente la reconstruction de l'aire du défaut de bois. L'ensemble des résultats en cm^2 sont résumés dans le tableau 3.2.

Les tableaux 3.3 et 3.4 analysent les résultats de l'identification de la conductivité et de la capacité du défaut. Le paramètre $\bar{E}\%$ représente l'erreur relative moyenne en pourcentage de la reconstruction, tandis que $\sigma\%$ est l'écart-type spatial indiquant la dispersion au sein de l'aire défectueuse reconstruite, il est reporté sur l'erreur relative.

Remarquez dans le tableau 3.2 que l'aire cible est faible vis-à-vis des caractéristiques du défaut présenté en introduction du chapitre. Cette différence s'explique par la discrétisation des éléments finis. Cette méthode surestime l'aire défectueuse de près de 50%, figure 3.11 et tableau 3.2. Cette forte erreur relative est à mettre en perspective avec l'échelle du défaut, la figure 3.11

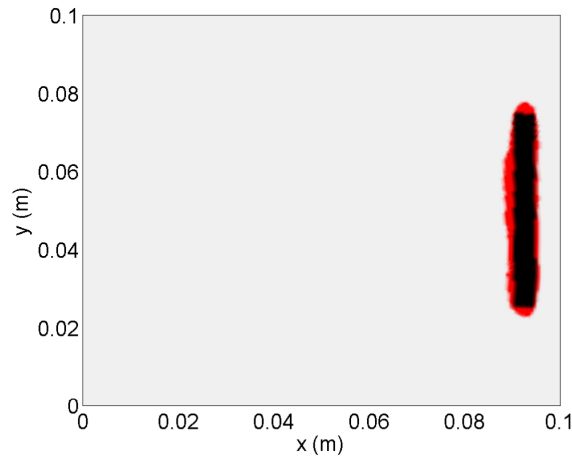


FIGURE 3.11 – Aire reconstruite pour le défaut de bois. En noir, la zone défectueuse correctement identifiée ; en rouge, la zone identifiée à tort comme étant défectueuse.

Défaut	Aire m ²	$\bar{E}_{\%}$
Cible	$2,178.10^{-4}$	-
Bois	$3,216.10^{-4}$	47,7

TABLE 3.2 – Résultats de la reconstruction de l'aire de la zone défectueuse pour le défaut de bois. Le paramètre $\bar{E}_{\%}$ représente l'erreur relative en pourcentage.

Défaut	cible W.m ⁻¹ .K ⁻¹	k W.m ⁻¹ .K ⁻¹	$\bar{E}_{\%}^k$	$\sigma_{\%}^k$
Bois	0,15	0,178	18,7	4,5

TABLE 3.3 – Résultats de l'identification de la conductivité du défaut de bois.

Défaut	cible J.m ⁻³ .K ⁻¹	ρc J.m ⁻³ .K ⁻¹	$\bar{E}_{\%}^{\rho c}$	$\sigma_{\%}^{\rho c}$
Bois	$1,1400.10^6$	$1,1405.10^6$	0	8,6

TABLE 3.4 – Résultats de l'identification de la capacité du défaut de bois.

montre que l'erreur d'estimation est répartie équitablement autour du défaut avec une légère prééminence à l'arrière de celui-ci, le défaut est bien localisé et la profondeur est respectée. La conductivité thermique k est identifiée avec une erreur relative moyenne de 18,7%, mais avec une très faible dispersion spatiale. L'autre paramètre ρc est identifié avec une erreur relative quasiment nulle, et un écart-type spatial inférieur à 10%. Bien que la zone défectueuse soit surévaluée, les résultats permettent de conclure sur la nature du défaut interne. Dans la suite de l'analyse, une méthode alternative est proposée. En effet il est intéressant de développer une méthode moins sensible aux instabilités numériques.

La section suivante introduit une méthode adaptée à la caractérisation des fonctions continues, moins à même à caractériser les changements brusques de propriétés, elle présente la particularité de diminuer les instabilités numériques et permet l'analyse des défauts présentant des ratios d'effusivité non unitaire

3.5 Méthode alternative

Les résultats précédents ont fait apparaître de fortes instabilités numériques pour les défauts présentant un ratio d'effusivité non unitaire. Bien que les nappes de propriétés à estimer ne soient discontinues, il apparaît utile dans le cadre de l'étude de développer une méthode alternative basée sur l'estimation de propriétés continues, permettant ainsi l'amortissement des instabilités numériques.

Le problème numérique constaté lors de l'identification de défauts présentant un ratio d'effusivité éloigné de l'unité apparaît lors du calcul de la différentielle de la fonctionnelle. Soit $\delta\bar{P} = (\delta\bar{k}, \delta\bar{\rho}c) \in \mathcal{U}$ une petite perturbation de δP , la différentielle de $\bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)$ s'obtient en calculant :

$$\begin{aligned} \bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)\delta\bar{P} = & - \int_0^{t_a} \int_{\Omega} \delta\bar{k} \nabla T \cdot \nabla \delta T^* dxdt + \gamma \int_{\Omega} \delta\bar{k} (k + \delta k - k^0) + \mu \int_{\Omega} \delta\bar{k} \delta k \\ & - \int_0^{t_a} \int_{\Omega} \delta\bar{\rho}c \frac{\partial T}{\partial t} \delta T^* dxdt + \gamma \int_{\Omega} \delta\bar{\rho}c (\rho c + \delta \rho c - \rho c^0) + \mu \int_{\Omega} \delta\bar{\rho}c \delta \rho c \end{aligned} \quad (3.16)$$

À l'inverse de l'étude précédente, ici, les paramètres reconstruits sont supposés continus et linéaires sur chaque élément (ie appartenant à $\mathcal{P}_{pm}^1(\mathcal{T}^h)$). Pour cela, les inconnues sont projetées sur le sous-espace des éléments finis utilisé lors du calcul direct :

$$k^h(x) = \sum_{i=1}^N k'_i \psi_i(x), \quad \rho c^h(x) = \sum_{i=1}^N \rho c'_i \psi_i(x) \quad (3.17)$$

avec $\{\psi_i\}_i$ les fonctions de base des éléments finis, et N la dimension du sous-espace (ie nombre de points). Les paramètres k^0 , ρc^0 , δk , $\delta \rho c$, $\delta\bar{k}$ et $\delta\bar{\rho}c$ se décomposent de la même manière. Ce qui permet d'écrire la différentielle $\bar{\mathcal{F}}'_P \forall i \in \llbracket 1; N \rrbracket$:

$$\bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)\delta\bar{k}'_i = \delta\bar{k}'_i \left[- \int_0^{t_a} \int_{\Omega} \psi_i \nabla T \cdot \nabla \delta T^* + \sum_{j=1}^N \left(\gamma(k'_j + \delta k'_j - k'_j{}^0) + \mu \delta k'_j \right) \int_{\Omega} \psi_i \psi_j \right] \quad (3.18)$$

$$\bar{\mathcal{F}}'_P(\delta P)\delta\bar{\rho}c'_i = \delta\bar{\rho}c'_i \left[- \int_0^{t_a} \int_{\Omega} \psi_i \frac{\partial T}{\partial t} \delta T^* + \sum_{j=1}^N \left(\gamma(\rho c'_j + \delta \rho c'_j - \rho c'_j{}^0) + \mu \delta \rho c'_j \right) \int_{\Omega} \psi_i \psi_j \right] \quad (3.19)$$

Comme expliqué précédemment, cette méthode a été développée pour l'estimation de champs de propriété continus et linéaire par éléments. Elle nécessite d'effectuer un produit scalaire[†] en chaque point du maillage. Le maillage choisi pour l'étude est donc plus grossier pour diminuer les temps de calcul (8 heures pour un défaut avec le nouveaux maillage pour 15 itérations de *Levenberg-Marquardt* comportant 20 itérations de gradient conjugué).

3.6 Résultats avec la méthode alternative

La méthode alternative, décrite en section 3.5, fonctionne avec les trois types de défaut considérés, cf tableau 3.1. La figure 3.12 présente les résultats de la reconstruction des champs de propriétés pour les différents types de défaut.

[†]ie un calcul du type $v^T M v$ avec v un vecteur et M une matrice.

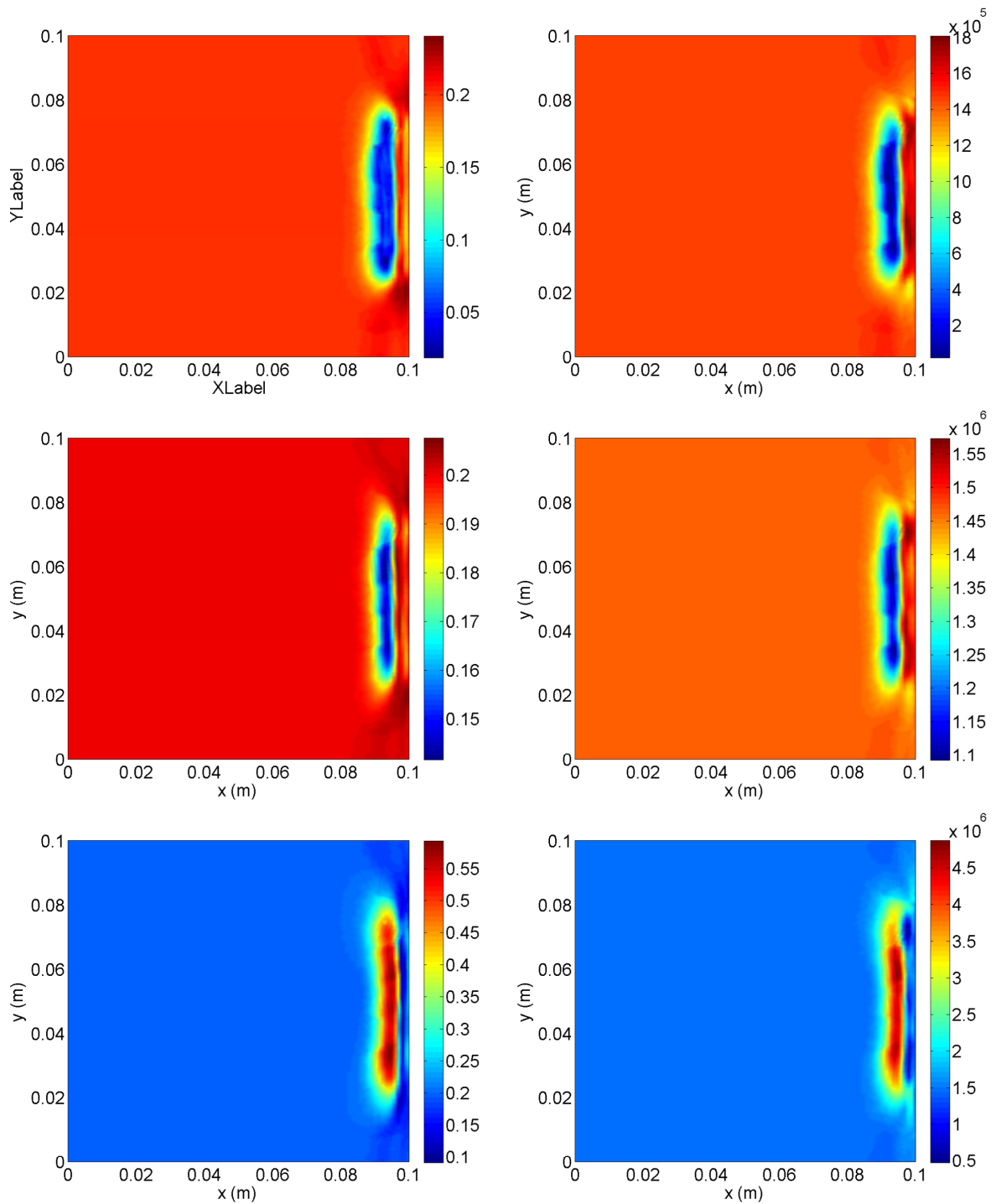


FIGURE 3.12 – Champs de propriétés thermophysiques reconstruits : à gauche la conductivité thermique, à droite la capacité thermique. En haut, défaut de liège ; au milieu, défaut de bois ; en bas, défaut d’acier.

Les résultats sont analysés à l'aide du seuil défini figure 3.7, permettant de déterminer si un point appartient au défaut. Les zones défectueuses reconstruites sont présentées figure 3.13 et les aires estimées sont reportées dans le tableau 3.5.

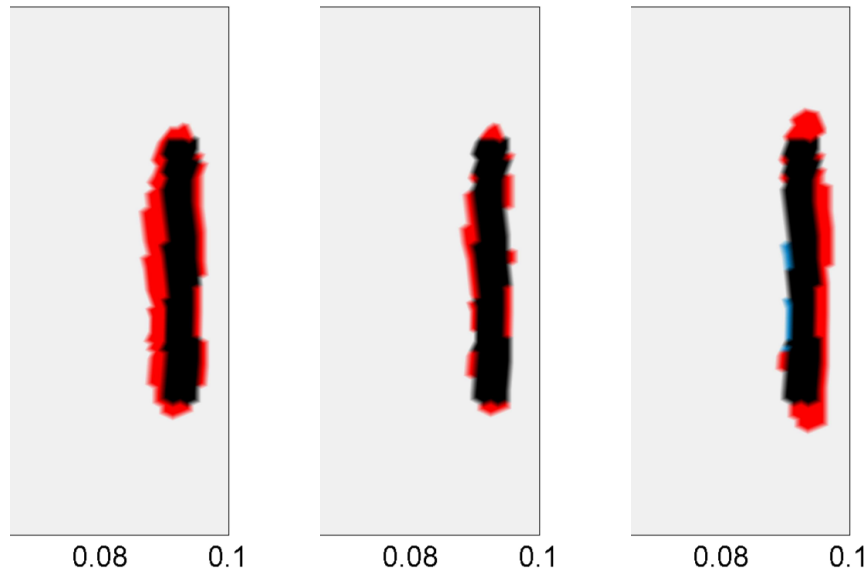


FIGURE 3.13 – Comparaison des zones défectueuses reconstruites pour les différents types de défaut, avec zoom au voisinage du défaut. En noir, la zone défectueuse correctement identifiée ; en bleu, la zone cible non identifiée ; en rouge, la zone identifiée à tort comme étant défectueuse.

Défaut	Aire	$\bar{E}\%$
Cible	$3,084.10^{-4}$	-
Liège	$4,946.10^{-4}$	60,4
Bois	$3,844.10^{-4}$	24,6
Acier	$4,370.10^{-4}$	41,7

TABLE 3.5 – Résultats de la reconstruction de l'aire de la zone défectueuse pour le défaut de bois. Le paramètre $\bar{E}\%$ représente l'erreur relative en pourcentage.

À l'image du chapitre 2, l'erreur relative sur l'aire estimée apparaît répartie autour du ratio d'effusivité du défaut. En revanche à l'inverse des observations du chapitre 2, l'acier présente une erreur relative plus faible que le liège. En d'autres termes il apparaît que la méthode proposée présente de meilleurs résultats pour les ratios unitaires et est moins résolue pour les ratios non unitaires. Encore une fois il convient de mettre en perspective l'erreur relative et sa répartition avec l'ordre de grandeur du volume cible. Même si l'acier présente une erreur plus faible que le liège il apparaît sur la figure 3.13 qu'elle est répartie sur la face *avant* du défaut, faussant ainsi sa localisation. L'aire estimée du bois apparaît quant à elle plus fidèle avec cette nouvelle méthode d'estimation qu'avec celle présentée section 3.3. Si la redéfinition de la méthode a permis l'amortissement des instabilités numérique, la définition du seuil de détection et le changement de maillage peuvent expliquer le changement dans le calcul de l'aire.

Afin de déterminer si la méthode est capable d'identifier le type du défaut, les tableaux 3.6 et 3.7 présentent les résultats de l'identification paramétrique. Le paramètre $\overline{E}_{\%}$ calcule l'erreur moyenne en pourcentage de la reconstruction, tandis que $\sigma_{\%}$ calcule l'écart-type spatial relatif en pourcentage représentatif de la dispersion au sein de l'aire défectueuse reconstruite.

Défaut	cible W.m ⁻¹ .K ⁻¹	k W.m ⁻¹ .K ⁻¹	$\overline{E}_{\%}^k$	$\sigma_{\%}^k$
Liège	0,039	0,084	114	32,7
Bois	0,15	0,164	9,6	7,6
Acier	15,1	0,460	97	0,8

TABLE 3.6 – Résultats de l'identification de la conductivité pour les différents types de défaut.

Défaut	cible J.m ⁻³ .K ⁻¹	ρc J.m ⁻³ .K ⁻¹	$\overline{E}_{\%}^{\rho c}$	$\sigma_{\%}^{\rho c}$
Liège	2,1600.10 ⁵	6,1205.10 ⁵	183,4	46,4
Bois	1,1400.10 ⁶	1,2340.10 ⁶	8,8	6,2
Acier	3,8664.10 ⁶	3,5038.10 ⁶	9,4	21,5

TABLE 3.7 – Résultats de l'identification de la capacité pour les différents types de défaut.

Il est intéressant de remarquer que la conductivité thermique estimée du bois apparaît mieux résolue avec cette nouvelle méthode (voir tableau 3.3), malgré un écart type spatial légèrement plus élevé. Comme pour le volume (à partir duquel les erreurs sont calculées) l'erreur relative sur la conductivité augmente grandement lorsque le ratio des effusivité n'est pas unitaire. Pour le liège la forte erreur relative sur la conductivité est là aussi à mettre en perspective avec la valeur cible, en effet contrairement à l'acier l'ordre de grandeur est respecté. Il est intéressant de remarquer l'effet de l'initialisation de l'algorithme (et donc de la régularisation). La conductivité de l'acier étant très éloignée de la valeur initiale, tableau 3.1, la procédure d'estimation s'arrête avant d'arriver à la valeur recherchée, il en est de même pour la capacité thermique massique estimée pour le liège. De plus, la méthode est à même de caractériser des fonctions continues, ainsi des propriétés thermophysiques du défaut fortement éloignées de celles de la matrice apparaissent plus difficiles à caractériser.

Cette section a présenté les résultats d'une méthode alternative d'estimation. La méthode permet, dans le cadre du bois, d'obtenir de meilleures estimations, aussi bien pour l'aire que pour les paramètres thermophysiques. L'étude a analysé le comportement de la procédure d'estimation en fonction des paramètres physiques de l'échantillon simulé. Il reste maintenant à étudier dans un cas favorable (le bois), le comportement de la procédure vis-à-vis de la distribution spatiale du défaut, en d'autre terme sa forme.

3.7 Étude sur d'autres formes de défaut

Cette section étudie le comportement de la méthode d'estimation en présence de défauts de formes variées à aire constante 2.5×10^{-4} cm², figure 3.14. En plus du rectangle déjà testé l'étude est appliquée sur une ellipse, un triangle entrant et un triangle sortant, ces défauts sont représentatif de délaminations et fissures proches de la surface. L'analyse est axée autour d'un défaut de bois, dont le ratio d'effusivité est proche de l'unité, tableau 3.1. La figure 3.14 présente les formes des défauts considérés projetées sur le maillage de l'étude précédente.

Après application de la méthode d'estimation, les champs de propriétés thermophysiques reconstruits sont présentés dans la figure 3.15. Des oscillations de Gibbs plus importantes sont observées sur les champs reconstruits des défauts non rectangulaires. Ces mêmes défauts ont la particularité d'être plus épais, un manque d'information dans la mesure pourrait expliquer la présence de ces oscillations, ce qui amène à postuler que le choix du temps de chauffe, $t_c = 450$ s, apparaît ici déterminant dans la résolution de la méthode. De plus, il est intéressant de remarquer que les défauts ne présentant pas de surfaces (orientées vers Γ_{IR}) rectilignes ou

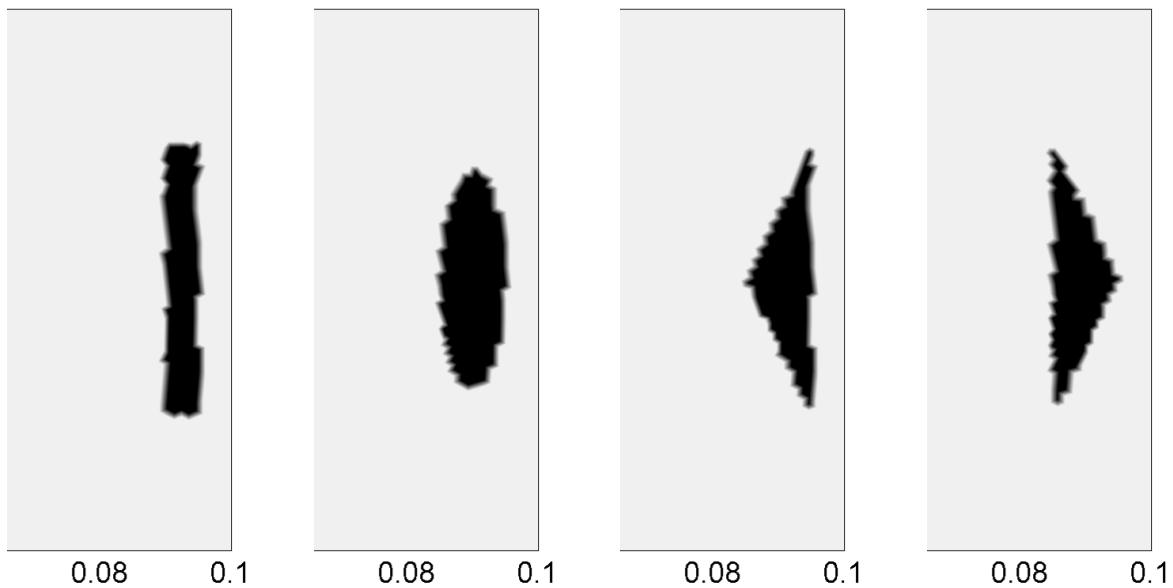


FIGURE 3.14 – Les différentes formes de défaut étudiées, zoom au voisinage du défaut.

du moins assez larges génèrent plus d'oscillations ; observables sur l'ensemble des défauts c'est particulièrement le cas pour le triangle sortant. À l'aide de la figure 3.15 il est alors possible d'indiquer qu'en plus de l'épaisseur et la largeur, l'angle d'attaque du défaut est déterminant pour la résolution spatiale de la méthode.

Les données reconstruites sont ensuite traitées indépendamment à l'aide du seuil défini section 3.4. La figure 3.16 présente les résultats de la procédure de détermination de l'aire défectueuse, avec en noir l'aire effectivement reconstruite, en rouge l'aire surestimée et en bleu l'aire non reconstruite. Les premières observations indiquant que pour les matériaux non rectangulaires, et donc plus épais, le temps de chauffe n'était pas suffisant semblent se confirmer ici, seuls les défauts non rectangulaires présentent des aires sous-estimées. Bien que des oscillations de Gibbs aient été remarquées pour les défauts non rectangulaires, elles n'affectent pas la détermination du volume défectueux. En revanche, l'effet du bord d'attaque, déjà observé sur les champs reconstruits figure 3.15, apparaît encore sur le triangle à pointe sortante. Plus que le bord d'attaque ce sont les différents angles des défauts qui apparaissent problématiques, en effet outre l'effet de la disposition des éléments (étudiés section 3.4), la surestimation de la zone défectueuse semble se concentrer autour des angles aigus de chaque échantillon, et ce, pour toutes les formes à l'exception de l'ellipse. Cette dernière observation laisse entrevoir la présence au sein de la méthode d'un *bulbe* minimal d'estimation dépendant de la résolution du maillage et des angles présentés par le défaut. Ces observations devront être mises en perspectives avec l'influence du temps de chauffe sur la résolution spatiale de la méthode.

Le tableau 3.8, présente les aires reconstruites en cm^2 . Tout comme pour les résultats précédents, dus à la résolution du maillage les aires cible sont légèrement différentes des aires théoriques simulées, c'est d'autant plus vrai pour l'ellipse.

Premièrement, il convient d'analyser les résultats présentés figure 3.8 conjointement avec la figure 3.16. Ainsi, le triangle à pointe entrante présente une faible erreur relative sur l'estimation de l'aire, de par sa géométrie la compensation entre l'aire surestimée et l'aire sous-estimée explique ces bons résultats. À l'inverse l'ellipse présente une géométrie bien reconstruite à l'exception de sa face arrière, le manque d'informations fait alors apparaître une forte erreur

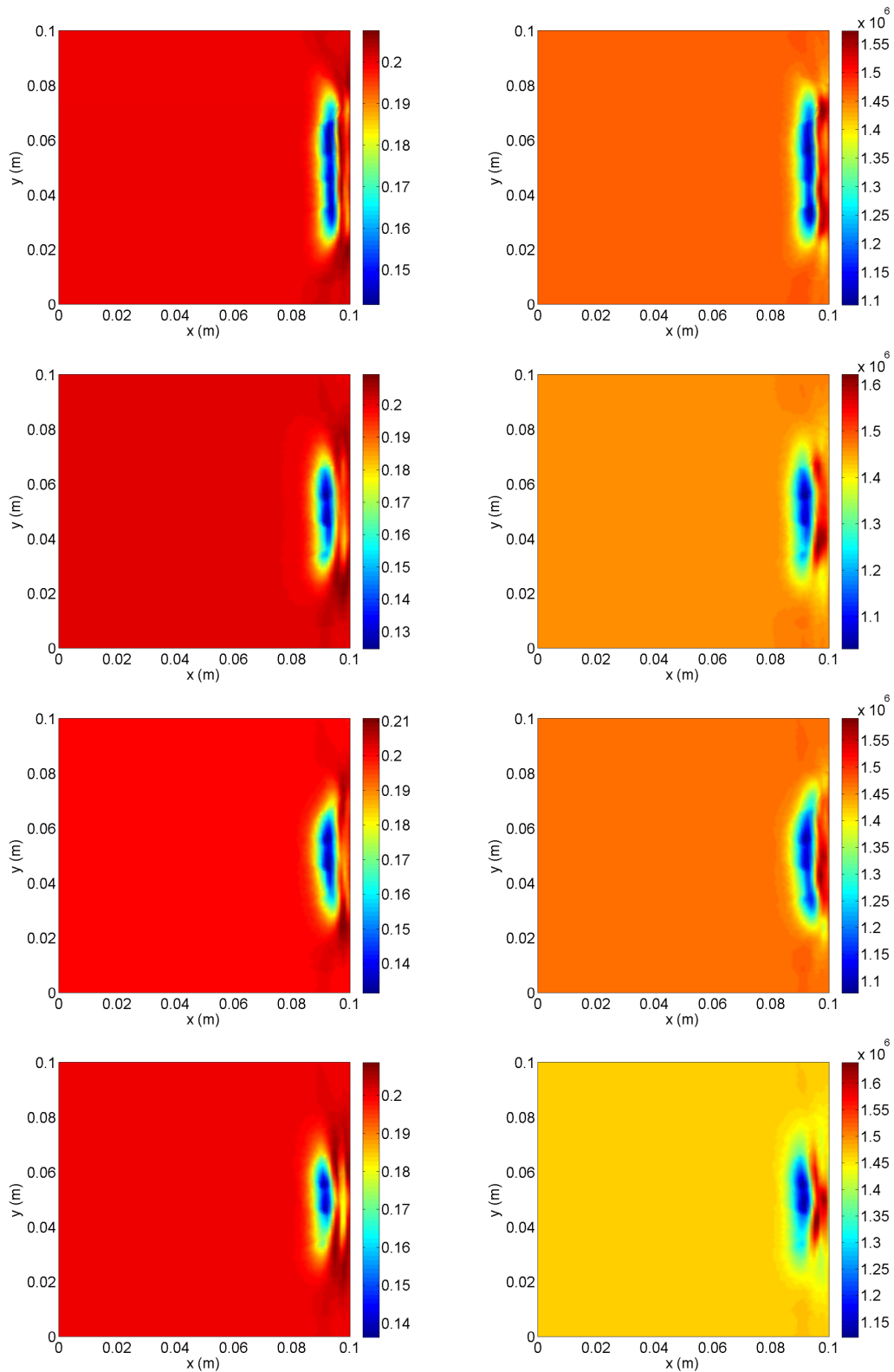


FIGURE 3.15 – Champs de propriétés thermophysiques reconstruits : à gauche la conductivité thermique, à droite la capacité thermique. De haut en bas, pour un défaut de forme rectangulaire, elliptique, triangulaire entrant, triangulaire sortant.

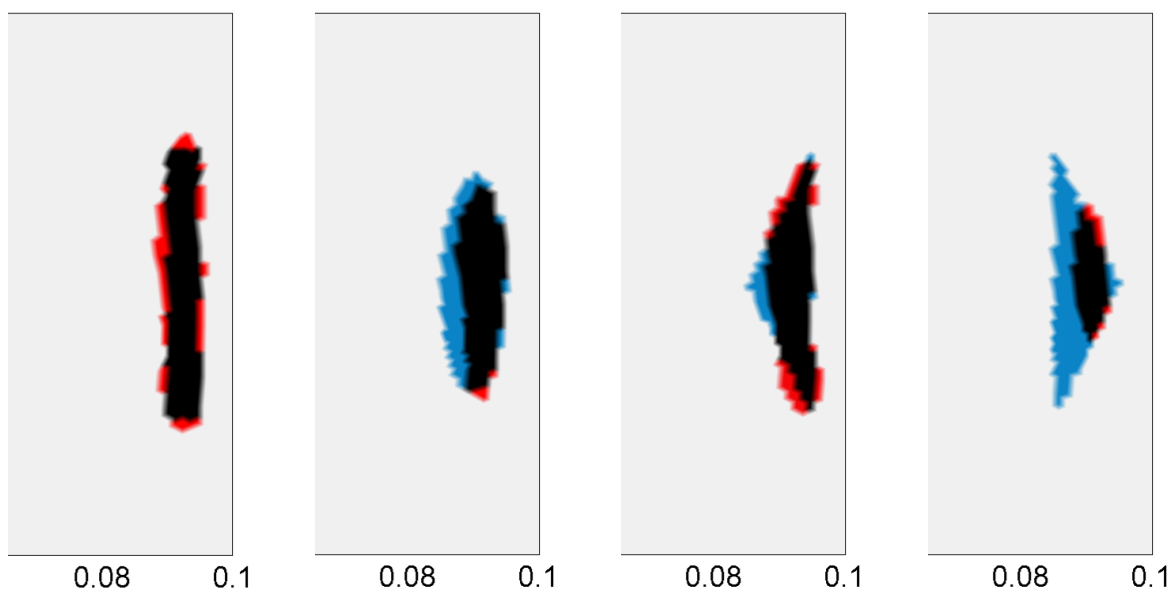


FIGURE 3.16 – Résultats de la reconstruction de la zone défectueuse du défaut de bois pour les différentes formes de défaut. En noir, la zone défectueuse correctement identifiée ; en bleu, la zone cible non identifiée ; en rouge, la zone identifiée à tort comme étant défectueuse.

Forme du défaut	Aire cible	Aire reconstruite	$\bar{E}_{\%}$
Rectangle	$3,084.10^{-4}$	$3,844.10^{-4}$	24,6
Ellipse	$3,670.10^{-4}$	$2,643.10^{-4}$	30
Triangle entrant	$3,005.10^{-4}$	$3,181.10^{-4}$	5,9
Triangle sortant	$3,067.10^{-4}$	$1,330.10^{-4}$	56,6

TABLE 3.8 – Résultats de la reconstruction de l'aire de la zone défectueuse du défaut de bois pour différentes formes de défaut. Le paramètre $\bar{E}_{\%}$ représente l'erreur relative en pourcentage.

relative, mais à l'image du défaut rectangulaire la répartition de cette erreur relative n'influe pas sur sa localisation ainsi que sur la reconstruction de sa géométrie. Ces différents résultats sont difficilement analysables, les défauts non rectangulaires présentant une reconstruction de leur répartition spatiale sous-estimée, ici encore le temps de chauffe choisi apparaît mal dimensionnée et une étude paramétrique sur la forme, l'aire et le temps de chauffe apparaît ici justifiée.

Les tableaux 3.9 et 3.10 présentent les résultats de l'estimation paramétrique. Tout comme pour l'étude précédente l'estimation des propriétés thermophysiques du bois présente une faible erreur relative. Il est intéressant de remarquer que la sous-estimation de l'aire défectueuse amène une erreur relative plus faible. Il en va de même pour l'écart type spatial, à l'exception de l'ellipse. La méthode reconstruisant une nappe de propriétés continues et la localisation fine de la frontière du défaut elliptique impliquent une augmentation de l'écart type spatial.

Pour résumer, pour les défauts présentant des angles d'attaques favorables, la sous-estimation de l'aire défectueuse est bénéfique à l'estimation paramétrique si et seulement si le défaut est bien localisé.

Forme	cible	k	$\overline{E}_{\%}^k$	$\sigma_{\%}^k$
Rectangle	0,15	0,1644	9,6	7,7
Ellipse	0,15	0,1525	1,7	9
Tri. entrant	0,15	0,1618	7,8	9,7
Tri. sortant	0,15	0,1553	3,5	6

TABLE 3.9 – Résultats de l'identification de la conductivité du défaut de bois pour les différentes formes de défaut.

Forme	cible	ρc	$\overline{E}_{\%}^{\rho c}$	$\sigma_{\%}^{\rho c}$
Rectangle	$1,140 \cdot 10^6$	$1,240 \cdot 10^6$	8,8	6,2
Ellipse	$1,140 \cdot 10^6$	$1,198 \cdot 10^6$	5,1	6,5
Tri. entrant	$1,140 \cdot 10^6$	$1,232 \cdot 10^6$	8	5,6
Tri. sortant	$1,140 \cdot 10^6$	$1,216 \cdot 10^6$	6,7	4,2

TABLE 3.10 – Résultats de l'identification de la capacité thermique massique du défaut de bois pour les différentes formes de défaut.

3.8 Synthèse

Résumé et principaux résultats

Ce chapitre a présenté le développement d'une méthode d'estimation de nappe de propriétés spatiales. Le modèle direct aux éléments finis est présenté puis une procédure d'estimation est analysée et détaillée. Après constatation d'une forte erreur numérique, la procédure d'estimation est redéfinie et permet la caractérisation du volume et des propriétés thermophysiques des défauts présentant un ratio unitaire. Enfin, la procédure est appliquée à une analyse paramétrique étudiant l'impact de la forme du défaut.

Synthèse des différentes sections

La section 3.1 présente le modèle direct utilisé. Résolus par éléments finis il permet la modélisation d'une matrice bidimensionnelle contenant un défaut rectangulaire, la résolution du modèle pour un maillage donné est présentée. L'analyse des thermogrammes de surface met en lumière l'impact du ratio d'effusivité du défaut sur la mesure. La section 3.2 introduit la modélisation inverse permettant le développement d'une procédure d'estimation paramétrique.

La section 3.3 détaille une première méthode de résolution du problème inverse. La procédure d'estimation est basée sur l'*algorithme de Levenberg-Marquardt*, le gradient de la fonctionnelle linéarisée est calculé à l'aide de l'état adjoint du modèle direct. La minimisation à proprement dit est elle assurée par l'algorithme du gradient conjugué. Cette méthode de résolution s'attache à reconstruire des nappes de propriétés spatiales discontinues constantes par éléments. Les différentes formulations analytiques continues et discrétisées de la fonctionnelle et de son gradient sont détaillées.

La section 3.4 présente les premiers résultats de la méthode. Il apparaît alors que la méthode des moindres carrés utilisée présente des oscillations de Gibbs aux abords des frontières du défaut. Un seuil de détection est proposé, défini par rapport à la nappe de propriétés estimées. Il ne nécessite pas de connaissances *a priori* et permet la caractérisation du volume défectueux au sein de la matrice. De plus, de sérieuses instabilités numériques sont observées pour les matériaux à ratios d'effusivité non unitaires. Malgré cela une première analyse sur un défaut de bois indique que la méthode permet la caractérisation fine des propriétés physiques du défaut malgré une surestimation de son volume.

Les conclusions de la première partie de l'étude amènent à la redéfinition de la procédure d'estimation. Présentée section 3.5, cette méthode est dimensionnée pour l'estimation de propriétés continues linéaires par éléments, moins à même de caractériser les changements brusques de propriétés, elle présente la particularité de diminuer les instabilités numériques et permet l'analyse des défauts présentant des ratios d'effusivité non unitaires. Là encore, les différentes formulations analytiques continues et discrétisées de la fonctionnelle et de son gradient sont détaillées.

La section 3.6 présente les résultats de cette nouvelle procédure sur l'ensemble des matériaux considérés. L'influence du ratio d'effusivité apparaît sur les résultats d'estimation. Contrairement à l'étude présentée chapitre 2, cette méthode présente de meilleurs résultats pour les ratios d'effusivité unitaires, ainsi le bois est correctement localisé et caractérisé. Bien que les autres ratios d'effusivité ne soient pas correctement caractérisés, leurs volumes identifiés respectent l'ordre de grandeur du volume cible. Le volume de défaut est surestimé pour le liège, mais l'erreur est également répartie ce qui permet sa localisation, en revanche ce n'est pas le cas pour le défaut d'acier. Les champs de propriétés thermophysiques estimés présentent les mêmes types de résultats, le bois apparaît bien caractérisé, le liège un peu moins et l'acier ne l'est pas du tout. La méthode, initialisée à la valeur de la matrice, est à même de caractériser des fonctions continues, en revanche les champs de propriétés cibles sont discontinus, ainsi des propriétés thermophysiques du défaut fortement éloignées de celles de la matrice apparaissent plus difficiles à caractériser. Ce fonctionnement s'explique en partie par le fait que la méthode est capable d'estimer, dans un ordre de grandeur satisfaisant, le volume défectueux de chaque défaut, mais caractérise difficilement leurs propriétés thermophysiques si le ratio d'effusivité n'est pas unitaire.

Enfin la section 3.7 présente une étude paramétrique sur la forme du défaut. Suite aux observations des sections précédentes, un défaut en bois est choisi pour l'analyse. Les différentes formes traitées sont, le rectangle, l'ellipse, et le triangle pointe sortante et entrante. L'aire est constante pour chacune des formes. Des oscillations de Gibbs plus importantes sont observées sur les champs reconstruits des défauts non rectangulaires. Ces mêmes défauts ont la particularité d'être plus épais, un manque d'information dans la mesure pourrait expliquer la présence de ces oscillations, ce qui amène à postuler que le choix du temps de chauffe, $t_c = 450s$ est déterminant dans la résolution spatiale de la méthode. De plus, il est intéressant de remarquer que les défauts ne présentant pas de surfaces rectilignes ou du moins pas assez larges génèrent plus d'oscillations ; observable sur l'ensemble des défauts c'est particulièrement le cas pour le triangle sortant. Il est alors possible d'indiquer qu'en plus de l'épaisseur et de la largeur, l'angle d'attaque du défaut est déterminant pour la résolution spatiale de la méthode. Ainsi, excepté pour le rectangle, l'aire défectueuse est sous-estimée.

Conclusion et perspectives

À la sortie de l'étude un certain nombre de perspectives apparaissent. Ainsi, une étude plus poussée doit être réalisée afin d'expliquer la présence d'instabilités numériques sur les résultats de la première méthode. Une réflexion sur l'expression du modèle inverse doit elle aussi être menée afin d'envisager la caractérisation de fortes disparités au sein de la matrice. Une large étude paramétrique sur la géométrie, l'aire, le temps de chauffe et les propriétés thermophysiques devrait contribuer à mieux cerner la résolution spatiale minimale de la méthode en fonction du maillage utilisé. Enfin une réflexion sur la méthode de calcul d'une fonctionnelle

construite à l'aide de mesures infrarouges doit être menée (interpolation, nombre de mailles en surface fixé par le procédé de mesure etc.)

Suite aux conclusions des chapitres 2 et 3, la section suivante s'intéresse à la notion de temps de chauffe *optimal* et propose une discussion sur son impact sur la procédure d'estimation développée chapitre 2.

Conception optimale d'expérience : Sur l'optimisation du temps de chauffe

Les chapitres 2 et 3 ont posé les bases du transfert de chaleur au sein de systèmes multi-couches épais. Le chapitre 2 a introduit la modélisation quadripolaire unidimensionnelle et a mené au développement d'une procédure d'estimation des propriétés physiques de systèmes multi-couches épais. L'étude a néanmoins fait apparaître des points singuliers dans la méthode (ratio d'effusivité, propagation des incertitudes sur l'estimateur des paramètres, etc..). D'autre part le chapitre 3 a mis en évidence l'importance du temps de chauffe, notamment en présence de système épais.

Le contrôle non destructif par thermographie infrarouge active nécessite une source de chaleur contrôlée afin d'exciter le système diagnostiqué. Traditionnellement (cf. chapitre 1) le contrôle de la source consiste essentiellement à choisir l'amplitude et l'allure de la fonction de chauffage par rapport au système étudié, et procéder à des essais de mise au point pour le choix des durées d'excitation. Ce chapitre propose une méthode permettant d'assister l'expérimentateur dans le dimensionnement de l'excitation thermique et étudie son impact sur la procédure développée au chapitre 2.

La première section détaille le développement d'un indicateur de chauffe optimale à partir d'observations réalisées sur les courbes de contraste thermique.

4.1 Observations et formulation de l'indicateur I_{ph}

L'étude développée précédemment dans ce manuscrit a produit des résultats justifiant le choix d'une excitation créneau pour le diagnostic de multi-couches épais. Dans cette section il s'agit de développer et d'étudier une méthode permettant le dimensionnement de l'excitation créneau ainsi que l'amélioration possible des performances de la procédure d'estimation de paramètres. Ces développements partent d'une réflexion sur l'évolution des systèmes dynamiques. Il est possible d'émettre l'hypothèse que dans le cas du transfert de chaleur au sein d'un corps, le contraste thermique est un moyen d'étudier la dynamique d'un défaut. Contrairement aux autres définitions possibles d'un contraste thermique (running, standard, normalisé) [Maldague, 2001], le contraste absolu ΔT , ne fait pas apparaître de ratio et est donc, exprimé en degrés $^{\circ}C$ ou Kelvin K . C'est pour cette propriété que l'étude est ici basée sur ce type de calcul :

$$\Delta T = T_{sain} - T_{def} \quad (4.1)$$

La figure 4.1 présente l'allure de l'évolution du contraste thermique pour un temps de chauffe t_c donné.

