



PRES UNIVERSITE LILLE –NORD DE FRANCE

UNIVERSITE D'ARTOIS

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES DE BETHUNE

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur

Option : Génie Civil

Par

Tao DU

**Thermographie infrarouge active par induction électromagnétique
application à l'auscultation d'éléments en béton renforcé**

Thèse soutenue le 29 Juin 2010 devant le jury composé de :

Messieurs :

Xavier DEROBERT	Rapporteur
Etienne GAVIOT	Rapporteur
Didier DEFER	Directeur de thèse
Franck BRACHELET	Co-encadrant
Jean -Luc BODNAR	Examineur
Emmanuel ANTCZAK	Examineur
Daniel FRANCOIS	Invité

Remerciements

Remerciements

Cette recherche a été effectuée au sein de l'équipe de Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement Lille Nord de France (LGCgE) de l'Université d'Artois à Béthune. Le thème de cette étude m'a été confié par le professeur Didier DEFER, directeur du laboratoire. Qu'il trouve dans ces quelques mots le témoignage de ma profonde gratitude pour tous les conseils et son soutien indéfectible durant ces années.

Je ne saurais présenter cette thèse sans souligner le rôle essentiel de Monsieur Franck BRACHELET, Ingénieur de recherche du LGCgE de l'Université d'Artois. Durant tout ce travail, son engagement a été sans faille, dépassant le simple cadre professionnel. Je tiens à lui témoigner toute ma renaissance et mon estime.

Je tiens à remercier vivement, Monsieur Xavier DEROBERT, Ingénieur des Travaux Publics d'Etat au LCPC de Nantes, et Monsieur Etienne GAVIOT, Professeur à l'Université du Maine, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux et le temps qu'ils y ont consacré. Je leur adresse toute ma reconnaissance.

Je remercie également Monsieur Jean-Luc BODNAR pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateur, et de s'être penché minutieusement sur mon travail.

J'exprime aussi ma sincère reconnaissance à Monsieur le Professeur Emmanuel ANTCZAK pour sa participation au Jury de ma soutenance et d'avoir porté de l'intérêt à mon travail.

Je remercie Monsieur Daniel FRANÇOIS, Responsable du groupe de travail ACTENA, d'avoir accepté d'être dans le Jury de soutenance.

Enfin, je souhaite remercier tous les membres du LGCgE qui ont contribué, chacun à leur façon, au bon déroulement de cette thèse, que se soit de manière technique, scientifique, administrative ou amicale. Merci en particulier à mes amis Tingting WU et Ying GAO, pour les moments passés ensemble, l'entraide, la disponibilité et sans qui le travail n'aurait pas eu la même saveur.

Merci à ma famille surtout.....

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE.....	7
TABLES DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	12
NOMENCLATURE.....	17
INTRODUCTUIN.....	21
I. CONTEXTE.....	29
I.1 LA PROBLEMATIQUE D'ACTENA.....	29
I.2 LES DIFFERENTS TYPES DE PRECONTRAINTE	30
I.3 ORIGINE DES VIDES D'INJECTION :	32
I.4 ETAT DE L'ART DES TECHNIQUES EXISTANTES	33
I.4.1 Radiographie :	33
I.4.2 Méthode Impact-Echo :	35
I.5 LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE.....	37
I.5.1 Le rayonnement électromagnétique [GAUS]:	38
I.5.2 Le rayonnement infrarouge :	40
I.5.3 Bilan radiométrique d'une scène thermique :	40
I.6 LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE APPLIQUEE AUX CONTROLES NON DESTRUCTIFS :	42
I.6.1 La Thermographie Pulsée : [GLSB].....	43
I.6.2 Thermographie modulée :	46
I.6.3 La thermographie à Phase Pulsée [MALM].....	48
I.7 LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE APPLIQUEE A LA DETECTION DES VIDES DE PRECONTRAINTE :	51
I.7.1 Sollicitation des armatures métalliques par passage d'un courant électrique :	51
I.7.2 Thermographie à phases pulsées appliquées à l'auscultation des câbles de précontrainte.....	51
I.7.3 Exemple de la campagne d'essais de MERLEBACH :	54
I.8 CONCLUSION.....	56
II. ASPECTS THEORIQUES.....	61
II.1 ELEMENTS DE CONDUCTION THERMIQUE	61
II.1.1 Equation d'équilibre thermique.....	61
II.1.2 Loi de Fourier.....	62
II.1.3 Conduction en régime transitoire	62
II.1.4 Conditions limites	63
II.2 MODELISATION NUMERIQUE.....	64
II.2.1 Caractéristiques des modèles	65
II.2.1.1 Paramètres thermophysiques des matériaux	65
II.2.1.2 Paramètres géométriques des modèles :	66
II.2.1.3 Approximation par élément finis	67
II.2.1.4 Conditions initiales et limites appliquées au modèle numérique.....	68
II.2.1.5 Sollicitation thermique appliquée aux poutres :	69
II.2.2 Résultats de la simulation pour la poutre sans défaut :	71
II.2.3 Résultats de la simulation pour la poutre avec défaut :	73
II.3 DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	76
II.3.1 Principales caractéristiques du dispositif de chauffage	76
II.3.2 Corps d'épreuves	78
II.3.3 Procédure expérimentale.....	79
II.4 ESSAI DE CHAUFFAGE D'UNE POUTRE SANS DEFAUT A L' AIDE DE L' INDUCTEUR :	79

II.5 METHODE DE TRAITEMENT FREQUENTIELLE :	83
II.5.1 <i>Rappels sur la transformation de Fourier :</i>	83
II.5.1.1 Transformation de Fourier	83
II.5.1.2 Transformation de Fourier discrète	83
II.5.2 <i>Analyse par fonctions de transfert</i>	84
II.5.3 <i>Modélisation numérique – cas d’une dissipation non uniforme</i>	86
II.5.4 <i>Comparaison des résultats de la simulation et résultats expérimentaux</i>	87
II.5.4.1 Températures de surface :	87
II.5.4.2 Températures internes	87
II.5.4.3 Comparaison des évolutions temporelles des températures en un point de la barre :	89
II.5.5 <i>Forme temporelle de la sollicitation</i>	90
II.5.6 <i>Calcul de la fonction de transfert sur les températures simulées</i>	91
II.5.6.1 Extraction des résultats par nœud	91
II.5.6.2 Analyse des résultats numériques	92
II.5.6.3 Calcul de la FFT des températures de surface de la poutre sans défaut	93
II.5.6.4 Calcul des fonctions de transfert	95
II.5.7 <i>Choix des fréquences Atténuation</i>	99
II.5.7.1 Atténuation	100
II.6 CONCLUSION	102
III. ESSAIS EXPERIMENTAUX SUR POUTRES SAINES ET AVEC DEFAUTS :	107
III.1 PROCEDURE EXPERIMENTALE	107
III.2 ESSAIS SUR LA POUTRE SANS DEFAUT	108
III.2.1 <i>Thermogrammes bruts de la poutre sans défaut :</i>	108
III.2.2 <i>Mise en évidence de la position de la barre :</i>	110
III.2.3 <i>Analyse du champ de températures à la surface de la poutre :</i>	110
III.2.4 <i>Décomposition spectrale du signal d’entrée :</i>	112
III.2.5 <i>Analyse fréquentielle appliquée à deux points caractéristiques</i>	112
III.2.6 <i>Analyse fréquentielle appliquée à la série de thermogrammes</i>	115
III.2.7 <i>Phases de la fonction de transfert H</i>	119
III.3 ESSAIS SUR LA POUTRE AVEC DEFAUT	120
III.3.1 <i>Thermogrammes bruts de la poutre avec défaut</i>	120
III.3.2 <i>Mise en évidence de la position de la barre avec défaut :</i>	123
III.3.3 <i>Analyse du champ de températures à la surface de la poutre :</i>	124
III.3.4 <i>Analyse fréquentielle appliquée à deux points caractéristiques</i>	125
III.3.5 <i>Analyse fréquentielle appliquée à la série de thermogrammes</i>	128
III.3.6 <i>Phases de la fonction de transfert H</i>	131
III.4 RESULTATS COMPLEMENTAIRES A L’AUSCULTATION DES CABLES TENDUS NON-ACCESSIBLES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE – APPLICATION A DES CAS PARTICULIERS	132
III.4.1 <i>Modélisation d’une poutre contenant une gaine métallique :</i>	133
III.4.1.1 Champ de temperature :	133
III.4.1.2 Analyse fréquentielle des thermogrammes	134
III.4.2 <i>Présence de ferrailages passifs</i>	135
III.4.2.1 Chauffage de la poutre dans laquelle l’armature passive est dans le même plan que la barre centrale.	136
III.4.2.2 Chauffage de la poutre dans laquelle l’armature passive est décalée de deux centimètres par rapport à la barre centrale.	139
III.4.3 <i>Conclusion sur ces résultats complémentaires :</i>	141
III.5 CONCLUSION	141

IV. DETECTION DE L'ÉPAISSEUR DU BETON DE RECOUVREMENT.....	147
IV.1 L'APPROCHE NUMÉRIQUE DU SYSTÈME.....	147
IV.1.1 Schéma de la modélisation des échantillons.....	148
IV.1.2 L'approximation de la dérivée seconde discrète Le choix dans l'ordre de l'approximation.....	149
IV.2 MODÉLISATION EN DIFFÉRENCES FINIES	150
IV.2.1 Equation de la chaleur en coordonnées cartésiennes	150
IV.2.2 Modèle à schéma alterné ADI.....	151
IV.2.3 Les conditions initiales	155
IV.2.4 Les conditions limites.....	155
IV.2.4.1 Conditions géométriques	155
IV.2.4.2 Conditions à l'interface.....	156
IV.2.4.3 Conditions à la surface.....	156
IV.2.5 Méthode ADI associée au dispositif expérimental.....	159
IV.2.6 Expression matricielle du schéma ADI.....	162
IV.2.7 Pas de temps et Maillage	164
IV.3 PROCÉDURE INVERSE	164
IV.3.1 Problème Inverse de Conduction de la Chaleur (PICC).....	165
IV.3.2 Principe de l'inversion.....	166
IV.3.3 Schéma de la procédure inverse	168
IV.4 NORMALISATION ET ÉTUDE DE SENSIBILITÉ	168
IV.4.1 Normalisation	168
IV.4.2 Étude de sensibilité	170
IV.4.2.1 Fonctions de sensibilité.....	170
IV.4.2.2 Sensibilité des paramètres :.....	171
IV.4.3 Corrélation des paramètres	173
IV.5 DÉTERMINATION DE L'ÉPAISSEUR D'ENROBAGE	174
IV.5.1 Introduction de la méthode du simplexe	175
IV.5.2 Méthode simplexe initial.....	175
IV.5.3 Méthode Nelder-Mead.....	177
IV.5.4 Validation de la procédure d'inversion	177
IV.5.4.1 Identification de l'épaisseur du béton de recouvrement sans bruit.....	178
IV.5.4.2 Identification de l'épaisseur du béton de recouvrement avec bruits.....	178
IV.5.5 Estimation des paramètres.....	181
IV.5.5.1 Détermination des valeurs des références.....	181
IV.5.5.2 Identification de l'épaisseur du béton de recouvrement – résultats expérimentaux.....	182
IV.5.5.3 Identification de l'épaisseur du béton de recouvrement et la diffusivité du béton - résultats expérimentaux	184
IV.6 CONCLUSION	186
V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	190
VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	196

Annexes :

Annexe 1 : Système tri-diagonale	204
Annexe 2 : La corrélation	207
Annexe 3 : Méthode de Nelder-Mead.....	209
Annexe 4 : Mesures des caractéristiques thermophysiques des spécimens expérimentaux	213

Table des figures

Chapitre I :

Figure I- 1.a, b et c : – Processus d’injection du coulis	31
Figure I- 2 :(a) Gaine de précontrainte extérieure en PEHD	32
Figure I- 3 : Exemple de défaut d’injection dans une gaine de précontrainte	33
Figure I- 4 : Exemple de mise en place de la radiographie γ ou X	34
Figure I- 5 : Exemple d’un cliché radiographique d’un câble de précontrainte	34
Figure I- 6 : Principe de la méthode Impact-Echo	35
Figure I- 7 : Exemple de banc MIEL développé par le LCPC.....	37
Figure I- 8 : Répartition spectrale du rayonnement électromagnétique.....	39
Figure I- 9 : Scène thermique vue par la caméra IR	41
Figure I- 10 : Dispositif expérimental pour la thermographie pulsée.....	44
Figure I- 11 : Dispositif expérimental pour la thermographie pulsée.....	46
Figure I- 12 : Sollicitation et réponse thermique d’un point en régime sinusoïdal.....	47
Figure I- 13 : FFT d’une impulsion de Dirac et de la Fonction rectangle	48
Figure I- 14 : Evolution schématique de la température d’un point en PPT	49
Figure I- 15 : Traitement fréquentiel en PPT	49
Figure I- 16 : Vues des poutres confectionnées	52
Figure I- 17 : Vues en coupe des éprouvettes confectionnées avec et sans défaut.....	52
Figure I- 18 : Schéma du dispositif expérimental de chauffage direct	52
Figure I- 19: Dissipation de la chaleur lors des essais de chauffage	53
Figure I- 20 : Instrumentation et thermogramme de la zone auscultée.....	54
Figure I- 21 : Profils des températures longitudinales et transversales	55

Chapitre II :

Figure II- 1: Solide homogène	61
Figure II- 2 : Coupe des spécimens (sain (b) et partie avec défaut (c))	66
Figure II- 3 : Maillage de la poutre	67
Figure II- 4 : Elément Solid70 (ANSYS®)	68
Figure II- 5 : Allure du flux imposé.....	70
Figure II- 6 : Conditions limites de la simulation	70
Figure II- 7 : Températures de surface simulées - poutre sans défaut - t=600s	71
Figure II- 8 : Champs de la température de la simulation.....	72

Figure II- 9 : Specimen avec défaut.....	73
Figure II- 10 : Champ de température en surface de la poutre ($t = 800s$).....	73
Figure II- 11 : Interprétation du transfert interne dans la poutre avec vide.	74
Figure II- 12 : Champ interne de température simulé.....	74
Figure II- 13 : (a) Champ de température du coté non injecté.....	75
Figure II- 14 : Champ externe de la température de la poutre avec défaut.....	75
Figure II- 15 : Inducteur électromagnétique	77
Figure II- 16 : Vue en coupe des 2 spécimens	78
Figure II- 17 : Dispositif expérimental	79
Figure II- 18 : Thermogrammes obtenus sur poutre saine à différents instants.....	80
Figure II- 19 : Résultat de la simulation magnétique (logiciel FLUX-3D®)	81
Figure II- 20 : Thermogramme sur poutre saine.....	81
Figure II- 21 : Evolutions de température de surface en deux points spécifiques	82
Figure II- 22 : Principe du traitement fréquentiel	85
Figure II- 23 : Distribution non uniforme du flux imposé.....	86
Figure II- 24 : (a) Champ de la température mesuré.....	87
Figure II- 25 : Températures de surface de la barre.....	88
Figure II- 26 : Evolution de la température numérique et mesurée pour un point.....	89
Figure II- 27 : Spectres de créneaux symétriques de durées différentes.....	91
Figure II- 28 : Extraction des résultats par procédure APDL	92
Figure II- 29: Evolutions des températures en 6 points de la surface de la poutre	93
Figure II- 30 : Phases des points P2 et P'2 en fonction de la fréquence.....	95
Figure II- 31 : Signal en temporel et fréquentiel.....	96
Figure II- 32 : Evolution en amplitude et phase de la fonction de transfert	97
Figure II- 33 : 1 image de module (a) et 1 image de phase (b).....	98
Figure II- 34 : Images en amplitude et phase des fonctions de transfert	99
Figure II- 35 Sollicitation retenue pour l'étude	100
Figure II- 36 Evolutions temporelles des températures	101
Figure II- 37 Spectre de la température de surface	101

Chapitre III :

Figure III- 1 : Dispositif expérimental	107
Figure III- 2 : Photo du montage expérimental et de la caméra infrarouge	108
Figure III- 3 : Thermogrammes bruts de la poutre sans défaut.....	108
Figure III- 4 : Thermogramme 3D de la poutre sans défaut à t=600S	109
Figure III- 5 : Extraction des maxima de températures	110
Figure III- 6 : Positions des points d'analyse.....	110
Figure III- 7: Forme de la sollicitation et évolution temporelle de la température de surface de trois points de la poutre.....	111
Figure III- 8: Le créneau d'entrée, amplitude et phase de sa FFT	112
Figure III- 9 :	113
Figure III- 10: (a) Phase de la fonction de transfert ; (b) Phase de déroulement de la	115
Figure III- 11: Images d'amplitude et de phase obtenues à partir des thermogrammes réels (échelle de couleur ajustée pour chaque thermogramme).....	116
Figure III- 12: Image de phase en 3D	117
Figure III- 13: (a) Evolution des phases non corrigées (phase de S(f))	118
Figure III- 14: Phase de la fonction de transfert H	119
Figure III- 15: Thermogrammes bruts de la poutre avec défaut	121
Figure III- 16 : représentation tridimensionnelle du thermogramme Figure III- 15.d.....	122
Figure III- 17 : (a) Extraction des maxima de températures à la fin de la	123
Figure III- 18 : Résultats obtenus après la recherche des maximums temporels.....	124
Figure III- 19: Positionnement des points d'analyse	124
Figure III- 20: Forme de la sollicitation et évolutions temporelle des.....	125
Figure III- 21 : (a) Evolution des Phases des points P1 et P2.....	126
Figure III- 22 : (a) Phase de la fonction de transfert ; (b) Phase déroulée	127
Figure III- 23 : Images d'amplitude et images de phase.....	128
Figure III- 24: Images d'amplitude et de phase obtenues à partir	129
Figure III- 25 : Evolution des phases unwrap (b vue de dessus)	130
Figure III- 26: Phase de la fonction de transfert avec une échelle commune	131
Figure III- 27 : (a) Schéma constitutif de la poutre	132
Figure III- 28: a,b,c et d – Résultats de simulation obtenus pour une sollicitation thermique au bout de 600s de chauffage.....	133

Figure III-29 : Représentation tridimensionnelle des températures à la surface de la poutre au bout de 600s de chauffage.....	134
Figure III- 30: Images d’amplitude et de phase obtenues à partir	135
Figure III- 31 : Présence de ferraillements passifs.....	136
Figure III- 32 : Thermogrammes bruts pour le cas n°1	137
Figure III- 33 : Images de phase pour le cas n°1	138
Figure III- 34 : Thermogrammes bruts pour le cas n°2	139
Figure III- 35 : Images de phase pour le cas n°2	140

Chapitre IV :

Figure IV- 1 : Maillage de la section de poutre	149
Figure IV-2 : Maillage du modèle	150
Figure IV- 3: Procédure de calcul des températures lors du passage	153
Figure IV- 4: Procédure de calcul des températures lors du passage	154
Figure IV-5 : Schéma de la méthode ADI	154
Figure IV-6 : Schéma aux conditions limites	155
Figure IV-7: Maillage associé à la méthode ADI	159
Figure IV-8: Schéma principe de la procédure d’inversion.....	1
Figure IV-9: (a) Evolution de la température pour deux sollicitations.....	169
Figure IV-10 (c): Sensibilité des paramètres pour la période de 1000s à la fin.....	172
Figure IV-11 : Evolution de la sensibilité à la diffusivité α	174
Figure IV-12: Interprétations géométriques du simplexe en petites dimensions.....	176
Figure IV-13 : Schéma de la méthode du simplexe initial.....	177
Figure IV- 14 : Validation de la procédure d’inversion pour	178
Figure IV- 15: (a) Courbe de la température numérique ;	180
Figure IV- 16: Photos des échantillons	181
Figure IV- 17: Evolution de la température simulée et mesurée (chauffage de 10min).....	183
Figure IV- 18 : Evolution de la température simulée et mesurée	185

Table des tableaux

Chapitre I :

Tableau I- 1: Méthodes développées dans ACTENA.....	29
Tableau I- 2 : Avantages et inconvénients de la thermographie IR.....	38
Tableau I- 3: Classement des domaines spectraux dans l'infrarouge	40
Tableau I- 4 : synthèse des avantages et inconvénients des différents contrastes	45

Chapitre II :

Tableau II- 1 : Paramètres thermophysiques des matériaux modélisés	65
Tableau II- 2 : paramètres géométriques	66

Chapitre IV :

Tableau IV- 1: Résultats de la procédure d'identification	184
Tableau IV- 2: Synthèse des résultats - identification épaisseur/diffusivité.....	186

Nomenclature :

Notation	Désignation	Unité
a	Rayon de l'armature	m
b	Demi-largeur des poutres	m
$C_p (c)$	Chaleur massique	$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
f	Fréquence	Hz
$H(f)$	fonction de transfert	
h_b	coefficient d'échange global	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$
h_c	coefficient de convection	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$
h_g	coefficient d'échange global	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$
h_r	coefficient d'échange radiatif	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$
Im	Partie imaginaire	
Q	Source volumique interne	$W \cdot m^{-3}$
q_{conv}	Perte de chaleur surfacique par convection	$W \cdot m^{-2}$
q_n	Flux de chaleur	$W \cdot m^{-2}$
q_{rad}	Perte de chaleur surfacique par rayonnement	$W \cdot m^{-2}$
q_s	Energie d'une source extérieure	$W \cdot m^{-2}$
Re	Partie réelle	
T	Température	°C ou K
$T_{b, \infty}$	Température ambiante	K
$T_{i,j(mes)}^n$	Evolution de la température mesurée	°C
$T_{i,j(sim)}^n$	Evolution de la température simulée	°C
ΔT	Variation de température	°C ou K
t	Temps	s
Δt	Pas de temps	s
x, y, z	Coordonnées cartésiennes	
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Variations spatiales du paramètre T	

Vecteurs et matrices :

Notation	Désignation	Unité
A, B	Matrices tridiagonales des paramètres	
C_a	Contraste absolu	°C
C_n	Contraste normalisé	
C_r	Running Contraste	
C_s	Contraste standard	
$[\overline{G}]$	Matrice de l'énergie	
g_{ij}	Densité d'énergie	W.m ⁻³
$\overline{g}_{ij}$	Moyenne des densités d'énergie aux nœuds	W.m ⁻³
R_A, R_B	Paramètres des matrices	
$[T]^n, [T]_j^{n+1}$	Matrice des températures	
X_{pi}	Vecteur des coefficients de sensibilité	

Indices et exposants :

Notation	Désignation	Unité
0,1,2,...,n	Indique le paramètre considéré	
i, j, k	Index	
M_n	Nombre de nœuds	
max, min	Indice	
N	Nombres entiers (nombres de lignes, de colonnes ou de points de mesure)	
$[\]^T$	Transposé	

Symboles grecques :

Notation	Désignation	Unité
$\lambda, \lambda_a, \lambda_b$	conductivité thermique	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	masse volumique	$Kg \cdot m^{-3}$
μ	Perméabilité magnétique	$H \cdot m^{-1}$
φ_s	Flux surfacique	$W \cdot m^{-2}$
α	diffusivité thermique	$m^2 \cdot s^{-1}$
σ	Constante de Stephan-Boltzmann	$W \cdot m^{-2} K^{-4}$
ε	Émissivité	

Introduction

Introduction

L'utilisation d'éléments métalliques pour renforcer les structures en béton est apparue avant le début du XXème. Pour permettre la réalisation d'ouvrages de grande portée, la seule utilisation d'armatures passives n'était plus suffisante. Au début du siècle dernier, la technique du béton précontraint a fait son apparition. Les performances mécaniques accrues en traction de structures comprimées en béton ont permis de repousser les limites d'utilisation du matériau. L'usage du procédé s'est répandu. Dans la période qui a suivi la seconde guerre mondiale, de nombreux ouvrages d'art ont été construits grâce à cette technique.

La mise en œuvre est maintenant bien maîtrisée et sur les ouvrages récents le procédé garantit un maintien à long terme de ses propriétés. Pour une partie importante du parc plus ancienne, peuvent apparaître des pathologies graves qui mettent en jeu la stabilité même des édifices. La mauvaise qualité de l'injection des gaines après tension des câbles est une des problématiques sérieuses rencontrées. Les câbles métalliques ne sont dans ce cas pas protégés et les zones non injectées créent des poches où l'humidité peut s'accumuler. Un phénomène de corrosion peut s'initier avec toutes les conséquences qui peuvent en découler. Le risque existe. Les gestionnaires de parc sont donc confrontés au problème de l'évaluation de leurs ouvrages. Si la technique de la précontrainte externe existe, pour la majorité des applications, les câbles sont noyés dans le béton. Il est donc très important de pouvoir mettre à disposition des méthodes de contrôle non destructives des éléments en béton précontraint adaptées à cette configuration. Une technique efficace a été expérimentée, il s'agit de la gammagraphie. La gammagraphie permet de réaliser une radiographie qui est très instructive sur l'état interne d'un élément en béton. Elle présente toutefois un inconvénient rédhibitoire : l'utilisation d'une source radioactive dangereuse. La mise au point de techniques non destructives qui vont fournir des informations pour formuler un diagnostic est au cœur d'enjeux de première importance.

L'intérêt du sujet a conduit le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Electricité de France à coordonner un projet national co-financé par EDF et l'Agence National pour la Recherche (ANR). Le travail présenté dans ce mémoire a été mené dans le cadre de ce projet intitulé Auscultation des Câbles Tendus Non Accessibles (ACTENA). La détection des vides d'injection était une des cibles visées. Il s'agit de l'objectif poursuivi dans ce travail.

L'étude a été menée au sein du Laboratoire d'Artois Mécanique Thermique Instrumentation qui développe depuis plusieurs années des méthodes d'auscultation d'ouvrages du génie civil basées sur des approches thermiques. L'utilisation de la thermographie infrarouge qui permet d'envisager des méthodes à grand rendement et ne nécessitant pas de contact est une des raisons principales de leur attrait. De nombreux travaux concernant les applications de la thermographie infrarouge pour l'auscultation ont été développés. Elles exploitent généralement l'observation des températures d'une surface à laquelle un chauffage externe à la structure est appliqué. Le principe retenu pour l'auscultation des câbles noyés dans le béton consiste à provoquer un chauffage interne par la partie métallique et à suivre l'évolution du champ de température à la surface de l'élément en béton avec l'ambition d'en déduire des informations sur l'état de la partie sollicitée. L'approche CIDETI (pour Chauffage Interne Détection Externe par Thermographie Infrarouge) a été expérimentée pour la première fois par X. Maldague et B. De Halleux. Une étude reprenant ce principe a été effectuée par Christopher Ostrowski au sein du laboratoire. La génération de chaleur dans les câbles était provoquée par le passage d'un courant électrique de forte intensité (plusieurs centaines d'ampères). La méthode donne des résultats intéressants mais présente des inconvénients qui rendent difficile son application sur ouvrage réel. Le mode de chauffage nécessite un accès au câble. Même si l'ouverture de fenêtres dans le matériau se pratique, on ne peut pas envisager de les multiplier. Le contact électrique au niveau des câbles pose également un problème car l'acier est très conducteur et on peut estimer que la résistance électrique des contacts est largement supérieure à celle des câbles. L'essentiel de la dissipation de chaleur s'observe à ce niveau et provoque des élévations de températures inadmissibles. L'approche est de plus en contradiction avec les objectifs du projet axé sur la non accessibilité des aciers.

Les réflexions ont orienté les travaux vers un chauffage par induction électromagnétique. L'objectif de cette étude est de mettre au point en laboratoire une procédure expérimentale et de traitement des données visant à localiser les câbles et mettre évidence la présence éventuelle de vides d'injection sur des spécimens de taille réduite avant d'essayer la méthode sur un ouvrage réel en conditions in situ.

Le document est structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique. Après avoir présenté la technique de la précontrainte et son application dans la construction des ouvrages de génie civil, la

problématique des défauts d'injection est introduite. Les différentes méthodes d'auscultation qui font l'objet de développement pour cette application et qui ont été expérimentées dans le cadre du projet ACTENA sont décrites. La suite du chapitre est dédiée à la thermographie infrarouge. Les bases physiques de rayonnement utiles pour la compréhension des travaux sont rappelées et les applications à l'auscultation des ouvrages de génie civil sont exposées. Une dernière partie traite plus particulièrement de l'état des travaux et des connaissances concernant la technique CIDETI pour l'étude la précontrainte.

Le deuxième chapitre développe la partie théorique des travaux. Le phénomène exploité est un problème de transfert thermique complexe dans un système à trois dimensions. Des transferts par conduction, convection et rayonnement se couplent pour aboutir à une distribution de température de surface qui doit être interprétée. La complexité du système conduit à étudier les phénomènes en se basant sur des simulations numériques. Un modèle numérique en éléments finis est élaboré. Les résultats d'un essai préliminaire attirent l'attention sur le caractère fortement non homogène du chauffage. Ce point conduit à modifier le modèle numérique et à s'orienter vers un traitement des thermogrammes dans le domaine fréquentiel.

Le troisième chapitre est destiné à présenter les résultats expérimentaux obtenus sur des spécimens spécialement réalisés pour l'étude de laboratoire. La technique de traitement fréquentiel est appliquée à des essais sur une poutre saine (sans défaut d'injection) et une autre de même dimension dans laquelle un vide a été reproduit. La technique est ensuite expérimenté in situ.

La quatrième chapitre est consacré au développement d'une méthode permettant de déterminer la profondeur du câble ainsi que la diffusivité thermique du béton d'enrobage. Un schéma inverse est développé. Il est basé sur le couplage d'une modélisation en différences finies spécifiquement écrite et d'un algorithme de minimisation de fonction qui permet de façon itérative d'identifier les paramètres recherchés. La méthode est expérimentée sur le spécimen sain.

Chapitre I

I. Contexte

I.1 La problématique d'ACTENA

Ce travail de thèse prend place dans le cadre du programme de recherche sur l'Auscultation des Câbles Tendus Non-Accessibles, dont l'acronyme est ACTENA [CHFO]. Ces travaux se sont déroulés de 2005 à 2008 et ont visés à développer des méthodes d'auscultation des structures en béton précontraint. La démarche générale du projet a consisté à engager plusieurs développements en parallèle sur la problématique du diagnostic de la pérennité de la précontrainte.

Le tableau I-1 reprend l'ensemble des sept méthodes qui ont été développées dans le cadre d'ACTENA et leur assigne les objectifs recherchés. Certaines méthodes ont des objectifs communs, c'est le cas de la thermographie infrarouge et de l'impact-écho dont les travaux se sont focalisés sur la détection des défauts d'injection et la localisation des gaines de précontrainte

Méthodes	Objectifs
Réflectométrie d'ondes acoustiques	Repérage des ruptures de câbles et de la corrosion
Réflectométrie d'ondes électromagnétiques	
Méthode RADAR	
Acousto-élasticité	Détermination des contraintes résiduelles dans le béton et les câbles
Emission acoustique	Détection et surveillance de l'activité corrodante et de la rupture des câbles
Impact-écho	Détection des défauts d'injection et localisation des gaines de précontrainte
Thermographie infrarouge	

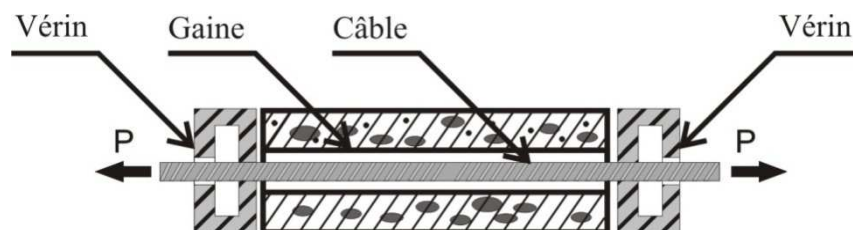
Tableau I- 1: Méthodes développées dans ACTENA

I.2 Les différents types de précontrainte

L'invention du béton précontraint est une innovation majeure dans le domaine des techniques de construction. La paternité de cette invention est attribuée sans conteste à l'ingénieur Français Eugène Freyssinet (1879-1962) [CHAU] qui a déposé les premiers brevets en 1928. L'idée de la précontrainte du béton découle du constat que « le béton résiste mieux aux efforts de compression qu'aux efforts de traction ». Il est donc apparu intéressant de le comprimer artificiellement de façon permanente à l'aide de câbles afin qu'il ne travaille pas en traction. Cet effort de compression appliqué au béton est couramment appelé « précontrainte ».

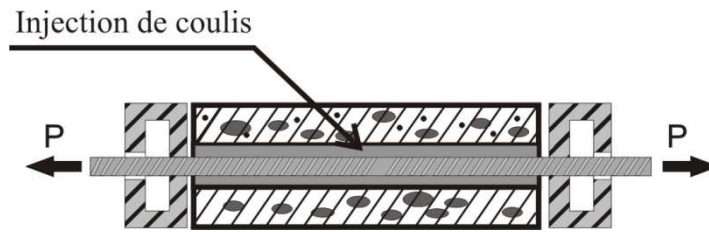
Deux modes de réalisations sont distingués :

- La précontrainte par post-tension consiste à tendre les câbles métalliques après qu'ils aient été placés dans une réservation. Les schémas de la figure I-1 illustrent succinctement trois étapes du processus d'injection du coulis.
- 1.) Les câbles sont tendus par des vérins hydrauliques placés aux extrémités de l'élément en béton.
 - 2.) Un coulis de ciment est injecté dans la réservation. La tension du câble n'est relâchée par les vérins qu'après que le coulis ait suffisamment durci pour pouvoir résister à cet effort. Le câble, le coulis, la gaine métallique et le béton étant solidaires, l'effort de précontrainte se répartit sur cet ensemble.
 - 3.) Aux extrémités de l'élément en béton, les câbles sont maintenus bloqués grâce à une clavette de forme conique qui vient s'insérer dans une tête d'ancrage.



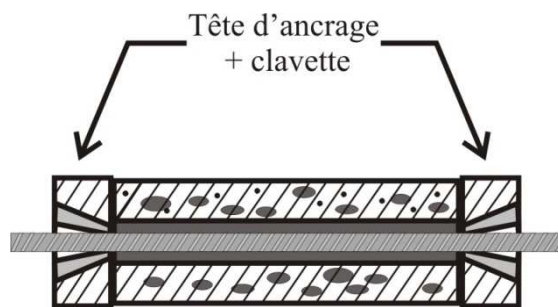
Etape 1 – les câbles sont tendus par des vérins

(a)



Etape 2 – le coulis est injecté dans la gaine

(b)



Etape 3 – le câble est maintenu par des ancrages

(c)

Figure I- 1.a, b et c : – Processus d'injection du coulis

- L'autre mode de précontrainte est appelé par pré-tension car il consiste à couler du béton sur des câbles préalablement tendus entre deux points fixes. Une fois la prise du béton achevée, la tension dans les armatures est relâchée et l'effort de précontrainte s'applique alors à l'ensemble de l'élément en béton. Ce mode de réalisation est également désigné par « fils adhérents ». Ce type de mise en œuvre est souvent réalisé en usine pour des éléments préfabriqués de construction tels que des poutrelles, des dalles, des citernes ou encore des poteaux.

Une distinction doit être faite selon que le système de précontrainte est placé à l'intérieur ou à l'extérieur des éléments en béton. Dans le cadre de ce travail, seule la précontrainte interne sera considérée. Des études portant sur les défauts d'injection dans les gaines de précontrainte externe ont déjà été réalisées [TALM] mais la mise en œuvre de ce type de méthode d'auscultation ne peut s'appliquer à la détermination de l'état d'injection des gaines de précontrainte interne.



Figure I- 2 : (a) Gaine de précontrainte extérieure en PEHD

(b) Détecteur capacitif d'injection de coulis

I.3 Origine des vides d'injection :

Le coulis d'injection joue un rôle très important pour la durabilité des ouvrages en béton précontraint car il doit protéger les câbles de la corrosion. Ces câbles en acier sont chimiquement passivés par l'action du coulis fortement basique. Les zones dans lesquelles il manque du coulis sont appelées « vide d'injection » ou « défaut d'injection » [LWRM]. C'est précisément ce type d'anomalie que nous souhaitons mettre en évidence dans la cadre de ce travail de thèse.

Un défaut d'injection fragilise le câble car celui-ci n'est plus protégé des agents corrosifs tels que l'eau d'infiltration qui peut-être chargée de polluants ou de sels issus du déverglaçage [AUDE] [DEAA] [RACG]. Cette corrosion peut conduire à la rupture totale ou partielle du câble et remettre ainsi en cause la sécurité de l'ouvrage.

Lors de l'autopsie de poutres de pont réalisées en béton précontraint, il apparait souvent que la majorité des défauts d'injection se situe dans les parties hautes de la gaine. Ces anomalies ne peuvent être constatées jusqu'à présent que par des campagnes d'auscultation par gammagraphie ou radiographie.

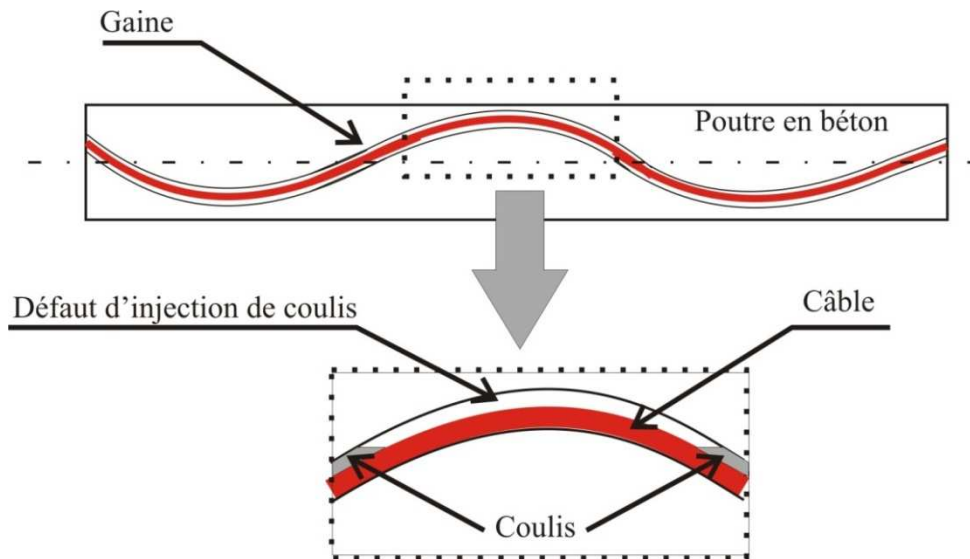


Figure I- 3 : Exemple de défaut d'injection dans une gaine de précontrainte

I.4 Etat de l'art des techniques existantes

I.4.1 Radiographie :

Un des constat qui a motivé le lancement d'un programme de recherche tel qu'ACTENA est qu'il n'existe pas actuellement de technique d'auscultation capable de remplacer la radiographie pour repérer les gaines de précontrainte et évaluer leur état d'injection.

La technique radiographique [WANI] [BRAB] met en œuvre des rayonnements ionisants émis par des radioéléments artificiels (cobalt, iridium) ou X produits par des accélérateurs. Le projecteur chargé du diffuser le rayonnement et le film radiographique sont placés de part et d'autre de la paroi à ausculter. Le film est collé contre la structure alors que l'émetteur est tenu à une distance de l'ordre du mètre de celle-ci. Le principe de cette méthode repose sur l'atténuation du rayonnement en fonction de la nature et de l'épaisseur des matériaux traversés, ce qui se traduit sur le film une fois développé par une variation de sa densité optique. La lecture se fait donc en niveaux de gris qui traduisent des informations concrètes sur la structure. L'interprétation des radiogrammes requière cependant une expertise se situant à la fois dans les domaines des procédés de construction des ouvrages d'art et des pathologies ou désordres s'y rapportant.

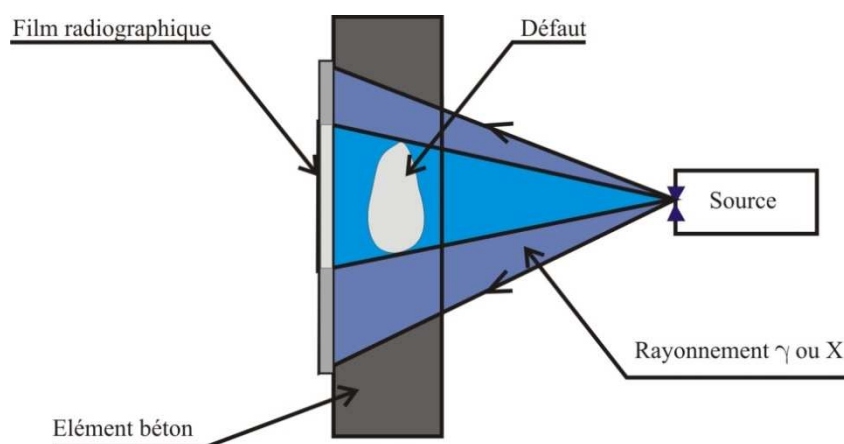


Figure I- 4 : Exemple de mise en place de la radiographie γ ou X

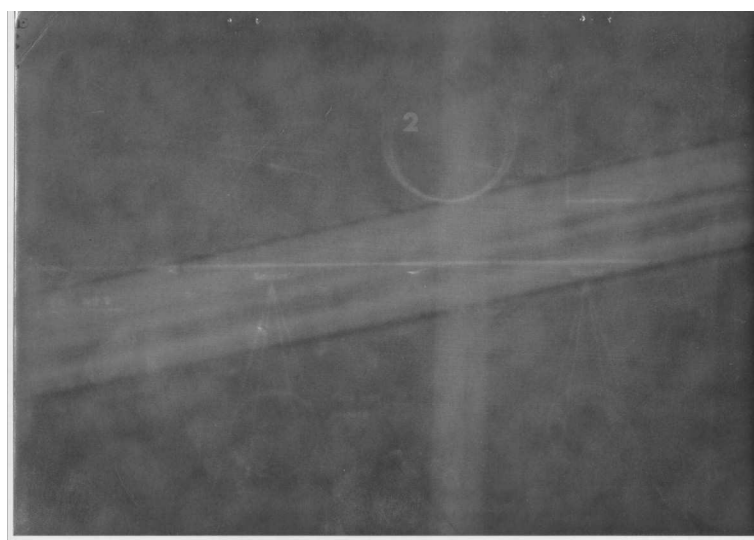


Figure I- 5 : Exemple d'un cliché radiographique d'un câble de précontrainte

Issu de la campagne d'auscultation de Merlebach (LRPC de Blois - 1975) [CRIC] [NFXE]

Les inconvénients majeurs de la radiographie sont liés à la manipulation de sources radioactives civiles : radioprotection des opérateurs et des usagers en général, nécessité de fermer les ouvrages à la circulation. Cette technique impose également d'avoir accès aux deux faces de l'élément à ausculter. Malgré ces inconvénients, elle reste une méthode d'auscultation fiable et reconnue. Il est à noter qu'une évolution notable dans la radiographie a été l'arrivée de capteurs numériques plans sensibles aux rayonnements, ce qui évite d'avoir recours à des films, à leur développement ainsi qu'à leur numérisation. Le stockage des informations se fait alors directement sous forme numérique et il est alors plus aisé de les traiter informatiquement.

I.4.2 Méthode Impact-Echo :

L'Impact-Echo est une méthode de contrôle non destructive pour le béton et la maçonnerie basée sur la propagation d'une onde de choc sonore dans la structure à ausculter [SAST] [PEDD] [LIYE]. Une bille est souvent utilisée pour générer le signal de stimulation. Son diamètre est choisi en fonction de la profondeur et de la résolution souhaitées. La réponse de la zone auscultée est mesurée par un capteur de déplacement ou d'accélération. Un système d'acquisition enregistre la réponse temporelle et une analyse fréquentielle permet de repérer les défauts et interfaces présentes dans ces structures. La figure I- 6 reprend l'ensemble de ces éléments.

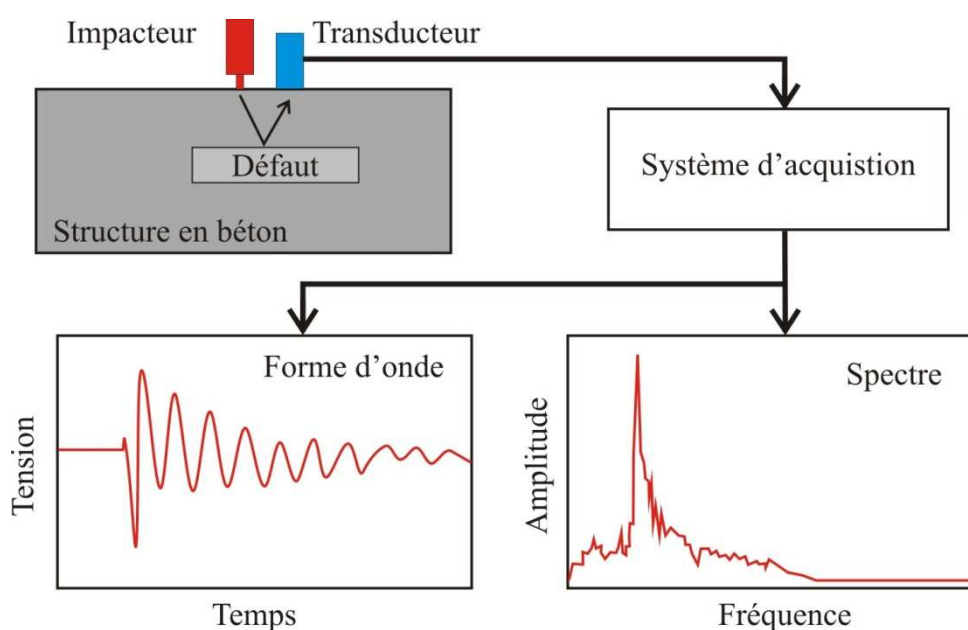


Figure I- 6 : Principe de la méthode Impact-Echo

Le signal reçu par le capteur se compose de l'onde de surface qui domine au début puis d'oscillations qui correspondent aux allers-retours de l'onde de compression entre la surface et le fond de la dalle. L'exploitation des données est réalisée dans le domaine fréquentiel. Le pic le plus énergétique correspond à la fréquence de ces allers-retours. La détermination de l'épaisseur ou de la profondeur d'un défaut dans une dalle de béton se fait par la relation simple :

$$L = \beta \frac{V}{n \cdot F} \quad \text{I- 1}$$

Avec : L est exprimé en m,

F la fréquence de résonance déduite des pics de la figure I-6 en Hertz.

V la vitesse des ondes de compression dans le béton m/s

N est égal à 2 si le matériau sous le béton est d'impédance mécanique plus faible (air) et égal à 4 dans le cas contraire (acier).

n est un facteur de forme égal à 0.96 dans le cas de la mesure de l'épaisseur d'une dalle de béton.

Si la vitesse ne peut être obtenue par calibrage sur une zone d'épaisseur connue, elle peut être mesurée à l'aide d'un second capteur avec un dispositif adapté. Un défaut sera caractérisé par un décalage de la fréquence caractéristique de l'épaisseur et/ou l'apparition d'un pic de fréquence qui correspondra aux allers-retours de l'onde entre la surface et le défaut. Cette fréquence permettra par ailleurs de remonter à sa profondeur.

Validée par l'ASTM [ASTM], l'Impact-Echo peut, sans en affecter l'intégrité, être employé pour réaliser des mesures d'épaisseur de dalles ou de plaques en béton. Cette méthode permet également de localiser et évaluer la taille de défauts tels les fissures, délaminages, vides, altérations et décollements au sein de structures en béton simple, armé ou précontraint. Elle sert à l'auscultation de chaussées et trottoirs (vides dans la couche de forme), d'ouvrages maçonnés dont les briques ou les pierres sont scellées au mortier (épaisseur, présence de fissures et vides, etc.).

L'impact écho reste une méthode ponctuelle car la sollicitation et l'analyse vibratoire ne sont faites qu'en un seul point. Les éléments à ausculter doivent alors être maillés et l'analyse conduite point par point.

Dans le cadre du programme ACTENA, les travaux menés sur la méthode impact-écho sont destinés à la détection des vides d'injection dans les gaines de précontrainte. Le LCPC a développé un banc forain semi-automatique pouvant ausculter des surfaces de 4m² [BAAP]. L'impact est généré par un dispositif électropneumatique et la réponse de la surface est enregistrée par un vibromètre laser. Les résultats sont enregistrés par un ordinateur pour une exploitation ultérieure.

Une campagne d'acquisition systématique de données sur un grand mur test comportant de nombreuses configurations de défauts d'injections des gaines a été effectuée. L'exploitation des données repose sur le pointé de fréquences sur le spectre de la vitesse particulière due à l'impact

en surface du béton. Les outils de traitement par analyse en ondelettes développés par l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées sont en phase d'optimisation. Cependant, des travaux récents ont modifié sensiblement la compréhension physique de cet essai – passage d'une interprétation en réflexions multiples d'ondes de compressions à une analyse en ondes de Lamb – ce qui fait que le pointé des fréquences doit être reconsidéré : il y a plus de fréquences à pointer, certaines sont porteuses d'information, mais d'autres peuvent être des artefacts liés à la source de l'impact, ce qui peut augmenter le taux de fausse alarmes de la méthode. La méthode reste donc à perfectionner sur la détection des vides dans les gaines de précontraintes.



Figure I- 7 : Exemple de banc MIEL développé par le LCPC

I.5 La thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est définie d'après [FABR] comme étant une technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène observée dans un domaine spectral de l'infrarouge. Si la caméra est étalonnée et que les paramètres environnementaux de la scène thermique sont connus, les températures de surfaces de l'objet observé peuvent être mesurées. Les avantages et les inconvénients de la thermographie infrarouge couramment cités dans la littérature sont résumés dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
Mesure sans contact	Connaissance de paramètres environnementaux (Températures, Distance, Emissivité des surfaces, incidences de l'angle d'observation...)
Cartographie 2D et évolution temporelle des températures	
Méthode surfacique à grand rendement	Conditions météorologiques favorables
Mise en œuvre rapide	
Hautes températures possibles	Accessibilité de la scène thermique
Possibilité de mesure sur des pièces en mouvement	

Tableau I- 2 : Avantages et inconvénients de la thermographie IR

Dans le cadre du développement d'une méthode d'auscultation des armatures métalliques du béton, il est parait évidemment intéressant de pouvoir bénéficier d'une méthode rapide à déployer et offrant un rendement d'auscultation important, on peut imaginer plusieurs centaines de m² par jour. Bien souvent, une technique sans contact évite l'installation de capteurs et de leur câblage. L'obligation de maîtriser les paramètres environnementaux ne revêt pas une importance capitale car dans le cas du contrôle non destructif seuls des écarts relatifs peuvent suffire. Il faut cependant préciser qu'une auscultation par thermographie infrarouge ne peut être faite par temps pluvieux et qu'il est alors nécessaire de protéger la caméra et la scène thermique observée par une bâche ou une tente.

I.5.1 Le rayonnement électromagnétique [GAUS]:

Le détecteur d'une caméra infrarouge est sensible au rayonnement électromagnétique, celui-ci provient de la matière qui émet et absorbe en permanence des rayonnements électromagnétiques lorsque la température est au dessus du zéro absolu (0 K). Le processus d'émission est lié à l'agitation moléculaire interne de la matière, génératrice de transitions radiatives pour les particules porteuses de charges électriques. Si la charge électrique subit une accélération, la relation de Maxwell montre qu'il apparaît une énergie libérée sous la forme de rayonnement

électromagnétique. Une élévation de température accroît l'agitation moléculaire au sein de la matière et favorise l'accélération des particules porteuses de charges électriques, génératrice de rayonnement.

L'énergie libérée E en Joule, sous forme radiative conditionne la longueur d'onde d'émission λ de la matière :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \text{I- 2}$$

$h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ J.s}$: constante de Planck

$c = 299792458 \text{ m.s}^{-1}$: célérité de la lumière

De même, il est intéressant de rappeler que la longueur d'onde λ est inversement proportionnelle à la fréquence f en Hertz :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{I- 3}$$

Cette répartition permet de classer les rayonnements en fonction de leur longueur d'onde ou inversement de leur fréquence :

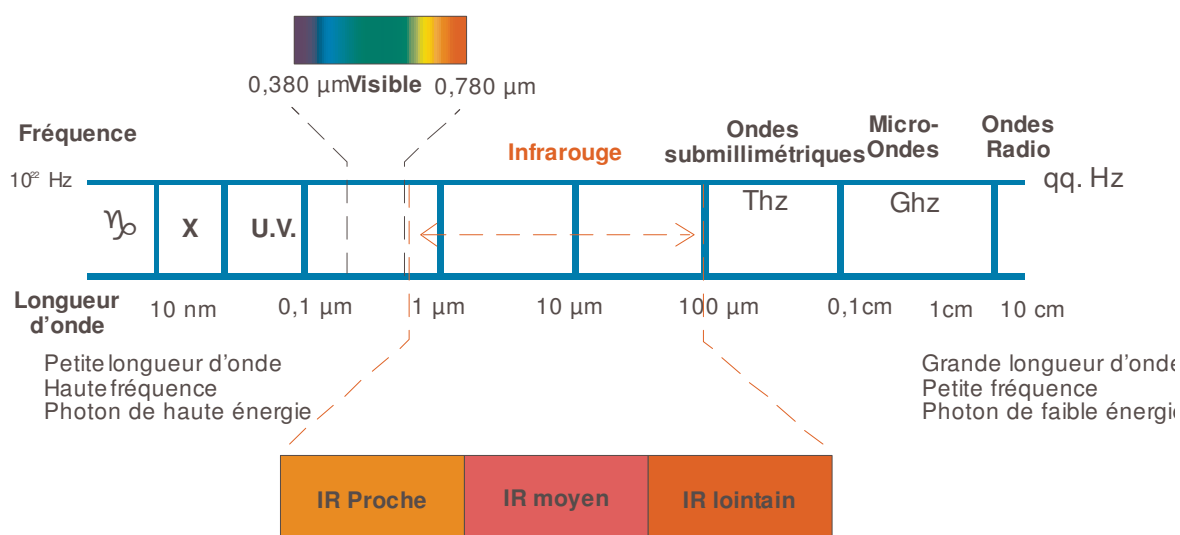


Figure I- 8 : Répartition spectrale du rayonnement électromagnétique

La longueur d'onde du rayonnement émis croît en raison inverse de l'énergie mise en cause dans la transition. Il est important de noter à ce sujet que dans le domaine infrarouge, les longueurs d'onde sont grandes, et l'énergie radiative correspondante faible.

I.5.2 Le rayonnement infrarouge :

Le spectre de rayonnement infrarouge est divisé en un certain nombre de régions arbitraires, correspondant à des domaines de fonctionnement des générateurs ou des récepteurs appropriés. Le spectre infrarouge correspond au domaine d'émission de la matière dont les températures sont celles trouvées généralement à la surface de la Terre.

Le spectre infrarouge est divisé en trois grandes régions suivant les détecteurs utilisables pour les déceler :

Domaine spectral	Détecteurs
Infrarouge proche 0.7-2 μm	émulsions spécialisées, détecteur (AsGa)
Infrarouge moyen 3-5 μm	Photoconducteurs (InSb, InP, MCT)
Infrarouge lointain 8-14 μm	microbolomètres, photoconducteurs (MCT), Puits quantiques (QWIP)

Tableau I- 3: Classement des domaines spectraux dans l'infrarouge

I.5.3 Bilan radiométrique d'une scène thermique :

La thermographie infrarouge consiste, à partir de la mesure du rayonnement émis par un objet dans une des bandes spectrales de l'infrarouge, à visualiser sous forme de thermogrammes la répartition spatiale et l'évolution temporelle des températures apparentes de surfaces d'un objet.

La caméra infrarouge mesure et transcrit par l'image les rayonnements infrarouges émis par un sujet. Le fait que le rayonnement soit une fonction de la température de surface du sujet permet à la caméra de calculer et d'afficher cette température en un point de la surface de l'objet étudié.

