



Laboratoire
Génie Civil
et géoEnvironnement
Lille Nord de France



UNIVERSITÉ D'ARTOIS

THESE

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'université

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur

Option : Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par

Sam Ang KEO

**DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE THERMOGRAPHIE
INFRAROUGE ACTIVE PAR EXCITATION MICRO-ONDES
APPLIQUEE AU CONTROLE NON DESTRUCTIF**

Soutenue le 09 décembre 2013 devant le jury composé de :

Rapporteurs :	Mme. Colette SIRIEIX M. Jean-Paul BALAYSSAC	Professeur, Université Bordeaux 1 Professeur, INSA Toulouse
Directeur de thèse :	M. Florin BREABAN	Professeur, Université d'Artois
Co-directeur:	M. Didier DEFER	Professeur, Université d'Artois
Examineurs :	M. Franck BRACHELET M. Pascal VANTOMME M. Jean-Luc BODNAR	Ingénieur, Université d'Artois Professeur, Université de Picardie Maître de Conférences, Université de Reims Champagne Ardenne



Université Lille Nord de France

REMERCIEMENT

Je soussigné **KEO Sam Ang**, Doctorant en Génie Civil, dans l'équipe d'Habitat du Laboratoire de Génie Civil et GéoEnvironnement (LGCgE) de l'Université Lille Nord de France- Université d'Artois, tiens à remercier chaleureusement, avec l'expression de mes sentiments respectueux, mes parents qui m'ont donné naissance, leurs soins, leurs aides et leurs réguliers et précieux conseils qui m'ont maintenant rendu fort, capable de vaincre tous les obstacles et de réaliser mon but dans la vie.

J'exprimerais profondément mes remerciements à **M. Florin BREABAN**, et **M. Didier DEFER**, Directeur et Co-directeur de ma thèse, qui m'ont bien encadré, m'ont encouragé et m'ont donné les explications à toutes mes curiosités sur mon sujet de thèse, me permettant d'en atteindre réussir les objectifs.

Je tiens à remercier infiniment **M. Franck BRACHELET**, qui m'a beaucoup aidé dans ces travaux de recherche. Il a été précieux pour la réalisation des essais expérimentaux sans oublier pour l'approvisionnement en matériaux et des matériels nécessaires. Je le remercie également pour tous les supports documentaires essentiels qu'il m'a transmis.

Je tiens à remercier infiniment **Mme. Colette SIRIEIX**, Professeur à l'Université Bordeaux 1 et **M. Jean-Paul BALAYSSAC**, Professeur à l'INSA de Toulouse qui ont accepté de rapporter sur mon travail de thèse et pour le temps qu'ils ont dû y consacrer.

Je ne saurais oublier d'exprimer ma gratitude à **M. Pascal VANTOMME** de l'Université de Picardie et **M. Jean-Luc BODNAR** de l'Université de Reims Champagne-Ardennes qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer au jury de la soutenance de ma thèse.

J'exprimerais aussi mes remerciements à **M. William PRINCE**, Professeur à l'INSA de Rennes, pour m'avoir toujours donné des conseils, des encouragements depuis mes études d'ingénieur à l'Institut de Technologie du Cambodge, et mes études de Master Recherche 2 à l'INSA de Rennes. Il m'a surtout donné les connaissances de base en auscultation des ouvrages, ce qui a suscité mon intérêt pour les techniques de contrôle non destructif.

J'adresse également un merci spécial à **M. Eric WIRQUIN**, **Thierry CHARTIER**, et **Pascal MOUVEAUX** pour m'avoir aidé dans la préparation des échantillons de mur en béton et béton armé.

Je tiens à remercier particulièrement le Conseil Régional Nord-Pas-Calais et l'Université d'Artois qui grâce à leur financement m'ont permis de mener cette thèse jusqu'à son terme au sein du LGCgE.

J'exprimerais aussi toute ma gratitude au Centre d'Application de Laser Flandres Artois (CALFA) de l'IUT Béthune qui m'a permis d'utiliser le système Laser CO₂ pour mes essais et aussi pour la place qui m'a été laissée pour faire mes essais de thermographie infrarouge avec le système de micro-ondes.

Enfin, je tiens à remercier sincèrement tous les amis pour m'avoir assisté en donnant de bonnes idées, des encouragements indispensables et pour leur générosité.

RESUME

Dans le domaine du Génie Civil, de nombreuses méthodes d'auscultation sont développées. Elles visent à aider à l'évaluation de l'état des ouvrages d'art en donnant des informations sur la structure interne ou sur l'état des matériaux. Les techniques basées sur la thermographie infrarouge sont prometteuses, elles présentent l'intérêt d'être à grand rendement et de se traduire par l'observation d'images (thermogrammes) qui semblent plus accessibles. La thèse consiste au développement d'une méthode de thermographie infrarouge active en basant sur un système d'excitation micro-ondes conçu et réalisé pour cette étude.

La source micro-ondes a été réalisée sur la base d'un magnétron commercial de 800 W à 2.45 GHz associé à une antenne cornet pyramidal pour guider les ondes vers des éléments à chauffer. Par rapport aux sources utilisées classiquement en thermographie infrarouge active, les ondes électromagnétiques de type micro-ondes se propagent dans le volume d'un élément en béton. Les ondes subissent des réflexions et des effets de diffraction lorsque impactent des parties métalliques. Des phénomènes d'interférence peuvent apparaître en surface et par effet radiothermique générer des gradients de température observables par thermographie infrarouge. Ces effets se produisent de façon instantanée. En prenant en compte de toutes les consignes de sécurité, des essais avec ce nouveau système d'excitation ont été effectués dans une enceinte de protection haute fréquence. Cette nouvelle méthode a été appliquée à la détection de défauts (absence de colle) dans le cas d'un renforcement composite (CFRP), d'une pièce métallique derrière une plaque de bois d'un centimètre d'épaisseur, et plus particulièrement des armatures verticales dans un mur en béton armé.

Mots clés : Thermographie infrarouge, Micro-ondes, Interférences, Radiothermie, Béton armé, Renforcements métalliques.

ABSTRACT

In the field of Civil Engineering, many inspection methods have been developed. They are intended to evaluate the condition of structures by providing information about the internal structure or status of the materials. Techniques based on infrared thermography are promising as they have the advantage of giving high performances and results by the thermograms observation that seems more accessible. The objective of the thesis is to develop a new active infrared thermography method based on a microwave excitation system designed and built for this study.

The microwave source was set up based on a commercial magnetron 800 W at 2.45 GHz associated to a pyramidal horn antenna for guiding microwave radiation to the heated elements. Compared to other sources traditionally used in active infrared thermography, the microwaves can propagate into the volume of a concrete element. The waves undergo the reflection and the diffraction effects while they impact any metal parts. The interference phenomena can appear on the surface and generate, by the radiothermal effect, the temperature gradients observed by infrared thermography. These effects occur instantaneously. Considering all the safety, the tests with the new excitation system were carried out in a high-frequency protection cell. This new method has been applied to the defect detection (adhesive absence) in the case of a composite reinforcement (CFRP), a metal element behind a wooden plate of one centimeter of thickness, and more particularly the vertical reinforcement bars in a reinforced concrete wall.

Keywords: Infrared thermography, Microwave, Interference, Radiothermie, Reinforced Concrete, steel reinforcements.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT	-2-
RESUME	-4-
ABSTRACT	-5-
TABLE DES MATIERES	-6-
Liste des figures	-9-
Liste des tableaux	-14-
INTRODUCTION GENERALE	-15-
CHAPITRE 1 : GENERALITES	-19-
I. INTRODUCTION.....	- 19 -
II. GENERALITES SUR CONTROLE NON DESTRUCTIF EN GENIE CIVIL...-	19 -
III. AUSCULTATION PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE.....	- 20 -
III.1. Définition.....	- 20 -
III.2. Principe.....	- 21 -
III.3. Loi de Planck.....	- 22 -
III.4. Types de la thermographie infrarouge.....	- 23 -
IV. Auscultation par Thermographie passive.....	- 23 -
V. Auscultation par Thermographie active.....	- 24 -
V.1. Principe.....	- 24 -
V.2. Techniques de stimulation.....	- 26 -
V.2.1. Flash.....	- 27 -
V.2.2. Halogène.....	- 27 -
V.2.3. Laser.....	- 28 -
V.2.3.3. Laser à dioxyde de carbone.....	- 30

V. 3. Méthodes de traitement	- 33 -
V. 3.1. Acquisition de données.....	- 33 -
V. 3.2. Traitement par Thermographie Pulsée (PT).....	- 33 -
V.3.2.1. Principe.....	- 33 -
V.3.2.2. Exemple d'application d'essais avec Laser CO2.....	- 34 -
V.3.3. Traitement par la thermographie à modulation synchrone (Lock –in).....	- 38 -
V.3.3.1. Principe.....	- 38 -
V.3.3.2. Exemple d'application d'essais de lock-in avec des lampes halogène.....	- 42 -
V.3.4. Traitement par thermographie à phase pulsée (PPT)	- 44 -
V.3.4.1. Principe.....	- 44 -
VI. MICRO-ONDES.....	- 48 -
VI.1. Définition.....	- 48 -
VI. 2. Générateur de micro-ondes (Magnétron).....	- 50 -
VI.3. Guide d'onde rectangulaire.....	- 52 -
V.3.1. Atténuation dans les guides d'onde rectangulaire.....	- 54 -
V.3.2. Adaptation d'impédance.....	- 55 -
VI.4. Application de la thermographie infrarouge stimulée par microondes (EMIR) ...	- 57 -
VII. CONCLUSION.....	- 58 -
REFERENCES DU CHAPITRE 1.....	- 59 -
CHAPITRE 2 :...SYSTEME D'EXCITATION MICRO-ONDES.....	-63-
I. INTRODUCTION.....	- 63 -
II. REALISATION DU SYSTEME.....	- 63 -
II.1. Générateur.....	- 63 -
II.2. Antenne cornet.....	- 64 -
III. CARACTERISATION DU GENERATEUR.....	- 67 -
III. 1. Signaux émis.....	- 67 -

III. 2. Directivité de l'antenne (Diagramme de rayonnement).....	- 70 -
IV. PROTECTION CONTRE LE RAYONNEMENT DE MICRO-ONDES.....	- 72 -
IV. 1. Risques liés à l'utilisation de la source.....	- 72 -
IV. 2. Grillage métallique.....	- 72 -
IV. 3. Mise en place de la clôture de protection.....	- 74 -
IV. 4. Vérification de l'efficacité de la protection.....	- 76 -
V. CONCLUSION.....	- 77 -
REFERENCES DU CHAPITRE 2.....	- 77 -
CHAPITRE 3 : APPLICATION DU SYSTEME DE SOLLICITATION PAR MICRO-ONDES A L'AUCULTATION D'ELEMENT EN BETON RENFORCES	- 79-
I. INTRODUCTION.....	-79 -
II. RENFORCEMENTS COMPOSITES.....	- 79 -
III. RENFORCEMENTS METALLIQUES.....	- 85 -
III.1. Mise en évidence du comportement d'un insert métallique.....	- 85 -
III.1.1. Cas d'un anneau métallique.....	- 85 -
III.1.2. Cas d'une barre métallique.....	- 90 -
III.2. Détection d'un réseau d'armatures dans un élément en béton.....	- 97 -
III.2.1. Détails sur la conception des murs.....	- 97 -
III.2.2. Dispositif expérimental.....	- 98 -
III.2.3. Premières observations.....	- 99 -
III.2.4. Phénomènes d'interférence.....	- 105 -
III.2.5. Effet de l'angle d'incidence de l'onde de sollicitation.....	- 109 -
III.2.6. Effet des espacements des armatures.....	- 115 -
IV. CONCLUSION.....	- 120 -
REFERENCES DU CHAPITRE 3.....	- 121 -
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	-124-
ANNEXE : PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES.....	-127-

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 :.....GENERALITES.....-19-

Figure 1- 1 : Les spectres des ondes électromagnétiques.....- 20 -

Figure 1- 2 : Schéma de principe d'auscultation par thermographie infrarouge.....- 21 -

Figure 1- 3 : Radiation d'un corps noir.....- 22 -

Figure 1- 4 : Exemple d'une auscultation par thermographie infrarouge passive.....- 24 -

Figure 1- 5 : Exemple illustrant les étapes d'une Evaluation par Thermographie active
.....- 25 -

Figure 1- 6 : Configuration expérimentale en thermographie active en réflexion et
transmission : (1) Source, (2) Echantillon, (3) Caméra infrarouge, (4) Ordinateur pour
données.....- 26 -

Figure 1- 7 : Deux lampes flash pour la thermographie infrarouge pulsée.....- 27 -

Figure 1- 8 : Dispositif de Lock-in conventionnel pilotant 2 lampes halogène.....- 27 -

Figure 1- 9 : Phénomènes d'interaction des photons avec deux niveaux d'énergie
électroniques d'un atome [31].....- 28 -

Figure 1- 10 : Système d'excitation à laser CO₂.....- 31 -

Figure 1- 11 : Dispositif de déviation du faisceau Laser.....- 31 -

Figure 1- 12 : Schéma optique du dispositif de déviation du faisceau laser vers
l'échantillon.....- 32 -

Figure 1- 13 : Schéma du dispositif expérimental des essais avec laser CO₂.....- 35 -

Figure 1- 14 : Détails des zones d'essais. (a) Acquisitions et commande du tir laser. (b)
Echantillon. (c) Détecteur (Caméra infrarouge).....- 35 -

Figure 1- 15 : Thermogrammes de l'échantillon CFRP des essais par Laser CO₂ à
l'instant 41 s.....- 36 -

Figure 1- 16 : Contraste temporel entre la zone de défaut et la zone sans défaut.....- 37 -

Figure 1- 17 : Principe de mesure par thermographie infrarouge de modulation
synchrone (lock-in).....- 38 -

Figure 1- 18 : Onde sinusoïdale et ses propriétés [16].....- 38 -

Figure 1- 19 : Principe de la méthode des 4 points dans la thermographie synchrone
.....- 40 -

Figure 1- 20 : Evolution des phases en fonction de la fréquence.....- 43 -

Figure 1- 21 : Evolution du contraste de phase en fonction de la fréquence.....	- 43 -
Figure 1- 22 : Images de phase en fonction de fréquence. (a) à 0.005 Hz. (b) à 0.5 Hz. (c) à 0.02 Hz.....	- 44 -
Figure 1- 23 : Principe d'analyse des thermogrammes par PPT.....	- 45 -
Figure 1- 24 : Evolution des températures de l'échantillon CFRP avec défaut dans la phase de refroidissement.....	- 45 -
Figure 1- 25 : Contraste de phase dans le domaine fréquentiel.....	- 46 -
Figure 1- 26 : Images de phase par FFT. (a) à 0.00586 Hz. (b) à 0.5 Hz. (c) à 0.03516 Hz.....	- 47 -
Figure 1- 27 : Les spectres des rayonnements électromagnétiques	- 49 -
Figure 1- 28 : Utilisation des magnétrons.....	- 50 -
Figure 1- 29 : Trajectoires électroniques dans un magnétron- coupe schématique du magnétron.....	- 51 -
Figure 1- 30 : Propagation des ondes en guide rectangulaire.....	- 52 -
Figure 1- 31 : Lignes de courant sur les faces d'un guide d'ondes rectangulaire et coupe transversale du champ électrique E.....	- 53 -
Figure 1- 32 : Etude de la distribution d'intensité du champ électromagnétique par la méthode EMIR : schéma de principe.....	- 57-
Figure 1- 33 : Méthode EMIR avec ses deux variantes : méthode directe (à gauche), et méthode du film sensible (à droite).....	- 58-
CHAPITRE 2 :...SYSTEME D'EXCITATION MICRO-ONDES.....	-63-
Figure 2- 1 : Four à micro-onde commercial et magnétron utilisés. (a) modèle du four utilisé. (b) ensemble du générateur. (c) magnétron.....	- 63 -
Figure 2- 2 : Propagation des ondes électromagnétiques.....	- 64 -
Figure 2- 3 : Antenne cornet pyramidal.....	- 65 -
Figure 2- 4 : Assemblage d'antenne et générateur de micro-ondes	- 66 -
Figure 2- 5 : Différents zones caractéristiques d'une antenne [5, 8].....	- 66 -
Figure 2- 6 : Détecteurs des micro-ondes.....	- 68 -
Figure 2- 7 : Signal de commande micro-onde (a) à 360W, (b) à 600W.....	- 68 -
Figure 2- 8 : Puissance crête et puissance moyenne	- 69 -
Figure 2- 9 : Campagne des mesures pour déterminer le diagramme de rayonnement...	- 71 -

Figure 2- 10 : Diagramme de rayonnement (lobes principaux).....	- 71 -
Figure 2- 11 : Grille de protection contre le rayonnement hyperfréquence	- 72 -
Figure 2- 12 : Courbe d'efficacité de la grille de protection en fonction de la fréquence appliquée.....	- 74 -
Figure 2- 13 : Montage de la clôture de protection.....	- 75 -
Figure 2- 14 : Schéma de zone d'essais effectués l'enceinte de protection	- 76 -
Figure 2- 15 : Détecteur à affichage numérique des micro-ondes.....	- 76 -

CHAPITRE 3 : APPLICATION DU SYSTEME DE SOLLICITATION PAR MICRO-ONDES A L'AUCULTATION D'ELEMENT EN BETON RENFORCES

.....	-79-
Figure 3- 1: Détails de l'échantillon CFRP.....	- 80 -
Figure 3- 2: Dispositif d'essai de thermographie infrarouge avec excitation micro-ondes sur l'échantillon CFRP.....	- 80 -
Figure 3- 3: Schéma du principe d'analyse des thermogrammes par algorithme de contraste.....	- 81 -
Figure 3- 4: Thermogrammes des essais sur CFRP à l'instant initial.....	- 82 -
Figure 3- 5: Contrastes temporels des thermogrammes d'échantillons CFRP.....	- 83 -
Figure 3- 6: Thermogrammes des échantillons CFRP à l'instant 100 s.....	- 83 -
Figure 3- 7: Evolution des températures de surface des échantillons CFRP.....	- 84 -
Figure 3- 8: Pièce métallique positionnée à l'arrière d'un panneau de bois.....	- 85 -
Figure 3- 9: Dispositif des essais de thermographie infrarouge sur échantillons en bois..	- 86 -
.....	- 86 -
Figure 3- 10: Thermogrammes des essais sur l'échantillon de bois à l'instant initial...	- 86 -
.....	- 86 -
Figure 3- 11: Contrastes temporels des thermogrammes d'échantillons de bois.....	- 87 -
Figure 3- 12: Thermogrammes des échantillons bois à l'instant 170 s.....	- 87 -
Figure 3- 13: Evolution des températures de surface des plaques de bois.....	- 88 -
Figure 3- 14 : Evolution du contraste des thermogrammes à quatre instants.....	- 90 -
Figure 3- 15 : Dispositif de l'essai sur une barre métallique contre le mur en béton.-	- 91 -
Figure 3- 16 : Thermogramme dans le cas de l'incidence normale de source.....	- 92 -
Figure 3- 17: Relations géométriques dans le cas du décalage à gauche sur le thermogramme.....	- 93 -

Figure 3- 18: Relations géométriques dans le cas de décalage à droite sur le thermogramme.....	- 94 -
Figure 3- 19: Essais avec une barre fixe et en changeant l'incidence de l'antenne ...	- 94 -
Figure 3- 20: Thermogrammes des essais avec la barre et en changeant l'incidence de l'antenne.....	- 95 -
Figure 3- 21: Evolution de « d » et de « Δ » en fonction de direction de l'antenne...	- 95 -
Figure 3- 22: Essais en décalant la barre et en gardant la direction normale de l'antenne	- 96 -
Figure 3- 23: Thermogrammes des essais à direction normale de l'antenne et décaler la barre.....	- 96 -
Figure 3- 24: Schémas des échantillons, (a) Mur en béton, (b) Mur en béton armé...	- 98 -
Figure 3- 25: Dispositif expérimental, (a) Essai sur mur en béton, (b) Essai sur mur en béton armé.....	- 99 -
Figure 3- 26: Thermogrammes et contrastes des murs à l'instant initial.....	- 100 -
Figure 3- 27: Thermogrammes des essais sur les échantillons de murs à l'instant 250 s	- 100 -
Figure 3- 28: Profil horizontal sur le contraste à 250 s par rapport à l'instant initial	- 101 -
Figure 3- 29: Contraste temporel entre la zone du béton et la zone de l'armature .-	- 102 -
Figure 3- 30: Evolution des températures des points dans la zone inter-armature et la zone au droit de l'armature.....	- 102 -
Figure 3- 31: Effet de la teneur en eau sur la constante diélectrique du béton [29] ..-	-103 -
Figure 3- 32: Constante diélectrique mesurée du béton en fonction de la fréquence [30]	- 104 -
Figure 3- 33: Conductivité électrique du béton [30]	- 105 -
Figure 3- 34: Diffraction d'une onde plane par une ouverture ou un obstacle.....	- 106 -
Figure 3- 35: Loi de Snell-Descartes de la réfraction.....	- 107 -
Figure 3- 36: Longueur d'onde du béton en fonction de la fréquence et d'humidité dans le béton [30].....	- 108 -
Figure 3- 37: Essais par méthode de réflexion sur le mur en béton armé avec l'enrobage de 1.5 cm.....	- 109 -
Figure 3- 38: Thermogrammes des essais par réflexion sur le mur dans le cas de 1.5 cm d'enrobage.....	- 110 -

Figure 3- 39: Essais par méthode de transmission sur le mur en béton armé avec 1.5 cm d'enrobage.....	- 111 -
Figure 3- 40: Thermogrammes des essais par transmission sur le mur avec 1.5 cm d'enrobage.....	- 112 -
Figure 3- 41: Essais par méthode en réflexion sur le mur en béton armé avec l'enrobage de 3.8 cm.....	- 113 -
Figure 3- 42: Thermogrammes des essais en réflexion sur le mur dans le cas de 3.8 cm d'enrobage.....	- 113 -
Figure 3- 43: Essais par méthode en transmission sur le mur en béton armé avec 3.8 cm d'enrobage.....	- 114 -
Figure 3- 44: Thermogrammes des essais en transmission sur le mur avec 3.8 cm d'enrobage.....	- 114 -
Figure 3- 45: Angle de Brewster dans le béton [30]	- 115 -
Figure 3- 46: Essais sur l'échantillon 3 couches par méthode de transmission.....	- 116 -
Figure 3- 47: Essais sur échantillon 3 couches par méthode de réflexion.....	- 116 -
Figure 3- 48: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 5$ cm par transmission.....	- 117 -
Figure 3- 49: Thermogrammes essais sur 3 couches dans le cas $e = 5$ cm par réflexion	- 117 -
Figure 3- 50: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 10$ cm par transmission.....	- 118 -
Figure 3- 51: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 10$ cm par réflexion.....	- 119 -
Figure 3- 52: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 20$ cm par transmission.....	- 119 -
Figure 3- 53: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 20$ cm par réflexion.....	- 120 -

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 :.....GENERALITES.....	-19-
Tableau 1- 1 : Synthèse des différents contrastes [9].....	- 34 -
Tableau 1- 2 : Phases obtenues après 9 essais de lock-in.....	- 42 -
Tableau 1- 3 : Domaines fréquentiels usuels	- 49 -
CHAPITRE 2 :...SYSTEME D'EXCITATION MICRO-ONDES.....	-63-
Tableau 2- 1 : Caractéristiques de la grille.....	- 73 -
Tableau 2- 2 : Correspondance dB - % d'efficacité.....	- 73 -

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine du Génie Civil, l'étude et le développement de méthodes et de techniques d'auscultation constituent un champ disciplinaire de grande activité. Ces méthodes visent à aider à l'évaluation de l'état des ouvrages d'art en donnant des informations sur la structure interne ou sur l'état des matériaux. Les besoins dans ce domaine sont réels et très importants. Bon nombre d'ouvrages arrivent à des stades où des questions de maintenances, de réparation, voire de destruction se posent avec des enjeux économiques et de sécurité énormes. Tous les outils permettant de contribuer de près ou de loin à la prise de décision peuvent potentiellement intéresser les gestionnaires. La mesure de champ de température par thermographie infrarouge fait partie des techniques qui ont fait l'objet du développement de méthodes d'auscultation en génie civil. Elles présentent l'intérêt d'être à grand rendement et d'aboutir à l'observation d'images (thermogrammes) qui semblent plus accessibles.

Le contrôle non destructif par thermographie infrarouge est depuis longtemps employé dans le domaine de la mécanique. Des applications au contrôle des assemblages mécaniques ou à l'étude de matériaux composites sont depuis longtemps mises en oeuvre et bien maîtrisées. Les méthodes qui ont été développées sont basées sur l'analyse de la réponse en température d'une surface d'une structure en corrélation avec une sollicitation thermique contrôlée. De nombreuses techniques de traitement des signaux ont été utilisées pour permettre d'extraire l'information des thermogrammes. Les méthodes de thermographie synchronisée (lock-in thermography) ont donné des résultats probants. D'autres méthodes basées sur l'étude de réponses impulsionnelles dans le domaine temporel ou fréquentiel ont également fait l'objet de nombreux travaux.

Avec l'apparition sur le marché de matériels de mesure plus robustes, beaucoup plus souples d'utilisation et utilisables à l'extérieur, les chercheurs essaient de transposer au génie civil certaines des méthodes de thermographie existantes. Le passage à cet autre champ d'applications se fait avec de nouvelles contraintes. Elles sont d'une part liées à la taille des structures à ausculter, les distances auxquelles doivent s'effectuer les observations, les possibilités de positionnement de l'équipement sur site. La nature des matériaux rencontrés induit également des difficultés. Les matériaux sont souvent hétérogènes de par leur nature. Les bétons, enrobés etc. sont des associations de matériaux ayant leurs propres propriétés. Ils sont de plus évolutifs, soumis à des altérations mécaniques, chimiques, aux sollicitations microclimatiques, à des variations de teneur en eau. Les états de surface sont imparfaits et hétérogènes ce qui peut conduire à des erreurs d'interprétation. De plus, une auscultation par thermographie n'est possible que si l'objet de l'étude est soumis à des transferts thermiques. Pour les ouvrages de génie civil, les conditions limites du système sont impossibles à maîtriser. In situ, la majorité des méthodes opérationnelles sont des techniques passives qui exploitent la réponse aux sollicitations naturelles (ensoleillement, cycle jour/nuit,...). Le

caractère aléatoire des sollicitations est un autre aspect qui complique la mise en œuvre. En outre, l'état des grandeurs thermiques à un instant dépend de l'historique des sollicitations sur une période antérieure à la mesure qui peut s'étendre sur plusieurs heures, jours voire semaines.

L'alternative consiste à introduire des sollicitations artificielles déterministes qui vont provoquer les transferts de chaleur. On parle alors de thermographie infrarouge active. Des auteurs ont montré que la thermographie active peut être utilisée pour identifier des défauts structurels ou des zones humides dans les matériaux de construction de façon beaucoup plus fiable que la thermographie quasi-statique. Une analyse quantitative d'un processus de refroidissement complet peut permettre d'identifier de manière précise les défauts à différentes profondeurs. Au sein de notre Laboratoire, une méthode d'auscultation des câbles de précontraintes et des renforcements métalliques des éléments en béton par thermographie active a été développée. Elle est basée sur une excitation thermique des armatures par induction électromagnétique. La diffusion de la chaleur entraîne alors une modification du champ de température de surface qui est traitée dans le domaine fréquentiel pour limiter l'effet de la non uniformité spatiale du chauffage et des variations d'émissivité en surface. Comme pour les autres méthodes actives, on observe en surface l'effet de la diffusion de la chaleur dans le volume sur le champ de température.

Pour obtenir des informations sur des propriétés thermophysiques ou géométriques sur des parties immergées dans l'élément observé, on essaie d'interpréter les gradients de températures de surface ou les éléments sur la dynamique de variation. Cette démarche permet surtout de mettre en évidence la présence de vides, de délaminages, l'existence de modifications des propriétés thermiques des matériaux dus par exemple à l'influence de la teneur en eau. Des problématiques importantes dans le domaine du génie civil sont reliées à l'état et au comportement des renforcements métalliques. Dans le cas d'une excitation par induction, ils peuvent être impliqués dans le processus de dissipation de la chaleur mais ils n'interviennent quasiment pas dans le phénomène de diffusion. Dans la majorité des cas des ouvrages de génie civil, la position des inclusions métalliques et leur géométrie n'affectent pas le transfert de chaleur par conduction de façon suffisamment forte pour qu'un effet soit décelable en surface.

L'effet radiothermique désigne l'élévation de température associée à l'absorption d'énergie d'un flux de rayonnement électromagnétique en régime non stationnaire (modulé ou pulsé). Lorsqu'un échantillon est irradié par un rayonnement électromagnétique d'intensité déterminée, une partie est réfléchi, une partie est transmise (si l'échantillon est électromagnétiquement transparent) et le reste est absorbé.

En général, après une interaction radiation électromagnétique / matériau d'absorption, il existe quatre mécanismes de désexcitation possibles : par émission radiative (luminescence), par effet radioélectrique, par réactions chimiques (processus photochimique), et par excitation phononique (production de chaleur). Parmi ces quatre mécanismes, le dernier est le plus efficace car une bonne partie de l'énergie absorbée est pratiquement dissipée sous forme de chaleur (échauffement de l'échantillon). Ce dernier mécanisme est connu sous le nom d'effet radiothermique.

L'effet radiothermique est généralement produit à l'aide des faisceaux de radiation électromagnétique dans le domaine spectral de radiofréquence, microondes, infrarouge (IR), ou visible (l'effet photothermique), en utilisant de générateurs de microondes et lasers. En tant que technique, elle peut être appliquée à toutes sortes d'échantillons opaques ou semi-transparents.

Le sujet de thèse consiste à développer une nouvelle méthode de thermographie active basée sur une excitation de type *micro-ondes*. Elle consiste à forcer un matériau, en le soumettant à un rayonnement transitoire électromagnétique à émettre par rayonnement thermique des informations non accessibles par thermographie infrarouge active basée sur la conduction.

Un nouveau système d'excitation micro-ondes (une source de microondes) est réalisé avec un magnétron de fréquence d'émission de 2.45 GHz et de puissance de 800W, commandé en impulsions. L'antenne assure la caractéristique de directivité du faisceau d'irradiation.

La propagation du faisceau de microondes dans le matériau crée des effets radiothermiques en évolution dynamique. L'image thermographique assure la révélation en surface du champ dynamique de températures. L'enregistrement de la réponse réalisé avec une caméra thermographique assure le diagnostic.