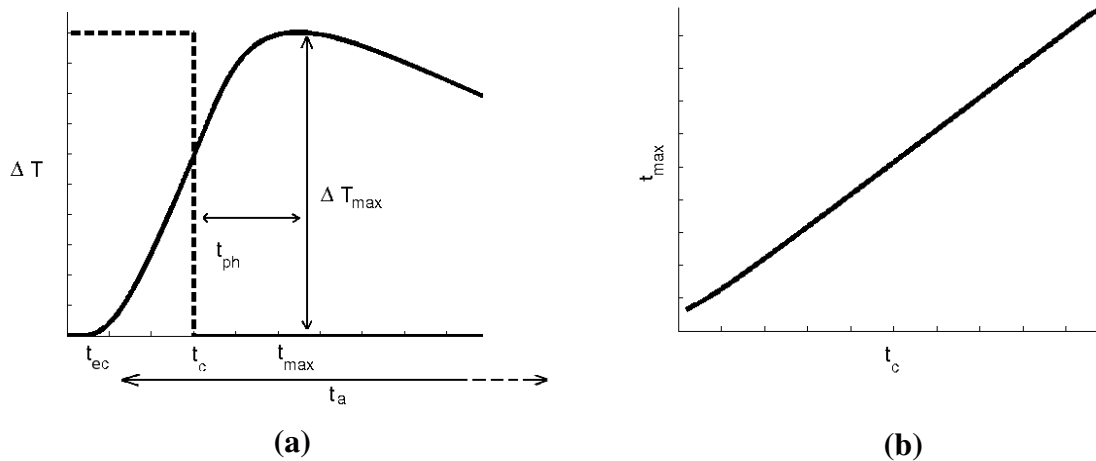


FIGURE 4.1 – (a) Allure du contraste thermique absolu. (b) Allure de $t_{max} = f(t_c)$

Les différents temps et valeurs caractéristiques présentés figure 4.1a, ont déjà été étudiés dans la littérature. Ainsi l'étude aux temps courts (t_{ec}) du contraste thermique, appelé *early detection* ou *early contrast*, présente une dépendance quadratique à la profondeur du défaut [Krapez *et al.*, 1994], contrairement au temps d'arrivée du contraste maximum t_{max} dépendant quasi-linéairement de la profondeur [Plotnikov et Winfree, 2000]. Historiquement la dépendance hyperbolique (i.e $1/x^3$) du temps d'apparition de contraste t_a à la profondeur [Cielo *et al.*, 1987] est la première à avoir été étudiée à la connaissance de l'auteur.

Le comportement de ΔT_{max} en fonction de la profondeur d'un défaut a lui aussi été l'objet d'études [Vavilov *et al.*, 1993]. Plus récemment une étude de ces différents paramètres propose d'intégrer les effets des transferts thermiques latéraux induits par le défaut dans la définition des corrélations précédentes [Almond et Pickering, 2012].

Chacune de ces études a permis le développement de méthodes d'estimation directe de la profondeur d'un défaut. En revanche la plupart de ces corrélations ne sont valides que pour l'excitation impulsionnelle ou des excitations créneaux courtes et pour un assemblage de matériaux donné. En effet, si t_{ec} de par sa signification apparaît invariant vis-à-vis du temps d'excitation, ce n'est pas le cas pour le temps d'apparition du contraste maximum, figure 4.1b. Le temps de chauffe apparaît alors être un paramètre d'importance pour l'optimisation de la procédure de contrôle. Une étude proposée par [Feuillet *et al.*, 2012] met en lumière l'influence du temps d'excitation et d'observation dans l'établissement d'une procédure d'estimation de paramètres. De plus, l'étude proposée chapitre 2 fait apparaître des systèmes multi-couches épais où l'influence des couches supérieures ne permet pas d'utiliser les corrélations établies dans la littérature.

Pour être menée à bien, la procédure d'estimation doit être construite autour d'un modèle sensible à ses paramètres et appliquée sur des mesures contenant un certain niveau d'informations sur la nature du défaut recherché. Émettant l'hypothèse que le niveau d'information contenue dans une mesure peut être observé à l'aide du contraste thermique, alors ΔT_{max} tout comme $\Delta T(t_{ec})$ apparaissent représentatifs de la *déteabilité* du défaut, d'autre part le *comportement*

dynamique induit par la présence d'un défaut doit lui aussi être mesurable, cette notion *automatique* est ici traduite par le calcul du déphasage entre $\Delta T(t_c)$ et ΔT_{max} , $t_{ph} = t_{max} - t_c$. La figure 4.2a présente l'évolution de ΔT_{max} et t_{ph} en fonction du temps de chauffe t_c .

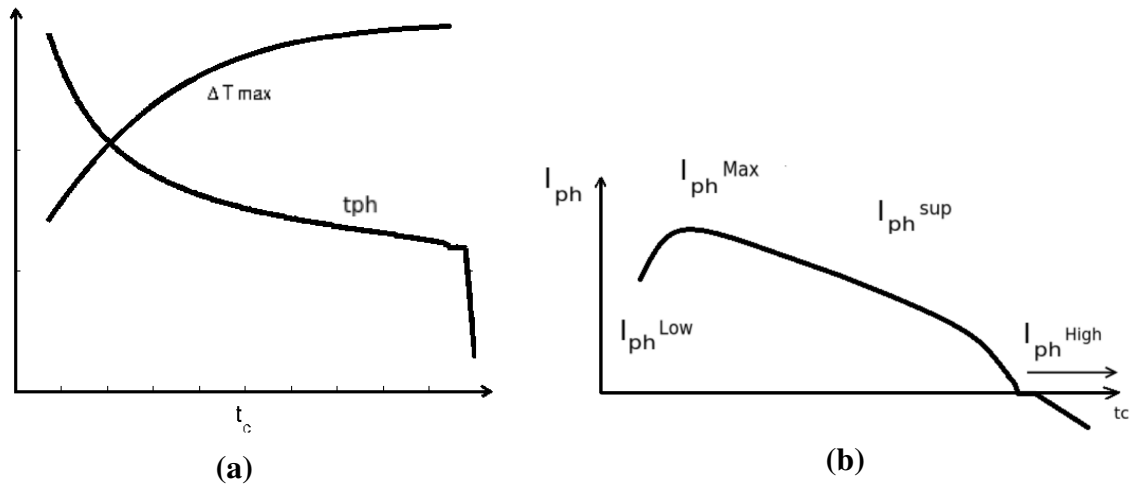


FIGURE 4.2 – (a) Évolution de Δt_{max} et t_{ph} (b) Évolution de I_{ph}

L'analyse de la figure 4.2a a mis en lumière la proportionnalité inverse de la *délectabilité* vis-à-vis de la *dynamique du système*. Ainsi une chauffe courte (impulsion) tend à maximiser la *dynamique du système* au détriment de la *délectabilité* et donc du ratio signal sur bruit, a contrario une excitation plus longue tend à maximiser la *délectabilité* au détriment de la *dynamique*. L'objet de l'étude est ici de dimensionner un indicateur permettant d'établir le meilleur compromis entre ces deux notions et d'étudier son impact sur la procédure d'estimation de paramètres. Il est aussi question d'étudier ici le temps où une augmentation du temps de chauffe n'influe plus significativement sur la mesure et l'estimation [Feuillet *et al.*, 2012]. L'indicateur proposé est présenté équation 4.2 et son allure est indiquée figure 4.2b.

$$I_{ph}(t_c) = |\Delta T_{max}(t_c)| t_{ph}(t_c) \quad (4.2)$$

$$t_c^* = \max_{t_c} (I_{ph}(t_c)) \quad (4.3)$$

avec $|\cdot|$ la valeur absolue.

Le calcul de I_{ph} en K.s pour un ensemble de temps de chauffe donné fait alors apparaître un maximum, il est alors possible d'émettre l'hypothèse que t_c^* défini équation 4.3 permet d'obtenir le meilleur compromis entre ΔT_{max} et t_{ph} . Remarquez sur les figure 4.2a et b qu'une fois le contraste maximum atteint ($\max_{t_c} (\Delta T_{max}(t_c))$), t_{max} n'évolue plus, le système apparaît alors complètement *chargé*.

L'étude principale porte sur les systèmes multi-couches épais, à des fins d'analyse le système est ici simplifié. Il consiste en un matériau monolithique appelé matrice où un défaut peut être inclus. Le système étudié ainsi que son analogie unidimensionnelle sont présentés figure 4.3.

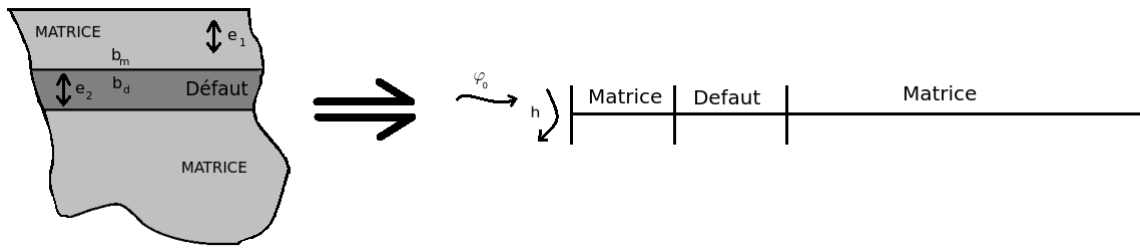


FIGURE 4.3 – Système étudié et analogie 1D

L'étude est basée, comme précédemment, sur l'évolution de l'indicateur I_{ph} en fonction du ratio d'effusivité entre la matrice et le défaut considéré. Le tableau 4.1 présente les caractéristiques des défauts analysés. Enfin l'analyse des ratios d'effusivité est complétée avec la base de matériaux disponibles en annexe IV. Noter que dans un premier temps le système est étudié à épaisseur et profondeur fixées.

Matériaux	k W/m.K	ρ kg/m ³	C J/kg.K	$\frac{b_{Matrice}}{b}$ W. \sqrt{s} /m ² .K	R W/K	$e_1 = e_2$ mm
Matrice	0.2	1200	1220	1	0.01	2
Acier	15.1	8055	480	0.07	$1.324e^{-5}$	2
Bois	0.15	600	1900	1.31	0.0013	2
Liège	0.039	120	1800	5.91	0.0051	2
Air	0.0242	1.225	1006	99.31	0.0083	2

TABLE 4.1 – Propriétés physiques utilisées

La figure 4.4 présente les valeurs de ΔT_{max} , t_{ph} et I_{ph} pour chacun des matériaux étudiés avec $t_c \in [10; 500]$. L'évolution de ΔT_{max} en fonction du temps de chauffe apparaît suivre une croissance exponentielle à coefficient négatif. De plus l'évolution de ΔT_{max} affiche des temps d'apparition du contraste maximum inversement proportionnels au ratio d'effusivité, ceci peut s'apparenter à l'effet de *puits* induit par la présence d'un défaut à forte capacité de diffusion.

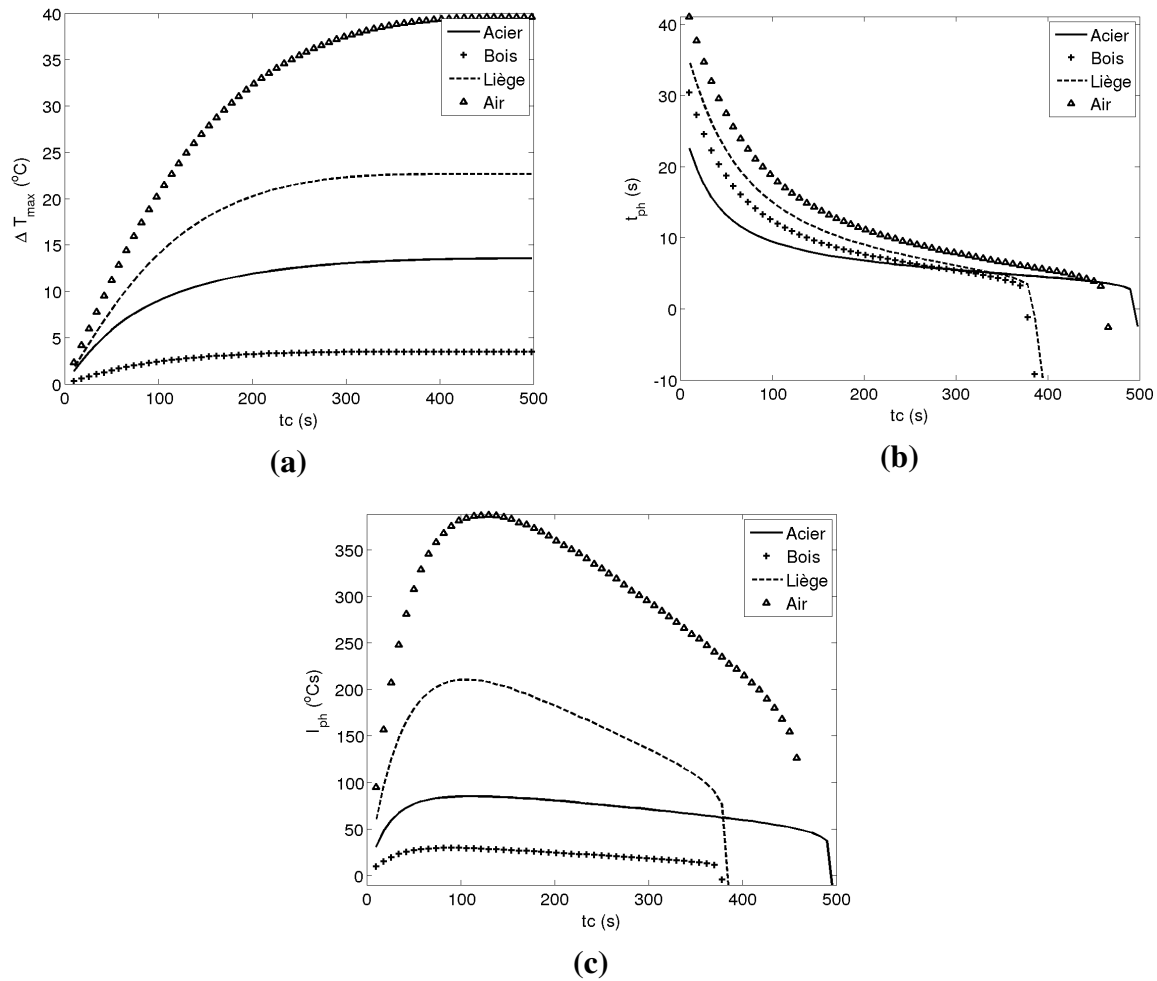


FIGURE 4.4 – (a) Évolution de ΔT_{max} (b) Évolution de t_{ph} (c) Évolution de I_{ph}

La durée de déphasage t_{ph} tend, quant à elle, à suivre l'évolution inverse. Les comportements inversés de ΔT_{max} et t_{ph} stabilisent l'apparition du maximum de I_{ph} . Le tableau 4.2 conforte ces premières observations, ainsi les différents temps t_{ph} et t_c^* apparaissent faiblement impactés par le ratio d'effusivité contrairement aux valeurs absolues ΔT_{max} et $\max I_{ph}$.

Matériaux	t_c^* s	$\max(I_{ph})$ K.s	$\Delta T_{max}(t_c^*)$ K	$t_{ph}(t_c^*)$ s
Acier	120	85	9.8	8.3
Bois	88	29	2.2	13.5
Liège	108	210	14.7	14.3
Air	128	388	24.6	15.26

TABLE 4.2 – Résultats pour les matériaux étudiés

La figure 4.5 présente les résultats obtenus en étendant l'étude à un large nombre de ratios d'effusivité.

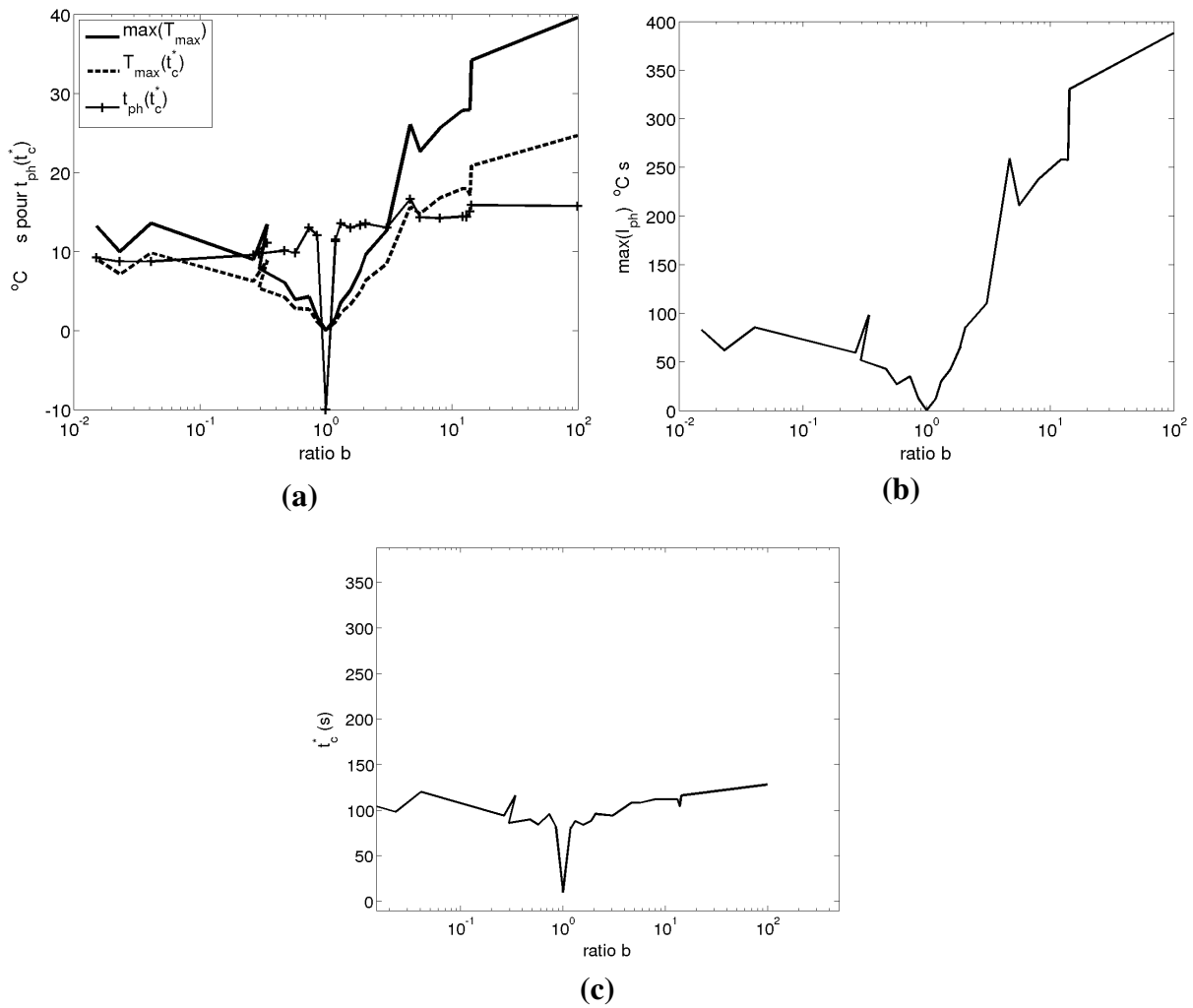


FIGURE 4.5 – Evolution des composantes de l'indicateur en fonction du ratio d'effusivité - (a) Évolution de $\max(\Delta T_{max})$, $\Delta T_{max}(t_c^*)$ et $t_{ph}(t_c^*)$ - (b) Évolution de $\max(\Delta I_{ph})$ - (c) Évolution de t_c^*

Conformément aux précédentes observations $t_{ph}(t_c^*)$ apparaît constant par rapport au ratio d'effusivité. Cette observation tend à montrer que $t_{ph}(t_c^*)$ reflète en grande partie la géométrie du système, qui est constante dans cette étude, et $\Delta T_{max}(t_c^*)$ reflète les propriétés du défaut. Ces comportements tendent à lier fortement t_c^* à la géométrie du système, plus qu'à la nature du défaut. t_c^* apparaît alors comme le temps minimum de chauffe à partir duquel l'information sur la géométrie du système est contenue dans le thermogramme.

Afin d'affirmer ou d'infirmer ces dernières observations, l'étude est étendue au comportement de la sensibilité aux paramètres du modèle ainsi que de la procédure d'estimation en fonction du temps de chauffe. C'est ce que les sections suivantes proposent de mettre en lumière.

4.2 Comportement vis-à-vis de la sensibilité aux paramètres du modèle

La sensibilité locale permet d'étudier l'influence des paramètres sur la sortie du modèle [Beck et Arnold, 1977, Saltelli et al., 2000, Orlande et al., 2011]. En cohérence avec les termes utilisés dans la section 4.1 la sensibilité au paramètre traduit l'information contenue dans le thermo-

gramme étudié. L'étude de sensibilité précédente, section 2.4, a mis en évidence l'influence du ratio d'effusivité entre la matrice et le défaut. Ici l'analyse de sensibilité étudie l'impact du temps de chauffe sur le niveau de sensibilité (et donc d'information) du modèle pour les quatre défauts présentés précédemment. Dans un premier temps la figure 4.6 présente les courbes de sensibilités réduites $S = P \frac{\partial T}{\partial P}$ pour $t_c = t_c^*$ avec $P = [e_1, R_2, b_2]$.

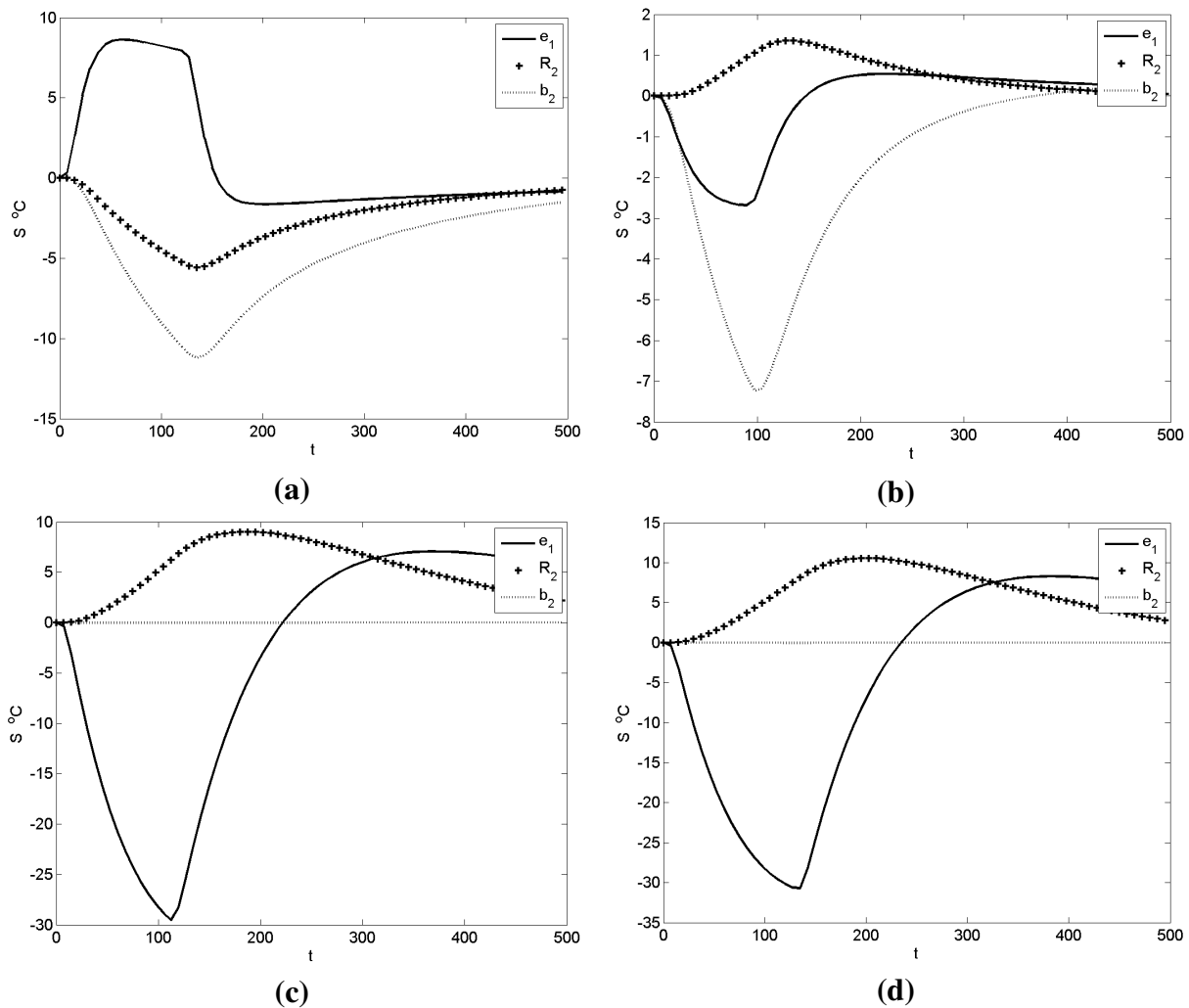


FIGURE 4.6 – Courbe de sensibilité réduite pour $t_c = t_c^*$ (a) Acier. (b) Bois. (c) Liège. (d) Air

L'analyse de la figure 4.6 fait apparaître des comportements vis-à-vis du ratio d'effusivité similaires aux conclusions précédentes. À savoir un niveau de sensibilité accru à e_1 et R_2 pour les matériaux présentant un fort ratio d'effusivité et une diminution significative pour les ratios unitaires. La sensibilité aux paramètres d'un défaut de type acier apparaît renforcée avec le temps de chauffe. Cette observation implique que la sensibilité augmente avec le temps de chauffe, ce qui est évident. En revanche, la sensibilité réduite peut être comparée à l'amplitude du signal thermique T généré [Faugeroux, 2004]. Ainsi il apparaît intéressant d'exprimer la sensibilité réduite proportionnelle S^* , équation 4.4 permettant d'étudier l'évolution du niveau

d'information contenu dans les thermogrammes en fonction du temps de chauffe*.

$$\bar{t}_c = \frac{tc}{t_c^*}$$

$$S^*(\bar{t}_c) = \frac{\max |S(\bar{t}_c)|}{\max T(\bar{t}_c)} \quad (4.4)$$

Pour cette analyse la sensibilité réduite proportionnelle est exprimée à l'aide des maxima de S et T , il aurait sans doute été plus rigoureux d'exprimer le maximum pour un t_c donné de $S^*(t) = S(t)/T(t)$. L'étude se voulant, ici, globale l'hypothèse que $S^*(\bar{t}_c)$ est représentatif du niveau d'information contenu dans le thermogramme est émise. Le comportement des coefficients de corrélation non linéaire en fonction de t_c a été étudié, mais le changement de conditions de mesures (temps d'observation et temps de chauffe) rendent la comparaison difficile. C'est pourquoi ils ne sont pas présentés ici.

La figure 4.7 présente l'évolution de S^* en fonction du temps de chauffe pour les quatre défauts sélectionnés où $\bar{t}_c(t_c^*) = 1$.

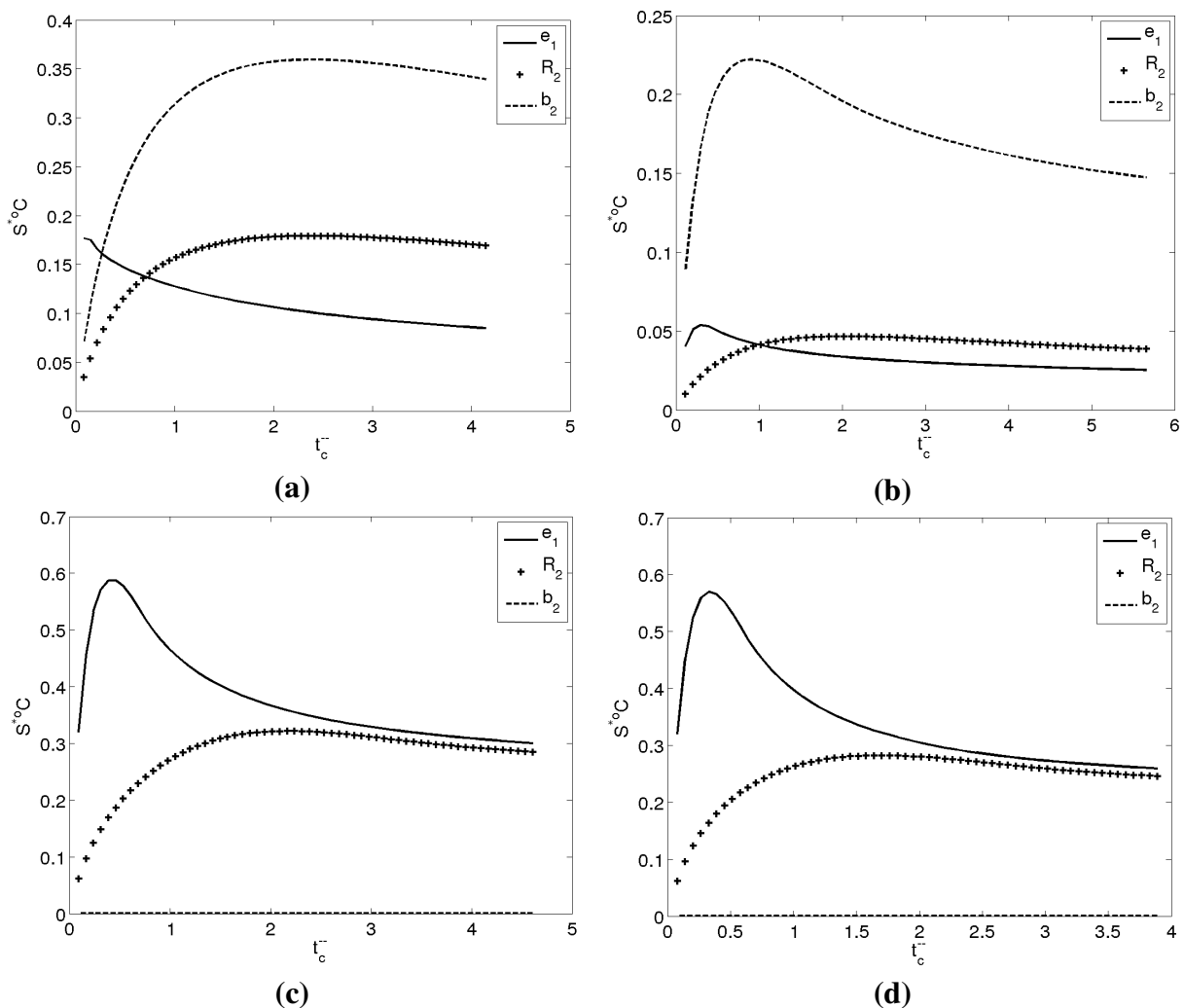


FIGURE 4.7 – Évolution du maximum de sensibilité adimensionné S^*
(a) Acier. (b) Bois. (c) Liège. (d) Air

L'analyse de la figure fait apparaître des niveaux de sensibilité réduite proportionnelle faibles pour les ratios d'effusivité $\frac{b_1}{b_2} \leq 1$, en accord avec les observations du chapitre 2. Il est quand

Notez que S^ pourrait être vu comme une expression du ratio signal sur bruit (SNR) [Vavilov *et al.*, 1998]

même intéressant de remarquer que le modèle affiche une forte sensibilité à b_2 pour ces matériaux. Les matériaux à fort ratio d'effusivité affichent quant à eux des sensibilités proportionnelles qui, après avoir atteint leur maximum respectif, sont décroissantes avec le temps de chauffe, justifiant le développement d'un indicateur du temps optimal d'excitation. Ainsi pour les matériaux considérés t_c^* apparaît être le temps où la sensibilité réduite proportionnelle à R_2 tend vers son maximum tandis que celle de e_1 tend vers une courbe affine décroissante. Cette stabilisation de la sensibilité proportionnelle induit que le maximum de sensibilité aux paramètres du système est atteint. Les courbes d'évolution du maximum de contraste ainsi que son temps d'arrivée en fonction de \bar{t}_c sont présentées annexe IV figures 29 et 30.

L'analyse de sensibilité en fonction du temps de chauffe met en évidence le caractère optimal de t_c^* , du moins pour les matériaux à fort ratio d'effusivité. La section suivante analyse les résultats de la procédure d'estimation développée chapitre 2 en fonction de \bar{t}_c .

4.3 Comportement vis-à-vis de la procédure d'estimation de paramètres

L'analyse de sensibilité précédente indique que t_c^* est lié au maximum de sensibilité locale proportionnelle. Cette section complète l'analyse en étudiant les résultats de la procédure d'estimation en fonction du temps de chauffe adimensionné \bar{t}_c . Les figures 4.8 et 4.9 présentent l'évolution de l'erreur relative d'estimation en fonction de \bar{t}_c , pour les estimateurs \hat{e}_1 et \hat{R}_2 des quatre défauts présentés tableau 4.1 et pour deux niveaux de bruits blancs de moyennes nulles $\sigma_b = 0^\circ C$ et $\sigma_b = 0.5^\circ C$.

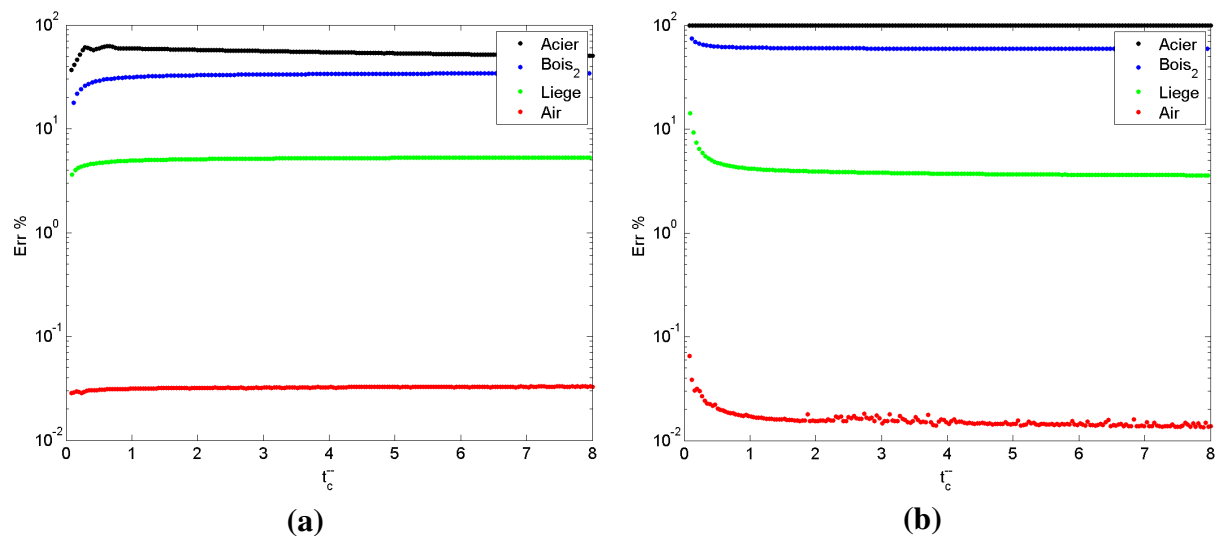


FIGURE 4.8 – Évolution de l'erreur relative de l'estimateur des paramètres en fonction du temps de chauffe \bar{t}_c
(a-b) \hat{e}_1 et \hat{R}_2 pour $\sigma_b = 0^\circ C$

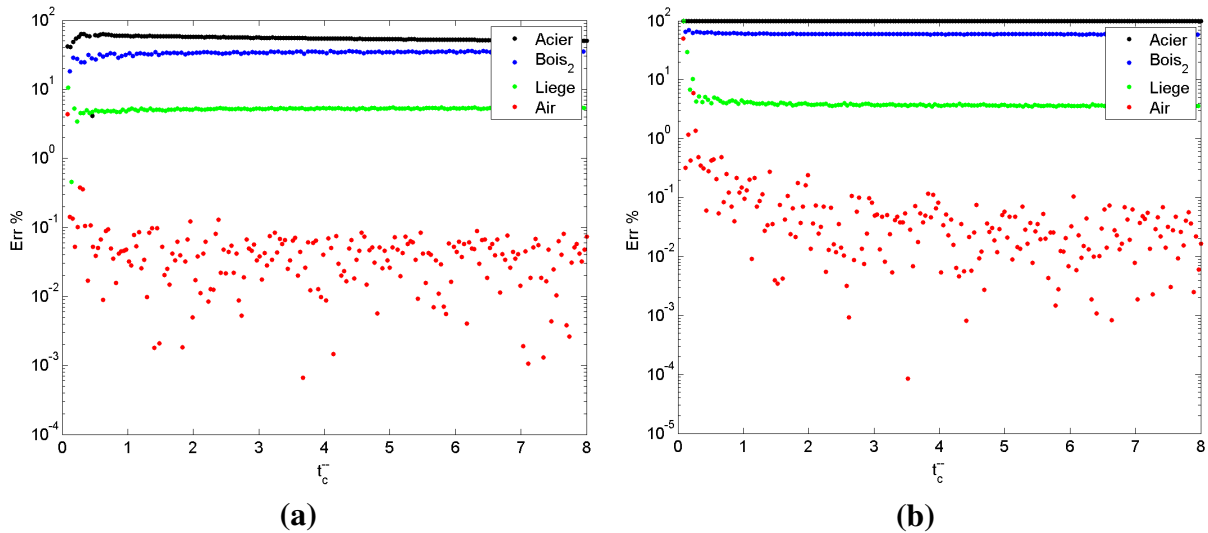


FIGURE 4.9 – Évolution de l'erreur relative de l'estimateur des paramètres en fonction du temps de chauffe \bar{t}_c
(a-b) \hat{e}_1 et \hat{R}_2 pour $\sigma_b = 0.5^\circ C$

L'analyse des figures 4.8 et 4.9 fait apparaître une erreur relative sur \hat{e}_1 constante, et une décroissance exponentielle de l'erreur relative sur \hat{R}_2 . Il apparaît pour cette dernière que la constante de temps de la décroissance équivalente à $\bar{t}_c \approx 1$ soit t_c^* . Le temps t_c^* apparaît ici être le temps de chauffe à partir duquel l'erreur relative sur les paramètres thermophysiques du défaut tend à être minimisée. Le comportement vis-à-vis des ratios d'effusivité est similaire à celui observé section 2.5, les matériaux présentant des ratios d'effusivité faibles ou unitaires sont difficilement caractérisés par la procédure d'estimation. Comme pour la section 2.5 la présence d'un bruit blanc de moyenne nulle fait apparaître un offset constant sur l'erreur relative, excepté pour l'air où le bruit de mesure provoque une forte dispersion, mais l'erreur relative de ce dernier reste sous la barre des 1%. Afin de compléter l'analyse, les figures 4.10 et 4.11 présentent l'évolution de l'écart type de l'estimateur des paramètres $\sigma_{\hat{p}}$ en fonction de \bar{t}_c pour les quatre matériaux et deux niveaux de bruits de mesures.

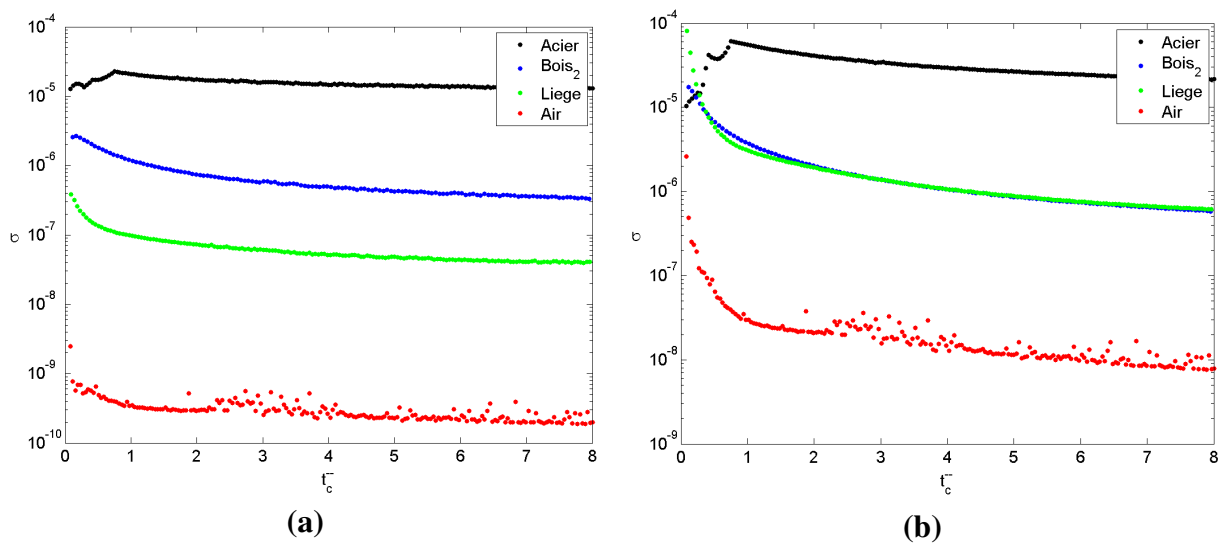


FIGURE 4.10 – Évolution de l'écart type de l'estimateur des paramètres en fonction du temps de chauffe \bar{t}_c
(a-b) σ_{e_2} et σ_{R_3} pour $\sigma_b = 0^\circ C$

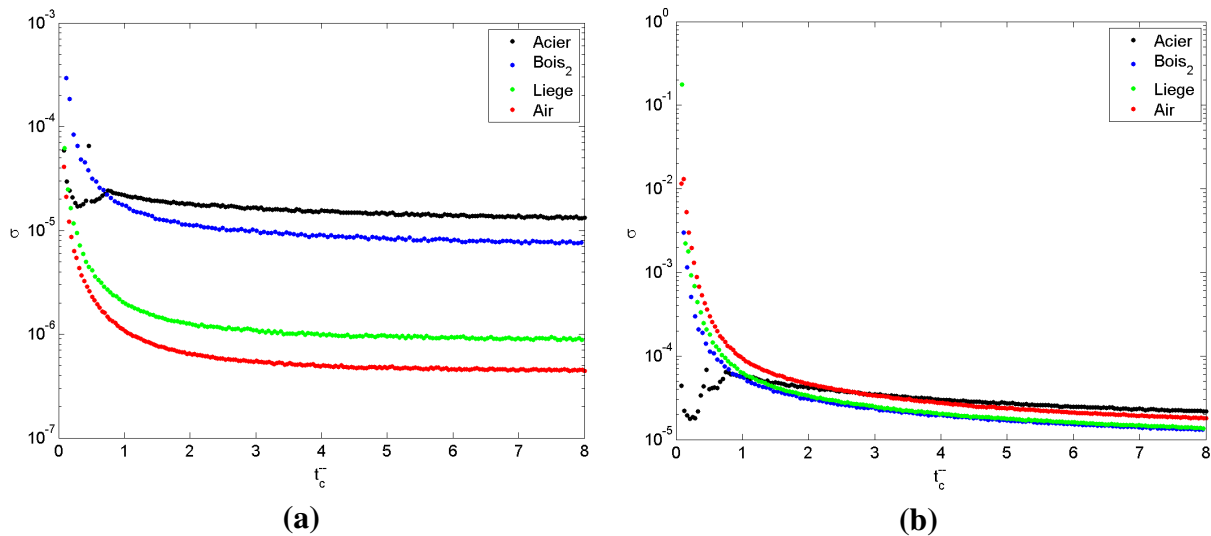


FIGURE 4.11 – Évolution de l'écart type de l'estimateur des paramètres en fonction du temps de chauffe \bar{t}_c
(a-b) σ_{e_2} et σ_{R_3} pour $\sigma_b = 0.5^\circ C$

À la différence de l'analyse sur les erreurs relatives, ici les deux estimateurs des paramètres apparaissent suivre une décroissance exponentielle. t_c^* apparaît encore une fois être le temps de chauffe à partir duquel $\sigma_{\hat{p}}$ tend à être minimisé. Ce comportement observé sur les figures 4.8 à 4.10 indique que t_c^* n'est pas le temps optimal de chauffe, comme l'analyse de sensibilité tendait à le montrer, mais le temps à partir duquel l'erreur relative et l'écart type de l'estimateur des paramètres tendent à être minimisés, le temps optimal étant un temps de chauffe respectant $t_c > t_c^*$. Le tableau 4.3 présente le calcul de t_c^* pour les différentes géométries étudié dans les chapitre 2 et 3.