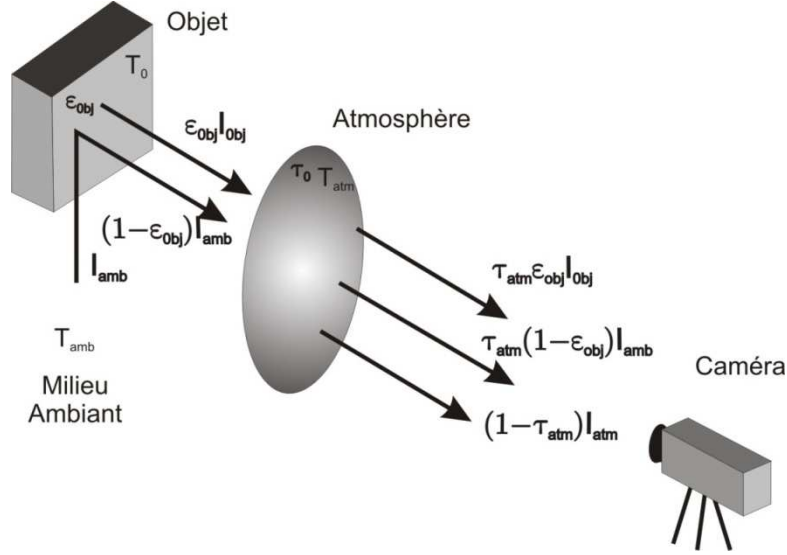


Figure I- 9 : Scène thermique vue par la caméra IR

En considérant les différents éléments de la Figure I-9, le bilan radiométrique au niveau de la caméra doit prendre en compte le rayonnement propre de l'objet, celui de l'environnement et enfin celui de l'atmosphère. La caméra est placée dans un environnement dont la température moyenne est notée T_{atm} . La scène thermique est composée d'un objet à la température T_0 et présente une surface d'émissivité ϵ_0 . Le flux rayonné par l'objet est la somme de son émission propre, soit $\epsilon_0 I_0$ et de la partie du flux ambiant qui est réfléchi par l'objet, soit $(1 - \epsilon_0) I_{amb}$. La propagation de ce flux en direction de la caméra est affectée par son passage au travers de l'atmosphère, soit le coefficient de transmission de l'atmosphère. Celle-ci n'étant pas totalement transparente, elle en absorbe une partie, qu'elle va réémettre soit $(1 - \tau_{atm}) I_{atm}$. Le bilan radiatif de ces transferts entre la caméra, l'objet et son environnement conduit à l'équation radiométrique Eq.I- 4

$$I_{cam} = \tau_{atm} \epsilon_{obj} I_{obj} + \tau_{atm} (1 - \epsilon_{obj}) I_{amb} + (1 - \tau_{atm}) I_{atm} \quad \text{I- 4}$$

A noter que l'équation radiométrique générale peut être considérée comme indépendante de la température de la caméra T_{cam} si celle-ci est compensée en dérive.

Le coefficient de transmission atmosphérique τ_{atm} dépend à la fois de la distance d'observation et des conditions atmosphériques. Dans les conditions expérimentales du laboratoire la caméra et celles rencontrées sur site (Margenne, Mur d'essais de LIER), elle est toujours placée à courte

distance de l'objet. En considérant alors l'atmosphère comme parfaitement transparente, la valeur du coefficient de transmission est égale à l'unité. Ce qui simplifie l'équation radiométrique et conduit à l'équation Eq.I-5

D'où,

$$I_{cam} = \varepsilon_{obj} I_{obj} + (1 - \varepsilon_{obj}) I_{amb} \quad \text{I- 5}$$

Lors des différents essais qui ont eu lieu dans ce travail, la faible distance entre la caméra et la scène thermique, de l'ordre de 1 à 2m, permet de considérer un coefficient de transmission de 100% et donc de négliger le rôle joué par l'atmosphère.

L'émissivité du béton est référencée dans les tables comme valant 0.92.

I.6 La thermographie infrarouge appliquée aux contrôles non destructifs :

Actif ou passif :

Les méthodes de contrôle non destructif par thermographie infrarouge se développent depuis une trentaine d'années à mesure que la technologie des caméras et les moyens de calculs évoluent. Tous les secteurs industriels sont concernés : aéronautique, automobile, génie civil, maintenance électrique, électronique, agroalimentaire... Les principaux avantages de la thermographie infrarouge sont d'être une méthode d'auscultation surfacique et sans contact entre l'objet et la caméra [XPVM].

La majorité des contrôles thermographiques se déroulant dans les domaines du Génie Civil se fait sur un mode d'auscultation dit « passif ». L'objet à ausculter est supposé être dans un état thermique permettant à l'opérateur de relever des gradients thermiques à sa surface qui traduisent d'éventuelles anomalies. Ces relevés doivent être réalisés lorsque les écarts entre la température de l'objet et celle de son environnement sont suffisamment importants. C'est par exemple le cas lors de campagnes d'auscultation par thermographie infrarouge de bâtiments qui ont lieu en période froide destinées à l'évaluation des déperditions thermiques des bâtiments. Ce domaine d'intervention est actuellement en plein essor aux regards des réglementations thermiques en cours ou à venir.

La thermographie infrarouge active s'est quant à elle, plus particulièrement développée dans le domaine du CND des matériaux ou de pièces mécaniques. Dans ce mode d'auscultation, la sollicitation thermique appliquée à l'élément à étudier est contrôlée. Les types de stimulation employés peuvent être, soit une sollicitation thermique directe imposée par des lampes, des flashes ou des radiateurs, soit l'application d'une sollicitation indirecte telle que l'induction, les micro-ondes ou des vibrations mécaniques et qui provoquera des effets thermiques.

L'auscultation sur un mode actif est plus particulièrement orientée sur la localisation de défauts ou la caractérisation des propriétés thermophysiques. La sollicitation thermique étant connue et maîtrisée, il est possible de repérer et de quantifier les hétérogénéités présentes dans les structures contrôlées au moyen de traitements appropriés de la réponse thermique. Les objectifs de ces contrôles visent principalement à déterminer la profondeur et l'étendue du défaut.

Une importante littérature est disponible sur les différentes méthodes de contrôle par thermographie infrarouge. Ces dernières sont classées en fonction du type de la sollicitation appliquée et le traitement mathématique subit par les thermogrammes.

I.6.1 La Thermographie Pulsée : [GLSB] [MABR] [SHEP]

Dans ce type d'auscultation, une sollicitation thermique impulsionnelle est appliquée à la surface du spécimen. Cette sollicitation peut être appliquée par différents moyens : lampes, flashes, faisceaux laser, jets d'eau ou d'air. La durée du pulse varie de quelques μ s à plusieurs secondes selon l'épaisseur et les propriétés thermiques du matériau à inspecter. Le front de chaleur appliqué à la surface du spécimen se diffuse ensuite vers l'intérieur. La présence d'anomalies à l'intérieur du spécimen va modifier le champ des températures de surface. Une caméra infrarouge, placée en face de ce spécimen, enregistre les évolutions de température à des intervalles réguliers.

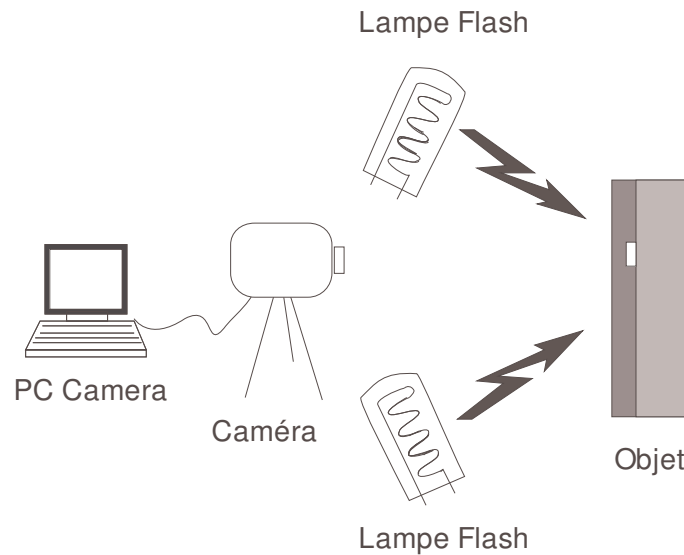


Figure I- 10 : Dispositif expérimental pour la thermographie pulsée

A partir de la série de thermogrammes, l'analyse de la décroissance temporelle des températures peut conduire à l'apparition de zones suspectes pouvant présenter des défauts internes. Cette méthode basique a été améliorée par l'utilisation de différents algorithmes de contraste thermique qui permettent d'augmenter la visibilité d'un défaut, la qualité des thermogrammes, et d'en extraire des informations qualitatives (position, géométrie du défaut). Il existe différents algorithmes de contrastes thermiques, le choix s'effectue en fonction de l'application et des conditions expérimentales.

Une synthèse des avantages et inconvénients des différents types de contraste est présentée dans le tableau suivant :

	Contraste	Avantages	Inconvénients
Absolu $C^a(t)$	$C^a(t) = \Delta T(t) = T_{def}(t) - T_s(t)$	Meilleure visualisation des défauts par rapport à l'environnement	Linéairement relié à l'énergie absorbée, Limite les comparaisons d'expérience
Running $C^r(t)$	$C^r(t) = \frac{C^a(t)}{T_s(t)} = \frac{T_{def}(t) - T_s(t)}{T_s(t)}$	Moins affecté par les propriétés optiques surfaciques Dépend moins de l'énergie absorbée	Traitement apparemment très sensibles aux bruits de mesure
Normalisé $C^n(t)$	$C^n(t) = \frac{T_{def}(t)}{T_s(t_m)} - \frac{T_s(t)}{T_s(t_m)}$	Calculé à partir du temps de température maximum t_m est fonction de la stimulation	t_m doit être identifié Traitement apparemment très sensibles aux bruits de mesure
Standard $C^s(t)$	$C^s(t) = \frac{T_{def}(t) - T_s(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)}$	Supprime la contribution de l'environnement	Normalisé par rapport à l'environnement Traitement apparemment très sensibles aux bruits de mesure

Tableau I- 4 : synthèse des avantages et inconvénients des différents contrastes [XPVM]

T_{def} , température de surface d'une zone altérée,

T_s , température de surface d'une zone saine,

t_m , instant où la température est maximale,

t_0 , début de la stimulation.

L'avantage de cette méthode de thermographie pulsée réside principalement dans sa rapidité d'analyse. Cette méthode a démontré son efficacité dans les secteurs de la construction et de la maintenance aéronautique [AADH]. Le point délicat lié à l'utilisation d'algorithmes de contraste est la connaissance a priori de zones saines qui servent de références à ces observations en relatif [XPVM] [GIMM].

I.6.2 Thermographie modulée :

La thermographie modulée est souvent appelée « lock-in » car elle fait intervenir le principe de démodulation synchrone [BRLA] [SAKU]. Lors de ce type d'auscultation, la caméra est placée en face de l'échantillon à ausculter et les thermogrammes sont enregistrés à intervalles réguliers. Le spécimen est soumis à une stimulation thermique sinusoïdale qui est souvent délivrée par des spots dont l'amplitude est modulée sinusoïdalement. Les ondes absorbées se diffusent à l'intérieur du spécimen. La présence d'un défaut interne va modifier ce régime sinusoïdal et par conséquent le champ des températures de surface. En régime permanent, la réponse thermique enregistrée à la surface du spécimen est également sinusoïdale. L'amplitude et la phase des températures de surface dépendent de la fréquence du signal d'entrée.

Un indicateur sensible pour une telle contribution est l'angle de phase entre le signal d'entrée et la réponse thermique à la surface du spécimen étudié. Si le champ de température est enregistré à intervalles réguliers durant plusieurs périodes, il est possible de calculer à l'aide de la transformée de Fourier, les phases et les amplitudes de chaque point de la surface de l'échantillon vu par la caméra.

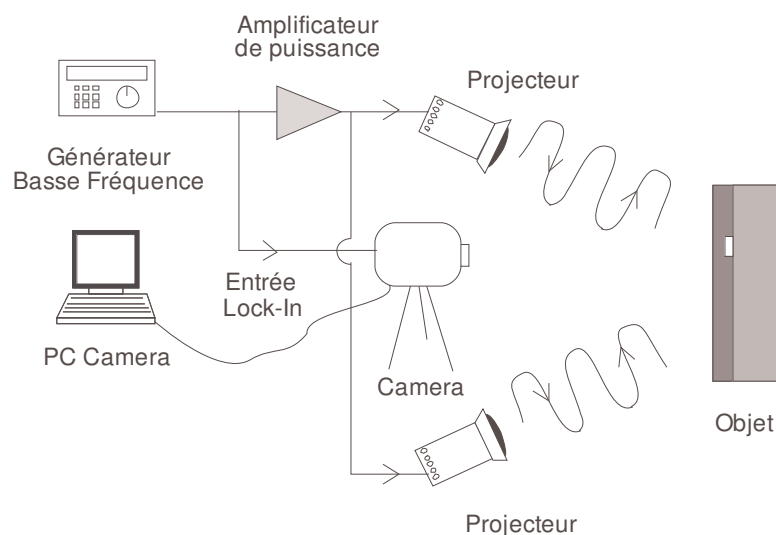


Figure I- 11 : Dispositif expérimental pour la thermographie modulée

Cette technique est issue de la radiométrie photo-thermique modulée [BUWK] (lock-in thermographie) dont le principe est d'étudier le déphasage et l'amplitude de la réponse en

température d'un spécimen par rapport à une sollicitation thermique sinusoïdale en régime établi.

La profondeur de pénétration de la chaleur déposée est fonction de la fréquence du signal d'excitation. L'amplitude est fonction des propriétés optiques infrarouges (absorption, émission) alors que le déphasage est indépendant des propriétés thermiques de la surface du spécimen.

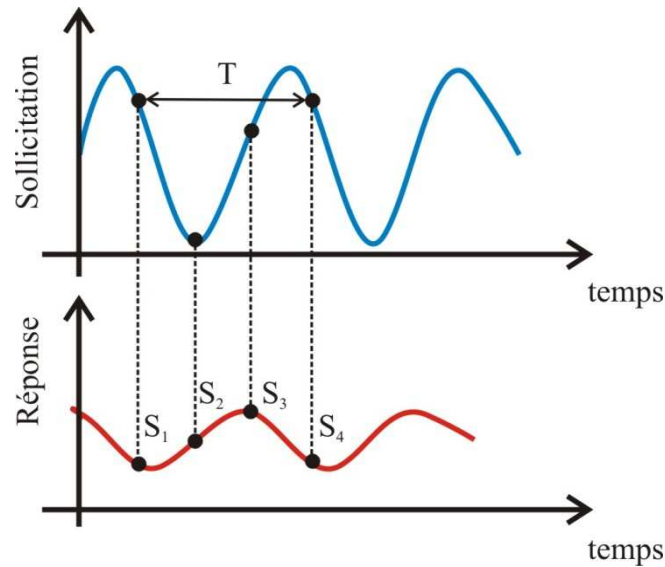


Figure I- 12 : Sollicitation et réponse thermique d'un point en régime sinusoïdal

L'analyse de Fourier appliquée à chaque pixel fournit l'amplitude et la phase de la réponse locale :

Soit en régime sinusoïdal,

$$\varphi = \text{Arctg} \frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} \text{ et } A = \sqrt{(S_3^2 - S_1^2) + (S_2^2 - S_4^2)} \quad \text{I- 6}$$

Cette méthode de lock-in est relativement lente car elle demande une auscultation du spécimen sur plusieurs périodes et pour différentes fréquences correspondant à différentes profondeurs de pénétration.

La profondeur de pénétration δ en [m] est donnée par la relation suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{a}{\pi f}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \rho C_p f}} \quad \text{I- 7}$$

Avec α , la diffusivité thermique en $[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$

f , la fréquence de la sollicitation en $[\text{Hz}]$ et λ , C_p , ρ respectivement la conductivité thermique $[\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$ et la capacité calorifique $[\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$ du matériau étudié, la masse volumique du matériau en $[\text{kg}.\text{m}^{-3}]$

La détection synchrone augmente le rapport signal sur bruit mais la durée des mesures est beaucoup plus longue que pour les méthodes impulsionnelles. La contrainte majeure provient du fait que l'épaisseur de la couche inspectée sous la surface est liée à la fréquence de modulation (la profondeur à laquelle se situe le défaut n'étant pas connue, il faut expérimenter différentes fréquences). Il est nécessaire d'avoir un module de « lock-in » pour synchroniser les acquisitions avec le signal d'excitation.

I.6.3 La thermographie à Phase Pulsée [MALM]

Le principe de la Thermographie à Phase Pulsée (TPP) est basé sur la combinaison d'une sollicitation thermique impulsionnelle appliquée au spécimen à ausculter et d'une analyse fréquentielle de l'évolution des phases et des amplitudes des températures. Cette méthode d'analyse est souvent présentée comme la réunion des concepts de la thermographie modulée (Lock-In) et de la thermographie pulsée (Pulse Thermography).

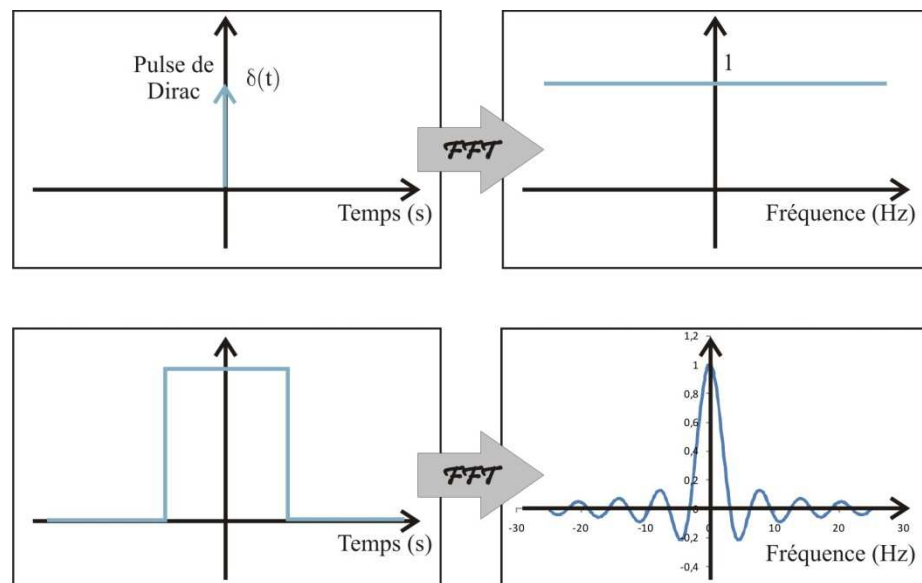


Figure I- 13 : FFT d'une impulsion de Dirac et de la Fonction rectange

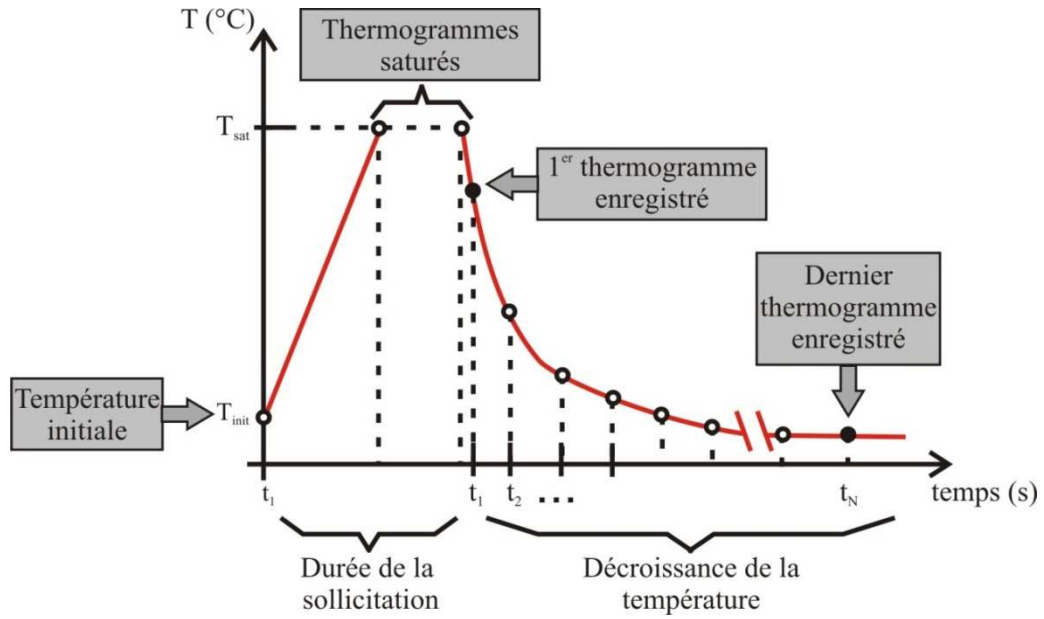


Figure I- 14 : Evolution schématique de la température d'un point en PPT [IBAR]

La procédure expérimentale peut se résumer à partir des différentes phases de la figure I-14. Le spécimen se trouvant à une température T_{init} est soumis à une sollicitation impulsionnelle, sa température de surface augmente alors brusquement. Les premiers thermogrammes sont enregistrés à partir du moment où la température de surface de l'échantillon se retrouve dans la gamme de températures mesurables par la caméra. La décroissance de la température continue jusqu'à redevenir sensiblement T_{init} .

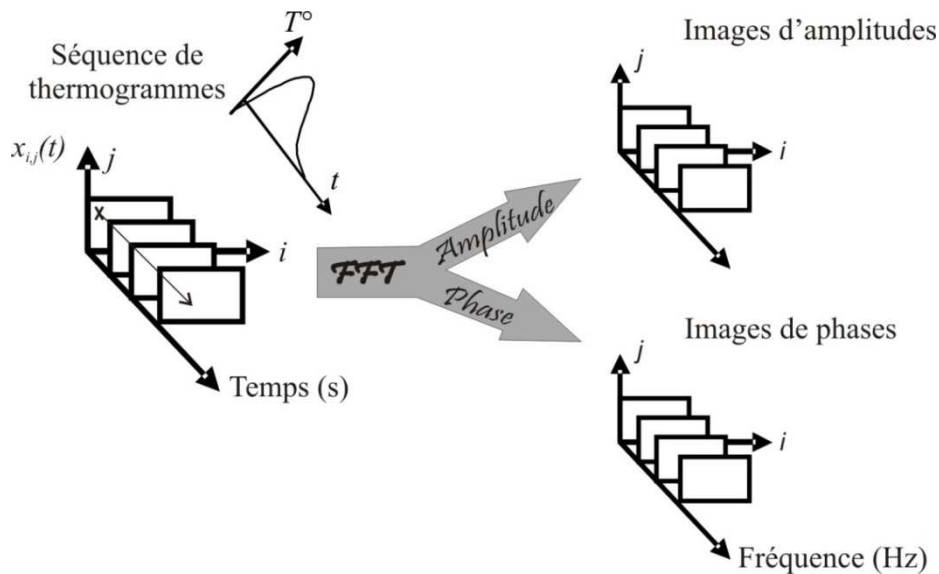


Figure I- 15 : Traitement fréquentiel en PPT

A partir de la série de thermogrammes enregistrés durant la phase de décroissance de la température, il est possible de calculer pour chaque point, la transformée de Fourier de cette évolution. Cette transformée étant une série complexe en fonction de la fréquence, il est possible d'obtenir des images en représentant la phase et l'amplitude en fonction de la fréquence.

Les images des amplitudes sont décrites comme étant plus sensibles aux bruits de mesure et à l'uniformité du chauffage. Les images des déphasages présentent l'avantage d'être moins affectées par l'uniformité du chauffage, les dégradations optiques des caractéristiques spectrales de la surface (variation de l'émissivité) [XPVM]

En Génie Civil, la thermographie à phase pulsée est une technique qui a déjà été employée. Le béton étant un matériau diffusif, la sollicitation est appliquée à la surface du spécimen à l'aide de flashes ou de radiateurs puissants. Dans cette configuration, les pertes thermiques par convection et rayonnement ne sont pas négligeables en surface et représentent un facteur pénalisant en termes de rendement. L'utilisation de sources puissantes, supérieures à 10KW/m^2 conduit des températures atteintes à la surface de l'échantillon, supérieures à 100°C , qui ne sont pas compatibles avec le béton.

Un autre point important est que la totalité de l'évolution en température de la surface du matériau ne soit pas utilisée dans la caractérisation du matériau car l'impulsion doit dans ce cas, être suffisamment puissante et d'une durée suffisamment longue pour qu'une anomalie à l'intérieur de l'échantillon ait un effet sensible sur le champ de température de la surface auscultée.

Plus le défaut est profond et plus la puissance ainsi que le temps d'observation doivent être importants. La profondeur sondée est le paramètre essentiel lors du choix du temps de chauffage.

I.7 La thermographie infrarouge appliquée à la détection des vides de précontrainte :

I.7.1 Sollicitation des armatures métalliques par passage d'un courant électrique :

Dans le cas de câbles accessibles, les premiers essais de détection du tracé des armatures par voie thermographique ont été initiés par De Halleux qui a développé la technique CIDETI (Chauffage Interne et Détection Externe par Thermographies Infrarouge) [HDMM]. Ce procédé de thermographie active repose sur l'échauffement par effet Joules des câbles de précontrainte soumis au passage d'un courant électrique. La chaleur est diffusée à travers le béton jusqu'à la surface de l'élément. Le champ des températures de surface est enregistré par une caméra infrarouge.

L'originalité du procédé repose sur l'échauffement par effet Joule des câbles dû au passage d'un courant électrique. Cette méthode permet de solliciter uniquement et séparément les câbles de précontrainte lorsqu'ils sont accessibles indépendamment, ce qui n'est pas forcément le cas dans toutes les poutres puisque les câbles se rejoignent au niveau de la tête d'ancrage. Les armatures de renforcement n'étant alors qu'indirectement stimulées. Dans le principe, le procédé permet une auscultation complète des ouvrages en un temps très raisonnable mais nécessite d'avoir un accès physique aux câbles. Le chauffage des armatures assuré par un générateur de forte puissance présente certains inconvénients [MARR]. Il n'est pas toujours facile de pratiquer des fenêtres dans les ouvrages d'art et la connexion entre les câbles d'alimentation électrique et ceux de précontrainte requiert d'avoir des résistances de contacts faibles.

Pour ces essais en laboratoire, nous avons confectionné, deux poutres de test d'une longueur de 50cm et d'une section carrée de 10x10cm² (figure I-16).

I.7.2 Thermographie à phases pulsées appliquées à l'auscultation des câbles de précontrainte

Le principe de la méthode CIDETI a ensuite été repris lors du travail de Ch. Ostrowski [OSTR] et les thermogrammes représentant l'évolution des températures de la surface de la poutre auscultée ont été traités par une analyse fréquentielle basée sur la transformation de Fourier.



Figure I- 16 : Vues des poutres confectionnées

Deux poutres ont été confectionnées, l'une sans défaut et l'autre présentant un défaut d'injection sur la moitié de sa longueur. Le défaut est matérialisé par une absence de coulis autour de la barre métallique.

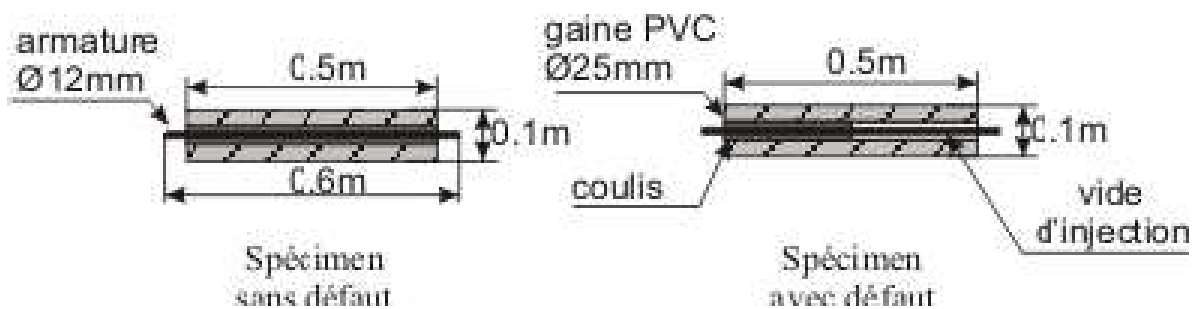


Figure I- 17 : Vues en coupe des éprouvettes confectionnées avec et sans défaut

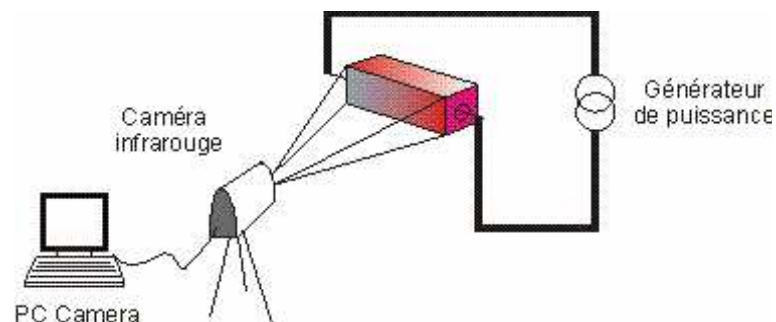


Figure I- 18 : Schéma du dispositif expérimental de chauffage direct des câbles par un générateur électrique

Lors de la phase expérimentale, la caméra infrarouge est disposée face à la poutre de test (figure I-18). Le générateur est constitué par un transformateur spécifiquement dimensionné afin de

pouvoir délivrer plusieurs centaines d'ampères sur une faible charge. Il est relié à la poutre d'essai par des fils connectés sur les armatures. La qualité des contacts électriques est primordiale pour obtenir une sollicitation thermique homogène le long de la barre. Plusieurs séries d'essais ont montré que la température atteinte par les connexions constituait un problème majeur ($T > 60^{\circ}\text{C}$). La mesure de la résistance de la barre est de l'ordre de 10^{-3} Ohm et celle des contacts de l'ordre de 10^{-2} Ohm. On peut en déduire qu'il y a dix fois plus de puissance dissipée au niveau des contacts électriques que dans le reste de la barre, soit pour un courant nominal de 120 A, une puissance dissipée de 144 Watt aux contacts et de 14.4 W dans la barre. La sollicitation thermique qui devrait être idéalement radiale, est donc en réalité diffusée aux extrémités de la barre, ce qui mène à des séries de thermogrammes comme celle de la figure I-19

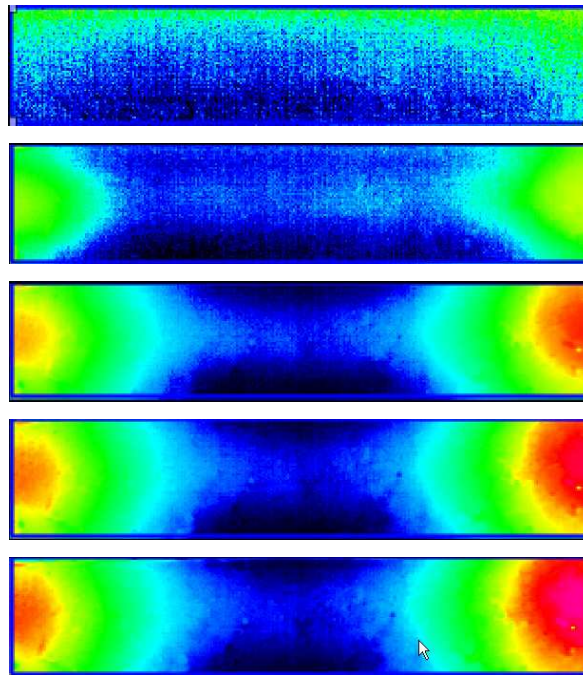


Figure I- 19: Thermogrammes retraçant la dissipation de la chaleur lors des essais de chauffage par connexion directe sur les armatures de la poutre

de longueur $l=0.5\text{m}$ ($T_{\text{max}} = 60^{\circ}\text{C}$)

Cette série de thermogrammes, pris à intervalles réguliers de 5 minutes, montre bien que la sollicitation n'est pas radiale. Dans cet essai, les imperfections des contacts se traduisent par des échauffements importants aux extrémités et conduisent à une dissymétrie de l'évolution de la

température des contacts. Cet effet devrait être particulièrement moins pénalisant pour des éléments de plus grandes longueurs.

En pratique, cette méthode est donc difficilement exploitable, car il sera difficile d'établir des contacts présentant une faible résistance électrique. A proximité des contacts, la sollicitation thermique risque d'être importante. Le béton pourrait être soumis à des températures élevées qui modifieraient ses propriétés physico-chimiques. De plus, les torons multibrins sont électriquement connectés au niveau de la tête d'ancrage. L'ensemble des armatures métalliques forme alors un réseau électrique en court-circuit. De plus, la circulation d'un courant de 120 A engendre l'existence de risques électriques pour les opérateurs.

Ces constats nous ont conduits à opter pour une autre technique de chauffage : l'induction électromagnétique. Cette technique de chauffage est peu usitée dans le domaine du génie civil [WIGG]. L'emploi de cette technique n'était pas prévu dans le programme de travail initial du projet ACTENA.

I.7.3 Exemple de la campagne d'essais de MERLEBACH :

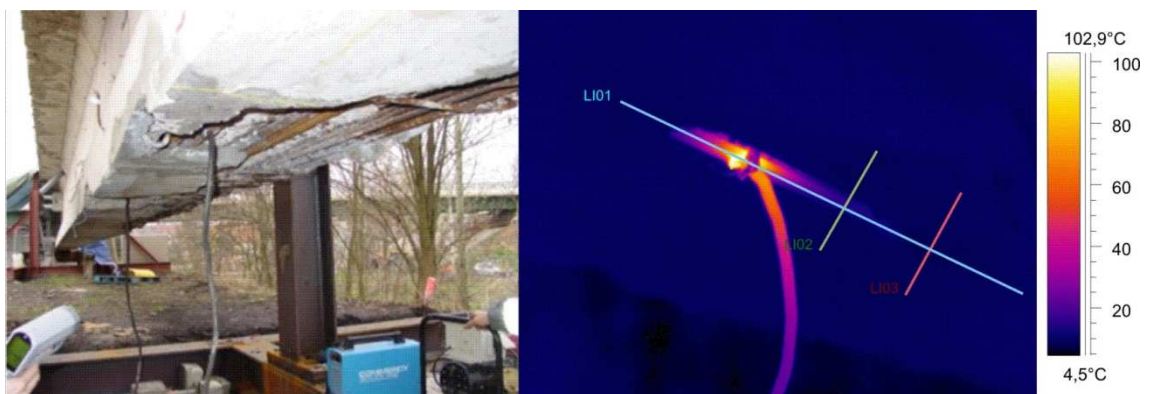


Figure I- 20 : Instrumentation et thermogramme de la zone auscultée du VIPP de Merlebach (57).

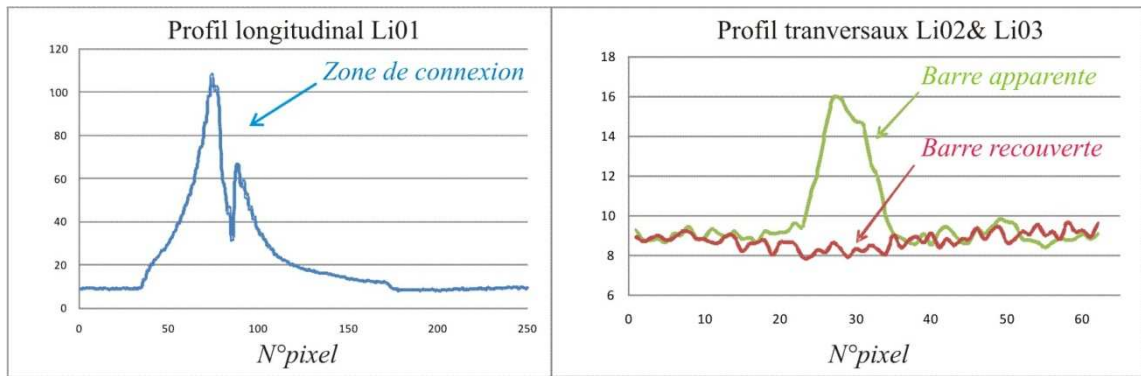


Figure I- 21 : Profils des températures longitudinales et transversales

Une campagne d’essais [CREM] préfigurant le programme de recherche ACTENA a été menée en 2005 sur une poutre d’un viaduc autoroutier de la commune de Merlebach (57). Lors de ces essais, une poutre en béton précontraint a été déposée au sol, facilitant ainsi son instrumentation. A cette occasion, le LAMTI a appliqué une méthode de détection des armatures métalliques par thermographie infrarouge et chauffage interne des armatures.

La photo figure I-20 montre le dessous de la poutre. Le retrait du béton de recouvrement en deux endroits a permis de connecter les armatures à un générateur électrique. La distance entre les deux points de connexions est de l’ordre d’un mètre.

Le thermogramme de la figure I-21 montre l’élévation importante la température au niveau de la connexion ($T \approx 100^{\circ}\text{C}$). Le logiciel de post-traitement « ThermaCam Researcher » associé à la caméra infrarouge employée, ici une AGEMA 570, permet de réaliser des relevés de températures le long d’une ligne :

- Le profil des températures **LI01** relevées le long du tracé du câble montre que la température atteinte au niveau de la connexion est supérieure à 100°C , elle diminue ensuite pour revenir égale à celle du béton non chauffé. La discontinuité de la température est d
- Le profil transversal **LI02** est réalisé au niveau de l’armature non recouverte de béton, et montre qu’à quelques centimètres de la connexion la température n’est plus que de 16°C . Le profil **LI03** est réalisé à un endroit où le béton recouvre l’armature.

- Le profil LI03 des températures ne présente pas d'élévation particulière au niveau du passage de l'armature.

La connexion électrique a été branchée durant plus de 2 heures et aucun thermogramme n'est venu révéler le tracé du câble. Ce premier échec a été imputé à la qualité de la connexion des fils aux armatures métalliques, ce qui sera vérifié ultérieurement en laboratoire.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons précisé dans un premier temps que ce travail de thèse s'est déroulé en étroite liaison avec le programme national de recherche ACTENA. Ces travaux se sont déroulés de 2006 à 2009 et ont visé à développer des méthodes d'auscultation des structures en béton précontraint. La démarche générale du projet a consisté à engager plusieurs développements en parallèle sur la problématique du diagnostic de la pérennité de la précontrainte. La participation du LGCGE dans ACTENA, s'est focalisée sur la mise au point d'une méthode de contrôle non destructif visant à déterminer le tracé des câbles de précontrainte et la détection des zones de défauts d'injection par thermographie infrarouge active.

La gammagraphie reste une méthode efficace et reconnue, elle présente cependant des inconvénients liés à l'utilisation de sources radioactives civiles, la radioprotection des personnels, les fortes épaisseurs de béton et aux restrictions d'accès à mettre en place au niveau de l'environnement du chantier.

La technique impact-écho est bien reconnue actuellement dans l'auscultation des parois en béton pour la détermination de leur épaisseur et le positionnement des armatures. Des développements sont en cours afin d'affiner la compréhension des modes de propagation et le traitement des signaux expérimentaux.

Dans un deuxième temps, pour situer l'originalité de la démarche et montrer la nécessité de développer une nouvelle méthode d'auscultation, nous avons présenté les principales méthodes en matière de thermographie infrarouge active. Il en ressort que l'intérêt des traitements fréquentiels réside dans l'utilisation d'images de phase, moins sensibles à la non uniformité de la sollicitation et aux propriétés réflectives de surface.

La détermination du tracé des câbles de précontrainte a été révélée initialement par le procédé CIDETI. Les travaux antérieurs qui ont eus lieu dans le laboratoire ont montré qu'il était possible de solliciter les armatures métalliques par circulation d'un courant de forte intensité. Cependant, l'intérêt de cette méthode a été fortement réduit au regard des essais que nous avons reproduit en laboratoire et lors de la campagne d'auscultation de MERLEBACH. Il s'avère que la résistance de contact provoque souvent une dissipation de chaleur nettement supérieure au niveau des contacts que dans le reste de l'armature métallique.

L'auscultation des armatures non accessibles étant également une priorité pour le programme ACTENA, nous nous sommes orientés sur un principe de sollicitation thermique des armatures à distance par induction électromagnétique.

Ainsi, avant d'entreprendre une expérimentation quelconque, il apparaît évident de réaliser une étude théorique des transferts thermiques au sein d'un spécimen de poutre. Dans le chapitre suivant, nous présenterons, une modélisation des corps d'épreuves qui seront fabriqués. Cette modélisation sera suivie par des essais préliminaires visant à valider et optimiser la modélisation.

Chapitre II

II. Aspects théoriques

II.1 Eléments de conduction thermique

II.1.1 Equation d'équilibre thermique

La figure II-1 représente un solide homogène Ω . Pour écrire que ce solide est en équilibre thermique, considérons une partie Ω_A connexe quelconque de ce solide, et écrivons que la chaleur produite dans cette partie est égale au flux de chaleur qui en sort, soit :

$$\forall \Omega_A, \int_{\Omega_A} Q dv = \int_{\partial\Omega_A} \vec{\phi} \cdot \vec{n} ds \quad (\text{II- 1})$$

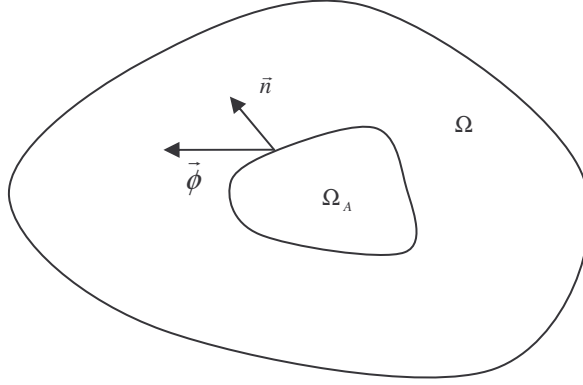


Figure II- 1: Solide homogène

Dans cette relation, $\vec{\phi}$ est un vecteur caractérisant la densité surfacique du flux de chaleur en $[\text{W}/\text{m}^2]$ sortant de Ω_A par sa frontière $\partial\Omega_A$, $\vec{n}$ est la normale unitaire extérieure à cette surface, et Q est un scalaire représentant une source volumique interne de chaleur $[\text{W}/\text{m}^3]$ dans Ω_A . Ce terme volumique peut représenter des phénomènes physiques tels que le chauffage par effet Joule (conduction ou induction), la dissipation thermique par déformation plastique.

Le théorème de la divergence appliqué (intégration par parties) à l'intégrale de surface de l'équation II- 1, s'exprime sous la forme:

$$\int_{\partial\Omega_A} \vec{\phi} \cdot \vec{n} ds = \int_{\Omega_A} \text{div}(\vec{\phi}) dv \quad (\text{II- 2})$$

L'équilibre thermique de toute partie Ω_A du solide Ω de la figure II- 1 peut s'écrire sous la forme :

$$\forall \Omega_A, \int_{\Omega_A} (Q - \text{div}(\vec{\phi})) dv = 0 \quad (\text{II- 3})$$

Cette équation devant être vérifiée dans tout le domaine Ω_A , l'équation aux dérivées partielles qui régit l'équilibre thermique en tout point de Ω s'écrit :

$$Q - \text{div}(\vec{\phi}) = 0 \text{ en tout point de } \Omega \quad (\text{II- 4})$$

II.1.2 Loi de Fourier

La loi reliant la densité de flux de chaleur au champ de température doit satisfaire le second principe de la thermodynamique. La loi de Fourier relie linéairement la densité de flux de chaleur au gradient de température local. Ceci s'écrit :

$$\vec{\phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{II- 5})$$

Où λ est un scalaire positif appelé conductivité thermique. Une variation de température selon une direction de l'espace (c'est-à-dire une composante de $\overrightarrow{\text{grad}}(T)$) provoquera un flux de chaleur dans cette même direction mais de sens opposé (pris par convention du chaud vers le froid).

En incorporant maintenant la loi de Fourier II-5 dans l'équation d'équilibre II-4, cette dernière devient :

$$\text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)) + Q = 0 \text{ en tout point de } \Omega \quad (\text{II- 6})$$

II.1.3 Conduction en régime transitoire

L'étude du transfert thermique dans la poutre d'essai se résume à un problème de conduction thermique en régime transitoire. La dissipation de la chaleur s'effectue uniformément et de façon omnidirectionnelle sur la longueur de l'armature, pour un volume V , nous pouvons écrire l'équation d'équilibre thermique sous la forme de l'équation différentielle analytique suivante :

$$\text{div}(\overrightarrow{\lambda \text{ grad}(T)}) + Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II- 7})$$

Dans ces circonstances, le terme de variation temporelle de l'équation de la chaleur n'est pas nul comme en conduction stationnaire, il équilibre le terme de diffusion et les éventuels termes sources Q .

II.1.4 Conditions limites

Les conditions aux limites (CL) peuvent avoir plusieurs formes. Elles traduisent les transferts entre les différentes parties du corps et son milieu environnant. Usuellement, quatre types de conditions sont distingués :

- CL de 1^e type ou de Dirichlet qui fixent la température T_s à la surface du corps (ou sur une partie de la surface) à chaque instant :

$$T_s = T(x_s, y_s, z_s, t) \quad (\text{II- 8})$$

où x_s, y_s, z_s décrivent les coordonnées de la surface.

- CL de 2^e type ou de Neumann qui spécifient la connaissance du flux surfacique dans chaque point de la surface du corps étudié et à chaque instant :

$$\varphi_s = \varphi(x_s, y_s, z_s, t) \quad (\text{II- 9})$$

- CL de 3^e type ou de Fourier (ou encore mixte) qui donnent la température environnante du corps T_e et la loi qui décrit le transfert thermique entre le corps et son environnement. Ce type de transfert qui a lieu à la surface du corps est très complexe à modéliser et implique un grand nombre de variables. La loi de Newton établit la relation entre la densité de flux thermique transférée à la surface du corps, de température T_c , vers son milieu environnant T_e :

$$\varphi = h(T_c - T_e) \text{ [W / m}^2\text{]} \quad (\text{II- 10})$$

où h est un facteur de proportionnalité appelé coefficient d'échange thermique surfacique. Il s'exprime en $[\text{W/K.m}^2]$.

- CL de 4^e type qui correspondent au cas d'un transfert thermique par conduction à travers l'interface de deux corps solides 1 et 2, de conductivités thermiques différentes, en contact supposé parfait. Les surfaces en contact ont la même température :

$$\varphi_1 = \varphi_2, \Rightarrow \lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_1 = \lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_2 \quad (\text{II- 11})$$

II.2 Modélisation numérique

Un modèle numérique pour chacun des deux corps d'essai a été élaboré. Les simulations qu'il permet d'effectuer ont plusieurs objectifs. Elles aident à la compréhension des phénomènes de transferts de chaleur lors d'une dissipation de chaleur par la barre métallique axiale. Le modèle peut également aider à optimiser les paramètres expérimentaux tels que la durée de chauffage et la cadence d'acquisition. Les simulations fournissent également des données artificielles pour la mise au point des procédures de traitement des données. A plus long terme, les simulations pourraient aider à constituer une base de signatures thermiques associées aux différentes typologies de défauts.

Les premières simulations réalisées correspondent au cas d'une dissipation uniforme de chaleur le long de la barre métallique.

II.2.1 Caractéristiques des modèles

II.2.1.1 Paramètres thermophysiques des matériaux

Le modèle comporte différents matériaux dont il faut fixer les paramètres thermophysiques dans la description. Les valeurs suivantes ont été utilisées pour les différentes configurations simulées :

	Unités	Béton	Câble	PVC	Air
Masse volumique	[kg/m ³]	2300	7900	450	1.3
Conductivité thermique	[W/m °C]	1.67	54	0.2	0.0257
Chaleur spécifique	[J/kg °C]	800	440	1000	1005
Diffusivité thermique	[m ² /s]	6.46e-7	1e-5	4.4e-7	2e-5

Tableau II- 1 : Paramètres thermophysiques des matériaux modélisés

Le béton est un matériau complexe dont les propriétés thermophysiques varient en fonction des constituants, de la formulation. Il est évident qu'un volume de béton même issu d'une même gâchée, présente des variations spatiales de propriétés thermophysiques. Les conditions de mise en œuvre, d'hydratation, de maturation, la répartition locale mortier/granulats créent une variabilité inévitable de conductivité thermique et de chaleur spécifique. Un échantillon a été confectionné avec le mélange issu de la gâchée qui a servi à réaliser le corps d'épreuve. Cet échantillon de grande taille (25x25x8 cm³) devant les granulats a permis de réaliser une mesure des caractéristiques thermiques moyennes du béton. La valeur estimée ici est retenue comme référence pour réaliser les simulations.

Les mesures ont été accomplies à l'aide d'un dispositif de mesure fluxmétrique disponible au laboratoire. La méthode de mesure utilisée est décrite dans la norme en vigueur NFX10-025 [NFXI].

II.2.1.2 Paramètres géométriques des modèles :

Les deux échantillons ont une géométrie prismatique. Leurs dimensions sont $0.1 \times 0.1 \times 0.5 \text{ m}^3$. Ils comportent une armature métallique de 12mm de diamètre, coaxiale à leur axe longitudinal.

Longueur de la poutre	0.5 m
Largeur de la section	0.1 m
Rayon du câble	0.006 m
Epaisseur du cylindre d'air (défaut d'injection)	0.005 m
Epaisseur du tube de PVC	0.003 m

Tableau II- 2 : paramètres géométriques

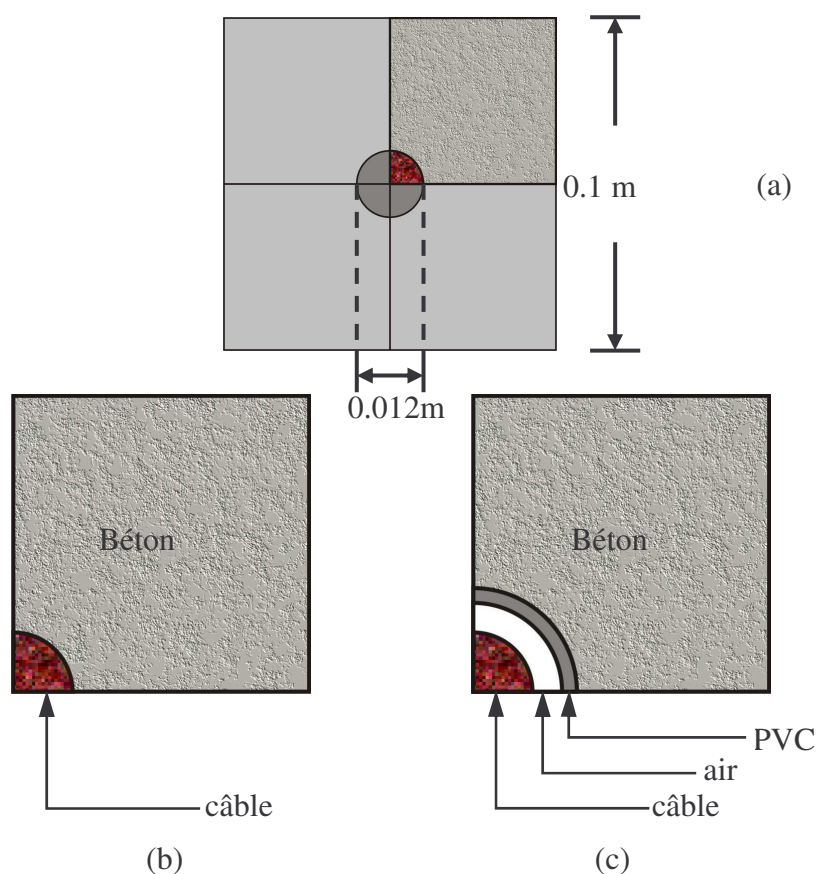


Figure II- 2 : Coupe des spécimens (sain (b) et partie avec défaut (c))

Les modèles numériques sont conformes aux deux corps d'épreuve utilisés dans la phase expérimentale.

- Un des spécimens (sain) représente une configuration d'injection idéale. Il ne présente pas de défaut. Le coulis est parfaitement injecté sur toute la longueur de la barre.
- le spécimen avec défaut (figure II-2.c) comporte une gaine en PVC de 3 mm de l'épaisseur dans laquelle est placée la barre métallique. La gaine est remplie de coulis sur une moitié de sa longueur, l'autre moitié est vide de coulis et traduit un défaut d'injection.

II.2.1.3 Approximation par éléments finis

L'approximation par éléments finis s'appuie sur un découpage (ou maillage) en domaines d'étude élémentaires ou éléments finis (figure II-3). L'approximation est construite sur chaque domaine élémentaire à partir des valeurs de la fonction en certains points particuliers appelés nœuds, tout en assurant certaines conditions de régularité de l'approximation globale sur tout le domaine. Ce type d'approximation est aussi appelé approximation nodale par sous-domaine.

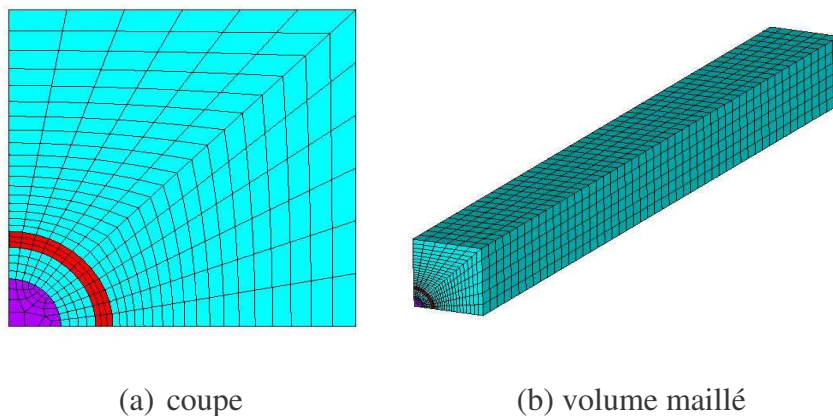


Figure II- 3 : Maillage de la poutre

Les modèles et simulations ont été réalisés à l'aide du logiciel ANSYS®. L'élément (SOLID70) a été retenu pour réaliser la modélisation numérique. Cet élément est conçu pour traiter les phénomènes de conduction thermique tridimensionnelle. Il comporte huit nœuds auxquels n'est affecté qu'un seul degré de liberté qui est la température. L'élément permet de traiter des problèmes de conduction 3-D dans des cas stationnaires ou transitoires.

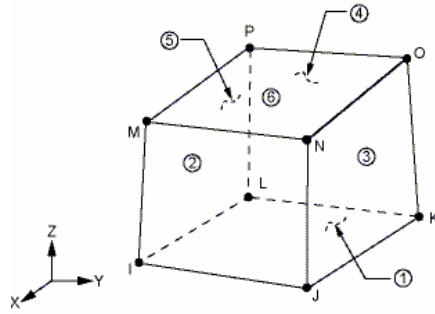


Figure II- 4 : Elément Solid70 (ANSYS®)

La modélisation de notre système en utilisant cet élément a conduit à un découpage en 17100 éléments associés à 19380 nœuds.

II.2.1.4 Conditions initiales et limites appliquées au modèle numérique

- Conditions initiales

A l'instant initial ($t=0s$), le volume entier de l'échantillon est considéré comme étant à une température uniforme, condition que l'on peut écrire sous la forme :

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = 20^{\circ}C$$

Cette hypothèse de travail est proche des conditions initiales expérimentales. Entre chaque essai réalisé pour cette étude, une période de repos a été imposée de telle sorte que le corps d'épreuve se trouve à une température uniformisée avec l'ambiance (température T_0) en début d'essai.

- Conditions limites

Les échanges entre l'échantillon et l'environnement sont modélisés par un échange surfacique qui englobe les transferts convectifs et radiatifs. Ils dépendent de l'écart de température entre la surface T et l'ambiance T_{ext} et d'un coefficient d'échange surfacique noté h . En tout point de la surface, la densité de flux s'exprime $\varphi = h.(T_{ext} - T)$. Pour les simulations, une valeur de

coefficient d'échange thermique surfacique local $h=10$ [W/m²/K] a été retenue. Il s'agit d'une valeur moyenne pour des échanges à l'intérieur d'un bâtiment.

Les contacts thermiques entre les différents milieux (acier/béton, béton/PVC) sont considérés parfaits. Aucune résistance thermique de contact n'a été introduite.

Les symétries du problème permettent de limiter l'étude à un quart de la section. Sur la Figure II- 6, la partie effectivement modélisée a été représentée. Elle est délimitée par les plans de section verticale Γ_1 et horizontale Γ_2 . Les conditions de symétrie permettent de déduire qu'il n'y a pas d'échange de chaleur perpendiculairement à ces surfaces (conditions limites adiabatiques). On peut écrire :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot \vec{n}_1 &= -\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_1 \\ \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot \vec{n}_2 &= -\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_2\end{aligned}$$

$\vec{n}_1$ et $\vec{n}_2$ sont les vecteurs normaux aux 2 surfaces.

II.2.1.5 Sollicitation thermique appliquée aux poutres :

Pour la série de simulations réalisée, une séquence de chauffage en tout ou rien sous la forme d'un créneau a été imposée au niveau de la barre métallique. Cela correspond à la stratégie adoptée lors de la phase expérimentale. Le passage d'un courant électrique à travers la barre ou l'excitation par un inducteur électromagnétique donnent des profils de chauffage avec des phases transitoires de durées négligeables par rapport aux constantes de temps du phénomène thermique observé. La modélisation de l'excitation par un créneau est donc représentative de la puissance imposée.

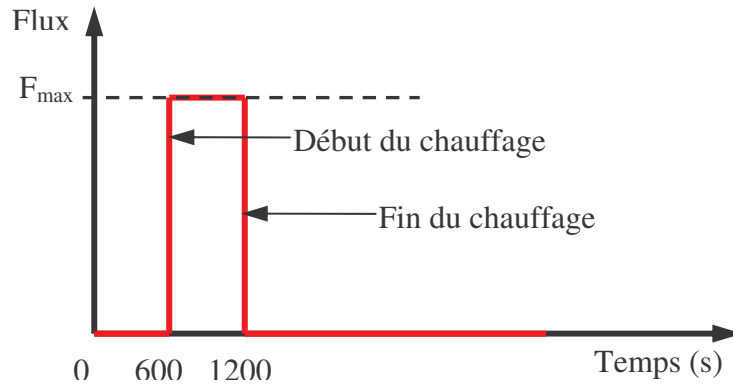


Figure II- 5 : Allure du flux imposé

La figure II-5 représente le créneau de puissance imposé. La durée de chauffage est ici fixée à 600s (10 min). Dans le modèle numérique, on impose une génération de chaleur par une dissipation uniformément répartie sur toute la surface enveloppe de la barre. Son amplitude est fixée à 800 [W/m²]. Cette valeur obtenue par « tâtonnements » provoque des élévations de températures cohérentes avec les observations.