Dans ce travail, une application de renforcement avec **des matériaux composites (CFRP)** permet de comparer les différentes approches. L'étude de paroi de béton renforcée par des armatures métalliques permet de mettre en évidence l'intérêt du chauffage par micro-ondes.

La thèse est divisée en 3 chapitres :

Le premier chapitre présente des études bibliographiques sur des méthodes de contrôle non destructif en génie civil, il est surtout consacré à la thermographie infrarouge active et le développement de cette technique qui dépend particulièrement du types de sollicitation et des méthodes de traitement associées. Des expérimentations ont été menées dans ce travail pour illustrer ces méthodes et les algorithmes de traitement. Une des illustrations concerne la détection des défauts dans une situation de renforcement par composites grâce à une méthode de thermographie infrarouge active par chauffage surfacique avec un faisceau laser CO₂ couplé à un dispositif optique. Il est à noter que cette source originale a été développée dans le cadre de cette thèse. Ce chapitre conduira vers le développement d'une nouvelle méthode avec une excitation par rayonnement micro-ondes en montrant les notions importantes de propagation des micro-ondes et le rôle du guide d'onde associé à ce nouveau système d'excitation.

Dans le deuxième chapitre de thèse, le nouveau système d'excitation micro-ondes est présenté. Il a été intégralement conçu et réalisé dans le cadre de cette thèse. Des études sur le fonctionnement et la caractérisation du système sont ensuite présentés.

A la fin de ce chapitre, le système de protection hyperfréquence est dimensionné et réalisé pour permettre une utilisation sécurisée de ce nouveau système de sollicitation.

Le dernier chapitre de cette thèse va présenter les premières applications de TIR active couplée au nouveau système de sollicitation par micro-ondes. L'auscultation d'un élément de béton renforcé par une couche de composite est détaillée. Cette nouvelle méthode sera ensuite appliquée pour ausculter des systèmes comportant des inclusions métalliques. Elle aboutit à l'étude d'un béton comportant un réseau d'armatures. Les phénomènes engendrés pendant ces essais seront expliqués en détail à partir d'une grande série de tests.

CHAPITRE 1

GENERALITES

I. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la présentation de généralités sur les techniques de contrôle non destructif appliquées en génie civil. La majeure partie traite des approches actives de thermographie infrarouge. Après un rappel théorique sur le rayonnement infrarouge, les principales sources d'excitation sont présentées. Des applications réalisées spécialement dans le cadre de ce travail en ayant recours à deux techniques de chauffage sont proposées. Il s'agit, d'une part, dans une approche classique, d'utiliser des lampes de type halogène et d'autre part, de façon originale, de coupler un dispositif optique à un faisceau laser pour créer une source surfacique.

Des essais réalisés sur un élément de béton renforcé avec un plat composite en chauffant la surface avec l'une ou l'autre des sources permettent d'introduire de façon comparative les différentes méthodes de traitement adaptées, proposées dans la littérature.

La dernière partie de ce chapitre s'attache à introduire les éléments théoriques et techniques utiles au développement d'un système de sollicitation de micro-ondes qui vise à étendre les champs d'application des méthodes thermographie infrarouge actives. Elle montre en détail le fonctionnement du générateur de micro-ondes et le rôle du guide d'onde qui est un élément essentiel associé au générateur pour réaliser un système d'excitation pour la thermographie infrarouge.

II. GENERALITES SUR CONTROLE NON DESTRUCTIF EN GENIE CIVIL

Les contrôles non destructifs (CND) regroupent l'ensemble des procédés permettant de contrôler et d'évaluer l'état des matériaux. Il s'agit essentiellement de déceler la présence non désirée de discontinuités telles qu'un manque de matière, des fissures ou des décohésions [1]. Dans le domaine du Génie Civil, les CND servent à tester ou à repérer un élément de construction (armature, fondation, étanchéité, couche de roulement...) afin d'évaluer son aptitude au bon fonctionnement, sans altérer son état de service [2-3]. De nombreuses publications sur l'état de l'art des différentes méthodes d'évaluation non destructives des ouvrages de Génie Civil en béton armé (BA) et en béton précontraint (BP) ont déjà été réalisées et sont axées principalement sur les méthodes d'imagerie des structures en béton et sur leurs efficacités in situ [4-8]. Les principales techniques employées sont basées sur les ondes mécaniques (ultrasons, impact écho, écoute passive) et les ondes électromagnétiques (rayons Gamma, rayons X,

infrarouge, micro-ondes, radar) [9-10]. Parmi ces méthodes de CND, certaines méthodes sont en contact avec les éléments détectés alors que certaines sont sans contact. Le caractère global et sans contact de la thermographie infrarouge est un des atouts de la technique pour les approches en Génie Civil [11-13].

III. AUSCULTATION PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

III.1. Définition

Le spectre de la lumière infrarouge (IR) est très large (présenté dans la figure ci-dessous), environ 2500 fois plus grand que le spectre des couleurs visibles par l'homme, soit du *violet* au *rouge*. De ce fait, le spectre d'ondes est divisé en 3 parties. Le premier domaine est situé entre le rayon 759 nm et 3000 nm (3 μm), il est appelé « *Infrarouge proche* ». Le suivant, appelé « *Infrarouge moyen* », se situe de 3 μm à 5 μm . Enfin, le troisième domaine s'étale jusqu'à 1000 μm (1mm), et est nommé « *Infrarouge lointain* » [9, 14-15].

Les spectres des ondes électromagnétiques sont présentés dans Figure 1- 1 ci-dessous.

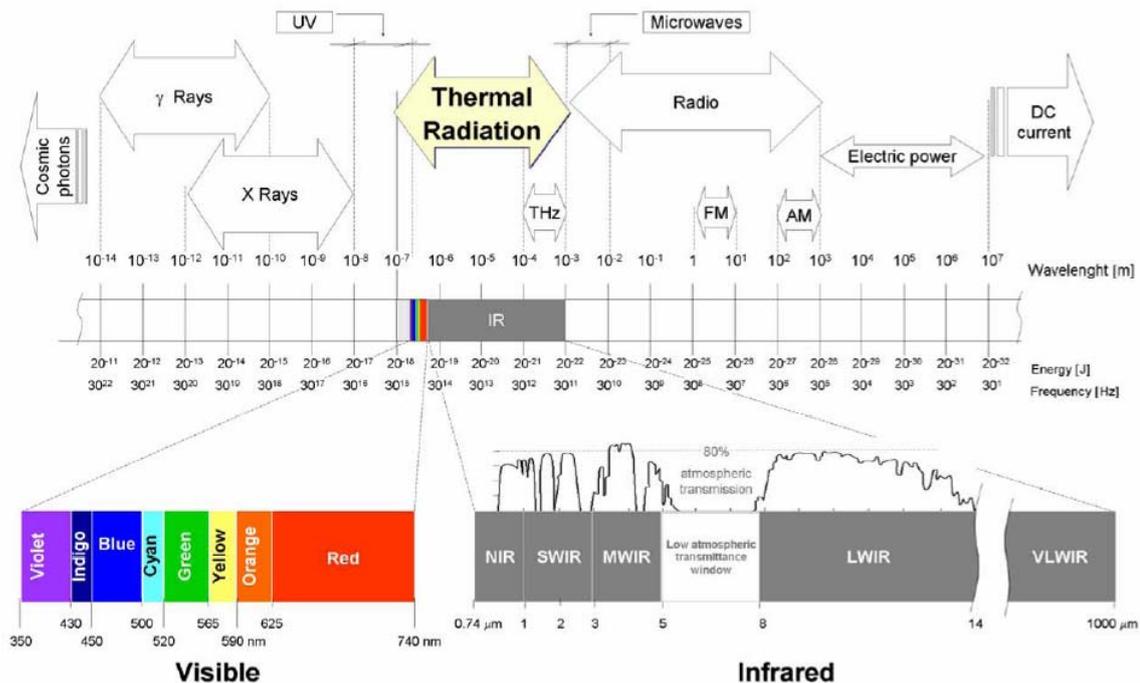


Figure 1- 1 : Les spectres des ondes électromagnétiques [14, 16]

Sur le schéma: **NIR** signifie Near-InfraRed, **SWIR** Short-Wavelength InfraRed, **MWIR** Mid-Wavelength InfraRed, **LWIR** Long-Wavelength InfraRed et **VLWIR** Very Long-Wavelength InfraRed).

La **thermographie infrarouge** est une technique de mesure *de température* basée sur le transfert de chaleur par rayonnements thermiques [9]. C'est une technique d'Evaluation Non Destructive qui se base sur la mesure de différence de température à la surface des matériaux et des structures pour détecter la présence de *problèmes*, de *défauts* ou plus généralement de *variations de propriétés de conduction thermique* sous la surface. Ces différences de température peuvent également provenir d'un excès de courant dans un circuit électrique, de frictions non-contrôlées dans une machine tournante ou de la présence d'humidité dans un isolant [15].

III.2. Principe

Le principe d'auscultation par thermographie infrarouge est généralement présenté dans le Figure 1- 2 ci-dessous [9]. La caméra infrarouge transcrit les *rayonnements infrarouges* émis par la surface d'un sujet en température et de visualiser la scène thermique visée sous forme de thermogramme. L'instrumentation est composée de *détecteurs* qui captent généralement le rayonnement dans les fenêtres. Dans ces fenêtres, l'énergie globale des rayonnements est transcrite en température à l'aide d'une équation radiométrique fonction des paramètres de la scène thermique qui permet de traduire sous forme mathématique le *bilan radiatif*. A partir de cette équation, le système de la caméra détermine la température par *calibrage* en chaque point de la surface de l'objet étudié.

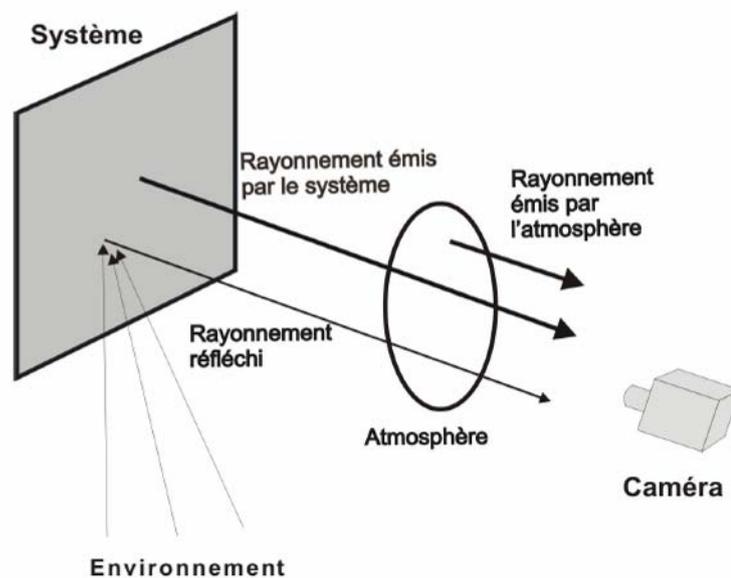


Figure 1- 2 : Schéma de principe d'auscultation par thermographie infrarouge

[9]

III.3. Loi de Planck

La loi de Planck [9, 17-18] nous permet de calculer l'émission spectrale théorique d'un corps noir parfait :

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad [1]$$

c : la vitesse de la lumière dans le vide ($2.998 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

k : la constante de Boltzman ($1.381 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

h : la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$)

T : la température (Kelvin)

λ : longueur d'onde (m)

La Figure 1- 3 ci-dessous présente l'émission spectrale d'un corps noir suivant la longueur d'onde à une température donnée [9, 14, 18-20]. Le spectre **visible** est représenté en **jaune**.

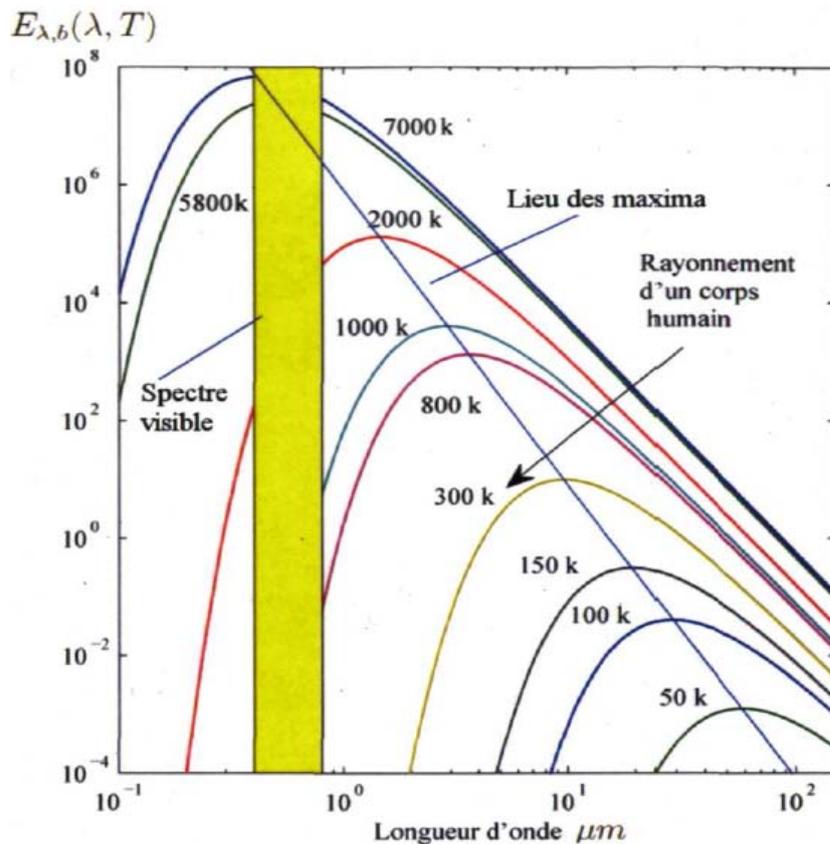


Figure 1- 3 : Radiation d'un corps noir

« **CORPS NOIR** » : c'est le nom donné à tout matériau qui aurait des caractéristiques parfaites dans le domaine des radiations infrarouges. Un tel « corps noir » répondrait aux critères suivants :

- Un corps noir *absorbe tous les rayons incidents* indifféremment de la direction d'émission et de la longueur d'onde
- Aucune surface *ne peut émettre plus d'énergie* qu'un corps noir, pour une température et une longueur d'onde données
- La radiation émise par un corps noir (définie comme émetteur diffus) est fonction de la longueur d'ondes et est *indépendante de la direction*
- *Emissivité* d'un corps noir est définie comme $\varepsilon = 1$.

$$\boxed{\text{Émissivité} = \frac{\text{Radiation réelle}}{\text{Radiation du corp noir idéal}}} \quad [2]$$

III.4. Types de la thermographie infrarouge

Les approches dans le domaine de l'auscultation par thermographie infrarouge sont classées en **deux catégories**. On distingue la thermographie infrarouge *active* et la thermographie *passive* [1, 9, 14-15]. Dans les deux cas, l'inspection consiste à détecter la présence d'un gradient de température qui révèle la présence d'un défaut ou d'un mauvais fonctionnement, gradient qui peut-être provoqué soit par une hausse ou une baisse de température [9, 21-23].

IV. Auscultation par Thermographie passive

Par définition, la thermographie passive n'utilise pas de stimulation supplémentaire extérieure, l'objet ou le défaut à détecter provoquant un gradient thermique naturellement [9]. Elle consiste à réaliser une simple étude mettant en évidence des gradients des températures apparentes de surface de l'objet dans *l'environnement naturel* de ce dernier. L'écart entre la température de l'environnement et le milieu étudié doit être suffisant pour qu'un contraste thermique puisse être visualisé sur les images thermiques [1, 14]. Un exemple de détection de défauts par la thermographie infrarouge passive est donné dans la figure ci-dessous.

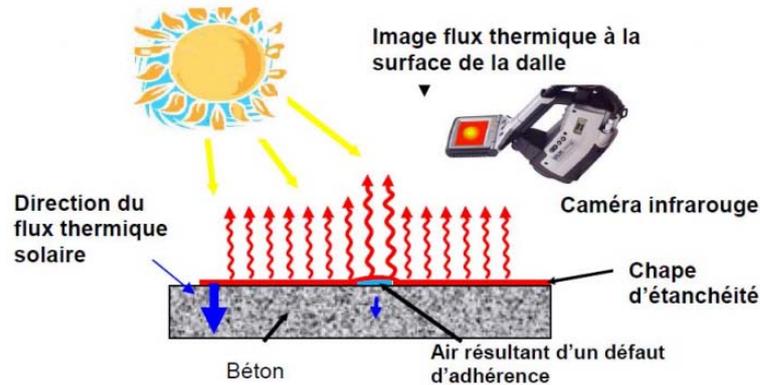


Figure 1- 4 : Exemple d'une auscultation par thermographie infrarouge passive

[24]

La Figure 1- 4 montre le principe d'une détection d'un défaut d'adhérence (présence d'air) d'une chape d'étanchéité sur une dalle en béton par la méthode de thermographie passive. La couche d'air créée par le décollement introduit une résistance thermique qui réduit le transfert de chaleur par conduction entre la chape d'étanchéité et le substrat. Le flux de rayonnement solaire qui est absorbé par la surface de façon quasi-uniforme provoque en surface un contraste de température entre la zone saine et celle avec le défaut sur les thermogrammes.

Les applications basées sur la thermographie infrarouge passive sont nombreuses en génie civil. Elles sont séduisantes car elles sont globales, sans contact, très faciles à mettre en œuvre. Toutefois, elles aboutissent rarement à des résultats quantifiables mais plus souvent à la mise en évidence « d'anomalies », de contrastes dont l'origine est difficilement accessible sans hypothèses fortes. Le couplage avec d'autres techniques est souvent recherché. L'impossibilité de contrôler les conditions limites, l'influence de l'historique des échanges thermiques sur le champ de température à un instant de mesure, le caractère aléatoire des sollicitations ou plus simplement l'absence de sollicitations ne permettent pas de profiter pleinement du potentiel de ces approches. Ces difficultés expliquent que des sources de chaleur artificielles, parfaitement contrôlées soient mises en œuvre pour générer des sollicitations déterministes et provoquer des gradients de température exploitables à la surface des éléments auscultés. On parle alors de Thermographie Infrarouge Active.

V. Auscultation par Thermographie active

V.1. Principe

En thermographie active, le processus de détection nécessite l'apport d'une *stimulation thermique extérieure* afin de provoquer l'apparition d'un gradient de température [9, 14, 25].

Depuis plusieurs années, des recherches sont entreprises afin de développer des techniques de stimulation thermique actives. A la suite de ces recherches, deux techniques principales ont été développées : la *thermographie pulsée* (Maldague, 1993) et la *thermographie modulée* (Busse, 1992). Une nouvelle technique de pré- traitement a été aussi mise au point : cette méthode se nomme la *thermographie de phase pulsée* (TPP, Maldague, 1996) [9, 15].

On peut diviser une expérimentation de thermographie infrarouge en *trois étapes* distinctes (Figure 1- 5 ci-dessous). Les techniques de thermographie infrarouge diffèrent selon l'une ou l'autre de ces étapes. Ces trois étapes sont [9, 15]:

- 1/. L'*excitation thermique* du spécimen (seulement si nécessaire en TI active).
- 2/. L'*acquisition* du rayonnement thermique dans les bandes infrarouges du spectre électromagnétique (l'acquisition temporelle de la réponse thermique).
- 3/. L'*analyse* des données thermiques (l'analyse numérique de la réponse).

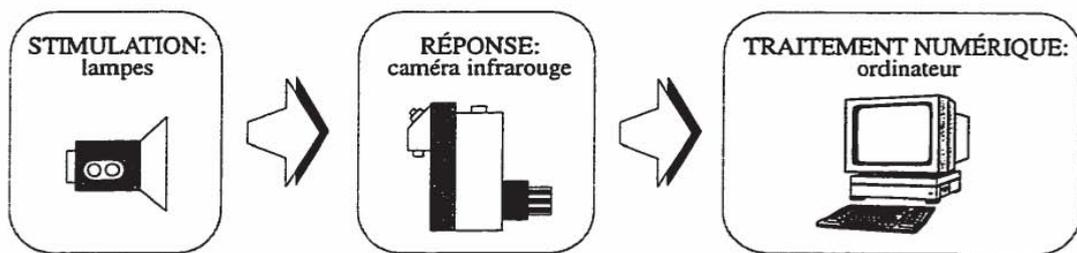


Figure 1- 5 : Exemple illustrant les étapes d'une Evaluation par Thermographie active [9]

Les avantages de l'évaluation par thermographie active sont généralement : *contrôle* de l'excitation, *absence de contact*, mise en œuvre *sécuritaire*, versatilité d'applications et dans certains cas outils uniques. La thermographie infrarouge active connaît cependant certaines lacunes, dont la difficulté d'obtenir un dépôt d'énergie uniforme et bref sur une grande surface, les effets perturbateurs reliés aux *pertes convectives* et *radiatives*, le coût encore relativement élevé de l'instrumentation et les variations d'émissivité des surfaces inspectées [9, 26]. Comme c'est une diffusion de chaleur qui est observée, les constantes de temps importantes des phénomènes conduisent à des temps d'essai importants qui augmentent rapidement avec les épaisseurs de matériau traversées par la chaleur.

Dans la thermographie infrarouge active, Il y a **deux** approches (Figure 1- 6) :

- En *transmission*, la caméra et la source d'excitation sont situées de part et d'autre d'un spécimen

- En *réflexion*, la caméra et la source d'excitation sont situées d'un même côté du spécimen [1, 9, 14].

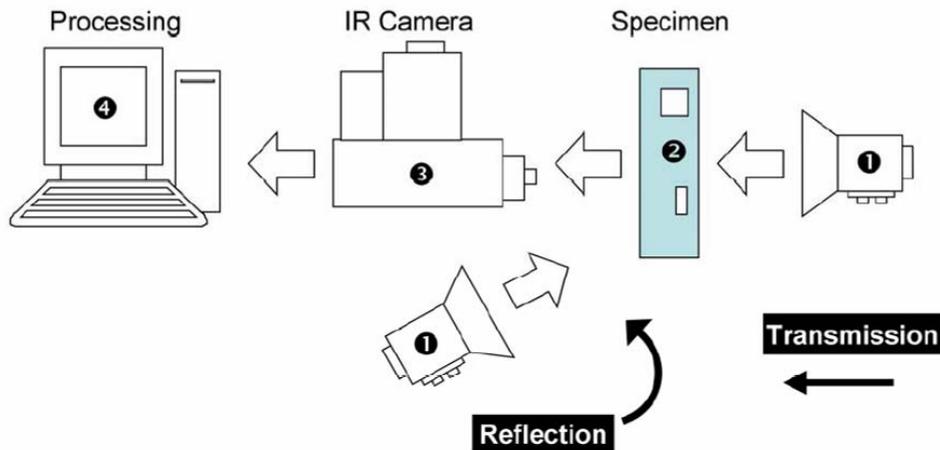


Figure 1- 6 : Configuration expérimentale en thermographie active en réflexion et transmission : (1) Source, (2) Echantillon, (3) Caméra infrarouge, (4) Ordinateur pour données

[14, 16]

V.2. Techniques de stimulation

En thermographie active, la stimulation thermique peut prendre des formes diverses, selon les contraintes d'utilisation. On peut penser au contact direct avec un *liquide chaud*, la projection d'un *gaz chauffé*, ou encore l'utilisation de lampes, ce qui sont par rayonnement. Plusieurs types de configurations de stimulations sont possibles [9]:

- *Stimulation ponctuelle* : avoir une bonne *uniformité*, mais plutôt *lente* à cause de la nécessité de recourir à un balayage pour couvrir l'ensemble d'une surface afin d'obtenir une image (ex : Laser, arc au plasma)
- *Stimulation par ligne* : possède une bonne *rapidité* et également une *uniformité* de chauffage à cause du déplacement latéral nécessaire pour couvrir une surface (ex : lampe infrarouge filiforme, jet d'air)
- *Stimulation de surface* : *grande rapidité* grâce au chauffage de l'ensemble de la surface, chauffage est cependant *difficile de réaliser uniformément* (ex : lampe incandescente, flash)

V.2.1. Flash



Figure 1- 7 : Deux lampes flash pour la thermographie infrarouge pulsée

Il s'agit d'une technique très répandue et éprouvée en thermographie active. Elle est caractérisée par sa rapidité et sa facilité de mise en œuvre. Lors d'un test de la TP, la surface de l'échantillon à inspecter est stimulée à l'aide d'une impulsion thermique qui génère à la surface un gradient, idéalement uniforme. Il se propagera par diffusion sous la surface inspectée, provoquant le régime thermique transitoire nécessaire à l'inspection. Selon l'épaisseur et la diffusivité du spécimen à inspecter, la stimulation peut durer de **quelques microsecondes à plusieurs secondes**.

V.2.2. Halogène

Les échantillons peuvent être chauffés avec des lampes halogène. Il s'agit de lampes à incandescence qui produisent un rayonnement qui se répartit entre le **visible** et **l'infrarouge**. Leur emploi est très pratique mais la difficulté principale réside dans la non-uniformité du rayonnement illuminant une surface.

Deux lampes halogène de 500 W utilisées comme moyen d'excitation pour un essai de thermographie infrarouge active sont présentées dans Figure 1- 8. Un système Lock-In peut être utilisé pour synchroniser les signaux des lampes à la caméra infrarouge.

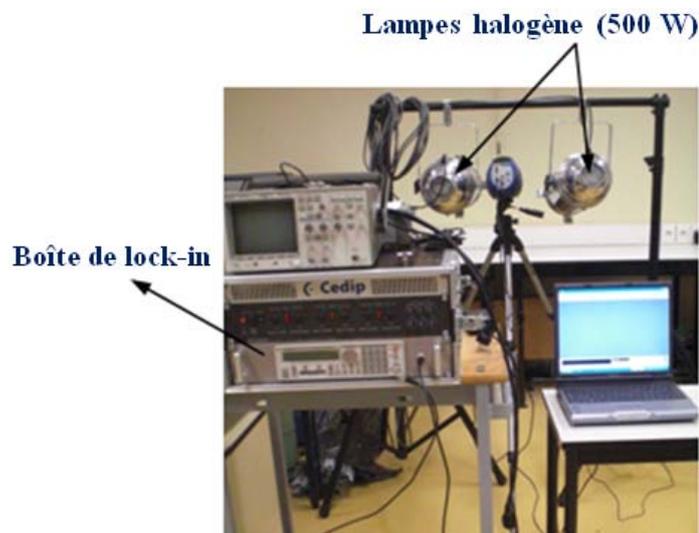


Figure 1- 8 : Dispositif de Lock-in conventionnel pilotant 2 lampes halogène

La synchronisation des signaux avec la caméra infrarouge permet en particulier d'éliminer une grande partie du bruit sur les signaux bruts des lampes lors des essais.

V.2.3. Laser

Le faisceau laser est couramment utilisé comme source d'excitation en thermographie infrarouge. Il est surtout choisi pour la détection de défauts très petits qui sont peu ou non accessibles par autres excitations. Il est également pertinent pour certains types de défauts comme les fissures à la surface des matériaux pour étudier leurs dimensions ainsi que leurs profondeurs [27-30].

Alors que le laser est souvent utilisé pour des chauffages ponctuels ou plus rarement linéiques grâce à un mécanisme de balayage, une extension à un chauffage surfacique basé sur le couplage avec un dispositif optique a été imaginée dans le cadre de cette thèse. Celui-ci est décrit dans la partie suivant après une brève présentation du fonctionnement d'un laser.

V.2.3.1. Définition- Histoire

L'effet **laser** (**Light amplification by stimulated emission of radiation**) a été mis en évidence vers 1960. Il résulte de transitions énergétiques entre niveaux électroniques ou vibrationnelles à l'échelle atomique dans des milieux de grande qualité optique et d'une direction de propagation privilégiée par réflexion multiple sur un jeu de deux miroirs qui définissent une cavité. Le milieu de la cavité est capable de générer des photons et de les amplifier dans l'axe du laser grâce à l'émission stimulée. Si on considère des atomes, deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 sont mis en jeu pour l'effet laser, avec des populations respectives n_1 et n_2 [31].

L'absorption excite les atomes de E_1 vers E_2 , la plupart du temps à l'aide d'une source de photons, dite pompe, d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$.

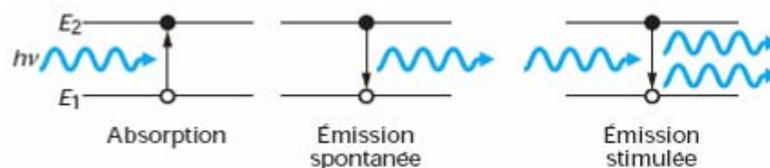


Figure I- 9 : Phénomènes d'interaction des photons avec deux niveaux d'énergie électroniques d'un atome [31]

L'émission spontanée d'un photon d'énergie correspondante se produit un certain temps après l'absorption, avec une direction et des caractéristiques aléatoires. C'est un phénomène naturel de retour l'état fondamental de plus basse énergie qui se produit dans de nombreuses sources lumineuses. **L'émission stimulée (Einstein, 1917)** est provoquée par la collision d'un photon incident de bonne énergie $h\nu = E_2 - E_1$ avec

un état excité. Elle produit un deuxième photon émis dans la direction du photon stimulant avec une polarisation et une phase identique. En utilisant la réflexion sur les miroirs de la cavité, l'émission dans l'axe des miroirs peut être ainsi amplifiée selon toutefois les conditions cinétiques d'inversion de population. **L'inversion de population**, $n_2 > n_1$, est indispensable pour obtenir l'effet laser. Elle doit être réalisée par l'action de l'absorption provoquée par la source de pompage. On montre aisément que si N_0 photons entrent dans le milieu amplificateur, la quantité de photons dans la direction de propagation s'écrit : $N(z) = N_0 \cdot e^{(n_2 - n_1) b_{21} z}$.

L'amplification est obtenue si N s'accroît avec z , c'est-à-dire si $n_2 - n_1 > 0$. Après traversée du milieu, l'intensité devient : $I = I_0 \cdot \exp(\alpha l)$. Une méthode simple, pour coupler vers l'extérieur de la cavité une fraction de l'énergie située à l'intérieur, est de placer un miroir partiellement transparent à une des extrémités de cette cavité. Si ce miroir de sortie a un facteur de réflexion R et des pertes négligeables, la fraction $(1 - R)$ de l'énergie sort de la cavité. L'intensité du faisceau lorsqu'il revient au point de départ est : $I = R I_0 \cdot \exp(2 \alpha l)$ [32].