Configuration	t_c (s)	t_c^* (s)
Multi-couches chapitre 2 - défaut bois	30	95
Multi-couches chapitre 2 - défaut Liège	30	100
Multi-couches chapitre 2 - défaut Air	30	110
Multi-couches chapitre 2 - aucun défaut	30	150
Matrice défectueuse chapitre 3 - défaut bois	450	390

TABLE 4.3 – Résultats pour les matériaux étudiés

Encore une fois, même en présence d'un système multi-couches, le temps de chauffe optimal minimum semble intrinsèquement lié à la géométrie du système. Le temps de chauffe utilisé dans l'étude présentée au chapitre 2 apparaît ici sous évalué, suite à l'analyse de des figures 4.10 et 4.11 il est possible que les écart type observés dans le chapitre 2 soient minimisables. Pour cela une nouvelle étude devra être conduite. En revanche, le temps t_c^* estimé pour chacun des défauts implique de diminuer la densité de flux appliquée à la surface du système afin de ne pas l'endommager et de rester dans une gamme de températures raisonnables. Cette observation implique une étude du comportement de I_{ph} et t_c^* en fonction de la densité de flux thermique.

Le temps de chauffe utilisé dans le chapitre 3 apparaît, lui, déjà suffisant, Une étude supplémentaire devra analyser les résultats de la méthode avec un temps de chauffe moindre.

Cette section a étudié le comportement de la procédure d'estimation en fonction du temps de

chauffe. Il apparaît après analyse que pour les matériaux à fort ratio d'effusivité t_c^* est le temps de chauffe à partir duquel l'erreur relative et l'écart type de l'estimateur des paramètres tendent à être minimisés. Ces différents développements ont amené à la conception d'un code de calcul, IRIASPOT. Ce code est basé sur la définition de modèle à l'aide de fichiers XML normalisés (schéma XML présenté annexe 1) et , permet le dimensionnement *a priori* du temps de chauffe, le calcul de différents contrastes thermiques et intègre une procédure d'estimation paramétrique similaire à celle développée chapitre 2. L'IHM du code de calcul est présentée annexe IV figure 31. La section suivante propose une synthèse des travaux détaillés dans ce chapitre.

4.4 Synthèse

Résumé et principaux résultats

Ce chapitre a présenté le développement d'un indicateur I_{ph} . Cet indicateur est utilisé pour la détermination d'un temps de chauffe *optimal* dans le cadre du contrôle non destructif de multicouches épais. L'étude s'appuie sur un modèle quadripolaire multi-couches ainsi que sur la procédure d'estimation développée chapitre 2. L'indicateur est basé sur le contraste maximal ainsi que sur le déphasage entre son temps d'apparition et le temps de chauffe. l'analyse porte sur t_c^* le temps de chauffe pour lequel I_{ph} atteint son maximum, $t_c^* = \max_{t_c} (I_{ph})$. Une analyse de sensibilité tend à montrer que t_c^* permet de maximiser la sensibilité réduite proportionnelle $S^* = \frac{S}{T}$ aux paramètres du défaut. L'étude est complétée par l'analyse de la procédure d'estimation en fonction du temps de chauffe. Il apparaît que le temps de chauffe déterminé par l'indicateur n'est pas le temps de chauffe optimal, mais le temps de chauffe à partir duquel l'erreur relative et l'écart type de l'estimateur des paramètres du défaut tendent à être minimisés. Tout temps de chauffe respectant $t_c > t_c^*$ apparait alors suffisant.

Synthèse des différentes sections

La section 4.1, introduit l'indicateur I_{ph} . L'objectif de cet indicateur est d'améliorer la procédure d'estimation de paramètres présentée section 2.5 dans le cadre d'une excitation créneau. Il est connu que l'augmentation du temps de chauffe améliore les résultats de la procédure d'estimation [Feuillet *et al.*, 2012], l'étude porte sur la définition du temps de chauffe *optimal* à partir duquel les résultats de la procédure d'estimation cessent de s'améliorer.

La définition de l'indicateur repose sur deux observations. Pour que l'estimation des paramètres d'un système dynamique soit possible, il faut que la réponse du système soit mesurable et contienne l'information nécessaire. Ainsi, l'indicateur est défini par, $\Delta T_{max}(t_c)$ le contraste absolu maximum pour un temps de chauffe donné et, t_{ph} , la différence entre l'apparition de ΔT_{max} et le temps de chauffe. Ainsi t_c^* le temps de chauffe pour lequel $I_{ph} = |\Delta T_{max}(t_c)| t_{ph}$ atteint son maximum apparaît être le meilleur compromis en *déteçtabilité* et *dynamique* imposé par le défaut. Une étude sur le comportement de l'indicateur et de ses différentes composantes a été réalisée pour plusieurs matériaux. L'évolution de ΔT_{max} en fonction du temps de chauffe apparaît suivre une croissance exponentielle à coefficient négatif, les temps d'apparition du contraste maximum sont inversement proportionnel aux ratios d'effusivité. Le temps de déphasage t_{ph} tend, quant à lui, à suivre l'évolution inverse. Les comportements inversés de ΔT_{max} et t_{ph} stabilisent l'apparition du maximum de I_{ph} . L'analyse de t_c^* en fonction du ratio d'effusivité des défauts considérés tend à lier fortement le temps de chauffe *optimal* supposé à la géométrie du système, plus qu'à la nature du défaut. t_c^* apparaît alors comme le temps minimum de chauffe à partir duquel l'information sur la géométrie du système est contenue dans la réponse

du modèle thermique.

La section 4.2 propose une analyse de sensibilité du modèle à ses paramètres en fonction de t_c^* . La sensibilité réduite au paramètre est à mettre en perspective avec le thermogramme (rapport entre la valeur absolue du thermogramme et la valeur absolue de la sensibilité). Un modèle est dit sensible à un paramètre si la sensibilité réduite atteint un certain seuil proportionnel à la réponse du modèle [Beck et Arnold, 1977, Faugeroux, 2004]. Afin de pouvoir mener une étude comparative du niveau de sensibilité en fonction du temps de chauffe pour différents matériaux, l'étude introduit la sensibilité réduite proportionnelle $S^*(t_c) = \frac{\max|S(t_c)|}{\max(T(t_c))}$ indiquant le niveau d'information sur un paramètre contenu dans la réponse du modèle. L'analyse conduite fait apparaître des niveaux de sensibilité réduite proportionnelle faibles pour les ratios d'effusivité $b_2 \leq 1$, en accord avec les observations du chapitre 2. Les matériaux à fort ratio d'effusivité affichent quant à eux des sensibilités proportionnelles qui, après avoir atteint leur maximum respectif, sont décroissantes avec le temps de chauffe, justifiant le développement d'un indicateur du temps optimal d'excitation. Pour les matériaux étudiés, t_c^* apparaît être le temps où les sensibilités réduites proportionnelles aux paramètres du défaut tendent vers leur maximum tandis que celles des paramètres des couches supérieures tendent vers une courbe affine décroissante. Cette analyse de sensibilité en fonction du temps de chauffe met en évidence le caractère *optimal* de t_c^* , du moins pour les matériaux à fort ratio d'effusivité.

La section 4.3 propose une analyse de la procédure d'estimation développée au chapitre 2 en fonction du temps de chauffe. L'analyse de sensibilité précédente indique que t_c^* est lié au maximum de sensibilité locale proportionnelle. Dans cette section l'analyse porte sur l'évolution en fonction du temps de chauffe de l'erreur relative et de l'écart type de l'estimateur des paramètres identifiés avec la procédure d'estimation développée et présentée au chapitre 2 (cf section 2.5 ainsi que [Beck et Arnold, 1977, Orlande *et al.*, 2011]). L'analyse des résultats montre une erreur relative sur les paramètres des couches supérieures constante, et une décroissance exponentielle de l'erreur relative sur les paramètres du défaut. Il apparaît pour cette dernière que la constante de temps de la décroissance équivalente à t^* , qui apparaît ici être le temps de chauffe à partir duquel l'erreur relative sur les paramètres thermophysiques du défaut tend à être minimisée. À la différence de l'analyse sur les erreurs relatives, l'évolution de l'écart de l'estimateur des paramètres du défaut et pour les couches supérieures apparaît suivre une décroissance exponentielle. Ce comportement indique que t^* n'est pas à proprement dit le temps optimal de chauffe, comme l'analyse de sensibilité le laissait entrevoir, mais le temps à partir duquel l'erreur relative et l'écart type de l'estimateur des paramètres tendent à être minimisés, le temps optimal étant un temps de chauffe respectant $t_c > t^*$. Enfin le calcul de t_c^* est appliqué aux systèmes étudiés dans les chapitres 2 et 3.

Conclusion et perspectives

Ce chapitre a présenté le développement d'un indicateur I_{ph} permettant la détermination d'un temps *optimal* de chauffe. Le temps de chauffe minimum est défini par le maximum de l'indicateur, représentant le meilleur compromis en *déteçtabilité* et *dynamique* imposée par le défaut. Une première analyse de ce temps de chauffe a montré que t_c^* correspondait au temps minimum de chauffe à partir duquel l'information sur la géométrie du système est contenue dans la réponse du modèle thermique. Le reste de l'étude a confirmé cette première observation indiquant que t_c^* était le temps à partir duquel l'erreur relative et l'écart type de l'estimateur des paramètres tendent à être minimisés. Le temps optimal est un temps de chauffe respectant $t_c > t^*$.

À partir de cette discussion sur l'optimalité du temps de chauffe il est possible d'énoncer

plusieurs perspectives. Premièrement, une étude plus complète devra aussi analyser le temps d'observation. Les développements présentés ici sont axés autour d'un modèle quadripolaire dont l'étude (cf chapitre 2) a indiqué le domaine de validité dans le cadre d'une procédure d'estimation paramétrique, à l'avenir d'autres approches de modélisation, telle la méthode détaillée chapitre 3 ou des méthodes analytiques [Maillet *et al.*, 1996, Fudym *et al.*, 2004], devront être utilisées pour approfondir cette l'étude. De plus, le modèle est formulé à l'aide de groupement de paramètres, les résultats de l'étude doivent être détaillés pour l'ensemble des formulations possibles de l'équation de la chaleur. Enfin, une étude paramétrique sera à conduire afin d'étudier le comportement de t_c^* en fonction des paramètres thermophysiques du défaut et de la géométrie du système. Cette étude permettra de compléter l'observation sur le comportement linéaire sur l'évolution de $\delta T_{max}(t_c)$ et $t_{ph}(t_c)$. L'utilisation des concepts d'automatique linéaire comme la définition de fonction de transfert pour définir une relation du type $\Delta T_{max}(t_c) = f(t_c)$, sera à étudier afin de déterminer une expression analytique de t_c^* .



**Surveillance thermique de structures de
génie civil par thermographie infrarouge
en environnement naturel**

Introduction au *structural health monitoring*

Ce chapitre introduit la notion de *Structural Health Monitoring* (SHM) des structures de génie civil. Le contexte est présenté et un état de l'art sur le *monitoring* des structures de génie civil à l'aide de la thermographie infrarouge est proposé. Enfin la problématique de la surveillance thermique long terme des structures de génie civil est exposée.

5.1 Le *structural health monitoring* SHM

Le vieillissement des structures de génie civil et leur utilisation de plus en plus intensive [IFSTTAR, 2010, CGDD, 2012] posent le problème du suivi des infrastructures. Ainsi, il apparaît nécessaire, que cela soit avant ou après réparation de l'ouvrage (cf. partie I), de fournir aux gestionnaires une indication continue sur l'état de la structure. Ces informations permettent une utilisation optimale de la structure tout en prévenant les événements catastrophiques et modérant les coûts de maintenance [Balageas *et al.*, 2006]. Apparu avec l'avènement des technologies de l'information et de la communication (TIC/NTIC), le *structural health monitoring* (SHM), ou suivi structurel en français, est un concept théorique et technologique défini comme une extension des méthodes de contrôle et évaluation non-destructives [Chang, 1997].

Une stratégie de SHM intègre les méthodes classiques de CND (cf. chapitre 1 et [Hoon *et al.*, 2004]) au sein de systèmes d'informations complets permettant, par exemple, l'utilisation de l'historique des mesures [Balageas *et al.*, 2006], figure 5.1. Ainsi, un système de SHM est défini d'une part par le phénomène physique observé, et d'autre part par le système lui-même (communications, pre/post traitements, etc.), potentiellement un système de SHM peut être développé afin de prédire le vieillissement de la structure.

Tout comme les systèmes de CND une variété conséquente d'architectures SHM existe, active, passive, journalières, long terme, multi-techniques, etc. Par exemple [Obràn, 2009] détaille une étude proposant l'analyse structurelle journalière d'un pont ferroviaire basée sur une approche multi-techniques. Ici, l'intérêt est porté sur les méthodes de diagnostic long terme permettant le suivi structurel de signaux / indicateurs représentant l'évolution de la structure au cours du temps. Ainsi, des systèmes complets ont fait l'objet d'études sur le suivi structurel d'infrastructures routières [Chen *et al.*, 2014, Soldovieri *et al.*, 2014, Crinière *et al.*, 2014b],

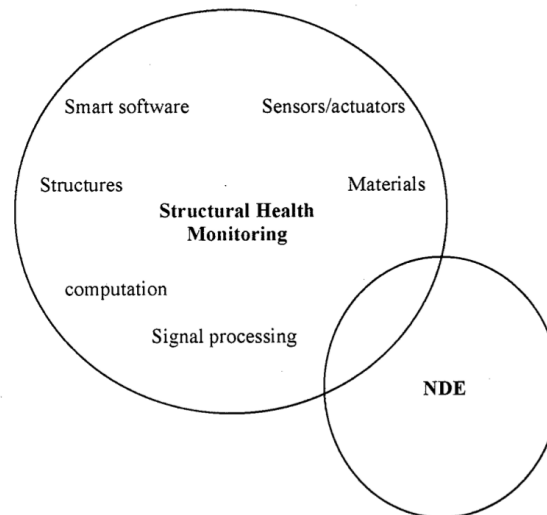


FIGURE 5.1 – Architecture SHM [Chang, 1997]

utilisant une architecture multi-capteurs à l’image du projet européen ISTIMES [Proto *et al.*, 2010], ou basées sur une seule méthode de mesure [Catapano *et al.*, 2012]. Par exemple [Tennyson *et al.*, 2001] propose une étude effectuée sur 16 ponts à travers le Canada sur une période de six ans, basée sur des mesures obtenues par fibre optique. Les architectures SHM long terme ont la particularité de s’articuler autour de systèmes d’information complets et autonomes.

Depuis plusieurs années les systèmes d’informations utiles au SHM suivent l’évolution des TIC, par exemple l’emploi de nouvelles stratégies de communication normalisées pour les systèmes distribués [Le Cam *et al.*, 2008, Proto *et al.*, 2010, Argenti *et al.*, 2012], l’utilisation de nouvelles capacités de calcul [NVIDIA, 2014] pour le pré-traitement en temps réel des mesures [Dumoulin et Averty, 2012a, Dumoulin et Averty, 2012b, Dumoulin, 2013] ou encore la gestion de l’énergie et l’accroissement de l’autonomie du système [Le Cam *et al.*, 2010, Crinière *et al.*, 2014c] jusqu’à l’autonomie décisionnelle.

La partie II de ce manuscrit est basée sur les systèmes de surveillance thermique long terme utilisant la thermographie infrarouge. Ainsi, la section suivante expose le choix de la thermographie infrarouge comme méthode de mesure et introduit un état de l’art non exhaustif des méthodes de ThIr en SHM.

5.2 La thermographie infrarouge : méthode de suivi des effets environnementaux sur les structures de génie civil

La partie I a présenté le principe de la thermographie infrarouge et son utilisation comme méthode de contrôle non-destructif qualitative et quantitative. Une architecture SHM étant basée sur un système de contrôle non-destructif, il apparaît intéressant d’étudier l’utilisation de la ThIr comme méthode de suivi des effets environnementaux. Les solutions de ThIr sont en pleine diffusion [FLIR, 2014b], ainsi les prix du marché tendent à baisser et rendent accessible la ThIr au plus grand nombre. Outre son coût de plus en plus abordable, la thermographie infrarouge autorise une mesure sans contact ainsi qu’un champ de vue important permettant le suivi thermique de larges structures [Clarck *et al.*, 2003].

L’intérêt de la ThIr pour le diagnostic long terme des ouvrages d’art, tient aussi au fait que

les infrastructures de génie civil sont constamment soumises à un flux thermique, le flux solaire [Duffie et Beckman, 1991] est une de ses composantes. L'analyse aux temps longs des systèmes soumis à l'excitation solaire naturelle peut se rapprocher d'une analyse des systèmes en régime thermique périodique [Busse, 1980, Lascoup *et al.*, 2013], et ainsi permettre l'analyse quantitative par le suivi au cours du temps des propriétés thermophysiques de la structure. La thermographie infrarouge a déjà été utilisée au sein d'architecture SHM multi-techniques [Proto *et al.*, 2010], mais bien souvent la ThIr n'est reconnue que comme méthode de diagnostic qualitatif [Rhazi et Naar, 2005, Obràn, 2009]. À l'image du chapitre 1, dans le domaine du génie civil le contrôle non-destructif et le monitoring de structure par ThIr sont assurés par une image du contraste thermique et non une séquence d'images infrarouges [Meola *et al.*, 2005]. Ce qui n'est pas suffisant pour assurer un diagnostic quantitatif dans le cas de systèmes complexes (multi-couches, composite, temps caractéristique de diffusion etc.). Une étude proposée par [Grinzato *et al.*, 1998] met en lumière l'aptitude de la thermographie infrarouge à fournir des informations quantitatives sur l'état d'une structure soumise à une excitation solaire et à l'ensemble des perturbations environnementales. Toutefois, à la connaissance de l'auteur, peu d'informations sur ce type d'approches, basées sur la ThIr, sont disponibles dans la littérature.

5.3 Synthèse

La notion de *structural health monitoring* a été introduite dans ce chapitre. Différents concepts et études ont été introduits [Chang, 1997, Balageas *et al.*, 2006]. Un système de SHM est défini sur plusieurs niveaux, de la mesure à la gestion et traitement des données.

Dans un premier temps, cette partie s'attache à présenter le développement et l'utilisation d'un système de gestion des capteurs et de données permettant le suivi long terme de paramètres thermophysiques et météorologiques. Le chapitre 6 présente IRLAW un système d'information développé au sein de l'IFSTTAR [Dumoulin et Averty, 2012b, Dumoulin *et al.*, 2013, Dumoulin, 2013] et permettant la mesure par ThIr synchronisée avec le suivi de différents paramètres environnementaux. Dans la suite le système est utilisé pour le suivi sur trois jours de l'état thermique du pont de Musmeci*. Dans le cadre du projet européen ISTIMES [Proto *et al.*, 2010], cette campagne de mesure a ensuite été utilisée pour effectuer la caractérisation *a posteriori* de l'état structurel du pont [Crinière *et al.*, 2013, Dumoulin *et al.*, 2013]. Le Chapitre 7 section 7.1 présente les développements qui ont conduit à l'automatisation du système [Crinière *et al.*, 2014c, Crinière *et al.*, 2014b] et son utilisation sur plus d'un an, sur des éléments de structures de Génie civil de grande dimension.

La figure 5.2 présente le schéma d'un système de SHM, ce schéma correspond pour partie à l'évolution du système *embryonnaire* présenté chapitre 7, il permettra l'analyse *in et ex situ* ainsi que la gestion des utilisateurs et une procédure d'aide à la décision.

*Viadotto dell'Industria : Situé sur la commune de Potenza en Italie le pont a été conçu par l'architecte Sergio Musmeci (1926-1981), Sa construction a été achevée en 1975

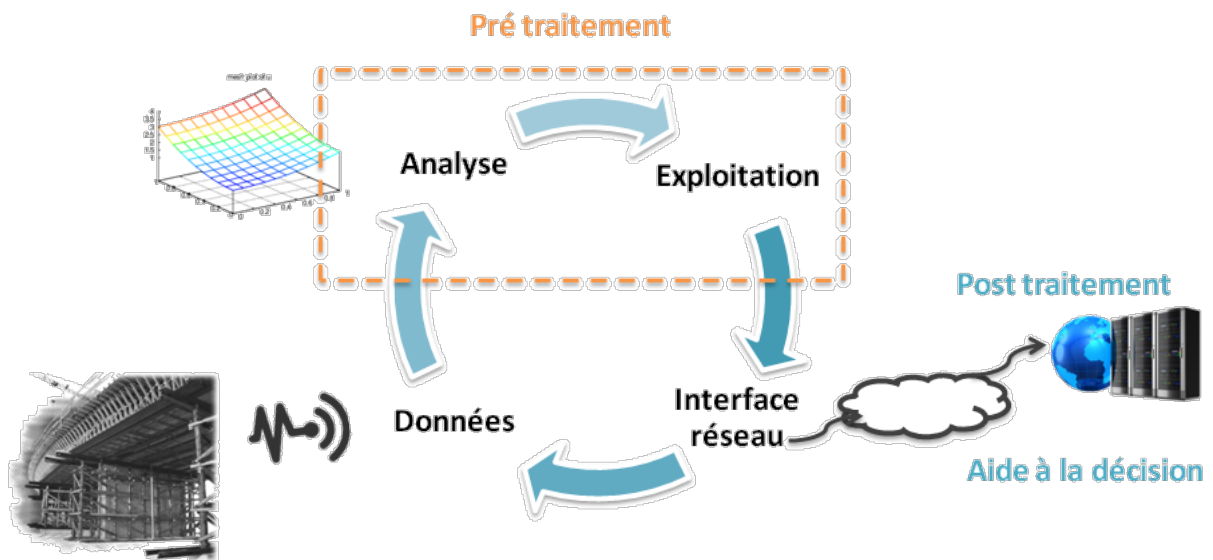


FIGURE 5.2 – Vue schématique d'un système de suivi structurel

De l'évaluation non destructive au structural health monitoring : suivi thermique du pont de Musmesci

Ce chapitre présente un monitoring ou suivi thermique conduit pendant plusieurs jours sur le tablier du pont de Musmeci à Potenza (Italie). L'analyse des données est conduite en exploitant la mesure de paramètres météorologiques synchronisée avec l'acquisition d'images thermiques. Les données sont acquises à l'aide du logiciel IrLaW (Infrared through Lan and Wifi) développé au sein de l'IFSTTAR.

Dans un premier temps, le système d'information utilisé puis son installation en vue du monitoring thermique du pont de Musmeci sont détaillés. Afin de faire le parallèle avec la partie I de ce manuscrit, un modèle thermique quadripolaire 1D fréquentiel est développé, puis mis en œuvre dans une procédure d'estimation paramétrique. Enfin, la procédure d'estimation est utilisée pour dresser la cartographie des propriétés thermophysique apparentes de la structure.

6.1 Système de mesure : IrLaW

Le logiciel IrLaW a été conçu par Rodolphe Averty et Jean Dumoulin pour répondre à un besoin spécifique, permettre la commande et la gestion de caméras thermiques lors d'expérimentations en laboratoire et en environnement naturel. Dans ce contexte initial un premier cahier des charges avait été défini :

- Assurer le contrôle des caméras
 - Permettre la gestion de scénario d'acquisition complexes, par exemple l'échantillonnage dynamique.
- Assurer la synchronisation des mesures avec les dispositifs d'excitation thermique
- Assurer la sauvegarde des données, définition d'une structure de fichier
- Développer une IHM

La figure 6.1 présente l'interface graphique de contrôle du logiciel.

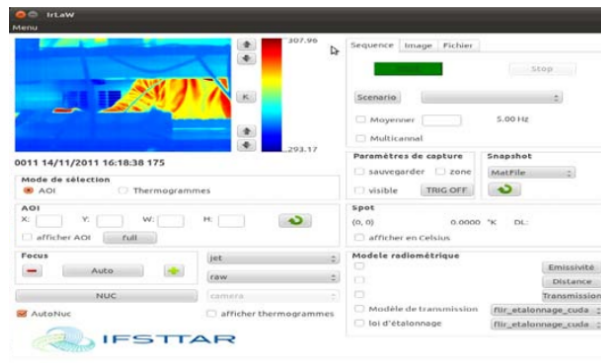


FIGURE 6.1 – Interface graphique de configuration du logiciel

IrLaW a été développé pour les machines UNIX disposant d'Ubuntu 11.10, le logiciel est régulièrement mis à jour suivant l'évolution du système d'exploitation libre, la dernière mise à jour a été réalisée durant ces travaux de doctorat, elle assure l'opérabilité du logiciel sur une distribution *Long Term Support* Ubuntu 12.04 LTS. Une grande partie du logiciel est sous licence *OpenSource*, la gestion des caméras quant à elle est soumise à un accord de confidentialité entre FLIR® et l'IFSTAR. Dans un deuxième temps, la définition du cahier des charges a été revue pour tendre vers une architecture de type SHM [Dumoulin et Averty, 2012a] :

- Permettre l'interfaçage du logiciel avec d'autres types de capteurs (caméra visible, GPS, station météo etc...)
- Assurer l'application de modèles physiques (Modèle thermique, modèle optique, correction atmosphérique)
 - Application du principe de *General-Purpose Computation on Graphics Hardware GPGPU* [Preis, 2011, Harris, 2002]
 - Définition d'un compilateur de modèles (Ergonomie du logiciel)

Le compilateur développé permet la programmation de modèles simplifiés de correction des effets atmosphériques à travers un langage aisément utilisable par l'expérimentateur. Le modèle compilé génère une bibliothèque utilisable par le logiciel. Suivant l'ordinateur sur lequel le logiciel est installé, le modèle peut être massivement parallélisé par l'intermédiaire de la technologie GPU [NVIDIA, 2014] et ainsi être appliqué en temps réel*. Appelé GPGPU, ce principe peut être simple à comprendre, mais plus ou moins difficile à appliquer. Il s'agit de repenser un code de calcul en une version massivement parallélisable et applicable sur des processeurs dédiés (les GPU). Ainsi, si l'on émet l'hypothèse que, par exemple, la correction atmosphérique figure 6.2, peut se formuler sous forme matricielle où chacun des termes est indépendant à chaque pixel, figure 6.3, alors l'approche GPGPU est applicable. En revanche, comme cela a été exposé section 2.8, un modèle faisant apparaître des calculs plus complexes peut ne pas être directement parallélisable (Manque de bibliothèques, pas de double parallélisation etc.). Dans ce cas, le système devra alors être repensé en vue d'utiliser de récentes innovations en GPGPU, par exemple le parallélisme dynamique [NVIDIA, 2012] qui à l'heure d'aujourd'hui impose l'achat de matériel spécialisé.

*Dans son architecture actuelle, le système ne suit pas les principes et la définition du temps réel, par exemple aucun ordonnanceur spécifique n'est utilisé, en revanche la parallélisation massive rend son exécution transparente

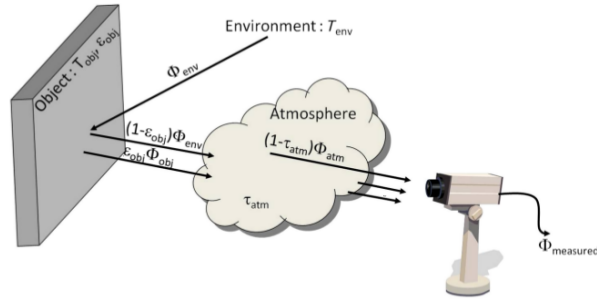


FIGURE 6.2 – Bilan radiatif simplifié [Dumoulin et Boucher, 2014]

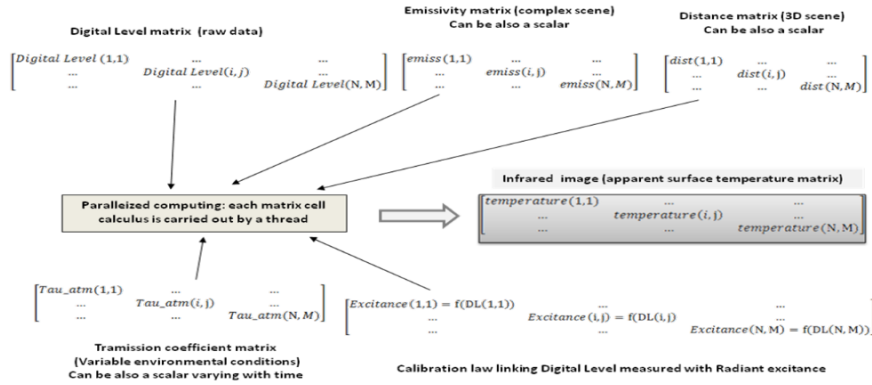


FIGURE 6.3 – Bilan radiatif matriciel applicable sur GPU

L'étude présentée dans [Dumoulin et Boucher, 2014] détaille une utilisation du logiciel pour la correction en temps réel des mesures infrarouges à l'aide de données atmosphériques. La correction atmosphérique est appliquée directement sur les niveaux numériques de la caméra infrarouge à l'aide de l'équation de bilan radiométrique simplifiée détaillée dans [Gaussorgues, 1989] :

$$DL'_o = \tau_{atm} \epsilon_o DL_o + \tau_{atm} (1 - \epsilon_o) DL_e + (1 - \tau_{atm}) DL_{atm} \quad (6.1)$$

où ϵ_o est l'émissivité de l'objet (cf chapitre 1) et τ_{atm} est la transmission atmosphérique, calculée à l'aide de la composition de l'atmosphère, d'une matrice des distances (chemin optique) et de la longueur d'onde [Shettle et Fenn, 1979]. DL_o représente la valeur des niveaux numériques issus du détecteur de la caméra infrarouge, DL_e et DL_{atm} représentent respectivement les contributions de l'environnement et de l'atmosphère (température du fluide et du ciel, cf chapitre 1). Ce modèle permet le calcul de DL'_o représentant les niveaux numériques pouvant être convertis en température suivant une loi d'étalonnage fournie par FLIR ®ou propre à l'utilisateur.

La figure 6.4, présente l'architecture de la première version du logiciel utilisé dans le projet européen ISTIMES [Proto et al., 2010]. Sous cette forme IrLaW peut être utilisé comme système de SHM à part entière. Dans le cadre du projet ISTIMES [Dumoulin et Averty, 2012a, Dumoulin et al., 2013] le logiciel s'inscrit dans une vaste architecture de SHM, IrLaW devient alors un capteur à part entière pouvant fournir des informations sous un format normalisé (interne à l'IFSTTAR), figure 6.5, ou directement des cartes de température (public).

Afin de garantir l'interopérabilité de IrLaW au sein du projet ISTIMES, la normalisation des communications entre capteurs est nécessaire. La prise en main et le développement de certains éléments complémentaire à ces interfaces de communication ont été effectués dans le cadre de ces travaux de thèse et s'intègrent dans une architecture OGC.

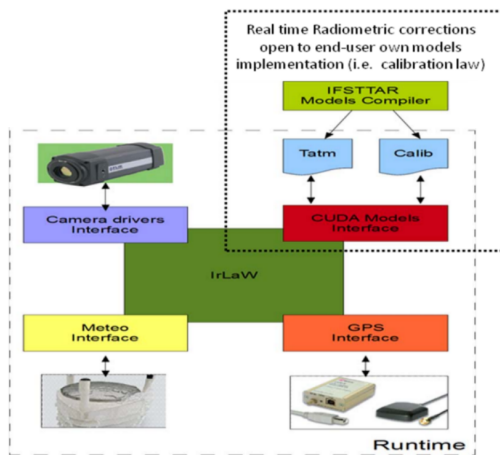


FIGURE 6.4 – Architecture du logiciel IrLaW [Dumoulin et Averty, 2012a]

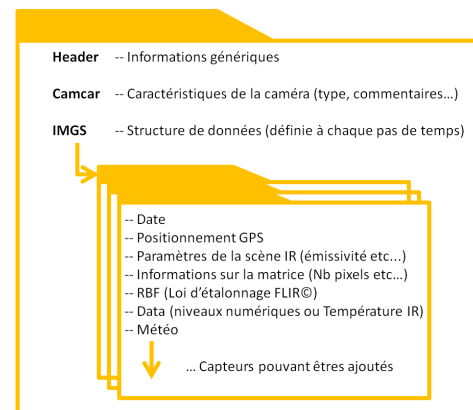


FIGURE 6.5 – Format de données

L'*Open Geospatial Consortium* (OGC) est une organisation à but non lucratif internationale promouvant les spécifications OpenGIS® [OGC, 2011]. Ces standards *OpenSources* garantissent l'interopérabilité des contenus, des services et des échanges dans les domaines de la géomatique et de l'information géographique. Ainsi, l'intégration du standard OGC au sein de IrLaW fut la dernière mise à jour du système permettant son utilisation au sein du projet ISTIMES. Cette intégration s'est faite à travers l'implémentation JAVA de l'OGC de la *52° North initiative* [52north, 2004]. Avant de détailler la communication entre IrLaW et le reste du système ISTIMES un léger paragraphe introduit la notion de *Service Oriented Architecture* (SOA) ou web-service.

Une application web développée à l'aide des standards OGC peut être définie comme une architecture *Service Oriented Architecture*, architecture orientée service en français. Théorisée dans les années 90 par Gio Wiederhold [Wiederhold, 1992], cette architecture logicielle rend compte du besoin d'interopérabilité entre les systèmes. D'abord développée pour la gestion interne des entreprises, à savoir *comment faire communiquer deux entités hétérogènes* ? Depuis l'avènement d'Internet il est courant de la définir comme *Web Oriented Architecture* (WOA), à savoir *comment faire communiquer un client avec un service distant et hétérogène* ? La communication s'effectue à l'aide de protocoles dit *Remote procedure call* (RPC) permettant l'appel d'une fonction/requête/procédure depuis un client sur un serveur distant ou une application tierce. Parmi ces protocoles se trouve le *Simple Object Access Protocol* (SOAP) [SOAP, 2014]. Développé en 1998 par Microsoft et IBM il est devenu une recommandation W3C en 2003. Le SOAP permet la transmission de messages entre objets distants, il autorise un objet à invoquer des méthodes (fonctions) d'objets physiquement situés sur un autre serveur. Dans une application utilisant le protocole SOAP, un fichier WSDL *Web Services Description Language* est utilisé pour décrire les fonctions et requêtes attribuables à chaque service.

C'est sur ce protocole qu'est basé une partie du standard OGC [OGC, 2010] notamment son implémentation par la *52° North initiative*. Ainsi, les différents types de messages entre capteurs et système sont définis par un WSDL normalisé. Dans le cadre d'ISTIMES, la communication entre IrLaW et le reste du système est assurée par les protocoles *Sensor Observation Service* (SOS) [SOS, 2012], *Sensor Planning Service* (SPS) [SPS, 2011] et *Web Notification Services* (WNS) du standard *Sensor Web Enablement* (SWE) [SWE, 2008] défini par l'OGC. L'utilisation de SWE permet de considérer chaque capteur (dont IrLaW) comme un web service indépendant avec lequel la communication est normalisée. La liste suivante présente le domaine d'action de chacun des web-services utilisés.

- *Sensor Observation Service (SOS)* : Requête, accès et récupération des informations et data du capteur. Ce web-service permet la déclaration et l'accès aux données du capteur aussi bien en *push* (capteur -> utilisateur) que en *pull* (requête utilisateur)
- *Sensor Planning Service (SPS)* : Web-service de *tasking*, demande l'envoi de données par le web-service SOS
- *Web Notification Services (WNS)* : Messagerie asynchrone, informe l'utilisateur de la réussite ou de l'échec des requêtes.

La figure 6.6 illustre l'architecture SWE au sein de IrLaW et ISTIMES [Averty, 2011]

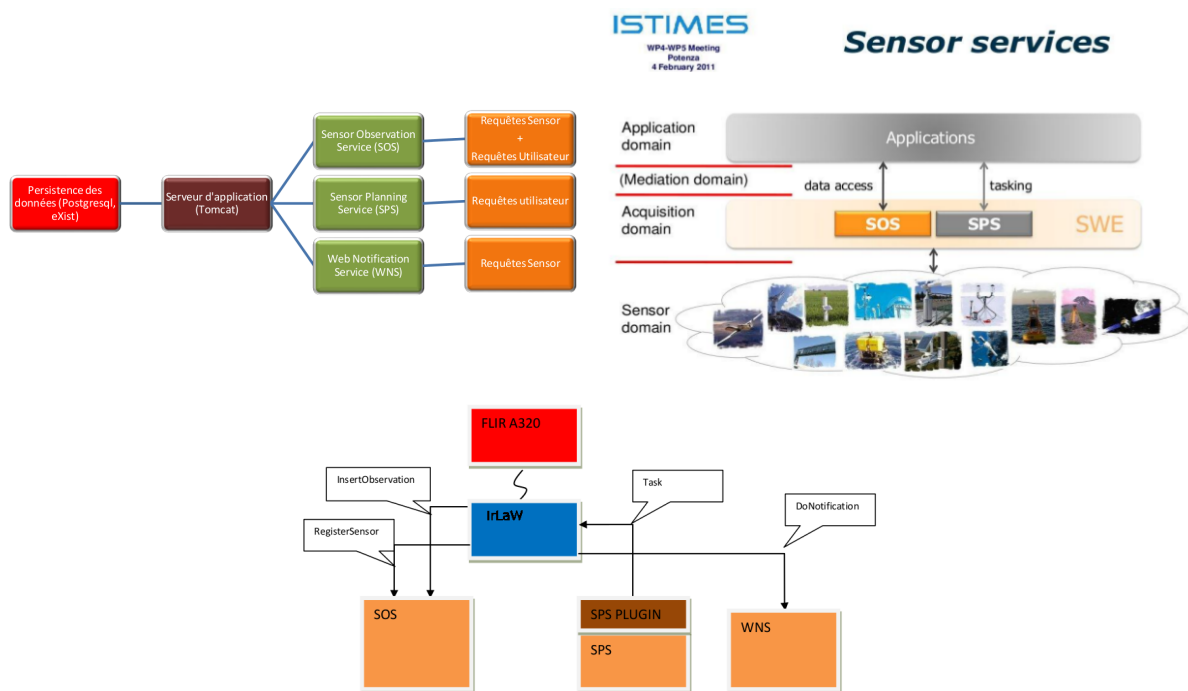


FIGURE 6.6 – Principe du SWE [Averty, 2011]

Bien que IrLaw ait évolué par l'intermédiaire du projet ISTIMES, il n'en reste pas moins un système indépendant pouvant faire office de capteur multi-données (GPS, météo, IR...) ainsi que de système SHM à part entière. C'est pourquoi l'ensemble du système de communication est implémenté au sein d'une architecture multicanal. Cette architecture permet à un système de mesure implémentant IrLaW de pouvoir communiquer avec différentes cibles/serveur via l'utilisation d'un canal indépendant disposant de son propre protocole de communication ainsi que de son propre accès aux capacités de calcul de la machine. Les figures 6.7 et 6.8 présentent respectivement, un schéma de la communication entre services internes à IrLaW et la fonctionnalité multicanal.

IrLaW ne devient alors que l'IHM du système, l'ensemble est appelé IrLaW-SENSORBOX. Bien que IrLaW ne soit plus qu'un sous-système de la SENSORBOX, de par sa conception monolithique (à l'exception du noyau) l'ensemble des traitements est encore effectué par la partie haut niveau de l'application (*user space*). Ce fonctionnement, bien que non bloquant pour l'utilisateur, rend toutes mises à jour difficiles et coûteuses en temps de développement. La prochaine amélioration du système marquera l'entrée de l'application dans une architecture SOA/WOA passant d'un système monolithique à un système complètement modulaire (MVC, architecture en couches J2E, etc...).

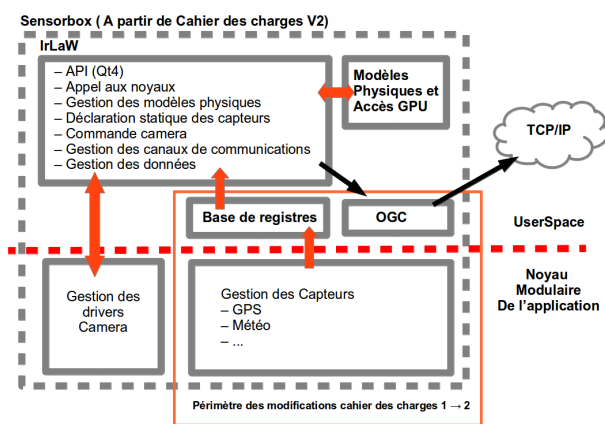


FIGURE 6.7 – Architecture finale du logiciel IrLaW-Sensorbox

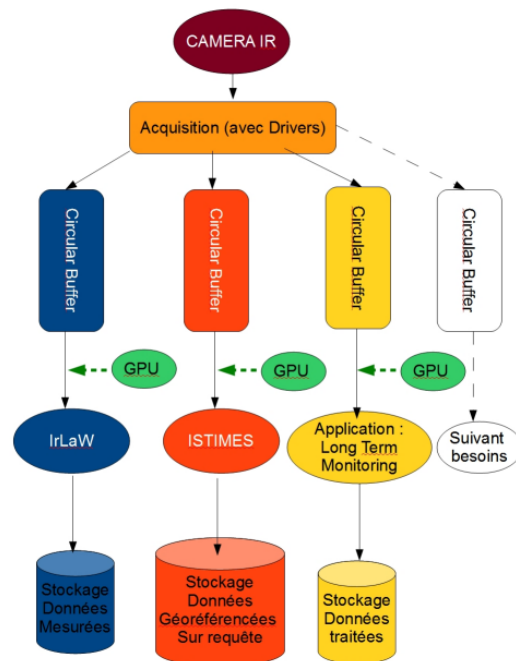


FIGURE 6.8 – Principe de communication multicanal

Les capacités de calcul du système, qu'elles soient embarquées ou sur un serveur distant, doivent aussi faire l'objet de nouveaux développements. Dans le cadre de cette thèse, un embryon de librairie de calcul scientifique dédiée à la conception de modèles physiques a été développé. Cette librairie a été conçue afin d'offrir à chaque futur utilisateur une boîte à outils mathématique et informatique permettant la conception rapide de modèles et définissant différentes notions communes à tout modèle physique. Développée en C++, la librairie définit un type générique de modèle pouvant être plus ou moins spécialisé (cf. Polymorphisme), la figure 6.9 présente le diagramme UML simplifié et argumenté de la librairie.

La librairie définit dans la classe mère un ensemble d'attributs communs à n'importe quelle définition de modèle, par exemple un vecteur de propriétés (cf. classe *ListPropriés*). La classe *Model* est virtuelle pure, c-à-d quelle définit des méthodes que l'ensemble des classes filles doivent implémenter, par exemple la méthode *void Solve()* déclenchant la résolution du modèle, le résultat étant stocké dans un objet générique non présenté ici. L'avantage du polymorphisme est qu'avec une telle architecture un code de calcul peut implémenter différents modèles spécialisés dans une collection de modèles génériques, l'appel de la méthode *Solve()* correspondra à la résolution du modèle spécialisé. Ce type de fonctionnement permet la conception de systèmes multi-modèles et multi-physiques.