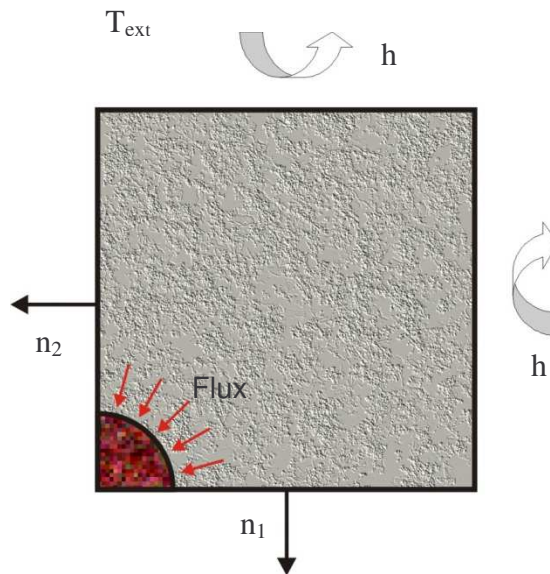


Figure II- 6 : Conditions limites de la simulation

II.2.2 Résultats de la simulation pour la poutre sans défaut :

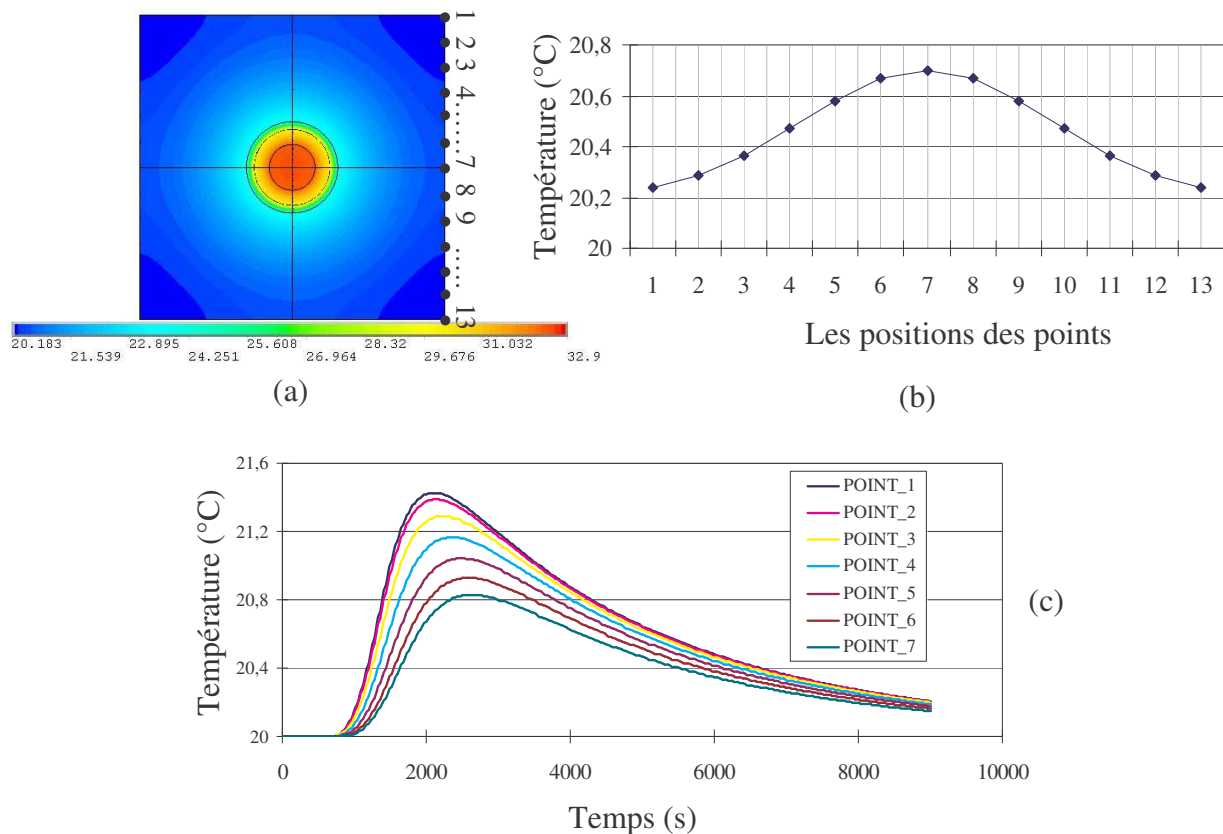


Figure II- 7 : Températures de surface simulées - poutre sans défaut - $t=600s$

La figure II-7 (a) montre la répartition du champ de température à une des extrémités de la poutre à l'instant où le chauffage est arrêté ($t = 600 s$). Sur le côté, 13 points uniformément espacés ont été repérés. La figure (b) montre que la puissance dissipée est suffisamment importante pour entraîner une élévation mesurable des températures à la surface de la poutre. Plus on s'approche des angles (points 1 et 13) de la poutre plus on s'éloigne de la source de chaleur au centre et moins on observe une élévation de température. Ce phénomène est accentué par la géométrie créant un effet d'ailette. La température est maximale dans l'axe médian (point 7) de l'échantillon. Dans les conditions de simulation retenues, un gradient de 0.5 °C est observé entre ces deux points.

La figure II-7 (c) illustre les évolutions temporelles de la température des points repérés en (a). La symétrie du problème permet de se limiter aux représentations des 7 premiers points. Le graphique montre que le point central est le premier à atteindre la température maximale. Ce résultat était prévisible car il s'agit du point le plus proche de la source.

La figure II-8 (a) & (b) montre la cartographie des températures à la surface de la poutre au moment où le maximum de température y est atteint ($t=900s$). Le champ de température converti en échelle de couleur confirme que pour chaque section perpendiculaire à la barre, le maximum de température en surface est observé au milieu suivant l'axe de la poutre. La répartition des températures suivant ces sections est identique si on reste éloigné des faces latérales du spécimen. On observe en effet une modification du comportement du champ de température quand on approche des extrémités de la poutre. Dans ce cas, la convection sur les faces latérales crée une dissipation plus importante de chaleur et les températures s'équilibrent à des niveaux plus faibles. On constate toutefois que même avec des gradients plus faibles pour chaque section perpendiculaire à l'axe de la barre, la valeur maximale de température se situe toujours au point le plus proche de la barre

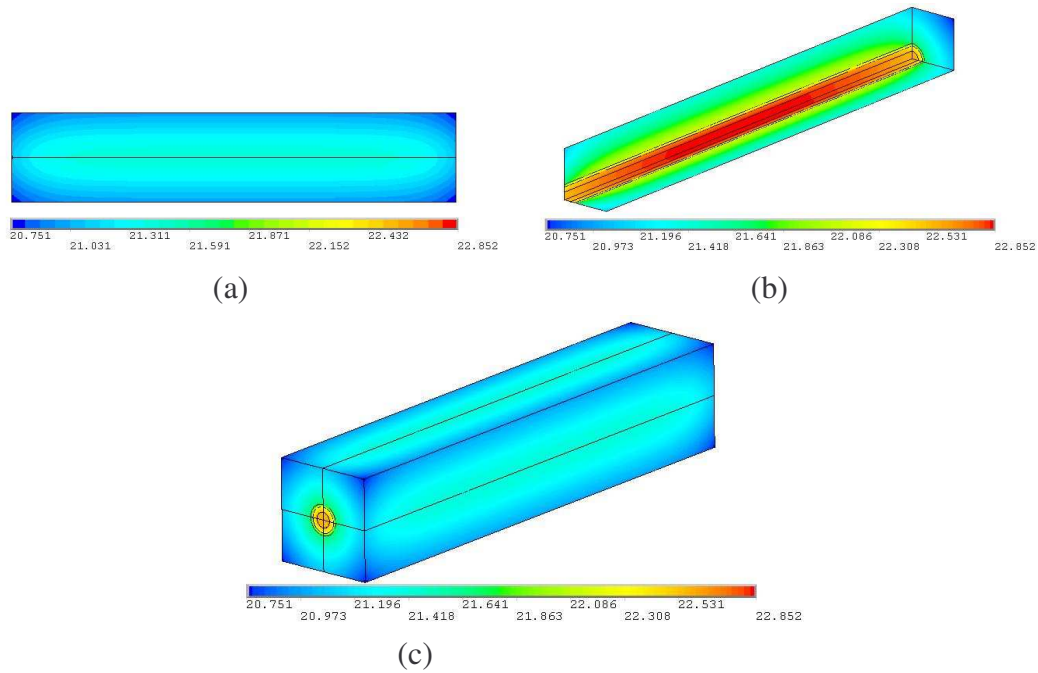


Figure II- 8 : Champs de la température de la simulation

Cette première simulation semble montrer que l'on peut envisager une localisation de la barre aux endroits où la température est maximale. Dans la partie de la poutre qui n'est pas affectée par les effets de bords, la répartition de la température de surface suivant des axes perpendiculaires à la direction de la barre est invariable.

II.2.3 Résultats de la simulation pour la poutre avec défaut :

La simulation suivante a été réalisée dans les mêmes conditions de chauffage, de paramètres thermophysiques des matériaux et de conditions limites et initiales mais la géométrie du modèle a été modifiée pour simuler la diffusion de la chaleur dans une poutre avec défaut.

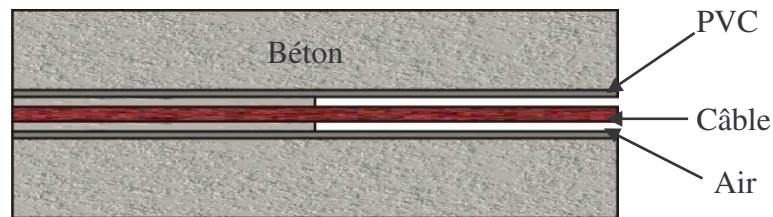


Figure II- 9 : Spécimen avec défaut

Pour matérialiser un défaut de remplissage de gaine de précontrainte, le spécimen modélisé précédemment a été divisé en 2 parties. Une partie reste inchangée. Sur l'autre moitié (figure II- 9), le câble est entouré d'une couche d'air de 5 mm d'épaisseur. Un tube de PVC de 50 mm de diamètre joue le rôle de gaine. Son influence est négligeable dans les transferts. Les données géométriques sont consignées dans le tableau II-2. Pour cette modélisation, l'air est supposé sec et ses propriétés thermiques sont données dans le tableau II-1.

Ce modèle numérique reproduit la configuration de l'échantillon utilisée dans la partie expérimentale.

Un créneau de puissance identique (800 W/m^2 pendant 600s) est imposé à la périphérie de la barre.

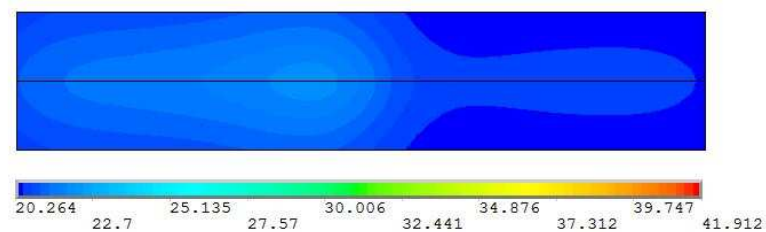


Figure II- 10 : Champ de température en surface de la poutre ($t = 800s$)

La figure II-10 montre le champ de température en surface à l'instant $t = 800s$. On observe une déformation importante du champ de température. La répartition des températures est très dissymétrique. Une élévation plus importante est observée à proximité de la frontière entre la partie remplie et celle vide de la gaine.

On peut décrire le phénomène de transfert de la façon suivante (la figure II-11).

La puissance est dissipée de façon uniforme le long de la barre. Du côté non injectée, l'air joue le rôle d'isolant et fait obstacle au transfert de la chaleur. La température de la barre de ce côté va s'élever plus fortement entraînant une diffusion de chaleur vers la partie injectée où il n'y a pas d'« obstacle ». A la surface, ce phénomène se traduit par une zone plus chaude en surface au niveau de la jonction.

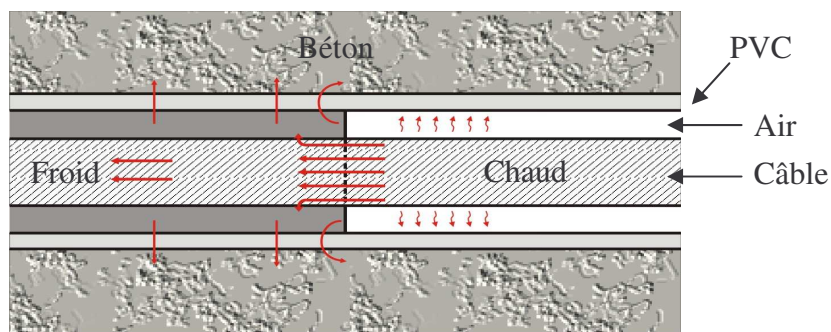


Figure II- 11 : Interprétation du transfert interne dans la poutre avec vide.

Le champ de température simulé suivant une coupe de la poutre (figure II-12) montre le gradient de température le long de la barre métallique.

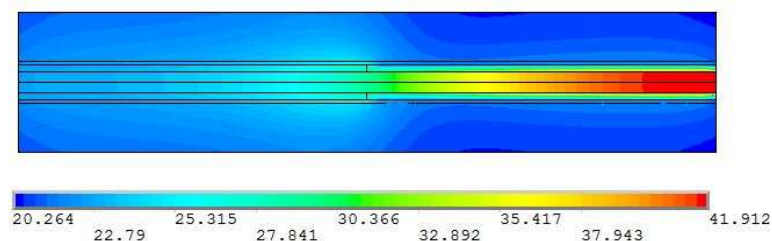


Figure II- 12 : Champ interne de température simulé

Les figures II- 13 a & b illustrent respectivement les extrémités de la poutre avec et sans défaut d'injection. La barre du côté avec défaut (a) est isolée du béton par la couche d'air, sa

température est supérieure à celle du côté sans défaut où la barre est directement en contact avec le béton.

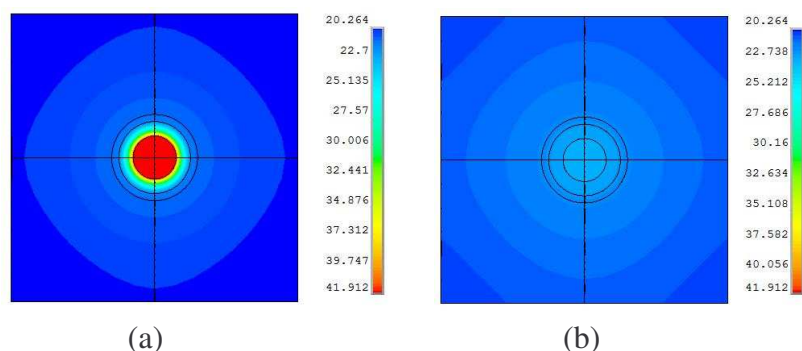


Figure II- 13 : (a) Champ de température du côté non injecté

(b) Champ de température du côté injecté

L'analyse des gradients « verticaux » montre que les profils verticaux de températures de surface passent toujours par une valeur maximale dans l'axe de la barre.

La figure II-14 montre une représentation en 3D de la poutre entière où sont observables les lignes isothermes symétriques par rapport aux deux plans médians longitudinaux.

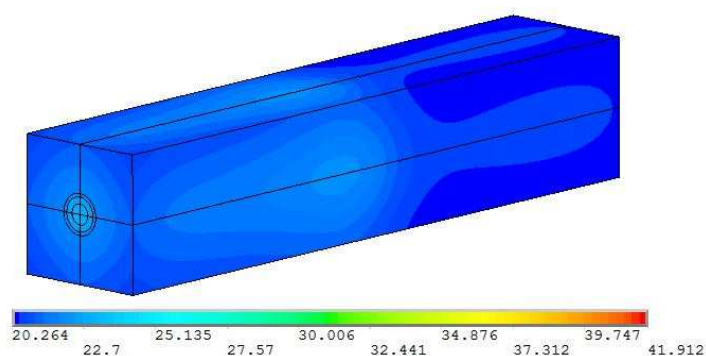


Figure II- 14 : Champ externe de la température de la poutre avec défaut

$$(\Delta T_{surf} \approx 1^{\circ}\text{C})$$

II.3 Dispositif expérimental

Les simulations précédentes ont confirmé qu'il était possible de localiser les armatures en provoquant une dissipation de chaleur et en observant le champ de température en surface. Il apparaît également que la présence d'un vide autour de la barre provoque des gradients de température dans le sens longitudinal (axe de la barre). La méthode envisagée semble adaptée à la mise en évidence d'« anomalies » de remplissage. Dans son travail de thèse, Christopher Ostrowski [OSTR] a montré que par effet Joule, il était possible de provoquer l'échauffement des armatures métalliques et de relever leur position. L'acier des câbles présente une résistivité électrique très faible et la méthode nécessite la réalisation d'un générateur spécifique permettant de délivrer plusieurs centaines d'ampères. La méthode impose également d'avoir accès au câble. Bien qu'il soit possible de pratiquer des fenêtres (elles sont par exemple nécessaires pour pratiquer des essais de mesure de tension résiduelle à l'arbalète), la mise en œuvre de la technique sur ouvrage réel serait très lourde et la pratique reste à éviter. Elle sort du cadre des techniques non destructives et provoque une réticence des gestionnaires d'ouvrage. En accord avec les objectifs du programme ANR-ACTENA, une approche non intrusive a été privilégiée et un autre moyen de chauffage a été retenu dans ce travail. Il s'agit du chauffage par induction électromagnétique.

II.3.1 Principales caractéristiques du dispositif de chauffage

Les techniques de chauffage par induction appliquées au contrôle par thermographie infrarouge sont souvent associées à la détection de fissures surfaciques ou sub-surfaciques dans des pièces métalliques de faibles dimensions [RIZB] [WANE] [ZBDN] [VGBR]. Ces techniques de contrôle non destructif viennent compléter, voire remplacer, celles déjà existantes du ressuage et de la magnétoscopie. Cette technique de chauffage est peu utilisée dans le domaine du génie civil [MARR] [WIGG].

Des travaux de Xavier Dérobert [DEAA] mentionnent l'emploi d'un dispositif d'induction destiné au chauffage des armatures. Le dispositif nous a été prêté par le service Ouvrages d'Arts du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussée de Autun.

Ce mode de sollicitation est d'une mise en œuvre beaucoup plus simple que le générateur de courant. Il autorise un chauffage sans contact à travers une épaisseur de béton.

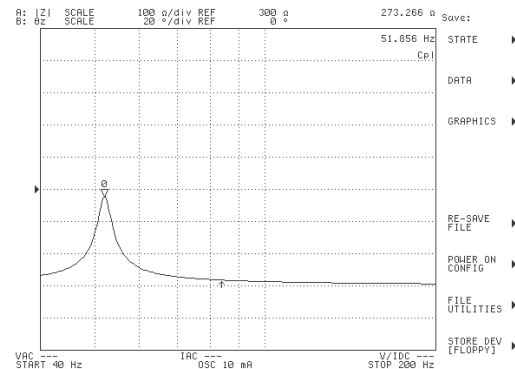
La perméabilité magnétique μ du béton est voisine de 1, le passage du flux magnétique s'effectue sans perturbation. Les propriétés électromagnétiques du béton sont adaptées à la transmission avec une faible atténuation du champ magnétique à travers la couche de recouvrement de la poutre.

Le principe de fonctionnement de l'inducteur repose sur la constitution d'un circuit LC parallèle accordé sur une fréquence de 50Hz en charge.

Le champ magnétique se referme par les armatures métalliques de la barre, ce qui provoque l'induction de courants de Foucault. Ces courants provoquent l'échauffement de l'armature métallique par effet Joule. L'inducteur se présente sous la forme d'un U. La largeur de l'entrefer (entraxe des branches du U- figure II-15) offre une zone de sollicitation d'une longueur de 50cm.



(a)



(b)

Figure II- 15 : Inducteur électromagnétique

(a) photo du dispositif

(b) Diagramme de Bode en amplitude - $f_0=51\text{Hz}$

Dans un conducteur électrique (ici la barre d'acier), le champ magnétique est court-circuité sur une très faible épaisseur. L'épaisseur de peau (en mètres) traduit la profondeur à laquelle pénètre le champ magnétique dans la barre métallique. Elle est notée δ et se détermine par la relation suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \sigma}} \quad (\text{II- 12})$$

Les valeurs suivantes ont été retenues pour calculer un ordre de grandeur de δ :

Conductivité électrique : $\sigma = 10^6 \text{ S.m}^{-1}$

Fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$

Perméabilité magnétique $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5000 \text{ H.m}^{-1}$

La perméabilité magnétique du matériau (μ) est le produit de la perméabilité du vide (μ_0 en H/m) et de la perméabilité relative (μ_r , sans dimension) : $\mu_r (\text{fer}) = 5000$ (ordre de grandeur)

On estime l'épaisseur de peau δ à 1mm. Cette faible épaisseur de peau montre que l'induction de courant s'effectue dans une fine couche à la périphérie de la barre. Cet effet dit pelliculaire justifie la condition limite en flux surfacique imposé sur l'armature métallique pour les modélisations numériques.

Dans notre configuration expérimentale, les spécimens sont placés sur les bras de l'inducteur.

II.3.2 Corps d'épreuves

Les vues en coupe longitudinale des deux corps d'épreuve réalisés sont présentées figure II-16.

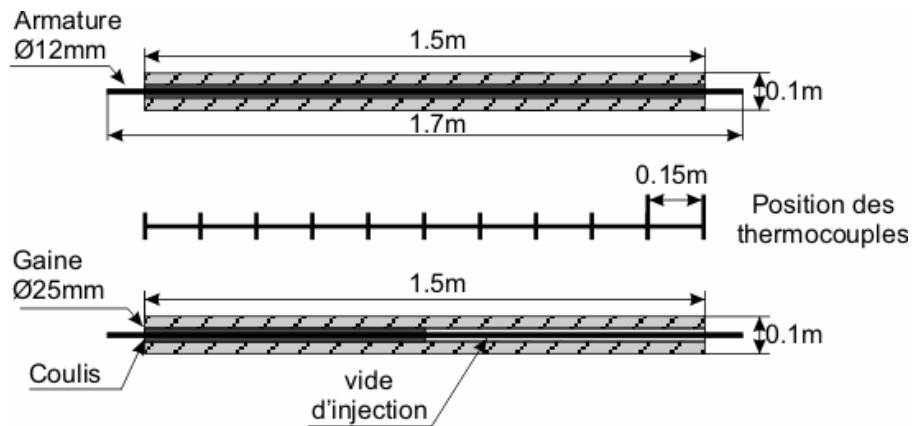


Figure II- 16 : Vue en coupe des 2 spécimens

De géométrie prismatique, leurs dimensions sont $0.1 \times 0.1 \times 1.5 \text{ m}^3$. Ils comportent une armature métallique de 12mm de diamètre, coaxiale à leur axe longitudinal. Leur formulation à base de ciment CEM 1 et de sable, est identique pour les deux spécimens. Le coulis est composé d'un

simple mélange eau et ciment. Comme cela a été détaillé lors de la description du modèle numérique, un spécimen sans et un avec un vide d'injection ont été confectionnés.

Des thermocouples ont été placés sur l'armature métallique tous les 15cm afin de mesurer l'élévation de température lors des essais.

II.3.3 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale dans cette étude consiste à commander l'inducteur par un signal dont la forme d'onde est un créneau. L'induction de courant provoque une génération de chaleur dans la barre (sur une fine couche périphérique). La température de la barre s'élève et entraîne un phénomène de transfert de chaleur par conduction dans l'élément en béton.



Figure II- 17 : Dispositif expérimental

Les thermogrammes de la surface du spécimen sont enregistrés à intervalles réguliers. Ils peuvent être interprétés en temps réel ou être post traités.

II.4 Essai de chauffage d'une poutre sans défaut à l'aide de l'inducteur :

Conformément à la procédure décrite, la poutre sans défaut est placée sur les bras de l'inducteur. La poutre est chauffée pendant 7 minutes et les thermogrammes sont enregistrés toutes les 5 secondes.

L'image en haut de la figure II-18 montre la vision panoramique du dispositif expérimental sous caméra infrarouge.

Les figures II-18 montre une sélection de plusieurs thermogrammes enregistrés à différents instants de l'expérimentation. Le premier constat positif pour l'application envisagée est que l'inducteur permet bien de chauffer les armatures de façon sensible. Un gradient maximum d'environ 1°C est observé entre les différentes zones de la poutre.

Dans la zone délimitée par les bras de l'inducteur, les thermogrammes montrent deux zones oblongues disposées de part et d'autre de l'axe médian vertical de la poutre. Ils pourraient laisser supposer la présence de défauts le long de la poutre alors que le spécimen est « sain ». Les variations de propriétés thermophysiques du béton dans des plages limitées ne pourraient pas expliquer des contrastes aussi importants et encore moins leur répartition qui devrait être aléatoire. La seule explication à l'existence de gradients de température est une répartition non uniforme du chauffage sur l'armature.

La non-uniformité de la sollicitation permet quand même la localisation du tracé du câble car les maxima de température suivant chaque axe vertical sont situés dans le plan médian longitudinal. Toutefois, l'interprétation des thermogrammes bruts ne permet pas de statuer sur l'état de l'injection. Elle pourrait conduire à des interprétations erronées.

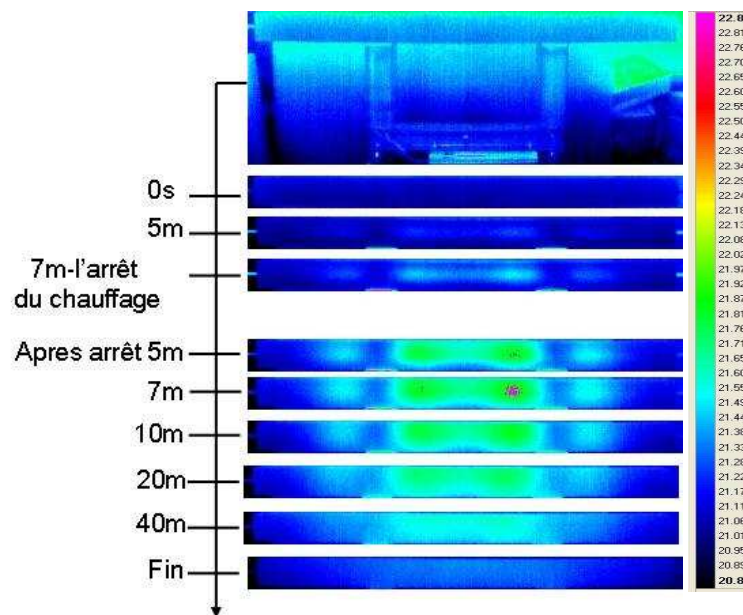


Figure II- 18 : Thermogrammes obtenus sur poutre saine à différents instants

On observe trois zones de températures plus élevées, une centrale et deux latérales.

La zone centrale correspond à la largeur de l'entrefer, soit 50cm. Les deux zones latérales sont dues au bouclage des lignes de flux. Il n'y a pas de chauffage au droit des bras de l'inducteur.

Une modélisation du champ magnétique créé par l'inducteur dans la poutre a été effectuée à l'aide du logiciel FLUX-3D[®] par le Professeur Daniel Roger du Laboratoire des Systèmes Electro Energétiques de l'Université d'Artois (L.S.E.E.). La figure II-19 représente les densités de courant induites à la surface de la barre. Sur la représentation, l'échelle de couleur allant du bleu au jaune traduit la gamme des densités de courant électrique. La simulation confirme qu'il existe deux zones sur lesquelles les densités de courant sont plus importantes que dans le reste de l'armature. Ces zones correspondent à celles observées lors de l'expérimentation. De même, les zones se situant justes au droit des bras de l'inducteur présentent les densités de courant induit plus faibles.

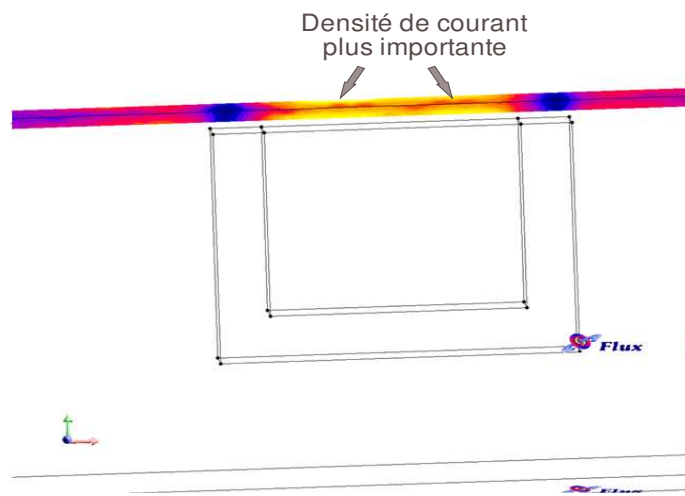


Figure II- 19 : Résultat de la simulation magnétique (logiciel FLUX-3D[®])

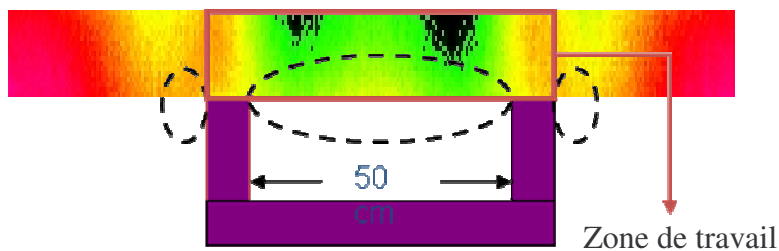


Figure II- 20 : Thermogramme sur poutre saine

La figure II-20 représente un thermogramme sur lequel on a situé l'inducteur et représenté schématiquement les « chemins » de bouclage du flux magnétique.

Lors de cet essai le maximum de température en surface est observé dans l'axe de la barre environ 7 minutes après l'arrêt de la source. Ce retard dépend de la géométrie et de la diffusivité thermique du béton. A titre d'illustration, deux points ont été choisis pour représenter les évolutions de température. Le premier point (courbe bleue) est celui où la température la plus élevée est atteinte. Le second (courbe rouge) se situe sur le même profil vertical mais sur l'arête supérieure du spécimen.

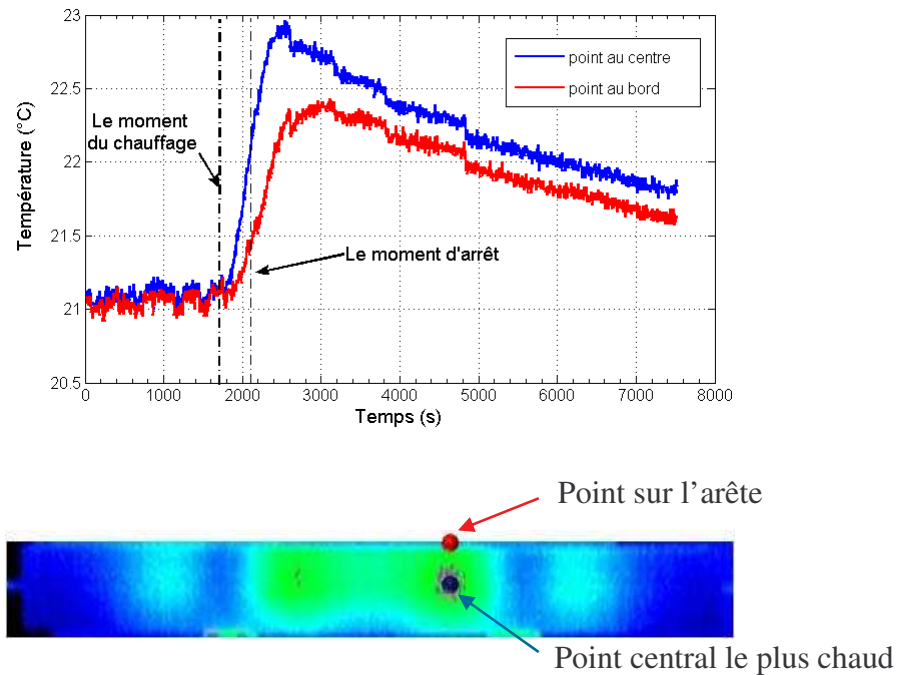


Figure II- 21 : Evolutions de température de surface en deux points spécifiques

Cet essai préliminaire montre que le dispositif d'induction se révèle efficace pour provoquer le chauffage de l'armature et que les températures observées en surface laissent présager une élévation de température limitée de la barre (Ce point sera vérifié par la suite). Toutefois, la sollicitation est non uniforme et l'information concernant l'état de l'injection n'est pas accessible directement.

Une procédure de traitement des thermogrammes est envisagée. Les approches fréquentielles basées sur l'exploitation de déphasages ont montré dans divers travaux qu'elles permettaient de réduire l'impact de la non uniformité de sollicitations. Elles éliminent aussi les problèmes liés aux variations d'émissivité de surface que l'on rencontre inmanquablement dans le cas d'une application sur site.

Le paragraphe suivant est consacré à la présentation de la méthode qui a été mise au point

II.5 Méthode de traitement fréquentielle :

II.5.1 Rappels sur la transformation de Fourier :

II.5.1.1 Transformation de Fourier

La transformée de Fourier est un outil mathématique permettant de déterminer le contenu fréquentiel ou spectre d'un signal. La définition mathématique est la suivante :

$$\begin{aligned} X(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)(\cos 2\pi ft - i \sin 2\pi ft) dt \end{aligned} \quad (\text{II- 13})$$

Où $x(t)$ est le signal d'entrée (fonction du temps), f la fréquence, et i est l'unité imaginaire ($i^2 = -1$) la base des nombres complexes. X est la transformée de Fourier de x . Le signal d'entrée peut être à valeurs réelles ou complexes. La transformée de Fourier est également réelle ou complexe. La transformation de Fourier permet de décomposer un signal en une somme (finie ou non) d'exponentielles complexes en calculant pour chaque fréquence l'amplitude et la phase du coefficient correspondant. Le tracé de ce module en fonction de f constitue le spectre de fréquences du signal.

II.5.1.2 Transformation de Fourier discrète

Le calcul numérique de la transformation de Fourier conventionnelle est basé sur sa représentation discrète. La transformation de Fourier discrète (TFD) est un échantillonnage approprié et une version numérisée de la transformation de Fourier continue (TFC). La TFD et la TFC d'une fonction $f(x)$ sont équivalentes si les conditions suivantes sont satisfaites :

- $f(x)$ est défini sur un support borné égal à la période du signal,
- la fréquence d'échantillonnage est supérieure de deux fois la fréquence maximale de $f(x)$,
- l'intervalle d'échantillonnage Δt est un multiple entier de la période de $f(x)$.

Pour des fonctions non périodiques, la TFD peut être considérée comme un échantillonnage de la TFC si la fonction a une étendue limitée et si la coupure aux plus hautes fréquences a des effets négligeables sur le spectre de puissance. Si l'on désire implanter la transformation de Fourier au moyen de la TFD, il est nécessaire de multiplier la fonction discrète dans le domaine spatial par la période d'échantillonnage Δt :

$$F\left(\frac{k}{N\Delta t}\right) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta t) e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad (\text{II- 14})$$

Cette transformation est appliquée à la courbe temporelle de température de chaque pixel isolé à partir de la séquence des thermogrammes. Dans la pratique, le calcul a été réalisé par l'algorithme classique de Transformation Rapide de Fourier (FFT) qui utilise pour son calcul une séquence de $N = 2^p$ points.

Le résultat de la transformation est un spectre complexe qui est composé de l'amplitude et de la phase du signal, toutes les deux fonctions de la fréquence.

II.5.2 Analyse par fonctions de transfert

Les méthodes fréquentielles développées pour les applications de la thermographie infrarouge au contrôle non destructif [WWBR] (Pulse Phase Thermography,...) exploitent la transformée de Fourier des évolutions temporelles des températures pour chaque pixel. Plutôt que les valeurs brutes des phases qui sont difficilement interprétables, elles utilisent des écarts de phase définis pour chaque surface élémentaire par rapport à la phase d'un point de la scène thermique choisi comme référence. Le choix de ce point de référence qui définit une origine des phases est une difficulté. Il nécessite des hypothèses liées souvent à une connaissance a priori du système. Ce choix conditionne tous les résultats des méthodes. Les applications existantes concernent des situations où une face d'accès est sollicitée en général par une source rayonnante et la phase de décroissance en température est observée. Seul le refroidissement est utilisé.

Dans ce travail, un traitement du type fonction de transfert a été envisagé. Dans ce cas, ce n'est pas un écart de phase entre deux points qui est retenu mais un déphasage entre l'entrée et la

sortie du système. Tout l'historique de température peut être exploité évitant ainsi le problème délicat des troncatures.

La méthode d'analyse originale qui est proposée figure II-22 considère la poutre comme un ensemble de systèmes caractérisés par leurs fonctions de transfert. Le signal d'entrée est représenté par le créneau de puissance envoyé par l'inducteur et les signaux de sortie sont les évolutions temporelles des températures de chaque surface élémentaire associée à un pixel. Les thermogrammes enregistrés à intervalles réguliers permettent de relever, pour une surface élémentaire, l'évolution temporelle de sa température. Chaque zone sera donc caractérisée par une fonction de transfert. Le passage dans le domaine fréquentiel est assuré par une transformation de Fourier appliquée aux signaux d'entrée et de sortie. Pour une surface élémentaire vue par un détecteur de la caméra, la fonction de transfert $H_{ij}(f)$ est définie comme étant le rapport du signal de sortie sur celui de l'entrée dans le domaine fréquentiel, soit $Y_{ij}(f)/X(f)$. Cette fonction $H_{ij}(f)$ étant un nombre complexe, elle peut être représentée par son module et son argument pour chaque fréquence d'analyse. L'ensemble de ces fonctions de transfert permet de reconstituer pour chaque fréquence des images du module et du déphasage pour la surface extérieure de la poutre.

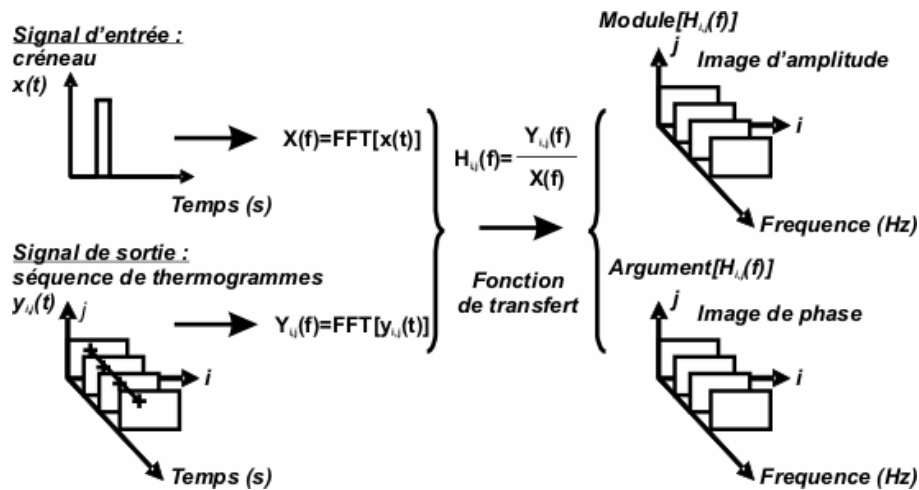


Figure II- 22 : Principe du traitement fréquentiel appliqué aux séquences de thermogrammes

L'amplitude du signal de puissance n'est pas connue. Elle n'intervient pas dans la détermination des déphasages.

Les essais préliminaires sur la barre sans défaut mis en évidence la non uniformité du chauffage provoqué par l'inducteur. La méthode précédemment décrite met en avant l'utilisation des phases car celles-ci sont décrites dans la littérature comme étant moins sensibles à la non uniformité du chauffage. Afin de vérifier les potentialités de cette méthode, elle est, dans un premier temps, appliquée sur des signaux simulés.

II.5.3 Modélisation numérique – cas d'une dissipation non uniforme

Les valeurs de flux générées le long de la barre sont modifiées dans le modèle numérique afin de faire apparaître une non uniformité. La nouvelle répartition du flux généré le long de la barre n'est plus uniforme comme le montre le graphique suivant, figure II-23.

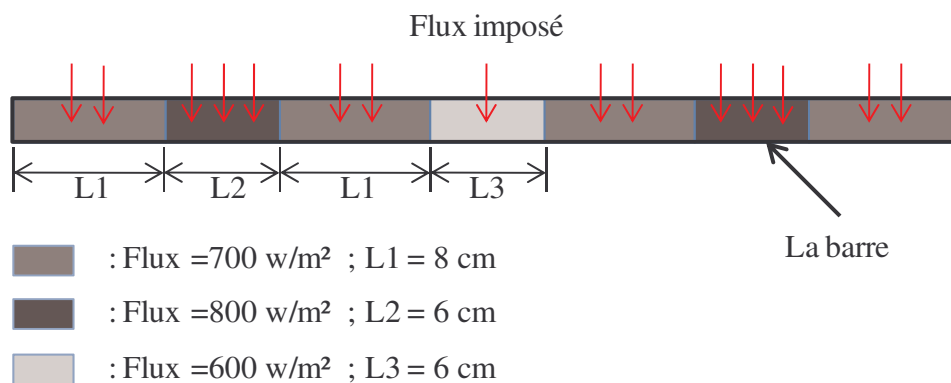


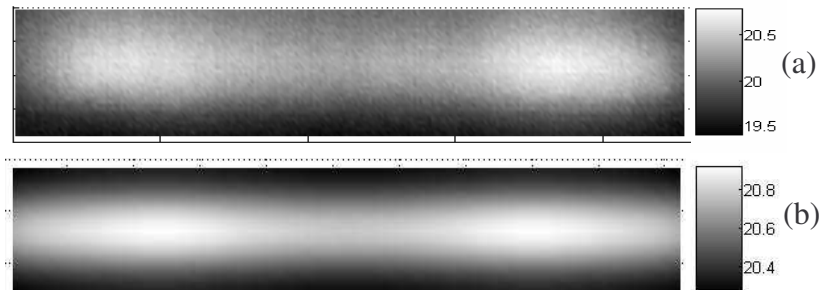
Figure II- 23 : Distribution non uniforme du flux imposé

La distribution de puissance exacte générée par l'inducteur n'a pas été étudiée de façon approfondie. La simulation des champs magnétiques et des densités de courants induits présentée à la figure II-20 aurait peut être donné des informations sur la répartition. L'objectif de la présente étude est de montrer l'efficacité de la méthode de traitement pour limiter l'impact de la non uniformité. Elle n'a pas pour but de reproduire fidèlement les conditions de sollicitations. La méthode basée sur le calcul des fonctions de transfert est appliquée aux résultats de simulation.

II.5.4 Comparaison des résultats de la simulation et résultats expérimentaux.

II.5.4.1 Températures de surface :

Comme dans le cas des thermogrammes expérimentaux, ceux issus de la simulation, pour $t = 1200$ s (arrêt du chauffage) montrent l'apparition de deux zones plus chaudes situées de part et d'autre de l'axe médian vertical de la poutre. Les gradients thermiques maximaux obtenus pour les deux thermogrammes sont sensiblement de même niveau, soit $\Delta T \approx 1^\circ\text{C}$. Ceci indique que la puissance injectée numériquement dans le modèle est du même ordre de grandeur que celle dissipée expérimentalement par induction.



II.5.4.2 Températures internes

Sur les barres des spécimens, des thermocouples ont été placés pour suivre l'évolution de leur température. Les observations de température de barre correspondant à l'échantillon sain sont montrées sur le graphique de la figure II-18 pour trois instants différents de l'essai ($t = 0, 5$ et 10 min). Alors que la température initiale est la même pour l'ensemble de la poutre, les évolutions à 5 et 10 minutes montrent bien la répartition non uniforme de la température.

La figure II-25 (a) représente les températures mesurées. Les 5 positions centrales dans la zone encadrée par une ligne en pointillée (n° 4, 5, 6, 7 et 8) correspondent à la partie de la poutre qui se situe entre les bras de l'inducteur. La figure II-25 (b) effectue un zoom sur cette partie. La

figure II-25 (c) représente le résultat de la simulation des températures dans cette même zone à l'instant $t=10$ minutes.

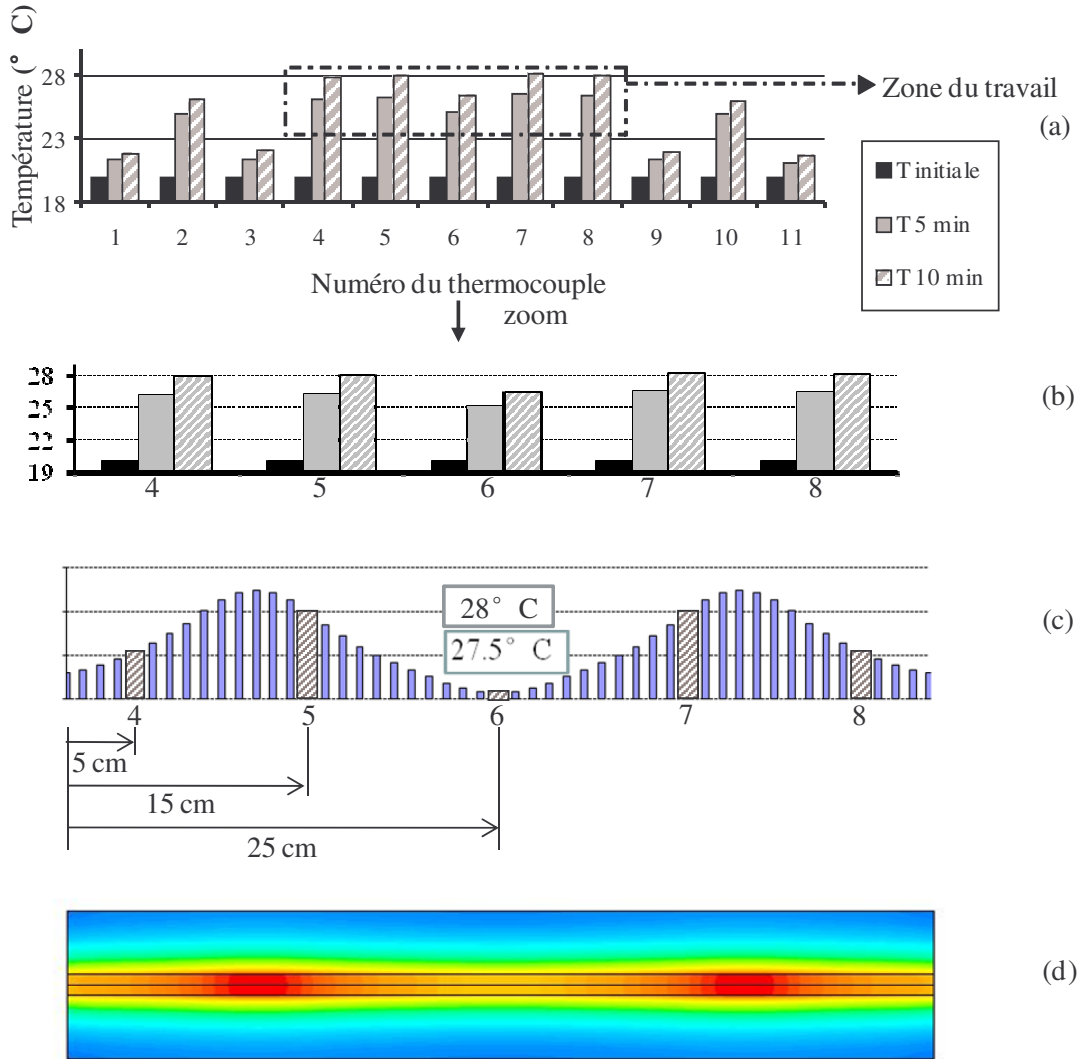


Figure II- 25 : Températures de surface de la barre

(a) (b) expérimentales

(c) expérimentales et simulées

(d) champs de température simulé dans le plan médian longitudinal vertical

On constate également que la répartition est similaire et que les valeurs sont du même ordre de grandeur. La température maximale qui est observée à la fin de la période de chauffage est d'environ 28°C . La température maximale simulée atteint 28.5°C et montre une bonne cohérence entre les observations et la simulation. La figure II-25 (d) représente une coupe

longitudinale du champ de température simulée duquel les températures sur la barre sont extraites.

II.5.4.3 Comparaison des évolutions temporelles des températures en un point de la barre :

Les évolutions temporelles des températures d'un point de la barre sont représentées afin de comparer le modèle numérique et les résultats de l'essai. La position correspondant au thermocouple n°5 (à 15 cm du bord gauche de la zone centrale) a été choisie arbitrairement. Le graphique de la figure II-26 montre ces évolutions, la forme globale montre bien les deux phases de l'essai, une de chauffage suivie de celle de refroidissement. Les températures maximales atteintes sont sensiblement les mêmes (à 0.5°C près). La phase de décroissance de la température est plus rapide.

Bien que le maillage de l'ensemble de la poutre sur une longueur de 1.5 mètre soit théoriquement possible, la simulation n'a pas pu être réalisée pour des problèmes de limitation d'espace mémoire. Dans ces conditions, seule la zone de 50 cm comprise entre les deux bras de l'inducteur a été maillée. Les conditions limites de cette simulation ne correspondent pas à la poutre réelle d'une longueur 1.5 mètre.

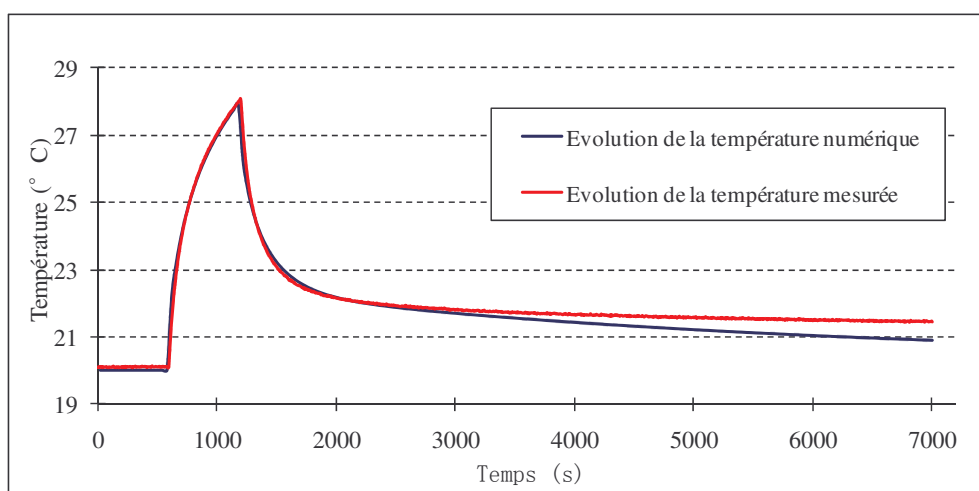


Figure II- 26 : Evolution de la température numérique et mesurée pour un point

Les évolutions sont similaires. Le modèle numérique donne des résultats proches des températures expérimentales. Une divergence apparaît pendant la période de refroidissement. Elle est essentiellement due aux modifications des conditions de température ambiante du local qui ont été observées lors des expérimentations. Les courbes obtenues sont un autre élément qui contribue à valider la modélisation des phénomènes. Il est à noter que d'autres comparaisons ont été effectuées pour d'autres points de la poutre avec des comportements aussi satisfaisants. L'objectif des simulations n'est pas de reproduire le phénomène observé avec précision. Leur intérêt est de générer des données pour mettre au point la méthode de traitement des thermogrammes et de valider le choix de l'approche fréquentielle. Le modèle peut également permettre d'optimiser les paramètres de l'expérimentation comme par exemple le temps de chauffage.

Les valeurs donnent aussi des indications qualitatives sur les champs de températures internes.

II.5.5 Forme temporelle de la sollicitation

La théorie du signal montre que pour déterminer la fonction de transfert d'un système, il faut le solliciter avec un signal dont le spectre couvre la gamme de fréquences d'intérêt. De façon idéale, il faudrait être capable de stimuler la poutre avec une impulsion très courte et très énergétique, afin de mesurer la réponse en température au niveau de la surface extérieure. L'inducteur actuel ne permet pas de régler le niveau des courants induits dans la barre. Le seul degré de liberté offert étant la durée de la stimulation, le signal ressemble plus à un créneau qu'à une impulsion. La décomposition spectrale d'un tel signal présente un contenu qui ne se limite pas à une unique composante comme en thermographie modulée, mais à un spectre continu composé d'une infinité de sinusoïdes [XPVM]. D'autres signaux auraient pu être envisagés (signaux périodiques, Signaux Binaires Pseudo Aléatoires,...). Dans ce travail, cet aspect n'a pas été approfondi et pourrait faire l'objet de développements. Le signal en créneau retenu présente l'avantage d'être extrêmement simple à générer et de ne nécessiter aucun dispositif de pilotage de la source. Considérant un créneau rectangulaire de largeur d'impulsion τ (dans notre simulation 600s) et d'intensité Am centré en $t=0$, sa transformée de Fourier a pour expression :

$$\frac{Am\tau \sin(\pi ft)}{\pi ft} \quad (II- 15)$$

Avec f , la fréquence.

Les spectres (b) associés à deux impulsions de largeurs différentes (a) centrées à $t=0$ s sont présentés Figure II-27. Plus l'impulsion est longue plus le spectre des fréquences est étroit et plus la puissance du signal se concentre dans les basses fréquences.

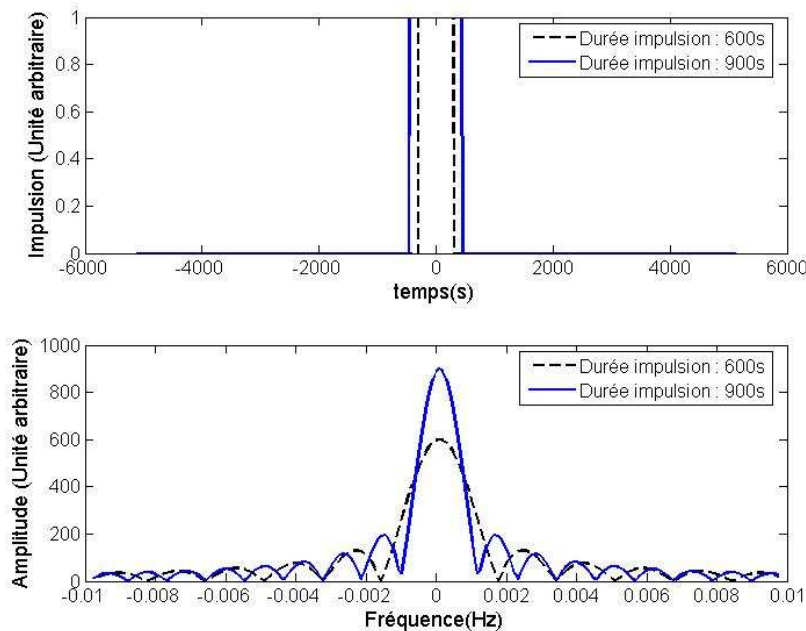


Figure II- 27 : Spectres de créneaux symétriques de durées différentes

Le créneau permettra de solliciter le matériau avec différentes fréquences.

L'analyse fréquentielle en phase et en amplitude de la réponse du spécimen au créneau va permettre de distinguer des zones spécifiques grâce aux variations des spectres. Ces variations sont liées à la configuration géométrique et aux propriétés thermophysiques des défauts éventuellement présents dans la poutre.

II.5.6 Calcul de la fonction de transfert sur les températures simulées

II.5.6.1 Extraction des résultats par nœud

ANSYS Parametric Design Language (APDL) est un langage de scripts propre à ANSYS permettant d'élaborer des routines pour automatiser des tâches ou paramétrer des modèles. Toutes les commandes d'ANSYS peuvent être intégrées dans un script d'APDL qui englobe une vaste gamme de fonctions (répétition de commande, macros, tests logiques, boucles, opérations vectorielles et matricielles...).

Les évolutions de la température pour tous les nœuds de la surface de la poutre sont extraites par routine écrite sous APDL. Une image en dimension $M*N$ représente l'ensemble de la température des nœuds à chaque instant. La dimension L représente le temps. La matrice 3D des résultats est illustrée dans La figure II-28. Elle contient toutes les valeurs de température de surface et sert à déterminer les fonctions de transfert pour chaque pixel.