V.2.3.2. Types de Laser

Les lasers sont classés par les différents types de source de stimulation. Cette classification est présentée dans le tableau ci-dessous [31] avec différentes utilisations pour chaque type.

Tableau 1- 1 : Classification de différents lasers

Nom, Longueur d'onde, Énergie, Pulse, Fréquence, Utilisation
Laser à gaz
HeNe, 632 nm, ≈ 100 mW, continu, mesure
Ar ⁺ , 448 nm, ≈ 100 mW, continu, très diverses
CO ₂ , 10,6 μm, kW, continu et pulsé μs, usinage
Excimere KrF, 248 nm, ≈ 100 W, 25 ns, kHz, ablation
Laser à solide
Rubis, 694 nm, 100 mJ/pls, 10 ns, diverses
Nd/YAG, 1,06 μm, 1 à 100 J/pls, 1 à 1 000 Hz, très diverses
Saphir-dopé au titane, 800 nm, μJ/pls, fs, kHz, ablation
Laser à semi-conducteur
AsGa, 904 nm, mW, continu et pulsé, kHz, très diverses
Laser à colorant
Rhodamine, 400 à 800 nm, μJ/pls, pulsé, mesure
Laser femtoseconde (5 à 500 fs)
TiSa (Ti :Al ₂ O ₃), 800 nm, nJ/pls, kHz à MHz, très diverses
Yb :KGd(WO ₄) ₂ , 1 030 nm, 100 μJ/pls, kHz à MHz, diverses
pls : impulsion

V.2.3.3. Laser à dioxyde de carbone

Le laser moléculaire CO₂ est probablement la *source cohérente IR* la plus développée industriellement et ses applications sont des plus variées. Ce milieu actif présente un fort coefficient de gain et permet d'obtenir de fortes puissances crêtes, en régime déclenché, ou développe une importante énergie laser en régime de fonctionnement continu ou quasi continu. Une autre particularité spécifique des lasers moléculaires qui utilisent des milieux gazeux fait que l'échauffement du milieu, siège de l'excitation, peut être maintenu à une valeur raisonnable en utilisant une circulation de gaz. Par ailleurs, ce type de laser présente un **rendement d'excitation élevé** [32].

Le développement des lasers moléculaires a bénéficié de travaux réalisés dans les années 60 par Polany qui a montré qu'il était possible d'obtenir une inversion de population entre niveaux vibrationnellement excités de molécules. C'est en **1964** que C.K.N Patel obtenait un fonctionnement en continu à partir d'un laser à dioxyde de carbone et décrivait le mécanisme d'excitation et d'émission radiative et non radiative. La mise en évidence de l'obtention d'une meilleure inversion de population en employant de l'azote vibrationnellement excité a considérablement contribué au développement de cette source laser. Des puissances crêtes voisines du kilowatt étaient rapidement obtenues en régime impulsif ouvrant la voie à la réalisation de sources de plus en plus puissantes.

Généralement, les lasers à gaz moléculaires reposent sur l'emploi d'une grande variété de modes d'excitation. On peut citer [32]:

- l'excitation **électrique** (décharge de type plasma que l'on doit contrôler afin d'éviter la création d'un arc, en particulier en travaillant à haute pression)
- l'excitation **optique**
- le pompage **chimique** (réaction chimique).

Le système laser présenté dans Figure 1- 10 ci-dessous est celui utilisé dans nos travaux de recherche. L'excitation laser est générée par un système laser CO₂ utilisé pour des découpes. Normalement, pour des découpes, ce système a besoin d'une tête de focalisation (comme présentée dans la figure) pour converger le faisceau laser (pour que sa puissance soit concentrée uniquement dans un diamètre de 0.2 mm). Pour nos essais de thermographie infrarouge, on n'a pas besoin de ce dispositif. Ce type de laser est un laser infrarouge, ayant une longueur d'onde de 10.6 μm.

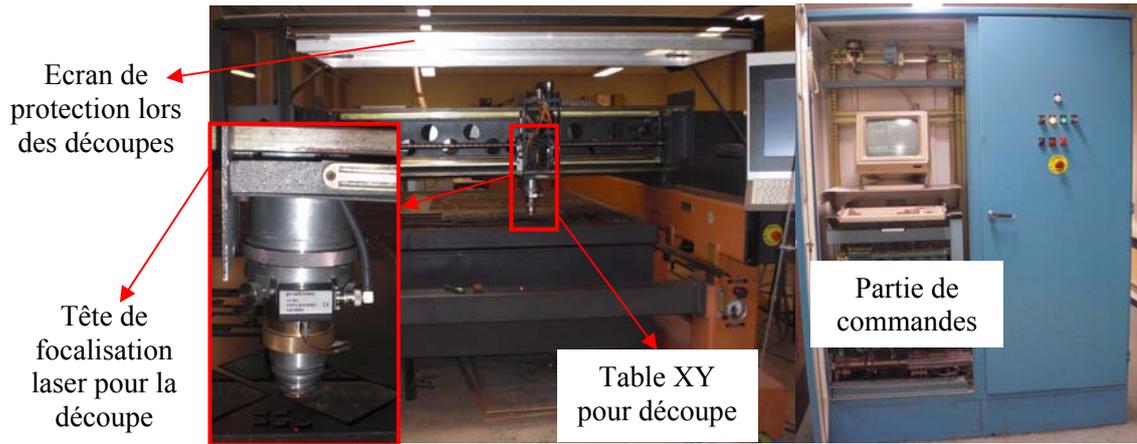


Figure 1- 10 : Système d'excitation à laser CO2

Dispositif de déviation du faisceau Laser

La direction du faisceau Laser, traversant une lentille avant d'arriver à la tête pour le découpe, peut être modifiée par un dispositif de déviation comme présenté dans Figure 1- 11. Le principe de la déviation du faisceau laser vers l'échantillon est représenté dans Figure 1- 12.

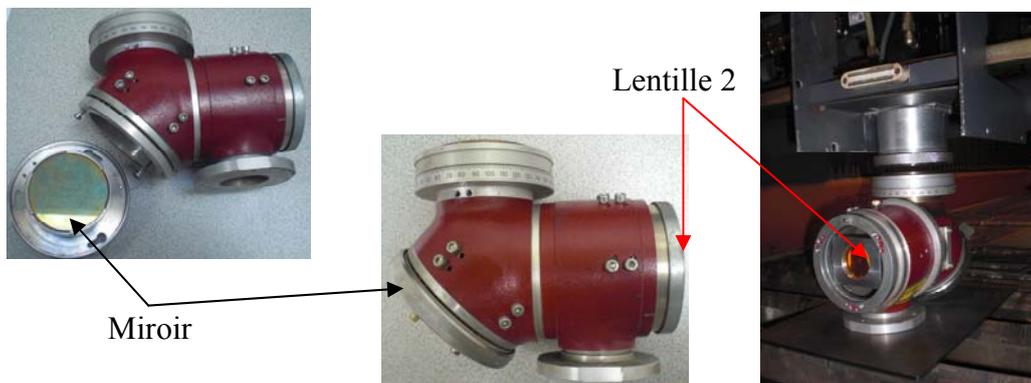


Figure 1- 11 : Dispositif de déviation du faisceau Laser

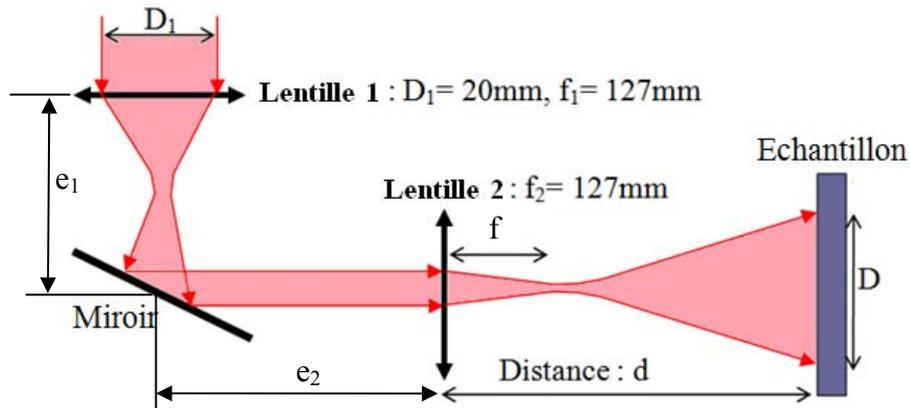


Figure 1- 12 : Schéma optique du dispositif de déviation du faisceau laser vers l'échantillon

Le faisceau laser traverse la lentille 1 et arrive à un miroir situé dans le dispositif de déviation. Par réflexion sur ce miroir, le faisceau change sa direction et continue son trajectoire jusqu'à la lentille 2. En traversant la lentille 2, le faisceau sort du dispositif et se dirige vers l'échantillon. Le rôle de la lentille 2 est d'augmenter le diamètre du faisceau en jouant sur la distance « d ». Ceci permet de chauffer les échantillons sur une grande surface ajustable. La caractéristique unidirectionnelle du faisceau laser permet de chauffer les échantillons dans une position précise. D'après la Figure 1- 12, le diamètre de la zone de chauffage « D » peut être déterminée par les équations :

$$f = (f_1 \cdot f_2 / f_1 + f_2 - e) \quad [3]$$

$$D = d \cdot (D_1 / f) = 0.155 \cdot d \quad [4]$$

Or, la distance « d » pour placer l'échantillon à partir de la lentille 2 peut être obtenue, en utilisant la relation (4), en fonction du diamètre désiré de l'échantillon chauffé ($d = 6.45 \cdot D$). Nous observons que plus les échantillons sont placés loin de la lentille 2, plus la surface de la zone chauffée est grande.

Une autre remarque est que la distance « d » est toujours beaucoup plus grande que le diamètre du faisceau sur l'échantillon « D » (environ 6 fois).

V. 3. Méthodes de traitement

V. 3.1. Acquisition de données

Pour une discrétisation satisfaisante d'un signal électrique, le théorème de Nyquist-Shannon (Harry NYQUIST, 1928 et Claude E. SHANNON, 1949) donne la limite basse de fréquence d'échantillonnage. Le théorème est présenté à l'équation ci-dessous. Pour que le contenu spectral (l'information) du **signal** ne soit pas **perturbé par l'échantillonnage**, la fréquence d'échantillonnage (f_s) doit être supérieure au double de la bande passante (B).

$$f_s > 2 \times B \quad [5]$$

f_s : la fréquence d'échantillonnage (Hz)

B : la bande passante du signal ; $B = f_{\max} - f_{\min}$ (Hz)

f : la fréquence du signal (Hz)

La fréquence d'acquisition de la caméra est directement définie par rapport au signal de la source. Pour certains traitements, cette fréquence est *augmentée* pour *améliorer la qualité des résultats*.

V. 3.2. Traitement par Thermographie Pulsée (PT)

V.3.2.1. Principe

A partir de la série de thermogrammes, l'analyse sur la décroissance temporelle des températures peut conduire à l'apparition de zones suspectes pouvant présenter des défauts internes. Cette méthode est basée sur l'utilisation de différents algorithmes de contraste thermique, améliorée pour augmenter la visibilité d'un défaut, la qualité des thermogrammes, et d'en extraire des informations qualitatives (position, géométrie du défaut). Différents algorithmes de contrastes thermiques sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1- 1 : Synthèse des différents contrastes [9]

	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

T_{def} : température de surface d'une zone de défaut

T_s : température de surface d'une zone saine

t_m : instant où la température est maximale,

t_0 : instant de début de la stimulation.

L'avantage de cette méthode de thermographie pulsée réside principalement dans sa rapidité d'analyse.

V.3.2.2. Exemple d'application d'essais avec Laser CO₂

Cette méthode de traitement par algorithme de contraste a été appliquée avec des essais associés au système de laser CO₂ décrit ci-dessus.

Afin de respecter les consignes de sécurité et la protection contre le faisceau laser, un miroir de protection est utilisé pour protéger l'opérateur. Les détails du dispositif expérimental des essais sont présentés dans Figure 1- 13 et Figure 1- 14.

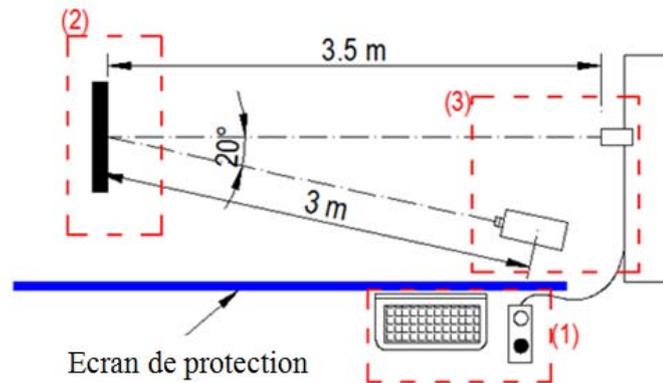


Figure 1- 13 : Schéma du dispositif expérimental des essais avec laser CO₂

En séparant les zones d'essais en deux parties par l'écran de protection, l'échantillon et la caméra infrarouge sont placés sur le même côté du faisceau de laser, alors que les acquisitions et l'opérateur sont situés de l'autre côté. Le démarrage de « tir » du laser est commandé à partir du même côté que les acquisitions.

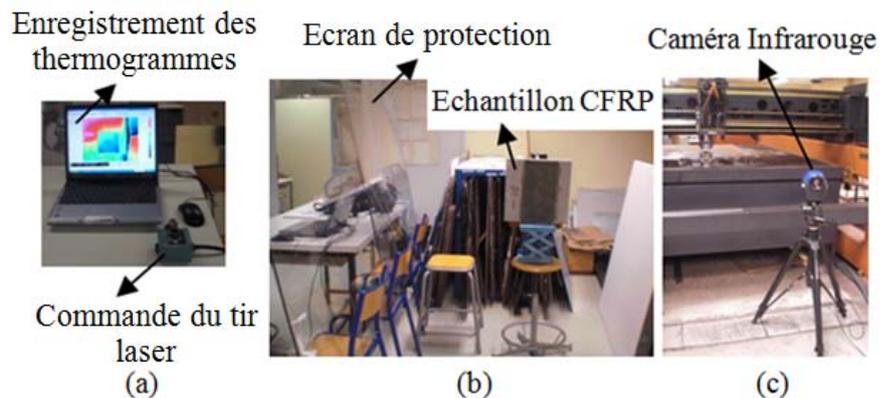


Figure 1- 14 : Détails des zones d'essais. (a) Acquisitions et commande du tir laser. (b) Echantillon. (c) Détecteur (Caméra infrarouge).

Les échantillons utilisés ici sont 2 plaques de béton (40 cm × 40 cm × 4.5 cm) renforcés par un tissu de carbone dit CFRP (Carbone Fiber Reinforced Polymer). L'un comporte un défaut de collage et l'autre est sans défaut. La position de l'échantillon a été fixée à 3.5 m de la lentille. Cette distance est assez importante pour que le diamètre du faisceau laser sur l'échantillon soit plus grand que la dimension de la surface de l'échantillon. Une caméra infrarouge sensible aux ondes moyennes dans la gamme de 3-5 μm (donc insensible au rayonnement produit par le laser), avec un détecteur de 320 × 256 matriciel en InSb (Antimoniure d'Indium), a été placée à 3 m de l'échantillon. Un angle de visée de 20° (angle entre l'axe de la caméra et la trajectoire du faisceau laser) a été adopté de manière à pouvoir détecter l'ensemble de la zone chauffée par le laser (Figure 1- 13).

Les thermogrammes sont enregistrés à intervalles réguliers (1 image par seconde) par l'ordinateur en utilisant le logiciel ALTAIR. L'échantillon a été chauffé sous une puissance de **300W** pendant **40 s**. A l'issue de l'enregistrement de la séquence de thermogrammes, le même protocole d'essai (la position de l'échantillon, de la caméra et de la lentille identiques, temps et puissances de chauffage inchangés) a été reproduit avec le second échantillon.

Résultats des essais sur CFRP

La séquence des thermogrammes a été analysée avec l'algorithme de contraste dans Matlab. Après avoir traversé la lentille dans le dispositif de déviation, le faisceau laser dont la répartition spatiale suit approximativement une gaussienne, provoque un chauffage non homogène de la surface de l'échantillon et peut conduire à des interprétations erronées. Ainsi, les essais sont effectués en deux étapes.

En appliquant l'algorithme de contraste à tous les points de la surface des échantillons (37 cm × 35 cm est observée), les thermogrammes obtenus à l'instant 41 s sont montrés dans Figure 1- 15.

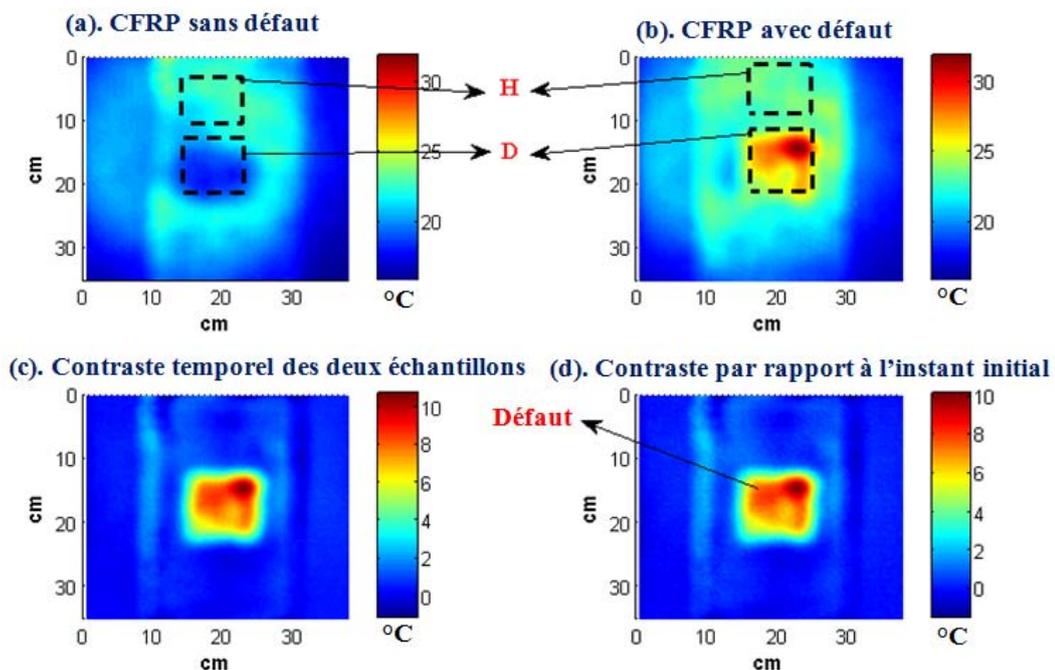


Figure 1- 15 : Thermogrammes de l'échantillon CFRP des essais par Laser CO₂ à l'instant 41 s

La Figure 1- 15.a montre le thermogramme de l'échantillon sans défaut. Ce thermogramme nous permet de voir la non-uniformité du faisceau laser sur l'échantillon. Ceci confirme qu'il n'est pas possible de se limiter au traitement des thermogrammes bruts et qu'il faut recourir à des traitements de données (calculs de contrastes par exemple). Dans ce cas, des contrastes obtenus avec un échantillon sans défaut sont

calculés. On remarque que la zone correspondant au CFRP est plus chaude que la surface du béton.

La Figure 1- 15.b montre le thermogramme de l'échantillon avec défaut de collage au même instant ($t = 41$ s) qui montre également la non-uniformité du chauffage.

La Figure 1- 15.c est le thermogramme obtenu par la soustraction entre le thermogramme de l'échantillon avec le défaut (Figure 1- 15.b) et le thermogramme de l'échantillon sans défaut (Figure 1- 15.a) à l'instant 41 s. Comme il est difficile de garantir des températures identiques pour les deux échantillons au début de l'essai, ce thermogramme de contraste thermique rend compte non seulement de la présence d'une différence de diffusion thermique due à la présence d'un défaut (absence de colle), mais aussi le contraste des températures initiales. Par conséquent, le contraste thermique calculé par rapport au thermogramme initial de la Figure 1- 15.d est nécessaire.

Le contraste thermique dans la Figure 1- 15.d soustrait les températures initiales des échantillons afin de ne considérer que le défaut comme étant la différence entre les deux échantillons. Ce thermogramme montre clairement le défaut au milieu de l'échantillon. L'absence de colle, rend cette zone plus chaude que les autres zones sans défaut.

La Figure 1- 16 montre une courbe de contraste temporel. C'est le contraste entre la zone de défaut et la zone saine (pas de défaut) dans le thermogramme présenté dans Figure 1- 15.d. Cette courbe permet de définir un instant auquel le thermogramme présente un contraste maximum entre les deux zones (saine et défectueuse).

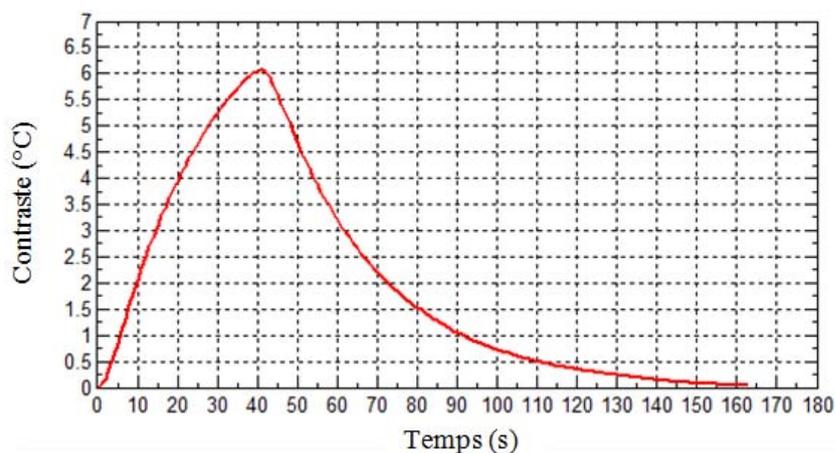


Figure 1- 16 : Contraste temporel entre la zone de défaut et la zone sans défaut

A partir de cette courbe de contraste thermique, on observe qu'à l'instant 41 s le contraste maximum de 6 °C est obtenu. Cette valeur de contraste élevée permet de visualiser clairement le défaut.

V.3.3. Traitement par la thermographie à modulation synchrone (Lock –in)

V.3.3.1. Principe

La technique qui est traduisible par « **détection synchrone** » en français se nomme en anglais « **Lock in** ». Cette dénomination existe depuis la fin des années 1970. Le nom vient de *l'amplificateur synchrone*, de l'inventeur Robert Henry DICKE (1916 à 1997) à qui il a valu un prix Nobel. Cet amplificateur est connu aussi sous le nom de *détecteur de phase synchrone*. C'est Gerhard BUSSE qui expérimente cette technique *infrarouge* en 1979 à des fins de test non destructif sur du métal. Cette technique a été perfectionnée par la suite avec différentes *sources d'excitation et d'acquisition* [9, 14]. Le principe d'une mesure par cette méthode est présentée dans Figure 1- 17.

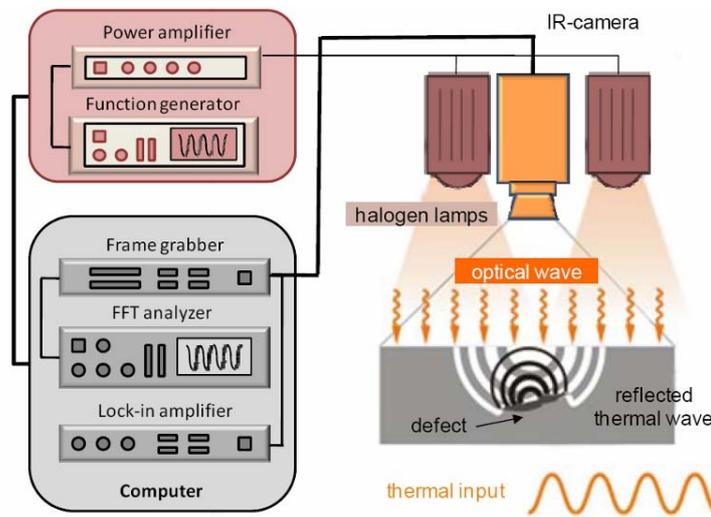


Figure 1- 17 : Principe de mesure par thermographie infrarouge de modulation synchrone (lock-in)

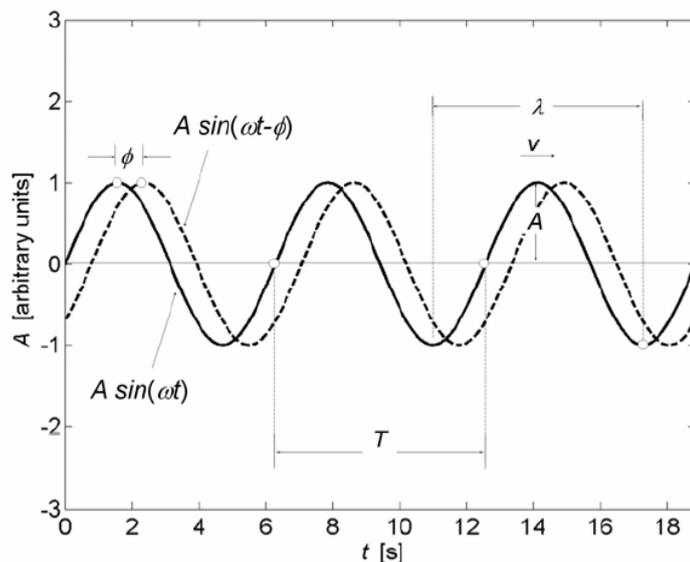


Figure 1- 18 : Onde sinusoïdale et ses propriétés [16]

Pratiquement, la puissance appliquée est toujours positive. Elle est composée d'une composante moyenne et d'une composante variable sinusoïdale. A partir du moment où la sollicitation est imposée, pour étudier le régime harmonique, il est nécessaire d'attendre que le régime transitoire associé à l'application du créneau de puissance moyenne soit presque terminé. Il faut ensuite observer plusieurs périodes de la composante étudiée pour accéder à une estimation précise de sa phase et de son amplitude. Ces dernières données qui sont fonction de la fréquence pourront être affectées par la présence d'anomalies ou par une variation de propriétés thermiques.

A partir des données enregistrées, il faut distinguer *les signaux* correspondant à une **anomalie** de ceux issus d'une **zone saine**. Dans un premier temps, le **contraste** des résultats donne la **position**. Il est alors possible de quantifier l'anomalie. On peut d'une part étudier les écarts de **phase** [9, 14, 16] entre les deux signaux (Figure 1- 18). Une analyse des écarts d'amplitude peut également être interprétée. La **méthode des 4 points** [9, 14, 33-35] est, par exemple, une méthode simple couramment utilisée pour déterminer la **phase**. Le principe est simple. Il consiste à relever les valeurs de 4 points tous les 1/4 de période, voir Figure 1- 19 ci-dessous.

La **phase** au point X_1 (et son **amplitude**) entre les deux signaux est donnée par l'équation ci-dessous. Ce calcul demande peu de ressources avec un enregistrement minimal de **4 images**.

$$\varphi = \arctan \frac{S_3(X_1) - S_1(X_1)}{S_4(X_1) - S_2(X_1)} \quad [6]$$

$$A_s = \sqrt{(S_3(X_1) - S_1(X_1))^2 + (S_4(X_1) - S_2(X_1))^2}$$

Avec : φ : la phase (rad)

A_s : l'amplitude

S_n : valeur du signal à l'instant $n \times T/4$

Cette méthode présente le défaut majeur d'être **très sensible au bruit**. Dans le cas d'un signal très bruité, il est préférable de s'orienter vers des méthodes plus robustes qui nécessitent des prises d'images plus fréquentes.

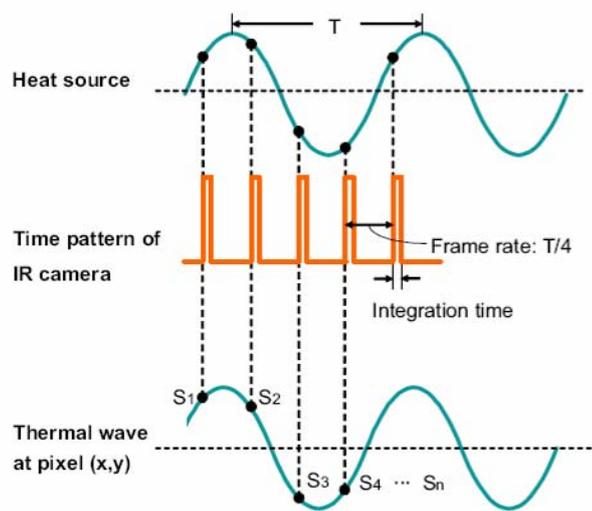
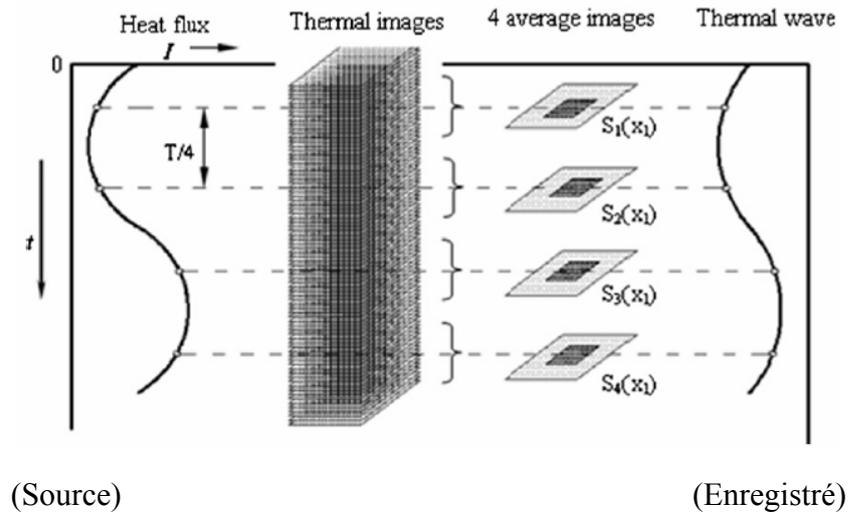


Figure 1- 19 : Principe de la méthode des 4 points dans la thermographie synchrone

La **qualité des résultats** est liée à **deux critères** :

- le **nombre d'images** par période
- le **nombre de périodes**.