La chaîne d'héritage permet la spécialisation du modèle développé. Premièrement le choix entre un modèle inverse ou direct, puis le choix du hardware utilisé, vient alors la sélection de l'espace de résolution, enfin le modèle est défini. La classe *InverseModel* implémente un modèle direct et permet la minimisation d'une fonctionnelle. La classe *ModelDirect* implémente un objet de la classe *Boundaries*. Cet objet représente les conditions aux limites du modèle développé, chaque classe fille de la classe *ModelDirect* a accès à la définition des conditions aux limites. Les classes *ModelLaplace* et *ModelLaplaceGSL* permettent la conception de modèles résolus dans le domaine de Laplace chaque classe fille de ces classes a accès aux algorithmes

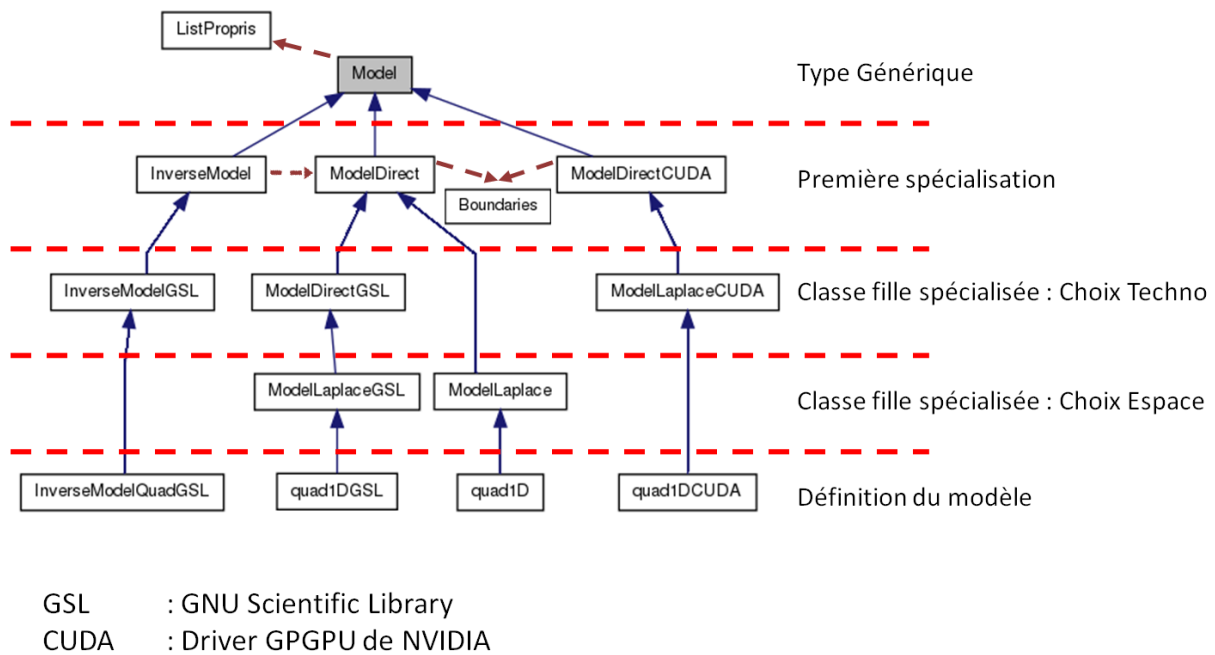


FIGURE 6.9 – Schéma UML simplifié de la librairie de modèles

d'inversion de la transformée de Laplace [Dehoog *et al.*, 1982, Stehfest, 1970], il est possible d'imaginer des classes implémentant la FFT ou encore la transformée en ondelette. À titre d'exemple, c'est à ce niveau de l'architecture qu'a été étudiée la possibilité d'implémenter un solveur éléments finis basé sur le code MILAMIN [Dabrowski *et al.*, 2008]. Une première version spécialisée pour l'équation de la chaleur a été développée (MilaHeat2D), mais non implémentée dans l'architecture pour le moment.

La librairie permet aussi le choix du hardware utilisé pour la résolution du modèle. Le calcul peut s'effectuer sur le CPU sans optimisation, le CPU optimisé et CPU dédié au calcul (*ie.* Intel MKL) ainsi que sur une carte de calcul GPU (NVIDIA).

La notation *GSL* correspond à l'utilisation de *GNU scientific library* elle permet l'utilisation de codes de calculs matriciels et d'optimisations linéaires à travers l'implémentation du *BLAS* [Lawson *et al.*, 1979] et *LAPACK* [Anderson *et al.*, 1999]. Ces bibliothèques de calculs scientifiques, développées en FORTRAN, implémentent des algorithmes optimisés pour le calcul sur CPU grand public et spécialisés. Ces algorithmes ont été développés par certains chercheurs déjà évoqués dans ce manuscrit (*ie.* George, J. Moré [Moré, 1977]).

La notation *CUDA* fait référence aux possibilités de calcul *GPGPU* de la machine. Cette branche de l'architecture donne accès à la parallélisation massive des calculs et implémente le *BLAS* et *LAPACK* à travers leurs homologues *GPGPU*, *cuBLAS*, *MAGMA* et *CUDAtools*. Ces bibliothèques parallélisent le calcul matriciel ainsi que les opérations d'optimisation linéaire. Dans le cadre de modèles physiques, avec les *GPU* grand public existants, deux solutions s'offrent aux développeurs. La première, optimiser à l'aide des *GPU* les calculs matriciels et autres du modèle, la deuxième, développer l'ensemble du modèle et le paralléliser (application pixel à pixel par exemple). Dans les travaux présentés ici il serait nécessaire de faire les deux, calcul linéaires et matriciels pour le modèle inverse et application à chaque pixel d'une séquence infrarouge. Malheureusement, le cumul des deux approches, appelé parallélisme dynamique, n'est possible que si la carte de calcul utilisée possède une *Compute capability* > 3.5 , ce qui à l'heure actuelle correspond à une carte haut de gamme nécessitant un certain investissement, néanmoins la librairie a été développée pour intégrer ce principe. Le polymorphisme en *GPU*, sur lequel repose l'architecture de la librairie, est lui aussi conditionné aux possibilités maté-

rielles de parallélisme dynamique. Pour le moment, le développement de la librairie est mis en sommeil. Cette approche est néanmoins intéressante, elle permettrait une déclaration de modèle au sein de IrLaW calquée sur la gestion des capteurs, à partir de là il est possible d'imaginer l'implémentation à chaud de modèles physiques au sein du système.

Cette section a présentée le logiciel de mesure développé au sein de l'IFSTTAR ainsi que les différentes étapes clés de son développement. La section suivante détaille son implémentation assurant l'acquisition de données environnementales et ThIR sur le tablier du pont de Musmeci durant trois jours.

6.2 Mise en place du système de mesure

Cette section présente l'installation du système de mesure en vue du suivi des conditions environnementales et des mesures infrarouges à la surface d'une infrastructure routière italienne ouvert au trafic durant trois jours en juillet 2011.

Le pont de Musmeci (Viadotto dell'Industria) est un ouvrage en béton situé sur la commune de Potenza en Italie. Il a été conçu par l'architecte Sergio Musmeci (1926-1981), sa construction a été achevée en 1975. L'architecture du pont de Musmeci, figure 6.10, a la particularité d'avoir été pensée non pas pour son utilisation finale, à proprement parler, mais pour son efficacité. Ainsi le pont de Musmeci est un exemple d'optimisation à la charge statique des structures bétons [Capomolla, 2006]. À ce titre nombre d'observateurs définissent ce pont non plus comme une structure de génie civil, mais comme une œuvre d'art. Le tablier du pont est orienté suivant un axe Sud/Est-Nord/Ouest.

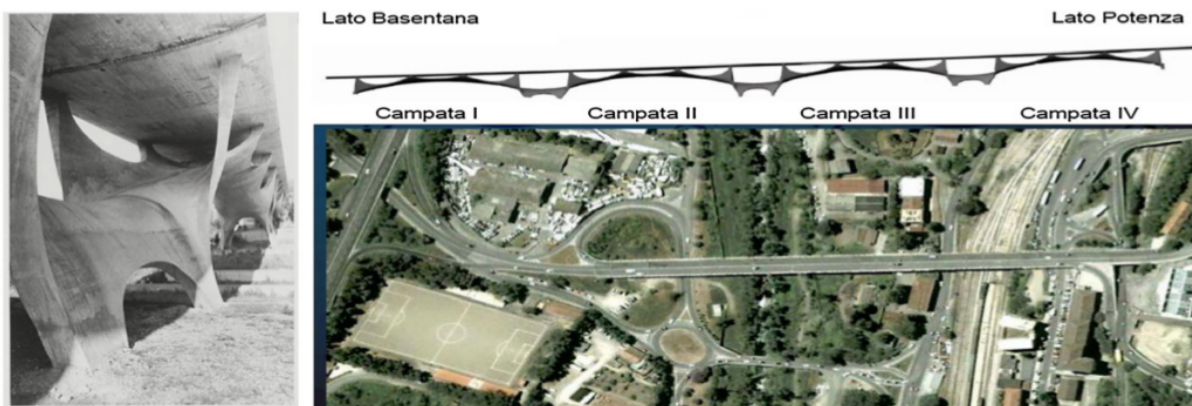
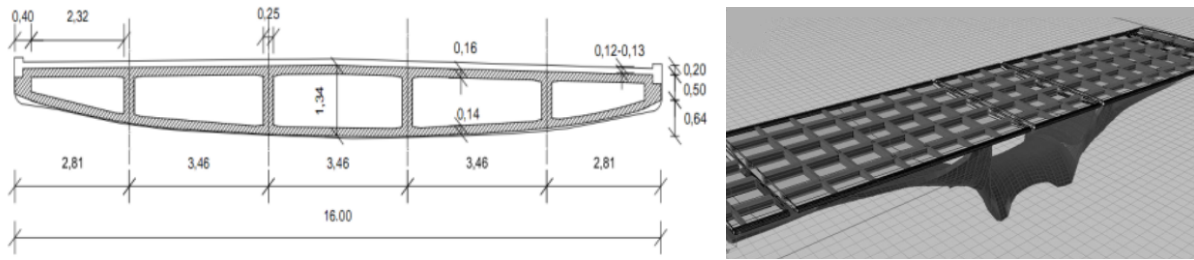


FIGURE 6.10 – Viadotto dell'Industria - pont de Musmeci

Outre son architecture optimisée, la structure interne du pont de Musmeci est composée de caissons de béton creux. L'objectif de l'étude présentée ici est de proposer une première cartographie des propriétés thermiques spatiales de la structure interne du tablier, figure 6.11.

Le tablier est revêtu d'une couche d'étanchéité puis d'une couche de roulement en béton bitumineux mis en œuvre au-dessus de la surface en béton des dalles ayant une structure interne en caisson. Le tableau 6.1 présente les propriétés thermophysiques supposées des différentes couches du tablier.

Afin d'effectuer le suivi temporel des différents paramètres météorologiques pendant la mesure par ThIR, le système IrLaW (cf section 6.1) a été installé sur un mini PC ZOTAC relié à une alimentation électrique sécurisée. Un GPS Ublox®(positionnement + datation des données), une caméra infrarouge FLIR®A320 et une station météo VAISALA®WXT520 ont été connectées au système conçu pour fonctionner de manière autonome. Le système assure la mise

FIGURE 6.11 – Structure interne du pont de Musmeci - cotes en m

	k W/m.K	α m ² /s	ρC J.m ⁻³ .K ⁻¹
Enrobé	1.41	$4.96e^{-7}$	2838810
Béton	1.8	$8.5e^{-7}$	2116000
Air	0.0242	$1.96e^{-5}$	1232

TABLE 6.1 – Propriétés physiques *a priori*

à disposition des données sur un réseau wifi privé. La figure 6.12 présente le schéma du système d'information installé sur le pont de Musmeci.

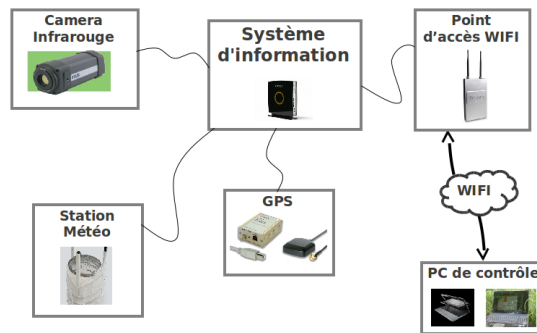


FIGURE 6.12 – Vue d'ensemble du système d'information

Un PC/Tablette de contrôle peut être utilisé localement afin de paramétrer le système ou d'effectuer la récupération asynchrone des données. Lors des essais, le mini-PC sur lequel le système IrLaW est implémenté a été placé dans un boîtier étanche sous le pont. La caméra infrarouge et la station météo ont été fixées sur un mât de 6m, la figure 6.13 présente l'installation du système sur l'un des gardes corps du pont ainsi que le champ de vision de la caméra infrarouge.

Un scénario d'acquisition a été implémenté dans le système (cf section 6.1), les données issues de la caméra infrarouge sont acquises à une fréquence de 5 Hz et enregistrées à 0.1 Hz après application d'une moyenne de 50 images thermiques. Le fait de moyenniser l'acquisition tend à réduire le volume de données stockées ainsi que l'impact de la circulation sur la qualité de mesure, sauf en cas d'embouteillage ou de trafic dense.

Une fois le système configuré et installé l'acquisition peut démarrer. L'évolution de la température de l'air, de la vitesse du vent ainsi que les images infrarouges ont été enregistrées. Le suivi de l'humidité relative constitue un des paramètres d'entrée pour corriger en temps réel les mesures infrarouges avant stockage (cf section 6.1). La figure 6.15 présente l'évolution des différents paramètres durant l'essai sur site.

Pendant les deux premiers jours, les paramètres suivis présentent un comportement périodique. Bien que le vent présente aussi un comportement périodique, il est perturbé par des

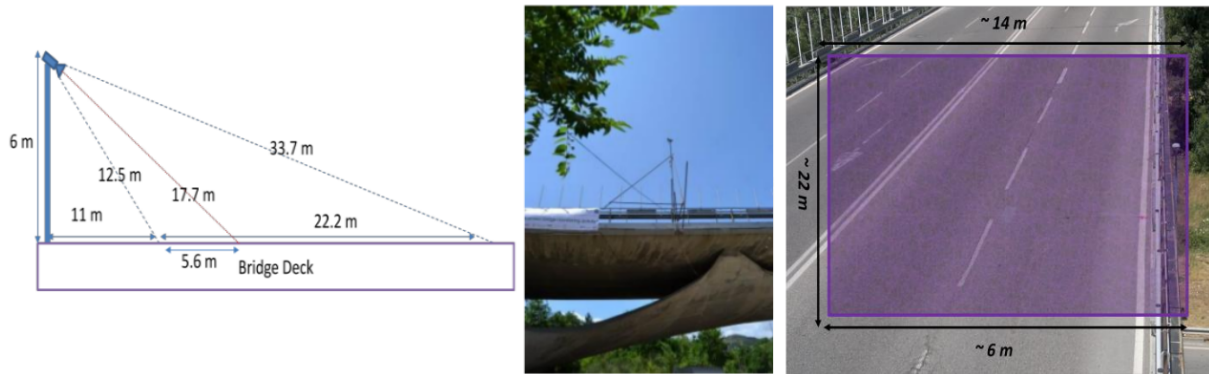


FIGURE 6.13 – Installation du système

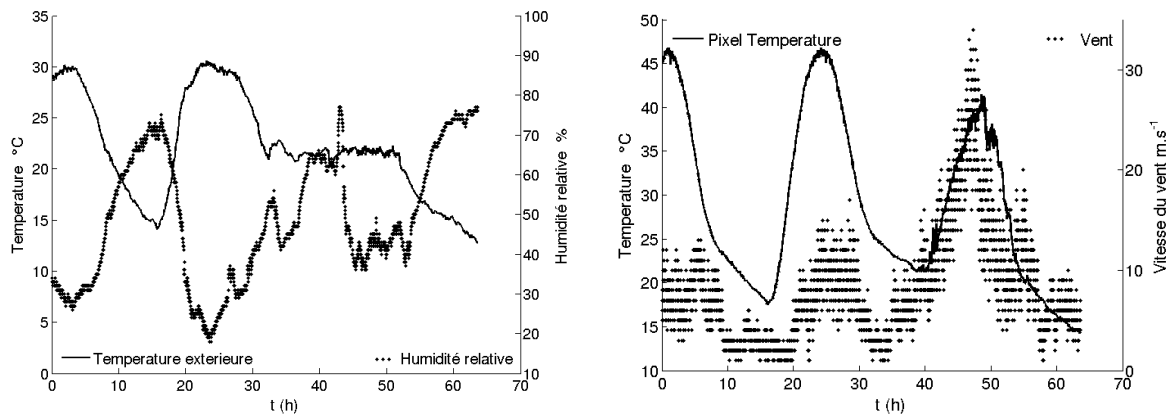


FIGURE 6.14 – Principales données acquises durant l'expérience

événements à haute fréquence (*ie.* rafales de vent). Le dernier jour un épisode de vent intense dans la journée se traduit par une chute de la température de surface de l'ouvrage. Remarquer que au même moment l'ensemble des paramètres, à l'exception du vent, présente un comportement constant. La figure 6.15 affiche le champ de température mesurée par la caméra infrarouge à différents instants du cycle journalier.

Le pont n'étant pas situé exactement dans l'axe solaire, l'ombre portée du garde corps apparaît sur ces différentes images thermiques. Remarquez que la structure interne du pont est détectable durant la relaxation thermique, cette observation indique que l'information sur la structure interne est contenue dans les images thermiques mesurées. Ainsi il apparaît justifié de dimensionner une procédure d'estimation de paramètres.

Cette section a présenté l'objet de l'étude et l'installation du système de mesure. Il a été observé un comportement *pseudo-périodique* de l'ensemble des paramètres durant au moins deux jours. Ces deux jours faisaient suite à dix jours de conditions climatiques estivales permettant la formulation d'une hypothèse de régime établis sur les deux premiers jours de mesures. Ainsi, la section suivante présente le développement d'un modèle quadripolaire fréquentiel en vue de la conception d'une procédure d'estimation paramétrique à l'image du chapitre 2.

6.3 Modélisation thermique

De par l'historique de mesure et l'allure périodique journalière du flux solaire, il est possible d'établir un parallèle entre les séquences d'images thermiques acquises section 6.2 et le contrôle non destructif de système par photothermie modulée. La photothermie modulé ou

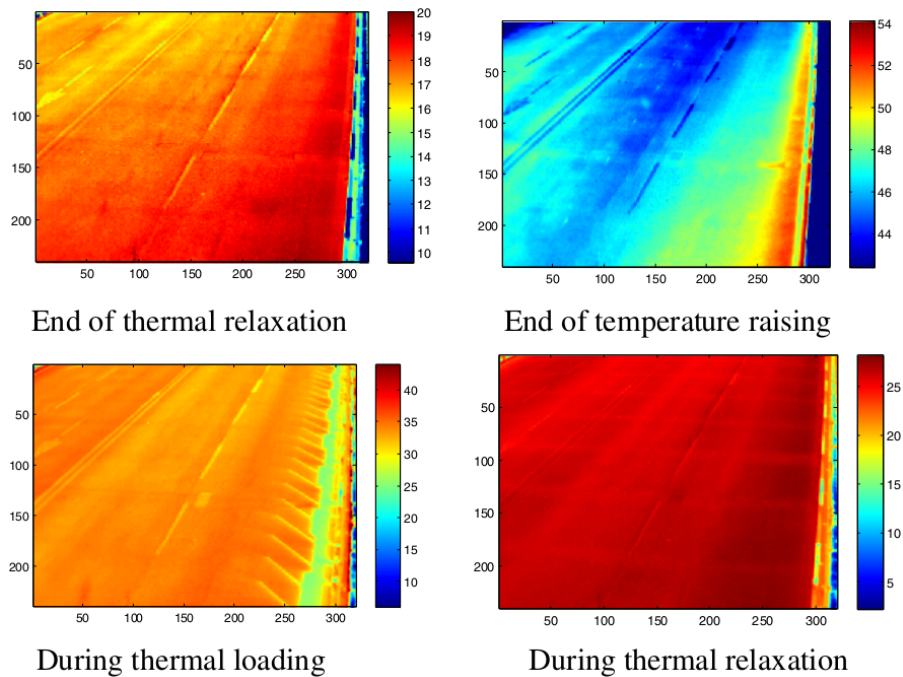


FIGURE 6.15 – Images thermiques

Lock-in [Busse, 1980] est couramment utilisée pour l'estimation de différentes propriétés telles que la diffusivité thermique [Czarnetzki et Roetzel, 1995, Salazar *et al.*, 2010]. En laboratoire elle présente l'avantage de déposer à la surface de l'échantillon une faible énergie, cette particularité permet notamment le diagnostic non destructif d'œuvres d'art [Candore *et al.*, 2006] ainsi que son utilisation dans le domaine biomédical [Autrique et Perez, 2011]. L'estimation de paramètre peut se faire directement, par analyse des déphasages entre zones saines et défectueuses [Lascoup *et al.*, 2013], ou à l'aide d'une modélisation inverse [Perez et Autrique, 2009]. L'effet de diffusion au sein des structures de génie civil ainsi que les perturbations environnementales rendent, ici, la mesure du déphasage difficile.

Après un rappel sur la formulation de l'équation de la chaleur soumise à une densité de flux périodique, cette section présente un modèle quadripolaire fréquentiel posant ainsi la première brique d'une procédure d'estimation paramétrique destinée à caractériser des éléments de structure soumis au flux solaire.

6.3.1 Formulation de l'équation de la chaleur en régime périodique établi : milieu semi-infini

La résolution de l'équation de la chaleur soumise à une excitation périodique (densité de flux ou température) est développée en détail dans [Carslaw. et Jaeger, 1959] et [Maillet *et al.*, 2000], cette section n'effectue qu'un rappel et présente les différentes quantités caractéristiques de l'évolution thermique périodique au sein d'un corps monolithique.

Les différents développements étudiés ci-après ne sont valides que pour modéliser la composante périodique établie d'un système soumis à une excitation harmonique c-à-d que la montée en régime du système a été effectuée préalablement. L'équation 6.2 présente le système à

résoudre :

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ T(x, t)|_{x=0} = \mathcal{A} \cos(\omega t) \\ T(x, t)|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

pour une fréquence f , une pulsation définie par $\omega = 2\pi f$ et une amplitude $A(x)|_{x=0} = \mathcal{A}$. L'hypothèse est émise que la solution recherchée est de forme :

$$T(x, t) = A(x, \omega) \cos(\omega t - \mathcal{D})$$

où \mathcal{D} est le déphasage spatial. Afin de résoudre l'équation 6.2 il est possible de poser $T^* = T_{rel} + jT_{imag}$ la température complexe avec j le nombre imaginaire :

$$T^* = A(x) \cos(\omega t - \mathcal{D}) + jA(x) \sin(\omega t - \mathcal{D}) = \tau(x) \exp(i\omega t) \quad (6.3)$$

avec $\tau(x) = A(x) \exp(-j\mathcal{D})$ l'amplitude complexe de la température T^* . Il est alors possible de poser l'équation 6.4, notez que l'amplitude de la température complexe ne dépend plus du temps :

$$\frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} = \frac{j\omega}{\alpha} \tau \quad (6.4)$$

Il est utile pour la suite de remarquer que l'équation 6.4 est équivalente à l'équation 2.5 présentée section 2.1.1 lorsque $p \rightarrow j\omega$. L'équation 6.4 a pour solution :

$$\tau(x) = \tau(x)|_{x=0} \exp\left(-\sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}} x\right) \quad (6.5)$$

La solution de l'équation 6.3 est alors exprimée l'aide de équation 6.5 et présentée équation 6.6

$$T^*(x, t) = \tau(x)|_{x=0} \exp\left(-\sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}} x\right) \exp(j\omega t) \quad (6.6)$$

L'expression de la partie réelle de l'équation donne la forme générale de la solution au problème posé :

$$T(x, t) = Re(T^*) = \mathcal{A} \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \cos\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} - \xi\right) \quad (6.7)$$

À partir de cette équation plusieurs observations sont possibles [Carslaw. et Jaeger, 1959, Maillet *et al.*, 2000] :

- Le déphasage spatial est défini par $\mathcal{D} = x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$ et augmente avec la profondeur.
- L'amplitude décroît exponentiellement avec la profondeur $A(x) = \mathcal{A} \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right)$. À l'aide de cette quantité il est possible de définir l'équivalent de la longueur caractéristique de diffusion (cf chapitre 1), à savoir la profondeur de pénétration D_p . Dans la pratique la profondeur x où le signal est observable varie entre $0 > x > D_p = 2\pi\sqrt{\frac{2a}{\omega}}$.
- L'équivalent du temps de diffusion en régime transitoire est défini par la vitesse v de "l'onde" thermique $v = \sqrt{2a\omega}$

- Il devient possible d'exprimer la longueur d'onde du système $\lambda = \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}}$. Comme avec la profondeur de pénétration la modélisation semi-infini n'est valide que pour des matériaux où $e \gg 2\pi\lambda$ [Carslaw et Jaeger, 1959].
- Remarquez qu'un second terme de déphasage ξ a été ajouté à la solution. Ce terme est nul quand l'équation est résolue pour une condition limite de Dirichlet et vaut $\pi/4$ dans le cas d'une condition de Neumann.

6.3.2 Formulation harmonique de l'équation de la chaleur : milieu semi-infini

Le système étudié ici est excité périodiquement par le flux solaire. Il est important de remarquer que le flux solaire est composé d'une somme de signaux périodiques auxquels s'ajoute l'ensemble des perturbations environnementales. Ainsi, les développements présentés section 6.3.1 n'apparaissent pas capables de modéliser le système étudié. Pour ce faire, il est possible de formuler l'équation 6.2 à l'aide des séries de Fourier et de l'équation 6.5 [Maillet *et al.*, 2000] :

$$T(t)|_{x=0} = \frac{1}{T_p} \left(\tau_c(0) + 2 \sum_{-\infty}^{\infty} (\tau_c(\omega_n) \cos(\omega_n t) + \tau_s(\omega_n) \sin(\omega_n t)) \right) \quad (6.8)$$

avec T_p la période, $\omega_n = \frac{2\pi n}{T_p}$ et

$$\begin{aligned} \tau_c(\omega_n) &= \int_0^{T_p} T(t) \cos(\omega_n t) dt \\ \tau_s(\omega_n) &= \int_0^{T_p} T(t) \sin(\omega_n t) dt. \end{aligned}$$

À l'image de l'équation 6.5, il est possible de définir $\tau(x, \omega_n)$ l'amplitude de la température complexe pour un ω_n donné par :

$$\tau(x, \omega_n) = \tau(0, \omega_n) \exp\left(-x \sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha}}\right) \quad (6.9)$$

Ainsi, la solution de l'équation 6.2 soumise à une excitation harmonique est :

$$T(x, t) = \frac{1}{T_p} \left(\sum_{-\infty}^{\infty} (\tau(\omega_n, x) \exp(j\omega_n t)) \right) \quad (6.10)$$

La transformée de Fourier discrète est reconnaissable dans l'équation 6.10. Cette observation est importante, elle autorise l'utilisation de la transformée de Fourier rapide pour la résolution de l'équation de la chaleur. La transformée de Fourier autorise aussi la formulation harmonique de signaux complexes périodiques ou non.

6.3.3 Formulation harmonique de l'équation de la chaleur : les quadripôles thermiques

Les développements précédents ont permis de faire un rappel sur la résolution de l'équation de la chaleur dans le cas d'une excitation périodique et des groupements caractéristiques. En

appliquant le raisonnement présenté section 2.1.1 sur l'équation 6.4 il est possible d'exprimer les matrices quadripolaires du système :

$$\begin{pmatrix} \tau_{1\omega_n} \\ \tilde{\varphi}_{1\omega_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha}} e\right) & \frac{1}{\sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha}} k} \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha}} e\right) \\ \sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha}} k \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha}} e\right) & \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha}} e\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_{2\omega_n} \\ \tilde{\varphi}_{2\omega_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{\omega_n} & B_{\omega_n} \\ C_{\omega_n} & C_{\omega_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_{2\omega_n} \\ \tilde{\varphi}_{2\omega_n} \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

La formulation quadripolaire est équivalente à celle présentée section 2.1.1 pour $p \rightarrow j\omega_n$. L'évolution de la chaleur au sein corps solide monolithique semi-infini soumis à une excitation harmonique à donc pour solution continue l'équation 6.12 obtenue à l'aide de la transformation de Fourier inverse [Erdelyi, 1954] :

$$T(t)|_{x=0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{A_\omega}{C_\omega} \tilde{\varphi}_{1\omega} \exp(j\omega) d\omega \quad (6.12)$$

La notion de température complexe est introduite pour résoudre l'équation de la chaleur d'un corps monolithique semi-infini soumis à une excitation périodique. La formulation quadripolaire du modèle permet d'établir un lien avec la transformée de Fourier autorisant l'utilisation d'algorithmes optimisés tel que la transformée de Fourier rapide (FFT) [Cooley et Tukey, 1965]. La section suivante présente le développement d'une procédure d'estimation paramétrique permettant de cartographier des propriétés thermophysiques apparentes du pont de Musmeci.

6.4 Procédure d'estimation paramétrique

Les mesures effectuées sur le pont de Musmeci ainsi que les différentes possibilités de modélisation de l'équation de la chaleur en régime périodique établi ont été présentées. À la vue des signaux thermiques l'hypothèse est émise que le pont présente un régime *pseudo-périodique* établi (cf section 6.2). Le pont étant soumis à des conditions variables, voire aléatoires (nuages, vents, etc.), l'hypothèse de périodicité est forte de conséquences. Étant donné les faibles perturbations et le comportement périodique des différents paramètres environnementaux, l'étude porte sur les premières 24 heures de mesure. Cette restriction aux premières 24 heures permet de réduire l'impact de l'hypothèse de périodicité. Elle est également justifiée par l'historique des conditions environnementales montrant que des conditions similaires à ces premières 24 heures ont pu être observées durant 10 jours avant le début des mesures.

La modélisation quadripolaire fréquentielle est détaillée équations 6.11 et 6.12, ce type de modèle à déjà été utilisé dans la partie I. L'objectif est ici d'étudier l'utilisation de modèles 1D quadripolaires pour la caractérisation de système soumis à l'ensemble des perturbations environnementales. Pour simplifier l'étude, un modèle quadripolaire semi-infini sera utilisé. Ce choix est justifié par le calcul de la profondeur de pénétration (cf section 6.3.1) à l'aide des propriétés supposées du pont (cf tableau 6.1). Enfin, étant donné le caractère supposé des propriétés du multi-couches que constitue le tablier du pont, une seule couche est exprimée au sein du modèle direct. L'estimation paramétrique porte donc sur les propriétés apparentes du système. Le modèle quadripolaire utilisé est présenté équation 6.13 :

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \tau_{surf\omega_n} \\ \tilde{\varphi}_{env\omega_n} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_{\omega_n} & B_{\omega_n} \\ C_{\omega_n} & C_{\omega_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_{ar\omega_n} \\ 0 \end{pmatrix} \\ T(t)|_{surf} &= \frac{1}{T_p} \left(\sum_{-\infty}^{\infty} \frac{A_{\omega_n}}{C_{\omega_n}} \tilde{\varphi}_{env\omega_n} \exp(j\omega_n t) \right) \end{aligned} \quad (6.13)$$

où $\tau_{surf\omega_n}$ est l'amplitude de la température complexe de la température en surface et $\tilde{\varphi}_{env\omega_n}$ la transformée de Fourier discrète de l'ensemble des sollicitations thermiques à la surface du tablier du pont. L'évolution de la température de surface $T(t)|_{surf}$ est obtenue à l'aide de l'inverse de la transformée de Fourier discrète. Étant donné la forme simplifiée du modèle, il aurait été envisageable d'exprimer une solution analytique continue à l'aide de la transformation de Fourier, équation 6.12, mais l'objectif est ici de tester l'ensemble de la méthode de modélisation, y compris la discrétisation fréquentielle. À l'image de la section 2.5 l'estimation paramétrique consiste à trouver le jeu de paramètres $P = [k, \alpha, e]$ qui minimise la fonctionnelle \mathcal{F} [Beck et Arnold, 1977, Orlande *et al.*, 2011] :

$$\min_P (\mathcal{F}) = \min_P \left(\| T(t)|_{surf} - \mathcal{M} \|^2 \right) \quad (6.14)$$

où \mathcal{M} représente les mesures, figure 6.14. Comme précédemment la minimisation de la fonctionnelle sera effectuée avec l'*algorithme de Levenberg-Marquardt* [Levenberg, 1944, Marquardt, 1963]. Avant de dimensionner une procédure d'estimation à proprement dit, il est nécessaire d'exprimer $\varphi_{env}(t)$ la densité de flux thermique à la surface du pont. L'excitation thermique à la surface fait intervenir un certain nombre de paramètres tels le vent et le flux solaire. La section suivante présente la méthode de reconstruction de $\varphi_{env}(t)$.

6.5 Reconstruction des conditions limites du système

La densité de flux thermique à la surface du tablier dépend du flux solaire et des autres conditions environnementales. Il est nécessaire de reconstruire les effets induits aux limites du système par ces deux paramètres. Dans un premier temps cette section, présente la méthode de reconstruction du flux solaire et du coefficient d'échange thermique, puis la densité de flux surfacique est reconstruite.

6.5.1 Reconstruction du flux solaire

Tout d'abord, le flux solaire dépend de plusieurs paramètres comme la constante solaire $I_c = 1367 \text{ W.m}^{-2}$ qui est la densité de flux moyenne reçue au sommet de l'atmosphère (une unité astronomique) ou l'angle d'incidence α_{inci} formé par les rayons solaires et la surface exposée. La plupart des modèles expriment l'addition des flux directs, diffus et réfléchis pour obtenir le rayonnement total à la surface figure 6.16.

De nombreuses études s'attachent à reconstruire le flux solaire, que cela soit pour l'estimation de l'énergie reçue par une zone urbaine [Melouch et Ben Brahim, 2001, Todorova, 2008] où l'estimation par satellite de la densité de végétation au dessus de la France [Piedallu et Gegout, 2007]. À chaque étude son modèle de flux solaire, [Todorova, 2008] propose une représentation graphique non exhaustive des différents modèles et corrélations utilisables en fonction de la hauteur dans l'atmosphère et [Piedallu et Gegout, 2007] propose un tableau dressant les apports de chaque modèle spécifique au calcul du flux global. Dans cette étude, le flux solaire

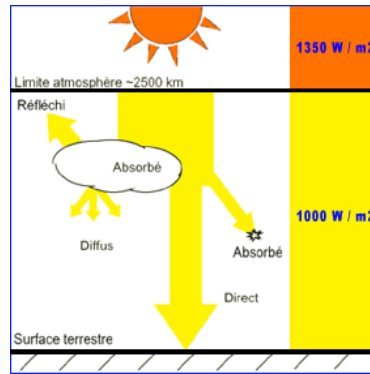


FIGURE 6.16 – Composantes du flux solaire

est reconstruit à l'aide d'une compilation de modèles proposée par [Duffie et Beckman, 1991]. Ci-après la liste des différents paramètres nécessaire au calcul de α_{inci} :

l_a Latitude du lieu, comprise entre -90° et 90° , comptée positivement au nord

δ Déclinaison solaire mesure l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan orbital de la terre. Elle est comptée positivement vers le nord et avec des valeurs nulles aux équinoxes, $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.

β Pente de la surface, angle entre la surface et l'horizontale. $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

γ Azimut de la surface. Angle entre la projection sur un plan horizontal de la normale à surface et la direction donnée par le sud. Positif à l'ouest. $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$

ξ Angle horaire. Déplacement angulaire du soleil dû au mouvement de rotation de la Terre. C'est l'angle entre les projections horizontales de la direction centre de la terre - surface à l'instant du calcul et à midi. Cet angle évolue de 15° par heure ($24 \times 15 = 360^\circ/\text{jour}$)

α_{inci} Angle d'incidence, angle entre la normale à la surface et le rayon incident.

α_s Angle d'altitude solaire, angle entre la projection dans le plan horizontal de la direction du rayon incident, et la direction du rayon incident.

θ_z Angle au zénith, c'est l'angle complémentaire de α_s

γ_s Azimut solaire. Angle entre la projection sur un plan horizontal de la direction du rayon incident et la direction donnée par le sud. Positif à l'ouest. $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$

Ces différentes quantités sont reportées figure 6.17. Des relations existent pour calculer l'ensemble de ces quantités. Ainsi la formule de [Cooper, 1969] permet le calcul de l'angle solaire δ :

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (6.15)$$

avec n le numéro du jour. Le modèle de [Kreith et Kreider, 1978] permet de calculer le rayonnement au sommet de l'atmosphère R_{atm} pour un jour donné à l'aide de la constante solaire I_c :

$$R_{atm} = I_c \left(1 + 0.034 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \quad (6.16)$$

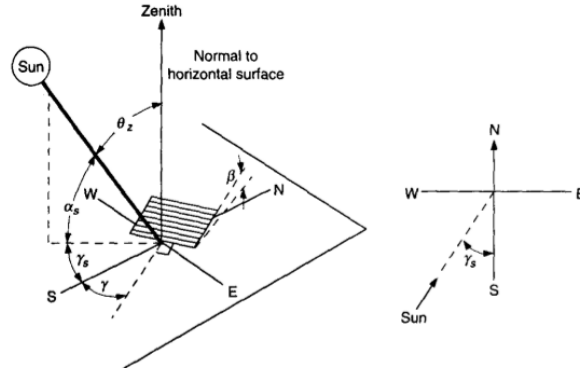


FIGURE 6.17 – Grandeurs utiles à la reconstruction de la densité de flux [Duffie et Beckman, 1991]

Notez que l'expression de ces deux relations change si l'année est bissextile [Cooper, 1969, Kreith et Kreider, 1978]. La formule de [Oke, 1987] permet le calcul de l'azimut solaire γ_s :

$$\cos(\gamma_s) = \frac{\sin(\delta) \cos(l_a) - \cos(\delta) \sin(l_a) \cos(\xi)}{\cos(\alpha_s)} \quad (6.17)$$

Le calcul de l'angle d'incidence est donné par [Duffie et Beckman, 1991] :

$$\cos(\alpha_{inci}) = \sin(\alpha_s) \cos(\beta) + \cos(\alpha_s) \sin(\beta) \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (6.18)$$

A partir du rayonnement au sommet de l'atmosphère R_{atm} , de la transmission atmosphérique $\tau_{atm} = 0.6$ [Gates, 1980] et de l'angle d'incidence α_{inci} il est possible de calculer la densité de flux solaire direct φ_{sol}^d :

$$\varphi_{sol}^d = R_{atm} \tau_{atm}^{\mathcal{M}_t} \cos(\alpha_{inci}) \quad (6.19)$$

où \mathcal{M}_t est le chemin optique des rayons solaires calculé à l'aide de corrélations [Kreith et Kreider, 1978, Piedallu et Gegout, 2007] :

$$\begin{aligned} M_o &= \sqrt{1229 + (614 \sin(\alpha_s))^2} - 614 \sin(\alpha_s) \\ P/P_o &= \left(\frac{(288 - 0.0065\mathcal{H})}{288} \right)^{5.256} \\ \mathcal{M}_t &= M_o P/P_o \end{aligned} \quad (6.20)$$

avec M_o le chemin optique relatif au niveau de la mer, P/P_o la correction de la pression atmosphérique et \mathcal{H} la hauteur de la zone étudiée. Reste maintenant à calculer le flux solaire diffus et total. L'équation 6.21 présente le calcul du rayonnement diffus [Duffie et Beckman, 1991, Piedallu et Gegout, 2007] :

$$\varphi_{sol}^{diff} = R_{atm} (0.271 - 0.294\tau_{atm}^{\mathcal{M}_t}) \sin(\alpha_{inci}) (0.5 + 0.5 \cos(\beta)) \quad (6.21)$$

Il est maintenant possible de calculer le rayonnement total φ_{sol}^{tot} à la surface, équation 6.22

$$\varphi_{sol}^{tot} = \left(\varphi_{sol}^{diff} + \varphi_{sol}^d \right) \left(\frac{neb}{8} \right)^{3.4} \quad (6.22)$$

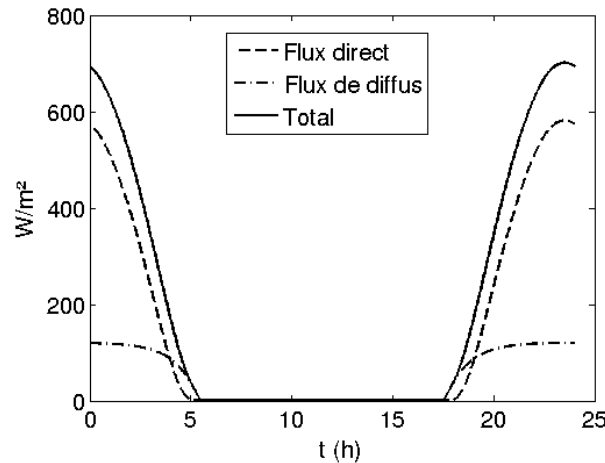


FIGURE 6.18 – Modélisation du flux solaire

où neb est l'indice de nébulosité (en octal) rendant compte de la présence de nuages. La figure 6.18 présente le calcul des composantes du flux solaire durant les premières 24 heures de mesure pour une nébulosité $neb = 0$ et une pente $\beta = 0$.

Notez qu'il existe plusieurs façons d'exprimer la présence ou non de nuages (nébulosité) et d'ombre [Duffie et Beckman, 1991, Piedallu et Gegout, 2007]. Ici les mesures ayant été effectuées en été avec un ciel dégagé il n'est pas nécessaire de prendre en compte la nébulosité. Il est aussi possible d'utiliser le modèle pour simuler l'éclairement entre surfaces, en zone urbaine par exemple [Viene, 2013]. La modélisation du flux solaire émet plusieurs hypothèses, notamment la transmission de l'atmosphère fixée à 0.6 [Gates, 1980] ou encore le calcul même du flux diffus [Duffie et Beckman, 1991] ces quantités sont difficiles à simuler en l'absence de mesures. C'est pourquoi en toute rigueur il aurait été nécessaire d'ajouter au système des capteurs de flux solaire.

6.5.2 Reconstruction du coefficient d'échange thermique et du flux global

Les faibles vitesses de vent mesurées les premières 24 heures peuvent être assimilées à un phénomène de convection naturelle (cf chapitre 1). Ainsi, il est possible de représenter le phénomène de transport à la paroi par l'application d'un coefficient d'échange thermique h . L'objectif est ici de reconstruire le flux à la surface du tablier du pont de Musmeci, équation 6.23

$$\varphi_{evn}(t) = h(t)(T_{ext}(t) - T_{surf}(t)) + \varphi_{sol}^{tot} = \varphi_{conv} + \varphi_{sol}^{tot} \quad (6.23)$$

avec φ_{evn} la densité de flux thermique en surface, T_{ext} et T_{surf} les température extérieure et de surface (cf chapitre 1). Le modèle présenté précédemment à permis de reconstruire φ_{sol}^{tot} , la suite de l'étude porte sur la reconstruction de h , φ_{conv} et $\varphi_{surf}(t)$.