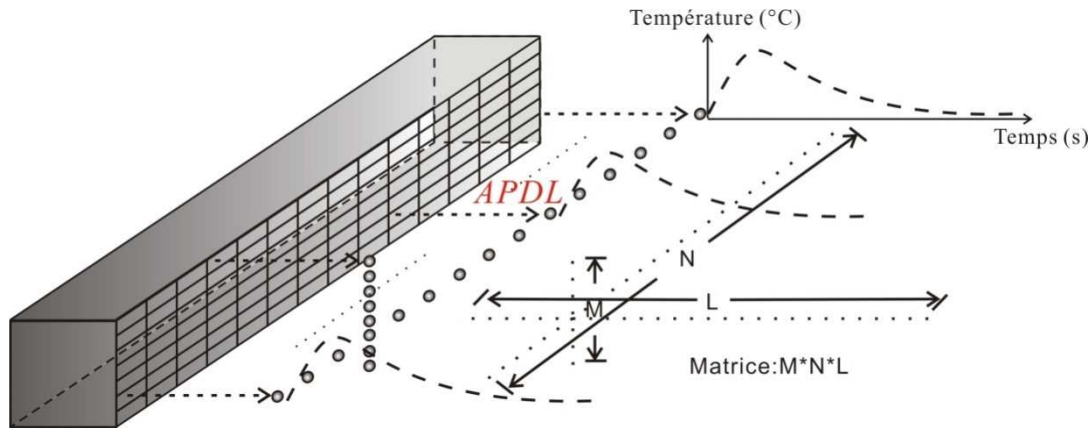


Figure II- 28 : Extraction des résultats par procédure APDL

II.5.6.2 Analyse des résultats numériques

La figure II-29 (b) représente les évolutions de la température pour différents points de la poutre sans défaut soumise à une sollicitation thermique non uniformément répartie représentant le chauffage par l'inducteur. Les points en question sont repérés sur la figure II-29 (a).

La simulation correspond à une température initiale est de 20°C et un signal de sollicitation choisi sous la forme d'un créneau d'une durée de 600 secondes.

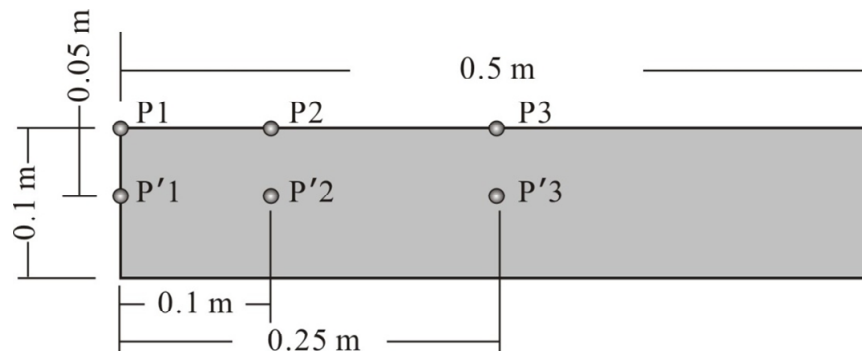


Figure II- 29-a: Positions des points de relevé de température

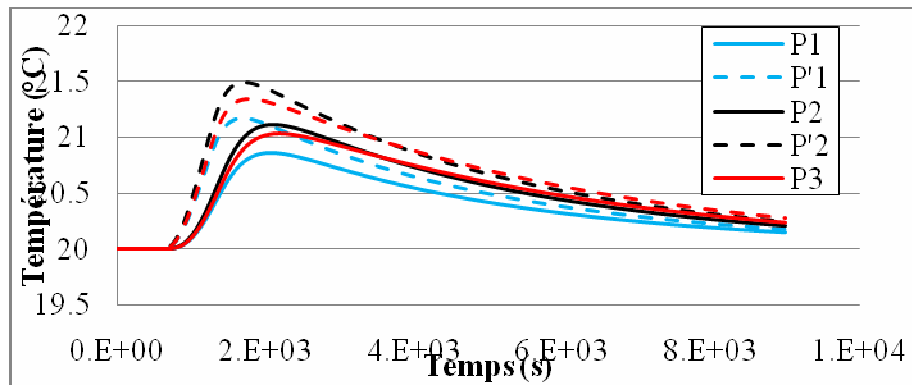


Figure II- 30-b: Evolutions des températures en 6 points de la surface de la poutre

La température maximale atteinte est de 21.5°C pour le point P'2.

Les lignes continues et discontinues représentent respectivement les évolutions de la température sur les points du bord et du centre de la poutre. La même couleur représente deux points sur le même axe vertical. Quel que soit l'axe, les températures au centre sont plus élevées que celles du bord et les maxima sont atteints plus rapidement que sur les bords. En analysant sur l'axe médian horizontal, la température maximale est atteinte dans une zone correspondant à un champ d'induction plus élevé.

On peut considérer que pour tout point de la zone d'observation l'évolution de température se situe entre les deux courbes extrêmes (points P2 et P'2) représentées figure II-21 (b).

II.5.6.3 Calcul de la FFT des températures de surface de la poutre sans défaut

Le calcul de la transformée de Fourier est réalisée sur la variation de température, la température initiale T_{init} est retranchée à chaque valeur de température de surface ($T_{init} = 20^{\circ}\text{C}$). Les évolutions de température présentées précédemment montrent que le champ de température ne retrouve pas son état initial en fin d'essai. Pour réduire l'effet de la troncature sur les spectres des températures, une fenêtre de Hanning a systématiquement été appliquée.

La figure II-30 suivante représente l'évolution des spectres en amplitude en fonction de la fréquence des températures sur les deux points particuliers de la poutre définis précédemment.

Au point P'2, l'amplitude de température est plus importante et la variation est plus rapide que pour le point P2, son spectre en amplitude présente des valeurs supérieures. Dans les deux cas, on observe une atténuation rapide en fonction de la fréquence.

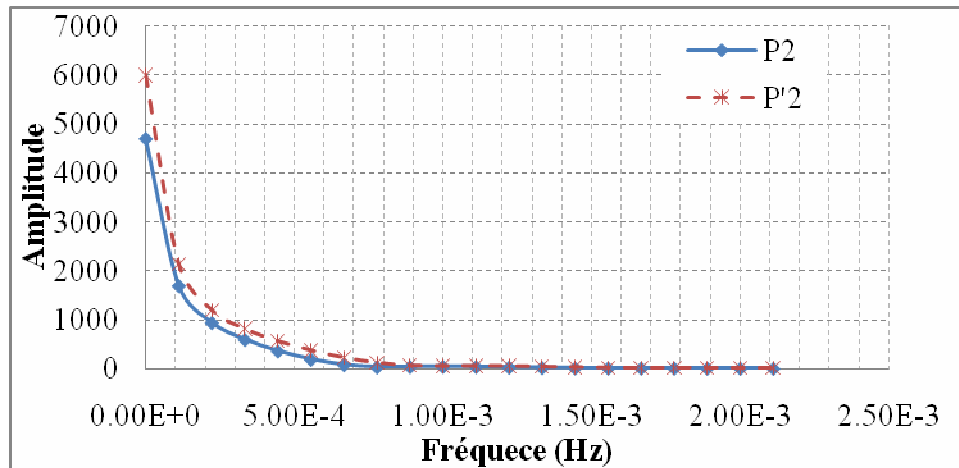


Figure II- 31 : Amplitudes des points P2 et P'2 en fonction de la fréquence

La Figure II-31 représente l'évolution de la phase des températures points P2 et P'2. Les phases sont extraites des valeurs complexes des transformées de Fourier. En fonction des algorithmes, l'argument est défini sur différents intervalles. Sur la figure de gauche, la phase oscille entre $-\pi$ et π . L'évolution des phases donne lieu à des sauts dans le domaine de définition. Les phases peuvent être définies modulo 2π . Afin d'obtenir une évolution régulière de la courbe de phase, il est possible de sélectionner les valeurs en travaillant sur les écarts de phases pour deux fréquences consécutives. Ce réarrangement des phases est visible sur la Figure II-31 (b). On parle alors de déroulement de phase.

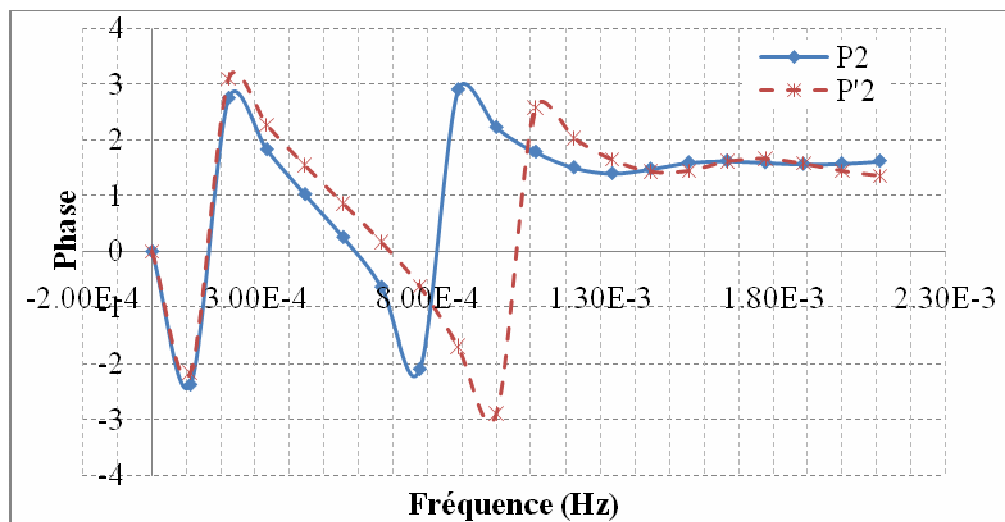


Figure II- 32-a : Phases brutes des points P2 et P'2 en fonction de la fréquence

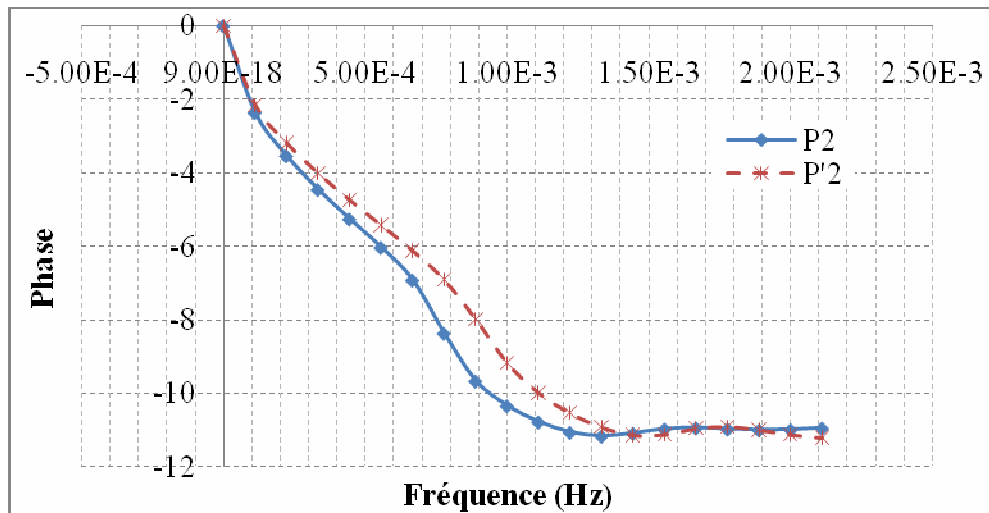


Figure II- 33-b : Phases après traitement des points P2 et P'2 en fonction de la fréquence

II.5.6.4 Calcul des fonctions de transfert.

La température en un point de la surface traduit la réponse à une sollicitation en flux de la forme d'un créneau temporel. La fonction de transfert caractérise le comportement du système entrée/sortie en fonction de la fréquence en faisant le rapport de la transformée de Fourier de la réponse à la transformée de Fourier de la sollicitation.

La figure II-32 représente le module (a) et la phase (b) du signal d'entrée

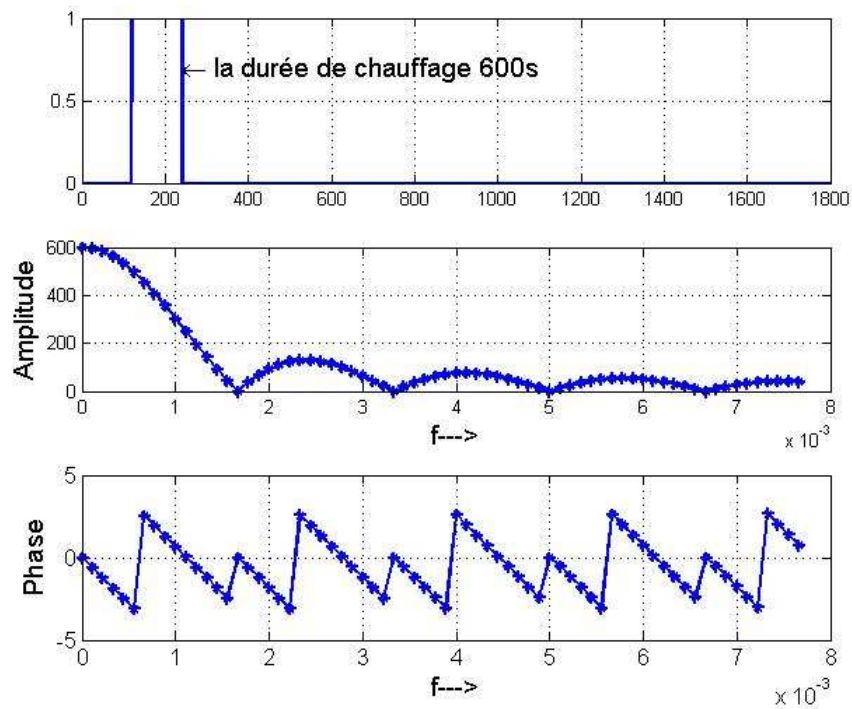


Figure II- 34 Evolution temporel et fréquentiel en amplitude & phase :

La figure II-33 représente les fonctions de transfert pour les 2 points retenus dans cette étude.

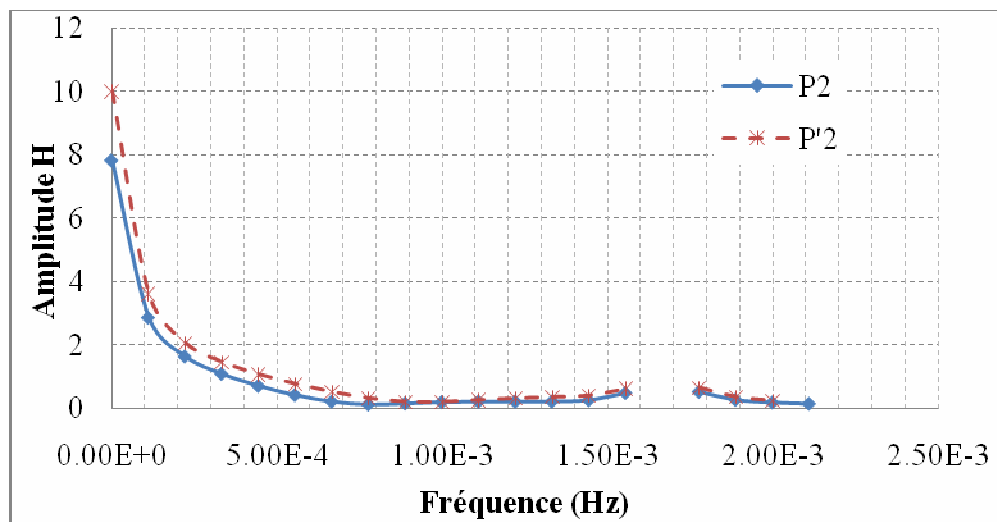


Figure II- 35-a : Evolution en amplitude de la fonction de transfert

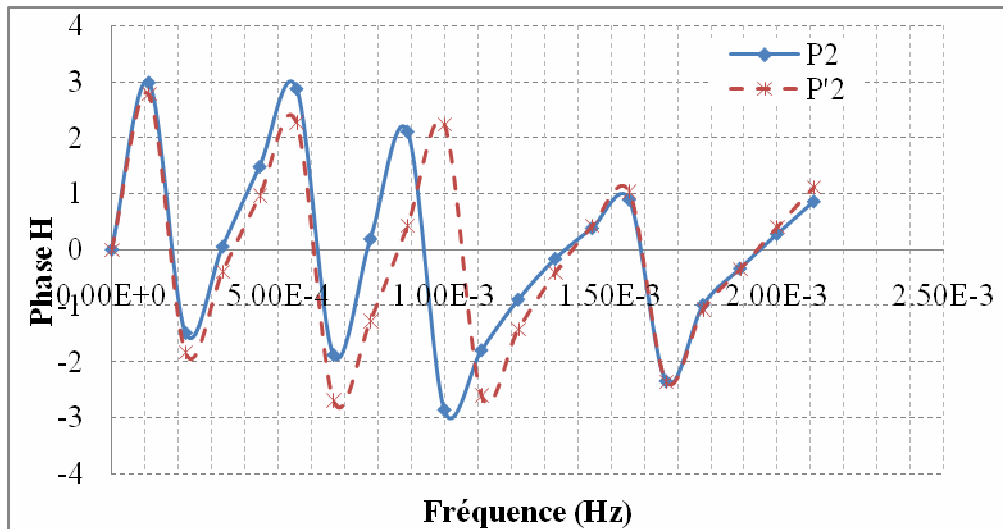


Figure II- 36-b : Evolution brute de la phase de la fonction de transfert

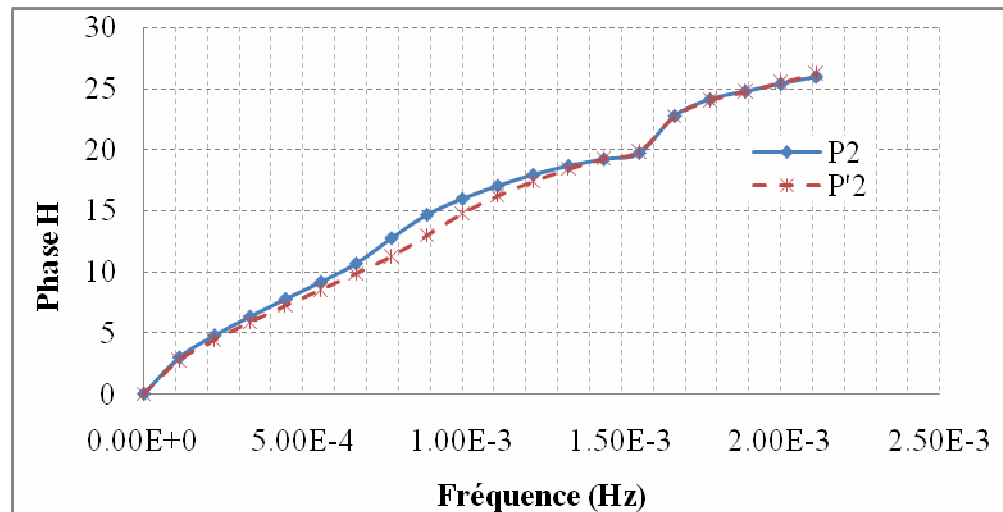


Figure II- 37-c : Evolution après traitement de phase de la fonction de transfert

Ces fonctions de transfert peuvent être déterminées pour chaque point (pixel) de la surface étudiée.

Il est alors possible de s'intéresser au comportement du système en se focalisant sur une fréquence particulière. Les résultats obtenus pour tous les pixels peuvent être agglomérés en reconstituant des images en module ou en phase. Les valeurs sont codées en respectant une échelle de couleurs ou de niveaux de gris.

La figure II-34 suivante représente le résultat de cette procédure de traitement pour la fréquence 0.00044 Hz.

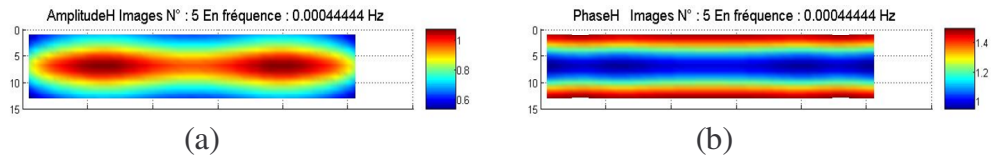


Figure II- 38 : 1 image de module (a) et 1 image de phase (b)

Sur l'image de module (ou d'amplitude), on retrouve l'effet de la non uniformité de chauffage alors que sur l'image de phase on n'observe que la mise en évidence du tracé de la barre. Ce premier résultat sur les températures simulées semble confirmer l'intérêt de l'approche.

Cette opération peut être répétée pour toutes les fréquences pour lesquelles les fonctions de transfert ont été déterminées.

La figure II-35 montre la série d'images des fréquences inférieures à la demi largeur du premier lobe spectral de l'excitation (ici jusqu'à 0.00156 Hz) correspondant à cette étude pour les fréquences. Pour les très basses fréquences, un effet de bord est à noter. Dans le modèle, les surfaces (surfaces latérales verticales y compris) sont le lieu d'échanges convectifs.

L'analyse visuelle de ces images montre que les images de phase sont moins affectées par la non uniformité du chauffage que les images d'amplitude. Le tracé de la barre métallique est plus uniforme pour les images de phase que pour les images d'amplitude. Les amplitudes sont plus importantes au niveau des zones où le chauffage est plus élevé.

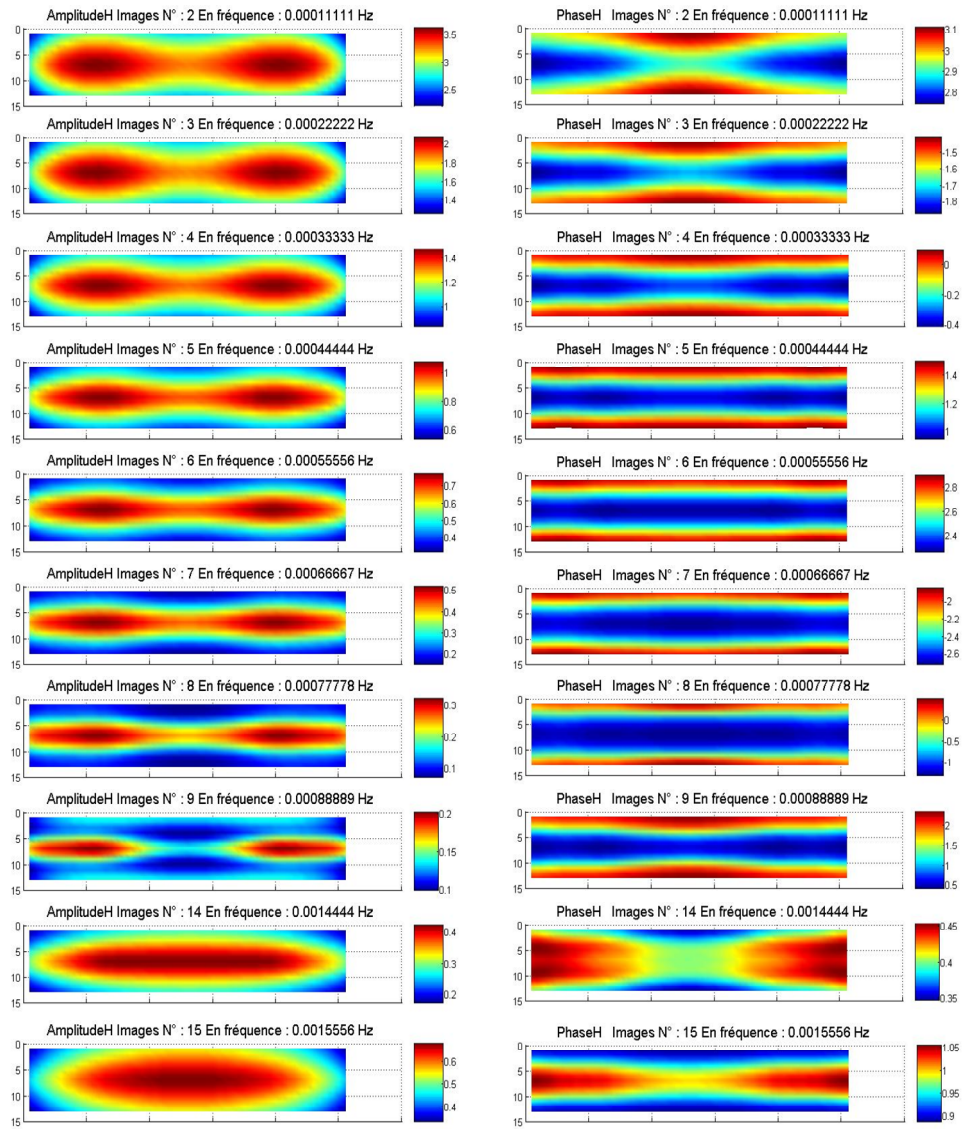


Figure II- 39 : Images en amplitude et phase des fonctions de transfert

II.5.7 Choix des fréquences Atténuation

La diffusion de la chaleur à travers le béton s'effectue avec une atténuation qui dépend fortement de la température. Pour réaliser l'étude des images de phases (ou d'amplitude), la gamme de fréquence est limitée par une valeur haute au dessus de laquelle, les composantes sont trop atténuées pour être détectées. Elles sont noyées dans le bruit des appareils de mesure ou masquées par toutes les sollicitations extérieures (convection, rayonnement) qui impactent la température de surface. Toutes les fréquences ne peuvent donc pas être exploitées.

Pour pouvoir définir a priori une bande de fréquence de travail, une étude de l'atténuation et du spectre de température prévisible en surface dans les conditions de l'expérimentation a été menée.

II.5.7.1 Atténuation

Le flux de chaleur est généré à la surface de la barre métallique et crée une élévation de température. La chaleur se diffuse dans le béton de la poutre et provoque une modification de la température de surface qui est enregistrée comme signal de sortie.

Pour estimer le spectre prévisible de la température de surface, le cas de la sollicitation « extrême » a été envisagé. Elle est définie sur la base des contraintes suivantes:

- La température atteinte par la barre ne doit pas dépasser 60°C
- Les caractéristiques de l'inducteur sont figées et il fonctionne en tout ou rien.
- Le signal de commande est un créneau

Un créneau de 60 minutes a été retenu comme signal de test. A partir des simulations, cette durée a conduit à une température de barre approchant de la limite fixée (60 °C). Il est à noter que des créneaux plus courts ont des spectres plus riches en hautes fréquences et pourraient donner des températures de surface un peu plus élevées aux fréquences élevées. Différentes études avec des durées de chauffage variables ont été effectuées et ont conduit aux mêmes conclusions que pour le signal retenu.

Un chauffage d'une durée de 3600 secondes est appliqué à la barre métallique, la figure II-36 montre l'allure temporelle ainsi que l'amplitude et la phase du spectre de ce signal de sollicitation.

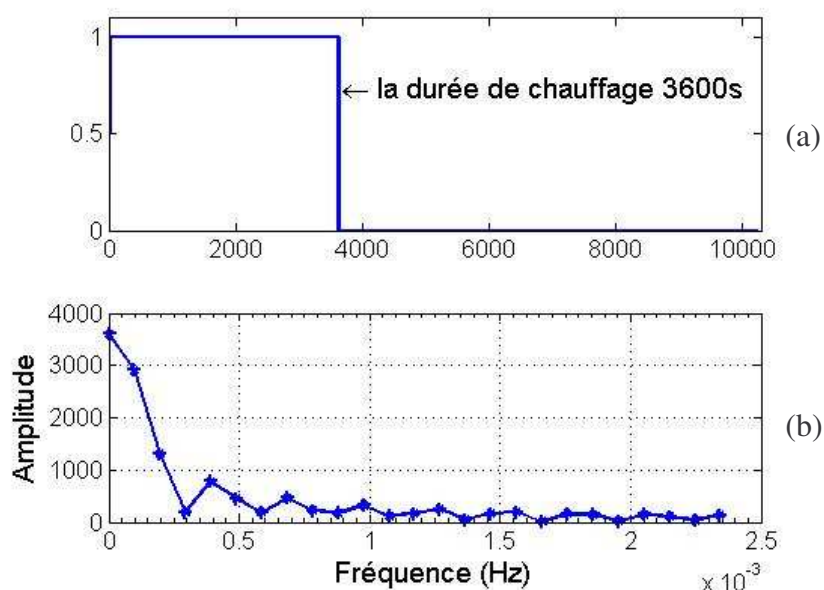


Figure II- 40 : Sollicitation retenue pour l'étude
(a) Signal temporel du flux dissipé

(b) Module du spectre associé

A partir de la simulation, la température maximale de surface de la poutre est déterminée (figure II-37). On observe bien que la valeur maximale de la barre est voisine de 60°C.

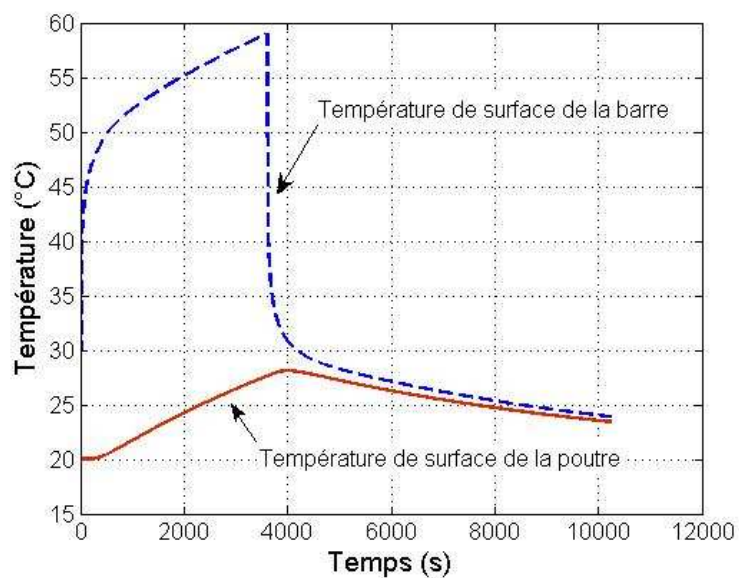


Figure II- 41 : Evolutions temporelles des températures de la barre et en surface pour un chauffage de 60 minutes

A partir de cette simulation, le spectre de la température de surface T_s est calculé. Il est représenté sur la figure II-38.

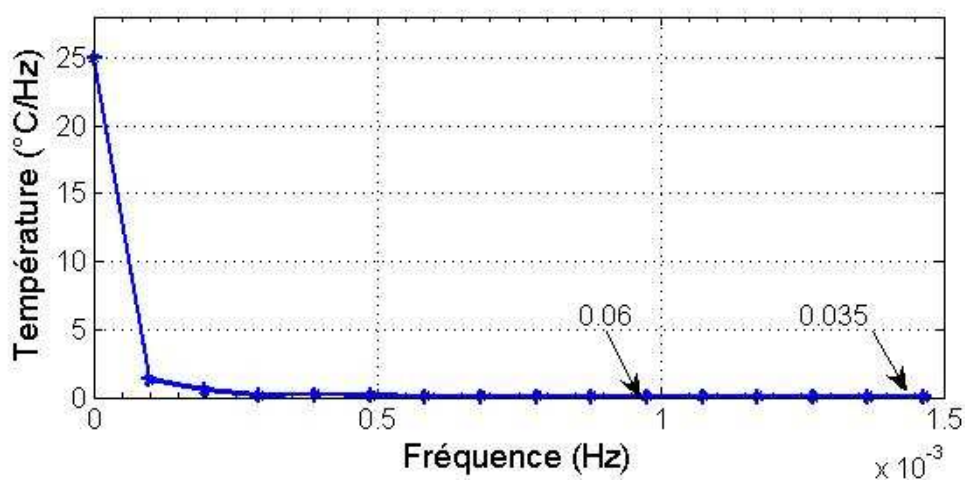


Figure II- 42 : Spectre de la température de surface

On constate que l'épaisseur de béton se comporte comme un filtre passe bas. Les composantes « hautes fréquences » du signal de sollicitation sont filtrées et ne produisent pas d'effet sensible en surface. On constate que vers $1.5 \cdot 10^{-3}$ Hz, l'amplitude est de l'ordre de la résolution de la caméra (0.025K). Le bruit de mesure ne permet pas d'étudier les fréquences supérieures. Il s'agit là en plus de la température la plus élevée en surface.

II.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté les bases fondamentales des transferts thermiques utiles pour cette étude. Ces relations sont appliquées numériquement aux modèles de simulation des poutres qui ont été conçues pour l'expérimentation. Les deux spécimens modélisés dans un premier temps, sont une poutre sans défaut et une autre présentant un défaut d'injection de coulis sur la moitié de sa longueur.

La sollicitation thermique est un créneau de puissance uniformément réparti le long de la poutre. Ces modélisations montrent qu'il est possible de repérer le tracé des armatures métalliques et que la présence d'un défaut induit un contraste des températures au niveau du champ des températures de surface.

Le premier essai effectué avec l'inducteur sur la poutre sans défaut montre que ce mode de chauffage fonctionne et qu'il est possible de localiser la position de la barre. Il apparaît cependant que le chauffage n'est pas réparti uniformément le long de la poutre.

Cette non-uniformité nous conduit à introduire une procédure originale de traitement fréquentiel. Elle s'inspire à la fois de la thermographie à phase pulsée en prenant en compte de l'historique complet de la température. La poutre est alors considérée comme un système dont le signal d'entrée est la sollicitation et les signaux de sorties sont les évolutions des températures de surface.

La non-uniformité de la sollicitation nous conduit à redéfinir la forme de la sollicitation dans la modélisation numérique. Les résultats de modélisation sont comparés aux résultats expérimentaux. Il en ressort ainsi que les répartitions spatiales et temporelles des températures d'un point sont alors comparables.

La procédure de traitement par fonction de transfert est appliquée aux résultats numériques. Les images de phases se montrent effectivement moins sensibles à la non-uniformité de la sollicitation. Le tracé de la barre est alors mieux révélé sur les images de phase que sur celles d'amplitude.

Chapitre III

III. Essais expérimentaux sur poutres saines et avec défauts :

III.1 Procédure expérimentale

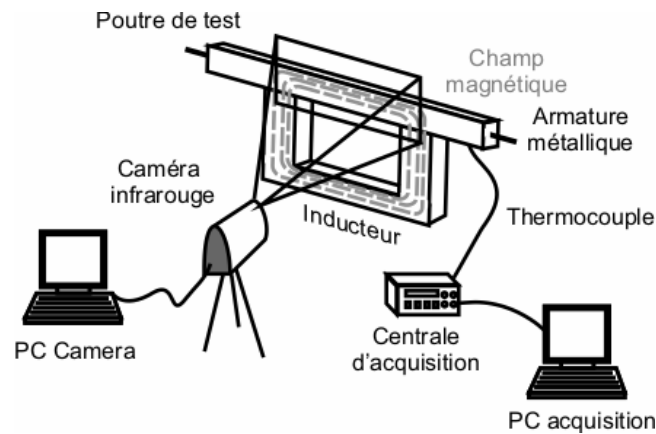


Figure III- 1 : Dispositif expérimental

La caméra employée est une SILVER 220 de la marque CEDIP Infrared. Elle est équipée d'un détecteur matriciel de 320x256 détecteurs quantiques en InSb, dont la sensibilité spectrale se situe dans l'infrarouge moyen 3-5 μm . Le NETD est inférieur à 25mK et donné typiquement à 20mK. Lors des essais, la caméra est placée en face de la zone sollicitée à une distance de 2 mètres. Les thermogrammes sont enregistrés à la fréquence de 0.2 Hz, soit un tous les 5 secondes. Un système d'acquisition mesure l'évolution des températures de la barre grâce aux thermocouples qui y ont été insérés lors de sa fabrication.

Un point de mesure correspond à une zone élémentaire vue par un détecteur de la caméra. La caméra est équipée d'un capteur matriciel composé de 320x256 détecteurs quantiques. La zone d'intérêt vue par la caméra est de 500 x 100 mm², ce qui correspond à des zones élémentaires de 2 x 2.5mm²



Figure III- 2 : Photos du montage expérimental et de la caméra infrarouge

III.2 Essais sur la poutre sans défaut

III.2.1 Thermogrammes bruts de la poutre sans défaut :

La poutre sans défaut a été sollicitée en suivant la procédure expérimentale décrite précédemment. La figure III-3 présente une série de 6 thermogrammes parmi les 2200 enregistrés.

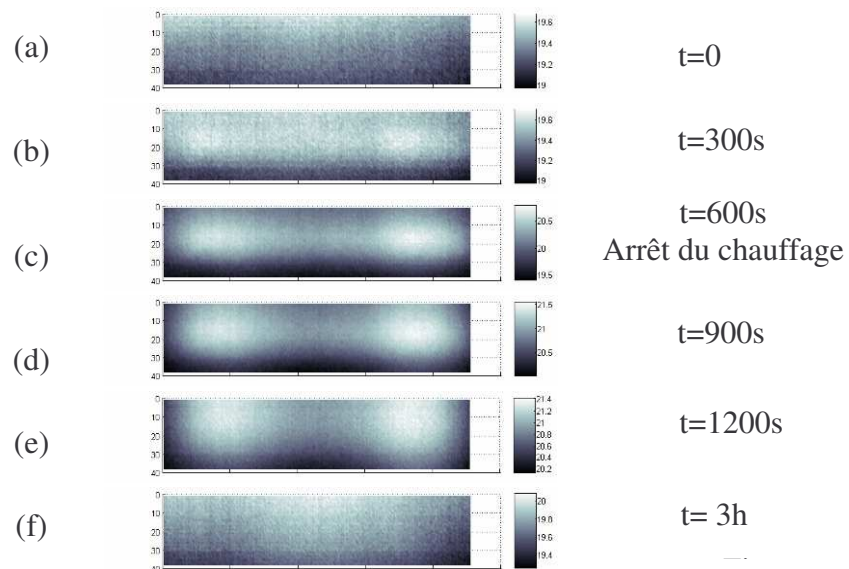


Figure III- 3 : Thermogrammes bruts de la poutre sans défaut

La température initiale est de 19.5°C à la surface de la poutre. Le thermogramme III-3.a correspond à l'instant initial lorsqu'aucune sollicitation n'est encore appliquée. Il permet de vérifier la quasi-uniformité du champ de températures à la surface de la poutre. A $t = 300\text{ s}$, l'effet du chauffage commence à être perceptible. Le thermogramme III-3.c correspond à la fin du chauffage, soit $t = 600\text{ s}$. A partir du thermogramme III-3.d, la température de surface de la poutre commence à décroître. Le thermogramme final III-3.f montre le champ de température final redevenu quasi uniforme au bout de 3 heures. Les conditions environnementales évoluant durant l'essai, la valeur moyenne des températures finales est plus élevée de 0.2°C qu'au démarrage.

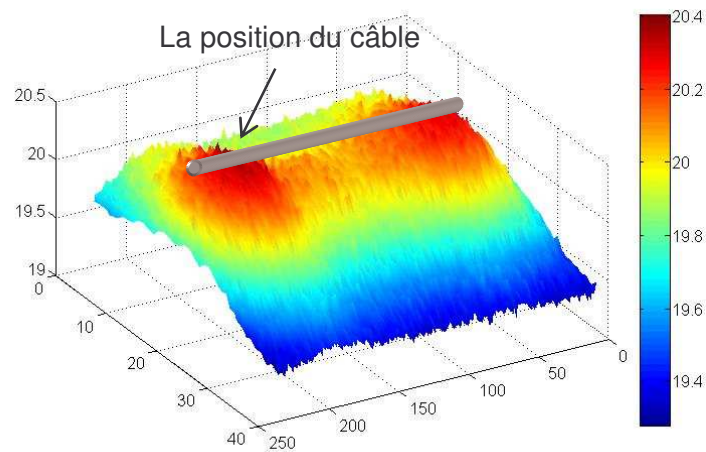


Figure III- 4 : Thermogramme 3D de la poutre sans défaut à $t=600\text{S}$
(fin du chauffage)

La figure III-4 est la représentation tridimensionnelle du thermogramme III-3.c. Ce mode de représentation met en évidence deux zones plus chaudes qui correspondent aux endroits où le champ d'induction est plus élevé.

A partir de ces thermogrammes, il est difficile de déterminer la position exacte de la barre métallique. Il semblerait a priori qu'elle se situe dans l'axe longitudinal de la poutre mais la présence de ces deux zones de température plus élevée conduit à une interprétation erronée sur la présence éventuelle de défaut. Cette non-uniformité du champ de température à la surface de la poutre a été expliquée au chapitre II, elle est due à la non-uniformité du champ magnétique issu de l'inducteur. La mise en évidence de la position de la barre peut-être facilitée par un traitement numérique des données décrit dans le paragraphe suivant.

III.2.2 Mise en évidence de la position de la barre :

L'analyse des températures sur les axes verticaux montre que les températures au centre sont plus élevées que celles atteintes sur les bords, de plus ces maxima sont atteints plus rapidement.

Un thermogramme se présentant comme un tableau de températures localisées par leurs coordonnées cartésiennes, l'extraction de la température maximale atteinte dans chaque colonne peut permettre de localiser la position du câble. Cette recherche des maximum a été appliquée à la fin de la période de chauffage, à $t = 600$ s afin d'obtenir des gradients de température importants. Le résultat de l'application de cet algorithme est présenté figure III-5.

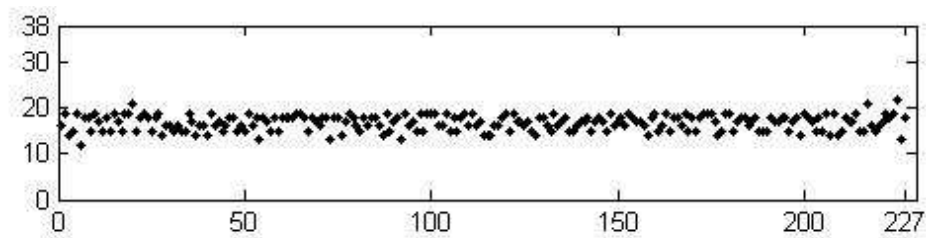


Figure III- 5 : Extraction des maxima de températures
(Échelle en nombre de pixels)

Dans le cas de ce spécimen de poutre sans défaut, la recherche des maximums de température permet la localisation rapide et précise du tracé de l'armature métallique.

III.2.3 Analyse du champ de températures à la surface de la poutre :

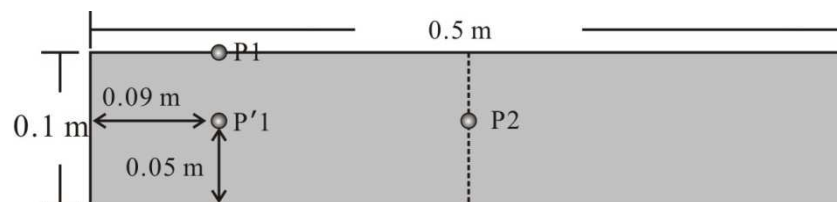


Figure III- 6 : Positions des points d'analyse
(Échelle en mètre)

L'analyse de l'évolution des températures à la surface de la poutre est faite à partir des trois points caractéristiques représentés sur la figure III-6 :

- Le point P'1 se situe sur l'axe médian longitudinal à 16cm du centre
- Le point P1 se situe sur le même axe vertical que le point P'1 mais au niveau de l'arête supérieure,
- Le point P2 est au centre de la poutre.

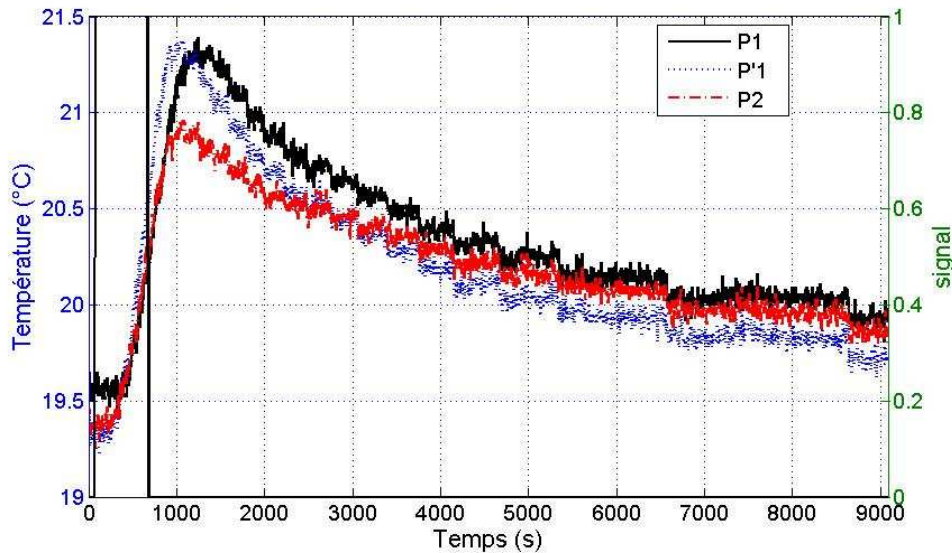


Figure III- 7: Forme de la sollicitation et évolution temporelle de la température de surface de trois points de la poutre

Le signal représentant le fonctionnement de l'inducteur est représenté sur l'échelle de droite de la figure III-7. La forme du signal de sollicitation et son échelle des temps est respectée. Les valeurs en ordonnées sont volontairement arbitraires car le champ d'induction ne peut être facilement et précisément quantifié. De plus, l'analyse des thermogrammes basée sur les fonctions de transfert, décrite théoriquement au chapitre II, repose sur l'hypothèse d'un champ d'induction uniformément réparti le long de la barre. Dans cette méthode d'analyse, seule l'échelle temporelle est respectée mais pas les valeurs en ordonnée. Lors de cet essai, la durée de la sollicitation est de 600 secondes.

L'évolution des points P'1, situé au centre de la poutre et du point P1, situé au bord montre un décalage temporel de 200s dû à la géométrie rectangulaire de la poutre, conformément aux résultats obtenus en simulation au chapitre II. Quel que soit l'axe vertical, les températures au centre sont plus élevées que celles du bord et ces maxima sont également atteints plus rapidement.

L'évolution des températures aux points P'1 et P2 traduit la répartition non uniforme de la température le long de l'axe médian longitudinal de la poutre. La température maximale de 21.5°C est atteinte dans la zone où se situe le point P'1 et pour laquelle l'induction est plus élevée.

III.2.4 Décomposition spectrale du signal d'entrée :

La méthode d'analyse fréquentielle des thermogrammes décrite au chapitre II nécessite de calculer la FFT du signal de sollicitation de la poutre qui est considéré comme le signal d'entrée d'un système. Son évolution temporelle, visible sur la Figure III- 8 est un créneau d'une durée de 600s et correspond à la mise en fonctionnement et à l'arrêt de l'inducteur. Les deux courbes suivantes représentent l'amplitude et la phase de ce signal en fonction de la fréquence.

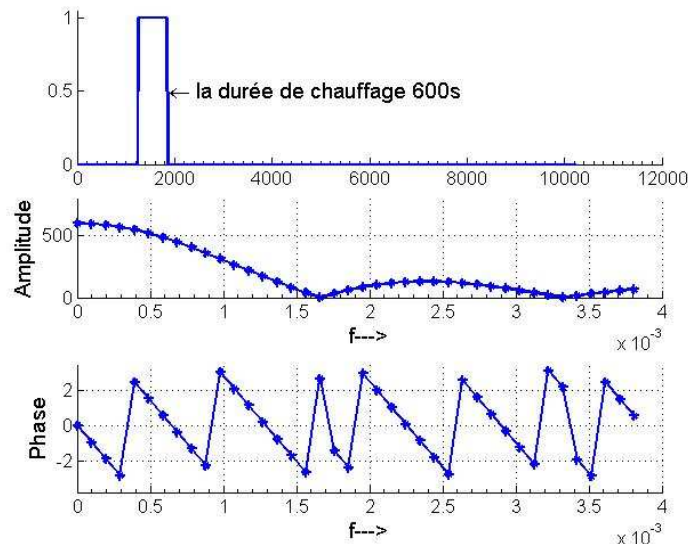


Figure III- 8: Le créneau d'entrée, amplitude et phase de sa FFT

III.2.5 Analyse fréquentielle appliquée à deux points caractéristiques

La caméra enregistre l'évolution des températures pour chaque point élémentaire de la surface de la poutre. Ces évolutions temporelles sont considérées comme les signaux de sortie du système représenté par la poutre. Les transformées de Fourier en phase et en amplitude des évolutions de la température des points P1 et P'1 sont visibles sur les figures III-9 a&b.

Ces courbes présentent une allure générale similaire à celles obtenues en simulation. Les différences des évolutions pour les amplitudes sont moins distinctes pour ces points expérimentaux que celles obtenues en simulation.

Les courbes de phases présentent une évolution cyclique due au domaine de définition de la fonction arc tangente qui est définie ici entre $-\pi$ et $+\pi$. Ces courbes sont alors traitées à l'aide la fonction « unwrap » disponible dans le logiciel MatLab® qui permet d'éliminer les effets de la rotation de phase en cumulant les valeurs angulaires. L'utilisation de cette fonction permet une représentation graphique plus claire de l'évolution fréquentielle des phases.

La figure III-9.c représente ces évolutions et montrent qu'il existe une différence entre les points situés au centre et ceux du bord. Les courbes de phase présentent une caractéristique décroissante légèrement différente.

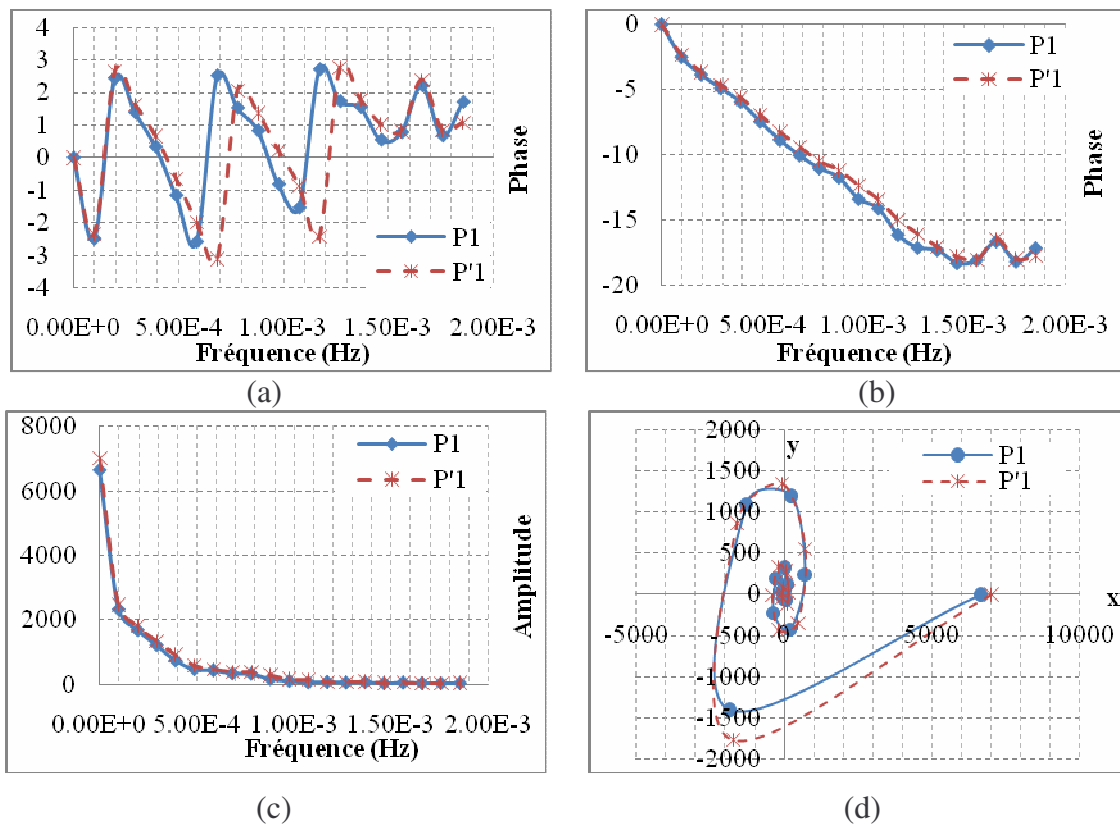


Figure III- 9 :

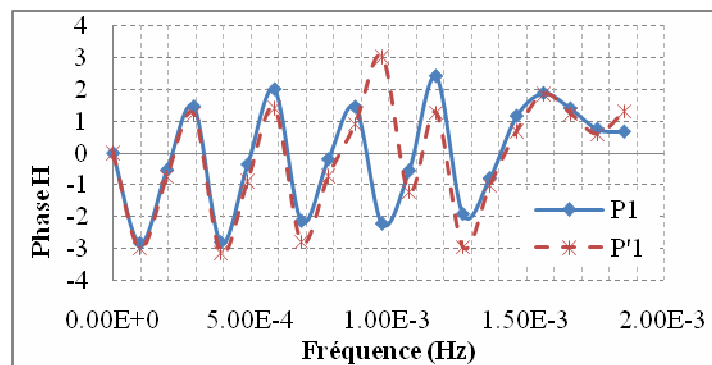
- (a) Evolution des Phases des points P1 et P'1
- (b) Evolution des Phases des points P1 et P'1 après traitement par unwrap
- (c) Evolution des amplitudes des points P1 et P'1
- (d) Lieu de Nyquist de la FFT de la température de deux points de la poutre

La FFT de la réponse en température pour les deux points P1 et P'1 conduit à une série de nombres complexes fonction de la fréquence. Le lieu de Nyquist de la figure III-8.d, représente la partie imaginaire de la fonction de transfert $H(f)$ en fonction de la partie réelle pour chaque point de fréquence.

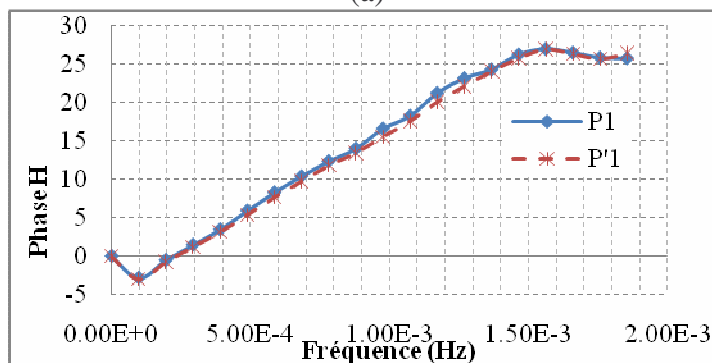
A partir de ce diagramme, un point peut être repéré par l'angle orienté qu'il fait avec l'axe des abscisses. Cette valeur d'angle correspondante peut être reportée sur l'évolution fréquentielle de la phase traitée avec la fonction unwrap.

● Résultat d'analyse fréquentielle par la fonction de transfert

La procédure de traitement fréquentiel a été détaillée au chapitre II sur la figure II-23. Les résultats obtenus pour les deux points caractéristiques P1 et P'1 sont présentés sur la Figure III-10. Ils présentent les déphasages de la fonction de transfert pour les deux points. La représentation des phases déroulées permet de voir qu'il n'y a pas un déphasage important entre les points P1 et P'1.



(a)



(b)

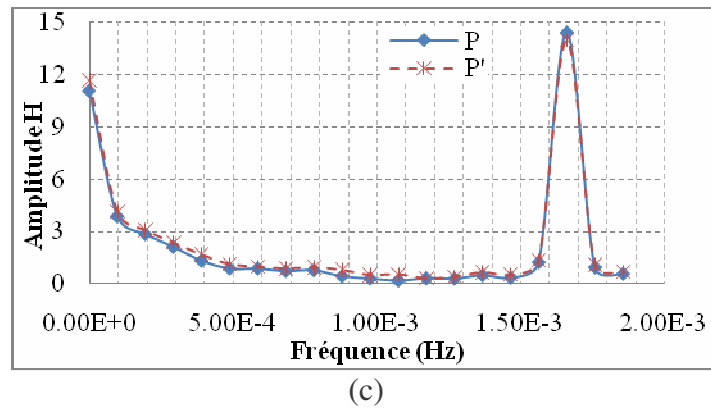


Figure III- 10: (a) Phase de la fonction de transfert ; (b) Phase de déroulement de la fonction de transfert ; (c) Amplitude de la fonction de transfert

Les évolutions de l'amplitude des fonctions de transfert sont représentées sur la Figure III- 10.c. La valeur de l'amplitude de P'1 est toujours supérieure à celle de P1 exceptée pour la fréquence vers $1.7 \cdot 10^{-3}$ Hz.

La transformée du signal d'entrée donne une courbe d'amplitude ayant la forme d'un sinus cardinal. Celle-ci s'annule une première fois vers $1.7 \cdot 10^{-3}$ Hz. La fonction de transfert étant le rapport du signal de sortie sur le signal d'entrée, il est logique d'obtenir une valeur élevée vers $1.7 \cdot 10^{-3}$ Hz.

III.2.6 Analyse fréquentielle appliquée à la série de thermogrammes

Les calculs de FFT sont effectués pour les 8626 points constituant l'image, répartis en 38 lignes et 227 colonnes. La reconstruction des images de phase et d'amplitude est effectuée en remplaçant les points à l'aide de leurs coordonnées. Une échelle de couleur est affectée à chaque valeur de l'amplitude ou de phase pour l'ensemble de l'image.