La thermographie infrarouge à une **démodulation synchrone numérique** permet d'accroître la résolution spatiale, par une **diminution des effets thermiques radio-convectifs et conductifs** (la température d'équilibre de surface dépend fortement de la convection et de transferts de chaleur radiatifs qui ont lieu entre le matériau absorbant et le milieu ambiant, ces transferts introduisent d'importantes erreurs qui **réduisent la précision de la mesure**). Cela nous permet d'obtenir des résultats satisfaisants dans deux domaines liés : d'une part, la caractérisation en amplitude et en phase de champs électromagnétiques, d'autre part, la caractérisation de l'absorption hyperfréquence de matériaux hétérogènes de type diélectrique-conducteur [9].

À la surface de l'échantillon, l'onde thermique (dite de retour) est *déphasée* par rapport à l'onde incidente lorsqu'il s'agit d'une anomalie « **ouverture** », c'est-à-dire lorsque l'anomalie est une modification locale de l'épaisseur de l'échantillon). Pour l'anomalie « **fermée** » (complètement recouverte par le matériau, l'onde de retour peut être composée de plusieurs ondes de *différents déphasages*. Ce déphasage est proportionnel à la position de l'anomalie dans le matériau.

La **profondeur de l'anomalie** est déductible en première approximation avec l'équation ci-dessous :

$$Z = C_1 \times \mu_b = C_1 \times \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \times f_b}} \quad [7]$$

Z : la profondeur (m)

C_1 : constante

μ_b : la longueur de diffusion thermique (m)

f_b : la fréquence limite (Hz)

α : diffusivité thermique du matériau ($m^2.s^{-1}$)

La fréquence de la source d'excitation f n'est pas liée à la profondeur. La fréquence f_b représente la fréquence limite (« **blind frequency** » en anglais). Elle est définie comme la fréquence qui correspond à la *première apparition de l'anomalie*. Elle est obtenue avec le diagramme de contraste de phase.

$$\text{Contraste} = \text{Phase}_{\text{zone saine}} - \text{Phase}_{\text{zone anomalie}} \quad [8]$$

C_1 a été élaboré par comparaison avec le calcul de l'amplitude et celui de la phase par rapport à une profondeur donnée. $C_1 = 1$ pour l'étude de l'**Amplitude**, $1.5 < C_1 < 2$ pour la **phase**, couramment adopté à **1.8** [14, 16]. Ainsi la *longueur de diffusion thermique de la phase*, C_1 fois plus profonde que celle obtenue par l'*amplitude*. La longueur de diffusion thermique [9, 14, 16]:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad [9]$$

$\alpha = k/\rho c_p$ [m^2/s], k [$W/m^\circ C$]: conductivité thermique, ρ [kg/m^3]: densité, c_p [$J/kg^\circ C$]: Chaleur spécifique; f : fréquence de l'onde thermique modulé, ω [rad/s]: fréquence modulation ($\omega = 2\pi f$, f est en Hz), λ [m]: longueur d'onde.

Ces résultats permettent de dégager des enseignements. Pour un spécimen de **béton lourd** (valeurs typiques $k = 2.1$ [W/m°C] ; $c_p = 1000$ [J/kg°C] ; $\rho = 2400$ [kg/m³] ; $\alpha = 1.5 \times 10^{-6}$ [m²/s]), à 10^{-3} Hz, la longueur de diffusion thermique vaut environ $\mu = 1.7$ cm. Conformément à la relation (9), dès que le « défaut » est au-delà de **quelques centimètres** de profondeur, il est nécessaire d'analyser des fréquences inférieures à 10^{-3} Hz qui imposent des essais relativement longs (plusieurs dizaines de minutes). Il est également nécessaire que le contraste de propriétés thermophysiques entre le matériau « sain » et l'anomalie soit suffisamment marqué pour provoquer un gradient de température détectable en surface.

Les dimensions du défaut sont également à considérer. Idéalement, il sera le plus « visible » s'il est de grande dimension devant la profondeur et parallèle à la surface d'observation. Un délaminage est un cas favorable à la détection. Une armature métallique même parallèle au plan de mesure ne pourra quasiment jamais être détectée en chauffant la surface.

V.3.3.2. Exemple d'application d'essais de lock-in avec des lampes halogène

Campagnes expérimentales des essais par méthode lock-in

Sous le pilotage d'un système de commande lock-in, l'échantillon de CFRP avec défaut (son détail a été présenté dans le dernier chapitre de la partie de thermographie infrarouge avec excitation micro-ondes) a été sollicité par deux lampes halogènes avec leurs signaux sinusoïdaux. Les thermogrammes ont été enregistrés avec le programme ALTAIR LI. Ce programme permet d'obtenir directement l'image de phase (temporelle) à la fin des essais. La fréquence des signaux pour les essais et les phases correspondantes sont présentées dans le Tableau 1- 2. Chaque essai a été effectué avec 3 périodes du signal sinusoïdal. Ce nombre de périodes a été suffisant pour l'interprétation des données dans le programme ALTAIR LI pour obtenir l'image de phase suffisamment précis. Le Tableau 1- 2 présente la phase de la zone de défaut et celle de la zone sans défaut de l'échantillon correspondant aux 9 essais à 9 différentes valeurs de fréquence (0.5 Hz, 0.3 Hz, 0.1 Hz, 0.05 Hz, 0.03 Hz, 0.025 Hz, 0.02 Hz, 0.01 Hz et 0.005 Hz).

Tableau 1- 2 : Phases obtenues après 9 essais de lock-in

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
(Hz)	0.5	0.3	0.1	0.05	0.03	0.025	0.02	0.01	0.005
φ_D (°)	-65.1	-77.15	-91.75	-98.69	-103.7	-102.88	-106.2	-118.82	-136.06
φ_S (°)	-71.42	-86.85	-112.5	-128.27	-137.32	-138.52	-142.22	-147.39	-149.1
$\Delta\varphi$ (°)	6.32	9.7	20.75	29.58	33.62	35.64	36.02	28.57	13.04

φ_D (°): Phase de la zone avec défaut; φ_S (°): Phase de la zone sans défaut

$\Delta\varphi$ (°): Contraste de phase entre les deux zones ($\Delta\varphi = \varphi_D - \varphi_S$).

Les essais ont été repris avec différentes fréquences des signaux afin d'atteindre le contraste de phase maximum. Dans notre cas, 9 essais ont été effectués pour déterminer la fréquence optimale correspondant à la profondeur de défaut.

Résultats des essais par méthode Lock-in

Pour chaque essai (Chaque fréquence), ALTAIR LI analyse sur les signaux sinusoïdaux des flux transmis à l'échantillon afin d'éliminer l'effet du bruit. La séquence des thermogrammes a été ensuite utilisée pour déterminer les images de phase par une méthode de 4 points [33]. A la fin de chaque essai correspondant à une fréquence, une image de phase a été obtenue à partir de ce programme à base de méthode mentionnée. Les courbes correspondant aux phases de deux zones de l'échantillon (sans défaut et avec défaut) de cette série des 9 essais sont présentées dans Figure 1- 20. L'évolution des contrastes de phase ($\Delta\phi$) de cette série d'essais de lock-in est aussi indiquée dans Figure 1- 21.

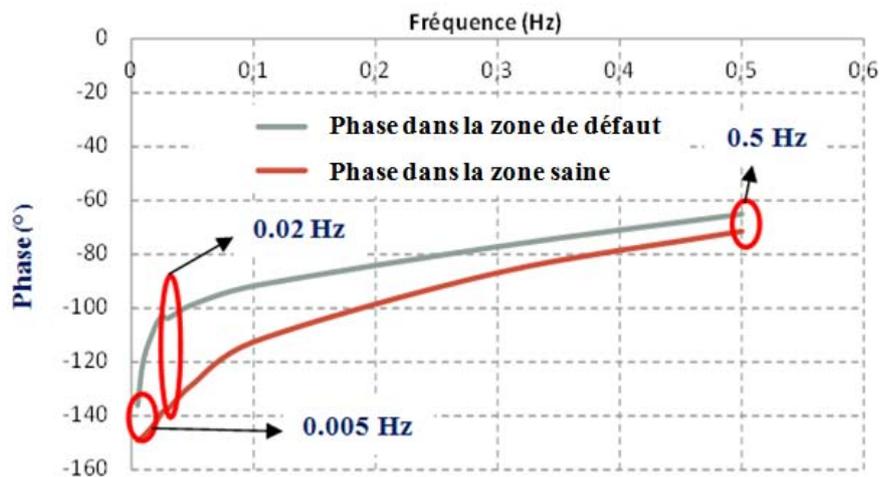


Figure 1- 20 : Evolution des phases en fonction de la fréquence

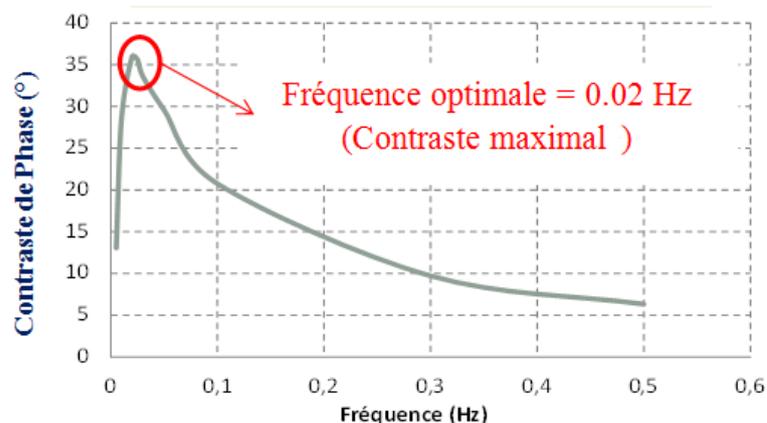


Figure 1- 21 : Evolution du contraste de phase en fonction de la fréquence

Ce diagramme montre la fréquence optimale de 0.02 Hz à laquelle le contraste de phase a la valeur maximale. Trois images de phase obtenues à la fin des essais avec trois différentes fréquences 0.005 Hz, 0.5 Hz et 0.002 Hz sont montrées dans Figure 1- 22.

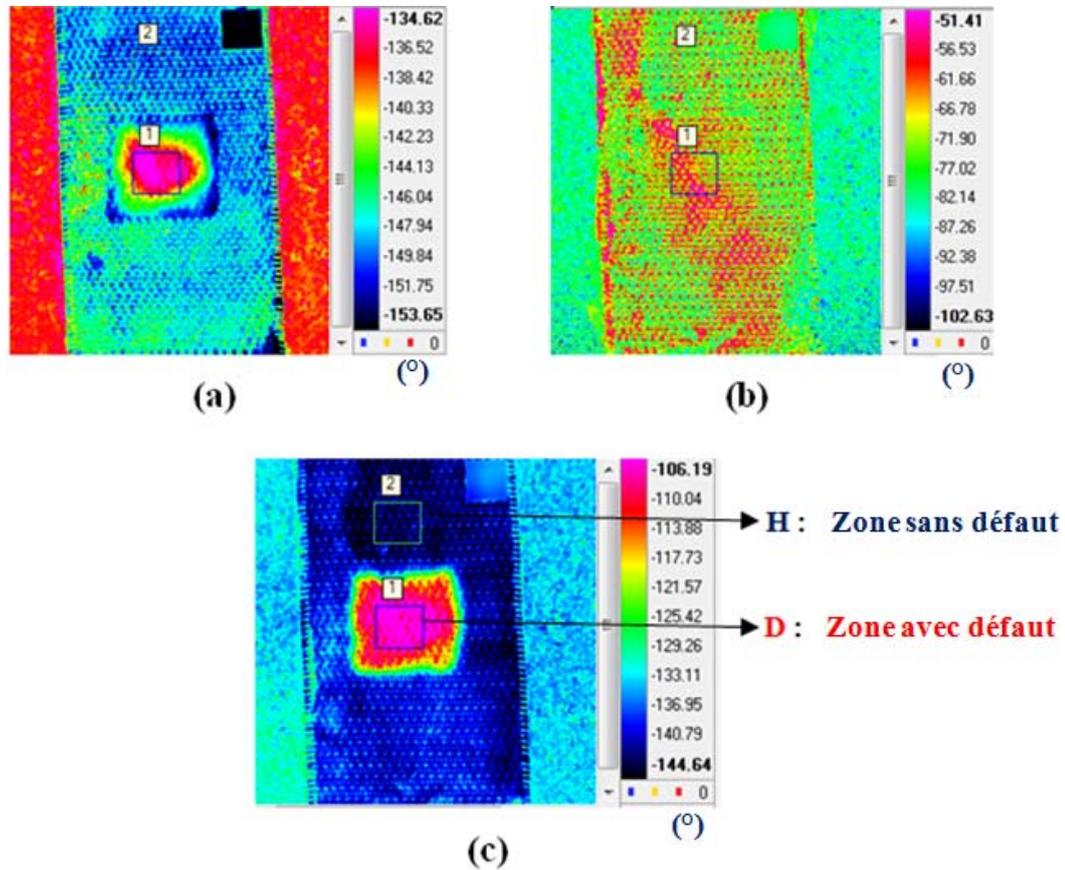


Figure 1- 22 : Images de phase en fonction de fréquence. (a) à 0.005 Hz. (b) à 0.5 Hz. (c) à 0.02 Hz

Ces trois images montrent qu'il y a une fréquence optimale à laquelle l'image de phase de l'échantillon peut montrer clairement la zone de défaut. Cette fréquence est directement liée à la position et à la nature du défaut et peut faire l'objet d'analyse à des fins de quantification.

La méthode de lock-in permet de réduire l'effet du bruit. Cependant, la série des essais nécessite beaucoup de temps couvrir la bande de fréquences d'investigation.

V.3.4. Traitement par thermographie à phase pulsée (PPT)

V.3.4.1. Principe

Suite à un temps d'échauffement, les thermogrammes dans la phase de refroidissement sont utilisés pour l'interprétation par la méthode de Thermographie à Phase Pulsée (notée PPT par la suite) [21-22], Le principe est présenté Figure 1- 23.

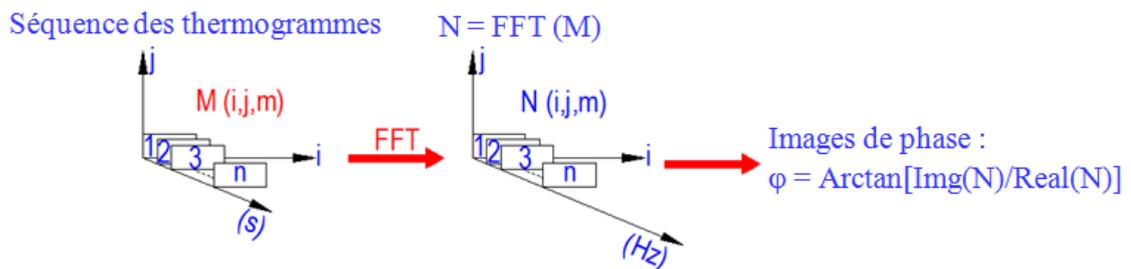


Figure 1- 23 : Principe d'analyse des thermogrammes par PPT

Le faisceau non homogène (quasi gaussien) après avoir traversé la lentille dans le dispositif de déviation produit un échauffement non homogène sur la surface de l'échantillon et peut conduire à mal interpréter les thermogrammes. Ainsi, les images de phase, qui sont moins affectées par l'excitation inhomogène, ont été exploitées pour étudier le défaut. La séquence des thermogrammes a été traitée avec l'algorithme de transformation de Fourier rapide (**FFT**) pour reconstituer pixel par pixel les images de phase dans le domaine fréquentiel.

Les températures moyennes de surface dans la zone de défaut et celle sans défaut (Echantillon CFRP avec le défaut uniquement) dans la phase de refroidissement sont présentées dans Figure 1- 24 ci-dessous.

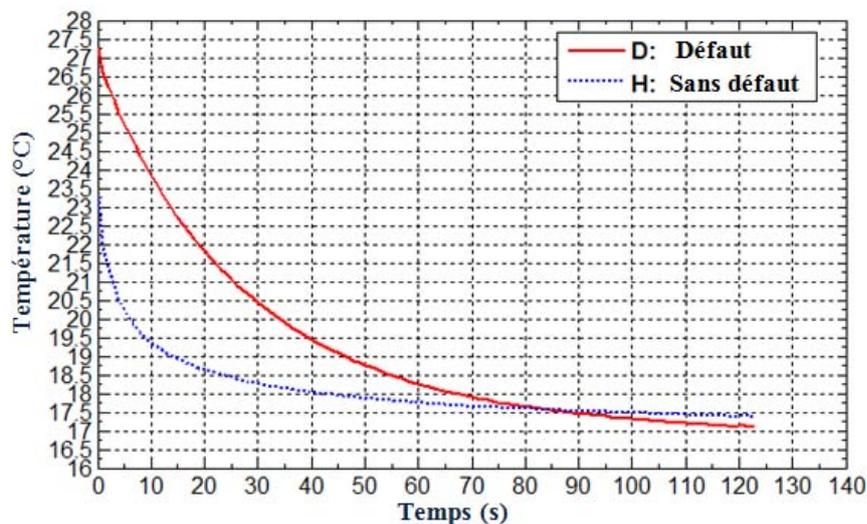


Figure 1- 24 : Evolution des températures de l'échantillon CFRP avec défaut dans la phase de refroidissement

Ces deux courbes montrent que la zone de défaut a une température de surface supérieure à la zone saine. Dans la zone défectueuse, la présence de l'air (qui a une conductivité thermique plus faible que la colle), à la place de la colle a engendré une élévation de température de surface supérieure à celles des autres endroits.

Résultats par le traitement et discussions

En appliquant l'algorithme de FFT précédent à tous les points de la surface des échantillons (Sur une zone de 37 cm × 35 cm), la séquence des images de phase en domaine fréquentiel a été obtenue. Le contraste de phase, qui est la soustraction entre la phase moyenne dans la zone de défaut et celle dans la zone saine, est montré (Figure 1- 25).

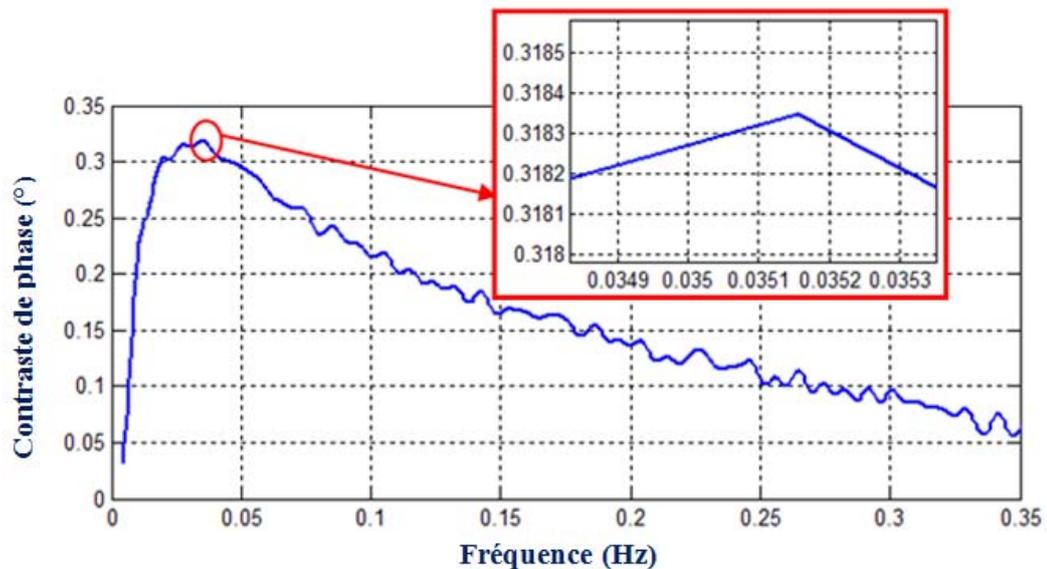


Figure 1- 25 : Contraste de phase dans le domaine fréquentiel

On observe que le contraste de phase continue à augmenter avec la fréquence jusqu'à une valeur maximale à la fréquence d'environ **0.03516 Hz**. Lorsque la fréquence continue à augmenter à partir de cette valeur, la courbe de contraste de phase commence à descendre. Cela montre qu'il y a une fréquence optimale à laquelle la zone de défaut apparaît le plus clairement sur l'image de phase. Trois images de phase aux trois différentes fréquences sont présentées dans Figure 1- 26.

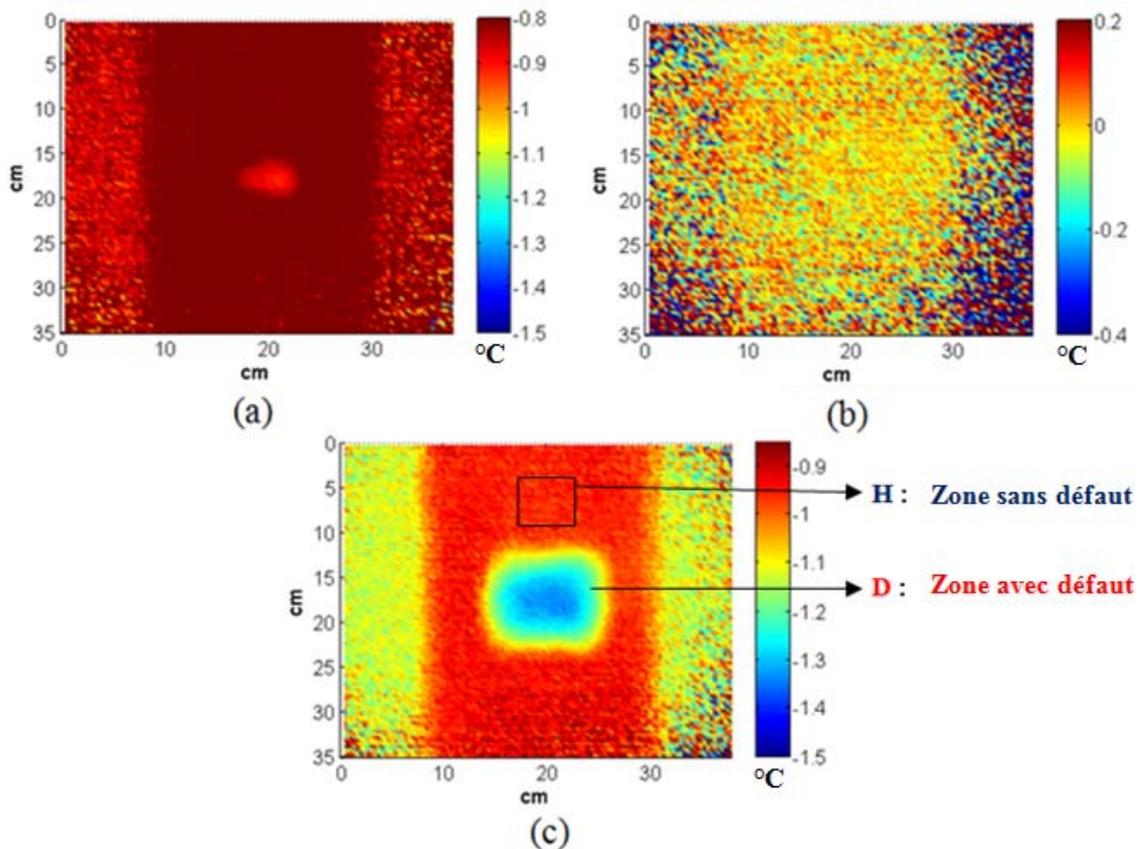


Figure 1- 26 : Images de phase par FFT. (a) à 0.00586 Hz. (b) à 0.5 Hz.
(c) à 0.03516 Hz

Ces images de phase montrent qu'à la fréquence de 0.00586 Hz, la zone défection n'apparaît pas clairement parce que l'excitation pénètre trop profondément dans l'échantillon. A la fréquence de 0.5 Hz, ce qui est une valeur élevée, l'excitation a une trop faible profondeur de pénétration, ce qui ne nous permet pas de voir la zone de défaut dans l'image de phase. Dans le cas contraire, on voit clairement la zone de défaut sur l'image de phase à la fréquence de **0.03516 Hz**.

On observe également que le chauffage inhomogène par le faisceau laser n'a pas l'effet sur les images de phase. Par conséquent, cette méthode d'interprétation PPT est intéressante dans le cas de la méthode de thermographie infrarouge avec excitation laser CO₂.

Pour cette application, alors que la méthode lock-in permet d'améliorer le rapport signal/bruit, le temps d'essai long pour couvrir la bande spectrale d'intérêt montre que la PPT appliquée ici sous excitation par laser CO₂ présente l'intérêt d'un essai unique de temps plus réduit de l'ordre de **120 s** dans ce cas. La courbe obtenue pour l'approche en Lock-in avait nécessité **plusieurs heures**.

Le temps de mesure reste généralement un des points faibles de la thermographie infrarouge active. Lorsqu'il s'agit d'étudier les effets sur la température de surface de la présence d'un défaut ou de variations de propriétés thermophysiques sub-surfaciques en réponse à une sollicitation thermique en surface, la durée nécessaire pour que la chaleur se diffuse jusqu'à la partie d'intérêt et pour que la température de surface soit impactée peut constituer un frein à l'utilisation de la thermographie. Cette durée qui ne correspond pas à un temps de trajet « aller-retour » car il n'y a pas de propagation d'ondes mais seulement une diffusion, évolue avec le carré de la distance.

L'objet de ce travail est de proposer une méthode d'auscultation active basée non plus sur un chauffage de la surface d'accès de l'élément mais d'utiliser la relative transparence du béton au rayonnement micro-ondes et d'utiliser les propriétés de réflexion des inclusions métalliques omniprésentes dans les éléments de béton renforcé pour générer des phénomènes d'interférence. En plus d'une amélioration significative du temps d'essai, cette approche vise à permettre l'étude des parties métalliques dans le béton. Quand on se limite à l'étude de phénomènes de conduction thermique, les contrastes de température qui apparaissent à la surface des composants en génie civil sont généralement dus à la présence de défauts étendus introduisant un excès de résistance thermique. Les parties métalliques incluses dans le béton sont très conductrices de la chaleur et au regard de leur dimension, de leur position, elles ne créent pas de modification sensible du transfert de chaleur par conduction.

La partie suivante est consacrée à une présentation théorique du rayonnement micro-ondes et des résultats utiles pour notre étude.

VI. MICRO-ONDES

VI.1. Définition

Hyperfréquences ou **micro-ondes** ont les bandes de fréquences correspondant à l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des ondes électromagnétiques. La fréquence « f » d'une onde électromagnétique est liée à sa longueur d'onde « λ » dans le vide (air) par la relation : $\lambda \cdot f = c$, où $c = 3 \cdot 10^8$ m/s [36-39]. Les gammes de longueur d'onde des micro-ondes sont bien montrés dans Figure 1- 27 et Tableau 1- 3.

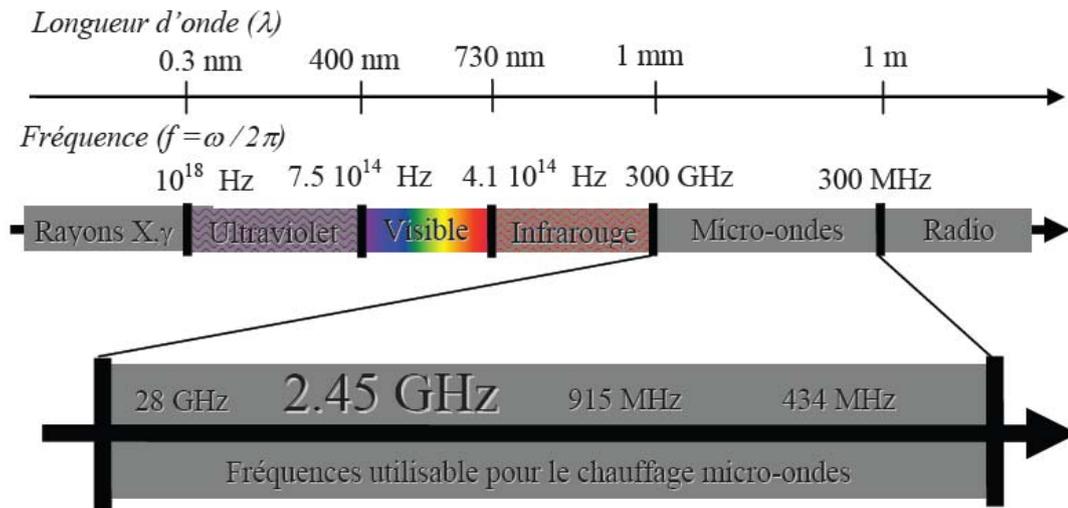


Figure 1- 27 : Les spectres des rayonnements électromagnétiques [38]

Tableau 1- 3 : Domaines fréquentiels usuels [39]

Désignation	Bande de fréquence	Longueurs d'onde
ELF (<i>extremely low frequency</i>)	30 à 300 Hz	Mégamétriques 10 000 à 1 000 km
VF (<i>voice frequency</i>)	300 à 3 000 Hz	1 000 à 100 km
VLF (<i>very low frequency</i>)	3 à 30 kHz	100 à 10 km
LF (<i>low frequency</i>)	30 à 300 kHz	Kilométriques 10 à 1 km
MF (<i>medium frequency</i>)	0,3 à 3 MHz	Hectométriques 1 000 à 100 m
HF (<i>high frequency</i>)	3 à 30 MHz	Décamétriques 100 à 10 m
VHF (<i>very high frequency</i>)	30 à 300 MHz	Métriques 10 à 1 m
UHF (<i>ultra high frequency</i>)	0,3 à 3 GHz	Décimétriques 100 à 10 cm
SHF (<i>super high frequency</i>)	3 à 30 GHz	Centimétriques 10 à 1 cm
EHF (<i>extremely high frequency</i>)	30 à 300 GHz	Millimétriques 10 à 1 mm
	300 à 3 000 GHz	Submillimétriques 1 à 0,1 mm

VI. 2. Générateur de micro-ondes (Magnétron)

Définition- histoire

Les **magnétrons** sont des dispositifs imaginés dans la première partie du XXème siècle (1922, **Albert W. Hull**, ingénieur chez General Electric). Ils ont montré tout leur intérêt vers la fin des années **1930** avec la mise au point des premiers radars. A.W. Hull est parti d'un concept de diode annulaire, la *cathode* se situant au centre. Entre cathode et anode, une tension V_k créée par un champ électrostatique E génère un courant radial d'électrons. Lorsqu'on applique un champ magnétique B homogène et perpendiculaire au plan de la diode dans la zone qui sépare cathode et anode, les électrons adoptent un mouvement circulaire. Au-delà d'une certaine valeur B_{hull} (proportionnelle à racine de V_k : critère de Hull), les électrons ne peuvent plus rejoindre l'anode et retombent sur la cathode. B étant orthogonal à E , on parle de dispositif à champs croisés. La zone annulaire qui sépare cathode et anode s'apparente à un guide d'onde refermé sur lui-même, de sorte que des ondes stationnaires peuvent s'y développer. Au milieu des années 1930, l'idée est venue de charger ce guide par une succession de cavités creusées dans l'anode, afin d'augmenter l'énergie électromagnétique qui peut être emmagasinée sur l'un ou l'autre mode [40]. Lorsque $B = B_{hull}$, la trajectoire des électrons frôle l'anode avant de replonger vers la cathode, et si B augmente encore, le *rayon de la trajectoire diminuant*, les électrons passent de plus en plus *loin de l'anode*. Au sommet de leur trajectoire (à une distance h de la cathode), ils ont une vitesse tangentielle égale à E/B , dite vitesse d'entraînement.