Il existe différentes corrélations permettant de lier la vitesse du vent au coefficient d'échange convectif [Palyvos, 2008]. L'équation 6.24 présente la corrélation de [McAdams, 1954]

$$\begin{aligned} h &= 5.7 + 3.8v & v < 5 \text{ m s}^{-1} \\ h &= 6.47v^{0.78} & v \geq 5 \text{ m s}^{-1} \end{aligned} \quad (6.24)$$

Le caractère très perturbé de l'évolution de la vitesse du vent (rafale) fait apparaître des événements hautes fréquences. Ce comportement risque de perturber fortement la résolution du modèle direct. Ainsi, les mesures ont été sous échantillonnées à 0.0083 Hz, ceci tend aussi

à réduire le nombre de données et donc *in fine* le temps de calcul. La figure 6.19 présente les composantes de φ_{conv} obtenues à l'aide de la corrélation de McAdams [McAdams, 1954].

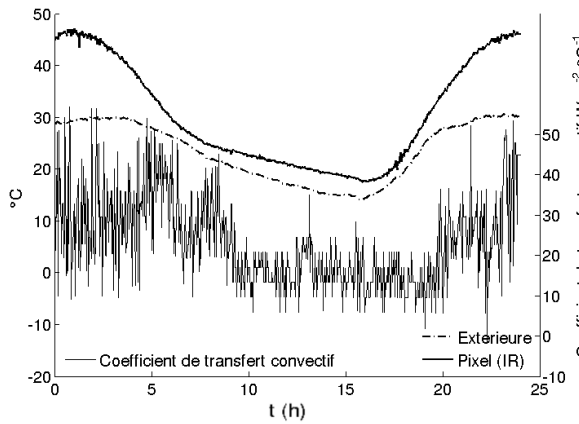


FIGURE 6.19 – Reconstruction du coefficient d'échange -
 $f_{ech} = 0.0083$ Hz

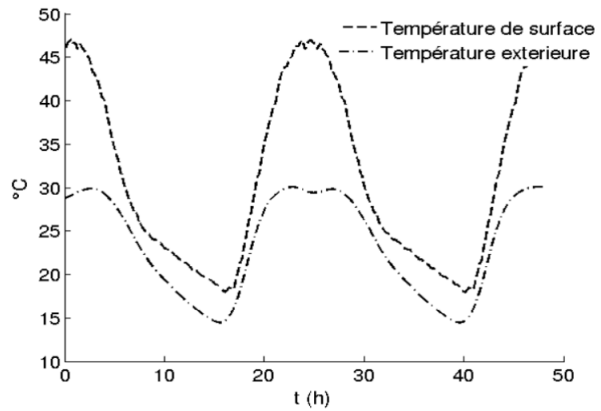


FIGURE 6.20 – Données filtrées

Bien que le nombre de données ait été réduit, il apparaît sur la figure 6.19 que le coefficient d'échange convectif est très perturbé par les rafales de vent. Bien que ces perturbations soient dues à un phénomène physique mesurable, dans le cadre de la modélisation thermique ces perturbations ne sont que du bruit de mesure. L'expérience montre que la résolution du modèle quadripolaire en présence d'une large gamme de fréquences n'est pas possible en l'état. Ainsi un filtre de Butterworth [Butterworth, 1930] d'ordre quatre est appliqué sur chacune des composantes de φ_{conv} , tableau 6.2 et figure 6.20

	ordre	Fréquence de coupure Hz
Température mesurée par IR	4	0.165
Température extérieure	4	0.0165
Vitesse du vent	4	0.0917

TABLE 6.2 – Propriété des différents filtres de [Butterworth, 1930]

Les précédents développements permettent d'exprimer le flux total φ_{env} ainsi que ses composantes, figure 6.21. La figure 6.22 présente $\varphi_{sol}^{tot}(\omega)$ et $\varphi_{env}(\omega)$ utilisés pour alimenter le modèle fréquentiel. Il est intéressant de remarquer deux pics fréquentiels dans $\varphi_{sol}^{tot}(\omega)$ à 11, 574 μHz et 23, 148 μHz , ces pics correspondent pour le premier à la périodicité journalière de 24 heures du signal, le second à l'alternance jour nuit de 12 heures. Ces deux pics sont aussi présents sur $\varphi_{env}(\omega)$, mais des événements d'amplitude non négligeable dus aux hautes fréquences du coefficient d'échange thermique sont aussi visibles. Il serait intéressant pour des développements futurs de ne résoudre le problème que pour les pics de fréquences, en omettant dans un premier temps les variations du coefficient d'échange.

La procédure d'estimation paramétrique utilisée peut être résumée schématiquement, figure 6.23.

Cette section a présenté la modélisation directe et inverse utilisée dans cette étude. Les méthodes de reconstruction du flux solaire et du flux convectif à la surface de tablier du pont de Musmeci ont été présentées. L'analyse a mis en avant la nécessité de filtrer les données de

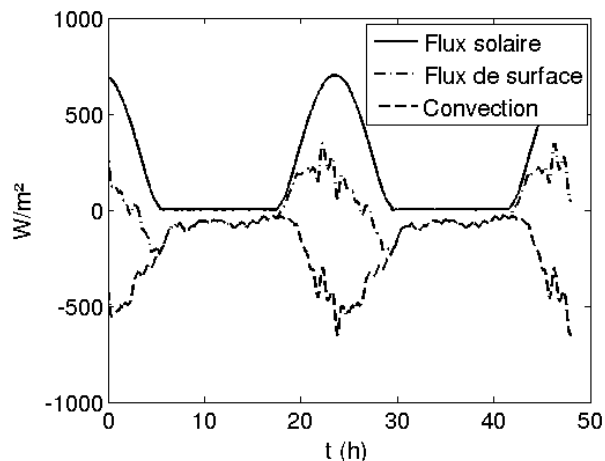


FIGURE 6.21 – Reconstruction de la densité de flux

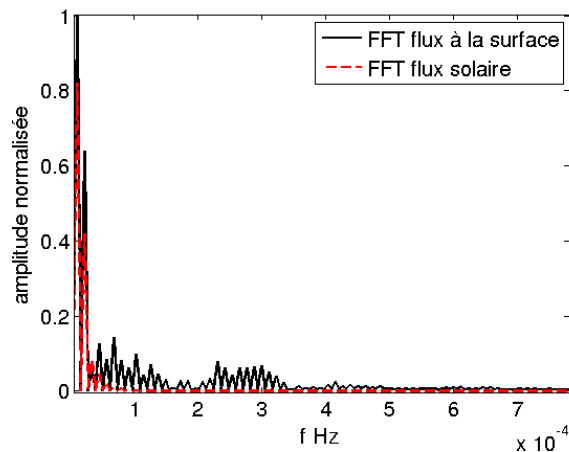


FIGURE 6.22 – Transformée de Fourier des densités flux thermiques

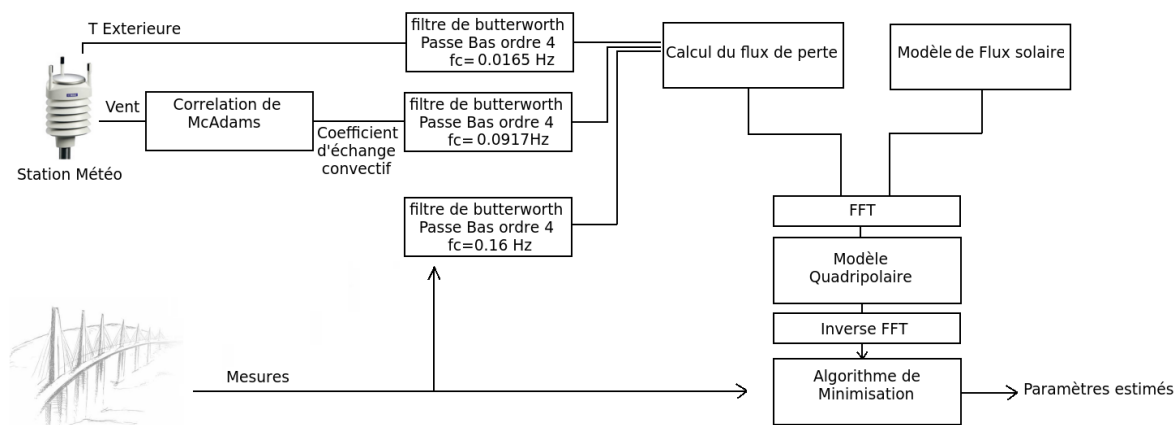


FIGURE 6.23 – Procédure d'estimation

mesure avant de reconstruire les conditions aux limites du système. Dans la suite de l'étude, une procédure d'estimation paramétrique est appliquée sur deux pixels représentatifs de la structure avant d'effectuer la cartographie des propriétés thermophysiques du tablier.

6.6 Résultats de la procédure d'estimation

Cette section a pour objectif de dresser la cartographie des propriétés thermophysiques apparentes de la structure. Ces évaluations sont réalisées en utilisant la procédure d'estimation présentée précédemment. Dans un premier temps, la procédure est appliquée sur deux pixels représentatifs localisés en utilisant l'image thermique présentée figure 6.15. Enfin, la cartographie du tablier sera proposée.

6.6.1 Estimation paramétrique sur deux pixels représentatifs

Suite à l'analyse de la figure 6.15 des zones présentant un comportement distinct ont pu être localisées. Ces zones correspondent aux caissons de béton présents sous la surface du tablier. Ainsi, deux points d'intérêt ont été identifiés, le premier $\mathcal{P}x_b$ est situé à la verticale d'une

séparation entre deux caissons, le deuxième $\mathcal{P}x_a$ est situé au-dessus d'une zone évidée. Le tableau 6.3 présente les résultats de la procédure.

	k W/m.K
$\mathcal{P}x_b$	1.75
$\mathcal{P}x_a$	1.8

TABLE 6.3 – Résultat de la procédure d'estimation sur deux pixels représentatifs

Il est possible sous certaines hypothèses, rappelées ci-après, de calculer les paramètres équivalents à un multi-couches [Maillet *et al.*, 2000], l'équation 6.25 présente le calcul de la conductivité apparente d'un système à n couches.

$$k_e = \frac{e}{\frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \dots + \frac{e_n}{k_n}} \quad (6.25)$$

Cette équation n'est valide que pour des matériaux présentant des ratios d'effusivités égaux, mais dans ce cas d'étude elle permet d'estimer un ordre de grandeur à l'aide des propriétés reportées tableau 6.1. Ainsi après calcul il apparaît que les deux premières couches présentent une conductivité apparente de $k_e = 1.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Au dessus d'une interface de béton entre deux caissons. Les calculs montrent que l'ordre de grandeur de k_e tend à augmenter, ce qui apparaît cohérent avec la propriété estimée. En revanche la présence d'une troisième couche d'air tend à diminuer fortement k_e , ce qui ne ressort pas dans le tableau 6.3.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce phénomène, tout d'abord il est possible que la profondeur de la couche d'air soit du même ordre de grandeur que la profondeur de pénétration (cf section 6.3). Difficile à calculer pour les multi-couches, elle serait pour un système entièrement en béton soumis à une excitation périodique de 24 heures de $D_p = 0.9 \text{ m}$ et de $D_p = 0.6 \text{ m}$ pour une excitation de 12 heures. Ainsi même si le béton apparaît plus diffusif que l'ensemble du multi-couches, la diminution de D_p n'explique pas le faible écart entre $\mathcal{P}x_b$ et $\mathcal{P}x_a$.

Une autre explication tient au procédé de fabrication. Les caissons de béton ont été moulés grâce à un coffrage en bois, et il est plausible que des vestiges de ce coffrage subsistent au sein du tablier, ce qui expliquerait la faible différence entre $\mathcal{P}x_b$ et $\mathcal{P}x_a$. Enfin, il est possible que l'injection des mesures dans la reconstruction des conditions aux limites tende à faire converger rapidement le modèle inverse.

La figure 6.24 présente l'écart entre mesure et modèle, tout comme dans la partie I de cette thèse, les résidus apparaissent faibles, mais signés. Bien que ces dernières constatations mettent en lumière les problèmes de la méthode, les paramètres estimés n'en restent pas moins fidèles aux valeurs attendues.

Après cette première analyse de la procédure inverse il apparaît que la différence entre les paramètres apparents (suivant leurs emplacements sur la structure) est plus faible que ce qu'il était attendu. Plusieurs choses peuvent expliquer ceci, présence de bois, erreur de jugement dans le choix des propriétés *a priori*, influence de l'injection des mesures dans le calcul des conditions limites ou encore problème de mesure. Néanmoins les estimations restent cohérentes vis-à-vis des propriétés attendues. C'est pourquoi, dans la suite de l'étude la procédure d'estimation est utilisée pour cartographier la distribution spatiale des propriétés thermophysiques du tablier.

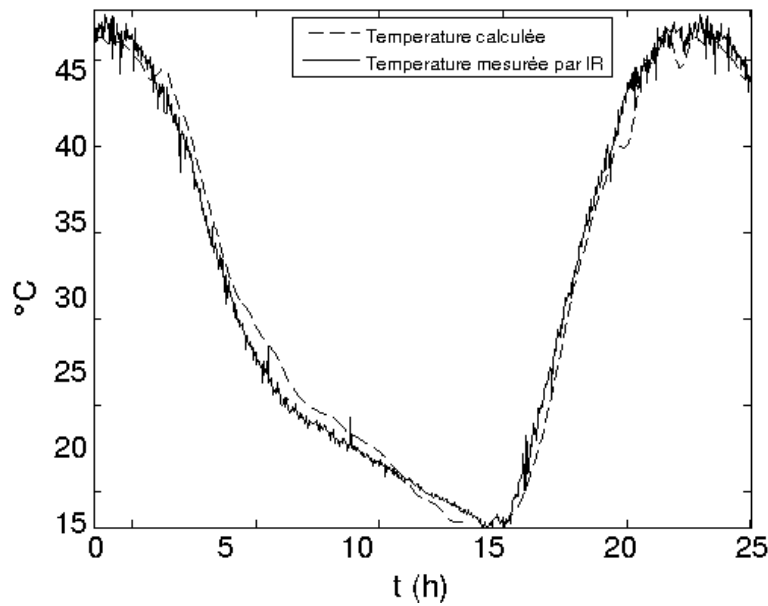


FIGURE 6.24 – Comparaison entre les mesures et la température calculée

6.6.2 Cartographie de propriétés

Après avoir étudié le comportement de la procédure d'estimation, la méthode est appliquée à l'ensemble des pixels de la séquence d'images infrarouges. Dans un premier temps, afin de localiser plus finement les zones d'intérêts, la figure 6.25 présente les cartographies de phases et d'amplitude obtenues par la transformation de Fourier [Cooley et Tukey, 1965].

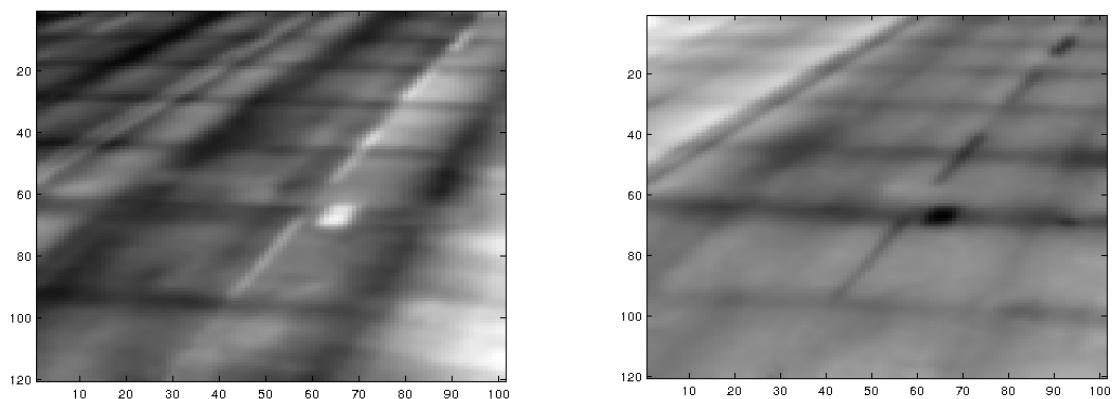


FIGURE 6.25 – Cartographies de phase (gauche) et d'amplitude (droite) issues de la FFT

La carte en amplitude représente la valeur de la seconde harmonique, tandis que la carte de phase représente la cinquième harmonique. D'abord choisies arbitrairement pour leur contraste élevé faisant apparaître la structure interne du pont, la valeur de phase et d'amplitude ω_5 et ω_2 correspondent aux pics fréquentiels générés par les deux composantes principales de l'excitation thermique, à savoir un signal journalier de 24 heures et une alternance jour nuit de 12 heures. Ces pics sont observables sur la figure 6.22. Il est intéressant de remarquer que l'ombre portée du garde-corps apparaît sur la carte de phase, inversement c'est la différence d'état de

surface entre les deux voies de circulation qui apparaît sur la carte d'amplitude.

La figure 6.26 présente la cartographie de conductivité thermique apparente identifiée à l'aide de la procédure d'estimation développée précédemment. Notez que pour l'occasion une implémentation *GPGPU* de l'algorithme de *Levenberg Marquardt* a été développée, le modèle direct a lui aussi été implémenté en *GPGPU* il est ainsi massivement parallélisé pour chaque ω_n . Les différents calculs ont été effectués sur un ordinateur grand public (RAM : 8G, Proc : Intel®Core™i7 – 2860QM @2.50 GHz, OS : Ubuntu 12.04) disposant de capacité de calcul *GPU* par l'intermédiaire d'une carte graphique NVIDIA®GT 555M.

La procédure d'estimation brute, c-à-d non optimisée au sens algorithmique (direct + *algorithme de Levenberg Marquardt*), a été appliquée à l'ensemble de la séquence infrarouge. Les résultats ont été obtenus en isolant une zone de 240x200 pixels au sein de l'image originelle, puis afin de réduire les temps de calcul, une moyenne spatiale sur quatre pixels a été appliquée. Ainsi la séquence d'images thermiques traitée a une résolution spatiale de 120x100 pixels. Les temps de calcul passent de ≈ 70 h avant parallélisation à moins de 3 h avec l'implémentation *GPGPU* non optimisée.

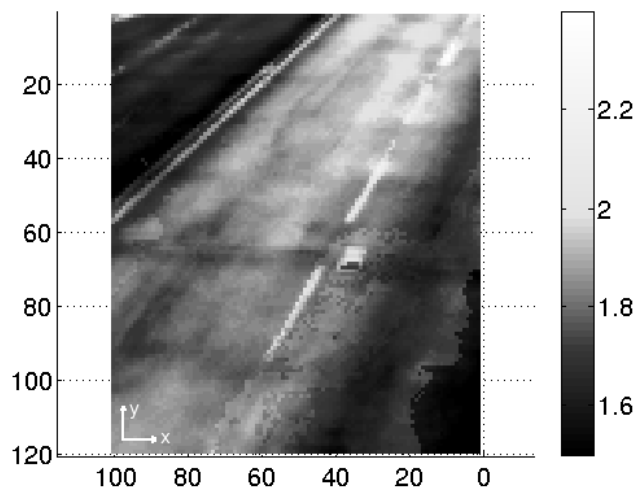


FIGURE 6.26 – Cartographie de la conductivité apparente

Le premier caisson de béton (au premier plan) apparaît clairement sur la cartographie. En revanche la minimisation étant effectuée sur les données temporelles et non fréquentielles les zones problématiques identifiées sur les cartes de phase ou d'amplitude apparaissent toutes les deux sur la cartographie de propriété, à savoir l'ombre portée (à droite) et le changement de revêtement (à gauche). Enfin des problèmes de mesure apparaissent, même si un certain nombre de caissons sont détectés la conductivité apparente apparaît croissante en y , bien que les mesures aient été corrigées (section 6.1), il est possible que la carte des distances pose problème. Les variations spatiales d'émissivité, bandes blanches, apparaissent aussi problématiques.

Une étude complémentaire devra analyser la faisabilité et les résultats de la procédure d'estimation non plus sur des mesures temporelles, mais sur la phase et l'amplitude de la transformée de Fourier de celles-ci. Ceci afin de prendre en compte les remarques effectuées sur les cartographies présentées figure 6.25.

6.7 Synthèse

Résumé et principaux résultats

Ce chapitre a présenté une étude dont l'objectif était de caractériser, à l'aide d'une modélisation quadripolaire fréquentielle couplée à une méthode de minimisation, la distribution spatiale de la conductivité apparente d'une structure de génie civil ouverte au trafic. Le système de mesure a été présenté et son installation *in situ* détaillée. La formulation périodique pure et harmonique de l'équation de la chaleur a été développée ainsi que les différentes méthodes de reconstruction de conditions limites environnementales. Enfin, la conception d'une procédure d'estimation paramétrique a permis la cartographie des propriétés thermophysiques apparentes de la structure.

Synthèse des différentes sections

La section 6.1 a présenté le principe de fonctionnement ainsi que les différentes étapes de conception de la solution logicielle et matérielle IrLaW-SENSORBOX. IrLaW est capable de piloter un ensemble de cameras thermiques, la récente démocratisation des solutions de calculs massivement parallèles *GPGPU* [Harris, 2002] lui permet d'effectuer un certain nombre corrections de mesure en temps réel (ie correction atmosphérique, conversion en température, etc.). De par sa connectivité il peut être intégré à un protocole expérimental strict [Dumoulin et Boucher, 2014]. Dans le cadre du projet ISTIMES, IrLaW à évoluer vers une architecture SHM, la SENSORBOX. Capable de faire office aussi bien de capteur multi-données ainsi que de système SHM à part entière. IrLaW-SENSORBOX implémente le protocole normalisé de communication de l'*open geospatial consortium* (OGC) au travers duquel il peut être déployé comme web-service respectant les concepts de SOA/WOA [Wiederhold, 1992] du W3C [OGC, 2011, OGC, 2010]. L'ensemble de ses capacités de communications peuvent être déployées dans des canaux de communication implémentant leurs propres protocoles et capacités de calcul [Averty, 2011, Dumoulin et Averty, 2012b].

Dans la suite de l'étude, la section 6.2, détaille l'installation du système de mesure afin d'effectuer le suivi thermique du pont de Musmeci, à Potenza en Italie [Dumoulin et Averty, 2012a, Argenti *et al.*, 2012]. Le système est composé, d'un GPS, d'une station météo ainsi que d'une caméra thermique filmant le tablier du pont. Le tout est articulé autour du logiciel IrLaW installé sur un mini PC et pouvant être commandé à distance. À l'aide de ce système autonome, l'ensemble des paramètres environnementaux (vents, température, humidité, etc..) ainsi que les données IR ont été mesurées pendant trois jours en juillet 2011. Le pont n'étant pas situé exactement dans l'axe solaire, l'ombre portée du garde corps apparaît sur les différentes images thermiques acquises. Lors de la relaxation thermique la structure interne en caissons de béton est détectée sur les images infrarouges, indiquant par la même que l'information sur la structure interne du pont est contenue dans le signal journalier mesuré. Un comportement *pseudo-périodique* est observé sur l'ensemble des paramètres durant les 24 premières heures, orientant ainsi l'étude vers une modélisation harmonique de l'équation de la chaleur en vue de développer une procédure d'estimation permettant le diagnostic de la structure interne du pont.

Après avoir constaté la périodicité des mesures (du moins sur les 24 premières heures), la section 6.3 présente la forme fréquentielle de l'équation de la chaleur, notamment en introduisant la notion de température complexe [Carslaw. et Jaeger, 1959, Maillet *et al.*, 2000, Perez et Autrique, 2009]. Les grandeurs caractéristiques de cette formulation ont ensuite été détaillées dans le cas d'une excitation périodique pure. Dans la suite de la section, la formulation fré-

quentielle pure a été étendue aux séries de Fourier ainsi qu'à la transformée du même nom par l'intermédiaire d'une formulation quadripolaire fréquentielle. La modélisation de la diffusion de la chaleur dans des matériaux soumis à des excitations harmoniques (*ie.* supérieur à une harmonique) ouvre ainsi la voie à la modélisation de systèmes soumis aux différents apports énergétiques environnementaux.

La définition des conditions limites est nécessaire pour résoudre le système. Dans le cas de structures soumises aux perturbations du milieu naturel, la condition aux limites du système est composée des différents paramètres environnementaux. Afin de résoudre le problème inverse, la section 6.5 présente une méthode de reconstruction des différentes composantes de la condition aux limites, à savoir le flux solaire et la convection à la surface du tablier. L'étude se porte sur la reconstruction du flux solaire, basée sur les travaux de [Duffie et Beckman, 1991, Piedallu et Gegout, 2007, Todorova, 2008]. La méthode consiste à reconstruire le flux solaire direct et diffus à l'aide de la position, de l'orientation, de l'altitude et de la nébulosité au dessus du sujet observé. La condition limite mixte est composée du flux solaire ainsi que de l'effet du phénomène de convection à la paroi. Ce dernier est reconstruit à partir des vitesses de vent mesurées et de la corrélation de McAdams [McAdams, 1954].

Une fois la condition limite reconstruite la section 6.6 détaille les résultats de la procédure d'estimation paramétrique présentée section 6.4. Un premier test a été effectué sur deux pixels représentatifs, le premier au dessus d'une jonction entre deux caissons interne à la structure, le second au dessus d'une zone évidée. Ce premier emploi de la procédure d'estimation a montré la faisabilité de la méthode, le faible écart de conductivité apparente entre les deux estimations tend à mettre en évidence la possible présence de vestiges du coffrage bois utilisé pour la construction de l'édifice. La procédure est alors appliquée sur l'ensemble de la séquence d'images infrarouges. Les calculs ont été effectués sur un ordinateur domestique disposant de capacité de calculs *GPGPU*. Trois heures de calcul ont été nécessaires pour dresser une cartographie de conductivité apparente, à savoir qu'en utilisant des techniques d'optimisation algorithmique ce temps de calcul pourrait être significativement réduit. La cartographie de conductivité apparente a permis la caractérisation et la détection des caissons interne à la structure. En revanche les variations spatiales de l'état de surface (émissivité) ainsi que des propriétés de la couche de roulement affectent les résultats de la procédure d'estimation.

Conclusion et perspectives

L'étude a montré la faisabilité de l'utilisation de modèles quadripolaires fréquentiels pour le diagnostic journalier de structures de génie civil soumis aux conditions environnementales. À travers l'analyse plusieurs perspectives et observations se dessinent. Tout d'abord le système de mesure IrLaW-SENSORBOX a été déployé et a permis le monitoring d'une structure durant trois jours. Le système conçu est certes efficace, mais son architecture monolithique est un frein à son évolution. La refonte de système en suivant certaines règles d'architecture logicielles tels les *design patern* (par exemple *MVC* pour le système, *factory* pour les capteurs) ou l'architecture trois tiers permettrait la compartimentation du logiciel et faciliterait le travail de maintenance et de mise à niveau. Enfin une réflexion sur le concept de web-service appliqué à un système de mesure ainsi que sur le développement d'un code générique permettant l'implémentation de modèles physiques apparaît justifiée.

La formulation en transformée de Fourier autorise la modélisation et/ou représentation de nombreux signaux. En revanche l'équation différentielle résolue dans cet espace transformé im-

pose des conditions de validité strictes (réelle périodicité, régime établi...). Il serait intéressant d'étudier le comportement de la modélisation fréquentielle en fonction de l'historique de mesure et d'étudier à quel moment le choix d'une telle modélisation est justifié, par exemple, si un an de mesure a été acquis, la modélisation fréquentielle en régime établi est elle physiquement valide? Dans la même veine, le principe de superposition doit être étudié comme méthode permettant la reconstruction de la valeur moyenne non constante contenue dans les mesures. L'étude a montré la présence de fréquences caractéristiques, il serait alors envisageable d'analyser la réponse du modèle lorsque seules ces fréquences sont utilisées pour le retour temporel. Une modélisation multi-couches permettant la représentation de la complexité du tablier est à étudier.

Enfin, la procédure d'estimation a permis la cartographie des propriétés thermophysiques du tablier. L'une des observations principales est l'impact de la variation spatiale de l'émissivité (signalisation routière), de l'ombre portée des gardes corps et d'un changement de propriété de la couche de roulement (rénovation). L'étude a montré que, sur les cartes de FFT, certaines perturbations n'étaient pas visibles. Ainsi, la phase apparaît plus sensible à l'ombre portée qu'aux changements de la couche de roulement contrairement à l'amplitude de la FFT. À partir de ces observations il servait envisageable d'analyser le comportement de la procédure d'estimation appliquer sur la la phase ou l'amplitude et non plus sur les signaux temporels.

Le chapitre suivant détaille une étude mise en place dans le cadre d'une surveillance thermique le long terme. Cette étude est incluse dans la continuité de ce chapitre, et doit servir à confirmer les premiers résultats présentés dans ce chapitre et étudier les perspectives détaillées ici.

Mise en place d'une expérience long terme et premiers résultats

Ce chapitre détaille la mise en place d'une expérience long terme de surveillance thermique. Le système de SHM présenté dans le chapitre précédent est d'abord modifié afin d'être complètement autonome et permet l'acquisition de données infrarouges et environnementales sur une échelle annuelle. La finalité d'une étude annuelle est de discriminer l'influence des événements périodiques journaliers et saisonniers ainsi que des événements aléatoires sur la mesure et les procédures de diagnostic à y associer. L'étude est axée autour de deux éléments structurels, dont l'un a été endommagé. L'un des deux éléments de structure est instrumenté à cœur à l'aide de thermocouples et de jauges de contrainte. L'étude détaille la mise en place du système ainsi que les éléments structurels. Les données environnementales, infrarouges et issues des thermocouples sont présentées et une première analyse est proposée.

7.1 Système de mesure

L'étude présentée dans ce chapitre nécessite la conception d'un système autonome capable d'assurer la mesure de paramètres environnementaux et la gestion d'une caméra infrarouge sur le long terme (ie supérieur à un an). Dans cet optique, le système d'information est basé sur le logiciel IrLaW-SENSORBOX présenté chapitre 6, figure 7.1. L'approche long terme de l'étude impose que le système d'information soit autonome en énergie, afin de nécessité le moins d'intervention humaine possible. Une stratégie de sauvegarde et gestion des données doit aussi être mise en place. Lors de travaux précédents un premier système de gestion de données nommé MULTIM [Averty, 2011] a été conçu. Ce SGBD (Système de gestion de base de données) est fortement orienté utilisateur final, proposant une interface (client léger ou autres) permettant la présentation graphique des données. Dans le cadre de la présente étude, ce système ne sera pas utilisé, en effet la question de l'utilisateur final n'est (d'un point de vue logiciel) par encore d'actualité. MULTIM est alors remplacé par un script de rapatriement automatique de données (Batch), basé sur le protocole *SFTP* (Secure File Transfer Protocol). Le script rapatrie de manière sécurisée et journalière les données acquises par les différents capteurs du système sur un serveur dédié au stockage de celles-ci. Afin de minimiser le risque de perte de données par défaut matériel, le stockage est redondant (implémentation du RAID :1 sur le serveur de stockage).

La nouvelle architecture du système est présentée figure 7.2.

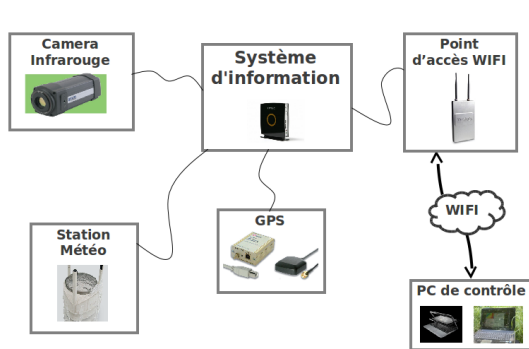


FIGURE 7.1 – Architecture IrLaW-SENSORBOX - cf Chapitre 6

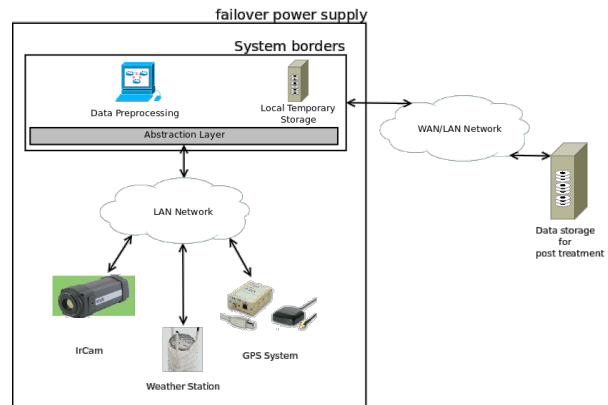


FIGURE 7.2 – Adaptation de l'architecture pour l'étude

L'autonomie énergétique est, elle assurée par une batterie externe de 12 volts et 102 ampères heures assurant une autonomie de plusieurs jours au système en cas de coupure de l'alimentation électrique. Seul le serveur de stockage n'est pas secouru en cas de panne, dans ce cas un stockage redondant interne au système permet la sauvegarde de plusieurs semaines de mesures. Pour information, le système n'effectuant pas de pre-traitement, le volume annuel de données brutes sauvegardées par le système suivant les capteurs, l'échantillonnage et la résolution de la caméra thermique peut varier de plusieurs centaines de Giga à plusieurs Téra octets.

Le développement du "switch" entre sources d'alimentation électrique, ainsi que l'implémentation matériel du système, figure 7.3, ont été assurés par Jean Luc Manceau, membre de l'équipe MéThOM, donnant par la même le surnom de *J-L Box* au système.

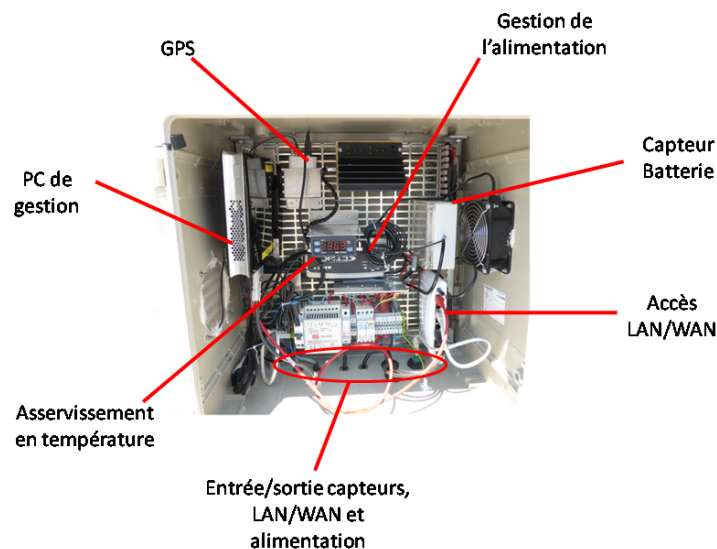


FIGURE 7.3 – Schéma de la *J-L Box*

D'un point de vue logiciel, l'autonomie énergétique est gérée comme un capteur (cf chapitre 6 section 6.1). En complément du *switch* matériel introduit précédemment, un capteur émet un signal électrique particulier lorsque la batterie atteint un niveau de charge insuffisant. À

l'émission de ce signal, IrLaW déclenche une procédure d'arrêt automatique de l'ensemble du système (PC + capteurs), évitant ainsi toute sauvegarde de données corrompues. Dans le cadre de ces travaux de thèse, une interface matérielle USB a été développée pour assurer la communication entre le capteur de niveau de batterie et le reste du système. Le système de mesure est installé dans un caisson de protection, déployé par la suite sur le lieu d'essais. Un système d'asservissement de la température interne au caisson a été installé, il permet d'éviter la surchauffe du système durant la saison chaude et assure la mise hors gel durant l'hiver.

Les différents changements apportés au système IrLaW SENSORBOX ont été présentés. Ces modifications accroissent son autonomie énergétique et automatisent la gestion des données capteurs. Dans la suite de l'étude, les éléments structurels sur lesquels porte le monitoring thermique sont présentés et l'installation du système de mesure est détaillée.

7.2 Éléments structurels et benchmark expérimental

Le système présenté dans la section précédente a été utilisé pour le *monitoting* d'élément structurel sur le long terme. Ces éléments sont deux poutres en béton renforcé de $16m \times 1m \times 0.5m$. Elles sont présentées figure 7.4. Elles ont été fabriquées sur le site du chantier d'aménagement du Port de Roscoff (France-Bretagne) en 2010 [Préfecture, 2010].



FIGURE 7.4 – Poutres en béton armé utilisées dans l'étude

La figure 7.5 présente l'armature métallique des poutres. Une des poutres est instrumentée avec 48 thermocouples et 10 jauges de déplacement. La figure 7.6 présente une représentation schématique du placement des différents capteurs. Le maillage d'instrumentation de la structure interne est composé de 16 sections, trois colonnes et six lignes. Chacun des capteurs internes est identifié par son numéro de section, de ligne et de colonne. Cette poutre n'ayant subi aucun endommagement elle sera considérée comme l'élément de structure sain de l'étude. Notez que les 48 thermocouples ont été placés suivant ce schéma afin de permettre, ultérieurement, la reconstruction du champ thermique interne [Nassiopoulos et Bourquin, 2010].

En ce qui concerne l'endommagement de la seconde poutre, l'IFSTTAR possède sur le site de Montagnole (France), une station d'essai à grande échelle, en temps normal elle est utilisée pour effectuer le dimensionnement et le test des filets de sécurités protégeant les infrastructures routières, située en zone montagneuse, de chutes de pierres. Le site est situé à flanc de falaise au sommet de laquelle un système de levage peut lâcher différentes charges (jusqu'à 20 T) d'une hauteur variant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres (maximum 70 m) sur une zone représentée par un demi-cercle de 12 m de rayon. Pour les besoins de l'étude, et dans le cadre du projet européen ISTIMES, la deuxième poutre a subi plusieurs impacts à haute énergie sur le site de Montagnole [Dumoulin *et al.*, 2011a]. La figure 7.7 présente le système de levage et l'impacteur de 2.5 T.



FIGURE 7.5 – Fabrication des poutres sur chantier

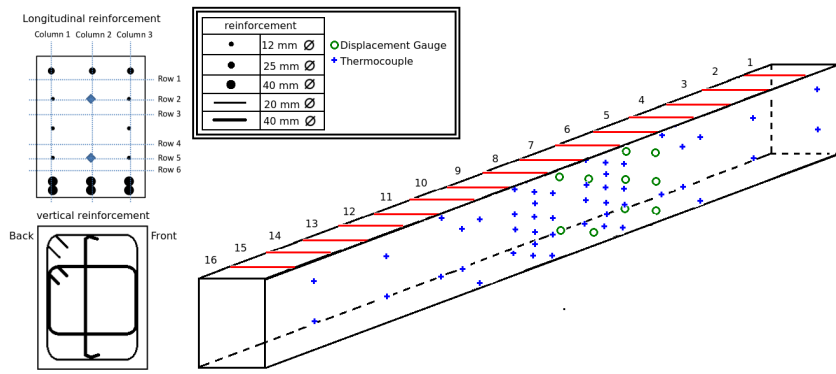


FIGURE 7.6 – Instrumentation de la poutre saine



FIGURE 7.7 – Site d'essai de l'IFSTTAR : Station de chute de blocs de Montagnole

Au total, la poutre a subi quatre impacts d'une hauteur de 1 m à 5 m. Les trois premiers impacts ont été réalisés depuis une hauteur de 1 m, générant chacun une énergie cinétique de 24,5 k.J*. Le dernier impact, réalisé depuis une hauteur de 5 m, génère une énergie cinétique de 122,5 k.J*. L'expérience a été filmée à l'aide d'une caméra rapide, figures 7.8 et 7.9.



FIGURE 7.8 – Poutre au moment du dernier impact



FIGURE 7.9 – Poutre 40 centièmes de secondes après le dernier impact

La figure 7.8 représente la poutre et l'impacteur au moment du dernier impact, la figure 7.9 présente la même scène à 40 centièmes de seconde d'écart. L'amortissement de l'impact par la poutre, ainsi que décrochage de matière sont visibles sur ces images. La figure 7.10

*En négligeant les frottements

présente l'état final de la zone d'impact. Bien que la poutre apparaisse fortement endommagée, son haut niveau de renforcement lui assure une tenue mécanique suffisante pour autoriser son déplacement [Catapano *et al.*, 2012] figure 7.11.



FIGURE 7.10 – Endommagement de la poutre après les différents impacts



FIGURE 7.11 – Mise en place des poutres sur le site de l'IFSTTAR Bougenais

Après avoir été instrumentée pour la première et endommagée pour la seconde, les deux poutres ont été déplacées sur le site d'essai à grande échelle de l'IFSTTAR Bougenais. Placées face au hall d'essais thermo-mécanique, les poutres sont orientées selon un axe *Est-Ouest*, donc soumises à l'éclairement solaire direct durant une grande partie de la journée, figure 7.12.

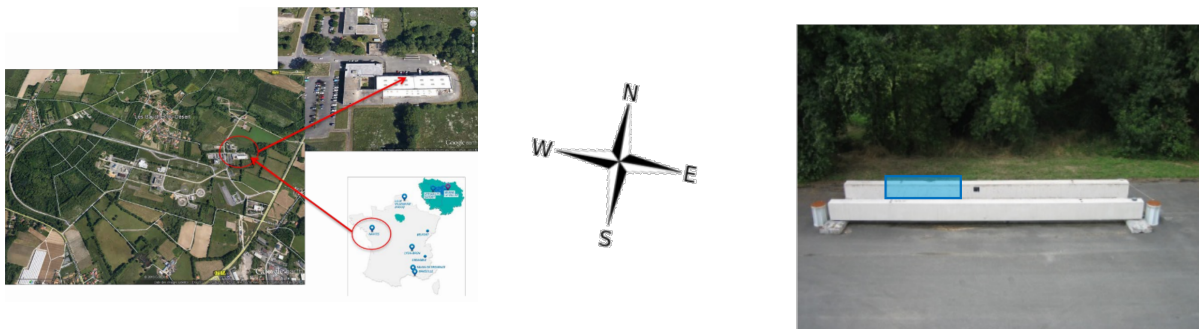


FIGURE 7.12 – Orientation et localisation du site d'essai

Le système d'acquisition présenté section 7.1, est installé sur le toit du bâtiment d'essais, figure 7.13. Le système est composé d'une station météo VAISALA WXT520 assurant la mesure des paramètres environnementaux à une fréquence de 0.1 Hz, d'un GPS UBLOX permettant la datation des données et d'une caméra thermique non refroidie à matrice microbolométrique (cf chapitre 1) FLIR SC325 en bande III, de résolution spatiale 320×240 px. La caméra acquière les données infrarouges de la scène, figure 7.14, à une fréquence native de 25 Hz. Un scénario d'acquisition défini pour l'étude (cf action 6.1) effectue une moyenne sur 250 images, ramenant la fréquence d'échantillonnage du système à 0.1 Hz.