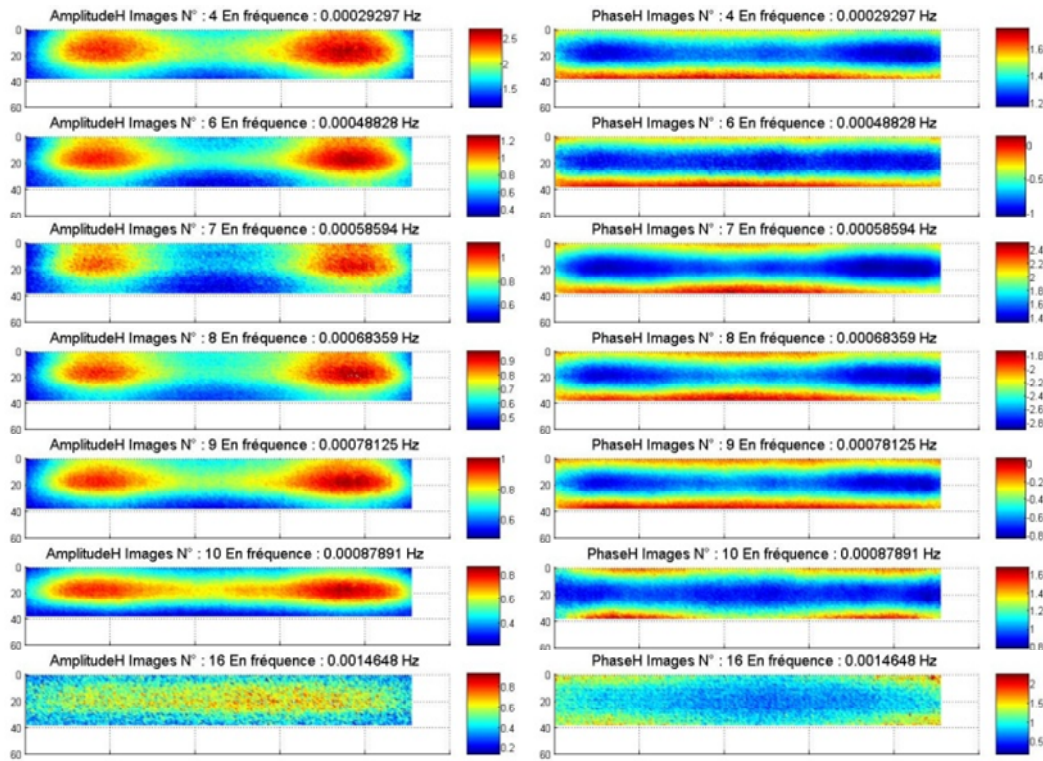


Figure III- 11: Images d'amplitude et de phase obtenues à partir des thermogrammes réels (échelle de couleur ajustée pour chaque thermogramme).

La série de gauche représente l'évolution des amplitudes de la fonction de transfert en fonction de la fréquence. Sur cette représentation, l'échelle de couleur est adaptée à chaque image afin de présenter un contraste maximal. Pour les fréquences inférieures à 10^{-3} Hz, ces images présentent deux zones dont les contrastes semblent traduire la présence de défauts au sein de la poutre. Les images obtenues pour des fréquences supérieures à 10^{-3} Hz montrent l'atténuation apportée par le béton à l'ensemble des composantes. Ces images d'amplitude montrent bien la non uniformité du chauffage le long de la barre.

Les images de phase représentées sur la série de droite sont quant à elles moins sensibles à la non-uniformité du chauffage. Le tracé de la barre métallique centrale apparaît également plus clairement.

Ces deux séries montrent bien l'intérêt principal des images de phases d'être quasiment insensible à la non uniformité du chauffage. L'analyse des seules images d'amplitude pourrait conduire à une interprétation erronée sur la présence d'éventuels défauts.

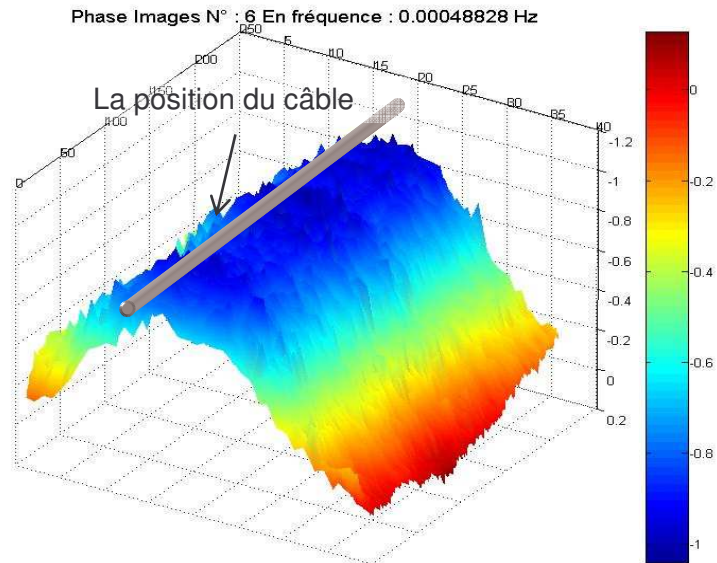
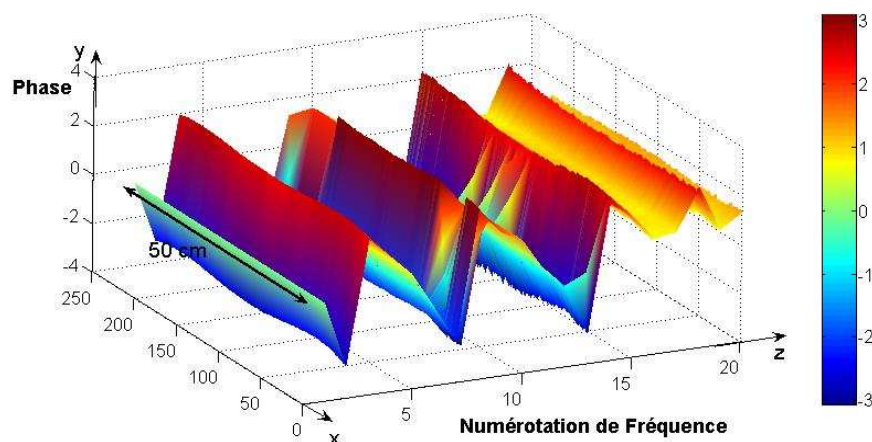


Figure III- 12: Image de phase en 3D

La figure III-12 est une représentation de la phase pour chaque point de la barre. La position réelle de la barre est placée virtuellement afin de montrer que son emplacement coïncide avec la zone des maximum de phase.

Cette représentation tridimensionnelle de la phase correspondant à une fréquence de $f = 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ Hz}$ et ne présente plus deux zones de température plus élevée comme sur les thermogrammes bruts. L'utilisation de ces images de phase rend possible la localisation de la barre métallique et montre l'absence de défaut au sein de ce spécimen.



(a)

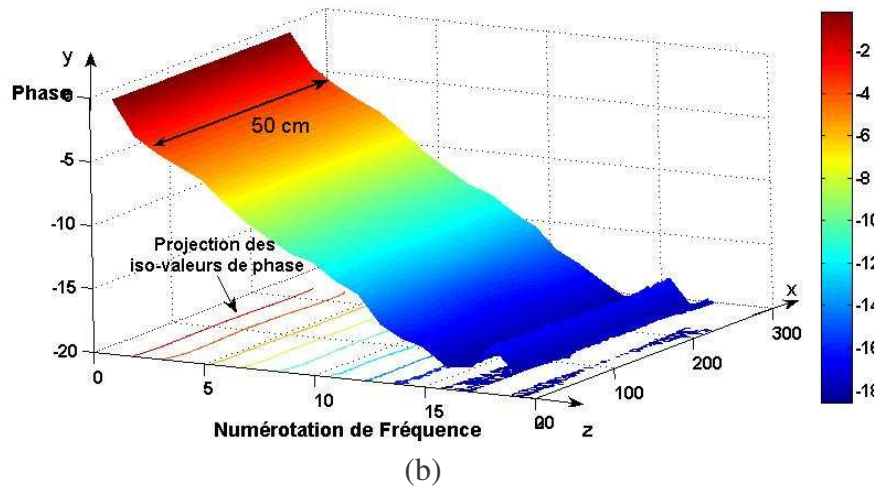


Figure III- 13: (a) Evolution des phases non corrigées (phase de $S(f)$)

(b) Evolution des phases corrigées par la fonction « unwrap »

Le relevé de la position de la barre correspond au lieu des points pour lesquels la valeur de la phase est maximale. Ce choix est effectué à partir de la représentation tridimensionnelle des images de phases dont un exemple est fourni Figure III-12.

Les figures III-13 (a) et (b) présentent l'évolution des phases en fonction des fréquences au niveau de la ligne médiane qui représente la barre à la surface de la poutre. L'axe des abscisses (x) représente la position des points de cette ligne médiane, l'axe des ordonnées (y) leurs phases et l'axe des z leurs fréquences. Le nombre d'images utilisé pour le traitement fréquentiel conduit à une représentation discrète des fréquences dont chaque point est un multiple de $0,09765 \text{ mHz}$.

Les figures III-13 (a) et (b) représentent ces évolutions en fonction de la fréquence pour les points situés le long du tracé de la barre. La représentation figure III-13 (a) est difficilement exploitable à cause de la périodicité des phases. Le traitement des valeurs de phase par la fonction « unwrap » conduit à la figure III-13 (b) sur laquelle les phases diminuent uniformément en fonction de la fréquence.

La projection des iso valeurs de phase sur le plan (xOz) montre des lignes quasiment droites et parallèles traduisant une répartition identique des phases le long de l'axe des abscisses pour chaque fréquence. Les valeurs obtenues pour les fréquences élevées, supérieures à $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Hz}$, ne sont pas représentées car elles ne sont pas significatives.

Cette représentation valide l'hypothèse qu'il est possible de s'affranchir de la non-uniformité du chauffage en analysant les valeurs de phases en fonction de la fréquence sur ce type de spécimen sans défaut.

III.2.7 Phases de la fonction de transfert H

La figure suivante représente les images de phase de la fonction de transfert pour différentes fréquences.

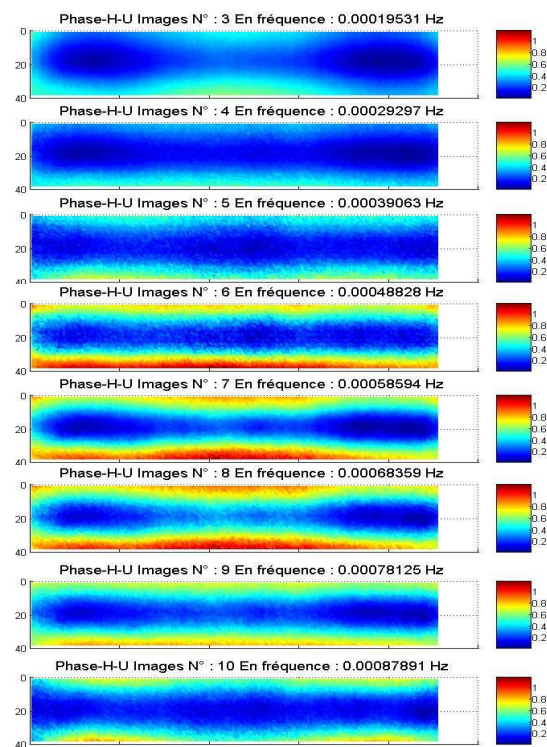


Figure III- 14: Phase de la fonction de transfert H

Cette série de thermogramme a été présentée Figure III- 11 avec une échelle des phases adaptée à chaque image. L'emploi de ce type d'échelle ne permet pas de comparer les images entre elles car une couleur ne correspond pas forcément à la même valeur de phase quand on compare les images entre elles.

Afin d'être comparées, une échelle commune à toute la série d'images doit être définie. Cependant, l'étendue des valeurs parcourues par les phases pour une série d'images est

relativement importante $[0 \text{ à } -18\pi \text{ radians}]$, de plus la différence entre les valeurs minimale et maximale dans chaque image est relativement faible (inférieure à 1 radian). En choisissant comme limites haute et basse les valeurs de phases minimale et maximale parmi toutes les images de la série, cela conduirait à des images ne présentant pas un contraste important.

Par contre en considérant une échelle de couleur identique pour l'ensemble d'une série d'image de phases, il est possible de comparer les couleurs entre elles car elles correspondent aux mêmes valeurs.

Une procédure de classement est effectuée pour trier et adapter l'échelle qui sera commune à tous les thermogrammes d'une série :

- La première étape de cette procédure est de calculer l'étendue des valeurs de phase, $[\Phi_{\max}-\Phi_{\min}]$ pour chaque image.
- L'échelle est alors référencée à zéro en retranchant la valeur minimale aux valeurs maximales $[0 ; \Phi_{\max}-\Phi_{\min}]$.
- Le maximum maximorum est recherché parmi les valeurs maximales de chaque échelle.
- Chaque échelle est ensuite divisée par cette valeur, les échelles sont alors normalisées entre 0 et 1.
- La correspondance entre l'échelle de couleur et les valeurs de phases réduites de chaque image est effectuée.

Cette procédure a été appliquée à la série de thermogramme de la Figure III- 14. Il ressort de cette représentation que les images obtenues pour les fréquences allant de $0,4.10^{-3}$ à $0,6.10^{-3}$ Hz présentent un contraste maximal car elles comprennent des valeurs comprises entre 0 et 1.

III.3 Essais sur la poutre avec défaut

III.3.1 Thermogrammes bruts de la poutre avec défaut

Le spécimen de poutre incluant un défaut de type vide d'injection sur la moitié de sa longueur a été sollicité en suivant la même procédure expérimentale que celle de la poutre sans défaut. La figure III-15 présente une série de 8 thermogrammes parmi les 2000 enregistrés.

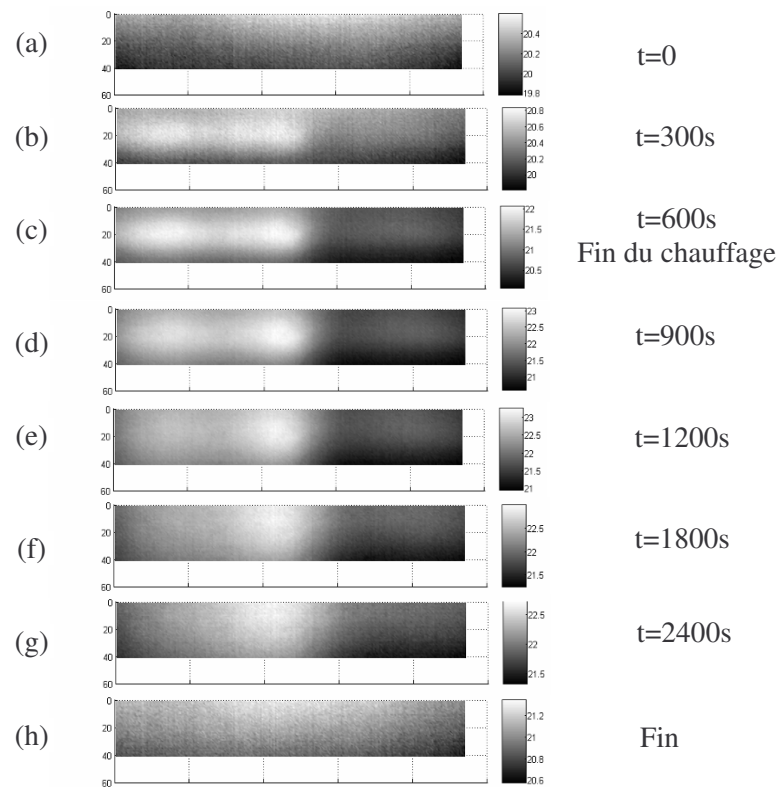


Figure III- 15: Thermogrammes bruts de la poutre avec défaut

La durée du chauffage est de 600s et les thermogrammes sont enregistrés à des intervalles de 5 s. Le premier thermogramme, Figure III- 15.a, correspond à l'instant initial lorsqu'aucune sollicitation n'est appliquée. Les thermogrammes suivants Figure III- 15.b, c, et d montrent globalement une augmentation de la température plus importante sur la partie gauche de la poutre que sur celle de droite. La moitié de gauche a été fabriquée sans défaut, alors que dans celle de droite la barre métallique est entourée d'air pour simuler le manque de coulis. Physiquement, la zone avec défaut présente une résistance thermique plus importante que la zone saine car la conductivité thermique de l'air est plus faible que celle du béton. Il apparaît donc logique que les températures soient plus élevées sur la zone correctement injectée.

Après $t = 900s$, la température de surface décroît jusqu'à redevenir uniforme à la fin de l'essai ($t_{\text{final}} \approx 2h30$). Comme le montre les thermogrammes e,f et g, cette décroissance de la température n'est pas uniforme sur toute la surface de la poutre. La distribution des températures sur le côté gauche n'est pas uniforme en partie à cause de la non uniformité du chauffage provoquée par l'inducteur et d'autre part à cause des effets de bords. La Figure III- 15.f & g la chaleur se dissipe et il ne reste qu'une zone plus chaude au milieu de la poutre. La

Figure III- 15.h correspond au champ des températures à la fin de l'essai, redevenu quasi-uniforme.

Par rapport à la partie saine les thermogrammes montrent une évolution inférieure à 1°C de la température au niveau de la partie défectueuse par rapport à la température initiale et de l'ordre de 3°C pour la partie saine.

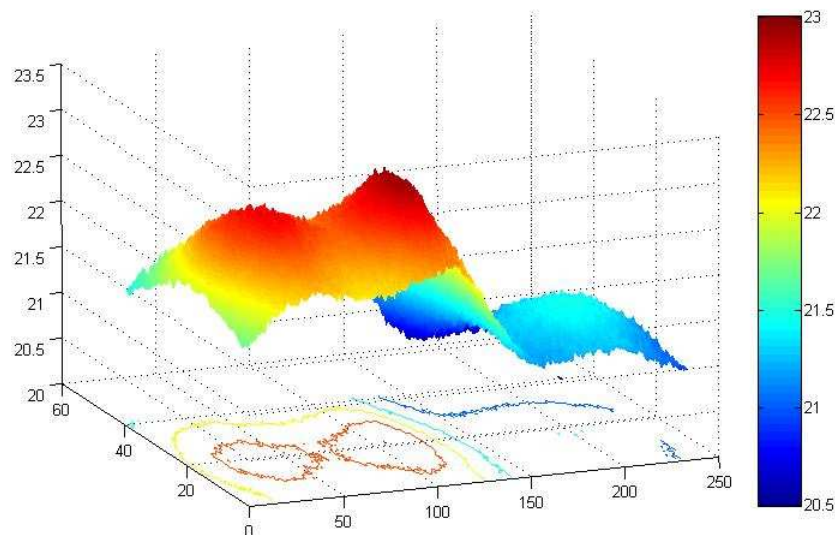


Figure III- 16 : Représentation tridimensionnelle du thermogramme Figure III- 15.d
[Echelle x et y en pixels, température en z (°C)]

La Figure III- 16 est la représentation tridimensionnelle du thermogramme Figure III- 15.d. Ce mode de représentation met en évidence les différences de températures entre les zones saines et défectueuses. La partie de gauche est globalement plus chaude de 1°C en moyenne que celle de droite. Elle présente deux zones plus chaudes, l'une à cause de la non-uniformité du chauffage et l'autre due à la diffusion du flux de chaleur au niveau de la transition de la zone défectueuse vers la zone correctement injectée.

A partir de ces thermogrammes, il est semble possible de déterminer la position de la barre métallique sur la moitié de la longueur de la poutre. La dissymétrie du champ de température laisse penser qu'il y a un défaut sur une des parties de la barre. A priori, sur la partie droite car son élévation en température est plus faible. Sur le côté droit, Les deux zones plus chaudes ont déjà été analysée au chapitre II, elles sont dues à la non-uniformité du chauffage et à la diffusion de la chaleur au niveau de l'interface zone saine/défaut.

Un traitement numérique de ces images peut faciliter la mise en évidence de la position de la barre.

III.3.2 Mise en évidence de la position de la barre avec défaut :

L'analyse des températures sur les axes verticaux montre que les températures au centre sont plus élevées que celles atteintes sur les bords, ces maxima sont également atteints plus rapidement.

Un thermogramme se présente comme un tableau dont les températures sont localisées par leurs coordonnées cartésiennes. L'extraction de la température maximale atteinte dans chaque colonne de ce tableau permet de localiser la position du câble. Cette recherche des maxima a été appliquée à la fin de la période de chauffage à $t=600$ s pour obtenir des gradients de température importants. Le résultat de cet algorithme est présenté Figure III- 17.

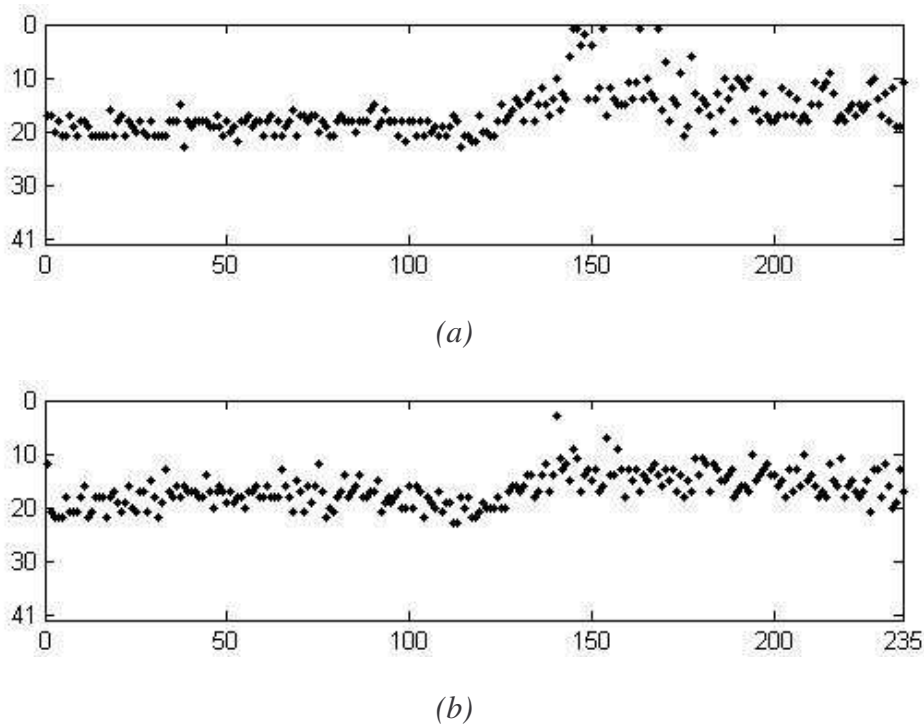


Figure III- 17 : (a) Extraction des maxima de températures à la fin de la période de chauffage
(b) Extraction des maxima de températures 5 minutes après la fin de la période de chauffage
(Echelle en pixels)

Cette recherche des maxima a été étendue à plusieurs thermogrammes.

Cette nouvelle procédure se décompose selon les quatre étapes suivantes :

- 1°. Pour chaque point, il faut rechercher la température maximale atteinte par ce point sur une série de thermogrammes (recherche des maxima temporels sur les thermogrammes allant de $t = 600s$ à $900s$).
- 2°. Cette procédure est appliquée individuellement à tous les points du thermogramme.
- 3°. Constitution d'un tableau reprenant tous ces maxima temporels.
- 4°. Recherche des températures maximales atteintes dans chaque colonne du tableau précédemment constitué.

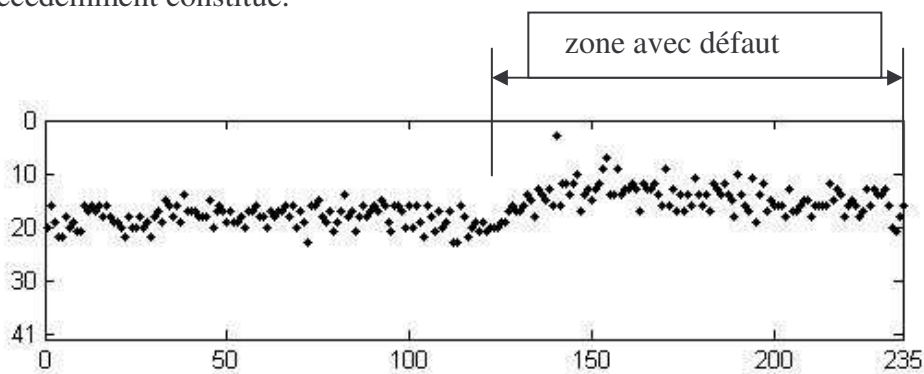


Figure III- 18 : Résultats obtenus après la recherche des maximums temporels et analyse des lignes verticales (échelle en pixels)

Le résultat obtenu par cette procédure est visible Figure III- 18. Il permet bien de visualiser le tracé de la barre mais ne permet pas de conclure sur la présence éventuelle de défaut. La dispersion des résultats est plus importante au niveau de la zone défectueuse à droite.

III.3.3 Analyse du champ de températures à la surface de la poutre :

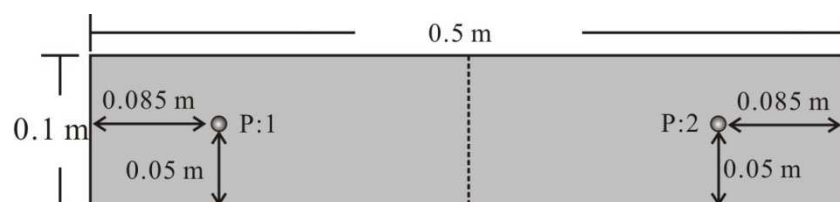


Figure III- 19: Positionnement des points d'analyse

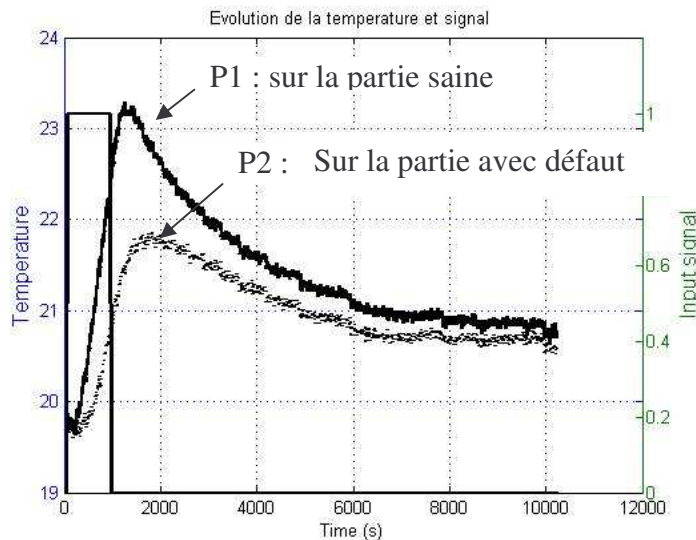


Figure III- 20: Forme de la sollicitation et évolutions temporelle des températures de surface de deux points de la poutre

Le signal de sollicitation est un créneau d'une durée de 600 secondes et la température initiale de la poutre est de 19.8°C au début de l'expérimentation. La température maximale atteinte au cours de cet essai est de 23.3°C .

La figure III-20 représente les évolutions de la température pour deux points caractéristiques (figure III-19):

- Le point P1 se situe sur l'axe médian longitudinal de la partie saine.
- Le point P2 se situe sur le même axe horizontal que le point P1, mais sur la partie avec défaut.

L'évolution de la température du point P1 est plus rapide et plus importante que celle de P2. La courbe de l'évolution de P2 est plus limitée, la température maximale est atteinte avec 400 secondes de retard par rapport à P1. Ce retard et cette atténuation sont dus à la présence du défaut qui augmente la résistance et la capacité du milieu.

III.3.4 Analyse fréquentielle appliquée à deux points caractéristiques

Une analyse fréquentielle est appliquée aux points P1 et P2, les résultats obtenus sont présentés sur la figure ci-dessous.

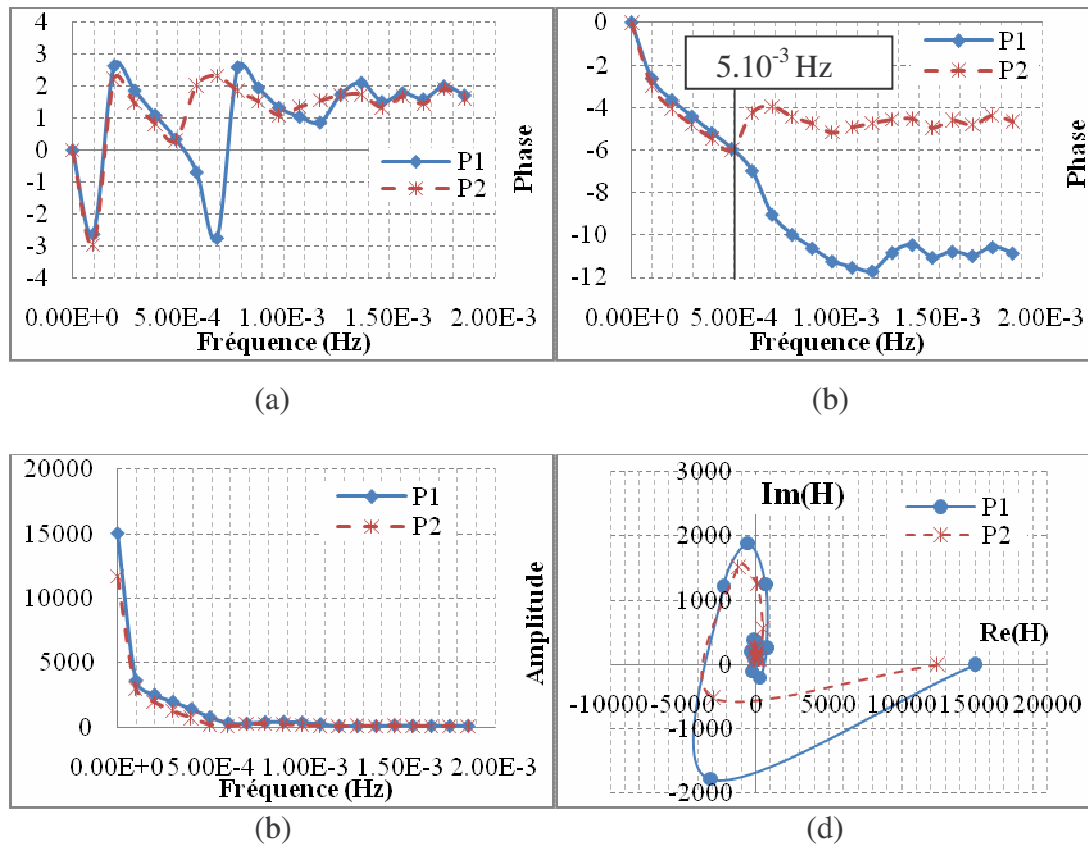


Figure III- 21 : (a) Evolution des Phases des points P1 et P2
 (b) Evolution des Phases des points P1 et P2 après traitement par unwrap
 (c) Evolution des amplitudes des points P1 et P2
 (d) Lieu de Nyquist de la FFT de la température de deux points de la poutre

La FFT de la réponse en température des deux points P1 et P2 donne une série de nombres complexes en fonction de la fréquence. La représentation brute de la phase en fonction de la fréquence n'est pas directement exploitable du fait de sa périodicité figure III-21.a, la représentation de Nyquist, figure III-21.d, montre également ce phénomène.

La figure III-21.b montre l'évolution fréquentielle des phases. Les courbes diminuent, jusqu'à la fréquence de $0,5 \cdot 10^{-3}$ Hz comme pour une poutre sans défaut. A partir de cette fréquence les courbes divergent. Celle de P1 continue sa décroissance comme pour une poutre sans défaut alors que P2 reste presque stable. Ce point de bifurcation est un résultat remarquable par rapport à l'évolution obtenue pour la poutre saine.

La figure III-21.c présente les courbes d'amplitude en fonction de la fréquence. Elles sont toutes deux décroissantes. La courbe du point P1 se situe toujours au dessus de P2 car la zone saine est moins résistive que la zone avec défaut. Leur atténuation est importante à mesure que la fréquence augmente.

● Résultat d'analyse fréquentielle par la fonction de transfert

Les fonctions de transfert ont été calculées à partir des résultats précédents, figure III-22 a, b & c.

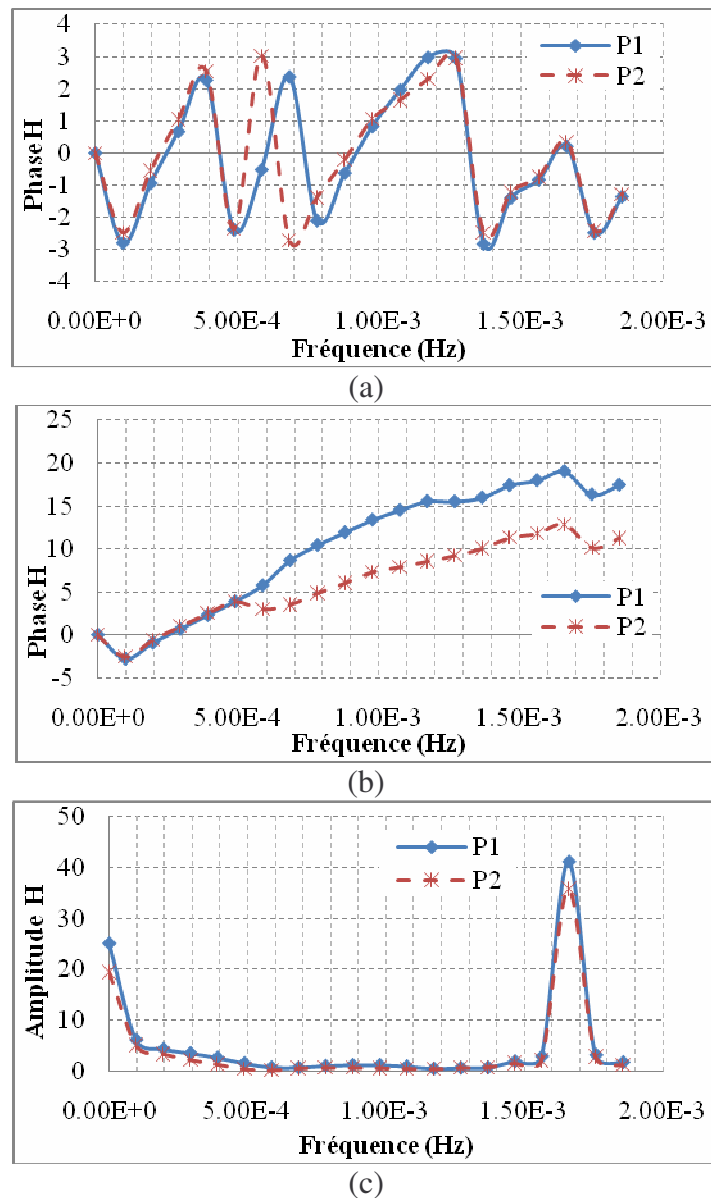


Figure III- 22 : (a) Phase de la fonction de transfert ; (b) Phase déroulée de la fonction de transfert ; (c) Amplitude de la fonction de transfert

L'évolution des phases pour les points P1 et P2 diverge à partir de $0,5 \cdot 10^{-3}$ Hz. Cette divergence apporte des informations sur la présence éventuelle d'anomalies, surtout en le comparant avec les évolutions obtenues sur la poutre saine (Figure III- 10).

Les évolutions de l'amplitude des fonctions de transfert sont représentées dans la figure III-22 c. La valeur de l'amplitude de P1 est toujours supérieure à celle de P2. Le saut observé à la fréquence de $1,7 \cdot 10^{-3}$ Hz correspond à une annulation du signal d'entrée, ce qui conduit à des valeurs élevées de l'amplitude de la fonction de transfert.

III.3.5 Analyse fréquentielle appliquée à la série de thermogrammes

Les images de phases et d'amplitudes de la fonction de transfert sont reconstruites à partir des coordonnées de chaque point et sont présentées Figure III- 23 en fonction de la fréquence.

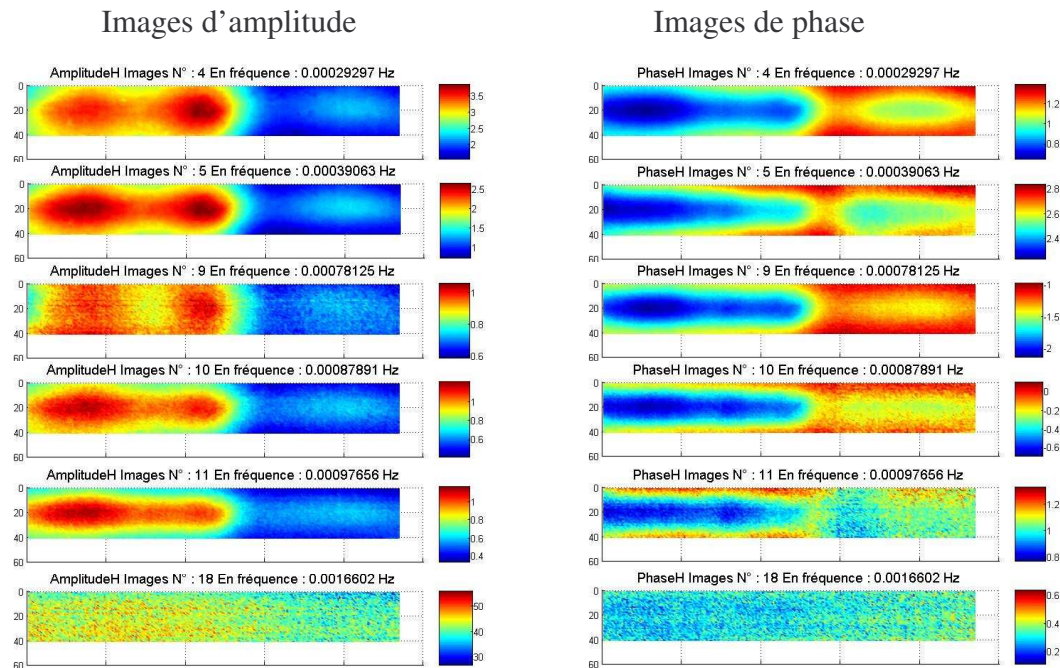


Figure III- 23 : Images d'amplitude et images de phase de la fonction de transfert $H(f)$

L'ensemble de ces images présente une dissymétrie entre les parties gauche et droite. En comparant, ces images avec celles de la poutre saine, la partie gauche de la poutre montre le tracé de la barre alors que sur la partie droite, le contraste est à peine visible. La moitié droite de la poutre présente une résistance thermique plus importante à cause de l'air autour de la barre métallique.

Les images obtenues pour des fréquences supérieures à 10-3Hz montrent l'atténuation apportée par le béton à l'ensemble des composantes.

L'influence de la non-uniformité du chauffage est moins visible sur les images de phases que celles d'amplitudes.

Les échelles de couleur sont graduées en radians, l'étendue des valeurs est adaptée aux valeurs minimale et maximale rencontrées dans l'image. Chaque image présente ainsi un contraste maximal pour la fréquence considérée.

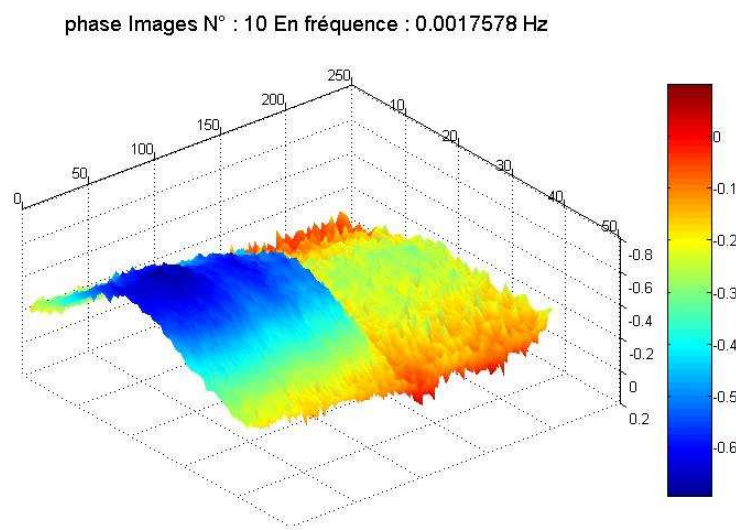
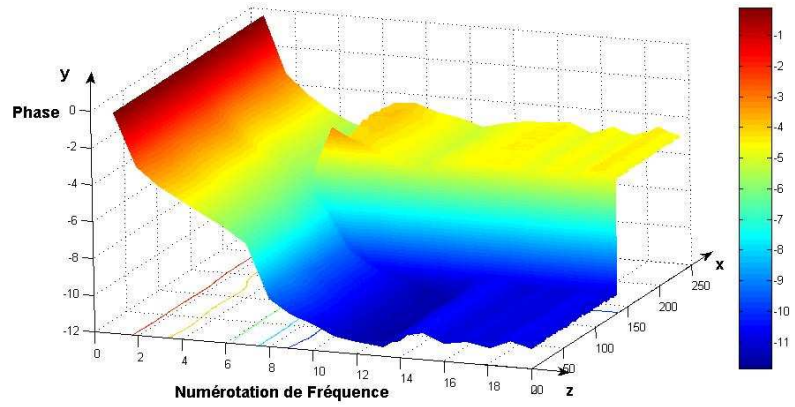
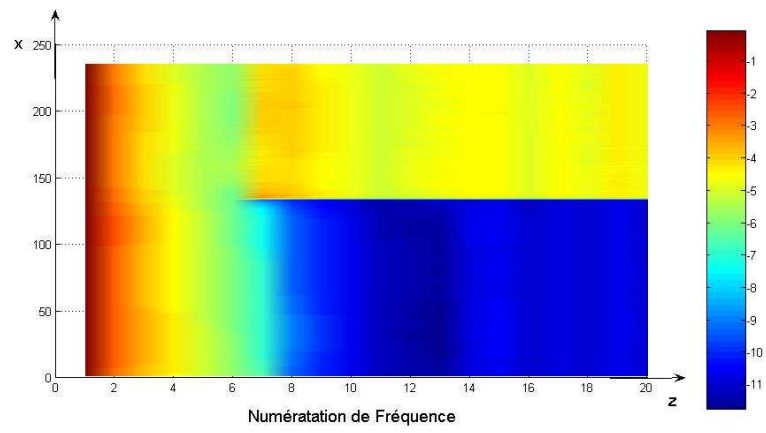


Figure III- 24: Images de phase obtenues à partir des thermogrammes réels.

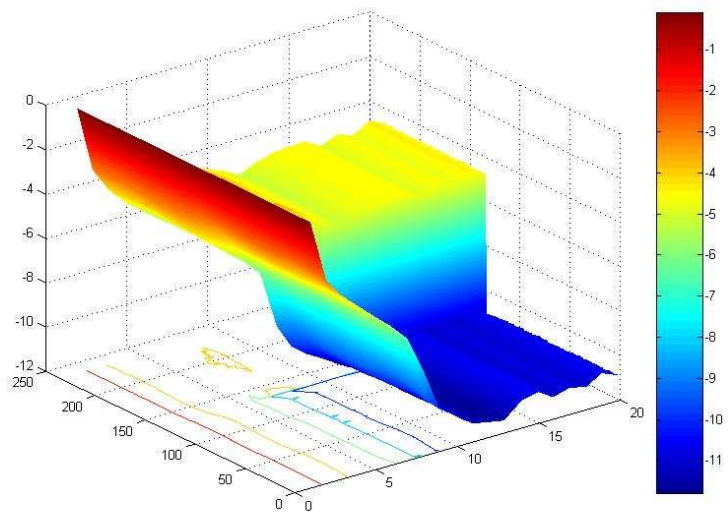
Comme pour les résultats de la poutre saine, obtenues pour des fréquences inférieures à 10-3Hz, les images d'amplitudes présentent des contrastes qui traduisent de manière qualitative la présence de la barre métallique au sein de la poutre. La représentation tridimensionnelle des phases montre clairement la discontinuité de cette évolution qui intervient vers 0,5.10-3Hz. La ligne de séparation ne passe pas exactement au milieu de la poutre à cause de la diffusion de la chaleur au niveau du raccordement du défaut et de la zone injectée.



(a)



(b)



(c)

Figure III- 25 : Evolution des phases unwrap (b vue de dessus)

L'évolution des phases le long de son axe longitudinal de la poutre saine a été présentée Figure III- 13, une étude similaire a été effectuée pour cette poutre présentant un défaut de type manque de coulis, figure III-25. La position des points est repérée sur l'axe des abscisses, les valeurs de phase sont représentées en ordonnée et la fréquence sur l'axe z. Ces fréquences sont des multiples de 9,76510-5 Hz.

Les figures III-25 a,b & c montre respectivement le résultat en vue de 3D et en vue de dessus. Cette courbe peut être comparée avec l'évolution des phases obtenue pour la poutre saine. Ce résultat important montre bien une cassure dans l'évolution fréquentielle des phases et traduit la présence du défaut.

III.3.6 Phases de la fonction de transfert H

Une procédure similaire d'adaptation d'une échelle commune à la série d'images de phase conduit aux résultats de la figure III-26.

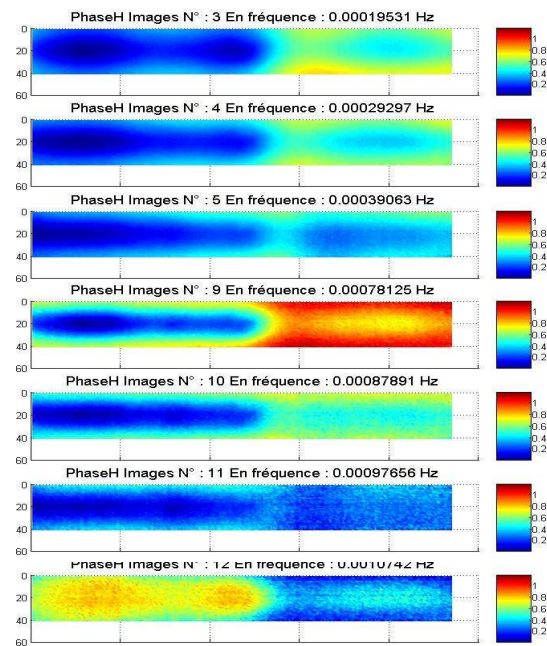


Figure III- 26: Phase de la fonction de transfert avec une échelle commune

Ces images montrent des différences entre les parties saine et défectueuse. En fonction des fréquences choisies ces images comparées à celle obtenues pour la poutre sans défaut montrent bien la présence du défaut sur la partie droite. Le contraste maximal est atteint pour les images n°9 et n°10.

Les caractéristiques de la poutre sont :

Gaine métallique	Diamètre interne 22mm	Diamètre externe 27mm
Barre métallique	Diamètre 12mm	
Poutre béton	Section 100x100mm	Longueur 1500mm

III.4.1 Modélisation d'une poutre contenant une gaine métallique :

III.4.1.1 Champ de température :

Ces transferts de chaleur ont été modélisés à l'aide du logiciel Ansys®. Ces résultats ont été obtenus après une sollicitation de 600 secondes. La température atteinte par l'extrémité présentant un défaut d'injection (figure III-28 b) est supérieure à celle correctement injectée (figure III-28 a).

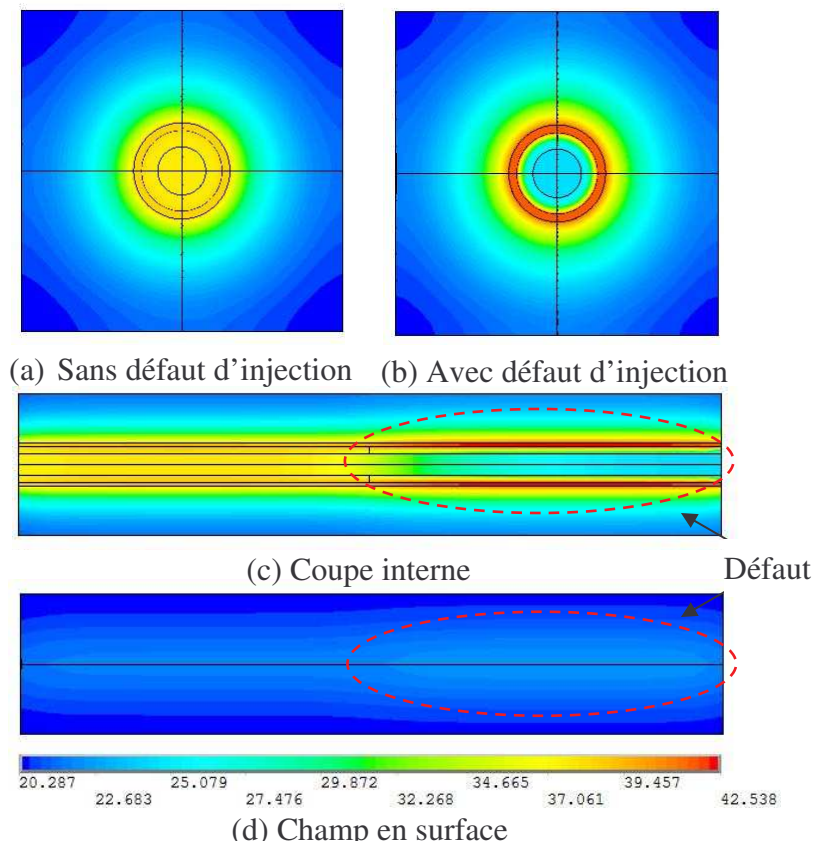


Figure III- 28: a,b,c et d – Résultats de simulation obtenus pour une sollicitation thermique au bout de 600s de chauffage.

La vue en coupe de la figure III- 28 c montre la répartition du champ des températures internes dans le plan médian de la poutre. Le vide d'injection conduit à une élévation de la température de la gaine car l'air qui constitue le défaut présente une conductivité thermique plus faible que celle du coulis.

La figure III- 28 d montre le champ des températures à la surface de la poutre.

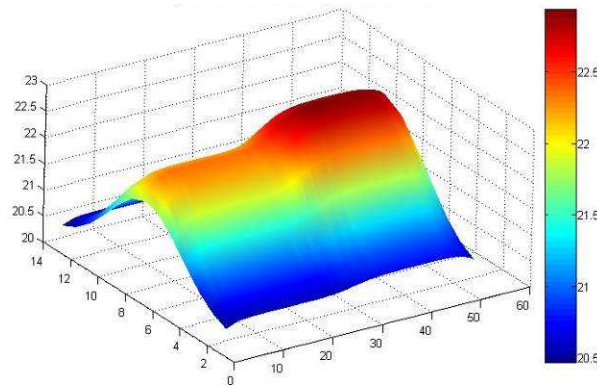


Figure III-29 : Représentation tridimensionnelle des températures à la surface de la poutre au bout de 600s de chauffage.

Ce champ des températures de surface est représenté en trois dimensions sur la figure III-29, celle-ci montre bien qu'au niveau de l'arête centrale il existe une différence de température entre les deux zones injectée et non injectée de l'ordre de 1°C pour une sollicitation de 600s.

Ces résultats de simulation sont encourageants pour la détection de vide d'injection dans les gaines de précontrainte métalliques. Les effets thermiques obtenus à la surface du parement de la poutre avec une gaine métallique sont inversés par rapport à ceux d'une poutre avec une gaine en matière plastique. Sur un thermogramme brut une zone « chaude » correspondra donc à une zone présentant un défaut.

III.4.1.2 Analyse fréquentielle des thermogrammes

La simulation a permis d'obtenir la carte des températures de surface pour un côté de la poutre à des intervalles de temps de 5 secondes. Une analyse fréquentielle basée sur l'algorithme de la FFT est appliquée à l'évolution temporelle de chaque nœud du maillage constituant la surface extérieure. Ces transformées de Fourier étant des séries complexes, les résultats obtenus sont représentés par des images de phase et d'amplitude pour une fréquence donnée.

Ces deux séries d'images de phase et d'amplitude montrent bien une différence des valeurs entre les zones saine et défectueuse qui permettent d'en déduire l'existence d'un défaut.

Le traitement fréquentiel appliqué à ces résultats de simulation n'apporte pas d'informations supplémentaires améliorant l'analyse du résultat. Cependant sur des données expérimentales soumises à des grandeurs d'influence comme la variation d'émissivité de la surface du parement ou la non-uniformité de la sollicitation, ce traitement fréquentiel améliore la qualité des résultats.

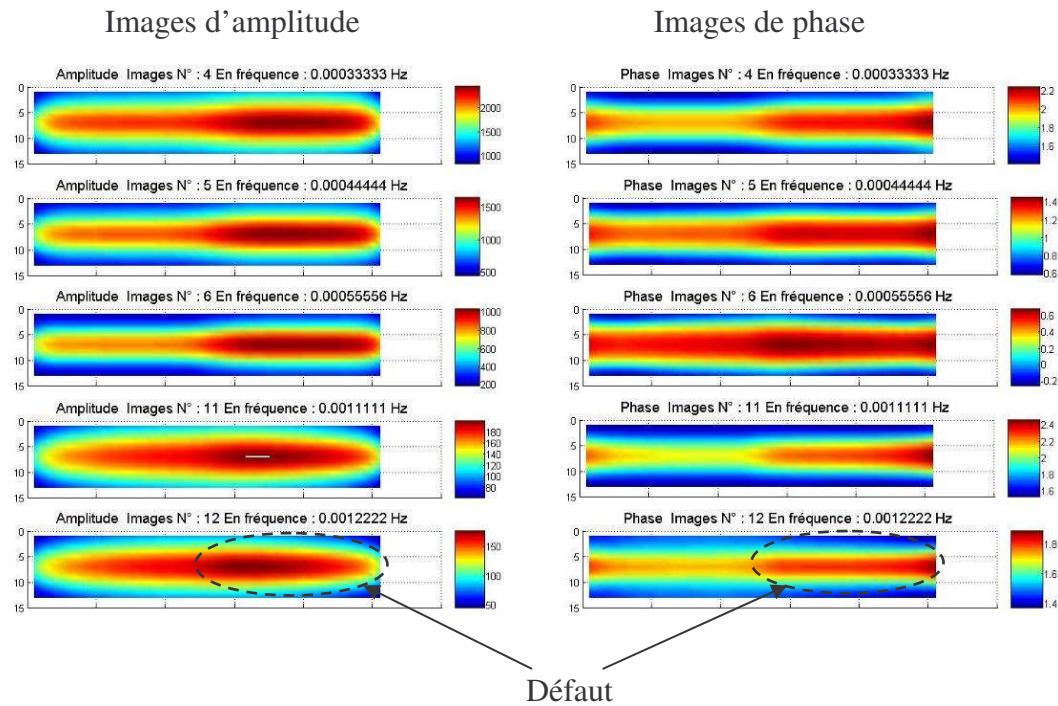


Figure III- 30: Images d'amplitude et de phase obtenues à partir des thermogrammes simulés

L'influence de la convection sur le bord de la poutre est présente sur les images d'amplitude.

III.4.2 Présence de ferrailages passifs

Les ouvrages d'art réalisés en béton précontraint contiennent également des armatures passives qui se situent quelques centimètres en dessous de la surface des éléments. La densité de ces armatures passives est également plus importante, au niveau de la tête d'ancrage des câbles aux extrémités des poutres. La présence de ces armatures métalliques va perturber le relevé thermographique car elles vont être sujettes à un échauffement dû au champ magnétique de l'inducteur. Afin d'évaluer les perturbations induites par ce phénomène, une poutre contenant de

ferraillages passifs a été fabriquée en laboratoire. La barre centrale de cette poutre est entièrement remplie de coulis et ne possède pas de gaine.

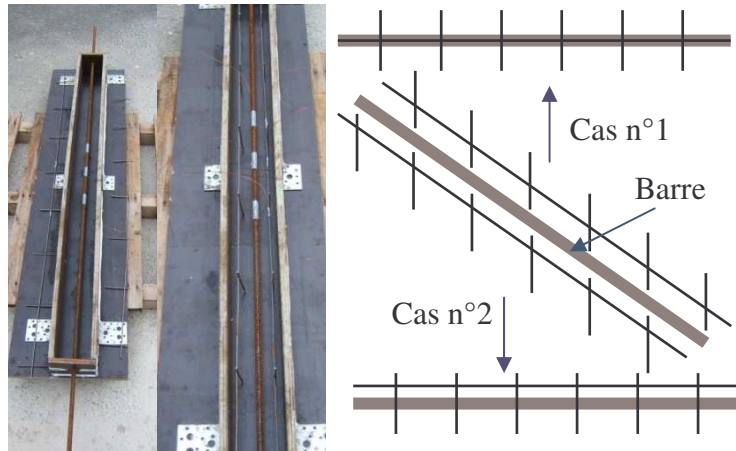


Figure III- 31 : Présence de ferraillages passifs

Deux ferraillages passifs ont été inclus de part et d'autre de la barre métallique centrale.