La Figure 1- 28 reprend les applications principales des magnétrons et leur période de développement.

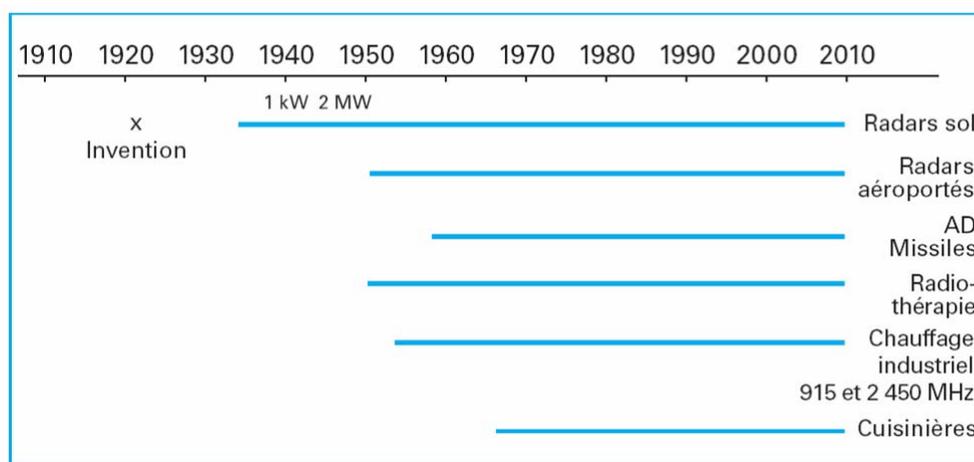


Figure 1- 28 : Utilisation des magnétrons

[40]

Les premières utilisations des magnétrons ont été les **radars**, d'abord au sol puis aéroportés. Les autodirecteurs de missiles ont été conçus à partir des années 60. D'autres applications ont été développées, en particulier dans des accélérateurs de particules pour la radiothérapie. La principale application reste le chauffage, industriel et domestique dans la gamme de 915 MHz à 2.45 GHz: les magnétrons sont les seuls tubes électroniques fabriqués en grandes séries pour les fours « **micro-ondes** » (1 kW à 2.45 GHz).

Le magnétron est un tube sous vide à géométrie **cylindrique** servant d'oscillateur. Il comporte **deux électrodes** [41]:

- **l'anode** est réalisée en cuivre ; elle est creusée de multiples cavités (10 à 20) qui forment des circuits résonnants ; dans l'une de ces cavités, **une antenne** permet de transmettre l'énergie MO à un circuit extérieur (guide d'onde) ;
- **la cathode** est généralement en tungstène thorié ; le filament est chauffé, à environ 2 000 °C, par une alimentation basse tension (5 à 10 V) ; la cathode est placée à un potentiel **néga**tif élevé (6 à 10 kV).

(Voir les détails dans Figure 1- 29 ci-dessous).

Des aimants permanents ou un électroaimant (ou les deux) produisent un champ magnétique continu et perpendiculaire au champ électrique. Sous l'influence conjuguée des champs électrique et magnétique, les électrons émis par la cathode s'éloignent de celle-ci en suivant un parcours incurvé en direction de l'anode. Chaque ensemble fente-cavité de l'anode forme un circuit résonnant à une fréquence précise, les parois de la cavité représentant la partie selfique et la fente la partie capacitive. La fréquence de résonance est déterminée par les dimensions de la cavité et de la fente.

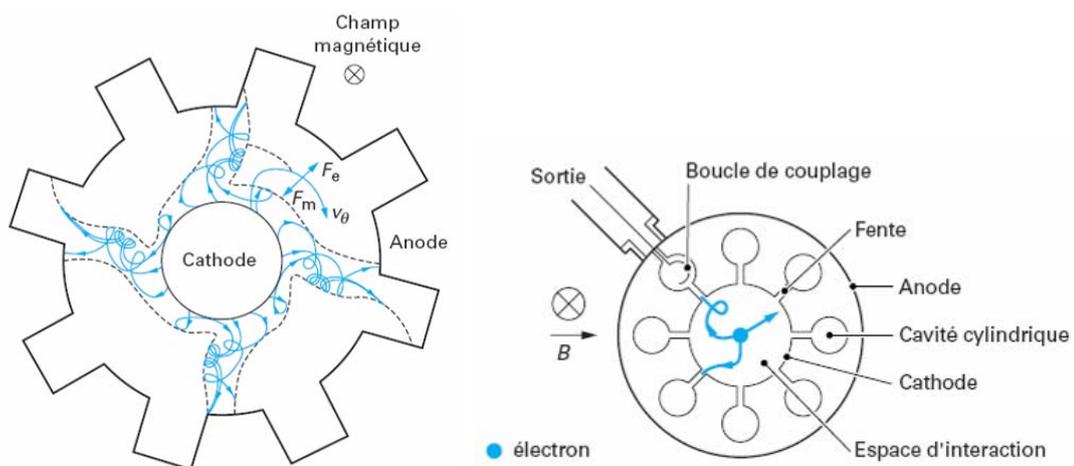


Figure 1- 29 : Trajectoires électroniques dans un magnétron- coupe schématique du magnétron

[40-41]

Les **magnétrons fonctionnant à 2 450 MHz** ont des puissances généralement comprises entre **0,2 et 6 kW micro-onde** et le **rendement global** est de l'ordre de **50 à 60 %**. À la fréquence de 915 MHz, il est possible de construire des magnétrons de puissance plus élevée, jusqu'à 25 kW avec un rendement global d'environ 55 à 65 %. La durée de vie des magnétrons est comprise entre 3 000 et 6 000 h. Dans des conditions normales de fonctionnement, l'énergie est perdue en chaleur dans les électrodes. C'est pourquoi le magnétron doit être refroidi. Les magnétrons de puissance inférieure à 2 kW sont refroidis par air forcé, les autres (puissance 2,5 à 6 kW) sont refroidis par une circulation d'eau autour du corps d'anode [41].

Pour **fonctionner**, le magnétron a besoin de plusieurs **alimentations** :

- une **alimentation classique** (transformateur triphasé, redressement en pont de Graetz, filtrage par induction de lissage) haute tension continue à polarité négative (6 à 10 kV ; 0,6 à 1 A)
- une alimentation basse tension pour le **chauffage du filament** (5 à 10 V, quelques dizaines d'ampères)
- une alimentation basse tension pour l'**électroaimant**.

Dans un magnétron, la cathode est très sollicitée à cause du fort bombardement électronique qu'elle subit. Les meilleurs magnétrons ont une **durée de vie** de l'ordre de **20 000 h**, mais la plupart s'éteignent après quelque **10 000 h**, soit **une année** en fonctionnement continu.

VI.3. Guide d'onde rectangulaire

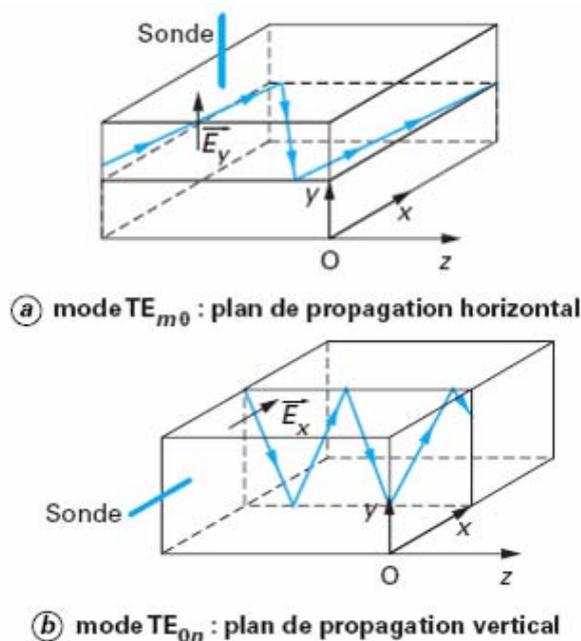


Figure 1- 30 : Propagation des ondes en guide rectangulaire [39]

Dans un plan de section transversale (Figure 1- 30) à $z = \text{Cte}$: $|E_y| = |E_0| \left| \sin \frac{\pi x}{a} \right|$.

Donc, lorsque x varie entre 0 et a , la variation du champ électrique est donnée par une demi-sinusoïde qui est caractéristique du mode fondamental. Les *lignes de courant* se calculent à partir de l'expression de la densité de courant :

$$\underline{\vec{j}} = \underline{\vec{n}} \wedge \underline{\vec{H}} \quad [10]$$

Avec $\underline{\vec{n}}$ normale à une face du guide, et $\underline{\vec{H}} = \underline{\vec{H}}_x + \underline{\vec{H}}_z$

Leur répartition sur les faces du guide est représentée sur Figure 1- 31 ci-dessous. Il est important de noter qu'elles sont :

- *verticales* sur les faces *latérales* ;
- *parallèles* à l'axe des z , uniquement au milieu des faces *supérieure* et *inférieure*.

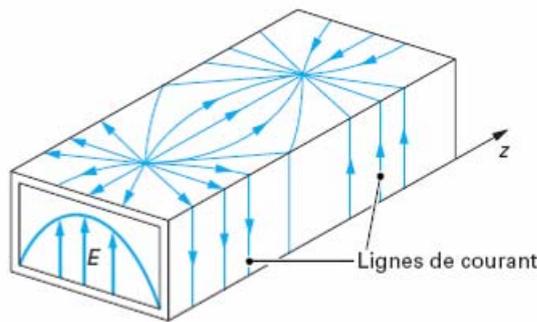


Figure 1- 31 : Lignes de courant sur les faces d'un guide d'ondes rectangulaire et coupe transversale du champ électrique E

[39]

On ne pourra donc usiner des fentes dans le guide, sans en perturber gravement le fonctionnement, que selon ces deux directions ; d'où les lignes de mesure à fente longitudinale. Dès que des *fentes coupent les lignes de courant*, elles *rayonnent une partie de l'énergie* qui se propage dans le guide : cela est d'ailleurs utilisé dans certains types *d'antennes*.

***Puissance active transportée par l'onde TE**

C'est la puissance transportée selon la direction Oz. La densité de puissance selon cette direction nous est donnée par la relation [39, 42]:

$$\underline{P}_z = -\frac{1}{2} \underline{E}_y \underline{H}_x^*$$

Soit :

$$P_z (W / m^2) = \frac{1}{2} E_0^2 \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{\lambda}{\lambda_g} \sin^2 \frac{\pi x}{a} \quad [11]$$

Cette expression représente la **puissance par unité de surface** perpendiculairement à Oz ; la **puissance moyenne active** traversant la **section transversale** du guide nous est donc donnée par :

$$P = \frac{1}{2} E_0^2 \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{\lambda}{\lambda_g} \int_0^a \int_0^b \sin^2 \frac{\pi x}{a} dx dy$$

***Cartes des lignes de champs et de courants**

Pour les modes TE_{m0}, le module de \underline{E}_y dans un plan de section transversale est donné par : $|\sin(m\pi x/a)|$. Les variations, pour $0 \leq x \leq a$, de l'amplitude du champ \vec{E} sont caractérisées par deux demi-sinusoïdes pour le mode TE₂₀ et **m demi-sinusoïdes** pour un mode TE_{m0}. Pour les modes TE_{0n}, la variation serait celle de $|\underline{E}_x|$, donnée par $|\sin(n\pi/b)|$ [39].

D'où :

$$P(W) = \frac{E_0^2}{4} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{4a^2}} ab \quad [12]$$

La puissance maximale transportable est donnée par la valeur, notée **P_{max}**, de l'expression précédente lorsque le champ électrique au centre du guide correspond au *champ de claquage* **E_{max}**.

V.3.1. Atténuation dans les guides d'onde rectangulaire

Les parois du guide constituées par des *conducteurs parfaits* est évidemment un cas idéal auquel correspond une propagation *sans pertes*. En fait, l'existence de courants dans des parois de conductivité finie implique qu'il y ait une dissipation d'énergie par effet **Joule** et, par conséquent, une **propagation avec pertes**. Le **coefficient d'atténuation** est donné par [39]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{\text{Puissance perdue dans les parois}}{\text{Puissance transmise dans le diélectrique}}$$

La puissance perdue en un point des parois du guide est : $\frac{1}{2} R_s |\vec{J}|^2$

R_s est la *résistance superficielle* de la paroi, qui est le quotient de sa *résistivité* ρ par la *profondeur de pénétration* δ due à l'effet de peau.

Comme $\delta = 1/\sqrt{\pi\mu_1(1/\rho)f}$, il vient :

$$R_s = \sqrt{\pi\mu_1\rho f} \quad [13]$$

Avec μ_1 : perméabilité des parois

\vec{j} est la densité de courant électrique donné par : $\vec{j} = \vec{n} \wedge \vec{H} = \vec{H}_t$

\vec{H}_t est composante tangentielle du champ magnétique,

\vec{n} normale à la paroi

Par ailleurs, la *densité de puissance transmise* en un point du diélectrique est donné par : $\frac{1}{2}\vec{E} \wedge \vec{H}^*$

Le *coefficient d'atténuation* α est égale à :

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{R_s \oint |\vec{H}_t|^2 dl}{\iint_s (\vec{E} \wedge \vec{H}^*) ds} \quad [14]$$

V.3.2. Adaptation d'impédance

La notion d'adaptation d'impédance est essentielle, car elle permet d'assimiler les conditions à respecter sur un montage haute fréquence ou micro-onde pour garantir une **transmission optimale** de l'énergie du générateur à sa charge et la survie des sources [41].

Un système S est adapté en impédance si dans le plan d'entrée du système le **coefficient de réflexion de l'onde électromagnétique est nul**. Cette définition est valable quel que soit le type de ligne d'alimentation. Lorsque le coefficient de réflexion est nul, le niveau de **puissance réfléchi est nul** ; toute l'énergie issue de la source est absorbée par l'applicateur (matériau, plasma, structure de l'applicateur), et il n'y a pas de phénomène d'ondes stationnaires, qui favorisent l'apparition d'arcs électriques dans la ligne d'alimentation de l'applicateur.

Coefficient de réflexion $\rho(f)$ en tension [17]:

$$\rho(f) = \frac{z - R_c}{z + R_c} \quad [15]$$

- f : fréquence
- R_c : impédance caractéristique de la ligne
- $|\rho(f)|^2$: coefficient de réflexion en **puissance**

Une partie de la **puissance de bruit thermique** issue du **récepteur**, soit $|\rho(f)|^2 kT_2$ revient vers le récepteur après réflexion sur la charge.

Selon le principe des transferts radiatifs, la puissance de bruit reçue par le détecteur provenant de la charge est donc :

$$P'(f) = [1 - |\rho(f)|^2] kT_1 \quad [16]$$

Par conséquent, dans le cas général, le **récepteur** reçoit **une puissance** :

$$P''(f) = [1 - |\rho(f)|^2] kT_1 + |\rho(f)|^2 kT_2 \quad [17]$$

- T_1 : température de la *charge*
- T_2 : température du *récepteur*.

La détermination de T_1 à partir de la mesure de $P''(f)$ nécessite donc au préalable la connaissance de T_2 et de $|\rho(f)|^2$. L'interface **sonde-milieu dissipatif** est alors caractérisée par un coefficient de *réflexion en puissance* $|\rho(f)|^2$. **L'émissivité du matériau en présence** d'une sonde donné : $e_f = [1 - |\rho(f)|^2]$. Elle exprime ainsi la capacité que possède le matériau à céder la **puissance de bruit thermique** au récepteur. En pratique, *l'émissivité est souvent différente de 1*.

Les composants capacitifs et selfiques de ces montages ne sont pas parfaits. Les éléments selfiques présentent une partie résistive d'autant plus élevée que les sections de conducteurs les constituant sont faibles. Leur impédance prend la forme suivante :

$$Z_L = R + jL\omega.$$

De même, les composants capacitifs variables présentent par construction une composante selfique faible et une composante résistive associée à cette self. Leur impédance est de la forme :

$$Z_c = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$$

Ces valeurs « **parasites** » jouent un rôle non négligeable dans les performances des montages, notamment pour les charges de faible impédance, et ceci en fonction de la puissance émise par la source.

VI.4. Application de la thermographie infrarouge stimulée par microondes (EMIR)

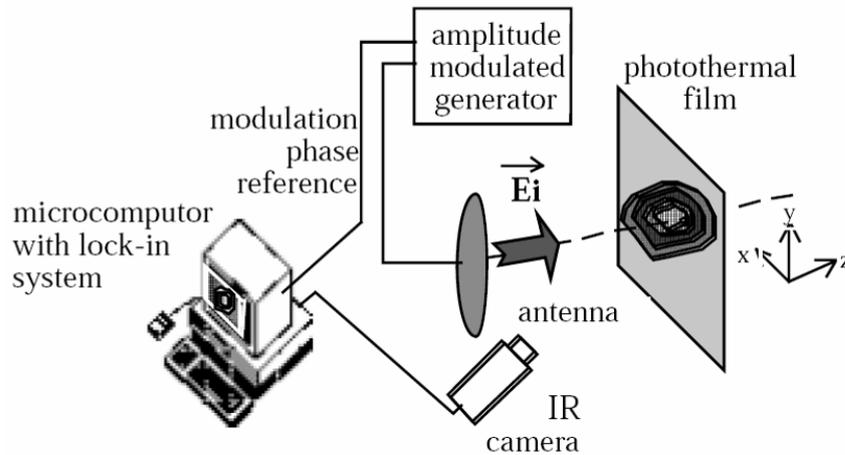


Figure 1- 32 : Etude de la distribution d'intensité du champ électromagnétique par la méthode EMIR : schéma de principe [43]

*****Principe de la Mesure d'un Champ Electromagnétique par Thermographie Infrarouge :**

On désire visualiser et mesurer un champ électromagnétique au moyen de films photothermiques résistifs. Son absorption par un matériau produit un échauffement qui peut être détecté par une caméra infrarouge. La densité volumique de **puissance absorbée par le matériau** est donnée par l'expression [42-43]:

$$P_{abs} = \frac{1}{2} [(\sigma + \omega \cdot \epsilon''') \cdot E^2 + \omega \cdot \mu''' \cdot H^2] \quad [18]$$

σ est la *conductivité* du matériau, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'''$: sa *permittivité complexe*, $\mu = \mu' - j\mu'''$: sa *perméabilité complexe*. E et H représentent les modules des *champs électrique et magnétique* absorbés. *L'échauffement résultant* dépend de cette *puissance absorbée* mais également des *propriétés thermiques du matériau* et des *transferts de chaleur* avec le milieu extérieur. Il est clair que cette technique fait appel à la fois à la connaissance des *phénomènes électromagnétiques* et *thermiques*.

Dans le cas où le défaut est meilleur conducteur, une méthode pour les matériaux absorbant les ondes radar peut être appliquée au succès. Le principe de cette méthode baptisée *EMIR (ElectroMagnétique InfraRouge)* avec deux variantes est donné dans la figure ci-dessous.

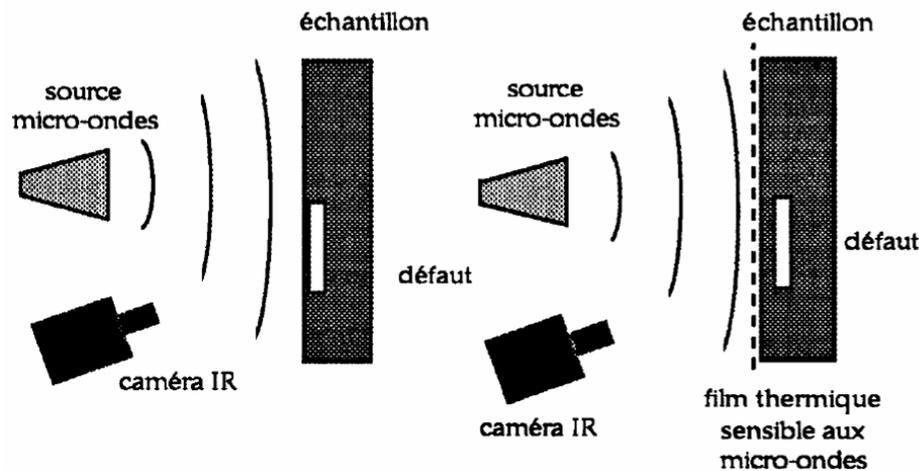


Figure 1- 33 : Méthode EMIR avec ses deux variantes : méthode directe (à gauche), et méthode du film sensible (à droite)

[43]

Dans la première variante, on mesure directement l'échauffement du matériau absorbant sous l'effet du champ micro-ondes. Dans la seconde, qui peut être appliquée aux matériaux sans pertes électriques, la thermographie révèle l'échauffement d'un film mince conducteur électrique qui convertit en chaleur une faible partie de l'énergie électromagnétique au voisinage de l'échantillon, révélant ainsi les **perturbations** apportées par le **défaut conducteur au champ électromagnétique** [43].

Pour les performances de la méthode EMIR, la meilleure **sensibilité** est obtenue en **régime continu**. Pour des mesures de **qualité**, le **régime modulé** est recommandé ; les bruits équivalents en température (NETD) et différence de champ électrique (NEEFD) et la dynamique maximale de mesure sont meilleurs.

VII. CONCLUSION

La thermographie infrarouge présente beaucoup d'atouts pour permettre de développer des techniques de contrôle non destructif dédiées aux ouvrages de génie civil ou aux éléments de construction. Elle est en particulier très simple à mettre en œuvre et permet une mesure à distance sans contact. Le développement des méthodes de thermographie infrarouge active s'est accompagné de l'élaboration de méthodes de traitement adaptées aux techniques de stimulation. Les techniques les plus répandues (Thermographie Pulsée, Thermographie à Phase Pulsée, Lock-in) ont été présentées dans ce chapitre en les appliquant à sollicitations par lampes halogène et par un système de chauffage surfacique basé sur l'étalement optique d'un faisceau de laser. Elles ont montré tout leur intérêt. En contrepartie, ces méthodes affichent des contraintes en termes de temps de mesure et ne permettent évidemment de détecter que des anomalies qui ont une influence significative sur la diffusion de la chaleur de la surface vers la profondeur de l'élément ausculté.

Le présent travail vise à expérimenter une nouvelle technique d'auscultation d'éléments en béton par thermographie infrarouge active s'appuyant sur une sollicitation par un magnétron (source de micro-ondes). Le béton est un milieu permettant une transmission partielle des micro-ondes (ce point sera vu ultérieurement dans le mémoire) et ce type d'onde pourra se propager dans la masse du matériau à la vitesse des ondes électromagnétiques. Un chauffage distribué dans le volume est possible mais la présence d'inclusions métalliques va générer des phénomènes de réflexion et de diffraction qui vont engendrer des concentrations d'intensité de rayonnement susceptibles d'entraîner des échauffements. Ce chapitre a rappelé les principales notions qui caractérisent ce type de rayonnement, le fonctionnement d'un générateur et le rôle d'un guide d'onde.

Dans le chapitre suivant, les différentes étapes de la conception et la réalisation, d'une source micro-ondes dédiées à la sollicitation d'éléments en béton seront détaillées.

REFERENCES DU CHAPITRE 1

- [1] Christopher OSTROWSKI, "AUSCULTATION DES OUVRAGES EN BETON PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ACTIVE ET PASSIVE," Doctorat, GENIE CIVIL, Université de Sherbrooke, Université d'Artois, Sherbrooke, 2005.
- [2] M. R. Clark, D. M. McCann, M. C. Forde, "Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges," *NDT & E International*, vol. 36, pp. 265-275, 2003.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *GUIDEBOOK ON NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE STRUCTURES*. VIENNA, Austria, 2002.
- [4] Ch Maierhofer, A. Brink, M. Röllig, H. Wiggenhauser, "Quantitative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental results and numerical simulations," *Construction and Building Materials*, vol. 19, pp. 731-737, 2005.
- [5] Chia-Chi Cheng, Tao-Ming Cheng, Chih-Hung Chiang, "Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves," *Automation in Construction*, vol. 18, pp. 87-92, 2008.
- [6] D. G. Aggelis, E. Z. Kordatos, M. Strantza, D. V. Soulioti, T. E. Matikas, "NDT approach for characterization of subsurface cracks in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 3089-3097, 2011.
- [7] M. Marchetti, S. Ludwig, J. Dumoulin, L. Ibos, A. Mazioud, "Active Infrared Thermography for Non-Destructive Control for Detection of Defects in Asphalt

-
- Pavements," presented at the 9th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Krakow, Poland, 2008.
- [8] Tao DU, "Thermographie infrarouge active par induction électromagnétique application à l'auscultation d'éléments en béton renforcé," Doctorat Thèse de docteur, Génie Civil, Université d'Artois, France, 2010.
- [9] XAVIER P.V. MALDAGUE, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. Canada, 2001.
- [10] G. Klysz, J.P. Balayssac, S. Laurens, "Spectral analysis of radar surface waves for non-destructive evaluation of cover concrete," *NDT & E International*, vol. 37, pp. 221-227, 2004.
- [11] Mathilde LARGET,
"CONTRIBUTION A L'EVALUATION DE LA DEGRADATION DU BETON :
THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ET COUPLAGE DE TECHNIQUES "
Doctorat, Mécanique, L'UNIVERSITE DE BORDEAUX,
Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, Bordeaux, 2011.
- [12] Colette Sirieix, Jean François Lataste, Denys Breysse, Samuel Naar, Xavier Dérobert, "Comparison of nondestructive testing: Infrared thermography, electrical resistivity and capacity methods for assessing a reinforced concrete structure," *Journal of Building Appraisal*, vol. 3, pp. 77-88, 2007.
- [13] Mathilde Larget, Denys Breysse, Colette Sirieix "Characterisation of geometrical properties of concrete using passive infrared thermography," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 15, pp. 759-772, 2011/01/01 2011.
- [14] Stéphane Guibert, "LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE A DETECTION SYNCHRONNE APPLIQUEE AUX MATERIAUX COMPOSITES," Maître ès sciences (M.Sc.) Mémoire, Génie électrique, Université Laval, Canada, 2007.
- [15] Steve Vallerand, "Détection et Caractérisation de défauts par thermographie de phase pulsée," Maître ès sciences (M. Sc.) Mémoire Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval, Canada, 2000.
- [16] Clemente Ibarra Castanedo, "QUANTITATIVE SUBSURFACE DEFECT EVALUATION BY PULSED PHASE THERMOGRAPHY: DEPTH RETRIEVAL WITH THE PHASE," Docteur, Génie électrique, FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE, UNIVERSITÉ LAVAL, 2005.
- [17] Bertrand BOCQUET, "Radiothermométrie micro-ondes," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence: R3030, 2002.
- [18] Jean-Pierre DORY, Françoise EVIN, Michel PIRO, "Chauffage par rayonnement infrarouge," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence: D5930, 1999.
-

-
- [19] Simone MATTEÏ, "Rayonnement thermique des matériaux opaques," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence: BE8210, 2005.
- [20] WAEL BEN LARBI, "COMPARAISON EXPERIMENTALE DE LA THERMOGRAPHIE MODULÉE ET DE LA THERMOGRAPHIE PULSÉE POUR L'ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE DES MATÉRIAUX EMPLOYÉS EN AÉROSPATIAL," Maîtrise, GÉNIE ÉLECTRIQUE ET GÉNIE INFORMATIQUE, UNIVERSITÉ LAVAL, QUÉBEC, 2010.
- [21] Xavier Maldague, Yves Largouët, Jean-Pierre Couturier, "A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments," *Revue Générale de Thermique*, vol. 37, pp. 704-717, 1998.
- [22] C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, "Defect Depth Retrieval from Pulsed Phase Thermographic Data on Plexiglas and Aluminum Samples," in *SPIE Procedures Thermosense XXVI*, 2004.
- [23] Hernán D. Benítez, Humberto Loaiza, Eduardo Caicedo, Clemente Ibarra-Castanedo, AbdelHakim Bendada, Xavier Maldague, "Defect characterization in infrared non-destructive testing with learning machines," *NDT & E International*, vol. 42, pp. 630-643, 2009.
- [24] Hervé CANNARD, Renaud BENCHET, Florent GERBAUD, Stéphane GRIVAUD, Lionel MACOR and "CONTRÔLE PAR THERMOGRAPHIE INFRA-ROUGE DES DOUBLES SOUDURES AVEC CANAL CENTRAL DES GÉOMEMBRANES PLASTOMÈRES
- " presented at the Rencontres Géosynthétiques 2011 2011.
- [25] Akbar Darabi, Xavier Maldague, "Neural network based defect detection and depth estimation in TNDE," *NDT & E International*, vol. 35, pp. 165-175, 2002.
- [26] Xavier Maldague, "APPLICATIONS OF INFRARED THERMOGRAPHY IN NONDESTRUCTIVE EVALUATION," Electrical and Computing Engineering Dept., Université Laval, Quebec, Canada.
- [27] Hongjoon Kim, Kyungyoung Jhang, Minjea Shin, Jaeyeol Kim "A noncontact NDE method using a laser generated focused-Lamb wave with enhanced defect-detection ability and spatial resolution," *NDT & E International*, vol. 39, pp. 312-319, 2006.
- [28] J. Schlichting, Ch. Maierhofer, M. Kreuzbruck, "Crack sizing by laser excited thermography," *NDT & E International*, vol. 45, pp. 133-140, 2012.
- [29] S. E. Burrows, S. Dixon, S.G. Pickering, T. Li, D.P. Almond, "Thermographic detection of surface breaking defects using a scanning laser source," *NDT & E International*, vol. 44, pp. 589-596, 2011.
- [30] Teng Li, Darryl P. Almond, D. Andrew S. Rees, "Crack imaging by scanning pulsed laser spot thermography," *NDT & E International*, vol. 44, pp. 216-225, 2011.
-

-
- [31] Sylvain LAZARE, Éric MOTTAY, "Spectrométries laser en analyse et caractérisation," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence: R2685, 2007.
- [32] Gilles BRASSART, Jean-Louis MEYZONNETTE, Jean-Paul POCHOLLE, "Sources laser," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence: E4020, 1996.
- [33] Liu Junyan, Tang Qingju, Liu Xun, Wang Yang, "Research on the quantitative analysis of subsurface defects for non-destructive testing by lock-in thermography," *NDT & E International*, vol. 45, pp. 104-110, 2012.
- [34] Datong Wu, Gerd Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Revue Générale de Thermique*, vol. 37, pp. 693-703, 1998.
- [35] Manyong Choi, Kisoo Kang, Jeonghak Park, Wontae Kim, Koungsuk Kim, "Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography," *NDT & E International*, vol. 41, pp. 119-124, 2008.
- [36] Jean-Yves ANIZON, Benoît LEMAIRE, Michel SURBLED, "Extraction assistée par micro-ondes," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence: F3060, 2003.
- [37] Alexandre BADEV, "Matériaux diélectriques à faibles pertes utilisés comme résonateurs et filtres dans les circuits micro-ondes," Thèse de doctorat, Génie Electrique, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2008.
- [38] David GROSSIN, "Développement du procédé de chauffage micro-ondes en vue de l'élaboration de céramiques à propriétés électriques particulières," Doctorat, Chimie des Matériaux, Université de Caen, Basse-Normandie, 2006.
- [39] Paul-François COMBES, Raymond CRAMPAGNE, "Circuits passifs hyperfréquences, Guides d'ondes métalliques," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence: E1401, 2002.
- [40] Thierry LEMOINE, "Tubes électroniques hyperfréquences - Tubes à ondes progressives et à champs croisés," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence E1621, 2009.
- [41] Georges ROUSSY, Jean-François ROCHAS, Claude OBERLIN, "Chauffage diélectrique - Technologies," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence D5941 2003.
- [42] RONALD KITCHEN, *RF and Microwave Radiation Safety Handbook*. Oxford: 2nd edition, 2001.
- [43] Daniel Balageas, Patrick Levesque, "EMIR: a photothermal tool for electromagnetic phenomena characterization," *Revue Générale de Thermique*, vol. 37, pp. 725-739, 1998.
-

CHAPITRE 2**SYSTEME D'EXCITATION MICRO-ONDES**

I. INTRODUCTION

Dans le domaine du contrôle non destructif par thermographie infrarouge active, peu d'applications ont été présentées mettant en œuvre un signal d'excitation sous la forme d'un faisceau micro-onde. Souvent, les échantillons réalisés [1-3] sont de petites dimensions afin d'être insérables dans la cavité d'un four ou dans un guide d'ondes. Dans notre travail de recherche, le système d'excitation micro-ondes réalisé permet de solliciter des échantillons de surface relativement plus importante, de l'ordre du mètre carré, ce qui bien correspond mieux aux besoins dans le domaine du génie civil. Le système expérimental envisagé ici, peu onéreux, nous permettra de transmettre les micro-ondes vers des échantillons directement par rayonnement sans avoir besoin de les mettre dans la cavité réduite d'un four.