La caméra thermique est placée dans un caisson de protection de la société VIDEOTEC modèle NTM dont la face avant est équipé d'un hublot en germanium affichant un coefficient de transmission élevé dans l'infrarouge [VIDEOTEC, 2013]. L'optique du caisson a été caractérisée en laboratoire, il affiche une transmission de 0.97 dans l'infrarouge bande III. Le caisson



FIGURE 7.13 – Site d'essai de l'IFSTTAR

est thermiquement asservi. L'asservissement en température garanti le respect du domaine de fonctionnement de la caméra thermique durant la saison froide, et évite la condensation sur la surface du hublot. La figure 7.14 présente le schéma d'installation du système ainsi que le domaine couvert par le champ de vision de la caméra.

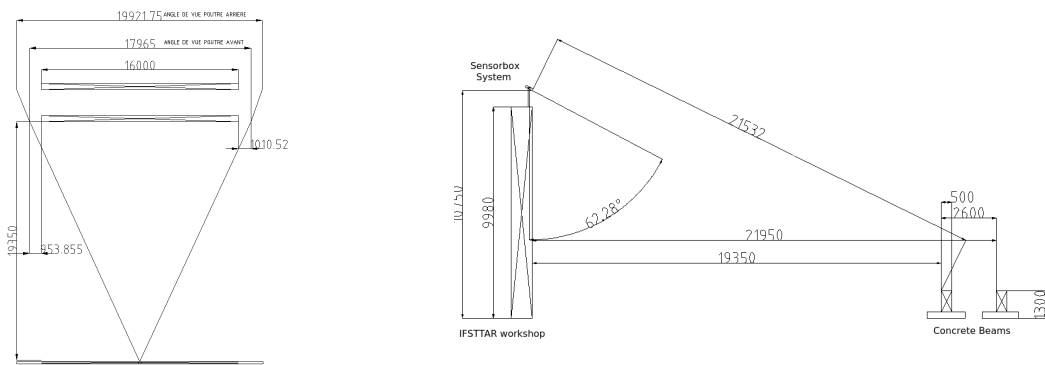


FIGURE 7.14 – Schéma du système de mesure - plan du champ de vision en (mm)

Dans un premier temps, l'ensemble des données acquises par le système est sauvegardé. Ces données représentent un volume de 500 Giga-octets annuel. La conversion en température des niveaux numériques de la caméra thermique s'effectue en post-traitement à l'aide du modèle présenté section 6.1. En première approche la distance entre les poutres et le système de mesure est fixée à 20m, la transmission optique de l'atmosphère est quant à elle calculée à chaque pas de temps à l'aide des données environnementales mesurées.

Cette section a présenté les éléments de structures utilisés et détaillé la mise en place du système de mesure sur le site d'essai de l'IFSTTAR à Bougenais. Le système étant en place depuis maintenant plus d'un an, la section suivante présente l'ensemble des données mesurées d'août 2013 à avril 2014.

7.3 Analyse de données expérimentales

7.3.1 Données thermiques et environnementales

Depuis août 2013, et jusqu'à avril 2014 neuf mois de données échantillonnées à 0,1Hz ont été acquis par le système présenté section 7.1. Une pause d'un mois a été faite en septembre 2013 pour réaliser diverses opérations de maintenance et apporter des modifications au dispositif afin d'améliorer la robustesse de l'ensemble du système. Lors de cette interruption, l'optique de la caméra infrarouge a été changée. Passage d'une focale de 10 mm à une focale de 25 mm. Ce

changement permet d'augmenter la résolution spatiale de l'image infrarouge. En contrepartie les extrémités des poutres ne sont plus incluses dans le champ de vision de la caméra. La figure 7.15 présente les images thermiques acquises pour différentes saisons, le changement de résolution dû au remplacement de l'optique est visible sur la figure.

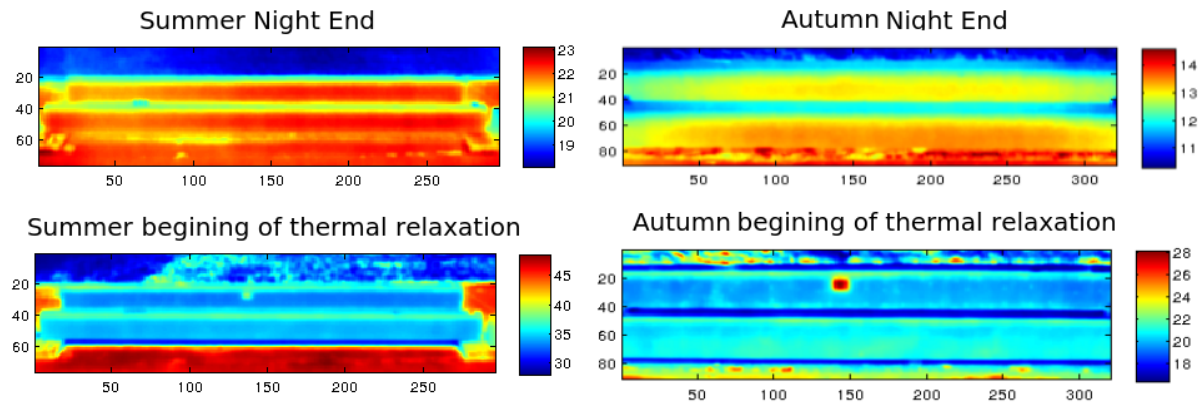


FIGURE 7.15 – Images thermiques pour différentes saisons

Au cours de ces neuf mois de fonctionnement, l'évolution du champ de températures apparentes, la température de l'air, la vitesse et la direction du vent, la pression, l'humidité relative, et les épisodes pluvieux ont été suivis. Les figures 7.16 à 7.18 présentent l'évolution au cours de l'été, l'automne et au début de l'hiver des différentes données mesurées.

En première analyse les figures 7.16 à 7.18 montrent les fortes corrélations existantes entre les paramètres environnementaux et les mesures de température par ThIr à la surface des poutres. La déclinaison saisonnière peut être observée sur les données en température.

Durant la saison chaude l'ensemble des paramètres adopte un comportement périodique, y compris le vent pour qui le réchauffement journalier de l'atmosphère fait apparaître un phénomène de transport des masses d'air (loi d'Archimède). En revanche durant les saisons plus froides, l'effet combiné de toutes les perturbations extérieures, le vent, la nébulosité, la présence d'ombre (ombre portée du bâtiment sur la structure de plus en plus importante d'octobre à décembre), de la pluie et la baisse de l'apport énergétique solaire, fait apparaître une distribution temporelle *pseudo-aléatoire* des paramètres mesurés

D'un point de vue physique et avec le retour d'expérience de l'étude menée au chapitre 6, les comportements observés ici indiquent qu'au cours d'une année une même structure peut être modélisée durant la saison chaude, par un système excité harmoniquement, et durant les saisons plus froides par un système excité presque aléatoirement. Ces observations sont importantes pour le développement de futurs modèles et méthode d'analyses.

Le système développé ici doit permettre à terme la reconstruction des propriétés thermophysiques des éléments de structures, ainsi que le suivi au cours du temps du champ de température interne [Nassiopoulos et Bourquin, 2010]. Dans le chapitre 6 cet objectif est assuré par une procédure d'estimation basée sur la minimisation d'une fonctionnelle représentant l'écart entre mesure et modèle [Beck et Arnold, 1977]. Pour que cette procédure fonctionne il faut, entre autres, que le défaut ou l'altération à caractériser affecte la mesure, en d'autres termes il est nécessaire d'avoir un contraste thermique.

Les thermogrammes moyens ($4 \times 4px$) d'une zone saine et d'une zone défectueuse mesurés au mois d'août 2013 sur la poutre endommagée, ainsi que le contraste thermique sont représentés sur la figure 7.19. Il apparaît que le haut niveau de renforcement de la poutre tend à uniformiser la distribution de la température à la surface de la poutre. Contrairement à l'étude

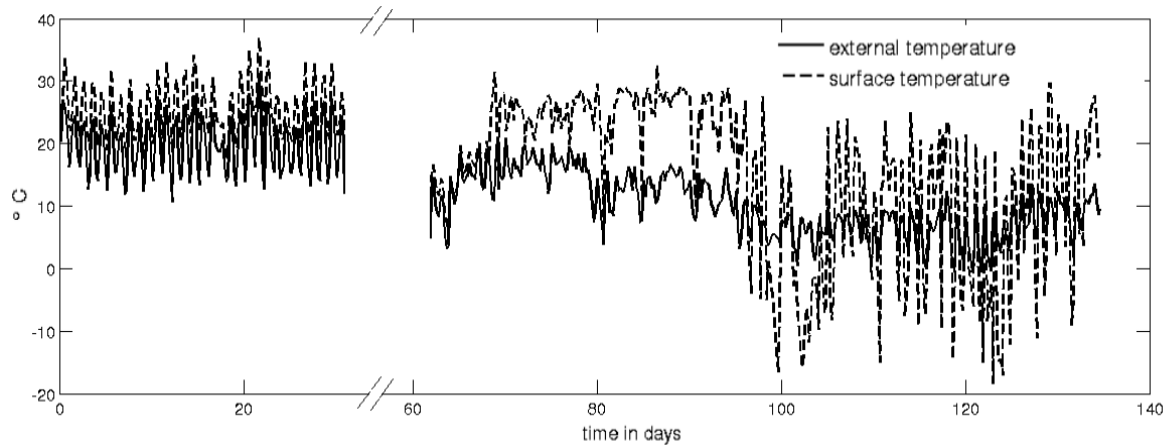


FIGURE 7.16 – Variation saisonnière de la température

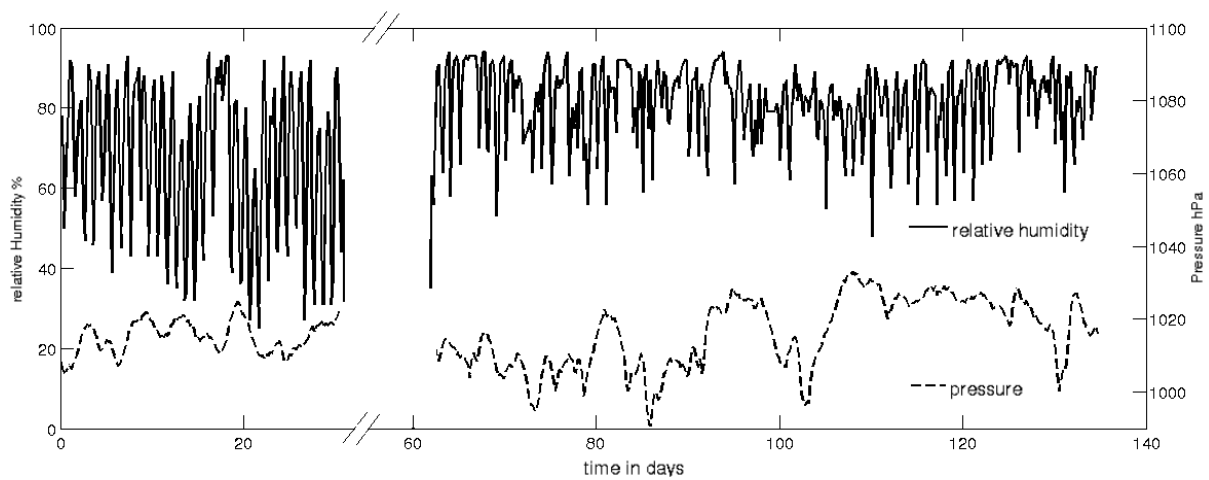


FIGURE 7.17 – Variation saisonnière de l'humidité relative et de la pression atmosphérique

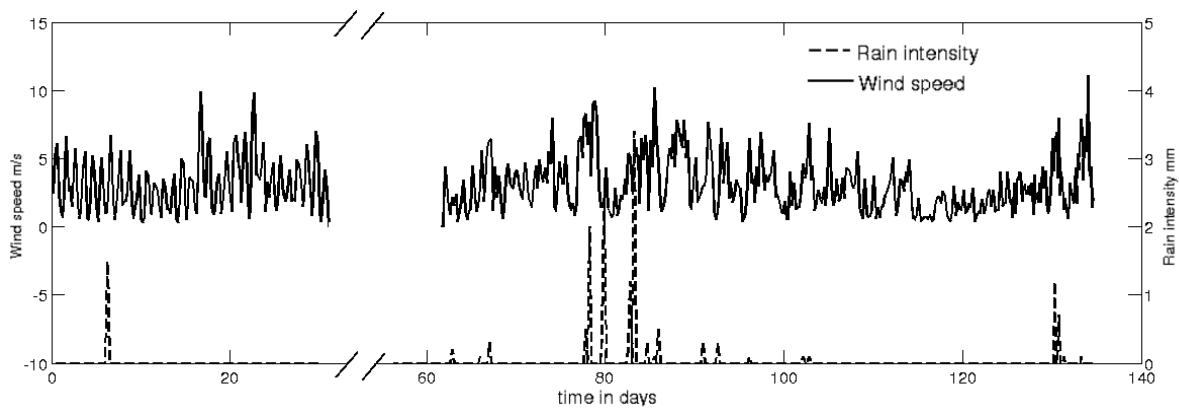


FIGURE 7.18 – Variation saisonnière du vent et événements pluvieux

précédente, où le phénomène de diffusion thermique au sein de la structure laissait émerger un contraste important, ici, la diffusion apparaît trop importante et uniforme pour générer un contraste prononcé en amplitude. Il apparaît ici que la minimisation d'une fonctionnelle *standard*, au sens des moindres carrés, pourrait conduire à une estimation paramétrique incohérente.

Il est tout de même intéressant de remarquer que même si le contraste thermique est faible, un changement dans la valeur moyenne du signal thermique tend à imprimer une valeur non

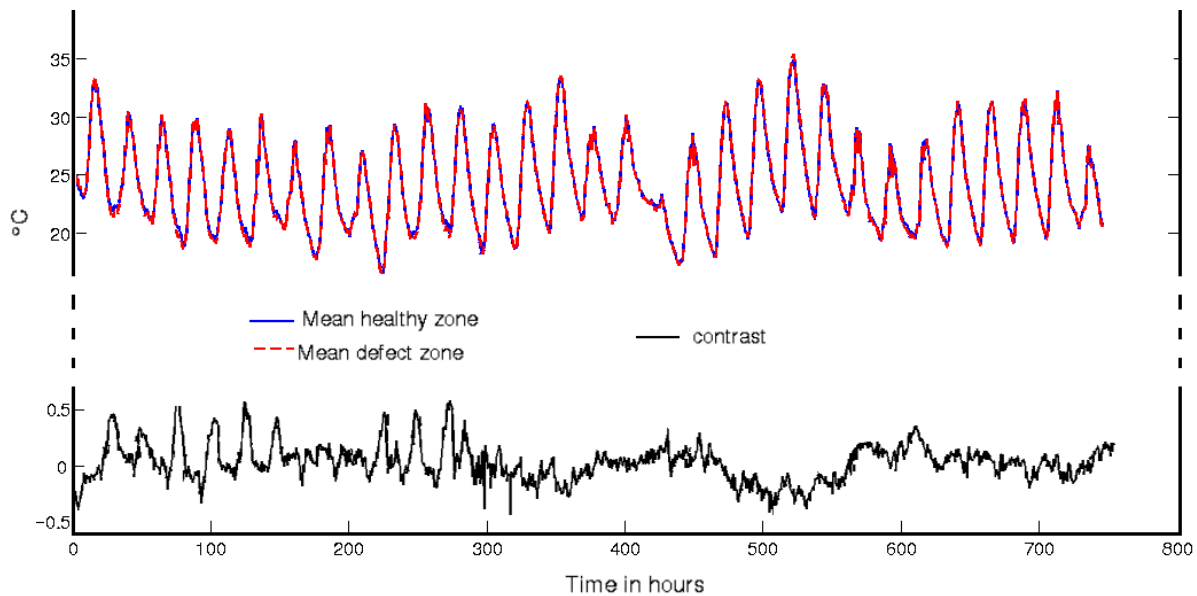


FIGURE 7.19 – Thermogrammes, zone saine et défectueuses en Août 2013

nulle au contraste thermique. Ainsi une diminution de la valeur moyenne (de l'heure 0 à la 150^{ème}) fait apparaître un comportement périodique représentatif d'un déphasage entre les thermogrammes. À l'inverse, un accroissement de la valeur moyenne (400h \rightarrow 550h) fait apparaître une décroissance dans le contraste thermique. Ces tendances observées pour de faibles valeurs absolues du contraste, montrent que la clef de l'analyse se situe dans les composantes à faibles fréquences des thermogrammes (ie variation saisonnière, semaines uniformes, etc.)

Courant 2014, le suivi des données mesurées par la caméra infrarouge a laissé entrevoir certains dysfonctionnements, en particulier des problèmes de compensation de la dérive du capteur. Ces dysfonctionnements sont observables aux environs du 120^{ème} jour de mesure, figure 7.16, ce problème a nécessité la mise en place d'une procédure de maintenance du système. Pour poursuivre les mesures, une solution temporaire a été mise en oeuvre, la camera thermique FLIR SC 325 a été remplacée par une FLIR SC 655 en bande III équipée d'une focale de 24 mm et proposant une résolution de $640 \times 480px$. Cet événement a été l'occasion de tester la flexibilité du système de mesure. Ainsi le remplacement de la caméra, effectué en quelques heures*, n'a pas impacté le reste du système (capteurs, mesures, sauvegarde, etc.). La figure 7.20 présente une image infrarouge acquise avec cette nouvelle caméra. L'évolution sur trois jours[†] d'un thermogramme moyen en surface de la poutre saine est aussi présentée.

Dans cette section les données acquises durant neuf mois d'août 2013 à avril 2014 ont été présentées. Les paramètres environnementaux et les séquences d'images infrarouges sont analysés. L'armature en acier de la structure en béton tend à uniformiser le champ de température rendant difficile la détection de la zone endommagée à l'aide du contraste thermique. Au cours de l'année 2014, des signes de dysfonctionnement de la caméra thermique ont entraîné son remplacement. La section suivante présente les données des thermocouples internes à la structure durant trois jours du 16 au 19 mai 2014.

*Le changement en lui même a été rapide, mais cette opération de maintenance a été l'occasion de vérifier la bonne marche du système

[†]Du 16 au 19 mai 2014

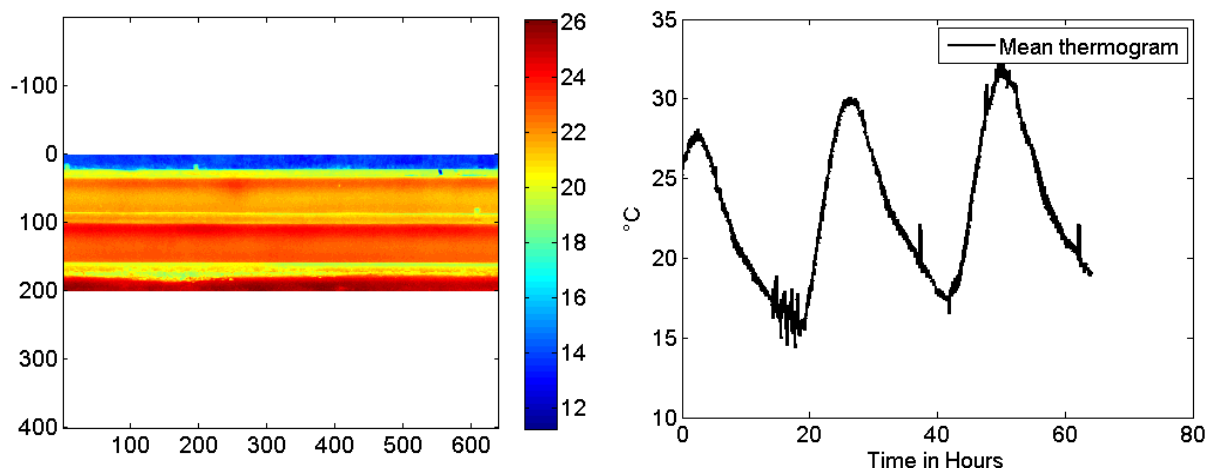


FIGURE 7.20 – Changement de caméra, image thermique à gauche et thermogramme à droite

7.3.2 Données issues des capteurs internes à la structure

En complément de l'analyse précédente, cette section présente les données acquises par les thermocouples au sein de la structure saine durant trois jours du 16 au 19 mai 2014. Ces données sont étudiées vis-à-vis des paramètres météorologiques et des mesures infrarouges. Les mesures infrarouges sont présentées figure 7.20 et les données environnementales sont présentés figure 7.21.

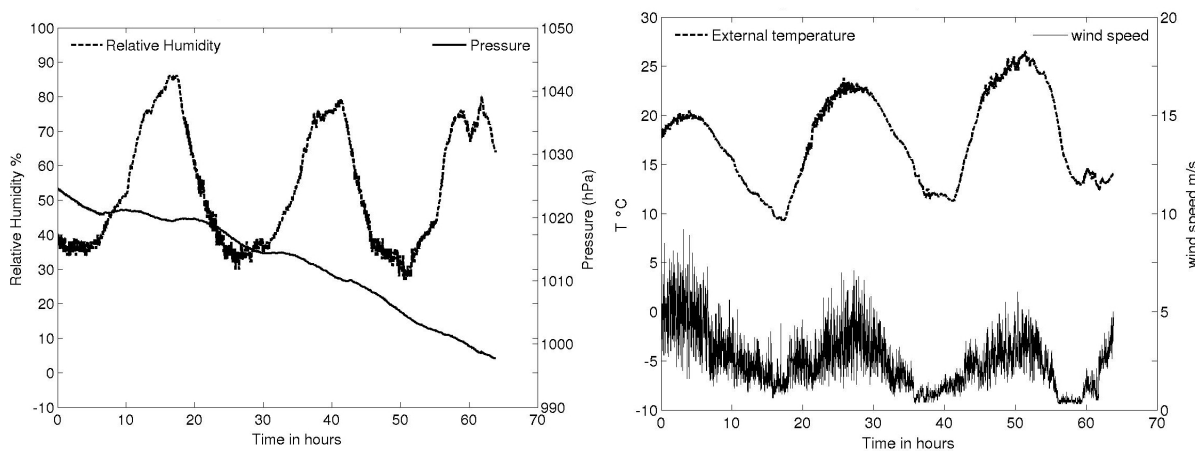


FIGURE 7.21 – Paramètres environnementaux durant trois jours

La chute de pression observée pendant ces trois jours indique que les conditions environnementales tendent à se dégrader. Néanmoins la valeur de moyenne de la température extérieure ainsi que des mesures IR augmentent.

Les thermocouples sont identifiés au sein de la structure suivant leur section, ligne et colonne (cf figure 7.5). Les thermocouples de la ligne 3 et des sections 9 et 7 sont sélectionnés pour l'étude. Situés au centre du champ de vue de la caméra thermique, ils permettent de comparer les données des thermocouples avec les mesures par ThIr. La figure 7.22 présente leur évolution sur trois jours

Ces mesures sont à comparer avec les températures de surface mesurées par ThIr, figure 7.20. Une première analyse montre que les mesures infrarouges sont cohérentes avec les évolutions mesurées par les thermocouples près de la surface considérée (colonne C_3 ligne R_3). La

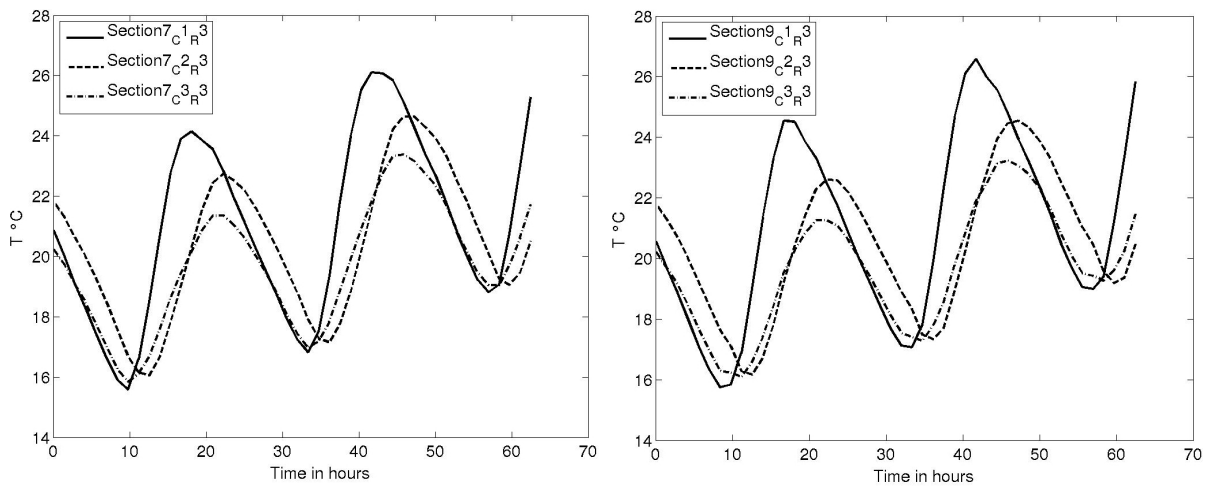


FIGURE 7.22 – Évolution des mesures de température interne durant trois jours

décroissance de l'amplitude ainsi que l'évolution du déphasage au centre de la poutre est en accord avec la théorie (cf. section 6.3) [Carslaw, et Jaeger, 1959]. Il est tout de même intéressant de remarquer que le déphasage des signaux mesurés s'inverse avec la profondeur, faisant apparaître un noyau de chaleur au sein de la structure. Cette observation indique que bien que l'apport énergétique soit en grande partie assuré par le flux solaire direct sur les faces avant et supérieure des poutres, il existe un apport en face arrière non négligeable. En supposant les conditions environnementales, à l'exception de l'apport solaire, identiques sur toutes les faces de la poutre, il est possible à l'image de la section 6.5 de reconstruire les conditions aux limites du système. La figure 7.23 présente les conditions reconstruites en face avant et arrière à l'aide du modèle de flux solaire de [Duffie et Beckman, 1991] et de la corrélation vents/coefficient d'échange de [McAdams, 1954], ces différents modèles sont détaillés dans la section 6.5.

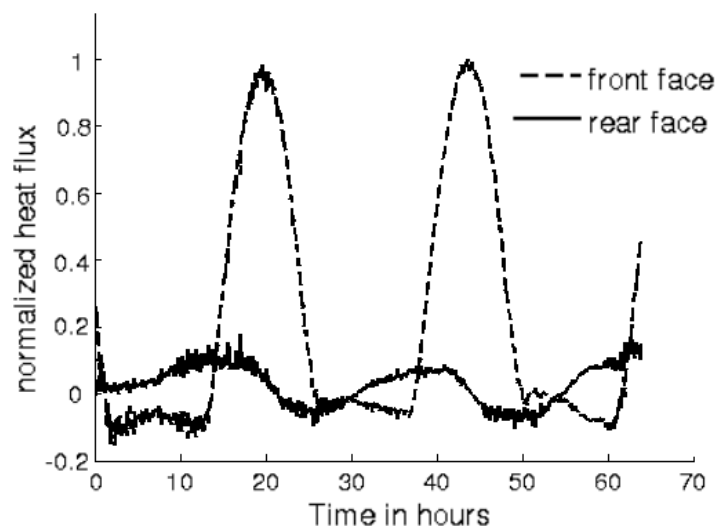


FIGURE 7.23 – Reconstruction des conditions limites du système

L'analyse de la figure 7.23 montre que, même si les contributions énergétiques en face avant sont largement prédominantes, la face arrière est elle aussi soumise à une densité de flux périodique significative. Ainsi, le système présenté apparaît toujours être en régime transitoire, et non en régime établi, même lorsque l'éclairement solaire de la structure apparaît stable.

La section suivante présente une première analyse ayant conduit à la cartographie de phase du système à l'aide de la transformée de Fourier.

7.4 Analyse qualitative

Afin d'effectuer une première analyse qualitative sur la structure, une FFT a été appliquée sur la séquence d'images thermiques acquise durant les 10 premiers jours de mesure d'août 2013.

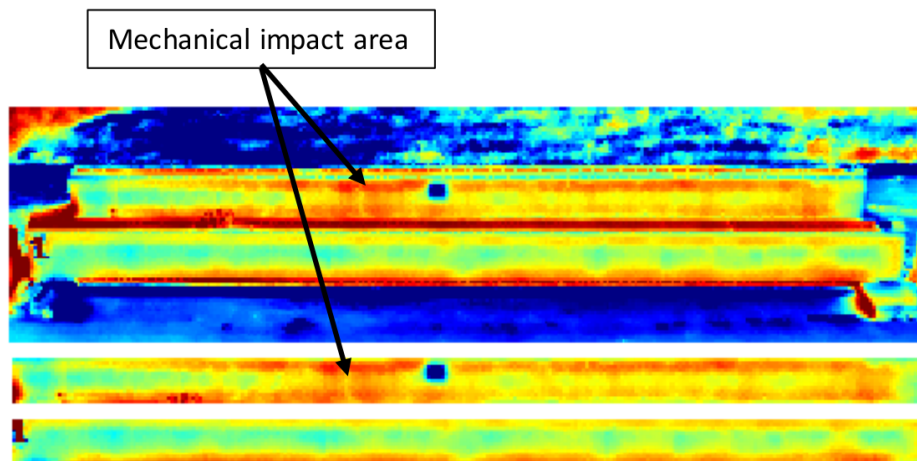


FIGURE 7.24 – Cartographie de phase de la FFT - zone d'intérêt centrée sur les poutres en bas de l'image

Le figure 7.24 présente la carte de phase obtenue après l'application de la FFT. Le carré bleu observé est dû à un marquage de référence appliqué sur la poutre endommagée. L'analyse portant sur le mois d'août 2013, la cartographie ne dispose pas d'une grande résolution spatiale, toutefois il est possible d'observer une zone particulière correspondant à la zone d'impact sur la deuxième poutre. Les valeurs de phase entre les deux poutres n'apparaissent pas identiques en zone saine, une variation locale des conditions limites ainsi que une composition différentes des deux poutres peuvent expliquer cette observation. Il est intéressant de remarquer que la carte de phase fait apparaître des séparations verticales le long des poutres. Ces séparations sont trop espacées pour être dues à l'armature métallique transversale interne aux poutres. En revanche, une variation de l'état de surface, due au coffrage utilisé combiné à l'émergence de fissures débouchantes pourrait apparaître plausible. À l'image du chapitre 6, l'analyse FFT a montré qu'un défaut ne générant qu'un faible contraste est détectable sur les cartes de phase. Il apparaît ainsi préférable d'exprimer un modèle thermique dans l'espace fréquentiel plutôt que dans l'espace temporel dans de futures travaux.

7.5 Synthèse

Résumé et principaux résultats

Ce chapitre a présenté un dispositif de mesure utilisé pour le suivi de paramètres environnementaux et l'acquisition synchronisé de séquences d'images infrarouges d'août 2013 jusqu'à aujourd'hui (août 2014). Le système développé a été rendu autonome en énergie et met en œuvre une stratégie de gestion automatique des données. Deux poutres en béton armé constituent l'objet de l'étude. La première a été instrumentée à cœur avec 48 thermocouples et 10 jauges de contrainte. La seconde a été fortement endommagée par une série d'impacts à haute

énergie réalisé sur l'un des sites d'essai de l'IFSTTAR. Les paramètres environnementaux ainsi que les séquences d'images infrarouges sont analysés sur neuf mois de mesure. Les données des thermocouples internes sont comparées aux mesures par ThIR. Un mois de mesure a été détaillé et a montré que, en raison du haut niveau de renforcement des poutres, la présence d'une zone hétérogène ne produisait qu'un faible contraste thermique. Enfin, une analyse qualitative effectuée à l'aide de la FFT a permis la détection de la zone endommagée.

Synthèse des différentes sections

La section 7.1, a détaillé l'adaptation et la mise à niveau du système IrLaW-SENSORBOX, présenté section 6.1, en vue d'une implémentation très long terme sur le site d'essai de l'IFSTTAR. Le système a été rendu autonome en énergie avec l'utilisation d'une batterie de secours. Des modules et des capteurs supplémentaires assurent la gestion automatisée de la source d'énergie ainsi que des scripts d'arrêt contrôlé du système. Le système met en œuvre également des méthodes de rapatriement sécurisé et sauvegarde des données. Enfin l'ensemble du système est asservi thermiquement afin de garantir un fonctionnement annuel.

La section 7.2 présente les éléments structurels utilisés dans l'étude ainsi que la mise en œuvre du système de surveillance sur le site de l'IFSTTAR Bouguenais. Deux poutres de béton armé de $16m \times 1m \times 0.5m$ constituent les éléments structurels utilisés, l'une de ces poutres a été instrumenté à cœur durant sa fabrication, 10 jauges de contraintes ainsi que 48 thermocouples sont présents au sein de la structure. Ces différents capteurs ont été placés de manière optimisée [Nassiopoulos et Bourquin, 2010]. La seconde poutre a été endommagée par une série d'impact à haute énergie allant de quelques kilos joules à une centaine de kilos joules. Le système de mesure présentée section 7.1 contrôle une station météo VAISALA WXT520 assurant la mesure des paramètres environnementaux, un GPS UBLOX permettant la datation des données et une caméra thermique non refroidie à matrice microbolométrique (cf chapitre 1) FLIR SC325 bande III, affichant une résolution de $320 \times 240px$. L'ensemble est cadencé à une fréquence de $0.1Hz$. Afin de protéger la caméra des agressions extérieures la caméra thermique est placée dans un caisson prévu à cet effet [VIDEOTEC, 2013]. Le système rapatriant l'ensemble des données mesurées, un volume de 500 *Giga* de données est prédit. La conversion en température des données ThIr est assurée, en pot-traitement, par le modèle présenté section 6.1, la transmission atmosphérique est calculée à chaque pas de temps en fonction des paramètres environnementaux mesurés et la distance capteur poutre est fixée à $20m$.

La section 7.3.1 présente l'analyse des données environnementale et ThIr acquises entre août 2013 et avril 2014. Une pause d'un mois a été faite en septembre pour diverses opérations de maintenance ayant conduit à l'amélioration de la robustesse de l'ensemble du système. Au cours de ces neuf mois de fonctionnement, les images thermiques, la température de l'air, la vitesse du vent, la pression, l'humidité relative, et les épisodes pluvieux ont été mesurés. L'évolution temporelle de ces différents paramètres fait apparaître de fortes corrélations entre les paramètres environnementaux et les mesures de température par ThIr à la surface des poutres. La déclinaison saisonnière peut être observée sur les données en température. Durant la saison chaude l'ensemble des paramètres adopte un comportement périodique, y compris le vent pour qui le réchauffement journalier de l'atmosphère fait apparaître un phénomène de transport des masses d'air (loi d'Archimède). En revanche durant les saisons plus froides, les effets de toutes les perturbations extérieures, le vent, la nébulosité, l'évolution de l'ombre portée du bâtiment, de la pluie et de la baisse de l'apport énergétique solaire combinée font apparaître une distribution temporelle *pseudo-aléatoire* des paramètres mesurés. Ainsi au cours d'une année une

même structure peut être modélisée par un système excité harmoniquement durant la saison chaude, et durant les saisons plus froides par un système excité presque aléatoirement. Ces observations sont importantes pour le développement de futurs modèles ou processus d'analyses. Le haut niveau de renforcement des poutres tend à uniformiser la distribution de la température, la diffusion apparaît trop importante et uniforme pour générer un contraste entre les zones saines et défectueuses suffisant. Il apparaît ici que la minimisation d'une fonctionnelle au sens des moindres carrés [Beck et Arnold, 1977], pourrait conduire à une estimation paramétrique incohérente.

Début 2014, les données mesurées par la caméra infrarouge ont laissé apparaître certains dysfonctionnements, en particulier la mauvaise compensation de la dérive du capteur. Ce problème a nécessité la mise en place d'une procédure de maintenance du système. Pour poursuivre les mesures, une solution temporaire a été trouvée, la caméra thermique FLIR SC 325 a été remplacée par une FLIR SC 655 en bande III équipée d'une focale de 24 mm et proposant une résolution de $640 \times 480px$. Cet événement malheureux a été l'occasion de tester la flexibilité du système de mesure.

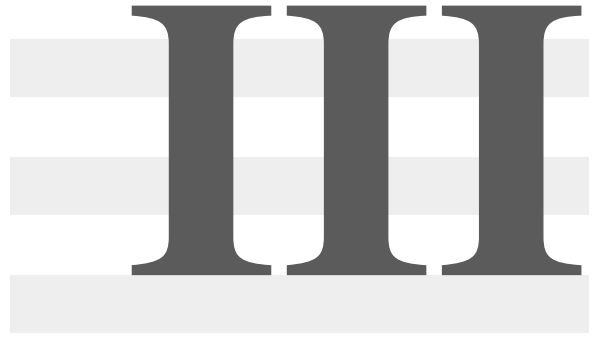
En complément de l'étude précédente, la section 7.3.2 présente les données acquises par les thermocouples au sein de la structure saine durant trois jours du 16 au 19 mai 2014. Ces données sont étudiées vis-à-vis des paramètres météorologiques et infrarouges. Une première analyse montre que les mesures infrarouges sont cohérentes avec les évolutions mesurées par thermocouples près de la surface de la poutre saine. La décroissance de l'amplitude ainsi que l'évolution du déphasage au centre de la poutre est en accord avec la théorie [Carslaw et Jaeger, 1959]. Il est tout de même intéressant de remarquer que le déphasage des signaux mesurés s'inverse avec la profondeur, faisant apparaître un noyau de chaleur au sein de la structure. Cette observation indique, bien que l'apport énergétique ne soit en grande partie assuré par le flux solaire direct sur les faces avant et supérieures des poutres, qu'il existe un apport en face arrière non négligeable. Les conditions aux limites du système reconstruites en face avant et arrière [McAdams, 1954, Duffie et Beckman, 1991] montrent que, même si les contributions énergétiques en face avant sont largement prédominantes, la face arrière est elle aussi soumise à une densité de flux périodique significative. Le système apparaît toujours être en régime transitoire, et non en régime établi, même lorsque l'éclairement solaire de la structure apparaît stable.

La section 7.4 présente une première analyse qualitative sur la structure. Les cartes de phases obtenues par l'application de la FFT sur les mesures ThIr des 10 premiers jours d'août sont présentées. L'analyse portant sur le mois d'août 2013, la cartographie ne dispose pas d'une grande résolution spatiale ceci n'empêche par la détection de l'endommagement de la deuxième poutre. Les valeurs de phase entre les deux poutres n'apparaissent pas identiques en zone saine, la distance fixe utilisée pour la conversion en température ainsi que l'impact des conditions de fabrication sont des pistes pour expliquer ce phénomène. Il est intéressant de remarquer que la carte de phase fait apparaître des séparations verticales le long des poutres. Ces séparations sont trop rapprochées pour être dues à l'armature métallique interne aux poutres. Une étude plus poussée serait nécessaire pour expliquer cet effet de compartimentation.

Conclusion et perspectives

Cette étude a montré que l'architecture du système de surveillance thermique était capable d'assurer la mesure de paramètres environnementaux et infrarouges sur de très longue période. Les différentes opérations de maintenances effectuées au cours de l'année de mesure n'ont pas perturbé la bonne marche du système. Les mesures dans l'infrarouge et météorologiques ont

conduit à montrer la corrélation qui existe entre la température et les conditions extérieures. En outre, deux comportements thermiques différents ont été identifiés. La première correspond à un système excité harmoniquement, le second à un système *pseudo-aléatoire*. Un mois de mesure a été détaillé et a montré que, dû au haut niveau de renforcement des poutres, la présence d'une zone hétérogène ne produisait qu'un faible contraste thermique. Une analyse par FFT a par contre mis en évidence le défaut. Ainsi, une procédure d'estimation développée dans le but de fournir des informations quantitatives sur la structure devra être formulée préférentiellement dans l'espace fréquentiel. De plus, il serait intéressant d'analyser des formulations alternatives de fonctionnelles, qui une fois minimisées permettrait la caractérisation de zones hétérogènes produisant un faible contraste. Dans un premier temps, l'utilisation de la méthode présentée dans le chapitre 3 sur les données infrarouges devra être analysée, et afin de gérer le volume conséquent de données acquises durant un an, une approche *bibliothèque de modèles* pouvant être appliqués à la volée apparaît nécessaire (cf section 6.1). Enfin la confrontation de la méthode infrarouge avec des méthodes utilisant des thermocouples internes pour reconstruire champ interne de température [Nassiopoulos et Bourquin, 2010] apparaît justifiée.



Conclusion

Conclusion Générale

Ces travaux de thèse intitulés *Contribution au développement d'outils d'analyse de séquences d'images infrarouges : application au contrôle non destructif de structures de Génie civil* ont présenté trois ans d'études et analyses ayant pour fil conducteur la caractérisation de systèmes complexes à l'aide de mesures réalisées par thermographie infrarouge. Ce manuscrit se divise en deux parties principales correspondant aux échelles de temps et d'espace du contrôle non destructif à proprement dit. Ainsi, la partie **I** présente des développements permettant le diagnostic *post-endommagement* de structures béton réparées par une technique de collage de composites. Ce diagnostic s'effectue sur une zone localisée de l'ouvrage (échelles centimétriques à métriques), sur un court laps de temps (de l'ordre de la minute) et à l'aide de méthodes d'excitations thermiques contrôlées. Les procédures développées permettent le contrôle non destructif quantitatif de systèmes multi-couches épais. La partie **II** s'intéresse au développement de système permettant le suivi *pré-endommagement* des structures, et dans le cadre de cette thèse, la surveillance thermique long terme. Ce type de surveillance s'effectue sur l'ensemble de la structure (échelle multi-métrique) durant une longue période de mesure (échelles journalières à annuelles) et requiert le suivi des perturbations environnementales. Cette conclusion générale reprend les conclusions et perspectives de chaque chapitre développé dans ce manuscrit, avant de détailler les perspectives générales.

Dans un premier temps, l'introduction générale rappelle les motivations premières des travaux conduits dans le cadre de cette thèse. À savoir la nécessité du contrôle non destructif des infrastructures routières, dû au vieillissement du parc et à l'augmentation du trafic durant les dernières décennies. L'utilisation de la thermographie infrarouge active comme seule méthode de mesure est motivée par la récente diffusion de solutions ThIr à un large public, rendant accessibles et abordables des caméras disposant de capteurs haute sensibilité et d'une résolution accrue. Outre la possibilité de détection de défaut, la ThIr offre l'opportunité d'appliquer un modèle physique à chaque pixel de la séquence d'images thermiques, et donc de fournir des informations qualitatives et quantitatives sur le système étudié.

La partie **I** composée des chapitres **1** à **4** présente le développement de méthodes d'évaluation non destructive quantitative de structures réparées par collage composite.

Dans le chapitre **1**, les principes de la thermographie infrarouge comme méthode de mesure ont été rappelés. Les principales grandeurs définissant le rayonnement thermique des corps ont été présentées et une introduction à la mesure du rayonnement permettant de remonter à la température d'un objet est proposée. Les travaux de thèse s'intéressant au contrôle de matériaux opaques, les principes fondamentaux du transfert de chaleur par conduction au sein des corps ont été rappelés, et un état de l'art des méthodes de contrôle non destructif par thermographie infrarouge a été présenté.