- Un de ces armatures a une barre qui se situe dans le même plan horizontal que la barre métallique centrale (Cas n°1 sur la figure III-31).
- L'armature se situant sur le côté opposé a une barre décalée de 2 centimètres vers le haut par rapport au plan horizontal de la barre métallique centrale. (Cas n°2 sur la figure III-31).
- Dans les deux configurations précédentes des barres métalliques verticales de 9 centimètres de longueur sont soudées à ces armatures horizontales.

III.4.2.1 Chauffage de la poutre dans laquelle l'armature passive est dans le même plan que la barre centrale.

La poutre a été placée sur l'inducteur et soumise à une sollicitation thermique durant 300 secondes. La série des thermogrammes obtenue est présentée ci-dessous :

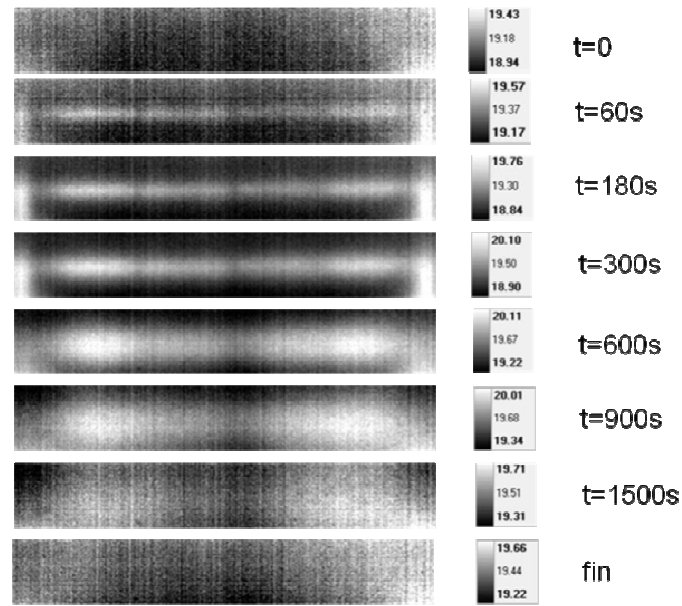


Figure III- 32 : Thermogrammes bruts pour le cas n°1

La barre horizontale de l'armature passive étant plus proche de la surface de la poutre, elle apparaît plus rapidement que dans les cas précédents. Les petites barres verticales sont également visibles sur les thermogrammes. A partir de 600 secondes, l'influence du chauffage de la barre centrale est clairement visible. A partir de 900 secondes, la diffusion thermique rend ces thermogrammes bruts difficilement interprétables.

La non-uniformité du chauffage est plus faiblement perceptible au début de l'essai car la barre horizontale est plus fine que la barre métallique centrale. Ensuite, la non-uniformité du chauffage se révèle plus marquée car elle provient de la barre centrale qui en étant plus massive délivre une puissance plus importante mais retardée.

Les conducteurs verticaux placés aux extrémités de la poutre chauffent plus que ceux placés entre les deux bras de l'inducteur. Les conducteurs verticaux placés aux extrémités sont placés sur le trajet du flux magnétique, ils sont donc soumis à des courants de Foucault. Les autres conducteurs verticaux intermédiaires sont placés perpendiculairement à ce flux magnétique et ne sont pas le siège de courant induits.

Le traitement fréquentiel précédemment décrit a été appliqué à cette série de thermogrammes, les résultats obtenus pour les images de phase sont présentés ci-dessous :

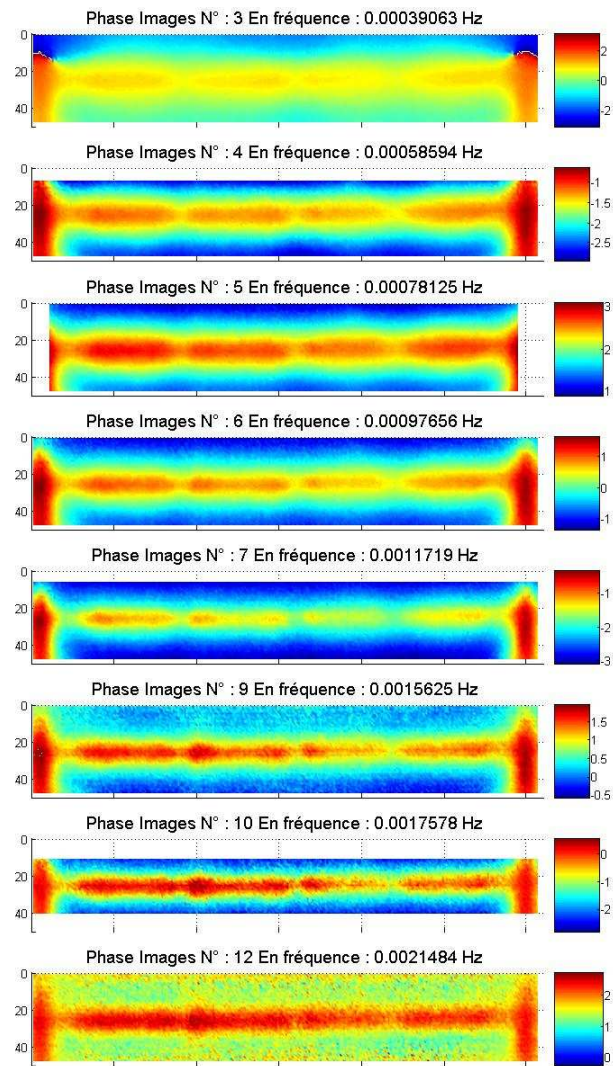


Figure III- 33 : Images de phase pour le cas n°1

Ces résultats ne peuvent laisser supposer l'existence d'une première barre plus fine au premier plan comme c'est le cas. La présence des barres verticales est visible. Les barres situées aux extrémités de la poutre apparaissent clairement, par contre les trois barres intermédiaires ne sont pas visibles sur toute leur longueur. Aux endroits où se situent ces barres, une discontinuité des valeurs de phase est visible le long de l'axe médian horizontal. La présence de ces barres verticales affecte le transfert du flux vers la surface et se traduit par une température plus faible sur les thermogrammes bruts.

III.4.2.2 Chauffage de la poutre dans laquelle l'armature passive est décalée de deux centimètres par rapport à la barre centrale.

La poutre a été placée sur l'inducteur et soumise à une sollicitation thermique durant 900 secondes. La série des thermogrammes obtenue est présentée ci-dessous :

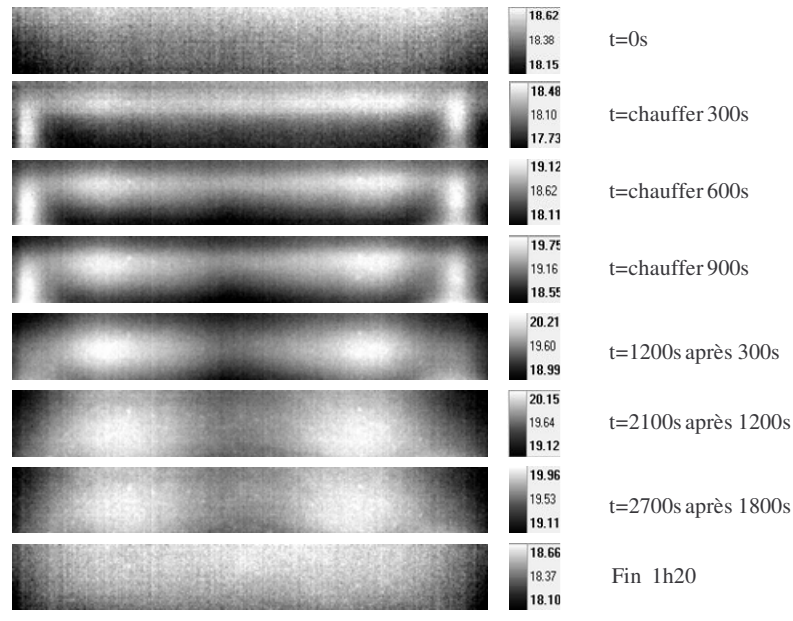


Figure III- 34 : Thermogrammes bruts pour le cas n°2

La barre horizontale de l'armature passive étant située plus haut que la barre centrale, elle apparaît décalée à partir de 300 secondes. Ensuite, se révèle le tracé de la barre centrale située plus bas mais affectée par la non-uniformité du chauffage. A partir de 900 secondes, apparaît l'influence du décalage des deux barres qui en chauffant décale la zone chaude vers le haut de la poutre. Après 1200 secondes, la diffusion de la chaleur dans la poutre atténue les contrastes de température à sa surface.

La présence des barres verticales situées aux extrémités est visible, par contre les trois barres verticales intermédiaires ne sont pas visibles sur ces thermogrammes. Les barres situées aux extrémités de la poutre apparaissent clairement car elles se situent sur le tracé du champ magnétique. A 1200 secondes, elles n'apparaissent plus sur le thermogramme.

Le traitement fréquentiel précédemment décrit a été appliqué à cette série de thermogrammes, les résultats obtenus pour les images de phase sont présentés ci-dessous :

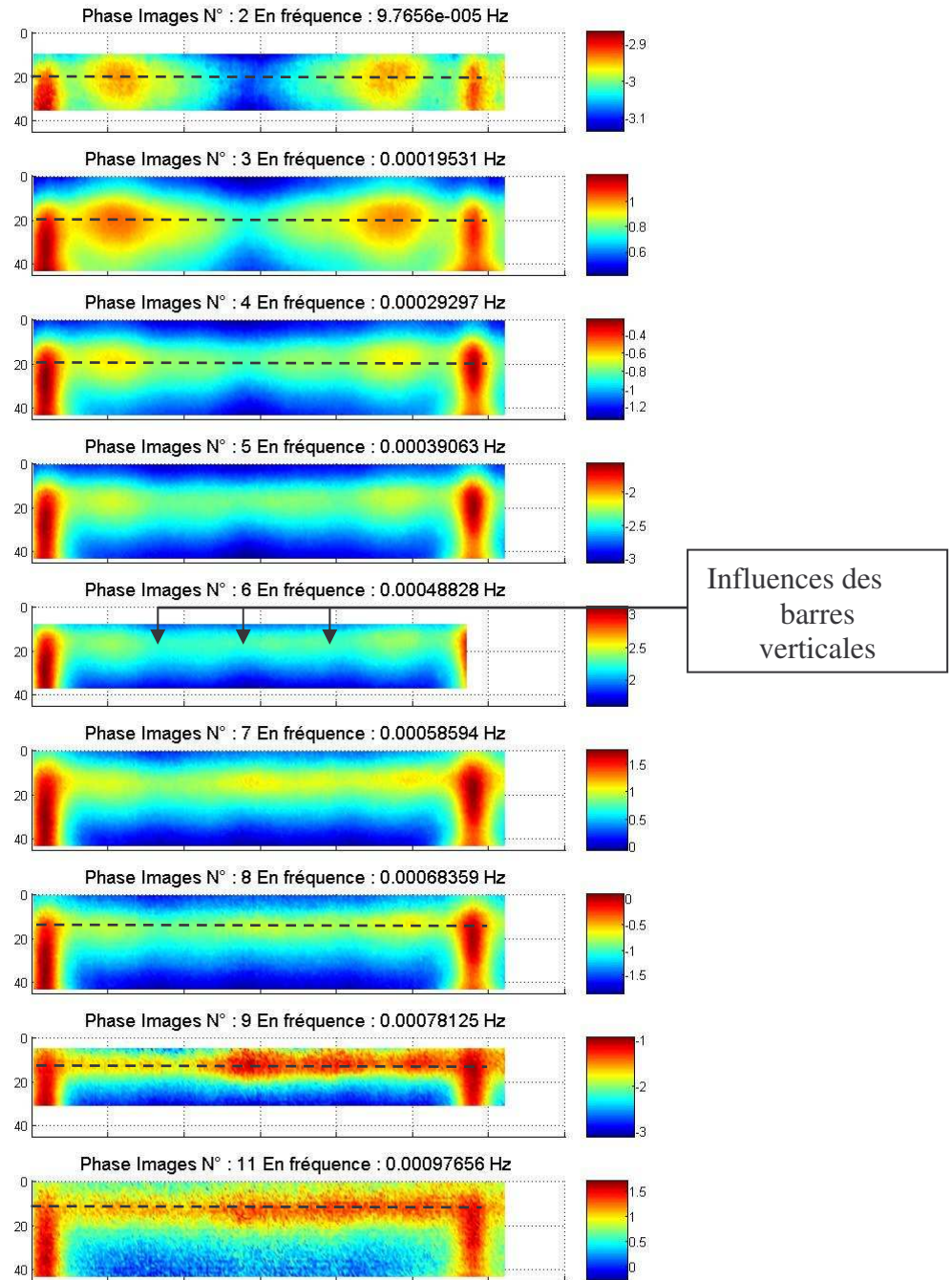


Figure III- 35 : Images de phase pour le cas n°2

Les images n°2 et n°3 obtenues aux basses fréquences montrent bien la présence de la barre centrale ainsi que la non-uniformité du chauffage. Les images suivantes n°4, 5 et 6, sont moins

soumises à la non-uniformité du chauffage. A mesure que l'on monte en fréquence sur les images suivantes, apparaît la présence de la barre du haut représentant l'armature passive. Ces résultats montrent qu'en fonction de la fréquence d'analyse, des éléments apparaissent plus ou moins clairement selon la profondeur à laquelle ils se trouvent.

Les petites barres verticales situées aux extrémités sont visibles sur cette série d'images de phase. La présence des barres intermédiaires verticales n'est pas clairement visible sur ces images.

III.4.3 Conclusion sur ces résultats complémentaires :

Le changement de la nature de la gaine conduit à une modification de l'interprétation des résultats de simulation numérique. Ces travaux n'ayant pas fait l'objet d'étude expérimentale, à cause de l'absence de corps d'épreuve incluant une gaine métallique, il apparaît intéressant d'effectuer ces essais.

La présence d'armatures passives rend plus difficile les interprétations des thermogrammes bruts. La localisation des câbles reste cependant possible. L'analyse fréquentielle fournit des informations complémentaires sur la profondeur des armatures.

L'analyse fréquentielle n'est faite que pour atténuer la non-uniformité du chauffage par induction. La conception d'un inducteur plan uniforme apparaît comme une voie de développement possible.

III.5 Conclusion

La première partie de ce chapitre a été consacrée aux résultats expérimentaux obtenus sur les deux premiers spécimens de poutre sollicités de manière identique. Une procédure d'analyse identique des résultats a été menée sur ces deux spécimens. Dans les deux cas les résultats obtenus tant au niveau des thermogrammes bruts que des images de phases et d'amplitudes sont en accord avec ceux de modélisation obtenus au chapitre II.

L'utilisation de cette méthode fréquentielle basée sur l'analyse par fonctions de transfert a permis de réduire l'impact de la non-uniformité du chauffage et d'exploiter les signaux issus du chauffage par induction. Sans avoir une idée précise de la distribution spatiale et temporelle de la

sollicitation, il est envisageable d'avoir des informations sur la présence éventuelle de défaut du type vide d'injection. Cette méthode ne requière pas d'avoir recours à un point de référence comme c'est souvent le cas avec les méthodes de traitement par contraste des thermogrammes.

Les thermogrammes bruts obtenus sur la poutre avec défaut montrent bien une dissymétrie du champ de température. La non-uniformité provient de la répartition non-uniforme de la sollicitation mais également du phénomène de diffusion intervenant au niveau de l'interface entre le vide d'injection et la zone correctement injectée. Ce phénomène de diffusion avait également été prévu par les modélisations, mais ne donne pas d'information précise sur la zone de transition.

L'apparition d'un décrochement, observé sur les images de phase à 0,5mHz, doit-être caractéristique du système. En étudiant de manière plus approfondie les images de phase et d'amplitude, des informations quantitatives devraient être extraites. L'exploitation de ces images en fonction de la fréquence est certainement porteuse d'informations qu'il nous est difficile actuellement d'obtenir sans faire un nombre important d'hypothèses.

Les procédures de recherche des maxima de température appliquées aux thermogrammes bruts permettent de relever le tracé de l'armature métallique. Ce même algorithme a été amélioré en choisissant plusieurs thermogrammes. Ces résultats sont encourageants et pourraient être traités en temps réel.

La deuxième partie de ce chapitre débute par une modélisation d'une poutre incluant une gaine métallique. Ce changement de matériau conduit à une modification de l'interprétation des résultats de simulation numérique. Ces travaux n'ayant pas fait l'objet d'étude expérimentale, à cause de l'absence de corps d'épreuve incluant une gaine métallique, il apparaît nécessaire à l'avenir d'effectuer ces essais.

Une troisième poutre ne présentant pas de défaut d'injection mais incluant des armatures passives a été testée dans des conditions équivalentes aux deux autres. Il apparaît que la localisation des câbles reste possible mais que la présence d'armatures passives rend plus difficile l'interprétation des thermogrammes bruts. L'analyse fréquentielle fournit des informations complémentaires sur la profondeur des armatures. L'obtention de données quantitatives requière la fabrication de nouveaux spécimens expérimentaux.

Ces expérimentations n'ont été faites que sur un seul type de défaut. La méthode actuelle n'a pas été appliquée sur des défauts tels qu'un remplissage partiel de coulis, des torons de différents diamètres, des câbles présentant des ruptures partielle ou totale, de même que l'influence de la corrosion n'a pas été prise en compte... A l'avenir, la fabrication de nouveaux spécimens expérimentaux incluant de tels défauts connus pourrait compléter un panel de signatures thermiques spécifiques.

Les spécimens étant de dimensions restreintes au regard des poutres rencontrées sur des ouvrages réels, des campagnes de mesure en extérieur devraient venir compléter ces essais.

Chapitre IV

IV. Détection de l'épaisseur du béton de recouvrement

Dans le chapitre précédent, une méthode de traitement fréquentiel des thermogrammes basée sur l'analyse des fonctions de transfert a été présentée. Cette méthode d'auscultation reste basée sur une interprétation visuelle des images de phase et d'amplitude obtenues pour différentes fréquences. Elle permet de déterminer le tracé de la barre ainsi que de détecter les défauts d'injection. Des développements pourraient permettre d'extraire d'autres informations quantitatives à partir des séquences de thermogrammes.

Dans ce chapitre, une piste est poursuivie. Son objectif est de déterminer l'épaisseur du béton de recouvrement et sa diffusivité thermique à l'aide d'une méthode inverse. L'épaisseur indique à quelle profondeur se situe le câble alors que des variations importantes de diffusivité peuvent renseigner sur les modifications dans la nature du béton. Cette méthode d'identification consiste à simuler le comportement de la température de surface et à comparer à chaque instant les résultats simulés avec les résultats expérimentaux. A chaque itération, les paramètres du système sont affinés afin de caler les résultats de simulation sur les résultats expérimentaux.

IV.1 L'approche numérique du système

La complexité de notre modèle ne permet pas d'obtenir facilement une équation analytique décrivant les transferts de chaleur par conduction au sein des spécimens. Une méthode basée sur les différences finies peut être appliquée afin de pouvoir simuler leur comportement thermique. Une méthode de calculs numérique, telle que la méthode des différences finies (DF), basées sur la discrétisation de l'espace et du temps, est souvent privilégiée pour des problèmes pratiques. [OZIS]. Elle présente l'avantage de s'intégrer sans difficulté dans un modèle d'identification paramétrique.

Avec la méthode des différences finies, le domaine d'étude est discrétisé et les valeurs des variables ne sont considérées qu'en un nombre fini de points nodaux. Si N nœuds sont choisis, N équations algébriques sont alors développées lors de la discrétisation des équations différentielles qui leur correspondent et compte tenu des conditions limites. Les difficultés liées à la résolution d'équations différentielles ordinaires ou partielles sont transformées en la

résolution d'un jeu d'équations algébriques et leur solution peut être déterminée par un algorithme approprié.

Les deux approches classiquement employées pour discrétiser les dérivées dans les équations différentielles sont le développement en série de Taylor ou la méthode du volume de contrôle. Dans ce travail, l'équation aux dérivées partielles du système est parabolique et bidimensionnelle (conduction transitoire en 2D), elle a été discrétisée par le développement en série de Taylor.

La modélisation permet d'obtenir la distribution des températures à l'intérieur et à la surface du spécimen lorsqu'il est soumis à une sollicitation thermique au niveau de l'armature métallique de la poutre. Cette modélisation est paramétrée en fonction de la forme de la sollicitation et des conditions environnementales.

L'avantage de cette technique de calcul réside dans la grande souplesse permise au niveau de la définition des conditions limites. Les hypothèses et les critères ont été choisis pour limiter

IV.1.1 Schéma de la modélisation des échantillons

La complexité de la modélisation intervient dans la géométrie de l'échantillon qui réunit à la fois des volumes prismatiques (spécimen) et cylindrique (armature). Cette complexité a été réduite en discrétisant plus finement l'ensemble tout en restant dans un système de coordonnées cartésiennes.

La symétrie de la sollicitation et de la section de la poutre ont été mises à profit en réduisant le problème au quart de la section transversale du modèle. Cette réduction a permis de réduire le pas du maillage tout en gardant un temps de calcul raisonnable.

Une illustration est donnée pour la partie A (figure IV-1)

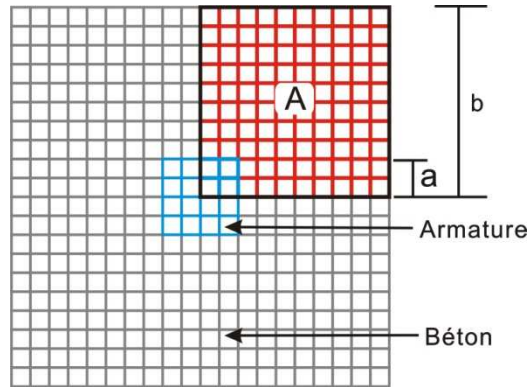


Figure IV- 1 : Maillage de la section de poutre

Les paramètres « a » et « b » sont respectivement les dimensions de l'armature et de l'échantillon en béton.

Dans ce maillage, « a » a été pris égal au rayon de l'armature métallique et « b » vaut la moitié de la longueur d'un côté de la poutre, soient $a=6\text{mm}$ et $b=50\text{mm}$.

IV.1.2 L'approximation de la dérivée seconde discrète Le choix dans l'ordre de l'approximation

L'approximation choisie pour la dérivée seconde est centrale du second ordre afin de réduire l'erreur de troncature. Pour une différence centrée, l'approximation de la dérivée seconde $f''(x)$ d'une fonction $f(x)$ est donnée par

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = \frac{f(x - \Delta x) - 2f(x) + f(x + \Delta x)}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad (\text{IV- 1})$$

Ou $O(\Delta x^2) = \frac{\Delta x^2}{12} f(x)''' + \dots$

Cet ordre offre une erreur de troncature $\frac{\Delta x^2}{12} f(x)'''$ plus faible que les autres formes d'approximation.

IV.2 Modélisation en différences finies

La modélisation en différences finies permet de représenter le système thermique sous la forme d'un maillage définissant des cellules élémentaires dont les valeurs aux nœuds sont représentatives de l'état thermique du spécimen. La seule grandeur physique présente aux nœuds du modèle est la température.

IV.2.1 Equation de la chaleur en coordonnées cartésienne

L'étude va donc consister à calculer la température de chaque nœud grâce une approximation de l'équation différentielle de la chaleur.

Le développement de la relation (II- 7) conduit à l'équation IV-2. Elle exprime le transfert de la chaleur dans les trois dimensions de l'espace pour un système linéaire non homogène avec génération de chaleur.

$$\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} + \frac{1}{\lambda} g(x, y, z, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (\text{IV- 2})$$

Où T représente la température, t le temps, (x,y,z) avec $0 \leq x, y \leq b$, $t > 0$. les coordonnées cartésiennes, λ la conductivité thermique, α la diffusivité thermique, et g la densité volumique de la chaleur, Cette équation conduit au maillage du modèle suivant (Figure IV-2)

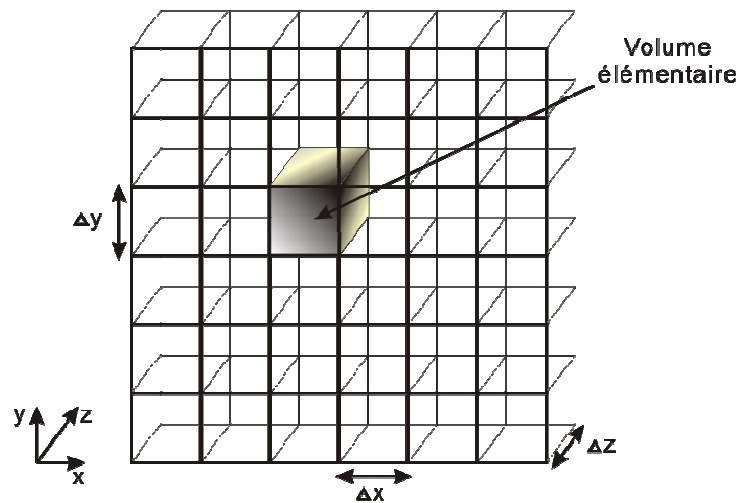


Figure IV-2 : Maillage du modèle

Les échantillons ont été dimensionnés de telle façon que dans la zone instrumentée et observée, les échanges ne soient pas sensibles aux effets de bords. La longueur L de l'échantillon a été prévue suffisamment grande devant les côtés de la section ($L=10 b$ étant la distance du centre de la source à la surface de l'échantillon) pour que dans la zone centrale, les phénomènes soient indépendants de la côté Z [NILI]. L'équation de diffusion généralisée à deux dimensions cartésiennes (x, y) s'écrit donc :

$$\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} + \frac{1}{\lambda} g(x, y, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} \quad (\text{IV- 3})$$

IV.2.2 Modèle à schéma alterné ADI

Le modèle à schéma alterné, dit « méthode ADI » pour « Alternance Direction Implicite », est une méthode aux différences finies destinée à la résolution des équations aux dérivées partielles elliptiques et paraboliques [PERA]. Elle est notamment utilisée pour résoudre les problèmes de conduction thermique ou de diffusion à plusieurs dimensions.

D'autres techniques traditionnelles pour résoudre l'équation de conduction de chaleur sont la méthode de Crank-Nicolson et la méthode implicite simple. En 2 et 3 dimensions, ces méthodes peuvent cependant être très coûteuses en temps machine. L'avantage de la méthode ADI est que les équations à résoudre à chaque itération ont une structure plus simple et sont donc plus facile à résoudre.

Notre modélisation est donc basée sur la méthode ADI. Elle offre une bonne précision et présente l'intérêt de ne nécessiter qu'une faible quantité de mémoire allouée lors de l'exploitation des données en temps réel. Cette méthode est décrite comme stable dans la littérature [MOHA].

Le formalisme suivant est introduit afin d'expliquer le concept :

$$T(x, y, t) = T(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) \equiv T_{i,j}^n \quad (\text{IV- 4})$$

avec n la variable associée au temps discrétisé, soit $t = n \cdot \Delta t$.

Pour la représentation en différences finies de l'équation de la chaleur, l'épaisseur de l'échantillon est divisée par un nombre M_n de sous-régions d'épaisseur Δl :

$$\Delta l = \frac{b}{M_n} \text{ par symétrie, } b \text{ est demi-largeur de la poutre.}$$

$$\text{Soit, } \Delta x^2 = \Delta y^2 = \Delta l^2 \quad (\text{IV- 5})$$

L'approximation aux différences finies de l'équation différentielle IV-3 avec la méthode ADI est basée sur les concepts suivants.

Supposons que l'algorithme passe d'une étape n à une étape $(n+1)$, dans la direction de x ce sera la méthode implicite simple qui sera utilisée alors que dans la direction y ce sera la méthode explicite simple. A l'étape suivante $(n+2)$, l'utilisation des méthodes est inversée selon les directions. A chaque itération temporelle, les méthodes explicite et implicite sont alternativement employées.

Lors du passage d'une étape n à la suivante $(n+1)$, en supposant que le schéma implicite est utilisé dans la direction x et que le schéma explicite dans la direction y alors l'équation (IV-6) illustre ce passage :

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\alpha \Delta t} = \frac{T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{\Delta l^2} + \frac{T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{\Delta l^2} + \frac{1}{\lambda} \frac{-n+1}{g_{i,j}} \quad (\text{IV- 6})$$

Cette équation traduit que le champ de température T à l'instant $n+1$ est calculé à partir des propriétés thermo-physiques du matériau et dépend du champ de température déterminée à l'instant précédent n .

Dans ces expressions, $\overline{g}_{i,j}$ représente la moyenne des densités d'énergie $g_{i,j}$ aux nœuds de coordonnées (i, j) aux instants n et $n+1$.

A l'itération suivante, la formulation explicite est maintenant utilisée pour la direction x et la formulation implicite pour la direction y .

L'équation (IV-7) représente ce passage lors d'une étape $(n+1)$ à la suivante $(n+2)$:

$$\frac{T_{i,j}^{n+2} - T_{i,j}^{n+1}}{\alpha \Delta t} = \frac{T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{\Delta l^2} + \frac{T_{i,j-1}^{n+2} - 2T_{i,j}^{n+2} + T_{i,j+1}^{n+2}}{\Delta l^2} + \frac{1}{\lambda} g_{i,j}^{n+1} \quad (\text{IV-7})$$

Cette équation utilise les résultats de l'étape précédente n+1 pour calculer la température à l'itération suivante n+2.

Afin de faciliter le calcul, il est pratique de réarranger les équations (IV-6) et (IV-7) de telle manière qu'à chaque itération, les valeurs inconnues apparaissent d'un seul côté de l'équation. Le réarrangement conduit à l'équation suivante, donnée pour l'étape (n+1) :

$$-rT_{i-1,j}^{n+1} + (1+2r)T_{i,j}^{n+1} - rT_{i+1,j}^{n+1} = rT_{i,j-1}^n + (1-2r)T_{i,j}^n + rT_{i,j+1}^n + \frac{\alpha \Delta t}{k} g_{i,j}^{n+1} \quad (\text{IV-8})$$

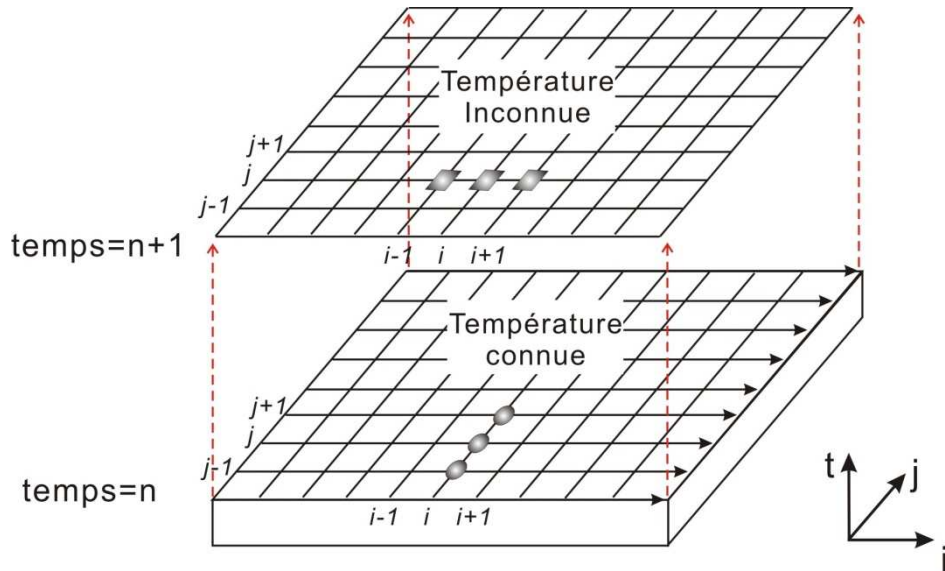


Figure IV- 3: Procédure de calcul des températures lors du passage
d'une étape n vers une étape (n+1)

Et à l'étape (n+2), l'équation s'écrit :

$$-rT_{i,j-1}^{n+2} + (1+2r)T_{i,j}^{n+2} - rT_{i,j+1}^{n+2} = rT_{i-1,j}^{n+1} + (1-2r)T_{i,j}^{n+1} + rT_{i+1,j}^{n+1} + \frac{\alpha \Delta t}{k} g_{i,j}^{n+2} \quad (\text{IV-9})$$

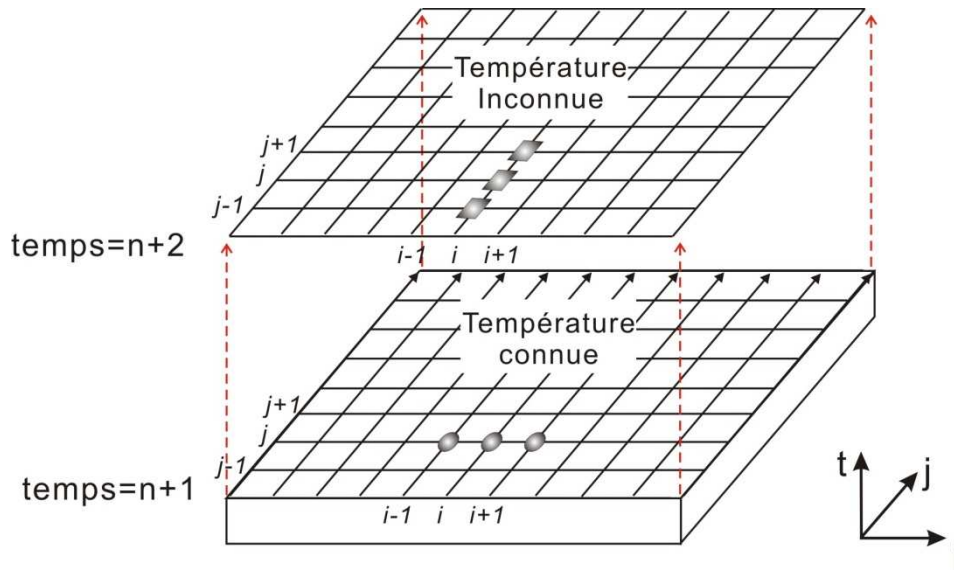


Figure IV- 4: Procédure de calcul des températures lors du passage
d'une étape (n+1) vers une étape (n+2)

A chaque étape de la résolution, les équations (IV-8) et (IV-9) sont répétées alternativement.

L'avantage de cette approche par rapport à celle entièrement implicite ou celle de Crank-Nicolson est qu'à chaque l'ensemble des équations du système à résoudre se présente sous la forme d'une matrice tri-diagonale. Les valeurs inconnues implicites sont $T_{i,j}^{n+1}$, $T_{i-1,j}^{n+1}$, $T_{i+1,j}^{n+1}$ dans l'équation (IV-8) et $T_{i,j}^{n+2}$, $T_{i,j-1}^{n+2}$, $T_{i,j+1}^{n+2}$ dans l'équation (IV-9).

La matrice des coefficients de chaque équation est tridiagonale, ce qui permet un gain de temps de calcul et une utilisation réduite de la mémoire allouée.

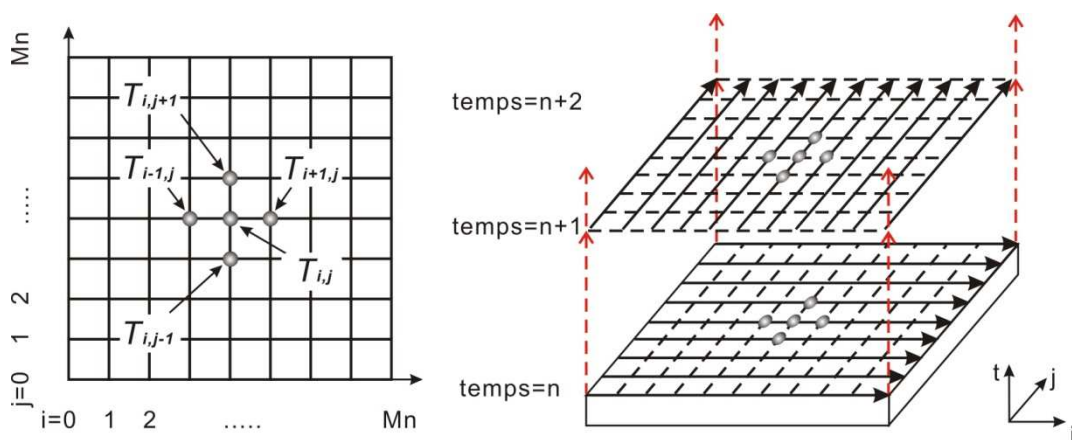


Figure IV-5 : Schéma de la méthode ADI

IV.2.3 Les conditions initiales

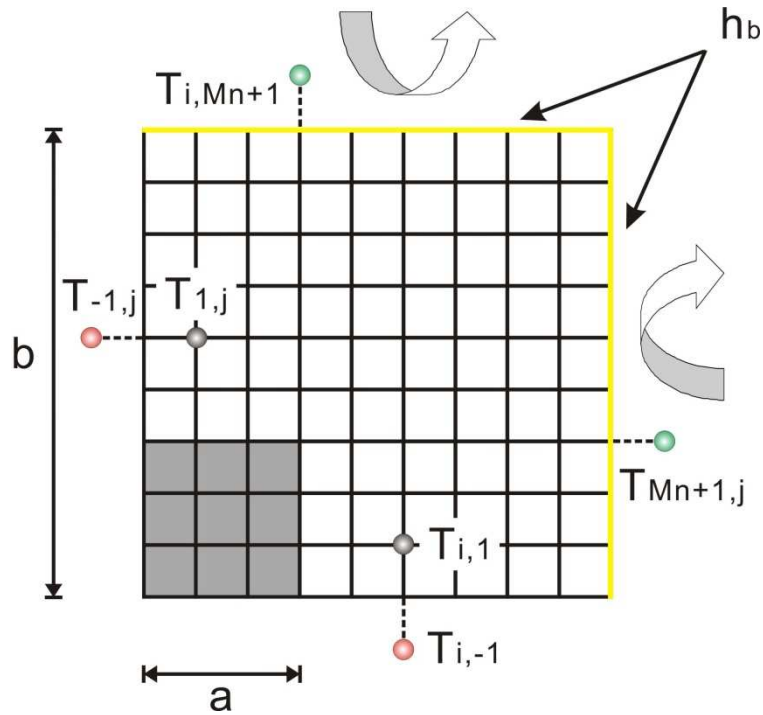


Figure IV-6 : Schéma aux conditions limites

A l'instant initial, le volume entier de l'échantillon est considéré comme étant à une température uniforme :

$$\text{Soit, } T(x, y, 0) = T_0 \text{ à } t = 0s \quad (\text{IV- } 10)$$

IV.2.4 Les conditions limites

Les conditions limites ont déjà été présentées au chapitre II, elles sont appliquées de manière identique dans ce chapitre.

IV.2.4.1 Conditions géométriques

Les symétries du problème permettent de se limiter à l'étude du quart de la section de la poutre. Les conditions limites internes sont définies aux axes X et Y du modèle.

Du fait de la géométrie de la modélisation adoptée, des simplifications peuvent être apportées au niveau de ces axes.

Ainsi, pour $x = 0$, et $y = 0$,

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{-1} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_1 \quad (\text{IV- 11})$$

$$\lambda \frac{T_{-1} - T_0}{\Delta l} = -\lambda \frac{T_0 - T_1}{\Delta l} \quad (\text{IV- 12})$$

Soit,

$$T_{-1} = T_1 \quad (\text{IV- 13})$$

Ces conditions correspondent à un flux nul en $x = 0$ ainsi qu'en $y = 0$

IV.2.4.2 Conditions à l'interface

Le contact à l'interface du béton et de l'armature en acier est considéré comme idéal et ne présente une résistance de contact nulle. Le flux de chaleur transitant d'un milieu à l'autre ne provoque pas de différence de température.

Dans le modèle présenté, l'acier présente une conductivité thermique λ_a et une diffusivité thermique α_a , de même le béton présente une conductivité thermique λ_b et une diffusivité thermique α_b .

Ces propriétés sont affectées au domaine d'étude de la manière suivante :

$$0 \leq x, y \leq a, \lambda = \lambda_a, \alpha = \alpha_a \quad (\text{IV- 14})$$

$$a < x, y \leq b, \lambda = \lambda_b, \alpha = \alpha_b \quad (\text{IV- 15})$$

Les conditions aux interfaces suivantes peuvent être déduites des équations (IV-11) et (IV-12) :

$$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial x} \Big|_{\substack{x=a \\ 0 < y < a}} = -\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial x} \Big|_{\substack{x=a \\ 0 < y < a}} \quad (\text{IV- 16})$$

$$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial y} \Big|_{\substack{y=a \\ 0 < x < a}} = -\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial y} \Big|_{\substack{y=a \\ 0 < x < a}} \quad (\text{IV- 17})$$

$$T_a = T_b \quad (\text{IV- 18})$$

IV.2.4.3 Conditions à la surface

Le calcul des températures de surface du béton en contact avec l'air ambiant nécessite la création d'un nœud fictif. Pour cela, un bilan thermique des conditions d'échange avec l'environnement extérieur est nécessaire.

Le bilan thermique à la surface de l'échantillon peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q_n + q_s = q_{conv} + q_{rad} \quad (IV- 19)$$

q_n représente la quantité de chaleur qui se propage par conduction perpendiculairement à la surface de l'échantillon, telle que :

$$q_n = -\lambda_b \frac{\partial T}{\partial n}, \text{ en } W \cdot m^{-2} \quad (IV- 20)$$

q_s correspond à l'énergie d'une source extérieure. Elle est ici considérée comme nulle ;

q_{conv} correspond à la perte de chaleur surfacique par convection entre la surface de l'échantillon de température T et son environnement à la température ambiante T_∞ , avec un coefficient de convection h_c tel que :

$$q_{conv} = h_c (T - T_\infty), \text{ en } W \cdot m^{-2} \quad (IV- 21)$$

q_{rad} correspond à la perte de chaleur surfacique par rayonnement entre la surface de l'échantillon de température T et son environnement à la température ambiante T_∞ tel que :

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4), \text{ en } W \cdot m^{-2} \quad (IV- 22)$$

avec $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$, (constante de Stephan-Boltzmann), et ε l'émissivité du béton. Les grandeurs de l'équation (IV-19) peuvent être remplacées respectivement par les expressions (20), (21), (22).

$$\lambda_b \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (IV- 23)$$

La linéarisation de la formulation (IV-24) peut être réalisée si $\frac{|T - T_\infty|}{T_\infty} \leq 1$ avec T_∞ et T en kelvin. Cette condition est vérifiée expérimentalement car les écarts de température sont limités. Dans ce cas,

$$\varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) = h_r (T - T_\infty) \quad (IV- 24)$$

avec h_r le coefficient d'échange radiatif,

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T^3, \text{ en } W \cdot m^{-2} \quad (IV- 25)$$

Ainsi, les conditions limites à la surface de l'échantillon peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$-\lambda_b \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_\infty) + h_r(T - T_\infty) \quad (IV- 26)$$

Il est alors possible d'écrire la relation $h_g = h_c + h_r$, avec h_g représentant un coefficient global d'échange thermique.

L'équation (IV-26) peut donc être formulée par la relation suivante :

$$-\lambda_b \frac{\partial T}{\partial n} = h_g(T - T_\infty) \quad (IV- 27)$$

Pour $x, y = b$, la surface est donc considérée comme soumise à un transfert thermique global à une température ambiante notée, $T_{b,\infty}$ et affecté d'un coefficient global d'échange h_g constant sur toutes les surfaces de l'échantillon :

$$\lambda_b \frac{\partial T}{\partial x} + h_g T = h_g T_{b,\infty} \quad (IV- 28)$$

$$\lambda_b \frac{\partial T}{\partial y} + h_g T = h_g T_{b,\infty} \quad (IV- 29)$$

La formulation de second ordre à la surface de l'échantillon est donc :

$$\lambda_b \frac{T_{M_n+1} - T_{M_n-1}}{2\Delta l} + h_g T_{M_n} = h_g T_{b,\infty} \quad (IV- 30)$$

T_{M_n+1} étant une température fictive à un point fictif M_n+1 , extension de la géométrie de notre modèle à une distance Δl du nœud M_n . Une simplification peut être opérée pour éliminer ce point fictif en remplaçant T_{M_n+1} par l'expression suivante :

$$T_{M_n+1} = \frac{2\Delta l h_b}{\lambda_b} (T_{b,\infty} - T_{M_n}) + T_{M_n-1} \quad (IV- 31)$$

La modèle peut alors être schématisé en respectant les conditions thermiques de la Figure IV- 6.

IV.2.5 Méthode ADI associée au dispositif expérimental

On a déduit les relations aux points spécifiques selon les conditions initiales et limites. En utilisant les résultats précédemment déduits on peut appliquer la méthode ADI au dispositif expérimental.

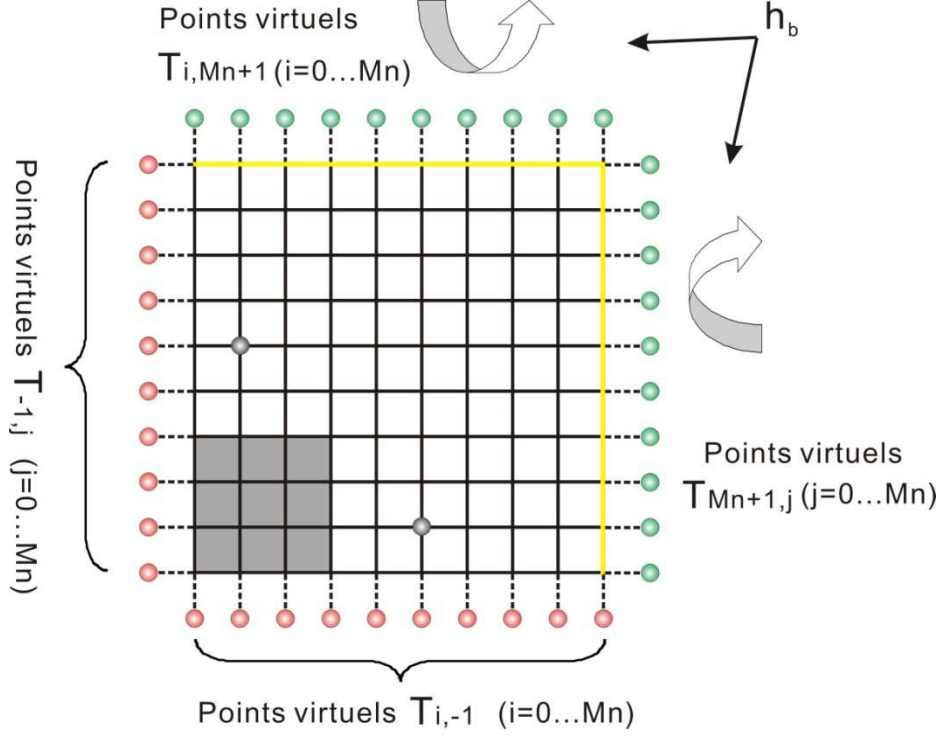


Figure IV-7: Maillage associé à la méthode ADI

Conformément à la méthode du schéma ADI introduit précédemment, l'équation IV-6 est utilisée pour déterminer la température à l'instant $n+1$ à partir de la température à l'instant n .

Dans cette étape, le calcul est fait suivant la direction x . L'équation IV-6 est développée ligne par ligne. Pour chaque ligne, l'indice i varie de 0 jusqu'à M_n .

Ligne $j=0$

Cette ligne est sur le bord du maillage.

- Cas particulier $i=0$

Le développement de l'équation commence pour $i=0$, c'est-à-dire au point $(0,0)$. Il s'agit du point central. L'équation nécessite d'avoir recours à deux points virtuels représentés sur la figure IV-7 :

$$-rT_{-1,0}^{n+1} + (1+2r)T_{0,0}^{n+1} - rT_{1,0}^{n+1} = rT_{0,-1}^n + (1-2r)T_{0,0}^n + rT_{0,1}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_a} g_{0,0}^{-n+1} \quad (\text{IV- 32})$$

En utilisant les propriétés de symétrie (formule (IV-13)), l'équation peut s'écrire de la façon suivante :

$$(1+2r)T_{0,0}^{n+1} - 2rT_{1,0}^{n+1} = (1-2r)T_{0,0}^n + 2rT_{0,1}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_a} g_{0,0}^{-n+1} \quad (\text{IV- 33})$$

Pour n=0 (début de la simulation t=0), la condition initiale est prise en compte dans l'équation

IV-33. Les températures $T_{i,j}^0$ de tous les points sont fixées à partir des températures initiales.

Dans cette équation, seules les températures $T_{0,0}^{n+1}$, $T_{1,0}^{n+1}$ sont inconnues.

- **i=1...M_n-1**

Ces points sont au sein de l'échantillon, le terme de gauche de l'équation (IV-8) est utilisé directement.

$$-rT_{i-1,0}^{n+1} + (1+2r)T_{i,0}^{n+1} - rT_{i+1,0}^{n+1} = rT_{i,-1}^n + (1-2r)T_{i,0}^n + rT_{i,1}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_{i,0}} g_{i,0}^{-n+1} \quad (\text{IV- 34})$$

Le terme de droite de l'équation est développé selon la formule (IV-10).

On obtient une nouvelle équation :

$$-rT_{i-1,0}^{n+1} + (1+2r)T_{i,0}^{n+1} - rT_{i+1,0}^{n+1} = (1-2r)T_{i,0}^n + 2rT_{i,1}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_{i,0}} g_{i,0}^{-n+1} \quad (\text{IV- 35})$$

Dans ces séries d'équations, les températures $T_{i-1,0}^{n+1}$, $T_{i,0}^{n+1}$ et $T_{i+1,0}^{n+1}$ sont inconnues

- **i= M_n**

Ce point (0, M_n) se situe sur la surface externe. Les termes $T_{M_n,-1}^n$ et $T_{M_n+1,0}^{n+1}$ apparaissent dans

l'équation (IV-8) et on obtient l'équation (IV-36). $T_{M_n,-1}^n$ et $T_{M_n+1,0}^{n+1}$ correspondent aux températures de deux points fictifs de coordonnées (M_n, -1) et (M_n+1, 0). Une formulation de second ordre a été employée dans l'équation (IV-30). Un coefficient d'échange surfacique global

h_b a été pris en compte (figure IV-5). L'expression de $T_{M_n+1,0}^{n+1}$ est donnée par l'équation (IV-31).

$$-rT_{M_n-1,0}^{n+1} + (1+2r)T_{M_n,0}^{n+1} - T_{M_n+1,0}^{n+1} = rT_{M_n,-1}^n + (1-2r)T_{M_n,0}^n + rT_{M_n,1}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_b} g_{M_n,0}^{-n+1} \quad (\text{IV- 36})$$

Donc par (IV-10) et (IV-31), on déduit une nouvelle équation (IV-37) :

$$\begin{aligned}
 & -2rT_{M_n-1,0}^{n+1} + (1+2r+2r\frac{\Delta l h_b}{\lambda_b})T_{M_n,0}^{n+1} \\
 & = (1-2r)T_{M_n,0}^n + 2rT_{M_n,1}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_b}g_{M_n,0}^{-n+1} + 2r\frac{\Delta l h_b}{\lambda_b}T_\infty
 \end{aligned} \tag{IV- 37}$$

Finalement, les développements des relations de calcul numérique pour la première ligne (j=0) conduisent aux équations (IV-33), (IV-35) et (IV-37).

Ligne j=1...M_n-1

Pour chaque ligne j, les mêmes développements sont faits. Les équations (IV-13) et (IV-30) sont utilisées pour traiter les conditions limites aux point (0, j) et (Mn, j).

j=M_n

La ligne j= Mn est au bord de la géométrie. Il faut prendre en compte les conditions limites de la convection.

- i=0

Dans l'équation (IV-38) qui est déduite, les températures T_{-1,M_n}^{n+1} et T_{0,M_n+1}^n sont affectées à deux points fictifs.

$$-rT_{-1,M_n}^{n+1} + (1+2r)T_{0,M_n}^{n+1} - rT_{1,M_n}^{n+1} = rT_{0,M_n-1}^n + (1-2r)T_{0,M_n}^n + rT_{0,M_n+1}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_b}g_{0,M_n}^{-n+1} \tag{IV- 38}$$

A partir des équations (IV-13) et (IV-33), on peut déduire l'équation (IV-39) ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 & (1+2r)T_{0,M_n}^{n+1} - 2rT_{1,M_n}^{n+1} \\
 & = 2rT_{0,M_n-1}^n + (1-2r-2r\frac{\Delta l h_b}{\lambda_b})T_{0,M_n}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_b}g_{0,M_n}^{-n+1} + 2r\frac{\Delta l h_\infty}{\lambda_b}T_\infty
 \end{aligned} \tag{IV- 39}$$

- i=1...M_n-1

Les développements d'équations sont identiques aux précédents.

- i= M_n

Ce point se situe au coin du modèle. On déduit l'équation (IV-40) comme :

$$\begin{aligned} & -rT_{M_n-1,M_n}^{n+1} + (1+2r)T_{M_n,M_n}^{n+1} - rT_{M_n+1,M_n}^{n+1} \\ & = rT_{M_n,M_n-1}^n + (1-2r)T_{M_n,M_n}^n + rT_{M_n,M_n+1}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_b} g_{M_n,M_n}^{-n+1} \end{aligned} \quad (\text{IV- 40})$$

Dans cette équation, la condition limite de convection a été utilisée suivant les deux directions en associant les points fictifs (M_{n+1}, M_n) et (M_n, M_{n+1}) . L'équation (IV-41) est donnée ci-dessous :

$$\begin{aligned} & -2rT_{M_n-1,M_n}^{n+1} + (1+2r+2r\frac{\Delta h_b}{\lambda_b})T_{M_n,M_n}^{n+1} \\ & = 2rT_{M_n,M_n-1}^n + (1-2r-2r\frac{\Delta h_b}{\lambda_b})T_{M_n,M_n}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\lambda_b} g_{M_n,M_n}^{-n+1} + 2(2r\frac{\Delta h_\infty}{\lambda_b}T_\infty) \end{aligned} \quad (\text{IV- 41})$$

Les relations numériques permettant de relier les températures aux temps n et $n+1$ ont été établies. Un système d'équations algébriques qui contient $M_n \times M_n$ inconnues doit ensuite être résolu. Si T^n est connue alors T^{n+1} peut être calculée.

Dans le schéma de calcul de la méthode ADI introduite précédemment, la procédure de calcul pour passer du temps n au temps $(n+1)$ a été écrite. Il faut maintenant passer à l'écriture de l'équation du passage du niveau $n+1$ au niveau $n+2$. Le principe est identique, il suffit d'inverser les rôles de x et y . La résolution de l'équation se fait en suivant la direction de y .

IV.2.6 Expression matricielle du schéma ADI

La formulation établie en suivant le schéma ADI de l'équation différentielle peut s'effectuer sous la forme d'expressions matricielles en alternant les directions.

Pour l'étape allant de n vers $n+1$, les différentes équations écrites pour chaque nœud peuvent être regroupées sous la forme matricielle suivante :

$$A \cdot [T]_j^{n+1} = [T]^n \cdot B + [\bar{G}] \quad (\text{IV- 42})$$

Dans cette relation, A et B sont des matrices tridiagonales des paramètres thermophysiques et géométriques du système, $[T]_j^{n+1}$ le vecteur colonne des températures inconnues à l'instant $n+1$, $[T]^n$ le vecteur colonne des températures connues à l'instant n , et $[\bar{G}]$ la matrice de la moyenne des énergies volumiques dissipées aux instants n et $n+1$.

Pour la transition des étapes $n+1$ à $n+2$, l'opération est réitérée en alternant les schémas :

$$A \cdot [T']_j^{n+2} = [T']^{n+1} \cdot B + [\bar{G}] \quad (\text{IV- 43})$$

$$A = \begin{bmatrix} 1+2r & -2r & & & & & \\ -r & 1+2r & -r & & & & \\ & -r & 1+2r & -r & & & \\ & & -r & \cdot & \cdot & & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & & 1+2r & -r \\ & & & & & -r & 1+2r & -r \\ & & & & & & -2r & R_A \end{bmatrix} \quad (\text{IV- 44})$$

$$R_A = 1 + 2r + 2r \frac{\Delta h_b}{\lambda_b} \quad (\text{IV- 45})$$

$$B = \begin{bmatrix} 1-2r & r & & & & & \\ 2r & 1-2r & r & & & & \\ & r & 1-2r & r & & & \\ & & r & \cdot & \cdot & & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & & 1-2r & r \\ & & & & & r & 1-2r & 2r \\ & & & & & & r & R_B \end{bmatrix} \quad (\text{IV- 46})$$

$$R_B = 1 - 2r - 2r \frac{\Delta h_b}{\lambda_b} \quad (\text{IV- 47})$$

Dans les équations (IV-42) et (IV-43), les termes de droite sont connus et les températures sont déduites du terme de gauche. Les équations (IV-44) et (IV-46) sont des matrices tridiagonales. Cette forme de matrice est classique pour les phénomènes de diffusion. Des techniques de résolution spécifiques permettant de réduire les temps de calcul ont été élaborées, ce travail est décrit en annexe I.