Ce chapitre présente la conception et la réalisation du système d'excitation de micro-ondes à partir d'un magnétron issu du commerce associé à une antenne cornet. La caractérisation de ce système est ensuite effectuée pour caractériser les signaux micro-ondes émis ainsi que la directivité de l'antenne. La réalisation d'une enceinte de protection haute fréquence est également décrite à la fin du chapitre.

II. REALISATION DU SYSTEME**II.1. Générateur**

La génération des micro-ondes est réalisée à l'aide d'un magnétron classique du commerce d'une puissance de 800W dont la fréquence d'émission est centrée sur 2.45 GHz. La Figure 2- 1.a montre le modèle du four à micro-ondes utilisé pour notre système d'excitation.

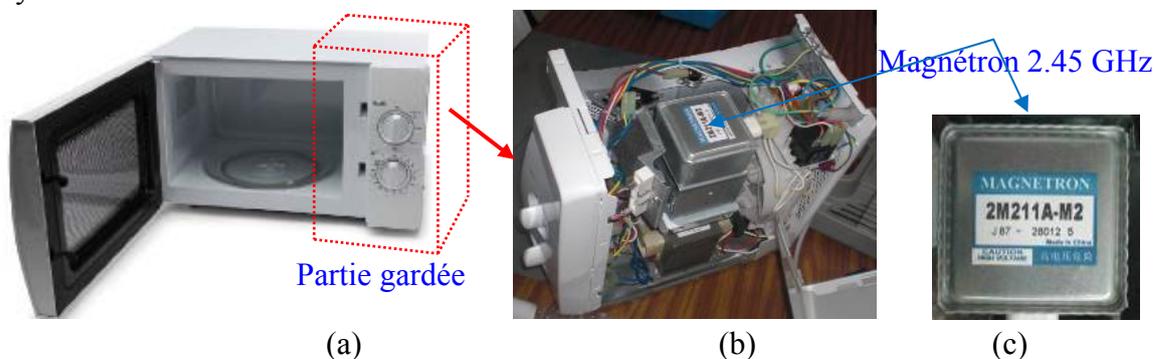


Figure 2- 1 : Four à micro-onde commercial et magnétron utilisés. (a) modèle du four utilisé. (b) ensemble du générateur. (c) magnétron

La partie commande a été gardée pour régler la durée d'échauffement et la puissance de l'émission souhaitées. Dans cette partie, se trouvent aussi les circuits électriques, les contacts assurant l'alimentation électrique ainsi que le fonctionnement du magnétron. C'est ce dernier élément qui engendre l'échauffement grâce au rayonnement des micro-ondes. Ce magnétron est un élément indispensable au système d'excitation qu'il convient de bien choisir afin qu'il soit aisément interchangeable s'il venait à être défaillant. Dans ce cas, on pourra changer seulement le magnétron du four par un autre adaptable sur ce modèle. Les contacts intérieurs assurant la sécurité du four ont été définitivement fermés pour assurer le fonctionnement de cet ensemble. Parmi tous les modèles proposés, notre choix s'est porté sur un modèle qui permet d'associer facilement l'ensemble magnétron et guide d'onde à une antenne cornet.

II.2. Antenne cornet

L'antenne assure la transmission des ondes vers les éprouvettes à chauffer. En général, une antenne est considérée comme un dispositif étant à l'interface entre une énergie électromagnétique guidée et une énergie électromagnétique rayonnée dans l'espace libre [4-6]. La réalisation de cette interface consiste à pratiquer une ouverture dans un guide d'ondes, soit en réalisant une ou plusieurs fentes, soit en le laissant ouvert à son extrémité, ce qui conduit généralement à une rupture d'impédance [6] entre la propagation guidée et la propagation en espace libre. La transition qui consiste à progressivement évaser les bords du guide conduit à une *antenne cornet*. La Figure 2- 2 présente la propagation des ondes électromagnétiques dans la direction OZ.

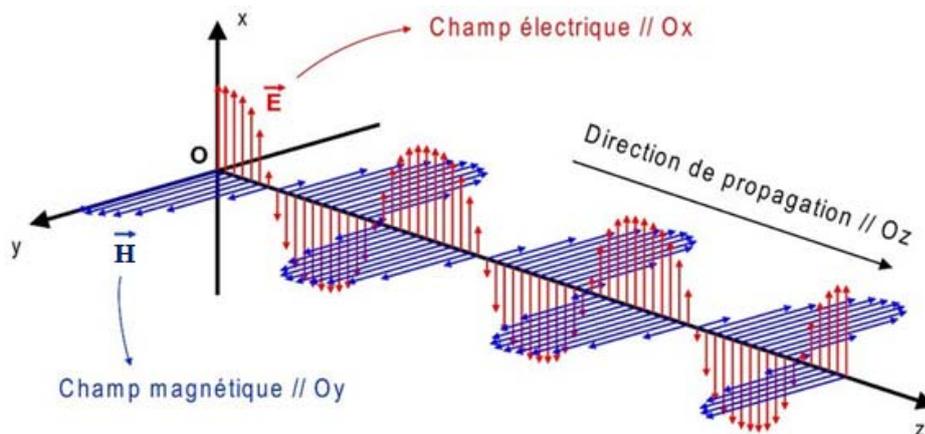


Figure 2- 2 : Propagation des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques (**TEM**) se décomposent en un champ magnétique (**H**) et un champ électrique (**E**) qui sont les ondes planes. Le champ électrique (**E**) est dans le plan *vertical* et perpendiculaire à la direction de propagation des ondes. Le champ magnétique (**H**) est dans le plan *horizontal*, perpendiculaire à la direction de propagation ainsi qu'au champ électrique.

L'antenne cornet peut être du type :

- **sectoriel dans le plan H** : les deux parois de l'antenne, en haut et en bas, restent parallèles tandis que les deux autres parois gauche et droite sont progressivement élargies,
- **sectoriel dans le plan E** : contrairement au premier type, les parois gauche et droite sont parallèles alors que les autres deux parois sont progressivement évasées,
- **sectoriel dans les deux plans** : transition des parois de l'antenne dans les deux sens. Ce dernier type est appelé **cornet pyramidal**.

Dans notre travail, c'est ce type d'antenne **cornet pyramidal**, présenté sur la Figure 2- 3 qui est utilisée. Ce type de l'antenne présente un gain optimal pour ce type de cornet [7].

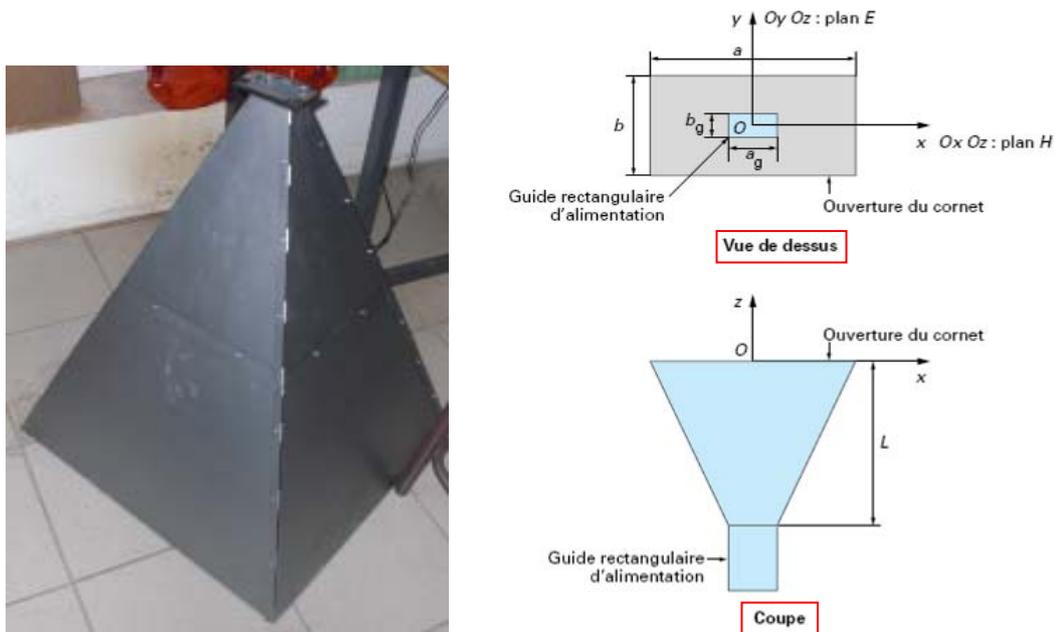


Figure 2- 3 : Antenne cornet pyramidal

Les vues en coupe et de dessus sont présentées Figure 2- 3. Les parois de l'antenne sont composées de plaques en acier de 1 mm d'épaisseur.

Les dimensions des éléments de l'antenne sont :

- Ouverture du cornet : $a = 59$ cm, $b = 56$ cm
- Guide rectangulaire d'alimentation (15 mm de profondeur) :
 $a_g = 62$ mm, $b_g = 36$ mm
- Profondeur du cornet : $L = 66$ cm

L'ouverture du guide rectangulaire d'alimentation a les mêmes dimensions que celle du générateur de micro-ondes afin de faciliter l'assemblage de ces deux éléments du système, visible Figure 2- 4 ci-dessous.

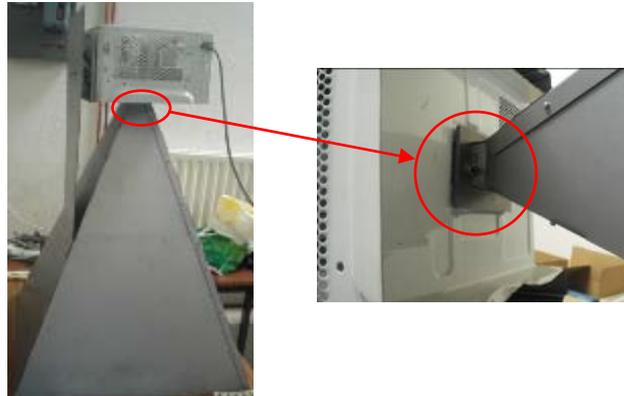


Figure 2- 4 : Assemblage d'antenne et générateur de micro-ondes

La grande ouverture du cornet favorise la diffusion du faisceau micro-ondes vers des corps d'épreuves de grande surface. Les dimensions des éléments de l'antenne donnent aussi un gain spécifique élevé qui sera présenté dans la partie consacrée à la détermination du diagramme de rayonnement (directivité) d'antenne.

Les ondes générées par le magnétron sont guidées par l'antenne, puis se propagent dans l'espace libre. La propagation de ces ondes après avoir traversé l'ouverture d'antenne est divisée en différents zones (Figure 2- 5). Chaque zone, qui est à des distances différentes de l'ouverture d'antenne présente différentes caractéristiques d'ondes.

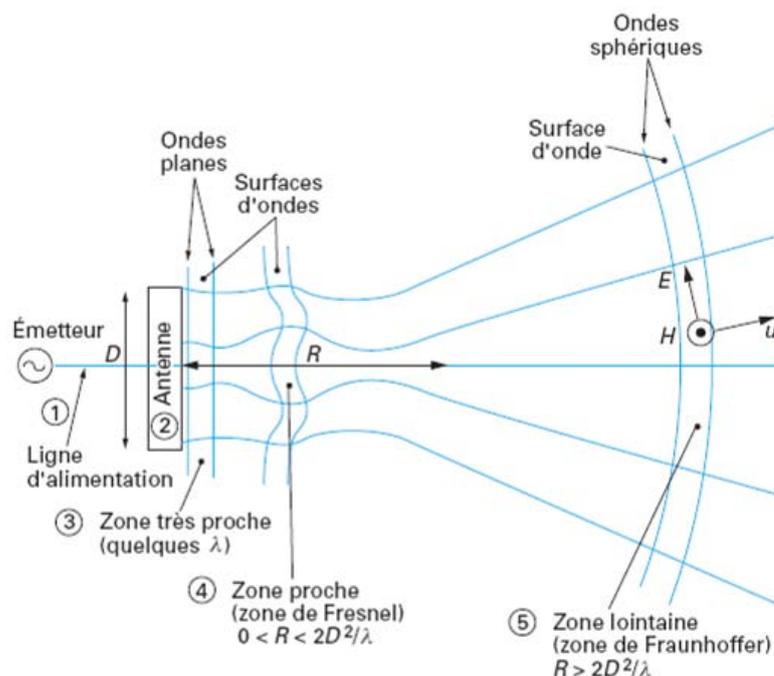


Figure 2- 5 : Différents zones caractéristiques d'une antenne [5, 8]

Les caractéristiques des ondes électromagnétiques se varient selon les zones où elles se propagent [5, 8]:

- **Ligne d'alimentation** : la puissance reste sensiblement constante car le guide d'onde a une atténuation très faible et il n'y a pas de rayonnement. La longueur d'onde guidée λ est généralement différente de la longueur d'onde en espace libre.
- **Antenne** : la puissance est répartie sur l'ouverture du cornet en fournissant une onde plane sur l'ouverture d'une densité moyenne (Puissance divisée par la surface de l'antenne).
- **Zone très proche (épaisseur de quelques longueurs d'onde λ)** : la puissance se propage dans l'espace sous forme d'**onde plane**. La densité de puissance est constante dans un petit cylindre normal à l'ouverture (l'énergie électromagnétique rayonnée reste concentrée à l'intérieur d'un *faisceau tubulaire* enveloppant approximativement l'antenne).
- **Zone proche (épaisseur de $2D^2/\lambda$)** : appelée aussi **zone de Fresnel**, la puissance reste approximativement canalisée dans un cylindre qui a pour section l'ouverture de l'antenne. Les surfaces d'onde se transforment progressivement de plans en **sphères** et la divergence du faisceau devient sensible.
- **Zone lointaine (cette région est appelée aussi zone de Fraunhofer)** : la puissance est rayonnée jusqu'à l'infini sous forme d'ondes **sphériques centrées sur un point voisin de l'ouverture** (le centre de phase). Dans une direction donnée, la puissance est constante dans un petit **cône** ayant cette direction pour axe, la densité de puissance (en W/sr) est une fonction caractéristique de la direction. La densité de puissance (en W/m^2) varie en $1/R^2$ (R étant la distance à l'antenne), et la longueur d'onde est celle de l'espace libre.

III. CARACTERISATION DU GENERATEUR

III. 1. Signaux émis

Les signaux micro-ondes émis sont détectés par un capteur analogique et leur forme visualisée ensuite sur un oscilloscope. On souhaite connaître les différentes phases de fonctionnement du système en fonction des impulsions détectées (les phases d'échauffement et de repos qui correspondent au son émis au cours du fonctionnement du magnétron). Ce capteur de micro-ondes utilisé est présenté dans Figure 2- 6 ci-dessous.



Figure 2- 6 : Détecteurs des micro-ondes

C'est un détecteur de fuites de micro-ondes qui sert à contrôler de manière simple la fuite des rayonnements des fours à micro-ondes vendus dans le commerce. Cet instrument à aiguille indique les fuites de microondes dans une plage de fuite (vert = OK, rouge = à faire contrôler le blindage à micro-ondes).

La sensibilité de cet appareil ne lui permet pas de résister au niveau de puissance élevé rencontré dans la zone de champ proche face à l'antenne. Il a donc été utilisé pour déterminer la directivité de l'antenne en champ lointain ou pour mesurer de faibles niveaux de puissance à côté de l'antenne. Placé à côté de l'antenne, ce capteur de micro-ondes permet de relever les caractéristiques des impulsions aux différentes puissances envoyées. Le signal au champ lointain (détermination de la directivité) ou placé à côté de l'antenne (pas en face) où l'intensité du signal est petite pour savoir

La Figure 2- 7 présente la forme des signaux micro-ondes détectée par le capteur pour une puissance moyenne émise de 360 W et de 600 W.

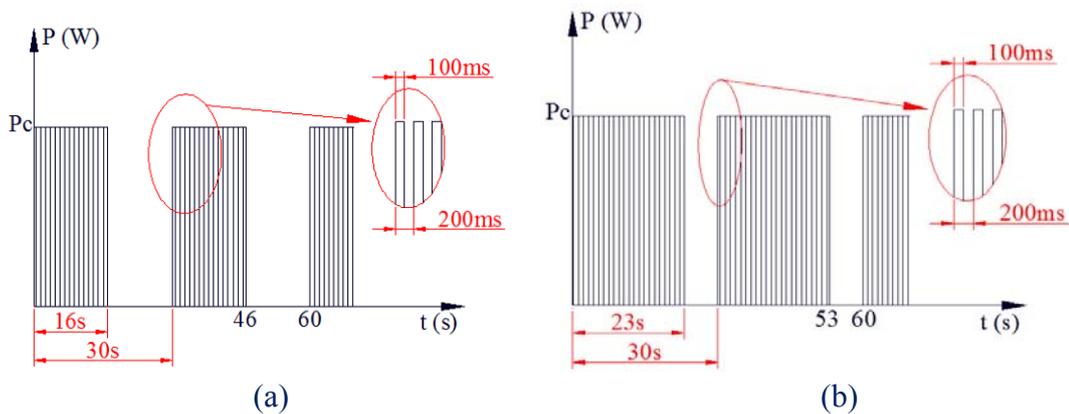


Figure 2- 7 : Signal de commande micro-onde (a) à 360W, (b) à 600W

Les signaux de commande issus de l'alimentation du magnétron servent de référence pour connaître la forme d'onde de la puissance envoyée sur l'échantillon. L'enveloppe de la forme d'onde peut être considérée comme étant un créneau de largeur variable selon la puissance transmise. A la puissance moyenne de **360 W** (Figure 2-7.a), les créneaux ont une période de **30 s** et une *durée* d'impulsion de **16 s**.

A la puissance moyenne de **600 W** (Figure 2- 7.b), la période du créneau reste la même, mais la durée d'impulsion augmente et dure **23 s**.

Pour les différentes puissances qu'il est possible de régler, on observe que ces créneaux sont composés de **petites impulsions** d'une période de **200 ms** et de durée **100 ms**.

La Figure 2- 8 présente la forme **théorique** du signal de puissance crête et la puissance moyenne du train d'impulsion.

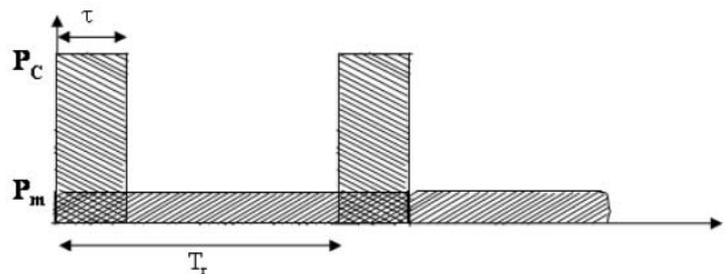


Figure 2- 8 : Puissance crête et puissance moyenne

[9]

La puissance crête est un terme utilisé pour définir le *maximum de puissance* du signal [10]. Le signal émis est caractérisé par la puissance **crête** P_c de l'impulsion, son énergie E et la puissance **moyenne** P_m avec les relations [9, 11]:

$$E = P_c \cdot \tau = P_m \cdot T_r \tag{1}$$

$$P_m = \frac{E}{T_r} = \frac{\tau}{T_r} P_c \tag{2}$$

T_r : Période de répétition des impulsions, son inverse $f = 1/T_r$ est la fréquence de répétition

τ : Durée des impulsions

La puissance d'impulsions (puissance crête) peut donc être calculée à partir de la mesure de la puissance moyenne et de la longueur des impulsions (Puissance moyenne *divisée* par la longueur des impulsions). La **longueur des impulsions** se définit comme le produit de la durée d'impulsion (τ) par la fréquence de répétition ($f = 1/T_r$). Les puissances crêtes pour les deux puissances moyennes sont :

- Pour $P_m = 600 \text{ W}$: $P_c = (200 \text{ ms}/100 \text{ ms}) \times 600 \text{ W} = 1.2 \text{ kW}$
- Pour $P_m = 360 \text{ W}$: $P_c = (200 \text{ ms}/100 \text{ ms}) \times 360 \text{ W} = 720 \text{ W}$

Remarque : Les puissances indiquées sur la commande du four micro-ondes sont les puissances moyennes.

III. 2. Directivité de l'antenne (Diagramme de rayonnement)

Généralement, les antennes sont caractérisées par leur diagramme de rayonnement dans un champ libre [12]. Le *diagramme de rayonnement* est une représentation de la répartition des puissances ou des champs selon certaines directions de l'espace. Il est normalement constitué de 2 diagrammes correspondant à la répartition des champs électriques E et des champs magnétiques H.

Il s'agit d'une méthode de mesure traditionnelle. Généralement, le diagramme qui caractérise l'antenne est le diagramme en *champ lointain*. Il faut donc que la distance entre le détecteur et l'antenne à mesurer soit au moins égale à la distance qui caractérise la zone de **Fraunhofer** [8].

Les mesures en champ lointain ont été effectuées à 25 mètres de l'antenne dans les directions verticales et horizontales. Le dispositif expérimental est montré sur la Figure 2- 9. L'ensemble générateur-antenne est monté sur un trépied orientable en élévation et azimut. Afin de protéger l'opérateur du rayonnement micro-ondes lors des campagnes de mesures expérimentales, une grille de protection est utilisée. Les détails sur cette protection hyperfréquence sont décrits dans la section suivante de ce chapitre.

L'antenne présente un gain de **21.67 dB** dans sa direction principale déterminé à l'aide de la relation ci-dessous [7, 11]:

$$G_{dB} = 10 \cdot \text{Log}_{10}[(4\pi/\lambda^2) \cdot \epsilon_{ap} \cdot AB] \quad [3]$$

Où λ : longueur d'onde (12 cm à 2.45 GHz)

A, B: dimensions d'ouverture de l'antenne (A= 59 cm, B= 56 cm)

ϵ_{ap} : efficacité d'antenne (0.51 en général)

Ces mesures permettent de tracer le diagramme de rayonnement dans un système d'axes polaires (Figure 2- 10). Sur la Figure 2- 10, le lobe horizontal en trait interrompu, représente le lobe principal du faisceau de micro-ondes dans le plan du champ magnétique (plan H). Le lobe vertical, en ligne continue, est le lobe principal de la radiation du faisceau micro-ondes dans le plan du champ électrique (plan E).

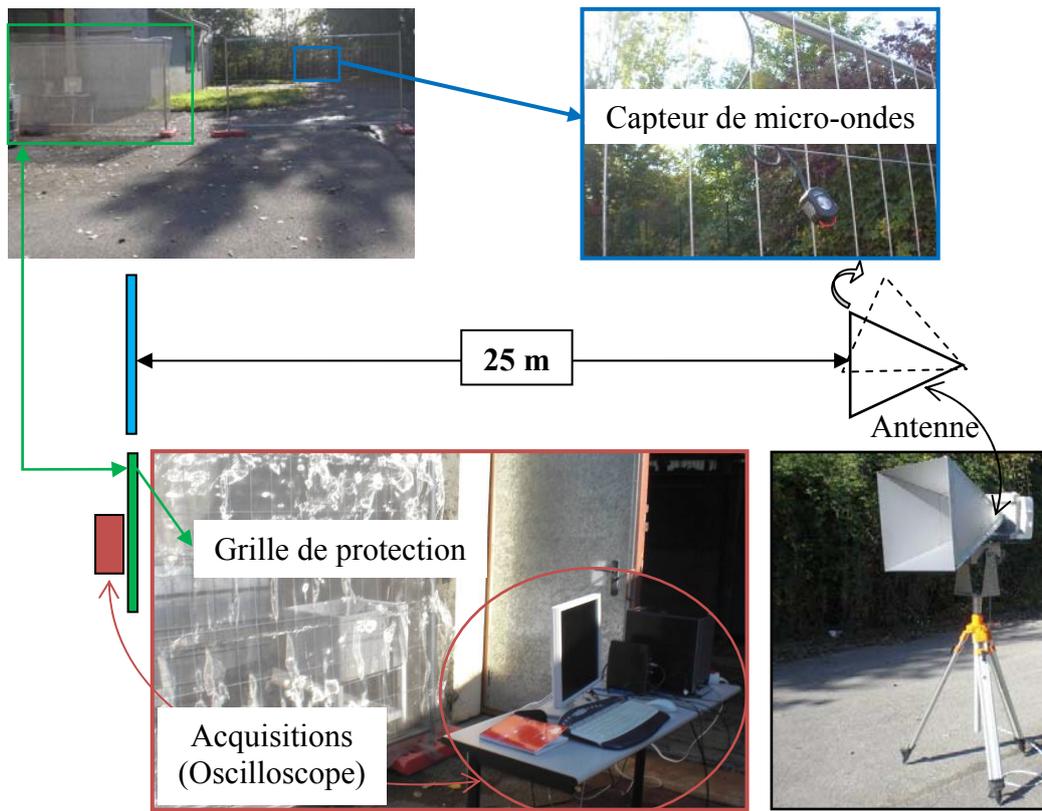


Figure 2- 9 : Campagne des mesures pour déterminer le diagramme de rayonnement

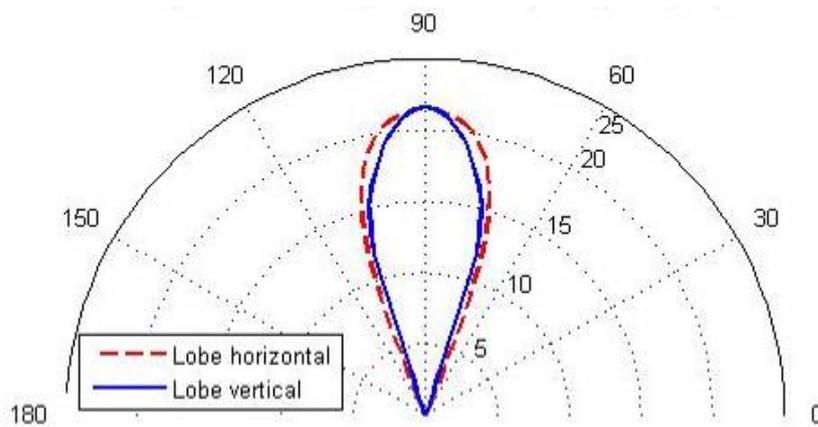


Figure 2- 10 : Diagramme de rayonnement (lobes principaux)

IV. PROTECTION CONTRE LE RAYONNEMENT DE MICRO-ONDES

IV. 1. Risques liés à l'utilisation de la source

Selon la norme relative à la protection des opérateurs vis-à-vis des champs électromagnétiques hautes-fréquences, un individu ne doit pas recevoir des puissances micro-ondes supérieures à 5 mW/cm^2 [13]. Afin de respecter ces normes et à l'instar de ce qui se fait pour les fours à micro-ondes, nous avons construit une enceinte de protection. Il s'agit d'un grillage de protection hyperfréquence qui est exigé pour des essais avec ce système d'excitation de micro-ondes. Une **grille métallique** a été utilisée pour permettre d'obtenir les images thermiques sans fuites de micro-onde [14-15].