Le chapitre **2** détaille une étude ayant conduit au développement d'une procédure d'estimation des paramètres d'un système multi-couches épais permettant, à partir d'une séquence

d'images infrarouges, le calcul de cartes de propriétés thermophysiques d'une structure de génie civil réparée par collage composite. L'étude présente le développement d'un modèle quadripolaire multi-couches et propose son analyse. Les techniques d'inversion de modèle pour la caractérisation de système sont détaillées, puis la procédure d'estimation paramétrique développée est appliquée à des simulations numériques et différents échantillons de laboratoire, permettant ainsi la cartographie des propriétés thermophysiques du système considéré. La procédure développée n'utilise qu'un seul modèle pour caractériser à la fois les zones saines et les zones défectueuses. La méthode étant unidimensionnelle, elle permet l'application de la procédure d'estimation indépendamment à chaque pixel de la séquence d'images infrarouges, mais fait apparaître des comportements singuliers dans la caractérisation de défauts présentant des ratios d'effusivités faibles et unitaires.

Dans le but de proposer une boîte à outils de méthodes élargissant les possibilités de diagnostic, le chapitre 3 présente le développement d'une méthode bidimensionnelle permettant l'estimation de nappes de propriétés spatiales. Basée sur un modèle direct résolu par éléments finis, une procédure d'estimation paramétrique utilisant la méthode de l'état adjoint est analysée et détaillée. Cette procédure permet la caractérisation des champs de conductivité et capacité thermique ainsi que l'estimation du volume défectueux pour les défauts présentant des ratios d'effusivités unitaires. En revanche, les autres types de défauts traités présentent des résultats moins performants. Pour finir, une analyse paramétrique sur la forme du défaut est proposée. Elle fait apparaître la nécessité d'utiliser une méthode de dimensionnement du temps de chauffe pour la caractérisation de système épais.

Le chapitre 4 présente une discussion sur l'optimalité du temps de chauffe pour le diagnostic de systèmes épais. L'étude est axée sur un modèle quadripolaire multi-couches et détaille le développement d'un indicateur permettant la définition d'un temps de chauffe résultant du compromis entre détectabilité et comportement dynamique du défaut. Le temps de chauffe dimensionné à l'aide de l'indicateur apparaît fortement lié à la géométrie du système étudié. Une analyse de sensibilité indique que le temps de chauffe *optimal* tend à maximiser la sensibilité aux paramètres du système. Enfin l'étude de l'évolution de l'erreur relative d'estimation ainsi que de l'écart type de l'estimateur des paramètres en fonction du temps de chauffe, montre qu'à défaut d'être *optimal*, le temps de chauffe obtenu avec l'indicateur développé est le temps à partir duquel l'erreur relative et l'écart type de l'estimateur des paramètres tendent à être minimisés.

La partie II composée des chapitres 5 à 7 présente le développement d'un système de surveillance thermique, et détaille son implémentation sur différentes structures.

Le chapitre 5 introduit la notion de *Structural health monitoring* des structures de génie civil. Apparu avec l'avènement des technologies de l'information et de la communication (TIC/N-TIC), le *Structural health monitoring*, ou suivi structurel, est un concept théorique et technologique défini comme une extension des méthodes de contrôle et évaluation non destructives. Une stratégie de SHM intègre les méthodes classiques de CND au sein de systèmes d'informations complets. Ce type de système est défini d'une part par le phénomène physique observé, et d'autre part par le système lui-même. Potentiellement, une telle architecture peut être développée afin de prédire le vieillissement de la structure. Un état de l'art est proposé sur les architectures de SHM implémentant la mesure par thermographie infrarouge, comme une des composantes du système.

Le chapitre 6 présente une étude permettant la caractérisation de la structure interne de structure de génie civil. Le développement d'un système complet de mesure y est détaillé. Appelé IrLaW-SENSORBOX, le système est capable de piloter un ensemble de caméras thermiques et d'effectuer un certain nombre de corrections de mesure en temps réel à l'aide de technologies *GPGPU*. Disposant d'une forte connectivité, le système assure la gestion de nombreux cap-

teurs (météo, GPS, etc..) et implémente des canaux de communication indépendants respectant les principes de SOA/WOA défini par le W3C. Une première étude sur la conception d'une bibliothèque de modèles physiques est présentée. Les méthodes de reconstruction de conditions limites en environnement naturel sont détaillées. Une procédure d'estimation issue des travaux de la partie I, et basée sur une modélisation quadripolaire fréquentielle est présentée. Elle permet, à travers trois jours de mesure, l'établissement d'une cartographie des propriétés thermophysiques de la structure interne d'un tablier de pont ouvert au trafic. Une analyse FFT de la séquence d'images infrarouges et des autres données acquises a montré l'indépendance de la phase et de l'amplitude à certains paramètres, indiquant que la définition d'une procédure d'estimation dans le domaine fréquentiel apparaît justifiée. La validité de l'hypothèse de périodicité est discutée. Enfin, le système conçu, qui a fait ses preuves, présente une architecture monolithique qui est un frein à son évolution. La refonte d'un tel système en suivant certaines règles d'architecture logiciel, permettrait la compartimentation du système et faciliterait le travail de maintenance et de mise à niveau.

Le chapitre 7, dernier du manuscrit, présente un essai de surveillance thermique (sur un an) d'éléments de génie civil. Le système introduit dans le chapitre 6 est adapté et mis à niveau. Il a été rendu autonome en énergie et implémente une stratégie de gestion automatique des données. Deux poutres en béton armé constituent l'objet de l'étude, la première a été instrumentée à cœur avec 48 thermocouples et 10 jauges de déformation, la seconde a été fortement endommagée pour une série d'impacts à haute énergie réalisée sur l'un des sites d'essai de l'IFSTTAR. Les paramètres environnementaux ainsi que les séquences d'images infrarouges sont analysés sur neuf mois de mesure, et les données des thermocouples internes sont comparées aux mesures par ThIR. Durant la saison chaude, l'ensemble des paramètres adopte un comportement périodique, en revanche durant les saisons plus froides, les effets de toutes les perturbations extérieures font apparaître une distribution temporelle *pseudo-aléatoire* des paramètres mesurés. Par ailleurs, le haut niveau de renforcement des poutres tend à uniformiser la distribution de la température, le contraste thermique entre les zones saines et défectueuses n'apparaît alors pas suffisant pour détecter les hétérogénéités. L'analyse des données issues des thermocouples internes fait apparaître un noyau de chaleur au sein de la structure. Cette observation indique, qu'il existe un apport énergétique en face arrière des poutres non négligeable à certains moments de l'année. Les cartes de phases obtenues par calcul de la transformée de Fourier sur 10 jours de mesures, permettent la détection de l'endommagement de la deuxième poutre, indiquant qu'une procédure d'estimation développée dans le but de fournir des informations quantitatives sur la structure devra être formulée préférentiellement dans l'espace fréquentiel. La confrontation de la méthode infrarouge avec des méthodes utilisant des thermocouples pour reconstruire le champ interne de température reste à étudier.

Ces travaux de thèse ont permis d'étudier différentes méthodes d'exploitation de séquences d'images infrarouge acquises sur des structures de Génie civil en vue de leur contrôle.

La partie I a conduit au développement d'un ensemble de méthodes permettant la caractérisation de multi-couches épais et propose une discussion sur l'optimalité de temps de chauffe pour ce type de diagnostic. La partie II a détaillé la conception et l'utilisation d'une architecture de mesure par thermographie infrarouge dédiée à la surveillance long terme des ouvrages d'art, suite à ces travaux différentes perspectives peuvent être énoncées. La démocratisation de solutions logicielles et hardware pour le calcul scientifique (*GPGPU*) devrait permettre des réductions significatives du temps de calcul et amener à la diffusion au plus grand nombre des méthodes de diagnostics développées dans ce manuscrit. La partie I met en évidence la difficulté de caractérisation de matériaux présentant un faible ratio d'effusivité, une étude sur la formulation de modèles ainsi que sur la définition de connaissance *a priori* permettant la carac-

térisation de tels matériaux apparaît justifiée. Un approfondissement de l'analyse sur l'optimalité du temps de chauffe, au cœur de bien des études, est nécessaire pour définir les conditions optimales d'expérience *in situ*, tout comme le développement de méthodes permettant la diminution de l'impact de l'état de surface du système contrôlé. Pour les structures soumises aux aléas climatiques, l'étude de modèles inverses permettant la caractérisation de système à faible contraste thermique semble être la prochaine étape. La définition d'un système de mesure modulaire multi-approches, suivant le principe de capteurs-modèles s'avère aussi nécessaire à la vue du large volume de données traitées dans ce type de système. Enfin l'unification des formats d'échange et d'enregistrement des données infrarouges permettraient la mutualisation des moyens de diagnostic, aussi bien en laboratoire que *in situ*.

Il est temps maintenant de conclure ces travaux de recherches. Les principes de CND et de SHM appliqués aux structures de génie civil sont vastes et fortement corrélés. Ces domaines de recherche sont propices à l'épanouissement de la curiosité scientifique, et gratifiants lorsqu'ils sont appliqués à garantir la sécurité des usagers.

Antoine

Bibliographie

- [52north, 2004] 52NORTH (2004). <http://52north.org/> (consulté aout 2014). *52 North Website*.
- [Abdulhay *et al.*, 2011] ABDULHAY, B., BOUROUGA, B. et B, C. D. (2011). Experimental and theoretical study of thermal aspects of the hot stamping process. *Applied Thermal Engineering*, 31:674–685.
- [Aci, 2008] ACI (2008). Guide for the design and construction of externally bonded systems for strengthening concrete structures. Rapport technique 440.2R02-08, American Concrete Institute, Michigan, U.S.A.
- [Afgc, 2011] AFGC (2011). Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites – recommandations provisoires. Rapport technique, Bulletin scientifique et technique de l’AFGC.
- [Almond. et Pickering, 2012] ALMOND., D. P. et PICKERING, S. G. (2012). An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit doi : 10.1063/1.4704684. *Journal of Applied Physics*, 111:063510.
- [Anderson *et al.*, 1999] ANDERSON, E and Bai, Z., BISCHOF, C., BLACKFORD, S., DEMMEL, J., DONGARRA, J., DU CROZ, J., GREENBAUM, A., HAMMARLING, S., MCKENNEY, A. et SORENSEN, D. (1999). *LAPACK Users’ Guide (Third ed.)*. Philadelphia, PA : Society for Industrial and Applied Mathematics. ISBN 0-89871-447-8.
- [Anscombe, 1973] ANSCOMBE, F. (1973). Graphs in statistical analysis. *American Statistician*, 27:17–21.
- [Araki *et al.*, 1992] ARAKI, N., MAKINO, A., ISHIGURO, T. et MIHARA, J. (1992). An analytical solution of temperature response in multilayered materials for transient methods. *International Journal of Thermophysics*, 13:515–538.
- [Argenti *et al.*, 2012] ARGENTI, M., GIANNINI, V., AVERTY, R., BIGAGLI, L. et DUMOULIN, J. (2012). Istim integrated system for transport infrastructures surveillance and monitoring by electromagnetic sensing. *In European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2012, Vienne Autriche*.
- [Ashby, 2004] ASHBY, M, F. (2004). *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth-Heinemann.
- [Autrique et Perez, 2011] AUTRIQUE, L. et PEREZ, L. (2011). Etude de faisabilité et conception optimale d’un banc expérimental dédié à l’identification de la diffusivité thermique de liquides. *In 3ème Journées Identification et Modélisation Expérimentale de Douai*.

- [Autrique *et al.*, 2009] AUTRIQUE, L., PEREZ, L. et SCHEER, E. (2009). On the use of periodic photothermal methods for materials diagnosis. *Sensors and Actuators B*, 135:478–487.
- [Autrique *et al.*, 2007] AUTRIQUE, L., PEREZ, L. et SERRA, J.-J. (2007). Finite element modelling for micro-scale thermal investigations using photo-thermal microscopy data inversion. *Measurement science and technology*, 18:1–11.
- [Averty, 2011] AVERTY, R. (2011). Interopérabilité d'un ensemble de capteurs intelligents sur un réseau wan et lan : Application à un dispositif de mesure par thermographie infrarouge (rapport de stage). Rapport technique, IFSTTAR - EPSI Nantes.
- [Balageas *et al.*, 2006] BALAGEAS, D., FRITZEN, C. et GUEMES, A. (2006). *Structural Health Monitoring*. WILEY.
- [Balageas et Roche, 2014] BALAGEAS, D. et ROCHE, J.-M. (2014). Common tools for quantitative pulse and step-heating thermography part i : theoretical basis. In *QIRT 2014 - Bordeaux - France*.
- [Balageas *et al.*, 1987] BALAGEAS, D. L., DEOM, A. et BOESCHER, D. M. (1987). Characterization and nondestructive testing of carbon-epoxy composites by a pulsed photothermal method. *Journal of material evaluation*, 45:465–466.
- [Banks et Kunisch, 1989] BANKS, H. T. et KUNISCH, K. (1989). *Estimation techniques for distributed parameter systems*. Birkhauser Boston.
- [Beck et Arnold, 1977] BECK, J. et ARNOLD, K. (1977). *Parameter estimation in engineering and science*. Wiley New York (NY).
- [Belevitch, 1962] BELEVITCH, V. (1962). Summary of the history of circuit theory doi :10.1109/jrproc.1962.288301. *Proceedings of the IRE (IEEE)*, 50:848–855.
- [Bendada *et al.*, 1998] BENDADA, A., MAILLET, D., BATSALE, J.-C. et DEGIOVANI, A. (1998). Reconstruction of non uniform interface thermal résistance by inverse conduction. *Inverse Problems in Engineering*, 6:79–123.
- [Bertrand, 1878] BERTRAND, J. (1878). Sur l'homogénéité dans les formules de physique. *Comptes rendus de l'academie des sciences*, 86:916–920.
- [Bord et Mugg, 2005] BORD, L.-J. et MUGG, J.-P. (2005). *L'arc des steppes : étude historique et technique de l'archerie des peuples nomades d'Eurasie*. Le gerfaut.
- [Bosc *et al.*, 2001] BOSC, J. L., CHAUVEAU, J. M. et BERNARD MARREY, J. D. (2001). *Joseph Monier et la naissance du ciment armé*. DU LINTEAU.
- [Brachelet *et al.*, 2014] BRACHELET, F., KEO, S., DEFER, D. et BEREABAN, F. (2014). Detection of reinforcement bars in concrete slab by infrared thermography and microwaves excitation. In *QIRT 2014 Bordeaux France*.
- [Brezis, 2008] BREZIS, H. (2008). *Analyse fonctionnelle*. Dunod.
- [Briane et Pagès, 2006] BRIANE, M. et PAGÈS, G. (2006). *Théorie de l'intégration*. Vuibert.
- [Brouns, 2014] BROUNS, J. (2014). *Développement d'outils numériques pour les audits énergétiques des bâtiments*. Thèse de doctorat, IFSTTAR - PRESS Paris Est.

- [Brouns *et al.*, 2014] BROUNS, J., CRINIÈRE, A., DUMOULIN, J., PEREZ, L. et BOURQUIN, F. (2014). Diagnostic de structures de génie civil : Identification des propriétés spatiales et de la surface d'un défaut. *In Société française de thermique 2014 Lyon France*.
- [Buckingham, 1914] BUCKINGHAM, E. (1914). On physically similar systems. illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review*, 4:345–376.
- [Busse, 1980] BUSSE, G. (1980). Photothermal transmission probing of a metal. *Infrared Physics*, 20:419–422.
- [Butterworth, 1930] BUTTERWORTH, S. (1930). On the theory of filter amplifiers. *Wireless Engineer*, 7:536–541.
- [Büyükoztürk et Tzu-Yang, 2006] BÜYÜKÖZTÜRK, O. et TZU-YANG, Y. (2006). Understanding and assessment of debonding failures in frp-concrete systems. *In Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, Turkey*.
- [Candore *et al.*, 2006] CANDORE, J., SZATANIK, G., BODNAR, J., DETALLE, V. et GROSSEL, P. (2006). Infra-red photothermal thermography : A tool of assistance for the restoration of murals paintings ? *In QIRT2006 Italie*.
- [Capomolla, 2006] CAPOMOLLA, R. (2006). Il ponte sul basento di sergio musmeci. il progetto della forma strutturale prima dell'avvento del calcolo automatico <http://www.aising.it/docs/atticonvegno/p1143-1152.pdf> (consulté aout 2014). *In Atti del Primo Convegno Nazionale di Storia dell'Ingegneria*, pages 1143–1152.
- [CARMA, 2006] CARMA (2006). *Glossaire des matériaux composites*. Centre d'Animation Regional en Matériaux Avancés (CARMA).
- [Carslaw. et Jaeger, 1959] CARSLAW., H. et JAEGER, J. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. Oxford press.
- [Catapano *et al.*, 2012] CATAPANO, I., DI NAPOLI, R., SOLDVIERI, F., BAVUSI, M., LOPERTE, A. et DUMOULIN, J. (2012). Structural monitoring via microwave tomography-enhanced gpr : the montagnole test site. *Journal of Geophysics and Engineering* doi :10.1088/1742-2132/9/4/S100, 9:100–107.
- [Cauchy, 1847] CAUCHY, A. (1847). Méthode générale pour la résolution des systèmes d'équations simultanées. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 25:536–538.
- [CGDD, 2012] CGDD (2012). Commissariat général au développement durable : La circulation routière augmente à un rythme ralenti depuis 2003. *Le point sur*, 118:1–4.
- [Chang, 1997] CHANG, F. (1997). Structural health monitoring : A summary report on the first stanford workshop on structural health monitoring. *In Stanford Workshop on Structural Health Monitoring*.
- [Chavent, 2009] CHAVENT, G. (2009). *Nonlinear least squares for inverse problems. Theoretical foundations and step-by-step guide for applications*. Springer-Verlag.
- [Chen *et al.*, 2014] CHEN, B., WANG, X., SUN, D. et XIE, X. (2014). Integrated system of structural health monitoring and intelligent management for a cable-stayed bridge. *The Scientific World Journal*, 2014:12 pages.

- [Ciarlet, 2006] CIARLET, P. G. (2006). *Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation*. Dunod.
- [Cielo *et al.*, 1987] CIELO, P., MALDAGUE, X., DEOM, A. et LEWAK, R. (1987). Thermographic nondestructive evaluation of industrial materials and structures. *Material Evaluation*, 45:452–560.
- [Clarck *et al.*, 2003] CLARCK, M., MCCANN, D.-M. et FORDE, M.-C. (2003). Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT&E International*, 36:265–275.
- [Coles et Murio, 2001] COLES, C. et MURIO, D. A. (2001). Simultaneous space diffusivity and source term reconstruction in 2D IHCP. *International Journal of Computers and Mathematics with Applications*, 42:1549–1564.
- [Cooley et Tukey, 1965] COOLEY, J. W. et TUKEY, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computation*, 19:297–301.
- [Cooper, 1969] COOPER, P. (1969). Solar geometry for fixed and tracking surfaces. *Solar energy*, 34.
- [Crinière *et al.*, 2014a] CRINIÈRE, A., DUMOULIN, J., IBARRA-CASTANEDO, C. et MALDAGUE, X. (2014a). Inverse model for defect characterisation of externally glued cfrp on reinforced concrete structures : comparative study of square pulsed and pulsed thermography. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 11:84–114.
- [Crinière *et al.*, 2012] CRINIÈRE, A., DUMOULIN, J., IBARRA-CASTANEDO, C., THEROUX, L.-D. et MALDAGUE, X. (2012). Comparison between spt and pt for defect characterization of cfrp plates glued on concrete or wood structures using optical active infrared thermography. In *QIRT2012 Naples (Italie)*.
- [Crinière *et al.*, 2014b] CRINIÈRE, A., DUMOULIN, J., MANCEAUX, J.-L., PEREZ, L. et BOURQUIN, F. (2014b). Multi-sensing system for outdoor thermal monitoring : Application to large scale civil engineering components. In *European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2014, Vienne Autriche*.
- [Crinière *et al.*, 2013] CRINIÈRE, A., DUMOULIN, J., PEREZ, L. et BOURQUIN, F. (2013). Thermographie infrarouge synchronisée avec la mesure de paramètres météorologiques : Application à l'auscultation du tablier d'un pont ouvert au trafic. In *SFT 2013 Gerardmer France*.
- [Crinière *et al.*, 2014c] CRINIÈRE, A., DUMOULIN, J., PEREZ, L. et BOURQUIN, F. (2014c). Civil engineering structure daily monitored through ir thermography and environmental measurement. In *QIRT 2014 Bordeaux France*.
- [Czarnetzki et Roetzel, 1995] CZARNETZKI, W. et ROETZEL, W. (1995). Temperature oscillation techniques for simultaneous measurement of thermal diffusivity and conductivity. *International Journal of Thermophysic*, 16:413–422.
- [Dabrowski *et al.*, 2008] DABROWSKI, M., KROTKIEWSKI, M. et SCHMID, D.-W. (2008). Milamin : Matlab-based finite element method solver for large problems. *Geochem. Geophys. Geosyst*, 9:Q04030.

- [Davies et Martin, 1979] DAVIES, B. et MARTIN, H. (1979). Numérical inversion of the laplace transform : a survey and comarison methods. *Journal of Computational Physics*, 33.
- [Davies, 2007] DAVIES, E. (2007). *Conduction and Induction Heating*. IET Power Engineering Series 11 (Ré-édition).
- [De Vriendt, 1984] DE VRIENDT, A.-B. (1984). *La transmission de la chaleur, Volume II : Introduction au rayonnement thermique*. Gaëtan Morin.
- [Degiovani, 1986] DEGIOVANI, A. (1986). Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode « flash ». *Revue Phys. Appl.*, 21:229–237.
- [Dehoog *et al.*, 1982] DEHOOG, F. R., KNIGHT, J. H. et STOKES, A. N. (1982). An improved method for numerical inversion of laplace transforms. *SIAM Sci Stat Comput*, 3:357–366.
- [Delhumeau, 1999] DELHUMEAU, G. (1999). *L'invention du beton arme. hennebique, 1890-1914*. NORMA.
- [Duffie et Beckman, 1991] DUFFIE, J. A. et BECKMAN, W. A. (1991). *Solar engineering of thermal process*. John Wiley And Sons.
- [Dumoulin, 2013] DUMOULIN, J. (2013). Thermal monitoring of transport infrastructures by infrared thermography coupled with inline local atmospheric conditions survey. *In Proc. SPIE 8867, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXI, San Diego, USA*.
- [Dumoulin et Averty, 2012a] DUMOULIN, J. et AVERTY, R. (2012a). Development of an infrared system coupled with a weather station for real time atmospheric corrections using gpu computing : Application to bridge monitoring. *In QIRT 2012 Naple Italie*.
- [Dumoulin et Averty, 2012b] DUMOULIN, J. et AVERTY, R. (2012b). Irlaw an ogc compliant infrared thermography measurement system developed irlaw an ogc compliant infrared thermography measurement system developed time computing capabilities for long term monitoring of transport infrastructures. *In EGU General Assembly, Vienne Autriche*.
- [Dumoulin *et al.*, 2011a] DUMOULIN, J., BOST, M., MERLIOT, E., DUBOIS, L., ROCHER-LACOSTE, F., COTTINEAU, L.-M. et BOURQUIN, F. (2011a). Design, conception and realisation of high energetic mechanical impacts on a civil engineering structure to evaluate sensing techniques in istimes project framework. *In EGU General Assembly 2011, Vienne, Autriche*.
- [Dumoulin et Boucher, 2014] DUMOULIN, J. et BOUCHER, V. (2014). Infrared thermography system for transport infrastructures survey with inline local atmospheric parameter measurements and offline model for radiation attenuation evaluation. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8:084978.
- [Dumoulin *et al.*, 2013] DUMOULIN, J., CRINIÈRE, A. et AVERTY, R. (2013). The detection and thermal characterization of the inner structure of the 'musmeci' bridge deck by infrared thermography monitoring. *Journal Of Geophysics And Engineering doi :10.1088/1742-2132/10/6/064003*, 10:064003.
- [Dumoulin *et al.*, 2010a] DUMOULIN, J., IBARRA-CASRANEDO, C., QUIERTANT, M. Taillade, F., BENDADA, A. et MALDAGUE, X. (2010a). Evaluation of frp gluing on concrete structures by active infrared thermography. *In QIRT2010*.

- [Dumoulin *et al.*, 2010b] DUMOULIN, J., IBOS, L., IBARRA-CASTANEDO, C., MAZIOUD, A., MARCHETTI, M., MALDAGUE, X. et BENDADA, A. (2010b). Active infrared thermography applied to defect detection and characterization on asphalt pavement samples : comparison between experiments and numerical simulations. *Journal of Modern Optics*, 57:1759–1769.
- [Dumoulin *et al.*, 2011b] DUMOULIN, J., IBOS, L. ans Marchetti, M. et MAZIOUD, A. (2011b). Detection of non emergent defects in asphalt pavement samples by long pulse and pulse phase infrared thermography. *EJECE Non destructive testing in civil engineering*, 15:557–574.
- [Dumoulin *et al.*, 2011c] DUMOULIN, J., TAILLADE, F., AUBAGNAC, C., BENAZARTI, K. et QUIERTANT, M. (2011c). Infrared thermography for the nondestructive inspection of cfrp strengthening. *Concrete international*, 33:55–58.
- [Ehrhart *et al.*, 2010] EHRHART, B., VALESKE, B., VULLER, C. E. et VOCKENHEIMER, C. (2010). Methods for the quality assessment of adhesive bonded cfrp structures - a resumé. *In 2nd International Symposium on NDT in Aerospace*.
- [Ekeland et Témam, 1999] EKELAND, I. et TÉMAM, R. (1999). *Convex analysis and variational problems*. SIAM.
- [Erdelyi, 1954] ERDELYI, A. (1954). *Tables of Integral Transforms, Vol. 1*. McGraw-Hill Inc.,US.
- [Fang, 2004] FANG, Q. (2004). Distinctions between levenberg-marquardt method and tikhonov regularization. Rapport technique, Thayer School of Engineering, Dartmouth College Hanover, NH 03755, USA.
- [Faugeroux, 2004] FAUGEROUX, O. (2004). Caracterisation thermophysique de revetements par methode photothermique impulsionnelle en face avant. *International Journal of Thermal Sciences*, 43:383–401.
- [Fernandes et Maldague, 2014] FERNANDES, H. et MALDAGUE, X. (2014). Fiber orientation assessment in complex shaped parts reinforced with carbon fiber. *In QIRT 2014 Bordeaux France*.
- [Feuillet *et al.*, 2012] FEUILLET, V., IBOS, L., FOIS, M., DUMOULIN, J. et CANDAU, Y. (2012). Defect detection and characterization in composite materials using square pulse thermography coupled with singular value decomposition analysis and thermal quadrupole modeling. *NDT&E International*, 51:58–67.
- [FLIR, 2014a] FLIR, S. (2014a). <http://www.flir.com/flirone/explore.cfm> (consulté aout 2014). *FLIR website*.
- [FLIR, 2014b] FLIR, S. (2014b). http://www.flir.com/flirone/press/FLIRONE_Launch_FAQ.pdf (consulté aout 2014). Rapport technique, FLIR Systems.
- [Fourier, 1822] FOURIER, J. (1822). *Theorie analytique de la chaleur*. Firmin Didot, père et fils.
- [Frechet, 1934] FRECHET, M. (1934). sur l’usage du soi-disant coefficient de corrélation. *In rapport pour la 22e session de l’iis à londres, bulletin de l’iis*.

- [Friedman et Miller, 2004] FRIEDMAN, E. et MILLER, J. L. (2004). *Photonics Rules of Thumb : Optics, Electro-Optics, Fiber Optics, and Lasers, Second Edition*. McGraw-Hill.
- [FTG, 2001] FTG (2001). Externally bonded frp reinforcement for rc structures, fib bulletin 14, lausanne, switzerland. Rapport technique, Fib Task Group 9.3.
- [Fudym et al., 2004] FUDYM, O., BATSALE, J.-C. et LECOMPTE, D. (2004). Heat diffusion at the boundary of stratified media homogenized temperature field and thermal constriction. *International Journal of heat and mass transfer*, 47:2437–2447.
- [Gates, 1980] GATES, D.-M. (1980). *Biophysical ecology*. ED New York.
- [Gauss, 1809] GAUSS, C. (1809). *Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium - Traduit en 1857 - Theory of the motion of the heavenly bodies moving about the sun in conic sections : a translation of Gauss's*. Boston, Little, Brown and company.
- [Gaussorgues, 1989] GAUSSORGUES, G. (1989). *La thermographie infrarouge : Principes, Thechnologies, Applications 3e édition*. Tec Doc, Lavoisier.
- [Grinzato et al., 1998] GRINZATO, E., VAVILOV, V. P. et KAUPPINEN, T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, 29:1–9.
- [Gutman, 1990] GUTMAN, S. (1990). Identification of discontinuous parameters in flow equations. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 28(5):1049–1060.
- [Hadamard, 1902] HADAMARD, J. (1902). Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. *Princeton University Bulletin*, 1:49–52.
- [Hanke, 2010] HANKE, M. (2010). The regularizing Levenberg-Marquardt scheme is of optimal order. *Journal of Integral Equations and Applications*, 22(2):259–283.
- [Harris, 2002] HARRIS, M. (2002). gpgpu.org (consulté en aout 2014).
- [Hestenes, 1951] HESTENES, M. (1951). Iterative methods for solving linear equations. *NAML Report*, 52.
- [Honig et Jirdes, 1984] HONIG, G. et JIRDES, U. (1984). Algorithm 27 : A method for the numerical inversion of laplace transforms. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 10:113–132.
- [Hoon et al., 2004] HOON, S ans Charles, R. F., FRANCOIS, M. H., DEVIN, D. S., DANIEL, W. S., BRETT, R. N. et CZARNETZKI, J. J. (2004). *A Review of Structural Health Monitoring Literature : 1996–2001*. Los Alamos National Laboratory.
- [Houhou et al., 2014] HOUHOU, N., BENZARTI, K., QUIERTANT, M., CHATAIGNER, S., RABASSE, M., AUBAGNAC, C., GAGNON, A. et FLETY, A. (2014). Durability of concrete/frp bonded assemblies subjected to coupled hydrothermal and creep ageing mechanisms : Experimental and analytical investigations. *In Transport Research Arena 2014, Paris*.
- [Ibarra-Castanedo et al., 2009] IBARRA-CASTANEDO, C., PIAU, J.-M., AVDELIDIS, S. G. N. P., GENEST, M., BENDADA, A. et MALDAGUE, X. P. V. (2009). Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures. *Research in Nondestructive Evaluation*, 20:1–31.

- [Ibos *et al.*, 2006] IBOS, L., LARBI YOUCEF, M., MAZIOUD, A., DACTU, S. et CANDAU, Y. (2006). Non-destructive testing of building walls using active infrared thermography. In *QIRT 2006 Padoue Italie*.
- [IFSTTAR, 2010] IFSTTAR (2010). Rapport annuel 2010. Rapport technique, IFSTTAR.
- [ISO, 2010] ISO (2010). *ISO 20473 :2007 Optique et photonique – Bandes spectrales*.
- [ISTIMES, 2014] ISTIMES (2014). <http://www.istimes.eu> (consulté aout 2014). *Project website*.
- [Jacques, 2005] JACQUES, J. (2005). *Contributions à l'analyse de sensibilité et à l'analyse discriminante généralisée*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble 1.
- [Keung et Zou, 1998a] KEUNG, Y. L. et ZOU, J. (1998a). An efficient linear solver for nonlinear parameter identification problems. *Scientific Computing*, 22:1511–1526.
- [Keung et Zou, 1998b] KEUNG, Y. L. et ZOU, J. (1998b). Numerical identifications of parameters in parabolic systems. *Inverse Problems*, 14:83–100.
- [Keys, 1981] KEYS, R. (1981). Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Transactions on Signal Processing, Acoustics, Speech, and Signal Processing* doi :10.1109/TASSP.1981.1163711, 29:1153–1160.
- [Krapez et Dohou, 2014] KRAPEZ, J. C. et DOHOU, E. (2014). Thermal quadrupoles approaches applied to improve heat transfert computation in multilayered materials with internal heat sources. *International Journal of Thermal Sciences*, 81:38–51.
- [Krapez *et al.*, 1994] KRAPEZ, J.-C., LEPOUTRE, F. et BALAGEAS, D. (1994). Early detection of thermal contrast in pulsed simulated thermography. *Journal de Physique IV*, 4:47–50.
- [Kreith et Kreider, 1978] KREITH, F. et KREIDER, J.-F. (1978). *Principles of solar engineering*. Hemisphere Publishing Corp.
- [Kunisch, 1988] KUNISCH, K. (1988). A review of some recent results on the output least squares formulation of parameter estimation problems. *Automatica*, 24(4):531–539.
- [Lamm, 1987] LAMM, P. K. (1987). Estimation of discontinuous coefficients in parabolic systems : applications to reservoir simulation. *Journal on Control and Optimization*, 25(1):18–37.
- [Laplace, 1814] LAPLACE, P. S. (1814). *Théorie analytique des probabilités*. Courcier Paris Ve.
- [Lascoup *et al.*, 2011] LASCROUP, B., PEREZ, L., AUTRIQUE, L. et CRINIÈRE, A. (2011). Détection de défaut à l'aide d'une sollicitation thermique périodique – étude de faisabilité. In *JNC17*.
- [Lascoup *et al.*, 2013] LASCROUP, B., PEREZ, L., AUTRIQUE, L. et CRINIÈRE, A. (2013). On the feasibility of defect detection in composite material based on thermal periodic excitation. *Composites : Part B* doi : [dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.020](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.020), 45:1023–1030.
- [Lawson *et al.*, 1979] LAWSON, C.-L., HANSON, R.-J., KINCAID, D. et KROGH, F.-T. (1979). Basic linear algebra subprograms for fortran usage doi :10.1145/355841.355847. *ACM Trans. Math, Software* 5 Algorithm 539.:308–323.

- [Le Cam *et al.*, 2008] LE CAM, V., COTTINEAU, L.-M., LEMARCHAND, L. et BOURQUIN, F. (2008). Design of a generic smart and wireless sensors network – benefits of emerging technologies. *In EWSHM 2008, Cracovie, Pologne.*
- [Le Cam *et al.*, 2010] LE CAM, V., LEMARCHAND, L., MARTIN, W. et BONNEC, N. (2010). Improving wireless sensor behavior by means of generic strategies. *In EWSHM 2010, Naples, Italie.*
- [Legendre, 1805] LEGENDRE, A. (1805). *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes.* Didot.
- [Levenberg, 1944] LEVENBERG, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least-squares. *Quart. Appl. Math.*, 2:164–168.
- [Lions, 1968] LIONS, J.-L. (1968). *Contrôle optimal de systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles.* Dunod.
- [Luce et Perez, 1999] LUCE, R. et PEREZ, S. (1999). Parameter identification for an elliptic partial differential equation with distributed noisy data. *Inverse Problems*, 15:291–307.
- [Maierhofer *et al.*, 2006] MAIERHOFER, C., ARNDT, R., RÖLLIG, M., RIECK, C., WALTHER, A., SCHEEL, H. et HILLEMEIER, B. (2006). Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Journal of Cement & Concrete Composite*, 401:28–393.
- [Maillet *et al.*, 2000] MAILLET, D., ANDRÉ, S., BATSALE, J.-C., DEGIOVANI, A. et MOYNE, C. (2000). *Thermal Quadrupoles - Solving the heat equation through integral transforms.* WILEY.
- [Maillet *et al.*, 1996] MAILLET, D., BATSALE, J.-C., BENDADA, A. et DEGIOVANI, A. (1996). Methodes integrales et controle non destructif par thermographie infrarouge stimulee. *Revue Générale de thermique*, 35:14–27.
- [Maldague, 2001] MALDAGUE, X. (2001). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing.* Wiley & Sons.
- [Manjunath, 2007] MANJUNATH, R. (2007). Review of nondestructive evaluation techniques for frp composite structural components. Rapport technique, Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, West Virginia.
- [Maranzana *et al.*, 2002] MARANZANA, G., PERRY, I. et MAILLET, D. (2002). Quasi-analytical simulation of conduction heat transfer through a pyramidal multilayer multiblock by ther quadrupole method. *Numerical heat transfert*, 42:499–521.
- [Marinetti *et al.*, 2004] MARINETTI, S., GRINZATO, E., BISON, P., BOZZI, E., CHIMENTI, M., PIERI, G. et SALVETTI, O. (2004). Statistical analysis of ir thermographic sequences by pca. *Infrared Physics & Technology*, 46:85–91.
- [Marquardt, 1963] MARQUARDT, D. (1963). An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 2:431–441.
- [Mayr et Hendorfer, 2010] MAYR, G. et HENDORFER, G. (2010). Porosity determination by pulsed thermography in reflection mode. *In QIRT2010.*

- [McAdams, 1954] MCADAMS, W. H. (1954). *Heat Transmission*. McGraw-Hill, New York.
- [Melouch et Ben Brahim, 2001] MELOUCH, R.-F. et BEN BRAHIM, A. (2001). Modelisation de la densité du flux solaire global de la ville de. *Rev. Energ. Ren.*, 4:1–9.
- [Meola *et al.*, 2005] MEOLA, C., DI MAIO, R., ROBERTI, N. et CARLOMAGNO, G.-M. (2005). Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. *Engineering Failure Analysis*, 12:875–892.
- [Miller, 1994] MILLER, J. L. (1994). *Principles Of Infrared Technology : A Practical Guide To The State Of The Art*. Van Nostrand Reinhold.
- [Modest, 1993] MODEST, M. F. (1993). *Radiative Heat Transfert*. Academic Press.
- [Moré, 1977] MORÉ, J. J. (1977). The levenberg-marquardt algorithm : Implementation and theory. *Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics*, 630:105–106.
- [Nassiopoulos et Bourquin, 2010] NASSIOPOULOS, A. et BOURQUIN, F. (2010). Fast three-dimensional temperature reconstruction. *CMA*, 199:3169–3178.
- [Nielsen, 1999] NIELSEN, H. B. (1999). Damping parameter in Marquardt's method. Rapport technique, Technical University of Denmark.
- [Nikishkov, 2010] NIKISHKOV, G. (2010). *Programming Finite Elements in Java - Chap 2 Finite Element Equations for Heat Transfer*. Springer London doi :10.1007/978-1-84882-972-5.
- [NVIDIA, 2012] NVIDIA (2012). *Dynamic parallelism in cuda* http://developer.download.nvidia.com/assets/cuda/docs/TechBrief_Dynamic_Parallelism_in_CUDA_v2.pdf (consulté aout 2014). NVIDIA Website.
- [NVIDIA, 2014] NVIDIA (2014). *CUDA Toolkit Documentation v6.0* <http://docs.nvidia.com/cuda/> (consulté aout 2014). NVIDIA Website.
- [Obràn, 2009] OBRÀN, O. (2009). Assessment of masonry arch railway bridges using non-destructive in-situ testing methods. *Engineering Structures*, 31:2287–2298.
- [OGC, 2010] OGC (2010). Ogc web coverage service 2.0 interface standard - xml/soap protocol binding extension. Rapport technique, Open Geospatial Consortium.
- [OGC, 2011] OGC (2011). Ogc reference model. Rapport technique, Open Geospatial Consortium.
- [Oke, 1987] OKE, T.-R. (1987). *Boundary layer climates*. Methuen.
- [Optris, 2014] OPTRIS (2014). <http://www.optris.fr/optris-pi-lightweight> (consulté aout 2014). *Optris website*.
- [Orlande *et al.*, 2011] ORLANDE, R. B. H., FUDYM, O., MAILLET, D. et COTTA, M. R. (2011). *Thermal Measurement and Inverse Techniques*. CRC Press.
- [Osiander, 1998] OSIANDER, R. (1998). Time-resolved infrared radiometry with step heating a review. *Revue Générale de thermique*, 37:680–692.
- [Ozisik, 2000] OZISIK, M. N. (2000). *Inverse Heat Transfer*. Taylor & Francis.

- [Pailhes *et al.*, 2012] PAILHES, J., PRADERE, C., BATTAGLIA, J.-L., TOUTAIN, J., KUSIAK, A., AREGBA, A. W. et BATSALÉ, J.-C. (2012). Thermal quadrupole method with internal heat sources. *International Journal of Thermal Sciences*, 53:49–55.
- [Palyvos, 2008] PALYVOS, J.-A. (2008). A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Applied Thermal Engineering*, 28:801–808.
- [Parker *et al.*, 1961] PARKER, W. J., JENKINS, R. C., BUTLER, C. P. et ABBOTT, G. L. (1961). Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. *Journal of Applied Physics*, 32:1679–1684.
- [Perez et Autrique, 2009] PEREZ, L. et AUTRIQUE, L. (2009). Robust determination of thermal diffusivity values from periodic heating data. *Inverse Problems* doi :10.1088/0266-5611/25/4/045011, 25:045011.
- [Piau *et al.*, 2008] PIAU, J., BENDADA, A., MALDAGUE, X. et LEGOUX, J. (2008). Nondestructive testing of open microscopic cracks in plasma-sprayed-coatings using ultrasound excited vibrothermography. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 23:109–120.
- [Piedallu et Gegout, 2007] PIEDALLU, C. et GEGOUT, J.-C. (2007). Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. *Ann. For. Sci.*, 64:899–909.
- [Planck, 1901] PLANCK, M. (1901). Über das gesetz der energieverteilung im normalspektrum (on the law of distribution of energy in the normal spectrum). *Annalen der Physik*, 309:553–563.
- [Plotnikov et Winfree, 2000] PLOTNIKOV, Y. A. et WINFREE, W. P. (2000). Temporal treatment of a thermal response for defect depth estimation. *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, 19:587–594.
- [Preis, 2011] PREIS, T. (2011). Gpu-computing in econophysics and statistical physics. *The european physical journal*, 194:87–119.
- [Prosser *et al.*, 2004] PROSSER, R. B., GEOFFREY, R. et MORSON, V. (2004). *Macintosh, Charles (1766–1843), manufacturing chemist and inventor of mackintosh waterproof fabrics.* Oxford University Press, 2004.
- [Proto *et al.*, 2010] PROTO, M., BAVUSI, M., ROMEO, B., BIGAGLI, L., BOST, M., BOURQUIN, F., COTTINEAU, L., CUOMO, V., DELLA VECCHIA, P., DOLCE, M., DUMOULIN, J., EPELBAUM, L., FORNARO, G., GUSTAFSSON, M., HUGENSCHIMDT, J., KASPERSEN, P., KIM, H., LAPENNA, V., LEGGIO, M., LOPERTE, A., MAZZETTI, P., MORONI, C., NATIVI, S., NORDEBO, S., PACINI, F., PALOMBO, A., PASCUCCI, S., PERRONE, A., PIGNATTI, S., CARLO PONZO, F., RIZZO, E., SOLDOVIERI, F. et TAILLADE, F. (2010). Transport infrastructure surveillance and monitoring by electromagnetic sensing the istimes project. *Sensor* 2010, 10:10620–10639.
- [Préfecture, 2010] PRÉFECTURE, m. A. (2010). Arrêté instituant un périmètre de sécurité aux abords du port de roscoff-bloscon (commune de roscoff) pendant les opérations de déroctage-dragage pour les travaux d'extension du port. *Préfecture maritime Atlantique : Arrêté 2010/22.*
- [Rajic, 2002] RAJIC, N. (2002). Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures. *Composite Structures*, 58:512–528.