IV.2.7 Pas de temps et Maillage

Pour obtenir une précision suffisante pour réaliser l'inversion, un pas de temps de 2.5s a été choisi lors des simulations. Les acquisitions ont été effectuées toutes les 5s pour limiter le volume de données à traiter. Pour la phase de comparaison et de mise au point du traitement, un point sur deux sera extrait des résultats des simulations.

Le maillage utilisé est une grille de 50x50 points représentée sur la figure IV-7. Celui-ci a donné des résultats quasiment stables et quasiment indépendants du maillage.

Notre étude s'est intéressée à l'évolution du champ de température. Une matrice en 3D ($50 \times 50 \times N_t$) a donc été créée pour calculer et enregistrer les températures aux N_t temps de calcul.

IV.3 Procédure inverse

La détermination de la profondeur des défauts est un des objectifs de nombreuses méthodes de contrôle non destructif. En thermographie infrarouge, les méthodes dites actives comme la thermographie pulsée, modulée [CKPK] [WUBU] ou à phase pulsée [MAGZ] [OMZH] comme celle décrite au chapitre I, sont toutes orientées vers ce type de détermination quantitative. L'approche envisagée dans ce travail est relativement différente, en effet la sollicitation par induction est ici interne à la structure et l'observation s'effectue en surface après diffusion de la chaleur à travers la couche de béton. Le principe de l'étude harmonique de type lock-in pourrait être intéressant pour cette application mais l'inducteur dont nous disposons n'est pas adapté à ce type de chauffage. De plus, l'épaisseur du béton d'enrobage conduirait à une succession d'essais entraînant un temps d'expérimentation extrêmement long. Au regard de la littérature traitant des méthodes de CND par thermographie infrarouge active, force est de constater que ces méthodes sont établies pour des transferts thermiques unidirectionnels alors qu'ici le problème est bidimensionnel. Ces méthodes sont difficilement applicables dans le cas de cette poutre dont les dimensions sont réduites.

Dans la suite de ce chapitre, une procédure inverse est employée pour déterminer l'épaisseur d'enrobage. Cette partie est consacrée à la présentation des techniques inverses utilisées dans le domaine de la thermique.

IV.3.1 Problème Inverse de Conduction de la Chaleur (PICC)

Durant les dernières décennies, les techniques inverses ont permis des avancées sensibles dans le domaine de la métrologie thermique. La détermination des températures, des flux, des grandeurs thermophysiques des milieux et des interfaces a connu des progrès significatifs en recourant aux approches inverses. Les moyens informatiques et l'introduction d'outils mathématiques appliquées ont concouru à un développement important de cette branche de la thermique.

Certaines applications du Problème Inverse de Conduction de la Chaleur (PICC) ont consisté à déterminer les conditions aux limites à partir de mesures de températures internes pour des cas où la condition ne peut être obtenue directement (surface inaccessible, conditions sévères, perturbation importante des échanges par le capteur). D'autres travaux ont permis de déterminer des grandeurs d'un champ thermique en exploitant des données obtenues de façon non-intrusive.

La première phase de la résolution du problème inverse consiste à réaliser une modélisation du phénomène. On parle alors du problème direct qui donne les réponses observables d'un phénomène en fonction des grandeurs du modèle (paramètres thermophysiques et géométriques, grandeurs d'état, grandeurs d'entrée).

Le problème direct peut se traiter de façon analytique ou à l'aide d'outils numériques de simulation.

Dans ce travail, le problème direct consiste à calculer l'évolution de la température à la surface d'un échantillon en béton consécutivement à une dissipation de chaleur par la barre connaissant le champ initial de température, les propriétés thermophysiques des matériaux et la forme du signal de chauffage. Le calcul de la réponse en température est réalisé à l'aide d'un modèle en différences finies présenté précédemment.

La deuxième phase consiste à utiliser des mesures expérimentales et à rechercher les paramètres du modèle direct qui permettent de reproduire au mieux ces mesures. On parle alors d'inversion. Dans cette phase, il est souvent indispensable de prendre en compte des contraintes ou des connaissances a priori car les observations ne sont généralement pas suffisantes pour isoler une solution unique ; il s'agit alors d'un problème mal posé. L'inversion peut porter sur la reconstitution d'un état initial, sur l'estimation de paramètres (identification), sur l'estimation de sources (estimation de flux) ou encore sur l'estimation de formes de domaine. Les problèmes peuvent également être couplés

Dans notre cas, il s'agit d'un problème d'estimation de forme de domaine et d'un paramètre physique. L'objectif est ici de déterminer une épaisseur d'enrobage et la diffusivité du béton

IV.3.2 Principe de l'inversion

Dans notre étude, le problème direct a été résolu à l'aide d'un modèle en différences finies dans la partie précédente. La modélisation numérique du transfert multidirectionnel est basée sur la résolution numérique de l'équation de chaleur (II -7). Les conditions limites, les conditions initiales, les propriétés thermophysiques des matériaux et les caractéristiques géométriques du modèle ont été intégrées dans le modèle numérique. Comme grandeur de sortie, la répartition des températures sur tous les nœuds discrétisées aux instants $t_1, t_2, \dots, t_N$ (du début jusqu'à la fin de l'essai) est calculée. Les températures sont notées :

$$T_{i,j}^n, \quad 1 \leq i, j \leq Mn \text{ (discrétisation spatiale)}, \quad 1 \leq n \leq N \text{ (discrétisation temporelle)}$$

La caméra infrarouge permet d'enregistrer une série d'images infrarouges (ici une image toutes les 5 secondes). Les évolutions de la température ($T_{i,j}^{n(mes)}$) sur la surface de la poutre sont extraites des images infrarouges. A partir du résultat de la modélisation numérique $T_{i,j}^n$, les évolutions de la température simulée ($T_{i,j}^{n(sim)}$) peuvent être aussi obtenues.

Le principal objectif visé par l'inversion consiste à déterminer un paramètre géométrique : l'épaisseur d'enrobage. Il s'agit là d'une donnée très importante à connaître pour les interventions sur les ouvrages en béton armé ou précontraint. Dans notre approche d'inversion, les autres paramètres (propriétés thermophysiques du matériau, coefficients d'échanges,...) sont supposés connus ou ont suffisamment peu influence dans la fenêtre temporelle d'observation, pour pouvoir se satisfaire d'estimations. L'étude de sensibilité présentée plus loin permet de se placer dans les conditions optimales de résolution du problème inverse. Une fois les paramètres expérimentaux définis, la procédure consiste à rechercher l'épaisseur qui permet de reconstituer au « mieux » la température en surface.

Dans un second temps, la diffusivité thermique du béton a été supposée inconnue et une recherche simultanée de l'épaisseur et de la diffusivité a été envisagée.

Pour résoudre ce problème, on cherche à minimiser l'écart (ou erreur) entre la température simulée à partir du modèle direct et la température mesurée par caméra infrarouge.

Une fonction d'erreur est définie. Elle est exprimée mathématiquement comme étant la racine carrée des variations (IV-52) mesure/simulation.

$$f(p_1, p_2, \dots) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (T_{i,j(mes)}^n - T_{i,j(sim)}^n)^2} \quad (IV-48)$$

$p_1, p_2, \dots$ représentent les paramètres du modèle recherchés.

L'inversion se traduit par un problème d'optimisation où l'on cherche un groupement de paramètres qui minimise la fonction $f(p_1, p_2, \dots)$.

$$f(p_1, p_2, \dots) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (T_{i,j(mes)}^n - T_{i,j(sim)}^n)^2} \rightarrow \min \quad (IV-49)$$

Pour compléter la formulation du problème, il faut définir les intervalles contenant les solutions admissibles pour chacun des paramètres p_i . Ces intervalles sont construits sur la base des connaissances physiques du problème (connaissances a priori).

$f(p_1, p_2, \dots)$ est une fonction des variables du système, dans notre cas, C'est une fonction non-linéaire. Il existe de nombreuses méthodes numériques qui visent à minimiser des fonctions.

Pour résoudre le problème qui nous concerne, nous avons eu recours à l'algorithme du simplexe pour réduire l'écart entre l'évolution de la température simulée et l'évolution de la température mesurée en ajustant les valeurs des paramètres. Dans notre cas : l'épaisseur du béton de recouvrement, la diffusivité thermique des matériaux.

IV.3.3 Schéma de la procédure inverse

Le schéma suivant décrit le principe de la procédure d'inversion.

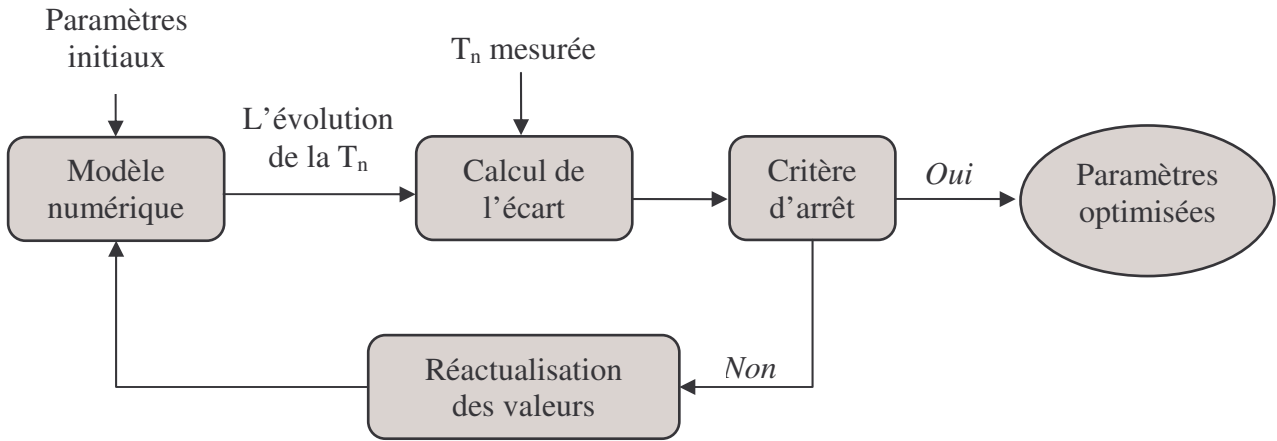


Figure IV-8: Schéma principe de la procédure d'inversion

IV.4 Normalisation et étude de sensibilité

IV.4.1 Normalisation

La procédure d'inversion a été présentée dans la partie précédente. Dans le chapitre II et III, la procédure d'essai a été détaillée. Le flux généré par l'induction sur la surface de l'armature à l'intérieur du béton est difficile de mesurer. Pour les simulations préliminaires, sa valeur a été estimée de façon grossière en essayant d'obtenir des températures cohérentes en surface. Il s'agit d'une valeur imprécise, mais cette valeur estimée n'est pas très 'loin' de la valeur vraie du flux. C'est-à-dire elle est du même ordre de grandeur.

Pour éliminer l'erreur liée à cette incertitude, une normalisation a été appliquée simultanément sur l'évolution de la température simulée $T_{i,j(sim)}^n$ et l'évolution de la température mesurée $T_{i,j(mes)}^n$. Le problème de conduction de la chaleur étudié ici est un problème linéaire vis-à-vis de la sollicitation ce qui implique une relation de proportionnalité entre la grandeur d'entrée Q (chaleur dissipée par la barre) et la sortie (variation de température de surface ΔT). L'ensemble des équations différentielles qui régissent le comportement des grandeurs thermiques sont linéaires à coefficients constants.

$$Q \propto \Delta T, \quad \Delta T(t) = T(t) - T_{ini} \quad (IV- 50)$$

$T(t)$ est l'évolution de la température en un point de la surface et T_{ini} correspond à sa valeur initiale en absence de sollicitation.

La figure IV-9 (a) représente deux évolutions de la température de surface (dans l'axe de la barre) obtenues avec deux dissipations volumiques de chaleur différentes (dans un rapport de 1 à 2) au niveau de la barre. Après traitement selon l'équation (IV-52), les évolutions de la température normalisée sont présentées figure IV-9 (b).

$$T(t)_{nor} = \frac{T(t) - T_{ini}}{Max(T(t))} = \frac{\Delta T(t)}{Max(\Delta T(t))} \quad (IV- 51)$$

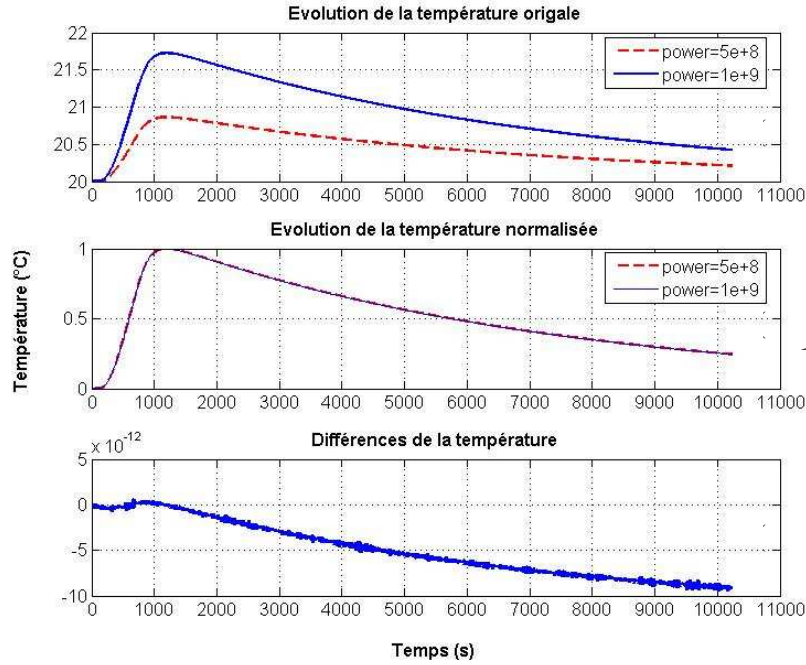


Figure IV-9: (a) Evolution de la température pour deux sollicitations
(b) Evolution de la température normalisée
(c) Différences de la température pour deux sollicitations

La figure IV-9 (b) montre que les températures normalisées sont superposées. Leur différence est représentée dans la figure IV-9 (c). Elle est quasiment nulle. Ces représentations confirment que les incertitudes sur la valeur du flux dissipé par l'induction sont sans conséquence si on traite la température normalisée au lieu de la température brute. La normalisation permet de se placer dans un contexte favorable pour envisager la procédure inverse de détection de l'épaisseur du béton de recouvrement.

IV.4.2 Etude de sensibilité

L'étude de sensibilité est un outil qui permet de déterminer quels sont les paramètres accessibles par notre approche inverse. Elle se base sur le constat suivant : si on opère une variation sur un paramètre d'entrée du modèle numérique et que cela n'entraîne qu'une faible variation du résultat du calcul alors il semble difficile en étudiant la réponse du modèle de « remonter » à la valeur du paramètre. Par contre, si une variation d'un paramètre d'entrée s'accompagne d'une modification significative de la réponse alors on dira que celle-ci est « sensible » à ce paramètre et qu'il est envisageable d'estimer le paramètre en question. La qualité de l'estimation sera d'autant meilleure que la sensibilité de la réponse à ce paramètre sera forte. Donc après avoir analysé, les sensibilités de la réponse aux différents paramètres qui interviennent dans la simulation numérique, il sera possible de 'prévoir' quels seront les paramètres identifiables par cette procédure.

IV.4.2.1 Fonctions de sensibilité

L'équation matricielle (IV-42 et IV-43) lie deux vecteurs de température par une matrice carrée [A]. Les vecteurs contiennent les températures en chaque point du système. L'étude théorique a montré que [A] comporte six paramètres thermophysiques indépendants. Il s'agit des caractéristiques thermophysiques des matériaux (diffusivité du béton et d'acier, conductivité du béton et d'acier), du coefficient d'échange surfacique et de l'épaisseur d'enrobage.

Le principe de l'étude de sensibilité consiste à calculer une variation δF de la réponse en température de surface à une sollicitation fixée (créneau de flux dissipé) consécutive à une variation δp_i d'un des paramètres p_i du modèle.

La fonction de sensibilité de l'évolution de température au paramètre p_i est alors définie par la relation suivante :

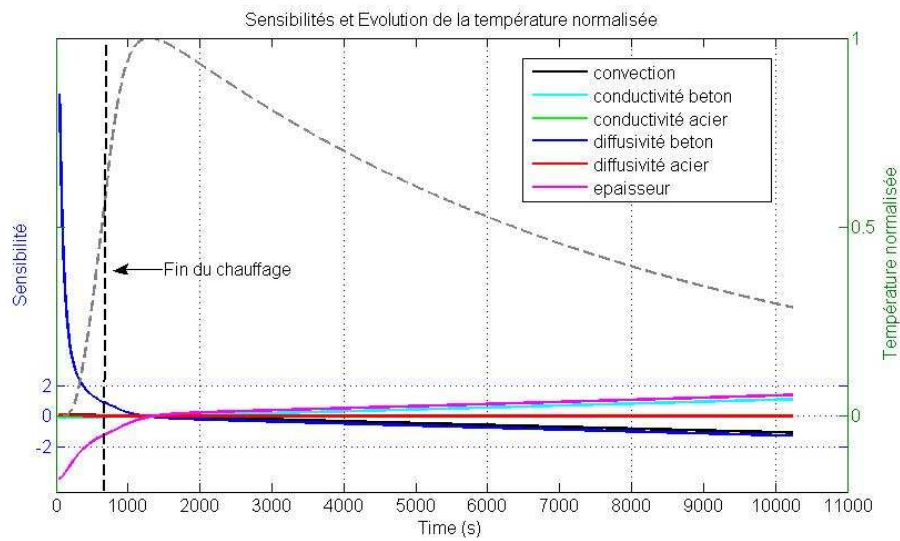
$$X_{p_i}(t) = \frac{\frac{\delta F(p_1, p_2, \dots, p_n, t)}{F(p_1, p_2, \dots, p_n, t)}}{\frac{\delta p_i}{p_i}} \quad (\text{IV- 52})$$

Elle exprime le rapport entre une variation relative de la réponse à une variation du paramètre concerné.

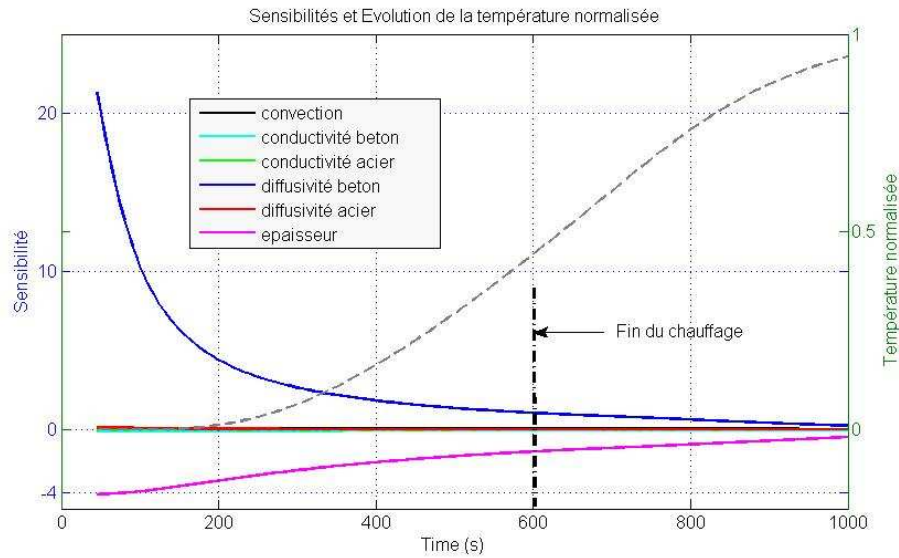
Pour calculer les fonctions de sensibilité, les paramètres doivent être fixés à des valeurs nominales. L'allure des courbes de sensibilité et leur interprétation sont donc liées au groupement de paramètres injectés pour l'étude. Cette contrainte ne remet pas en cause la faisabilité de cette étude car son interprétation est essentiellement qualitative. Elle sert à déterminer les paramètres identifiables. On peut observer que ses conclusions dépendent uniquement de l'ordre de grandeur des paramètres.

Une discussion justifiant l'utilisation de la température normalisée a été menée dans la partie précédente. Le calcul de sensibilité est donc effectué sur la base des variations de la température normalisée.

IV.4.2.2 Sensibilité des paramètres :



(a) : Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres



(b): Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres(début de l'essai)

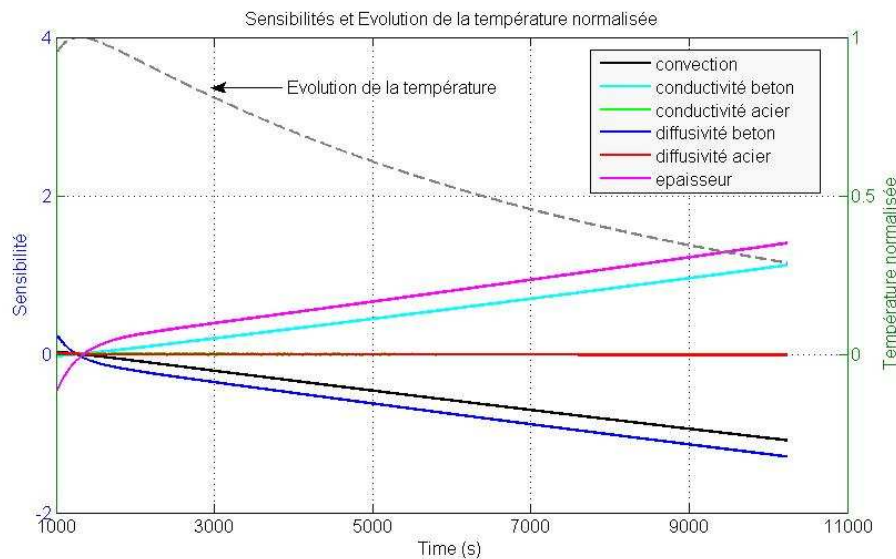


Figure IV-10 (c): Sensibilité des paramètres pour la période de 1000s à la fin

La figure IV-10 (a) représente l'évolution des principales fonctions de sensibilités de la température normalisée aux différents paramètres géométriques et thermophysiques du modèle. Pour faciliter la compréhension, l'évolution de la réponse en température normalisée de surface de la poutre calculée par le modèle est représentée en ligne discontinue.

Sur la figure IV-10 (b), les fonctions de sensibilités ont été représentées pour les 1000 premières secondes. On remarque que pendant la période d'évolution croissante de la température, la

diffusivité du béton et l'épaisseur d'enrobage sont les paramètres les plus influents sur la sortie. Ils présentent les fonctions de sensibilités les plus fortes alors que les autres paramètres donnent lieu à des sensibilités très faibles. Ces derniers ont moins d'influence sur la réponse.

Il s'agit d'une remarque importante car la détermination de l'épaisseur est la priorité du problème d'inversion. L'estimation de la diffusivité peut être également envisagée si on se réfère à l'importance de la fonction de sensibilité à ce paramètre. L'étude de sensibilité indique que la période durant laquelle la température croît semble être adaptée aux objectifs. C'est pendant cette phase « montante » que les sensibilités aux paramètres d'intérêt sont les plus élevées.

La possibilité d'une identification simultanée de la diffusivité du béton et de son épaisseur est liée à la corrélation des fonctions de sensibilité à ces deux paramètres. Ce point va être discuté dans l'étude de corrélation qui suit.

La figure IV-10 (c) montre que l'identification de paramètres devient difficile pour les temps longs car les sensibilités aux autres paramètres croissent fortement.

IV.4.3 Corrélation des paramètres

L'étude de sensibilité a montré que la diffusivité du béton et l'épaisseur d'enrobage avaient une influence suffisamment importante pour envisager de les identifier à partir de la réponse temporelle de l'évolution de la température. Pour la détermination des deux paramètres, il faut toutefois pousser un peu plus loin l'analyse en s'assurant qu'il n'y a pas de corrélation entre les sensibilités à ces paramètres. Il faut vérifier qu'une variation d'un paramètre ne peut pas être compensée par une variation de l'autre pour donner la même réponse. Si tel était le cas, il serait alors impossible d'identifier simultanément ces paramètres et l'inversion n'aurait pas de solution unique.

On montre (Annexe A.2) que si les sensibilités d'une grandeur à deux paramètres sont corrélées alors les fonctions de sensibilités sont proportionnelles. Une façon simple de vérifier l'absence de corrélation consiste à tracer une des fonctions par rapport à l'autre et à s'assurer que la courbe obtenue n'est pas une droite passant par l'origine.

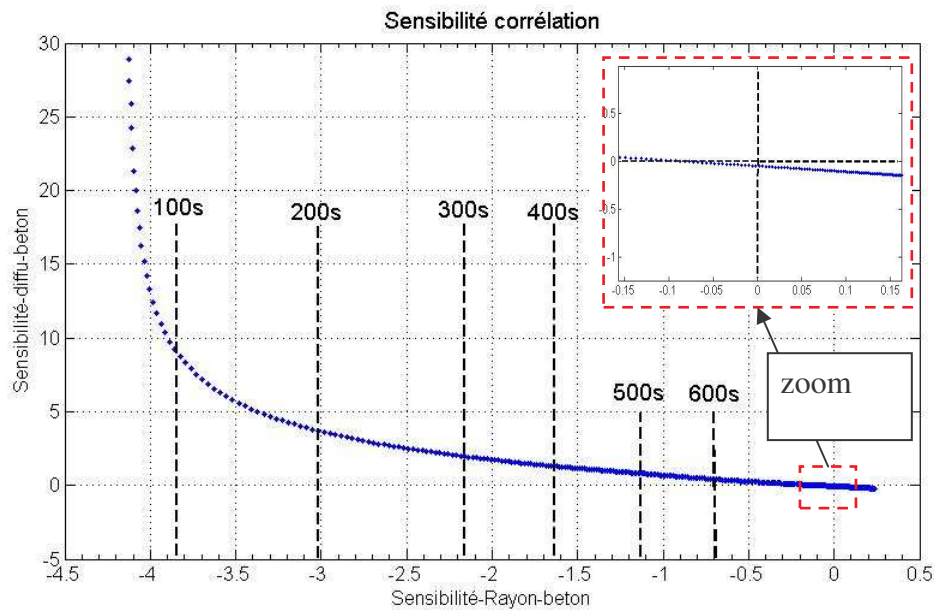


Figure IV-11 : Evolution de la sensibilité à la diffusivité α en fonction de la sensibilité à l'épaisseur d'enrobage

La courbe du graphe figure IV-11 représente la sensibilité de la réponse à la diffusivité en fonction de la sensibilité à l'épaisseur d'enrobage. Les intervalles du temps sont également repérés sur le graphe. On constate qu'après 400s la courbe tend vers une droite passant par l'origine. Ils sont quasiment corrélés. Il semble qu'il est impossible d'identifier simultanément la diffusivité du béton et l'épaisseur du béton de recouvrement si on se limite à cette période.

Par contre avant 400s, les fonctions de sensibilité ne sont pas proportionnelles. Il n'y a donc pas de corrélation entre les paramètres avant 400s.

Il convient donc d'exploiter au maximum cette fenêtre temporelle pour aboutir à une solution unique. Lors des expérimentations, l'intervalle de temps [100s ; 600s] a été retenu.

L'étude de corrélation de la sensibilité semble indiquer qu'il est possible de déterminer l'épaisseur d'enrobage et la diffusivité du béton en même temps.

IV.5 Détermination de l'épaisseur d'enrobage

La détermination des paramètres thermophysiques s'opère en minimisant l'écart entre l'évolution de la température obtenue par la simulation numérique et celle mesurée par la caméra infrarouge. En entrée du modèle numérique, un groupement de paramètres du béton est testé. Les paramètres concernant l'acier et les échanges surfaciques ont été tirés de la littérature.

L'étude de sensibilité a montré qu'ils n'avaient pas un rôle important pendant la phase de montée en température. Des simulations ont montré qu'une erreur sur leur valeur n'avait pas d'effet sensible sur la réponse en température. Les paramètres thermophysiques du béton ont été déterminés au préalable par des méthodes classiques de caractérisation thermique (Banc fluxmétrique). Les paramètres recherchés sont identifiés quand l'évolution de la température simulée est la « plus proche possible » de l'évolution de la température mesurée. Il existe de nombreuses méthodes numériques qui permettent de réaliser cette minimisation. Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode du simplexe

IV.5.1 Introduction de la méthode du simplexe

En 1962, Spendley et al [SHBZ] ont introduit la méthode initiale du simplexe, une méthode d'optimisation itérative. Elle est basée sur l'initialisation d'un algorithme par un simplexe régulier et en le modifiant itérativement pour estimer un sommet sur l'hyperplan. Le point estimatif est choisi comme sommet quand la fonction minimisée atteint sa plus grande valeur. La procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait.

En 1965, Nelder et Mead [NEME] ont amélioré cette méthode. Ils ont donné leurs noms à la méthode Nelder-Mead. Elle est encore appelée méthode de minimisation du simplexe modifié ou méthode downhill simplexe.

La méthode Nelder-Mead est une méthode de minimisation non linéaire sans contraintes. C'est une méthode de recherche directe, facile à programmer car elle ne nécessite pas le calcul de gradient numérique et entraîne des temps de calcul réduits par rapport aux autres méthodes.

IV.5.2 Méthode simplexe initial

La méthode simplexe initial est facile à comprendre et à appliquer. Elle débute dans notre cas par le test de groupements initiaux. Le nombre de calculs initiaux est égal au nombre de variables plus un (ici $2+1=3$). Dans l'espace des groupements de paramètres, les points initiaux forment une figure géométrique dans l'espace à $n+1$ dimensions (n est le nombre de paramètres) appelée simplexe.

Si une seule variable est recherchée, le simplexe forme un segment de droite. Pour deux variables, il forme un triangle. On passe à un tétraèdre pour trois variables. Au-delà,

l'interprétation géométrique est plus difficile mais les descriptions géométriques représentées dans la figure IV.12 peuvent aider à la compréhension de la démarche d'optimisation.

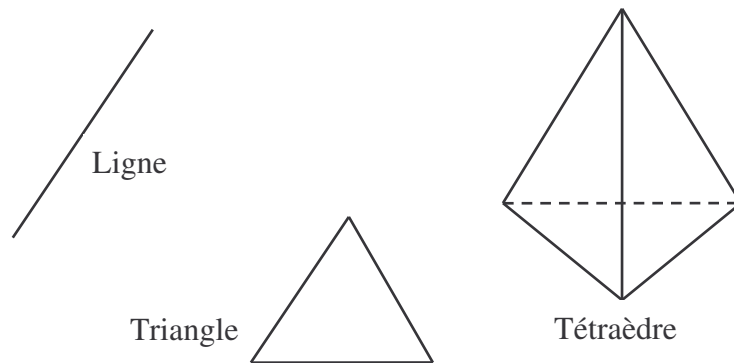


Figure IV-12: Interprétations géométriques du simplexe en petites dimensions

Les deux principales règles de la méthode simplexe initial sont :

- Rejeter le jeu de paramètres qui a donné la réponse la plus défavorable (erreur) dans le simplexe en cours.

Un nouveau groupement de variables est défini. Il remplace dans le nouveau simplexe, le groupement qui a donné le mauvais résultat. Le nouveau point est choisi en réfléchissant celui qu'il remplace par rapport au plan défini par le reste du simplexe en cours. Le simplexe est retourné. A chaque étape, le plus mauvais point est éliminé. Les étapes successives de calcul vont guider le simplexe vers une zone favorable de l'espace où la figure va se stabiliser.

- Ne jamais retourner sur le groupement de variables qui vient juste d'être rejeté.

Le nouveau groupement obtenu par réflexion peut produire un résultat plus mauvais. Sans cette seconde règle, le simplexe peut osciller entre les deux points.

Le schéma synoptique suivant décrit le fonctionnement de l'algorithme du simplexe. Pour tous les simplexes, P désigne le plus mauvais groupement ou le groupement rejeté, M correspond à la meilleure solution en cours alors que V_M correspond à la seconde.

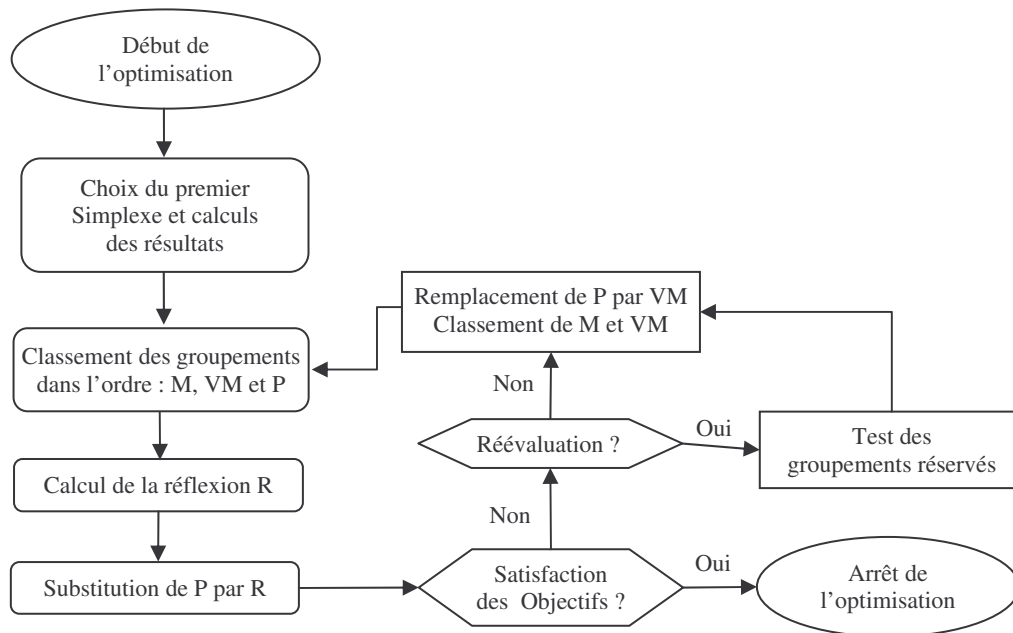


Figure IV-13 : Schéma de la méthode du simplexe initial

IV.5.3 Méthode Nelder-Mead

La méthode Nelder-Mead (Annexe A.3) utilise le concept du simplexe qui est un polytope de $N+1$ sommets dans un espace à N dimensions. Soit N la dimension de l'espace où f prend ses valeurs. On démarre avec un simplexe de cet espace. La première étape consiste à enlever le point du simplexe où la fonction est maximale et à le remplacer par la réflexion de ce point par rapport au centre de gravité des N points restants. Si ce point est meilleur, on étire le simplexe dans cette direction. Sinon, on est dans une vallée, et on réduit le simplexe par une similitude centrée sur le point du simplexe où la fonction est minimale.

Ces procédures consécutives d'extension et contractions permettent souvent d'atteindre la zone optimale plus rapidement que la méthode simplexe initial et de trouver un résultat plus précis.

IV.5.4 Validation de la procédure d'inversion

La procédure d'inversion a été présentée dans la partie précédente. Un modèle numérique en différences finies a été élaboré pour résoudre le problème direct, et la méthode de simplexe est

employée pour la phase de minimisation. C'est-à-dire qu'un schéma d'inversion est établi. Avant d'appliquer cette procédure sur les résultats expérimentaux, une validation de ce système inverse a été effectuée à partir de données simulées.

IV.5.4.1 Identification de l'épaisseur du béton de recouvrement sans bruit

Les paramètres thermophysiques du béton et d'acier, les paramètres géométriques et les conditions limites de l'essai sont intégrés dans un modèle numérique qui nous donne alors un premier ensemble de résultats. Dans un premier temps, notre procédure d'inversion vise à identifier l'épaisseur du béton de recouvrement d'un modèle numérique avec ces premiers résultats.

Les différentes évolutions des réponses simulées lors de la procédure d'inversion sont visibles sur la figure IV- 15. L'épaisseur obtenue à l'aide de l'algorithme d'inversion est identique à celle qui avait été définie initialement pour effectuer cette validation. L'algorithme a permis ici de retrouver le résultat avec précision, soit $(0.04400 \pm 0.00025m)$. Notre procédure d'inversion est bien vérifiée pour ce cas « idéal ».

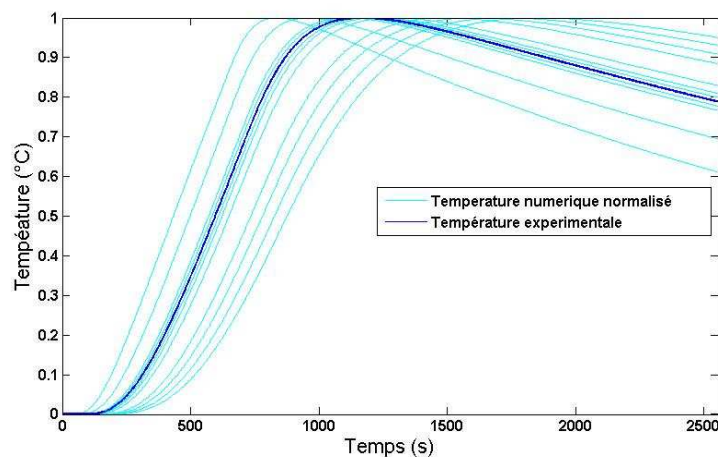


Figure IV- 14 : Validation de la procédure d'inversion pour l'identification de l'épaisseur

IV.5.4.2 Identification de l'épaisseur du béton de recouvrement avec bruits

Dans les chapitres II et III, les thermogrammes ont montré qu'ils comportaient des bruits générés par la caméra infrarouge. En contrôle non destructif bien souvent, ce ne sont pas les valeurs absolues des grandeurs physiques qui présentent le plus d'intérêt mais les variations entre elles. Ces écarts entre grandeurs traduisent des variations de la grandeur détectée même si leurs valeurs ne sont pas connues avec précision. Dans le cas des mesures par thermographie infrarouge, la précision des températures mesurées dépend à la fois de la résolution thermique de la caméra mais aussi de la précision des grandeurs environnementales que l'on fixe arbitrairement. Ces grandeurs interviennent directement dans le bilan radiatif de la scène thermique avec plus ou moins d'importance [Cf.ChapI.5.3-bilan radiatif]. Par exemple une légère variation du pourcentage d'humidité dans l'air aura moins d'influence dans certain cas qu'une variation d'émissivité sur la température de l'objet étudié. L'émissivité du béton est donnée dans la majorité des tables comme étant égale à 0,92. Or, il s'avère que l'émissivité du béton n'est certainement pas constante sur toute la surface de la poutre. Des aspérités peuvent se comporter comme des minis cavités jouant le rôle de corps noirs et présenter une émissivité apparente plus élevée. Des variations d'émissivité peuvent provenir des différents composants du béton, en effet des zones présentent plus de laitance, d'autre plus de ciment. Tout ceci conduit à des variations d'émissivité qui ne sont pas prises en compte localement et donc produisent des variations de températures. Ces variations sont comme un bruit thermique s'ajouter aux températures mesurées. Nous avons donc superposé un bruit à l'évolution de la température calculée par la modélisation.

Avec la procédure d'inversion une épaisseur de $e = (0.044 \pm 0.0015\text{m})$ est trouvée. En augmentant les bruits, les erreurs sont plus élevées. La figure IV- 15 montre la procédure de la validation de l'inversion. Une courbe de la température obtenue numériquement par la modélisation est présentée dans la figure IV-15 (a). Un bruit aléatoire d'une amplitude de 30mK est superposé à la courbe de la température [figure IV-15 (b)]. Elle ressemble ainsi à une courbe réelle provenant d'un résultat expérimental. Un traitement de lissage est appliqué sur cette courbe bruitée [la figure IV-15 (c)]. La figure IV-15 (d) représente la courbe de la température normalisée. Les différentes itérations du processus d'optimisation sont visibles en bleu clair sur la figure IV-15(e). La courbe finale normalisée de la température (sans dimension) est représentée en bleu foncé.

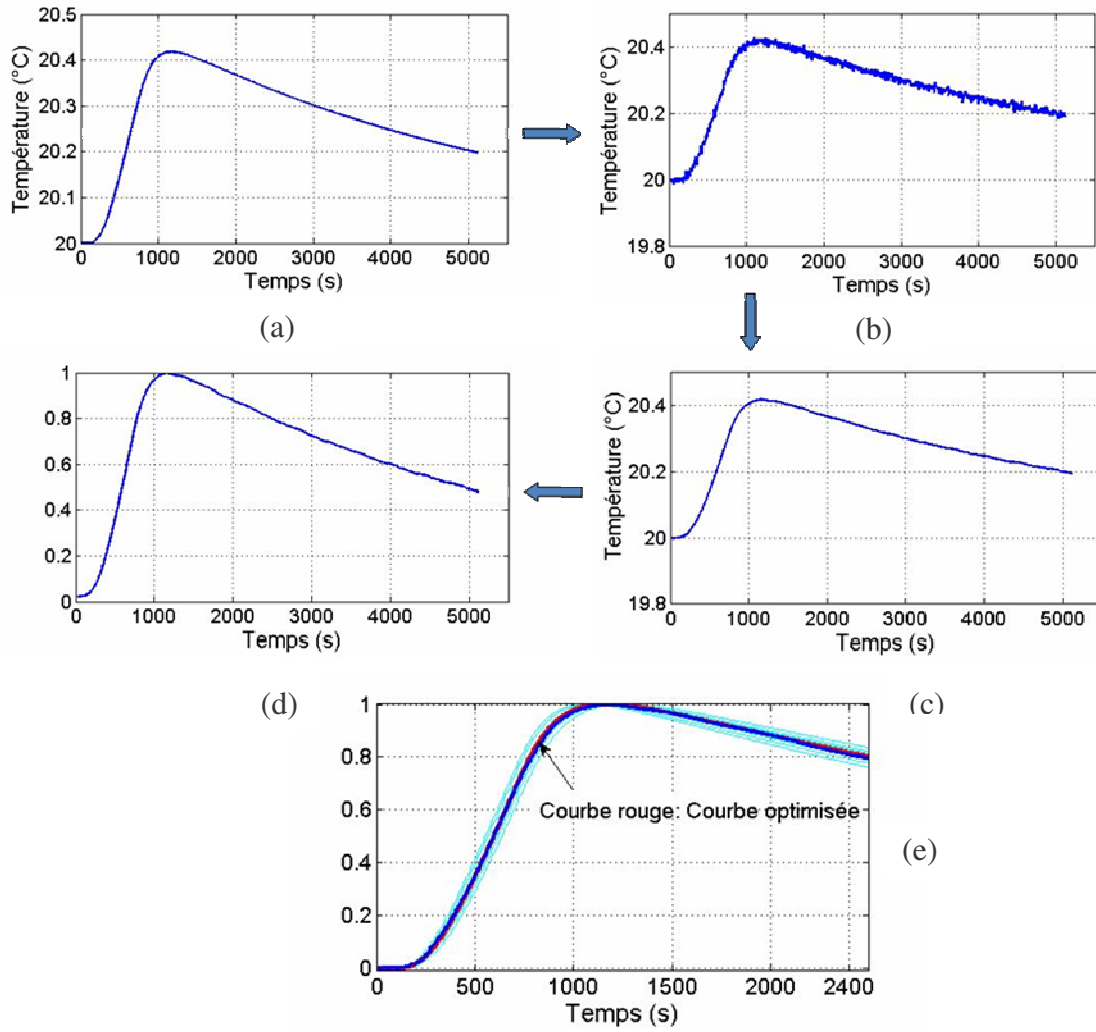


Figure IV- 15: (a) Courbe de la température numérique ;
 (b) Courbe de la température numérique avec des bruits ;
 (c) Courbe lissée ; (d) Courbe normalisée ;
 (e) Procédure d'optimisation

Dans notre cas, la caméra infrarouge est donnée pour une résolution de 25mK. Les bruits sont donc moins importants que dans le cas de la figure IV-15. Les résultats des tests réalisés avec un bruit d'amplitude plus importante sont encourageants quant au succès de la procédure d'inversion.

IV.5.5 Estimation des paramètres

IV.5.5.1 Détermination des valeurs des références

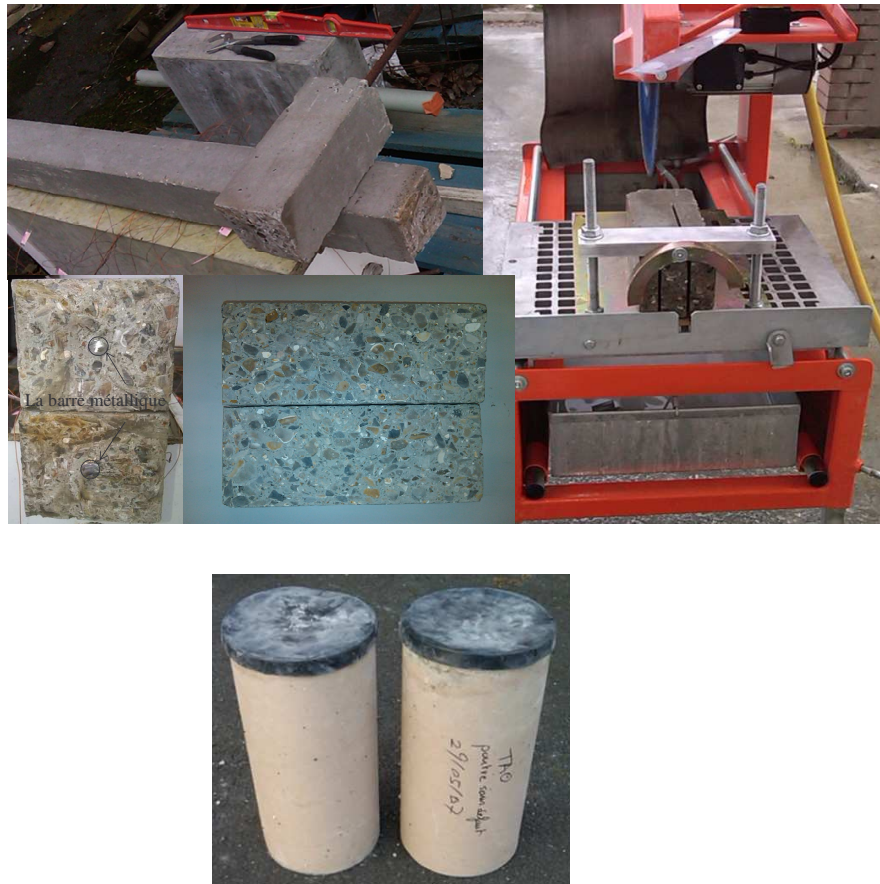


Figure IV- 16: Photos des échantillons

- L'épaisseur du béton de recouvrement

Une barre métallique d'une longueur de 1.8 m et de 12 mm de diamètre a été insérée au centre de la poutre de section carrée de 10 cm de côté. Idéalement, l'épaisseur du béton de recouvrement est donc de 0.044m ($((0.100-0.012)/2)$). Bien que les poutres aient été coulées avec beaucoup de précautions, il est difficile de garantir un positionnement identique sur toute la longueur de la barre. Pour vérifier la présence éventuelle d'une erreur de positionnement, la poutre saine a été tronçonnée. Un décalage d'environ 1 mm vers le bas a été mesuré dans la section coupée ($e=0.043$ mm par rapport à la surface d'étude). De plus, la barre n'est pas complètement lisse mais présente des aspérités pour favoriser son adhérence avec le béton. Ces aspérités introduisent également une erreur sur la position de la barre. Il existe donc bien une incertitude sur la position de la barre qui est due aux conditions de

mise en œuvre et aux aspérités de surface. La valeur $e=0.044\text{m}$ est indicative et ne peut être considérée comme étant la valeur exacte de référence.

- La diffusivité du béton

D'après l'étude de la sensibilité de la température normalisée aux différents paramètres, la diffusivité du béton joue un rôle également important. La précision des résultats obtenus par la procédure d'inversion dépend de cette valeur. Lors de la fabrication des poutres en béton, une partie du béton a été réservée pour confectionner des échantillons cylindriques $16\text{cm} \times 32\text{cm}$. Une mesure de la diffusivité du béton a été effectuée sur des tranches circulaires de ces échantillons à l'aide des bancs de caractérisation disponibles au laboratoire. Bien que le mélange qui a permis de réaliser ces échantillons soit le même que celui de la poutre, les conditions de mise en œuvre, de maturation et de stockage conduisent à des inhomogénéités du béton et donc une variation de la diffusivité. De plus la valeur obtenue traduit un comportement thermique moyen d'un matériau homogénéisé. Les valeurs obtenues dans ces conditions se sont montrées éloignées des résultats obtenus par la procédure d'inversion testée (écart de 10 à 15%). Afin de disposer d'une valeur plus représentative de celle des spécimens, un échantillon a été directement prélevé sur la poutre (figure IV-16) et sa diffusivité a été mesurée. Une diffusivité de $6,46 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a été obtenue. Cette valeur qui elle aussi est une diffusivité d'un matériau homogène équivalent servira d'élément de comparaison pour les résultats issus de la procédure d'inversion. L'hétérogénéité du béton entraîne des variations de sa diffusivité thermique et des écarts sont à attendre. La méthode devrait à l'évidence être expérimentée sur un matériau homogène. Pour ne pas trop s'éloigner du contexte du béton renforcé, une étude sur un spécimen en mortier permettrait une étude plus fine de la précision de la méthode. Cette étude n'a pas été réalisée faute de temps.

IV.5.5.2 Identification de l'épaisseur du béton de recouvrement – résultats expérimentaux

Une procédure d'essai a été introduite précédemment. Une sollicitation thermique en forme de créneau d'une durée 10 (ou 15) minutes est appliquée. Les images infrarouges sont

enregistrées toutes les 5 secondes. L'épaisseur du béton de recouvrement a été déterminée à partir des résultats expérimentaux.

Pour diminuer l'amplitude du bruit de mesure, la température utilisée est la valeur moyenne spatiale sur les points (pixels) autour du point le plus chaud. La moyenne T_{moy} a été effectuée sur 5 pixels (températures T_i).

$$T_{opti} = T_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (IV- 53)$$

T_{moy} est l'évolution de la température moyenne des pixels choisis T_i ,

T_{opti} est l'évolution de la température à optimiser.

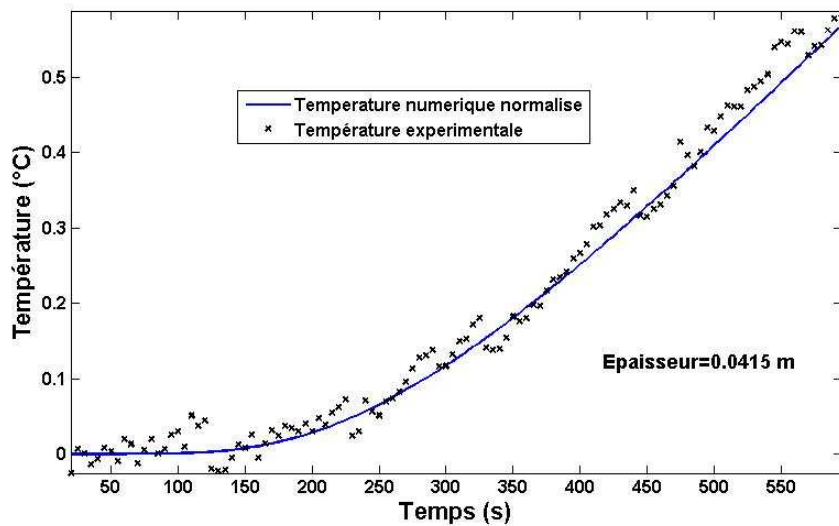


Figure IV- 17: Evolution des températures mesurée et simulée après optimisation

Pour apprécier l'impact du temps de chauffage, des essais ont été effectués pour deux durées différentes de chauffage : 10 min et 15 min. Pour chaque type de chauffage les deux évolutions de la température moyenne autour du point le plus chaud ont été retenues.

Un exemple de résultat est montré figure IV-17. Cet essai a conduit à déterminer une épaisseur $e = 0.0415$ m.

Pour assurer la reproductibilité des résultats, une vingtaine d'essais a été réalisée dans des conditions expérimentales identiques. Ces résultats sont donnés dans le tableau IV-1

	Epaisseur (m)
Moyenne	0.0396
Maximum	0.0415
Minimum	0.0378
Ecart-type	0.00097
Coefficient de variation	2.4 %
Valeur indicative	0.044

*Tableau IV- 1: Résultats de la procédure d'identification
De l'épaisseur du béton de recouvrement*

Les résultats obtenus montrent une bonne reproductibilité avec un faible coefficient de variation. La valeur moyenne s'écarte de 9% de la valeur « idéale » de l'épaisseur d'enrobage. Pour cette étude, la diffusivité est supposée connue et égale à $6.46 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Il est évident qu'une erreur sur la diffusivité va entraîner un biais dans l'estimation et créer une erreur systématique.

Remarque concernant le temps de chauffage (10 min ou 15min de chauffage)

La durée d'essai ne semble pas avoir une influence sur la précision des résultats. Ce constat est à relier à l'étude de sensibilité qui indique que la sensibilité de la température normalisée au paramètre recherché est optimale en début d'essai. A partir d'une certaine durée, l'augmentation du temps de chauffage n'apporte pas d'information significative sur l'épaisseur.

- Remarque concernant la zone d'étude

Plusieurs procédures d'identification ont été réalisées pour des zones différentes. Si la variation de température est plus faible corrélativement le niveau de bruit relatif superposé est plus important. L'étude préalable a montré que dans ce cas les résultats de l'optimisation présentent une dispersion plus importante. Dans le cas du spécimen étudié, les résultats sont difficilement comparables entre eux car la diffusivité varie spatialement en lien avec l'hétérogénéité du matériau.

IV.5.5.3 Identification de l'épaisseur du béton de recouvrement et la diffusivité du béton - résultats expérimentaux

Le degré de corrélation entre l'épaisseur du béton d'enrobage et la diffusivité a déjà été vérifié en traçant la figure IV-11. L'étude a montré qu'il existe une seule période pendant laquelle les sensibilités de la réponse à la diffusivité du béton et à l'épaisseur ne sont pas proportionnelles. Cette période sera intégrée dans la plage de temps retenue pour l'inversion.

Un exemple du résultat de la phase de minimisation est montré figure IV-18. Les évolutions des températures mesurée et simulée après optimisation sont représentées pendant la phase montante. La zone de température la plus élevée a été retenue pour le calcul.

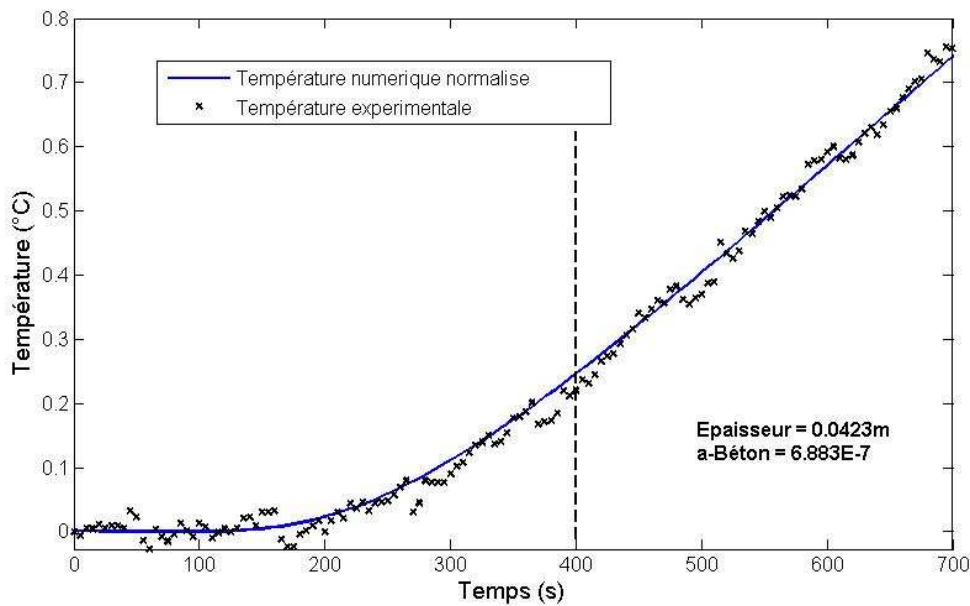


Figure IV- 18 : Evolution des températures simulée et mesurée
(exemple de résultats de la phase de minimalisation)

Pour cet essai, la valeur estimée de la diffusivité du béton est de $6.89 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et l'épaisseur de l'enrobage est estimée à 0.0423m.

La procédure a été reproduite pour une vingtaine d'essais réalisés dans les mêmes conditions. Une synthèse des résultats est consignée dans le tableau IV-2 :

	Epaisseur (m)	Diffusivité ($10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)
Moyenne	0,0412	6,74
Maximum	0,0433	7,21
Minimum	0,0385	6,16
Ecart-type	0,0015	0,35
Coefficient de variation(%)	3.64 %	5.19 %

Valeurs indicatives	0,044	6,46
----------------------------	--------------	-------------

Tableau IV- 2: Synthèse des résultats - identification épaisseur/diffusivité

L'identification simultanée des deux paramètres a été réalisée avec une reproductibilité satisfaisante. Les résultats moyens obtenus s'écartent respectivement des valeurs indicatives de 7% pour la position et de 5% pour la diffusivité. Une concordance meilleure est constatable pour la position au regard de la première étude (à diffusivité connue).