IV. 2. Grillage métallique

Notre choix concernant le grillage de protection s'est porté sur le modèle répondant à la référence commerciale suivante **HF +grillage d'acier LF/ inox HEG10** de chez « YSHIELD EMR » en Allemagne. Il se présente sous la forme d'un grillage finement tissé dont les mailles carrées font 1mm de côté. Il est donné pour offrir une protection en hautes et basses fréquences. Le maillage et les caractéristiques plus détaillés sont présentés dans Figure 2- 11 et *Tableau 2- 1* ci-dessous :

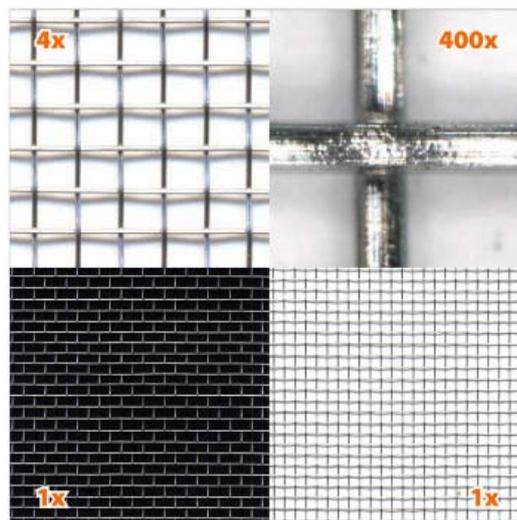


Figure 2- 11 : Grille de protection contre le rayonnement hyperfréquence

Tableau 2- 1 : Caractéristiques de la grille

Caractéristiques	Valeur
Largeur	100 cm
Longueur	rouleau de 25 m / par le compteur
Atténuation	40 dB à 1 GHz
Largeur de maille	1,0 mm
Diamètre de fil	0,16 mm
Epaisseur	0,32 mm
Surface ouverte	74%
Poids	260 g / m ²
Couleur	Argent
Anti-feu matériel, A1 selon la norme DIN 4102:1994	
Conductivité de surface	0,1 ohms (résistance carrée)

En principe, un rayonnement incident rencontrant un obstacle tel un mur ou une cloison peut en partie être réfléchi, absorbé et/ou transmis. Dans notre cas, il convient qu'il y ait le moins d'ondes transmises à l'extérieur de l'enceinte par soucis de protection. Les ondes doivent donc être absorbées et réfléchies. D'après l'article paru dans electrosmog.info (protections hautes-fréquences), l'efficacité d'un dispositif peut s'exprimer de deux façons : efficacité de protection (pourcentage d'atténuation) en % ou en dB, ou pourcentage passant (inverse). La correspondance entre ces deux façons d'exprimer l'efficacité est donnée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2- 2 : Correspondance dB - % d'efficacité

Efficacité en dB	0	3	6	10	13	16	20	23	26	30	40	50	60
% d'efficacité	0	50	75	90	95	97,5	99	99,5	99,75	99,9	99,99	99,999	99,9999
% passant	100	50	25	10	5	2,5	1	0,5	0,25	0,1	0,01	0,001	0,0001

L'atténuation du blindage est testé par le fournisseur en suivant les normes ASTM D4935-10 et/ou IEEE STD 299-2006. Donnée par le fournisseur, la courbe d'efficacité du grillage utilisé pour nos essais est présentée sur la Figure 2- 12.

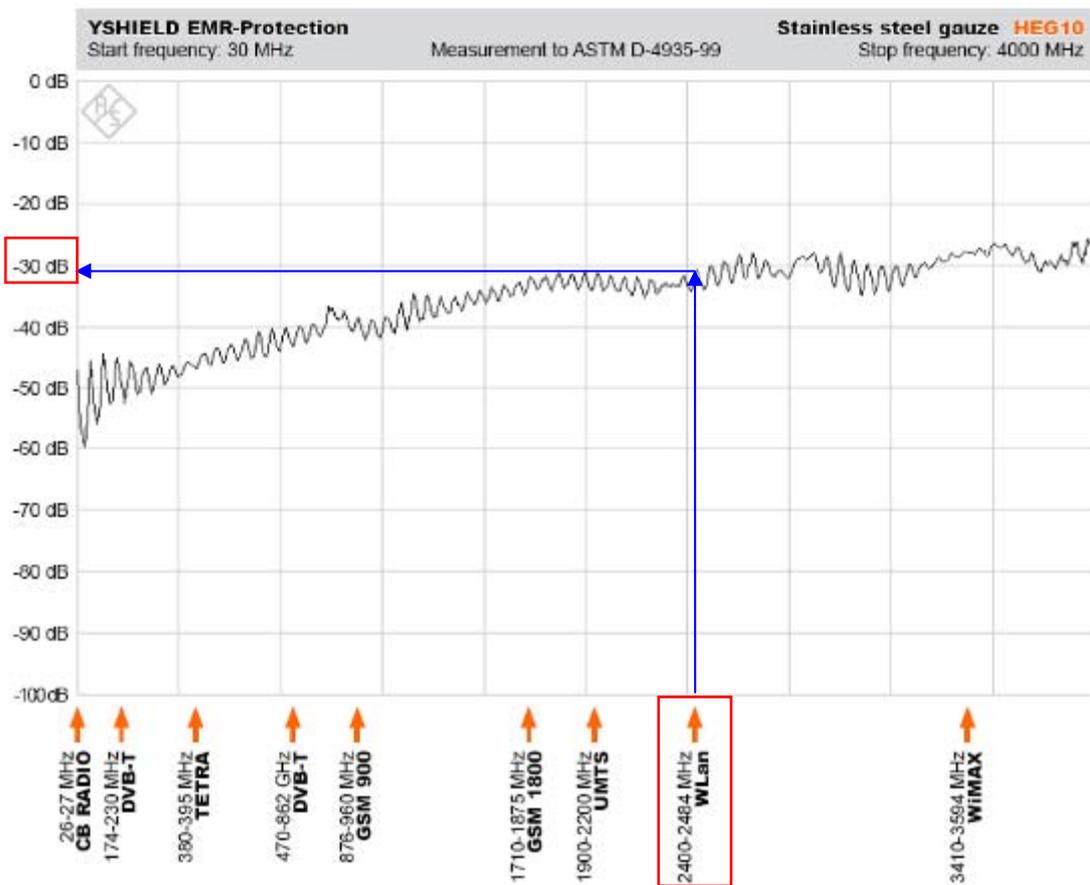


Figure 2- 12 : Courbe d'efficacité de la grille de protection en fonction de la fréquence appliquée

Cette courbe d'efficacité exprime l'atténuation en dB du grillage en fonction de la fréquence du rayonnement incident. Le magnétron émet des micro-ondes à la une fréquence de 2.45 GHz, l'atténuation due au grillage de protection est donc de 30 dB ce qui correspond à 99.9 % d'efficacité.

IV. 3. Mise en place de la clôture de protection

La clôture de protection telle qu'elle a été mise en place est visible sur la Figure 2- 13 ci-dessous :

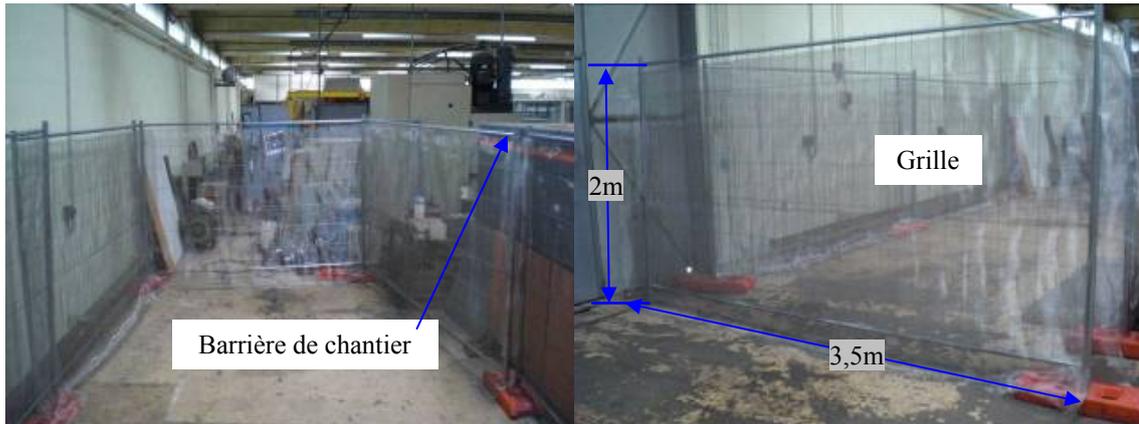


Figure 2- 13 : Montage de la clôture de protection

Les éléments utilisés pour monter cette clôture de protection sont les suivants:

- Des barrières de chantier couramment utilisées lors de la construction des bâtiments ou d'ouvrages d'art, elles mesurent 3.5 m de long et 2 m de haut
- Des supports en béton utilisés comme supports des barrières assurent leur stabilité ainsi que la continuité de plusieurs barrières pour avoir la clôture de longueur exigée
- Des bandes de grillage de protection hyperfréquence d'un d'1 mètre de large et 25 mètres de long
- Des fils suffisamment fins pour fixer le grillage sur la barrière sans le détériorer

Le grillage préalablement découpé à une longueur de 3.8 m (excès de 0.15 m environ à chaque extrémité de barrière de 3.5 m de longueur, ce qui sont prévus pour chaque endroit de recouvrement ou de continuité des écrans de protection) avec chaque barrière métallique pour avoir plusieurs écrans de protection. L'écran qui distingue la partie des *acquisitions* (ordinateur synchronisé à la caméra infrarouge) et de celle d'excitation avec détecteurs est fait avec la superposition de grillage (double couches de grillage) pour nous bien protéger contre le rayonnement de micro-ondes lors des essais (opérateur se situe dans la côté des acquisitions).

Pour assurer la sécurité des alentours de la zone où on fait des essais avec les micro-ondes, une clôture de protection a été réalisée en juxtaposant les écrans sur des pieds (morceaux en béton) à chaque extrémité de l'écran. L'ensemble des zones de nos essais est présenté dans le schéma ci-dessous :

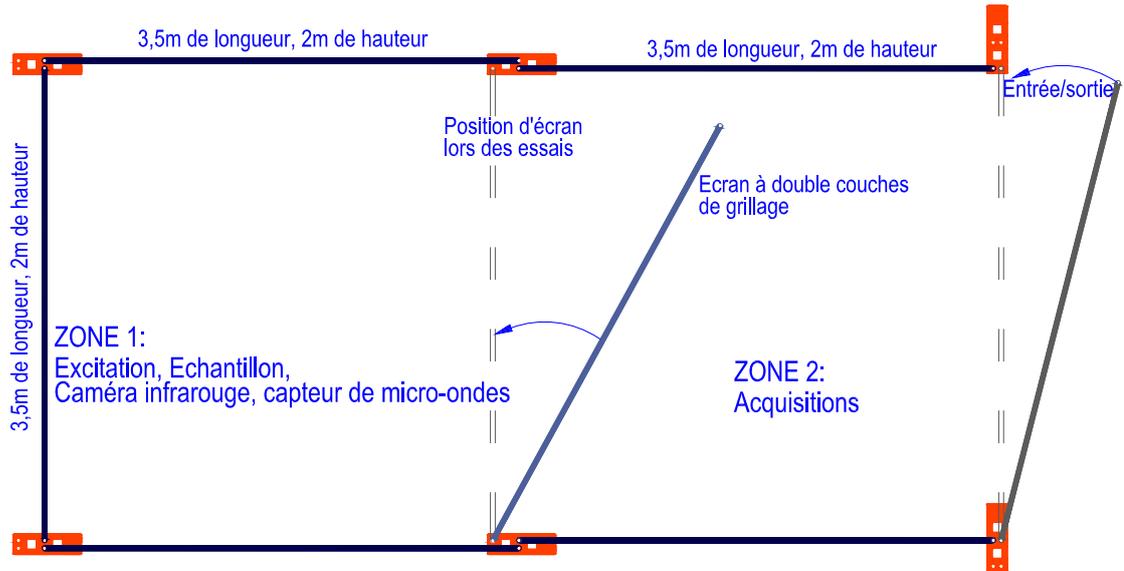


Figure 2- 14 : Schéma de zone d'essais effectués l'enceinte de protection

Comme montré sur le schéma ci-dessus (Figure 2- 14), 7 écrans sont nécessaires pour fabriquer cette enceinte de protection (1 écran de largeur et 2 écrans de longueur). L'écran qui sépare la zone 1 de la zone 2 est revêtu de deux couches superposées de grillage, ce qui assure la sécurité des opérateurs pendant le fonctionnement du système.

IV. 4. Vérification de l'efficacité de la protection



Figure 2- 15 : Détecteur à affichage numérique des micro-ondes

Afin de vérifier, l'efficacité réelle du grillage de protection, nous avons souhaité effectuer des mesures complémentaires à titre de vérification. Ces mesures ont été faites avec beaucoup de soins au niveau de l'écran double couches car il en va de la sécurité des opérateurs. Lors de la conduite de ces tests, le générateur est mis en fonctionnement dans la zone 1 (Figure 2- 14) et les mesures sont faites dans la zone 2 à l'aide du capteur à affichage numérique visible sur la Figure 2- 15.

Lorsque la valeur mesurée par le capteur est supérieure à $5\text{mW}/\text{cm}^2$, il est impératif d'ajouter une deuxième couche de grillage pour diminuer la puissance des micro-ondes transmises. Une attention particulière a été apportée pour confectionner une protection efficace aux jonctions angulaires entre les panneaux. Une fois vérifié, le système de protection est considéré comme étant prêt pour être mis en pratique avec l'excitation de micro-ondes.

V. CONCLUSION

Dans ce chapitre, la conception et la réalisation d'un nouveau système d'excitation de micro-ondes a été réalisé. Les phases de fonctionnement de ce système ont été étudiées en précisant la forme des impulsions en fonction du niveau de puissance délivré. Le diagramme de rayonnement caractéristique de l'antenne cornet pyramidal a également été tracé en champ lointain. La mise en œuvre de cette nouvelle source est présentée au chapitre suivant. L'ensemble de ces essais sont faits dans l'enceinte de protection en respectant les normes de sécurité en vigueur.

REFERENCES DU CHAPITRE 2

- [1] G. Cucurullo, P. G. Berardi, R. Carfagna, V. Pierro, "IR temperature measurements in microwave heating," *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, pp. 145-150, 2002.
- [2] Gennaro Cucurullo, Vincenzo Pierro "A procedure to measure electromagnetic skin depth in microwave heating," *Infrared Physics & Technology*, vol. 46, pp. 49-55, 2004.
- [3] U. Galietti, D. Palumbo, G. Calia and F. Ancona, "New data analysis to evaluate defects in composite materials using microwaves thermography," presented at the 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, University of Naples Federico II, Naples, Italy, 2012.
- [4] RICHARD C. JOHNSON, *Antenna Engineering Handbook*. Atlanta, Georgia, 1993.
- [5] Joseph ROGER, "Antennes, Bases et principes," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence: E3280, 1998.
- [6] Patrick VAUDON, "Antennes à ouverture, Antennes cornets," in *Master Recherche Télécommunication Hautes Fréquences et Optiques*, ed. Université de Limoges.
- [7] Kerim Güney, "Simple Design Method for Optimum Gain Pyramidal Horns," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 55, pp. 205-208, 2001.
- [8] Joseph ROGER, "Mesures radioélectriques sur les antennes," *Techniques Ingénieur*, vol. Référence: R1140, 2001.
- [9] S. MEGUELATI, "COURS RADAR," ed. Université de Blida, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département Aéronautique, Option : installation, 2009/2010.

- [10] François ZIADE, "FAISABILITE D'UNE ETALON CALCULABLE DE PUISSANCE HAUTES FREQUENCES," Doctorat, Electronique et Communications, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, 2008.
- [11] RONALD KITCHEN, *RF and Microwave Radiation Safety Handbook*. Oxford: 2nd edition, 2001.
- [12] Nicolas Zerbib, M'Barek Fares, Thierry Koleck, Florence Millot, "Some numerical models to compute electromagnetic antenna-structure interactions," *Comptes Rendus Physique*, vol. 6, pp. 647-653, 2005.
- [13] M. Bangay, C. Zombolas, "Advanced Measurements of Microwave Oven Leakage," presented at the Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Australia, 2004.
- [14] Juan Monzó-Cabrera, J. L. Pedreño-Molina, A. Toledo, "Feedback control procedure for energy efficiency optimization of microwave-heating ovens," *Measurement*, vol. 42, pp. 1257-1262, 2009.
- [15] J.L. Pedreño-Molina, J. Monzó-Cabrera, M. Pinzolas, "A new procedure for power efficiency optimization in microwave ovens based on thermographic measurements and load location search," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 34, pp. 564-569, 2007.

CHAPITRE 3**APPLICATION DU SYSTEME DE SOLLICITATION PAR MICRO-ONDES
A L'AUSCULTATION D'ELEMENTS EN BETON RENFORCES**

I. INTRODUCTION

De nombreuses méthodes de thermographie infrarouge ont été développées et appliquées dans les domaines du génie civil depuis des années [1-3], notamment pour les diagnostics thermiques de l'enveloppe des bâtiments et pour la détection de défauts dans diverses structures [4-6]. Ces méthodes ont également été appliquées pour les diagnostics dans les infrastructures des travaux publics tels que les routes et les ponts [7-8]. Des défauts présents dans des techniques de renforcements par les matériaux composites et dans des structures en béton sont couramment détectés par diverses méthodes de thermographie infrarouge [9-11].

Ce chapitre présente les premiers résultats de la méthode de thermographie infrarouge active d'auscultation de structures du génie civil, basée sur le nouveau système d'excitation micro-ondes développé spécifiquement dans ce travail et présenté chapitre 2. Des premiers essais sont effectués pour détecter un défaut associé à l'absence de colle entre un renforcement en fibre de carbone (CFRP) et un élément en béton. Ce type d'application est classiquement étudié avec d'autres techniques de sollicitation et a fait été choisi comme illustration des méthodes dans le chapitre 1. Son étude dans ce travail permet de situer l'intérêt de la source micro-ondes par rapport aux sources usuelles. Ensuite, des essais pour la détection un insert métallique derrière un échantillon en bois et pour la détection des armatures d'un mur en béton armé sont effectués pour mettre en évidence les apports de l'approche micro-ondes. Les séries d'essais pour l'analyse sur le phénomène de diffraction mis en évidence dans la détection des armatures dans le mur en béton sont présentées dans la dernière partie du chapitre.

II. RENFORCEMENTS COMPOSITES

Les matériaux composites ont attiré beaucoup l'attention des chercheurs en sciences des matériaux, et en ingénierie. Les applications de ces matériaux ont été également augmentées. Les composites en fibres de carbone (CFRP pour Concrete Fiber Reinforced Polymer) sont couramment utilisés dans la réparation et le renforcement des structures en génie civil [12-15]. Dans ces techniques, l'absence de colle peut provoquer le délaminage des fibres de carbone des éléments réparés ou renforcés [16]. La détection de ce type de défaut par thermographie infrarouge est encore actuellement l'objet de nombreuses publications [4, 11, 17] (c.f. Chapitre 1).

Echantillons CFRP

Deux échantillons de mêmes dimensions ont été préparés, l'un sans défaut, et l'autre avec défaut (Figure 3- 1). Un support carré en béton de 40 cm de côté et 4,5 cm d'épaisseur, a été renforcé par un tissu de composite en fibres de carbone (CFRP) de forme rectangulaire dont les dimensions sont de 22 cm x 40 cm. Ce renfort composite est composé d'une tissu de fibres de carbone bidirectionnels. Il est collé sur le support en béton à l'aide d'une colle spécifique à base époxydique.

Le défaut correspond à une absence de colle sur une surface carrée de 10 cm de côté au milieu de l'échantillon testé.

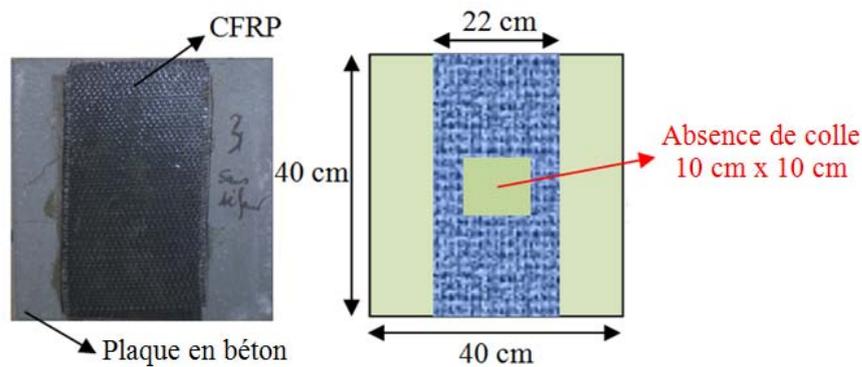


Figure 3- 1: Détails de l'échantillon CFRP

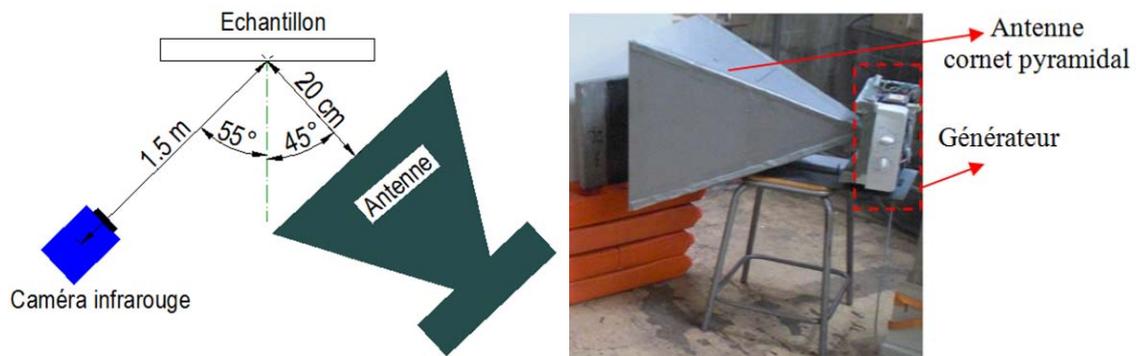


Figure 3- 2: Dispositif d'essai de thermographie infrarouge avec excitation micro-ondes sur l'échantillon CFRP

La position des échantillons à solliciter a été marquée, à 20 cm de l'ouverture de l'antenne (Figure 3- 2). Une caméra infrarouge refroidie sensible aux ondes moyennes dans la gamme de 3-5 μm , équipée d'un capteur matriciel 320 x 256 détecteurs en Antimoniure d'Indium, a été placée à 1.5 m de l'échantillon. Comme il est indiqué sur la Figure 3- 2, elle est orientée selon un angle de 55° par rapport à la normale de manière à pouvoir détecter toute la zone chauffée par le faisceau de micro-ondes provenant de l'antenne. L'antenne est placée à 45° dans la direction opposée à la caméra .Cet

ensemble est placé dans l'enceinte de protection décrite au chapitre précédent. Durant cette expérimentation, les thermogrammes ont été enregistrés à la fréquence d'une image par seconde à l'aide du logiciel ALTAIR dédié à la caméra. Les échantillons ont été chauffés avec une puissance de **360 W** pendant **150 s**. Ce même protocole expérimental a été respecté pour les deux échantillons. Les angles et la position de la source et de la caméra sont restés strictement identiques ainsi que la puissance et la durée de la sollicitation

Principe d'analyse des thermogrammes (Algorithme de contraste)

La non-uniformité du faisceau de micro-ondes, provoquée par leurs réflexions avec l'échantillon et l'antenne, produit un échauffement inhomogène dans l'échantillon sans défaut, et peut conduire à des erreurs d'interprétation. L'amplitude de cette non-uniformité dépend aussi de la nature des matériaux détectés. Ainsi, les essais ont été effectués en deux étapes : la première étape sur l'échantillon sans défaut, et la deuxième sur l'échantillon avec défaut. Ensuite, la séquence des thermogrammes a été analysée par calcul de types de contraste réalisés sous environnement Matlab. Le principe des 2 traitements est représenté dans Figure 3- 3.

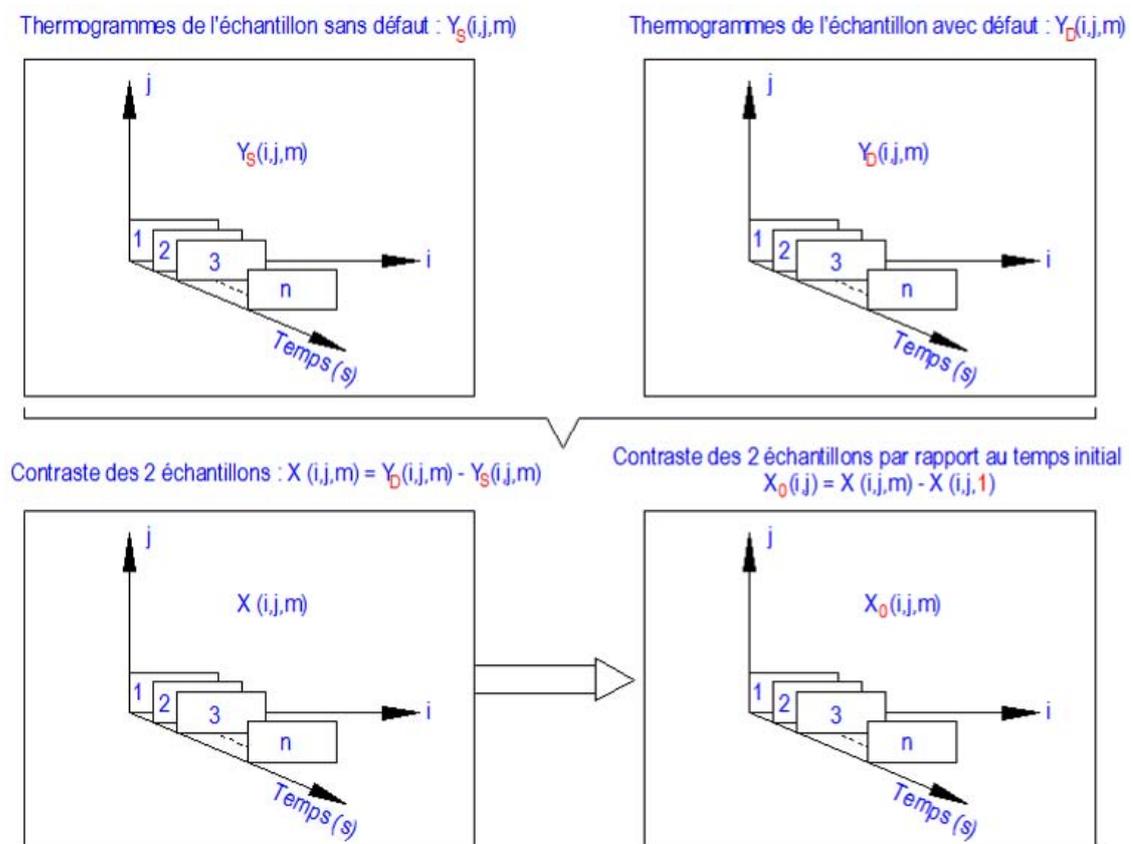


Figure 3- 3: Schéma du principe d'analyse des thermogrammes par algorithme de contraste

Considérons un point $Y (i, j)$ de la surface du corps d'épreuve, on effectue la différence aux mêmes instants entre l'évolution temporelle de la série avec défaut (Y_D) et celle sans défaut (Y_S). Cette démarche ($X = Y_D - Y_S$) permet de s'affranchir de la non-uniformité de la sollicitation. On retranche ensuite à cette série la valeur initiale ($m = 1$) de la température, ce qui permet de ne considérer que l'élévation de la température [$X_0 = X(m) - X(1)$] dans le cas où les températures de ces deux échantillons ne seraient pas identiques (Sans tenir compte du contraste engendré par la différence de leurs températures initiales).

Cet algorithme est appliqué à chaque point ($m = 1, 2, 3...n$) composant le thermogramme à chaque instant correspondant.

Résultats des essais sur échantillons en CFRP

La Figure 3- 4 présente l'application de l'algorithme précédant à tous les points de la surface au temps initial. Bien qu'il existe un gradient de température aux instants initiaux pour les échantillons avec et sans défaut, la Figure 3- 4.c ne montre pas de zones susceptibles de représenter un défaut (ce qui montre bien que le défaut n'a pas été détecté avant la sollicitation par l'excitation de micro-ondes).

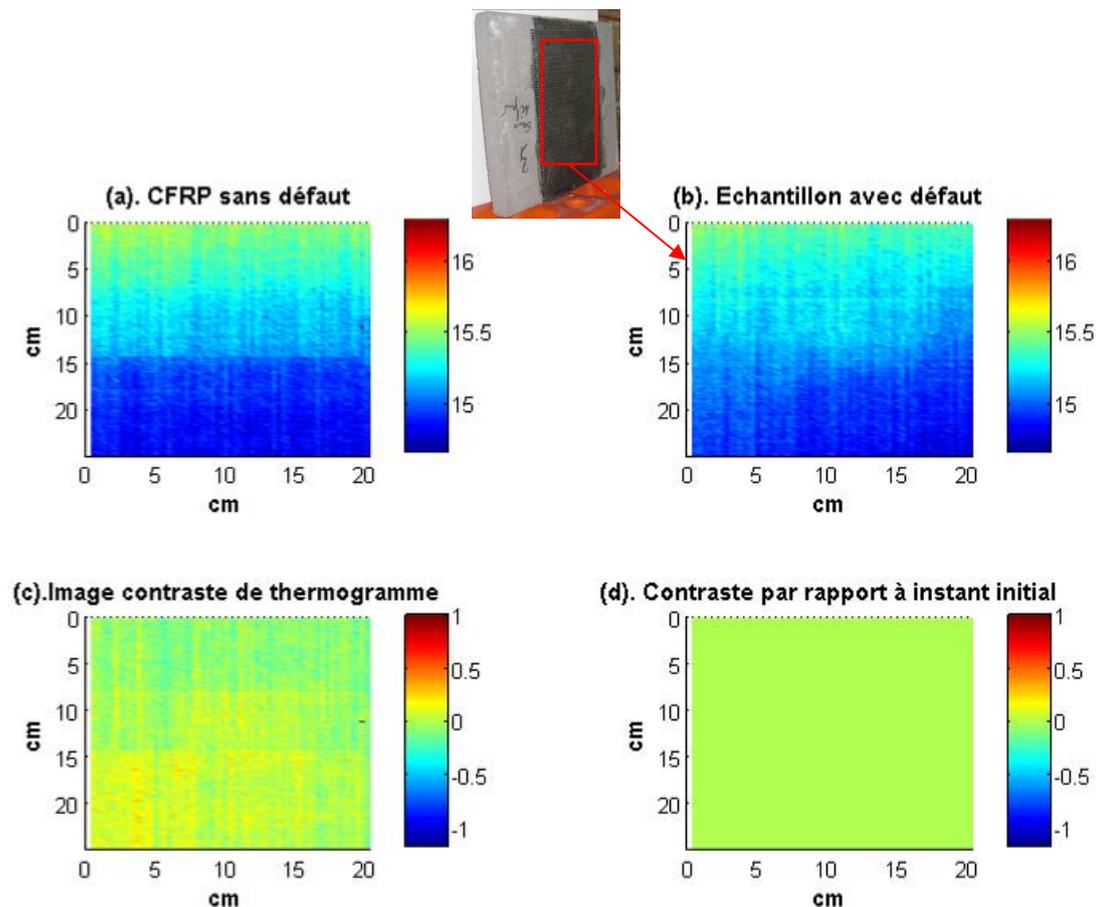


Figure 3- 4: Thermogrammes des essais sur CFRP à l'instant initial

Comme présenté sur la Figure 3- 4, l'analyse de la fonction de contraste permet de se placer à un instant pour lequel le contraste est maximal ($\Delta T=0.68\text{ }^{\circ}\text{C}$). La courbe représentant l'évolution temporelle due aux contrastes est présentée sur la Figure 3- 5.