- [Renil *et al.*, 2014] RENIL, T., LIBIN, M. et BALASUBRAMANIAN, K. (2014). Scanning induction thermography (sit) on damaged carbon-fiber reinforced plastics (cfrp) components. *In QIRT 2014 Bordeaux France.*
- [Rhazi et Naar, 2005] RHAZI, J. et NAAR, S. (2005). Aptitude de la thermographie infrarouge à détecter les fissures et nids d'abeille dans le béton. *In Groupe de Recherche sur l'auscultation et l'Instrumentation Département de génie civil Université de Sherbrooke.* 12e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art.
- [Roche et Balageas, 2014] ROCHE, J.-M. et BALAGEAS, D. (2014). Common tools for quantitative pulse and step-heating thermography part ii : experimental validation. *In QIRT 2014 - Bordeaux - France.*
- [Rouaud, 2013] ROUAUD, M. (2013). *Calcul d'incertitudes (licence libre <http://www.incertitudes.fr/livre.pdf>).* Lulu.
- [Saint Raymond, 2007] SAINT RAYMOND, J. (2007). *Topologie, calcul différentiel et variable complexe.* Calvage et Mounet.
- [Salazar *et al.*, 2010] SALAZAR, A., MENDIOROZ, A., FUENTE, R. et CELORRIO, R. (2010). Accurate measurements of the thermal diffusivity of thin filaments by lock-in thermography. *Journal of Applied Physics*, 107:043508.
- [Saltelli *et al.*, 2000] SALTELLI, A., CHAN, K. et SCOTT, E.-M. (2000). *Sensitivity Analysis.* Wiley New York (NY).
- [Schlichting *et al.*, 2012] SCHLICHTING, J., MAIERHOFER, C. et KREUTZBRUCK, M. (2012). Crack sizing by laser excited thermography. *NDT&E International*, 45:133–140.
- [Schoefs *et al.*, 2011] SCHOEFS, F., BASTIDAS-ARTEAGA, E. et BARBOT, L. (2011). Projet mareo : Evaluation probabiliste de la dégradation et des stratégies de maintenance durables de structures en béton armé en environnement maritime. *Essais et Simulations*, 107:24–32.
- [Sheng *et al.*, 2011] SHENG, H., LI, Y. et CHEN, Y. (2011). Application of numerical inverse laplace transform algorithms in fractional calculus. *Journal of the Franklin Institute*, 348: 315–330.
- [Shettle et Fenn, 1979] SHETTLE, P. et FENN, W. (1979). *Models for The Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties.* Air Force Geophysics Laboratory.
- [Siegel *et al.*, 2010] SIEGEL, R., HOWELL, J. et MENGUC, P. (2010). *Thermal Radiation Heat Transfer 5eme édition.* CRC press.
- [SOAP, 2014] SOAP (2014). <http://www.w3.org/TR/soap/> (consulté en aout 2014). *W3C - World Wide Web Consortium.*
- [Soldovieri *et al.*, 2014] SOLDOVIERI, F., DUMOULIN, J., PONZO, F., CRINIÈRE, A., BOURQUIN, F. et CUOMO, V. (2014). Association of sensing techniques with a designed ict architecture in the istimes project : Application example with the monitoring of the musmeci bridge. *In 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM2014 Nantes France.*

- [SOS, 2012] SOS (2012). Ogc sensor observation service interface standard. Rapport technique, Open Geospatial Consortium.
- [Spearman, 1904] SPEARMAN, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology*, 15:72–101.
- [SPS, 2011] SPS (2011). Ogc sensor planning service implementation standard. Rapport technique, Open Geospatial Consortium.
- [Stehfest, 1970] STEHFEST, H. (1970). Algorithm 368 : Numerical inversion of laplace transform. *Communication of the ACM*, 13:47–49.
- [Strong, 2002] STRONG, B. (2002). History of composite materials. *Composites Manufacturing*.
- [SWE, 2008] SWE (2008). Ogc sensor web enablement architecture. Rapport technique, Open Geospatial Consortium.
- [Taillade et al., 2012] TAILLADE, F., QUIERTANT, M., BENZARTI, K., DUMOULIN, J. et AUBAGNAC, C. (2012). Nondestructive evaluation of frp strengthening systems bonded on rc structures using pulsed stimulated infrared thermography. Rapport technique, InTech.
- [Taine et al., 2008] TAINE, J., LACONNA, E. et PETIT, J. (2008). *Transferts thermiques , Introduction aux transferts d'énergie 4eme édition*. DUNOLD.
- [Taiwo et al., 1995] TAIWO, O., SCHULTZ, J. et KREBS, V. (1995). A comparison of two methods for the numerical inversion of laplace transforms. *Computers chem, Engng*, 19:303–308.
- [Tang et Podolony, 1998] TANG, B. et PODOLONY, W. (1998). A successful beginning for fiber reinforced polymer (frp) composite materials in bridge applications. *In FHWA Proceedings, International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures*.
- [Tber et Talibi, 2007] TBER, M. H. et TALIBI, M. E. A. (2007). A finite element method for hydraulic conductivity identification in a seawater intrusion problem. *Computers and Geosciences*, 33:860–874.
- [Tennyson et al., 2001] TENNYSON, R., MUFTI, A., RIZKALLA, S., TADROS, G. et BENMOKRANE, B. (2001). Structural health monitoring of innovative bridges in canada with fiber optic sensors. *Smart Materials and Structures Journal*, 10:560–573.
- [Theroux et al., 2014] THEROUX, L.-D., DUMOULIN, J. et MALDAGUE, X. (2014). Square heating applied to shearography and active infrared thermography measurements coupling : From feasibility test in laboratory to numerical study of pultruded cfrp plates glued on concrete specimen. *Strain doi : 10.1111/str.12086*.
- [Tikhonov, 1963] TIKHONOV, A. (1963). Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. *Soviet Math Dokl*, 4:1035–1038.
- [Todorova, 2008] TODOROVA, R. (2008). Estimation of total solar radiation received on horizontal surface in bulgaria. *In Third International conference on water observation and information systems for decision support, Ohrid, Macedonia*.

- [Tralshawala *et al.*, 2007] TRALSHAWALA, N., HOWARD, D., KNIGHT, B., PLOTNIKOV, Y. et RINGERMACHER, H. (2007). Lateral heat flow method for thickness independent determination of thermal diffusivity doi :10.1063/1.2798581. *Journal of Applied Physics*, 102:083522.
- [Tufté, 2001] TUFTE, E. (2001). *The Visual Display of Quantitative Information, 2nd Edition, ISBN 0961392142*. Graphics Press.
- [Valluzzi *et al.*, 2009] VALLUZZI, M. R., GRINZATO, E., PELLEGRINO, C. et MODENA, C. (2009). Ir thermography for interface of frp laminates externally bonded on rc beam. *Materials and structures*, 42:25–34.
- [Vaschy, 1892] VASCHY, A. (1892). Sur les lois de similitude en physique. *Annales Télégraphiques*, 19:25–28.
- [Vavilov, 2010] VAVILOV, V. (2010). 1d-2d-3d transition conditions in transient ir thermographic nde. In *QIRT 2010 Quebec Canada*.
- [Vavilov *et al.*, 1998] VAVILOV, V. P., ALMOND., D. P., BUSSE, G., GRINZATO, E., KRAPEZ, J. C., MALDAGUE, X., MARINETTI, S., V, P. W. S. et D, W. (1998). Infrared thermographic detection and characterisation of impact damage in carbon fibre composites : results of the round robin test. In *QIRT1998*.
- [Vavilov *et al.*, 1993] VAVILOV, V. P., MALDAGUE, X., DUFORT, B., ROBITAILLE, F. et PICARD, J. (1993). Thermal nondestructive testing of carbon epoxy composites : detailed analysis and data processing. *NDT&E International*, 26:85–95.
- [VIDEOTEC, 2013] VIDEOTEC (2013). Caisson avec module thermique pour les milieux agressifs. Rapport technique, WWW.VIDEOTEC.COM FICHES TECHNIQUES.
- [Vienne, 2013] VIENNE, P. (2013). Pilotage optimal des enveloppes du bâtiment. Rapport technique, Mines Nancy - IFSTTAR.
- [Walker, 1958] WALKER, H. (1958). The contributions of karl pearson. *Journal of the American Statistical Association*, 53:11–22.
- [Wiederhold, 1992] WIEDERHOLD, G. (1992). Mediators in the architecture of future information systems. *IEEE Computer Magazine*, 25:38–49.

IV

Annexes



Sigles infrarouges

Proche infrarouge

- PIR : Proche-IR 0,78 – 3 μm - Découpage [ISO, 2010]
- IR-A : 0,7 μm – 1,4 μm - Découpage CIE (Commission Internationale de l'éclairage)
- NIR : Near-IR 0,78 – 3 μm - Découpage [ISO, 2010]
- Bande I : 1 – 3 μm - [Gaussorgues, 1989]

Infrarouge moyen

- MIR : Moyen-IR 1.4 - 50 μm - Découpage [ISO, 2010]
- IR-B : 1.4 - 3 μm - Découpage CIE (Commission Internationale de l'éclairage)
- Bande II : 3 – 5 μm - [Gaussorgues, 1989]

Infrarouge lointain

- LIR : Lointain-IR 50 - 5000 μm - Découpage [ISO, 2010]
- IR-C : 3 - 1000 μm - Découpage CIE (Commission Internationale de l'éclairage)
- FIR : Far-IR 50 - 5000 μm - Découpage [ISO, 2010]
- Bande III : 8 - 12 μm - [Gaussorgues, 1989]



Les matériaux composites

Les matériaux composites peuvent être définis comme l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles améliorant certaines propriétés du matériau résultant. Ces matériaux sont composés d'une ossature, appelée renfort, qui assure la tenue mécanique, et d'un liant organique ou minéral, appelé matrice, qui assure la cohésion de l'ensemble. Ils peuvent être naturels ou artificiels ; le bois et les os sont des matériaux composites. Les composites artificiels quant à eux ont presque toujours existé. En effet, 2000 ans avant Jésus Christ, les populations Mongols fabriquaient déjà des arcs composites en alliant bois et tendons d'animaux [Bord et Mugg, 2005]. Durant la révolution industrielle, des composites plus complexes font leur apparition. Charles Machintosh crée ainsi l'imperméable en appliquant du caoutchouc sur des textiles [Prosser *et al.*, 2004]. En 1867 Joseph Monier dépose le premier brevet traitant du béton armé [Bosc *et al.*, 2001]. Quelques années plus tard, en 1892, François Hennebique construit le premier immeuble parisien en béton armé (1 Rue Danton, Paris) [Delhumeau, 1999].

De nos jours, le terme de matériaux composites fait généralement référence à des assemblages dont les renforts sont présents sous forme de fibres (FRP : Fiber reinforced polymer), et où la matrice est une résine polymère (par exemple de la résine époxy). Pour les utilisations industrielles et scientifiques les fibres de verre (GFRP), de carbone (CFRP) et d'aramide (KEVELAR®) sont le plus souvent utilisées, figure 25. Les matériaux sont dits "chargés" lorsque les renforts sont remplacés par des poudres ou des liquides [CARMA, 2006]. Les propriétés des FRP sont généralement orthotropes, les composites chargés quant à eux tendent vers un comportement isotrope.

L'histoire des composites modernes commence dans les années trente, lorsque la fibre de verre est brevetée. En raison de leur résistance à la contrainte mécanique et leur faible masse volumique, à la sortie de la Seconde Guerre mondiale, les matériaux composites sont utilisés dans des processus industriels intimement liés à la recherche en aéronautique et aérospatial [Strong, 2002]. Ils sont, pour la plupart, fabriqués en une fois, ce qui rend difficile la détection de défauts apparaissant durant le processus de fabrication. Ainsi, le développement d'un éventail de méthodes de diagnostic acoustiques, mécaniques, thermiques, irradiantes, etc. à accompagné l'essor des matériaux composites [Manjunath, 2007]. Aujourd'hui, près de la moitié des matériaux composites sont utilisés dans les transports et structures de génie civil [Strong, 2002].



FIGURE 25 – **a)** Fibre de carbone tissé avant imprégnation - **b)** Fibre de verre avant imprégnation - **c)** Plaque en fibre de carbone unidirectionnelle Carbodur®-**d)** Fibre de carbone pré-imprégnée

Liste de matériaux

Matériaux	k	ρ	C	b
Cuivre	380	8900	380	35849
Aluminium	230	2700	880	23377
Acier	50	7800	450	13248
Acier n°2	15.1	8055	480	7640.9
Béton	1.8	2300	1000	2035
Béton n°2	1.8	2300	920	1951
Pierre	1.7	2000	1000	1844
Eau	0.6	1000	4185	1582.6
Brique	0.74	1800	1000	1154
Bois	0.29	870	1600	635
Époxy	0.2	1200	1220	542.5
Plâtre	0.25	825	1000	454
Bois n°2	0.15	600	1900	413.5
Bois n°3	0.15	500	1600	346
OSB	0.12	600	1150	288
Laine de bois	0.1	400	1700	261
Béton cellulaire	0.09	350	1000	177
Fibre de bois	0.04	160	2100	116
Liège	0.05	120	1560	97
Liège n°2	0.039	120	1800	91.8
Laine de roche	0.044	100	1030	67
PSE	0.04	34	1450	44
Laine de verre	0.04	25	1700	41
PSE n° 2	0.04	26	1450	39
Polyuréthane	0.03	34	1400	38
Air	0.0242	1.225	1006	5.5

TABLE 1 – Propriétés thermophysiques utilisées

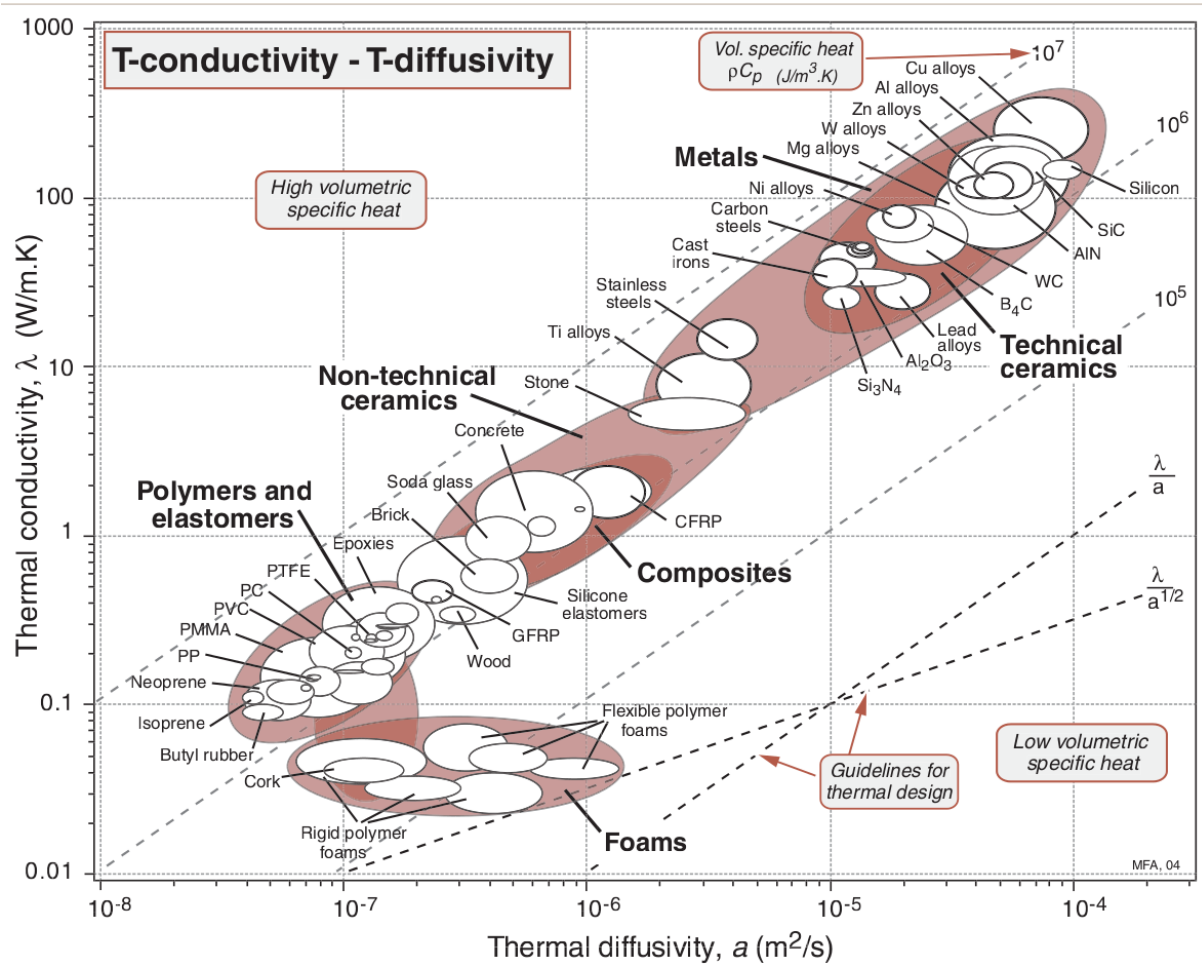


FIGURE 26 – Abaque de conception [Ashby, 2004]



Comportement de la procédure d'estimation en présence de bruit

Cette annexe est un complément de la section 2.5. Les figures 27 et 28 présentent les erreurs relatives et les écarts types de l'estimateur des paramètres \hat{P} pour un bruit de mesure blanc de moyenne nulle et d'écart type $\sigma_b \in \llbracket 0; 0.45 \rrbracket$.

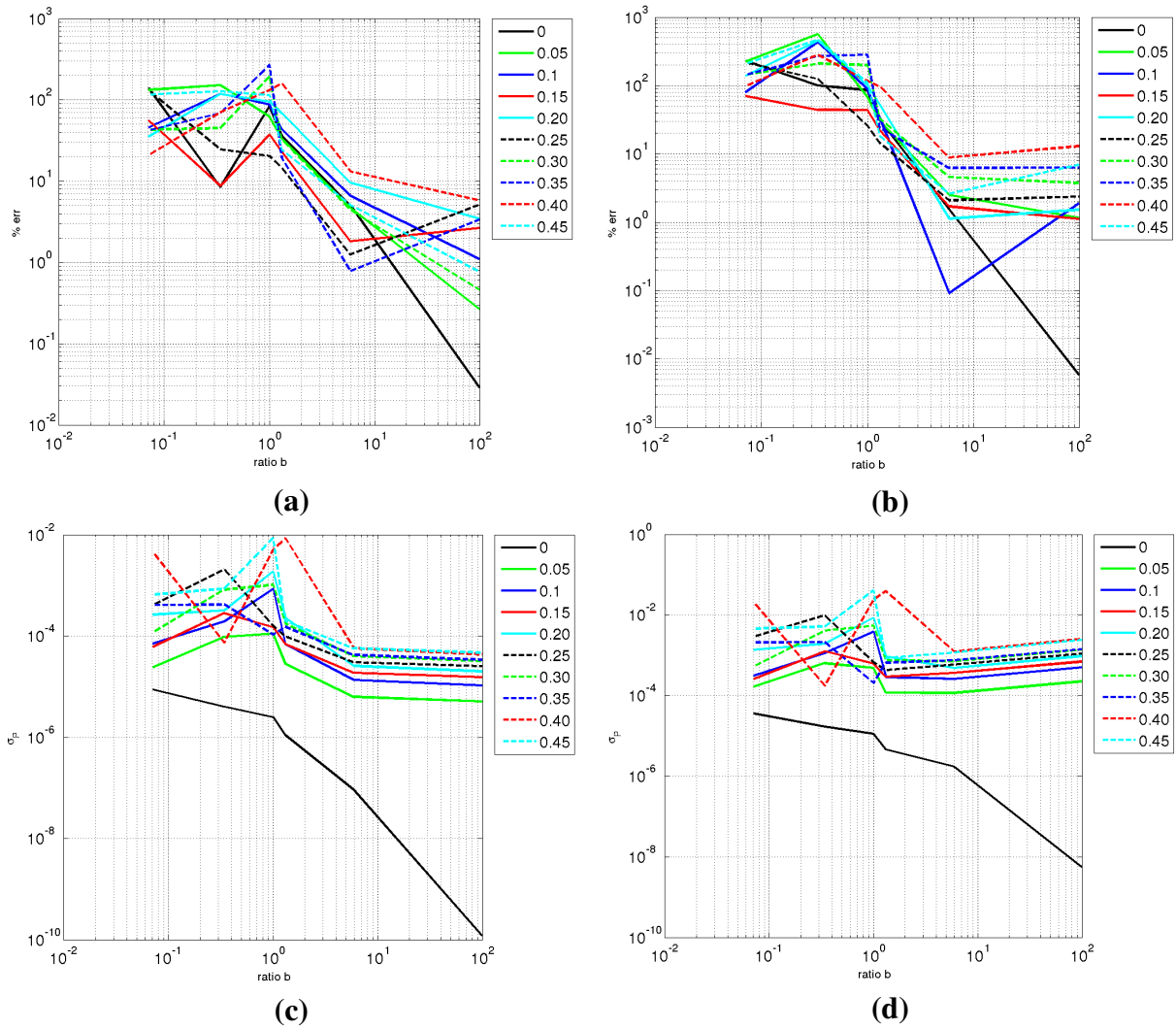


FIGURE 27 – Excitation Dirac : (a) Erreur relative sur \hat{e}_2 , (b) Erreur relative sur \hat{R}_3 , (c) Écart type \hat{e}_2 , (d) Écart type \hat{R}_3 .

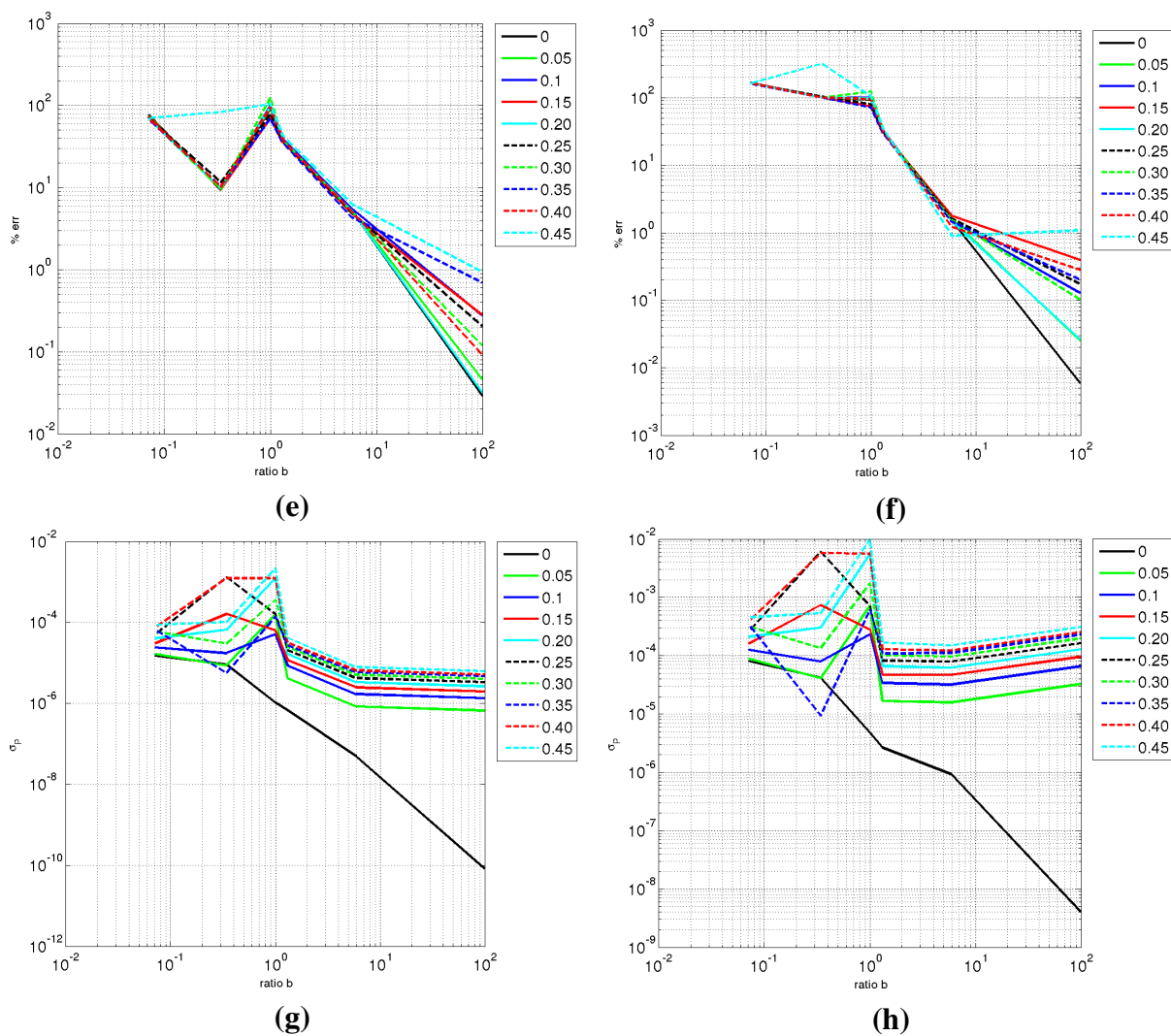


FIGURE 28 – Excitation Créneau : (e) Erreur relative sur \hat{e}_2 , (f) Erreur relative sur \hat{R}_3 , (g) Écart type \hat{e}_2 , (h) Écart type \hat{R}_3 .
 Pour $\sigma_b \in [0; 0.45]$



Évolution du maximum de sensibilité et de son temps d'arrivée

Cette annexe est un complément au chapitre 4 du manuscrit. Elle présente les figures 29 et 30 respectivement l'évolution du maximum de sensibilité et de son temps d'arrivée en fonction de \bar{t}_c

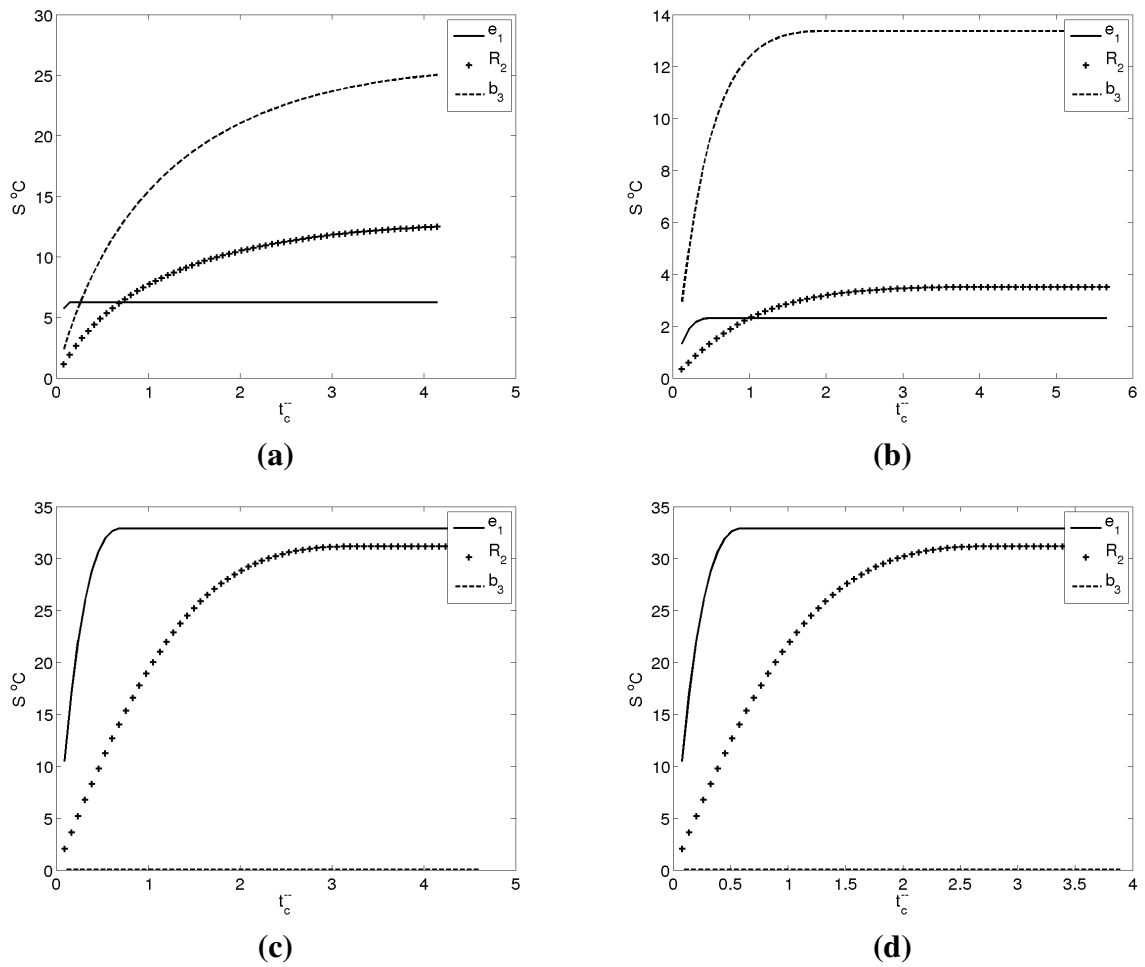


FIGURE 29 – Évolution du maximum de sensibilité en fonction de \bar{t}_c
 (a) Acier. (b) Bois. (c) Liège. (d) Air

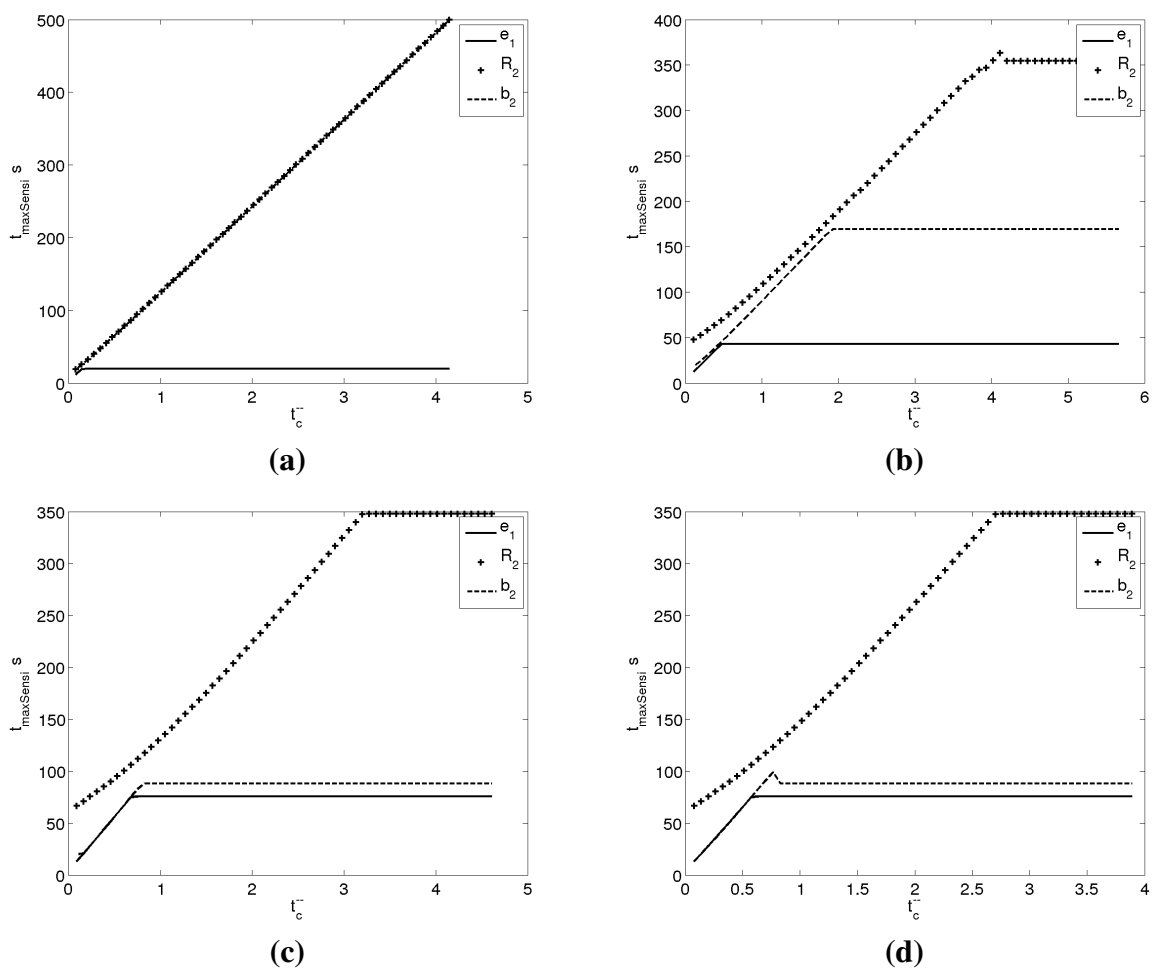


FIGURE 30 – Évolution du temps d’arrivée du maximum de sensibilité en fonction de \bar{t}_c (a) Acier. (b) Bois. (c) Liège. (d) Air

IRIASPOT

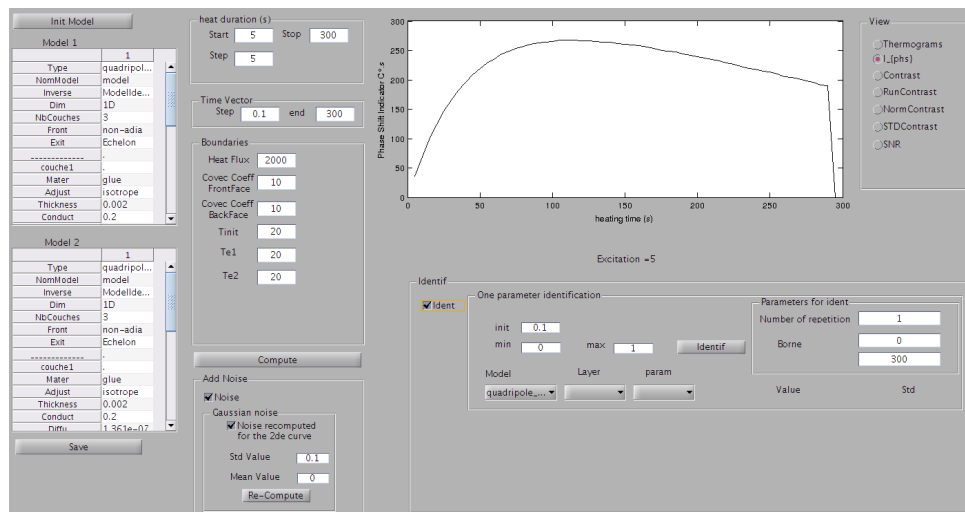


FIGURE 31 – IHM du code de calcul IRIASPOT

Listing 1 – Exemple de modèle thermique IRIASPOT

```

<!-- Modele quadripolaire 3 couches
      A.criniere 2011 -- IFSTTAR SII
-->
<model>
  <conf name="Type">quadripole_Def</conf>
  <conf name="NomModel">model</conf>
  <conf name="Inverse">ModelIdentif</conf>
  <conf name="Dim">1D</conf>
  <conf name="NbCouches">3</conf>
  <conf name="Front">non-adia</conf>
  <conf name="Exit">Echelon</conf>

  <Layer name="1">
    <param name="Mater">glue</param>
    <param name="Adjust">isotrope</param>
    <param name="Thickness">0.002</param>
    <param name="Conduct">0.2</param>
    <param name="Diffu">0.0000001361</param>
    <param name="Rho">1200</param>
    <param name="Cp">1220</param>
  </Layer>
  <Layer name="2">
    <param name="Mater">liege</param>
    <param name="Adjust">isotrope</param>
    <param name="Thickness">0.002</param>
    <param name="Conduct">0.039</param>
    <param name="Diffu">0.00000018056</param>
    <param name="Rho">120</param>
    <param name="Cp">1800</param>
  </Layer>
  <Layer name="3">
    <param name="Mater">glue</param>
    <param name="Adjust">isotrope</param>
    <param name="Thickness">0.01</param>
    <param name="Conduct">0.2</param>
    <param name="Diffu">0.0000001361</param>
    <param name="Rho">1200</param>
    <param name="Cp">1220</param>
  </Layer>
</model>

```

Liste de publications

Articles dans des revues scientifiques internationales

[A.1]* B. Lascoup, L. Perez, L. Autrique et **A. Crinière**, *On the feasibility of defect detection in composite material based on thermal periodic excitation*, Composite Part B : Engineering Vol 45 pp 1023-1030 2013, oai :hal.archives-ouvertes.fr :hal-00845958

[A.2] J. Dumoulin, **A. Crinière** et R. Averty, *The detection and thermal characterization of the inner structure of the 'Musmeci' bridge deck by infrared thermography monitoring*, Journal of Geophysics and Engineering Vol 10 N° 6, 2013, doi :10.1088/1742-2132/10/6/064003

[A.3] **A. Crinière**, J. Dumoulin, C Ibarra-Castanedo et X. Maldague, *Inverse model for defect characterisation of externally glued CFRP on reinforced concrete structures : comparative study of square pulsed and pulsed thermography*, Quantitative InfraRed Thermography Journal, Vol 11, pp. 84-114, 2014, doi : 10.1080/17686733.2014.897512

Articles dans des conférences internationales avec comité de lecture et publication des actes

[CI.1] **A. Crinière**, J. Dumoulin, C. Ibarra-Castanedo, L-D. Theroux et X. Maldague , *Comparison between SPT and PT for defect characterization of CFRP plates glued on concrete or wood structures using optical active infrared thermography*, QIRT 2012 (11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography), Naples, Italie, Juin 2012.

[CI.2]* B. Lascoup, L. Perez, L. Autrique, et **A. Crinière**, *Defect detection based on thermal periodic excitation*, ECCM 15 (15th European Conference on Composite Materials), Venise, Italie, Juin 2012.

[CI.3] **A. Crinière**, J. Dumoulin, J-L. Manceau, L. Perez et F. Bourquin, *Multi-Sensing system for outdoor thermal monitoring : Application to large scale civil engineering components*, EGU

2014 (European Geosciences Union annual meeting), Vienne, Autriche, 27 avril – 02 Mai 2014.

[CI.4] A. Crinière, J. Dumoulin, L. Perez et F. Bourquin, *Civil engineering structure daily monitored through IR Thermography and environmental measurement*, QIRT 2014 (12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography), Bordeaux, France, 7 - 11 Juillet 2014.

[CI.5] F. Soldovieri, J. Dumoulin, F.C. Ponzio, A. Crinière, F. Bourquin et V. Cuomo, *Association of sensing techniques with a designed ICT architecture in the ISTIMES project : application example with the monitoring of the Musmeci bridge*, EWSHM 2014 (7th European Workshop on Structural Health Monitoring), Nantes, France, 8 - 11 Juillet 2014.

Articles dans des conférences nationales avec comité de lecture et publication des actes

[CN.1]* B. Lascoup, L. Perez, L. Autrique et A. Crinière, *Détection de défaut à l'aide d'une sollicitation thermique périodique – Étude de faisabilité*, JNC 17 (17^{ème} Journées Nationales Composite), Poitiers, France, 15-17 juin 2011.

[CN.2] A. Crinière, J. Dumoulin, L. Perez et F. Bourquin, *Thermographie infrarouge synchronisée avec la mesure de paramètres météorologiques : Application à l'auscultation du tablier d'un pont ouvert au trafic*, SFT 2013 (Congrès annuel de la Société Française de Thermique), Gérardmer, France, 28-31 mai 2013.

[CN.3] J. Brouns, A. Crinière, J. Dumoulin, A. Nassiopoulos et F. Bourquin, *Diagnostic de structures de Génie Civil : Identification des propriétés spatiales et de la surface d'un défaut*, SFT 2014 (Congrès annuel de la Société Française de Thermique), Lyon, France, 28-31 mai 2014.

*Réalisée dans le cadre du Master 2 Recherche

Thèse de Doctorat

Antoine CRINIÈRE

Contribution au développement d'outils d'analyse de séquences d'images infrarouges

Application au contrôle non destructif de structures de Génie Civil

Tools for InfraRed sequences analysis

Application to the non destructive testing of civil engineering structural elements

Résumé

Le vieillissement du parc d'infrastructures de transport ainsi que l'augmentation du trafic durant les dernières décennies rendent nécessaire le contrôle santé des structures de génie civil. Les travaux conduits dans le cadre de cette thèse portent sur le développement et l'étude de méthodes de diagnostic *pré* et *post* endommagement de structures de génie civil couplées à la mise en œuvre de systèmes de Thermographie infrarouge. Le manuscrit s'articule autour de deux axes. La partie I présente le développement d'un ensemble de méthodes, basées sur l'utilisation de la thermographie infrarouge active, permettant le contrôle non destructif d'ouvrages réparés par collage de matériaux composites. Les différentes méthodes étudiées ont permis l'établissement des cartographies de propriétés thermophysiques de ces matériaux renforcés. En complément, une discussion sur l'optimalité du temps de chauffe pour ce type de diagnostic est proposée. La partie II présente la conception et l'utilisation d'une architecture dédiée à la surveillance thermique long terme des structures par thermographie infrarouge. Le système étudié permet le suivi des paramètres météorologiques et thermiques sur de grandes échelles de temps et d'espace. Ce dispositif de mesure est d'abord appliqué au suivi thermique d'un tablier de pont sous trafic. La cartographie de sa structure interne a été reconstruite. Enfin une analyse du comportement d'éléments de structures, sain et endommagé, soumis aux aléas climatiques pendant un an est proposée et discutée.

Mots clés

Transfert Thermique, Contrôle non destructif, Surveillance thermique, Modélisation, Problèmes Inverses, Conception de systèmes d'information, Génie Civil, TIC

Abstract

Constant increase of road traffic coupled with ageing transport infrastructures implies the need of non destructive diagnostic for civil engineering structures. The work presented in this Ph.D. thesis focuses on the development of *pre* and *post* damage diagnostic strategies, paired with the implementation of infrared thermography systems. This manuscript is structured into two main axes.

Part I presents the conception of a set of methods for the non destructive evaluation of civil engineering structures repaired by CFRP bonding using active infrared thermography. The different methods led to the thermophysical properties mapping of repaired materials by CFRP bonding. A complementary discussion about the optimality of the heating time is also carried out.

Part II details the conception and use of a software architecture dedicated to the long term thermal monitoring of structures by infrared thermography. The system allows the monitoring of meteorological and thermal parameters over large scales of time and space. It has been used for the thermal monitoring of a bridge deck open to traffic. Mapping of the intern structure thermal properties have been calculated. Finally, thermal behaviour of damaged and sound structural elements submitted to climatic perturbations over a year has been followed by infrared thermography. Results obtained are presented and discussed.

Key Words

Heat transfer, Non destructive testing, Thermal monitoring, Thermal models, Inverse problems, Information system, ICT