Avec les incertitudes sur les valeurs réelles de la position et de la diffusivité thermique, la méthode semble fournir des estimations très prometteuses. Une campagne réalisée sur un matériau homogène avec une précision meilleure sur la position de la barre permettra de tirer des conclusions plus affirmatives.

IV.6 Conclusion

Dans cette partie, une méthode d'identification de l'épaisseur de recouvrement et de la diffusivité thermique du béton a été développée à partir d'une procédure d'inversion. Elle est basée sur l'association d'un modèle numérique en différences finies et d'un algorithme de minimisation de l'écart entre la température simulée et la température mesurée. Le modèle numérique a été spécifiquement écrit suivant un schéma ADI qui alterne pour chaque direction, une écriture numérique explicite et implicite de l'équation de diffusion de la chaleur. Une étude de sensibilité de la réponse en température aux paramètres a montré qu'il était possible d'identifier simultanément l'épaisseur d'enrobage et la diffusivité thermique. Deux situations ont été envisagées. La première pour laquelle la diffusivité thermique est supposée connue et la seconde pour laquelle les deux paramètres sont à identifier. Les valeurs estimées à partir des deux approches obtenus sont proches de valeurs indicatives et montrent tout l'intérêt de cette approche. Les écarts peuvent facilement être imputés à l'incertitude sur la position exacte de la barre et à la variabilité spatiale de la diffusivité thermique d'un matériau hétérogène comme le béton. On peut toutefois regretter que par manque de temps une campagne sur un matériau homogène (mortier) n'ait pu être réalisée.

Conclusions et perspectives

V. Conclusions et perspectives

Ces travaux ont montré l'intérêt de la thermographie infrarouge active appliquée à la localisation des armatures métalliques dans des structures en béton et qu'il était possible de détecter des défauts d'injection de coulis. Une exploitation quantitative des évolutions de température est mise à profit pour estimer l'épaisseur d'enrobage et la diffusivité thermique du béton.

En premier lieu, la problématique de l'auscultation des ouvrages d'art a été introduite en explicitant la technique de construction par précontrainte et en passant en revue les méthodes de contrôle non destructif déployées pour évaluer son état. L'utilisation de la thermographie infrarouge active a déjà été envisagée pour aborder cette problématique. Des travaux antérieurs ont proposé le principe d'un chauffage interne et du suivi de l'évolution du champ de température à la surface de l'élément ausculté. Les résultats déjà obtenus au laboratoire ont incité à faire évoluer le mode de sollicitation en remplaçant le chauffage direct par effet Joule par un chauffage par une induction électromagnétique. La mise en œuvre d'un mode de sollicitation sans contact et non intrusif correspond bien aux attentes du programme de recherche ANR ACTENA sur l'auscultation des câbles tendus non accessibles dans lequel se situe ce travail.

L'inducteur employé n'étant pas spécifiquement dimensionné pour cette application, des essais préliminaires ont été réalisés sur une poutre sans défaut. Ils ont montré que le dispositif permettait d'assurer un chauffage suffisant des armatures métalliques sans que les températures n'atteignent des valeurs trop élevées. Toutefois les essais ont révélé que la génération de chaleur n'était pas uniformément répartie tout au long de la barre. L'hétérogénéité de la sollicitation provoque l'apparition de gradients de température en surface qui pourraient conduire à une interprétation erronée des thermogrammes bruts.

Afin de s'affranchir de cette non-uniformité, nous avons introduit une procédure de traitement originale des thermogrammes bruts. Cette méthode fréquentielle est basée sur une approche systémique du problème. La sollicitation thermique s'apparente à un créneau de puissance dissipée au niveau de l'armature. Elle constitue le signal d'entrée d'un système où s'établissent des transferts thermiques. Les évolutions des températures de chaque surface élémentaire associée à chaque pixel des thermogrammes sont autant de sorties du système thermique. Pour

chaque pixel, une fonction de transfert peut être calculée. Les phases des fonctions de transfert peuvent être associées pour reconstituer une image de phase. L'analyse se porte alors sur des images de phase et d'amplitude de fonctions de transferts. Conformément à ce qui est évoqué dans la littérature, les images de phases se sont montrées moins sensibles à la non-uniformité du chauffage que les images d'amplitude.

Ces résultats ont été vérifiés par des travaux de modélisation à l'aide d'un logiciel d'éléments finis et expérimentalement sur des spécimens de poutres saine et défectueuse. Les évolutions fréquentielles des images de phase montrent des points singuliers dont l'exploitation quantitative devrait être poursuivie au-delà de notre travail.

Les modélisations des deux premiers spécimens de poutre ont permis d'appréhender plus finement les transferts thermiques. Les effets dimensionnels, les transferts à l'interface des zones saine et défectueuse ainsi que la non-uniformité ont été modélisés.

La détermination du tracé des armatures a pu être effectuée à l'aide d'un algorithme relativement simple de recherche des maximas sur une série de thermogrammes. Des précisions ont été apportées lors de la présence d'une gaine métallique et d'armatures passives. Les essais menés sur le mur test de Lyon ont permis de voir que le chauffage fonctionnait en extérieur mais que sa manipulation restait quelque peu fastidieuse.

Une méthode d'inversion a été mise au point pour déterminer dans un premier temps l'épaisseur du béton d'enrobage et dans un deuxième permettre en plus l'identification de la diffusivité thermique de ce dernier. Cette méthode d'identification est basée sur une modélisation aux différences finies d'un quart de section de la poutre et d'un algorithme de minimisation d'erreurs...Les résultats sur l'épaisseur et la diffusivité sont obtenues avec une très bonne précision.

Afin de limiter l'étendue de ces travaux, il faut préciser que notre objectif n'a pas été de mettre au point une méthode d'auscultation complète mais plutôt d'explorer les potentialités d'application de la thermographie infrarouge à la détection des armatures métalliques dans le béton. Ces travaux à forte dominante expérimentale devraient se poursuivre sur des ouvrages réels.

Enfin, le développement d'un nouvel inducteur est prévu, le circuit magnétique devrait présenter un champ d'induction plus uniforme et l'alimentation permet de faire varier la fréquence et la valeur du signal de sollicitation.

Ces travaux ont été menés en laboratoire principalement sur des spécimens de poutre en béton, ils demandent à être étendus à des ouvrages d'art réels. Les méthodes thermiques appliquées à des matériaux tels que le béton sont relativement longues à mettre en œuvre.

Références bibliographiques

VI. Références bibliographiques

- [AADH] N.P. Avdelidis, D.P. Almond, A. Dobbinson, B.C. Hawtin, C. Ibarra-Castanedo, et X. Maldague, "Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 40, Avr. 2004, p. 143-162.
- [ANTC] E. ANTCZAK : "Identification par impédance thermique : application à la caractérisation des géomatériaux , " *Thèse de Doctorat de l'Université d'Artois*, 1996.
- [ASTM] ASTM C1383-98a Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method
- [AUDE] C. Aubagnac, X. Derobert, "Evaluation de différentes méthodes d'auscultation non destructives avant autopsy d'un élément de poutre du pont de Foix," *Bulletin des Laboratoire des Ponts et Chaussées* – 241, Nov. Déc. 2002, Ref. 4417.
- [BAAP] S. Bedaoui, P. Argoul, O. Abraham, N. Point, "Extracting the S1 Lamb mode from the impact echo signal," *NDTCE'09*, France, June 2009.
- [BRAB] Breysse et Abraham, "Méthode de CND appliquées aux ouvrages d'art, " Edition des Ponts et Chaussées.
- [BRLA] O. Breitenstein, M. Langenkamp, "Lock-in Thermography Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials," Springer, 2003.
- [BUWK] G. Busse, D. Wu, W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *In: J. Appl. Phys.* 71, 3962-3965(1992)
- [CHAU] Robert CHAUSSIN, « Béton précontraint », *Techniques de l'ingénieur*, C 2 3 360.
- [CHFO] J.-L. Chazelas, S. Fortier, "ACTENA, un programme de recherche pour le développement des méthodes non destructives d'auscultation des câbles tendus non accessibles," *COFREND*, 2008

- [CKPK] M. Choi, K. Kang, J. Park, W. Kim, et K. Kim, “Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography,” *NDT & E International*, vol. 41, Mar. 2008, p. 119-124.
- [CREM] Christian Cremona, “Suivi du comportement mécanique d'une poutre de VIPP sous chargement : Le cas du VIPP de Merlebach,” *Edition du LCPC* (1 janvier 2007).
- [CRIC] Rapport technique sur le “Contrôle Radiographique de l’Injection de Certaines Gaines de Précontrainte du Viaduc de Freyming-Merlebach,” *CETE de Rouen*, LRPC de Blois, 1975.
- [DEAA] X. Dérobert, C. Aubagnac, O. Abraham, “Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy,” *NDT&E International* 35 (2002) 541–548.
- [FABR] P. Fabre, “Appareillage de thermographie industrielle,” *Techniques de l’ingénieur*, R 2 750.
- [GAUS] G. GAUSSORGUE, “La thermographie infrarouge : Principes, Technologies, Applications,” *Ed. Tech&Doc/Lavoisier*, 4ème Ed. 1999.
- [GIMM] D. González, C. Ibarra-Castanedo, F. Madruga, et X. Maldague, “Differentiated absolute phase contrast algorithm for the analysis of pulsed thermographic sequences,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 48, Avr. 2006, p. 16-21.
- [GLSB] A. Gleiter, C. Spiessberger, G. Busse, “Decay time analysis in pulse thermography,” *Eur. Phys. J. Special Topics* 153, 377–381 (2008)
- [GUTH] S. Güths, “Anémomètre à effet peltier et fluxmètre thermique. Conception et réalisation. Application à l’étude de la conversion naturelle,” Thèse de doctorat, Université d’Artois, 1994.
- [HDMM] B. de Halleux, P.M. Dubois, X. Maldague, D. Michaux, “Auscultation des ouvrages d'art pour établir le tracé des armatures de précontrainte par voie thermographique,” *Journée Francophone Auscultation et instrumentation des Ouvrages de Génie Civil*, 23 Novembre 2000, Béthune.

- [IBAR] C. Ibarra-Castanedo, “Quantitative Subsurface Defect Evaluation By Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase,” *Thèse de doctorat*, Université Laval, 2005.
- [LITE] P. Liu et P. Yeh, “Vertical spectral tomography of concrete structures based on impact echo depth spectra,” *NDT & E International*, vol. 43, Jan. 2010, p. 45-53.
- [LWRM] R. Le Roy, M. Willaert, D. Rouanet, H. Mirmand, “Identification des paramètres favorisant la formation de poches d’air et d’eau dans les coulis de ciment pour gaines de précontrainte,” *Bulletin des LCPC*-229-Nov.-Déc. 2000-Réf. pp.53-70.
- [MABR] Ch. Maierhofer, A. Brink, “Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the near surface region,” *Infrared Physics Technology* 43 (2002), pp. 271-278;
- [MAFI] John H. Mathews and Kurtis K. Fink, “Numerical Methods Using Matlab,” *Prentice Hall*, 4th Edition, 2004
- [MAGZ] X. Maldague, F. Galmiche, et A. Ziadi, “Advances in pulsed phase thermography,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, Juin. 2002, p. 175-181.
- [MALM] X. Maldague, S. Marinetti, “Pulse phase infrared thermography,” *J. Appl. Phys.* **79**, 2694 (1996)
- [MARR] Ch. Maierhofer, R. Arndt, M. Röllig, C. Rieck, A. Walther, H. Scheel, B. Hillemeier, “Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures,” *Cement & Concrete Composites* 28 (2006) 393–401
- [MOHA] I.O. Mohamed, “Computer simulation of food sterilization using an alternating direction implicit finite difference method,” *Journal of Food Engineering*, vol. 60, Déc. 2003, p. 301-306.
- [MPTM] “Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux,” Ed. Masson, Paris, 1990.

[NEME] J.A. Nelder et R. Mead, “ A simplex method for function minimization ,” *Computer Journal*, vol. 7, no 4, 1965, p. 308-313

[NFXE] norme NF EN 584-1 essais non destructifs Film pour radiographie industrielle
Partie 1 : classification des systèmes films pour radiographie industrielle

[NFXI] NF X10-025-Isolation thermique - Détermination de la résistance thermique et de la conductivité thermique en régime stationnaire - Méthode fluxmétrique

[NILI] C. Le Niliot et P. Gallet, “Infrared thermography applied to the resolution of inverse heat conduction problems: recovery of heat line sources and boundary conditions,” *Revue Générale de Thermique*, vol. 37, Sep. 1998, p. 629-643.

[OMZH] M.A. Omar et Y. Zhou, “A quantitative review of three flash thermography processing routines,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 51, Mar. 2008, p. 300-306

[OSTR] Ch. Ostrowski, “Auscultation des ouvrages en béton par thermographie infrarouge active et passive,” *thèse de doctorat*, soutenue en novembre 2005, Université d’Artois, Béthune.

[OZIS] N. M. Ozisik, Heat Conduction, 2nd edition, Wiley Interscience, 692p

[PEDD] C.G. Petersen, A. Davis, A. Delahaza, “Impact Echo testing of steel cable ducts for injection grouting quality,” *Proceeding NDTE-CE Berlin 2003*

[PERA] D. W. Peaceman,; H. H. Rachford, JR., “The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations,” *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 3: 28–41, MR0071874(1955)

[PFTV] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, “Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing,” *Cambridge University Press*, 1986

[RACG] A.Raharinaivo; G.Arliguie; T.Chaussadent; G.Grimaldi; V.Pollet; G.Taché; “La corrosion et la protection des aciers dans le béton,” *Collection LCPC*, p.167, 1998.

[RIZB] G. Riegert, TH. Zweschper, G. Busse, “Eddy-current lockin-thermography : method and its potential ,” *J. Phys. IV*, France 125 (2005), p. 587-591.

[SAKU] T. Sakagami et S. Kubo, “Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, Juin. 2002, p. 211-218.

[SAST] Mary J. Sansalone and William B. Streett, “ Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry” *NDT net* , Vol.3 No.2 ,February, 1998

[SCHA] Robert J. Schilling, Sandra L. Harris, “Applied Numerical Methods for Engineers Using MATALAB and C,” *Thomson Learning*, 2000,p.37-96

[SHBZ] H.Shekarforoush, M.Berthod, J. Zerubia, “Direct search generalized simplex algorithm for optimizing non-linear functions,” *Institute national de recherche en informatique et en automatique*, N°2535 Avril. 1995.

[SHEP] SM. Shepard, “Advances in pulsed thermography,” In: Proceedings of SPIE – the international society for optical engineering, vol. 4360. Thermosense XXVIII, Orlando, FL; 2001. p. 511–5.

[TALM] F.Taillade, C.Aubagnac, C.Lacroix, D.Malaterre, J. L.Saussol, L. M.Cottineau , “ The capacitive probe: Developing a diagnostic tool for external prestressing ducts ,” *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 272 (2008) pp 107-122

[THER] P. Thery, “Fluxmètre calorifique,” Brevet ANVAR, 1979.

[VGBR] J. Vrana, M. Goldammer, J. Baumann, M. Rothenfusser, and W. Arnold, “Mechanisms and Models for Crack Detection with Induction Thermography” *Review of Progress in QNDE* 27, 475-482 (2008).

[WANE] G. Walle, U. Netzelman, “Thermographic Crack Detection in Ferritic Steel Components Using Inductive Heating, ” *ECNDT 2006* – Tu.4.8.5

- [WANI] M. Wanin, “Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 1), ” *Technique de l’ingénieur*, M 4 130.
- [WIGG] H. Wiggenhauser, “ Active IR-applications in civil engineering, ” *Infrared Physics & Technology*, Vol. 43, Issues 3-5, June 2002
- [WUBU] D. Wu et G. Busse, “Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials,” *Revue Générale de Thermique*, vol. 37, Sep. 1998, p. 693-703.
- [WWBR] F. Weritz, G. Wedler, A. Brink, M. Röllig, C. Maierhofer, H. Wiggenhauser, “Investigation of concrete structures with Pulse Phase Thermography,” *NDT-CE 2003*
- [XPVM] Xavier P. V. Maldague, “ Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing,” *Wiley-Interscience*; 1 edition, April, 2000
- [ZBDN] G. Zenzinger, J. Bamberg, M. Dumm, P.Nutz, “Crack Detection Using Eddytherm, ” *Review of progress in quantitative non destructive evaluation*, AIP Conference Proceedings, Volume 760, pp. 1646-1653 (2005).

Annexes

Annexe 1 : Système tri-diagonale

De nombreuses applications en ingénierie conduisent à des modélisations mathématiques sous forme matricielle. Parfois les matrices rencontrées comportent de nombreux zéros. Ces zéros peuvent être arrangés sous différentes formes au sein de la matrice. Ces matrices, dites clairsemées, se présentent sous des formes diagonales, triangulaires inférieures ou supérieures. Un autre cas particulier s'appelle « matrice tri-diagonale » [SCHA] [PFTV]. Il ne présente que des coefficients non nuls que sur sa diagonale principale, et immédiatement au-dessus et en dessous d'elle.

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & d_1 & & & \\ c_1 & a_2 & d_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & c_{i-1} & a_i & d_i \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & c_{n-2} & a_{n-1} & d_{n-1} \\ & & & & & c_{n-1} & a_n \end{bmatrix} \quad (A1- 1)$$

La décomposition LU est une méthode de décomposition d'une matrice en une matrice triangulaire inférieure L (comme "Low", bas) et une matrice triangulaire supérieure U (comme "Up", haut).

$$A = LU = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ l_1 & 1 & & & \\ & l_2 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & l_{n-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & d_1 & & & \\ & u_2 & d_2 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & d_{n-1} \\ & & & & u_n \end{bmatrix} \quad (A1- 2)$$

L est une matrice triangulaire inférieure avec des 1 sur sa diagonale et U une matrice triangulaire supérieure, par conséquent, pour une matrice tri-diagonale $n \times n$ il y a seulement $2n-1$ éléments inconnus (n^2+n pour le cas général) dans L et U à déterminer. La multiplication de L par U et l'égalisation du produit avec A révèle que les équations suivantes peuvent être utilisées pour déterminer les éléments de L et U.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= a_1 \\
 l_i &= c_i / u_i \\
 u_{i+1} &= a_{i+1} - l_i d_i \quad u_i \neq 0, i = 1, 2, \dots, n-1
 \end{aligned}
 \tag{A1- 3}$$

Le calcul de L et U pour une matrice tri-diagonale est un processus linéaire qui dépend de n, à la différence du cas général où c'est un processus de n^3 . Il est clair à la vue de (A-2) que les exigences de stockage pour L et U peuvent être réduites significativement parce qu'il n'y a aucun besoin de stocker les éléments zéro.

Le système algébrique linéaire peut être résolu efficacement pour une variété de vecteurs donné sur la partie droite. D'abord, notons que le système $Ax=b$ peut être réécrit comme $LUx=b$. Le système $LUx=b$ peut alors être résolu par étapes, en utilisant y comme la variable intermédiaire, soit :

$$\begin{aligned}
 Ax &= b \\
 LUx &= b \\
 Ly &= b \\
 Ux &= y
 \end{aligned}
 \tag{A1- 4}$$

La procédure pour résoudre $Ly=b$, $\begin{cases} y_1 = b_1 \\ y_i = d_i - l_{i-1}y_{i-1} \end{cases} \quad i = 2, 3, \dots, n$

La procédure pour résoudre $Ux=y$, $\begin{cases} x_n = y_n / u_n \\ x_i = (y_i - d_i x_{i+1}) / u_i \end{cases} \quad i = n-1, n-2, \dots, 1$

Programme sous Matlab:

```

function x=followup(A,b)
n = rank(A);
for(i=1:n)
    if(A(i,i)==0)

```

```
disp('Error: il y a des zeros ');  
return;  
end  
end;  
  
d = ones(n,1);  
a = ones(n-1,1);  
c = ones(n-1);  
for(i=1:n-1)  
    a(i,1)=A(i+1,i);  
    c(i,1)=A(i,i+1);  
    d(i,1)=A(i,i);  
end  
d(n,1) = A(n,n);  
  
%La procédure pour résoudre  $Ly=b$ , les résultats enregistrés dans b  
  
for(i=2:n)  
    d(i,1)=d(i,1) - (a(i-1,1)/d(i-1,1))*c(i-1,1);  
    b(i,1)=b(i,1) - (a(i-1,1)/d(i-1,1))*b(i-1,1);  
end  
  
%La procédure pour résoudre  $Ux=y$   
  
x(n,1) = b(n,1)/d(n,1);  
for(i=(n-1):-1:1)  
    x(i,1) = (b(i,1)-c(i,1)*x(i+1,1))/d(i,1);  
end
```

Annexe 2 : La corrélation

Lorsque deux paramètres sont corrélés, la représentation de la fonction de sensibilité de l'un par rapport à l'autre conduit à une représentation linéaire passant par l'origine. Les deux fonctions de sensibilité sont dans ce cas proportionnelles.

Le développement suivant permet de comprendre cette approche graphique.

En supposant que deux paramètres, notés p et q , soient corrélés, il existe alors plusieurs groupements différents de ces deux paramètres qui donnent la même réponse pour une sollicitation identique. Dans notre cas, on peut supposer par exemple la même évolution de la température en fonction du temps.

Considérons deux groupements (p_1, q_1) et (p_2, q_2) donnant la même réponse.

On peut écrire :

$$F(t, p_1, q_1) = F(t, p_2, q_2) \quad (\text{A2- 1})$$

Les relations entre ces deux couples de paramètres sont :

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \Delta p \\ q_2 &= q_1 + \Delta q \end{aligned} \quad (\text{A2- 2})$$

Où Δ représente une variation du paramètre concerné.

Le développement limité au 1er ordre de la fonction $F(t, p_1, q_1)$ s'écrit :

$$F(t, p_1, q_1) = F(t, p_1 + \Delta p, q_1 + \Delta q) = F(t, p_1, q_1) + \Delta p \cdot \frac{\partial F}{\partial p} + \Delta q \cdot \frac{\partial F}{\partial q} \quad (\text{A2- 3})$$

Avec la relation d'égalité ci-dessus, nous obtenons :

$$\Delta p \cdot \frac{\partial F}{\partial p} + \Delta q \cdot \frac{\partial F}{\partial q} = 0 \quad (\text{A2- 4})$$

En introduisant les fonctions de sensibilités X_p et X_q telles qu'elles ont été définies en IV-52, l'équation A2-4 peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{X_p(t)}{X_q(t)} = -\frac{\Delta q}{\Delta p} \cdot \frac{p}{q} \quad (\text{A2- 5})$$

Le terme de gauche est défini comme étant le rapport de deux fonctions dépendant du temps alors que celui de droite en est indépendant. Cette égalité n'est possible que lorsque le rapport des fonctions de sensibilité est constant, c'est-à-dire lorsqu'elles sont proportionnelles. Si l'on trace une fonction par rapport à l'autre, la représentation graphique est linéaire. Les points se situent bien sur une droite passant par l'origine.

Annexe 3 : Méthode de Nelder-Mead

La méthode simplexe permet de déterminer un minimum local d'une fonction de plusieurs variables. Cet algorithme a été inventé par Nelder et Mead. [MAFI] Pour deux variables, un simplexe est un triangle et la méthode consiste à rechercher un modèle qui compare des valeurs de fonction aux trois sommets d'un triangle. Le sommet, où $f(x, y)$ est la plus grande, est rejeté et remplacé avec un nouveau sommet. Un nouveau triangle est formé et la recherche se poursuit. Le processus produit des séquences de triangles (qui peuvent avoir des formes différentes), pour lesquelles la fonction calculée aux sommets devient de plus en plus petite. Un critère d'arrêt sur la taille des triangles stoppe le processus itératif et permet de déterminer les coordonnées du point qui minimise cette fonction.

Cette algorithme est appelé « simplex » (un triangle généralisé en N dimensions) L'algorithme est exposé utilisant la terme de simplex et permet de trouver le minimum d'un fonction de plusieurs variables. C'est un algorithme efficace et compact.

- Triangle Initial BGW

Soit $f(x, y)$ la fonction à minimiser. Au départ, les trois sommets du triangle sont donnés par $V_k = (x_k, y_k)$ avec $k = 1, 2, 3$. La fonction $f(x, y)$ est alors évaluée à chacun des trois points : $z_k = f(x_k, y_k)$ for $k = 1, 2, 3$. Les indices sont réordonnés de manière à ce que les indices $z_1 \leq z_2 \leq z_3$.

Nous utilisons la notation suivante comme moyen mnémotechnique : $B = (x_1, y_1)$, $G = (x_2, y_2)$, et $W = (x_3, y_3)$ pour se souvenir que B est le meilleur sommet, G est le bon (à côté du mieux) et W le pire.

- Milieu du Bon Côté M

Le processus de construction utilise le milieu du segment joignant B et G . Il est déterminé par la moyenne des coordonnées :

$$M = \frac{B+G}{2} = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \quad (\text{A3- 1})$$

- Réflexion utilisant le Point R

La fonction diminue quand on se déplace le long du côté du triangle de W vers B et il diminue quand on se déplace le long du côté de W à G. Ainsi, il est possible que $f(x, y)$ prenne des valeurs plus petites aux points qui sont loins de W sur le côté opposé de la ligne entre B et G. Un point d'essai R est choisi en prenant le symétrique par rapport au côté $\overline{BG}$. Pour déterminer R, nous déterminons d'abord le milieu le M du côté $\overline{BG}$. Il faut alors dessiner le segment allant de W à M et appeler sa longueur d. Ce dernier segment est prolongé d'une distance d jusqu'à M pour placer le point R (voir la figure A3-1).

La formule vectorielle pour R est

$$R = M + (M - W) = 2M - W \quad (\text{A3- 2})$$

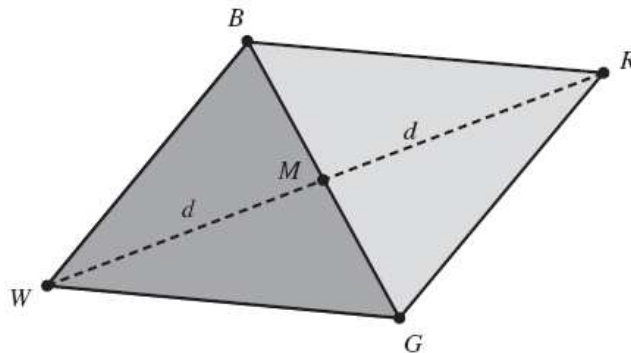


Figure A3- 1 : Triangle $\triangle BGW$ et Milieu du Bon Côté M et Réflexion utilisant le Point R

- Expansion utilisant le Point E

Si la valeur de la fonction en R est plus petite que la valeur de fonction en W, alors nous nous sommes déplacés dans la bonne direction vers le minimum. Peut-être que le minimum est juste un peu plus éloigné que le point R. Donc nous prolongeons le segment par M et R jusqu'au point E. Cela forme un triangle étendu BGE. Le point E est déterminé en se déplaçant d'une distance supplémentaire d, le long de la ligne joignant M et R (voir la figure A3-2). Si la valeur de la fonction en E est plus petite que la valeur de la fonction en R, alors nous avons trouvé un meilleur sommet que R. La formule vectorielle pour E est :

$$E = R + (R - M) = 2R - M \quad (\text{A3- 3})$$

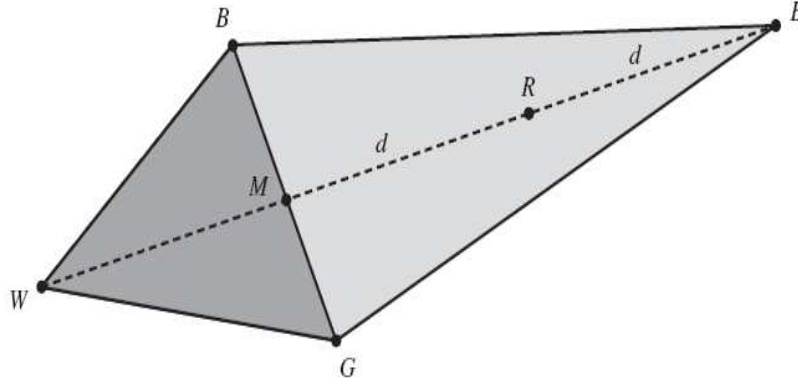


Figure A3- 2 : Triangle ΔBGW et point R et Expansion utilisant le Point E

- Contraction utilisant le Point C

Si les valeurs de la fonction en R et en W sont les mêmes, un autre point doit être évalué. Peut-être que la fonction est plus petite en M , mais nous ne pouvons pas remplacer W par M car nous devons avoir un triangle. Considérons les deux milieux respectifs C_1 et C_2 des segments $\overline{WM}$ et $\overline{MR}$, (voir la figure A3- 3). Le point ayant la valeur la plus petite est appelé C , et le nouveau triangle est BGC .

Note : Le choix entre C_1 et C_2 pourrait sembler inopportun pour le cas bidimensionnel, mais c'est important dans des dimensions plus hautes.

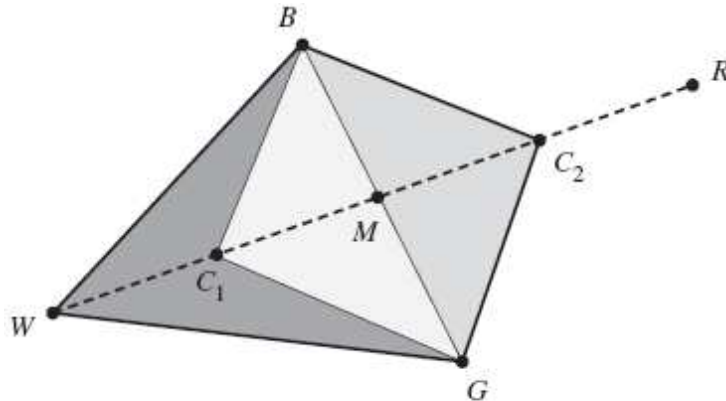


Figure A3- 3: Contraction utilisant le Point C_1 et C_2

- Réduction vers B

Si la valeur de la fonction en C n'est pas plus petite que la valeur en W, les points G et W doivent être réduits en direction de B (voir la figure A3-4) Le point G est remplacé par M et W est remplacé par S, qui est le milieu du segment joignant B avec W.

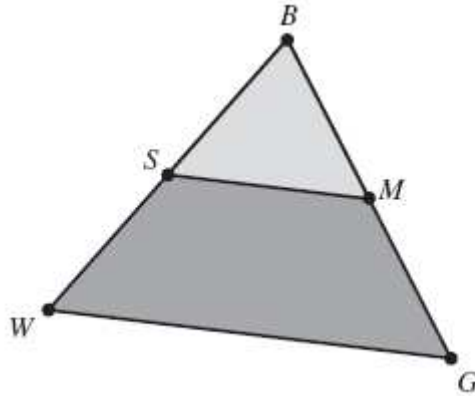


Figure A3-4 : Réduction vers B

Annexe 4 : Mesures des caractéristiques thermophysiques des spécimens expérimentaux [MPTM]

Ces mesures sont destinées à mesurer les caractéristiques thermophysiques du béton qui a servi lors de l'élaboration des poutres d'essai. Ces essais ont pour buts de valider les résultats obtenus pour l'épaisseur du béton de recouvrement et pour la détermination de la diffusivité thermique.

A4.1 Détermination expérimentale de la sensibilité d'un fluxmètre thermique

L'étalonnage d'un fluxmètre a pour but de déterminer sa sensibilité « s », exprimée en $[\mu V/(W/m^2)]$, c'est-à-dire la tension délivrée par le capteur lorsqu'il est soumis à une densité de flux unitaire. La relation (eq. A4- 1) exprime la « responsivity », « S » exprimée en $[V/W]$ en fonction de la sensibilité « s », en $[\mu V/(W/m^2)]$. « A » représente la surface active du capteur, Φ le flux en Watt et ϕ , la densité de flux en Watt par mètre carré.

$$S = \frac{\partial V}{\partial \Phi} = \frac{\partial V}{A \cdot \partial \phi} = \frac{1}{A} s \quad \text{en } [V/W] \quad (A4- 1)$$

A4.2 Méthode d'étalonnage à flux nul

Plusieurs méthodes sont envisageables [GUTH]. Nous avons choisi une procédure dite 'à flux nul'. Le montage d'étalonnage est représenté Figure A4-1. Le flux thermique nécessaire à cette procédure est obtenu par le passage d'un courant électrique dans une résistance chauffante (appelée résistance principale). La puissance électrique dissipée donne alors naissance, par effet Joule, à un flux de chaleur de part et d'autre de cette résistance. La compensation d'un des deux flux est mise en œuvre grâce aux apports d'une résistance chauffante auxiliaire. Cette compensation a pour but d'annuler la composante de flux thermique dirigée vers le haut, dès lors que la résistance auxiliaire génère une composante identique mais dirigée vers le bas, à cet effet un fluxmètre auxiliaire est inséré entre les deux éléments résistifs ; la condition de compensation est assurée lorsque ce fluxmètre auxiliaire délivre une tension nulle. L'avantage essentiel de cette méthode (de type général « méthode de zéro ») réside dans la possibilité de recourir à un fluxmètre non étalonné pour assurer la fonction du contrôle d'équilibre. Le simple bilan énergétique (produit tension-courant) de la résistance principale est alors représentatif de la puissance thermique (« P ») imposée intégralement sur la surface du capteur à étalonner. Connaissant ainsi le flux thermique traversant réellement le capteur à étalonner, il ne reste qu'à

relever la tension de sortie du fluxmètre. La pente de la courbe $V_{\text{capteur}}=f(P)$ constitue la sensibilité en flux net exprimée en volt par Watt.

Le fluxmètre à étalonner est placé sur la plaque échangeuse inférieure. Nous superposons, dans l'ordre, une résistance électrique plane, un fluxmètre auxiliaire, une autre résistance chauffante et une plaque isolante. Cet ensemble est alors surmonté par une deuxième plaque échangeuse. Un vérin pneumatique comprime assure un maintien vertical de cet ensemble et réduit les résistances de contact. Ces dernières dépendent principalement de l'état de surface des éléments utilisés et de la pression à laquelle ils sont soumis. De l'eau à température contrôlée circule dans les échangeurs pour permettre l'obtention de conditions de températures imposées de part et d'autre de ce montage.

L'emploi du constantan comme matériau conducteur pour la réalisation de l'élément chauffant permet de s'affranchir d'une régulation active du niveau de puissance dissipée. En effet, ce matériau est caractérisé par une très faible dérive de sa résistance en fonction de la température. La dissipation de la puissance devant se produire préférentiellement dans la zone utile et non au niveau de ses connexions, nous prenons soins lors de sa fabrication, de laisser du cuivre sur ces dernières. Le cuivre possédant une résistivité électrique 30 fois plus faible que le constantan, il dissipera moins de chaleur par effet Joule au niveau de ses connexions. En contrepartie, un transfert latéral de chaleur peut constituer une source d'erreur si cette piste n'est par thermiquement isolée sur sa surface.

L'intégralité du banc d'étalonnage automatisé est représentée ci-dessous, Figure A4-1.

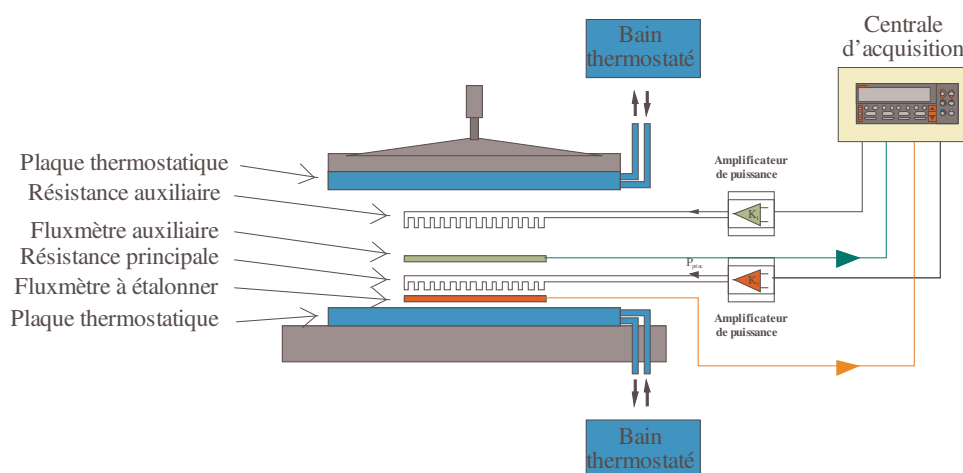


Figure A4- 1 : Schéma du dispositif d'étalonnage

Comme précédemment, le fluxmètre auxiliaire donne l'information relative au transfert thermique entre l'élément chauffant et l'isolant au contact de l'échangeur supérieur. Il est donc représentatif d'un flux de perte, noté Φ_{perte} . Le rôle de la résistance chauffante auxiliaire étant de compenser ce flux Φ_{perte} , il suffit de régler, grâce à l'amplificateur auxiliaire, une puissance telle que le fluxmètre auxiliaire délivre une tension nulle, exprimant ainsi l'annulation de la composante du flux au travers de sa surface. Les deux échangeurs sont maintenus à une température identique, afin d'éliminer toutes composantes de flux supplémentaire.

La compensation du flux de perte, Φ_{perte} , est assurée par un asservissement de puissance comportant un correcteur P.I.D. numérique inclus dans le programme d'étalonnage du PC. Ce dernier régule la résistance chauffante auxiliaire de manière à obtenir un flux nul traversant le fluxmètre auxiliaire. Lorsque la compensation est effective, l'opérateur visualise la valeur de la tension de sortie du fluxmètre à étalonner V_{capteur} en fonction du Φ_{princ} .

La résistance chauffante principale de surface S_{princ} (en m²) est alimentée par l'amplificateur de puissance qui délivre une densité de puissance φ_{princ} , lorsque la compensation est effectuée.

$$\varphi_{\text{princ}} = \frac{R_{\text{princ}} \cdot I_{\text{princ}}^2}{S_{\text{princ}}} \quad \text{en [W/m}^2\text{]} \quad (\text{A4- 2})$$

Pour le niveau donné de puissance Φ_{princ} , correspond alors une tension de sortie du capteur notée V_{capteur} .

Le coefficient de sensibilité étant le rapport entre la grandeur électrique de sortie V_{capteur} et la densité de flux φ_{princ} traversant le fluxmètre en [W/m²], la sensibilité s'exprime par le rapport :

$$S = \frac{V_{\text{capteur}}}{\varphi_{\text{princ}}} \quad \text{en } [\mu\text{V}/(\text{W/m}^2)] \quad (\text{A4- 3})$$

Bien que présentant une élégance certaine compte tenu du caractère d'indépendance vis-à-vis de la sensibilité du fluxmètre auxiliaire, cette méthode nécessite un contrôle très strict de l'homogénéité de la surface active du fluxmètre auxiliaire. En effet, une valeur globale nulle du

flux net pourrait résulter d'un ensemble de déséquilibres locaux mais à valeur centrée, effet susceptible d'entraîner une erreur d'étalonnage significative. Un moyen simple de contrôle consiste à vérifier la stabilité des valeurs obtenues, lorsque le fluxmètre auxiliaire est successivement tourné de 90° jusqu'à trouver sa position initiale.

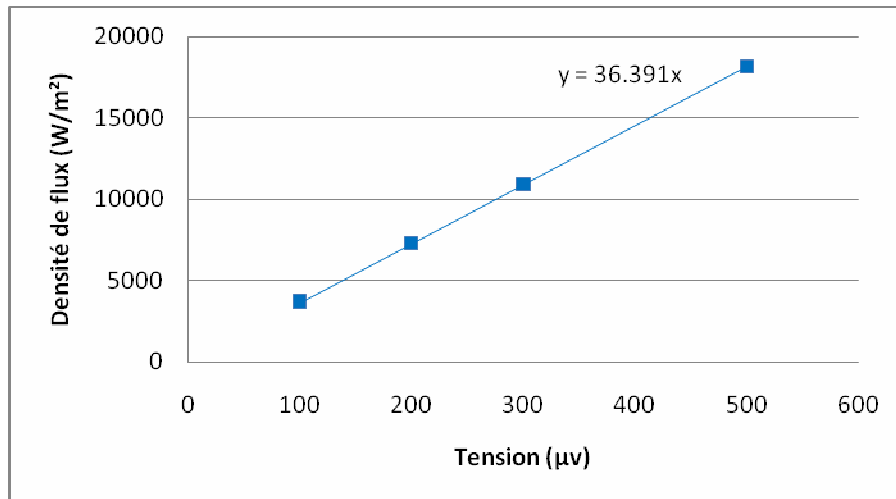


Figure A4- 2 : Caractéristique d'étalonnage des fluxmètres thermiques

	Fluxmètre 1		Fluxmètre 2	
	Surface A	Surface B	Surface A	Surface B
Sensibilité [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$]	36.39	36.27	37.71	37.38
Moyen	36.37		37.55	

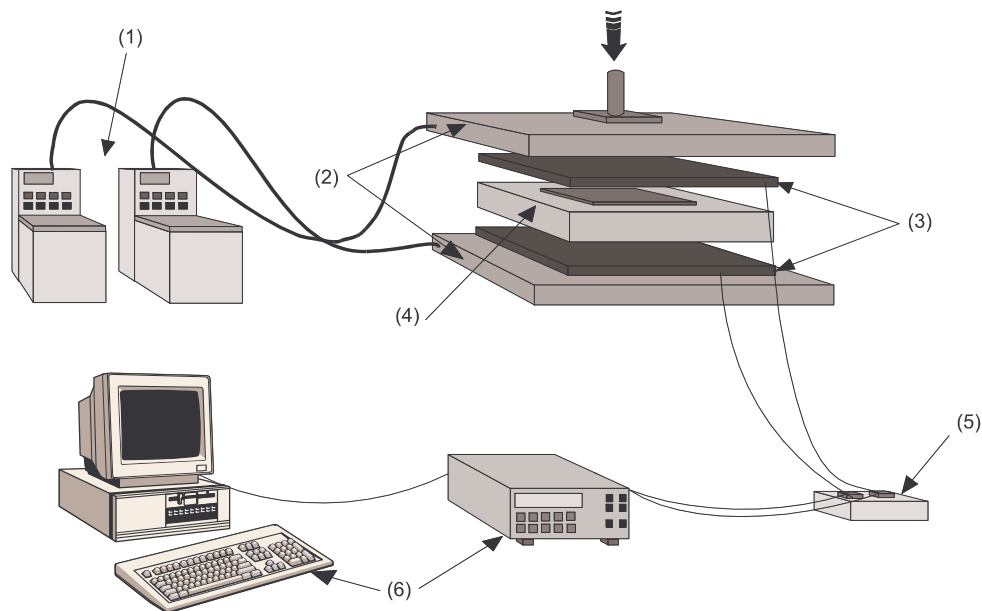
A4.3 Détermination des propriétés thermophysiques des matériaux

Afin de vérifier les valeurs de la diffusivité thermique obtenues à l'aide de la procédure d'identification, nous avons besoin de déterminer expérimentalement la diffusivité thermique du béton constitutif des poutres d'essai. Le laboratoire dispose de ce type de bancs de caractérisation des propriétés thermophysiques. Au cours d'un même essai, seront déterminées la conductivité thermique et la capacité thermique d'échantillons de tailles significatives prélevés sur les spécimens d'essai.

Ces méthodes ont été largement éprouvées dans notre laboratoire [ANTC] et bien que le LGCgE ne soit pas accrédité par un organisme certificateur, les mesures réalisées correspondent aux conditions stipulées dans la norme EN 1946/3, relative aux « Performances thermiques des produits et composants pour le bâtiment - Critères particuliers pour l'évaluation des laboratoires mesurant les propriétés de transmission thermique - Partie 3: Mesurages selon la méthode fluxmétrique ».

Ces caractérisations sont basées sur des mesures de flux thermiques et de températures réalisées sur les deux faces d'un échantillon soumis à des conditions limites contrôlées.

La figure A4-2 illustre le dispositif expérimental utilisé.



(1) Bains thermostatiques	(2) Plaques échangeuses
(3) Fluxmètres	(4) Echantillon et ceinture isolante
(5) Boîte de jonctions et référence de température	(6) Micro-ordinateur et multimètre

Figure A4- 3 : Dispositif expérimental de mesure des paramètres thermophysiques

Les fluxmètres ont une surface active de $15 \times 15 \text{ cm}^2$. Un anneau de garde amène les dimensions des fluxmètres à $25 \times 25 \text{ cm}^2$. La mesure de température est réalisée à l'aide de thermocouples de type « T » placés de part et d'autre de l'échantillon. Chaque thermocouple est relié à une masse thermique de température connue, pour accéder à la température des faces de l'échantillon.

Les sollicitations sont assurées par deux plaques échangeuses en aluminium qui sont reliées à des bains thermostatiques par l'intermédiaire de pompes. Le déplacement de la plaque supérieure est assuré par un vérin pneumatique, qui permet également de maintenir le système fluxmètres-échantillon sous pression, de manière à minimiser les résistances de contact.

Il est important de noter que les sollicitations thermiques imposées au système peuvent faire apparaître des transferts de masse au cours de la manipulation. Pour garantir la validité des résultats obtenus, il faut veiller à maintenir un écart à la fois raisonnable et suffisant pour obtenir des résultats corrects [ANTC]

A4.4 Détermination de la conductivité thermique

La conductivité thermique λ [W/(K.m)] caractérise l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur en régime permanent. Elle traduit la tendance d'un matériau à plus ou moins laisser « passer » la chaleur. Ce paramètre s'inscrit donc intuitivement dans la notion de transfert de chaleur au sein du milieu. La méthode consiste à soumettre un échantillon d'épaisseur « e » à un gradient de température, de manière à imposer un transfert de flux. La figure A4-3 schématise les grandeurs d'entrée et de sortie du système.

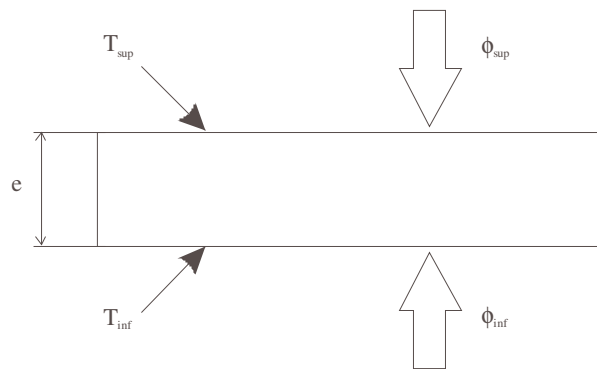


Figure A4- 4 : Système conductif unidirectionnel soumis à un gradient de température

La conductivité thermique d'un matériau est directement liée à la résistance thermique, qui traduit l'opposition qu'il présente au passage de la chaleur. La méthode consiste à imposer sur les deux faces du système des températures différentes T_1 et T_2 . Les flux et les températures sont relevés en entrée et en sortie. La connaissance de ces deux grandeurs permet de calculer la résistance thermique, et d'en déduire la conductivité thermique.

Pour un système unidirectionnel en régime permanent, la relation entre le flux et la différence de température peut être exprimé comme suit :

$$\varphi_1 = \frac{\Delta T}{R} \quad (\text{A4- 4})$$

$$\varphi_2 = \frac{\Delta T}{R} \quad (\text{A4- 5})$$

L'utilisation des grandeurs généralisées $\sum \varphi$ et ΔT permet de relier les flux sur les deux faces par la somme des expressions précédentes, telle que :

$$\sum \varphi = \frac{2}{R} \Delta T \quad (\text{A4- 6})$$

Où « R » représente la résistance thermique de l'échantillon

L'intérêt de l'utilisation des grandeurs généralisées réside dans la réduction de la durée de la mesure. En effet, si on observe la figure A4-4, on constate que la somme des flux a une constante de temps beaucoup plus faible que celle d'un flux élémentaire. $\sum \varphi$ est quasi stationnaire bien avant le régime permanent.

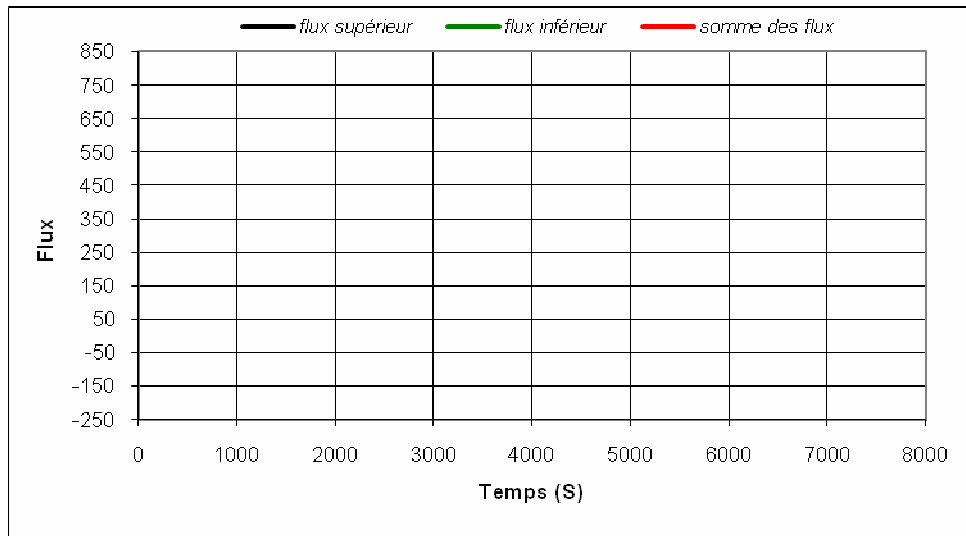


Figure A4- 5 : Exemple d'évolution des flux au cours de la détermination de la conductivité thermique

La conductivité thermique est déterminée dès lors que la somme des flux est stable.

$$R = \frac{2\Delta T}{\sum \varphi} \quad (\text{A4- 7})$$

$$\lambda = \frac{e}{R} \quad (\text{A4- 8})$$

Où « e » représente l'épaisseur de l'échantillon

A4.5 Résultats des échantillons prélevés sur la poutre

- **Le fluxmètre** : en ce qui concerne ce matériau, nous avons utilisé les caractéristiques thermiques d'un matériau homogène équivalent caractérisé par une résistance thermique de $6.10^{-3} \text{ K/(Watt/m}^2\text{)}$. La valeur de la conductivité thermique de ce matériau équivalent est prise égale à 0.083 W/m.K (équivalent à un fluxmètre et aux deux résistances de contact (3×2.10^{-3}) pour une épaisseur de $0,5 \text{ mm}$) [ANTC] [THER] .

A4.6 Détermination de la chaleur massique

La chaleur massique $c \text{ [J/(kg.K)]}$ traduit l'aptitude d'un matériau à emmagasiner de la chaleur. Elle mesure la quantité d'énergie nécessaire pour faire varier de 1°C la température d'un kilogramme de matériau.

La méthode consiste à effectuer une étude du bilan d'énergie entre deux états d'équilibre. Le dispositif de mesure est le même que celui précédemment décrit, seules les sollicitations thermiques changent [ANTC]

A partir d'un état initial (t_{initial}) stable, nous imposons une variation de température par changement de la consigne sur les deux bains thermostatés. La température va évoluer, ainsi que les flux sur chaque face, comme le montre la figure A4-5. Nous attendons le rétablissement du régime final (t_{final}), où le matériau a recouvré un nouvel état stable, associé à une nouvelle température d'équilibre.

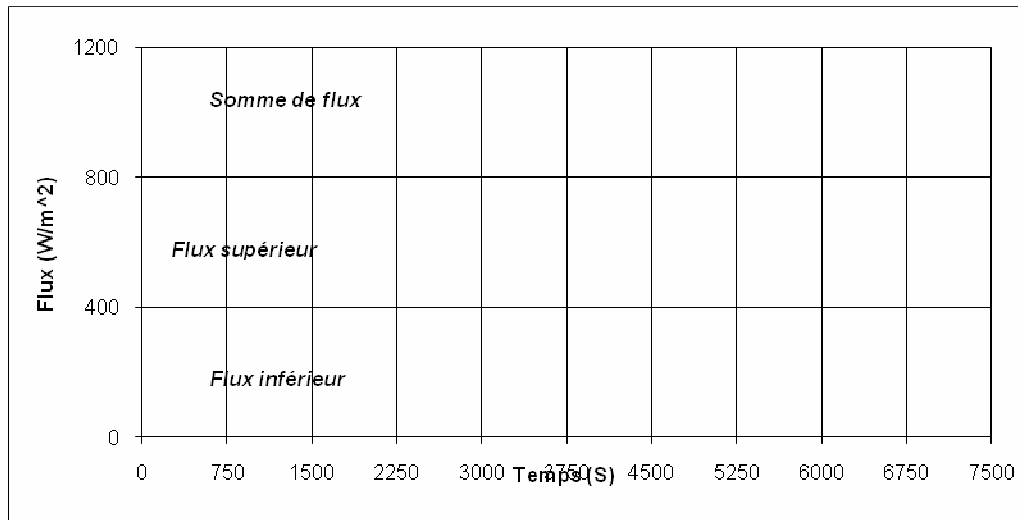


Figure A4- 6 : Exemple d'évolution des flux au cours de la détermination de la chaleur massique

Durant la phase de déséquilibre, l'échantillon stocke ou déstocke une énergie Q sous forme calorifique, selon que la température augmente ou diminue. Cette énergie est liée à la différence des flux selon la relation :

$$Q = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta \varphi \cdot dt \quad (A4- 9)$$

$$Q = C \cdot \Delta T \quad (A4- 10)$$

ΔT correspond aux variations de températures entre l'état initial et l'état final

Nous calculons alors la capacité thermique de l'échantillon :

$$C = \frac{\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta \varphi \cdot dt}{\Delta T} \quad (A4- 11)$$

Connaissant la masse volumique de l'échantillon ainsi que son épaisseur, on détermine la chaleur massique après avoir soustrait la capacité propre des capteurs:

$$c = \frac{C}{\rho \cdot S \cdot e} \quad (\text{A4- 12})$$

Où « ρ » désigne la masse volumique de l'échantillon, et « e » son épaisseur.

A4.7 Résultats des échantillons prélevés sur la poutre

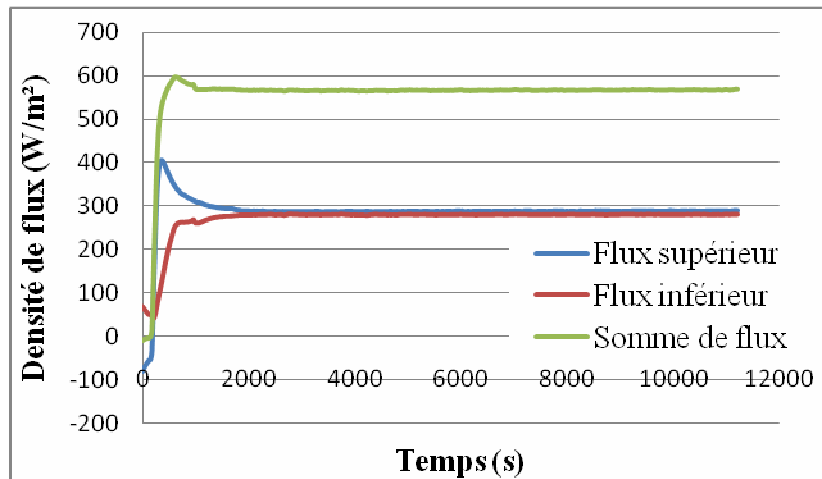


Figure A4- 7 : Evolution des flux au cours de la détermination de la conductivité thermique

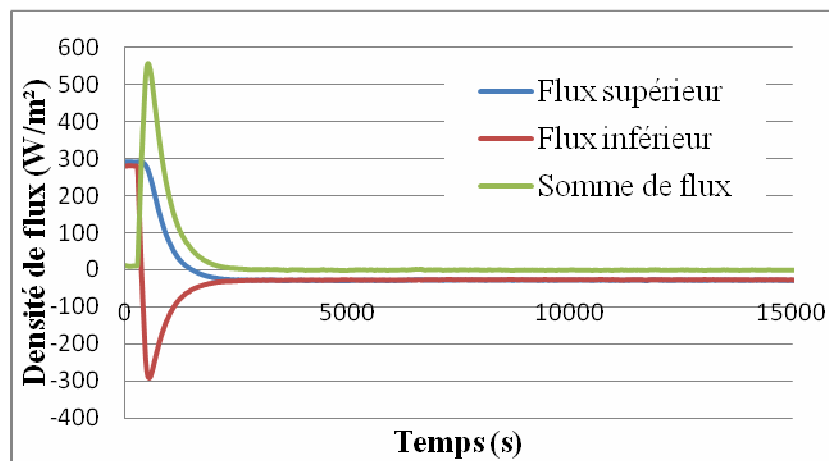


Figure A4- 8 : Evolution des flux au cours de la détermination de la chaleur massique

	Conductivité Thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Rho* c [J/Km ³]	Masse Volumique [Kg.m ⁻³]	Diffusivité thermique [m ² .s ⁻¹]
Echantillon	1.30	1.9910 ⁺⁶	2307.75	6.46*10 ⁻⁷