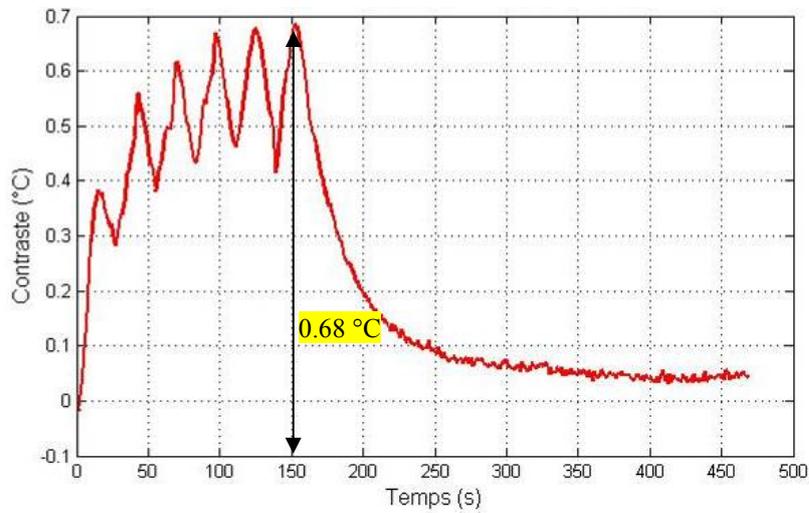


Figure 3- 5: Contrastes temporels des thermogrammes d'échantillons CFRP

La Figure 3- 6 montre les thermogrammes obtenus à $t = 100\text{ s}$, l'algorithme de contraste met en évidence le défaut correspondant à l'absence de colle en dessous du tissu de carbone. L'absence de colle (l'air remplaçant la colle présente une conductivité plus faible que celle de la colle conduit à des températures de surface plus élevées que sur la zone sans défaut.

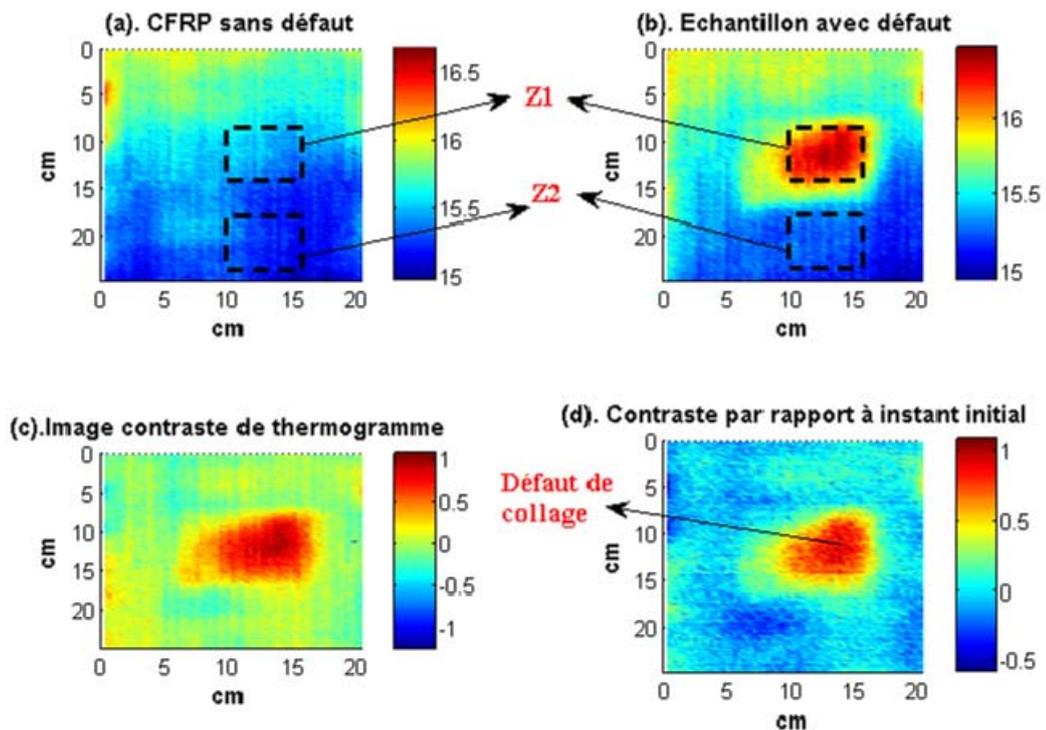


Figure 3- 6: Thermogrammes des échantillons CFRP à l'instant 100 s

Sur les thermogrammes des Figure 3- 6.a et Figure 3- 6.b, supposons que "Z2" une zone sans défaut (zone saine) et "Z1" une zone défectueuse, situées aux mêmes positions sur les deux échantillons. Les évolutions temporelles des températures moyennes de ces deux zones sont présentées dans Figure 3- 7.

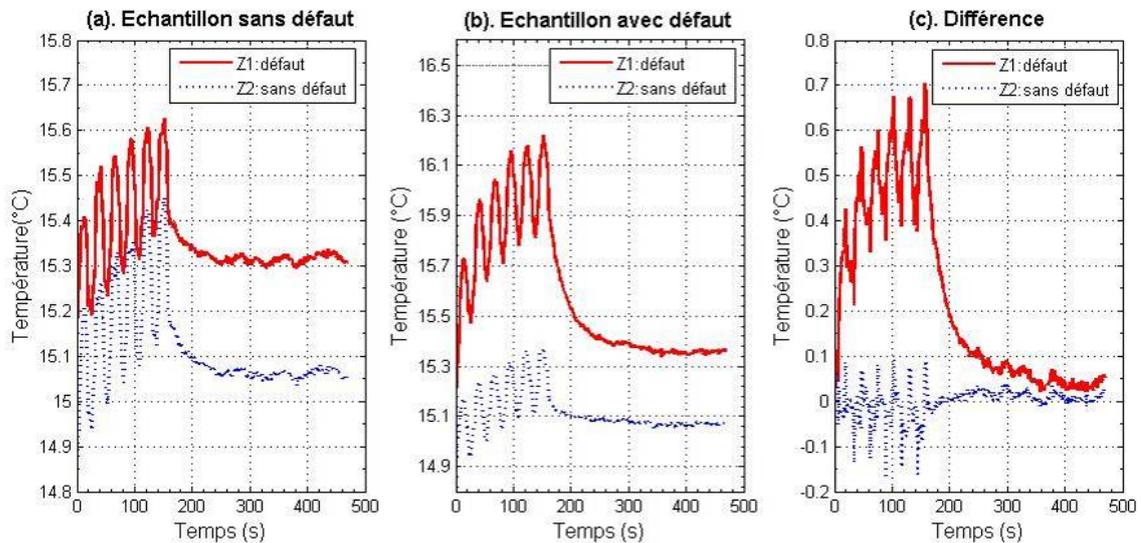


Figure 3- 7: Evolution des températures de surface des échantillons CFRP

Les échantillons ont été sollicités pendant 150 s. On observe que ces courbes de température sont modulées par une oscillation durant les phases de chauffage. –La période et la durée de ces oscillations correspondent à celles des signaux détectés par le capteur de micro-ondes pour une puissance moyenne de 360 W telles qu'elles ont été décrites au chapitre 2.

A la fin de la période de chauffage par micro-ondes, une phase de relaxation rapide tend à faire revenir le système son point d'équilibre initial à. Les deux zones considérées de l'échantillon sans défaut (Figure 3- 7.a) présentent une augmentation moyenne identique de 0.45 °C durant la phase de chauffage.

La deuxième série de mesures effectuée sur l'échantillon avec défaut montre une différence de l'évolution des températures de surface, soit 1 °C (15.2 °C à 16.2 °C) pour la zone défectueuse et 0.45 °C (14.9 °C à 15.35 °C) pour la zone saine. La différence entre ces courbes est montrée sur la Figure 3- 7.c. Elle correspond à la soustraction entre les courbes des Figure 3- 7.b et Figure 3- 7.a, et montre qu'il n'y a qu'un très faible écart de température pour la zone saine alors que la zone défectueuse montre un écart croissant dû au défaut allant jusqu'à 0.7 °C.

Ces résultats montrent que l'excitation à l'aide de micro-ondes permet d'obtenir des résultats similaires à ceux obtenus avec des sollicitations surfaciques (flash, halogène) en ce qui concerne l'accessibilité à la détection de défauts proches de la surface des éléments.

III. RENFORCEMENTS METALLIQUES

III.1. Mise en évidence du comportement d'un insert métallique

III.1.1. Cas d'un anneau métallique

L'intérêt de ce type d'échantillon, c'est d'évaluer la possibilité de détection de la présence d'un matériau derrière une paroi, ce qui est différent des autres méthodes existantes par thermographie infrarouge qui ont pour objectif de détecter des vides ou des cavités dans un matériau [9, 18].

III.1.1.1. Détails des échantillons

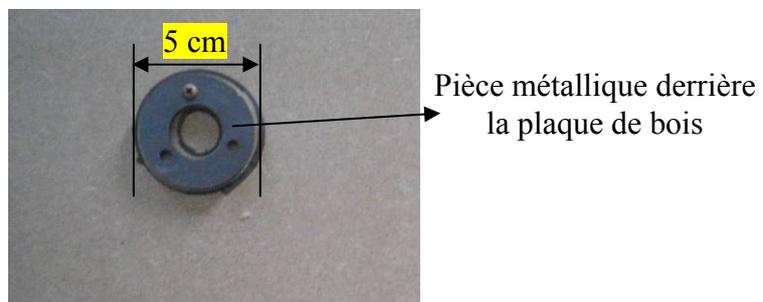


Figure 3- 8: Pièce métallique positionnée à l'arrière d'un panneau de bois

Cet échantillon est composé d'une plaque rectangulaire de bois reconstitué (MDF), de dimensions 0.9 m x 1.2 m et de 10 mm d'épaisseur. Un anneau métallique de 4 mm d'épaisseur est fixé sur une des faces de cette plaque (Figure 3- 8).

III.1.1.2. Dispositif expérimental

Les deux essais sur les échantillons de bois sont effectués avec le même dispositif expérimental que ceux sur les échantillons avec les renforts carbone. La direction de caméra infrarouge (55°) et de l'antenne (45°) restent identiques. Dans ce cas, la caméra infrarouge (Figure 3- 9) a été également placée à une 1.5 m de l'échantillon testé. Cet échantillon a été placé à environ 24 cm de l'ouverture du cornet de l'antenne. Ces échantillons ont été chauffés avec une puissance moyenne de **360 W** comme le cas des essais sur CFRP pendant **180 s**.

Dans la direction normale à la surface sollicitée, la distance optimale à laquelle l'échantillon est le mieux sollicité est de 25.2 cm [19-20]. Si l'échantillon est placé trop loin du magnétron, il n'y aura pas assez d'énergie transmise à l'échantillon et si l'échantillon est placé trop près de la source, il y aura trop de réflexions des micro-ondes, ce qui peut endommager le magnétron.



Figure 3- 9: Dispositif des essais de thermographie infrarouge sur échantillons en bois

III.1.1.3. Résultats des essais

Les échantillons de bois ont été sollicités pendant 180 s, les thermogrammes ci-dessous correspondent à une petite zone indiquée sur la Figure 3- 10 à l'instant initial après l'application de l'algorithme de contraste aux thermogrammes bruts des deux essais. La Figure 3- 10.a et la Figure 3- 10.b ne montrent pas la présence d'un défaut mais seulement la présence d'un gradient de température entre le haut et le bas de la plaque.

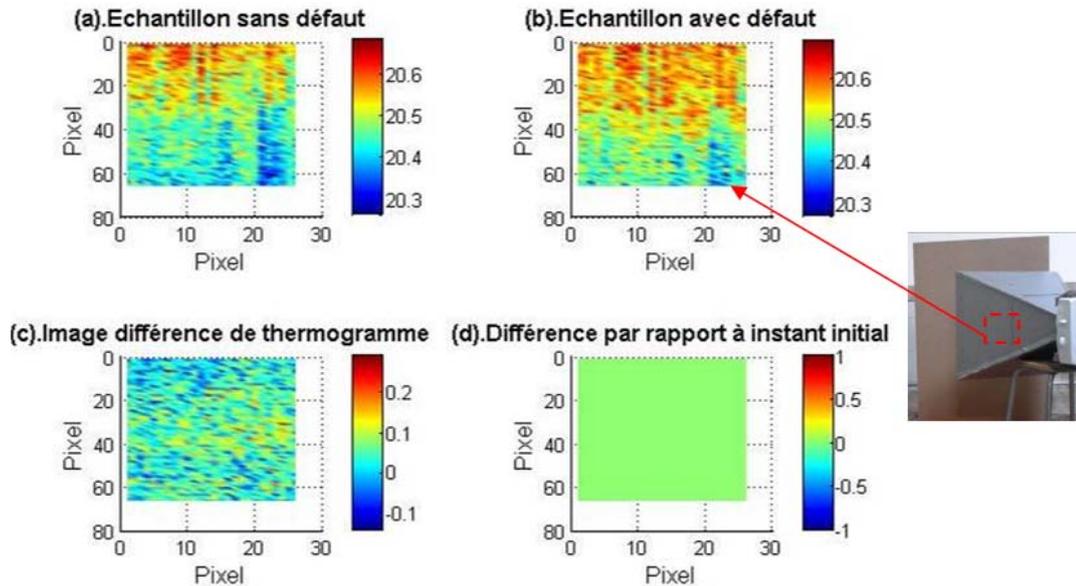


Figure 3- 10: Thermogrammes des essais sur l'échantillon de bois à l'instant initial

La fonction de contraste ci-dessous (Figure 3- 11), montre qu'il est intéressant de se placer à $t = 170$ s pour obtenir un contraste maximal (0.35 °C).

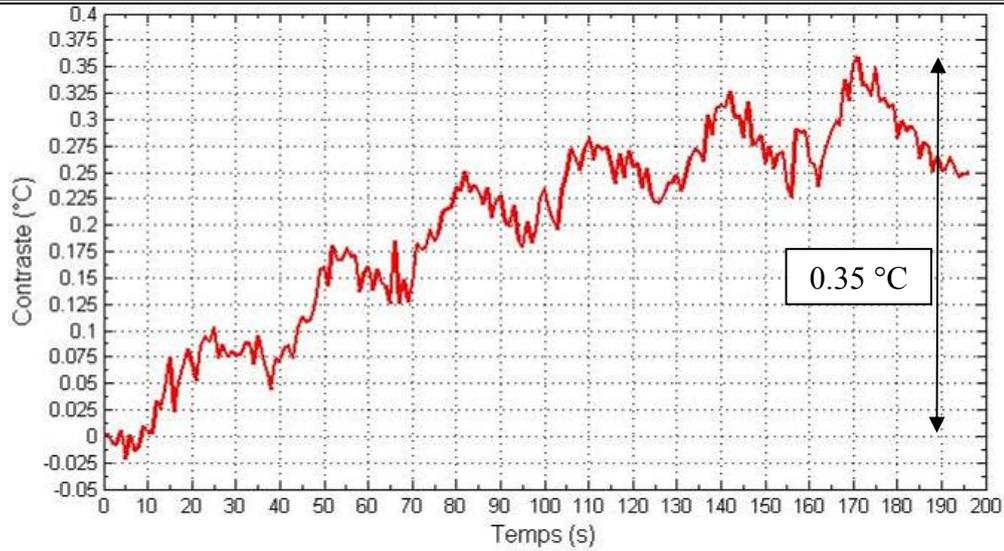


Figure 3- 11: Contrastes temporels des thermogrammes d'échantillons de bois

Les thermogrammes obtenus à $t = 170$ s (Figure 3- 12) montrent la présence de la pièce métallique. La différence de température moyenne entre la zone avec l'insert et une zone saine est de l'ordre de 0.35 °C.

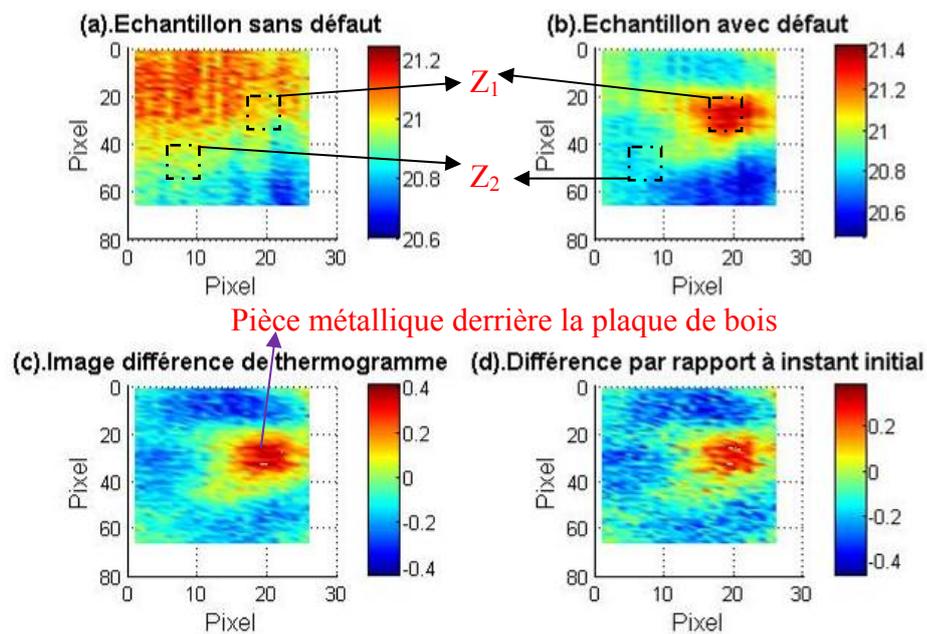


Figure 3- 12: Thermogrammes des échantillons bois à l'instant 170 s

Afin de comparer les évolutions des températures aux mêmes endroits, deux zones Z_1 et Z_2 sont définies. Elles se situent aux mêmes endroits sur chaque échantillon, c'est le même principe qui a été appliqué dans le cas des essais sur les renforts carbone.

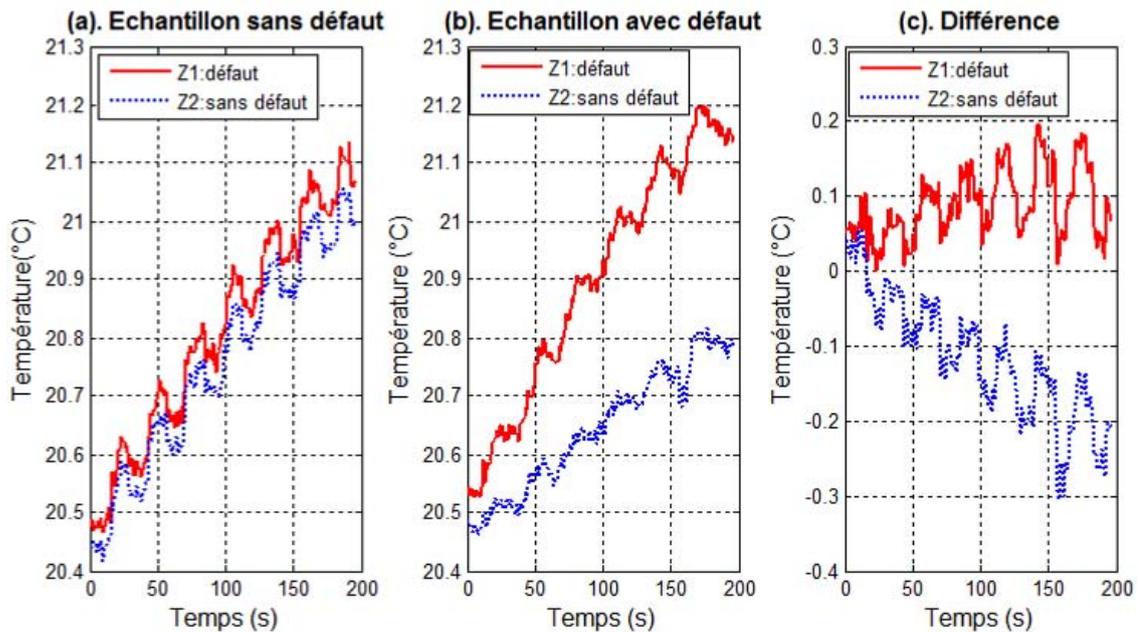


Figure 3- 13: Evolution des températures de surface des plaques de bois

Les Figure 3- 13.a et Figure 3- 13.b montrent les évolutions temporelles de la température des échantillons de bois avec et sans insert métallique pour ces deux zones. Leurs évolutions sont modulées au rythme des phases de fonctionnement du magnétron.

Le premier essai sur une plaque de bois sans défaut montre une augmentation modérée de la température (0.7 °C). Le bois s'échauffe sous l'effet des microondes grâce à l'eau résiduelle, contenue dans ses fibres. Le deuxième essai réalisé en plaçant un insert métallique contre la face arrière de l'échantillon permet aux ondes d'être réfléchies à cet endroit. Ces ondes réfléchies sont été ensuite absorbées de nouveau par l'eau contenue dans le bois et conduisent à une élévation de température plus importante qu'aux endroits sans insert.

La Figure 3- 13.c représente l'évolution temporelle du contraste entre les deux échantillons dans la zone sans défaut Z2 est décroissante car il n'y a pas de pièce métallique qui engendre la réflexion vers la surface chauffée. Les ondes qui traversent toute l'épaisseur de bois chauffent cette couche de bois qui subit en même temps des pertes par convection au niveau de la surface arrière aux endroits sans pièce métallique, ce qui produit une augmentation de température moins élevée à cet endroit. Il apparaît donc que plus le matériau est transparent aux micro-ondes, moins les températures de surface sont élevées.

Remarque : Quand un champ électromagnétique est appliqué sur le bois, les propriétés électriques sont définies par différents processus de polarisation à la suite des interactions entre les molécules du bois et le champ externe [21]. L'effet de polarisation est provoqué par l'arrangement des particules de charges électriques dans le bois, sous l'influence de ce champ extérieur.

L'effet total de polarisation sur le bois est constitué par les **cinq types** suivant :

- Polarisation **électrique**
- Polarisation **ionique (atomique)**
- Polarisation **de dipôle**
- Polarisation **interfaciale (structurel)**
- Polarisation **électrolytique**

Comme d'autres matériaux de construction, les propriétés diélectriques du bois qui ont tendance à limiter la pénétration des ondes dans le matériau, dépendent de différents facteurs comprenant le type de bois (essences), sa densité, sa teneur en eau, la température, la fréquence d'opération et de tout traitement chimique particulier auquel le bois a été soumis. Il a été relevé que lorsque l'humidité ou la teneur en eau augmente, la conductivité électrique augmente, et le comportement des bois saturés se rapproche de celui de l'eau. L'autre facteur important trouvé qui influence les paramètres diélectriques du bois est l'orientation du champ électrique par rapport à la direction du grain, c'est pourquoi il est difficile de trouver deux plaques de bois avec des caractéristiques diélectriques identiques. Afin de diminuer ces variations de caractéristiques, nous avons choisi de prendre du bois reconstitué.

III.1.1.4. Phénomène de diffraction et d'interférence

On observe le contraste des thermogrammes de l'échantillon sans pièce métallique derrière et de celui avec la pièce métallique (comme Figure 3- 12.c) sur une zone plus large sur les échantillons. L'évolution des contrastes à 4 instants différents (30 s, 35 s, 50 s, et 110 s) sont présentés dans Figure 3- 14.

On remarque qu'autour de l'endroit de la pièce métallique derrière de la plaque du bois, l'endroit chauffé sous forme d'un cercle apparaît aussi sur les thermogrammes. C'est l'effet du phénomène de diffraction et d'interférence lorsque les ondes qui ont traversé l'épaisseur du bois et ont en contact avec la pièce métallique. Après le contact avec la pièce métallique, il y a des parties (aux extrémités de l'anneau) des ondes qui diffractent. Les interférences de ces parties des ondes diffractées et de la pièce métallique sont ensuite apparues sur la surface de la plaque de bois, ce qui nous permet de les voir sur les thermogrammes. Etant donné que l'antenne a été mise à 45° par rapport à la surface de la plaque détectée, l'endroit correspondant à la pièce métallique ne se situe pas au centre du cercle correspondant aux parties chauffées par les ondes diffractées.

On rappelle que les champs électriques composant des micro-ondes qui sortent de l'antenne sont verticaux. Donc, la polarisation est dans la direction verticale. Pour cette raison, les deux endroits chauffés sont à gauche et à droite de la pièce métallique (pas en haut ou en bas).

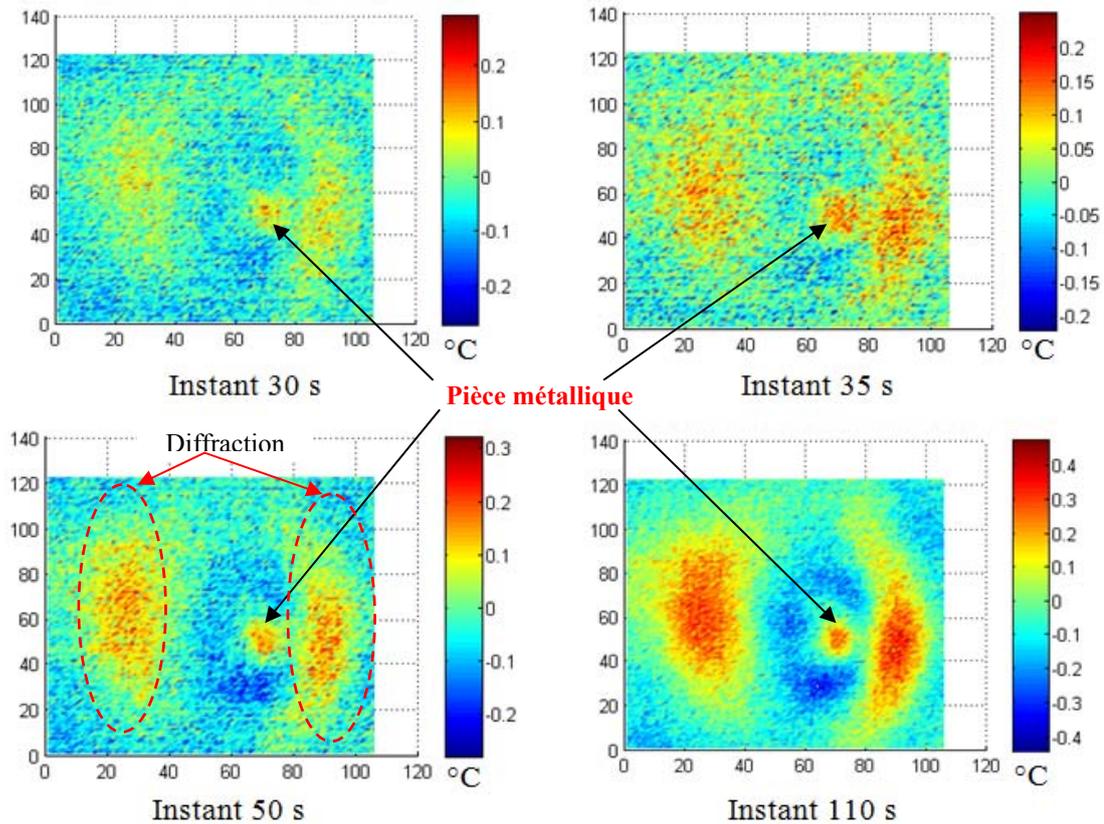


Figure 3- 14 : Evolution du contraste des thermogrammes à quatre instants

Les détails sur l'interprétation des phénomènes de diffraction et d'interférence sont donc à discuter pour la détection d'une pièce métallique. Ils seront présentés dans les parties suivantes de ce chapitre.

La campagne d'essais sur les échantillons en bois a montré l'intérêt des micro-ondes qui permettent de révéler la présence d'une pièce métallique derrière une épaisseur de bois d'un centimètre. L'effet de la sollicitation micro-ondes a provoqué une augmentation de température qui reste très faible (moins de 1 °C) et n'entraîne pas d'altération des matériaux auscultés. Ce type de résultat ne peut être obtenu par les autres techniques de chauffage. Ces travaux préliminaires ouvrent des perspectives intéressantes pour l'auscultation des armatures dans des structures en béton armé.

III.1.2. Cas d'une barre métallique

Pour approfondir la compréhension du phénomène de diffraction créé par un obstacle de taille réduite, il nous est apparu intéressant de faire un essai avec une seule barre métallique placée verticalement contre le mur en béton.

Durant cette série d'essais, deux paramètres sont modifiés :

- l'angle d'incidence du rayonnement en **modifiant la direction de l'antenne** tout en gardant la **barre fixe**, puis
- la position de la **barre a été déplacée** tout en **gardant l'antenne dans la direction normale** à la surface du mur.

Ces essais ont été réalisés en utilisant une puissance moyenne de 600 W pour chauffer l'échantillon pendant 5 mn.

III.1.2.1. Détails des échantillons

Une barre métallique de type ronde lisse de diamètre de 12 mm (RL-Ø12) a été placée verticalement contre le mur en béton de 1 m × 1 m × 6.5 cm.

III.1.2.2. Dispositif expérimental

L'antenne a été placée dans la direction normale à la surface du mur. L'échantillon a été soumis au rayonnement micro-ondes en plaçant l'antenne à une distance de 40 cm de l'ouverture de l'antenne, et la caméra a été mise dans l'autre côté à 2.6 m du mur suivant une direction normale passant par l'axe de la barre pour détecter des températures de surface du mur après la transmission des micro-ondes dans le mur. Le dispositif de cet essai (échantillon et système de chauffage) est montré sur Figure 3- 15.

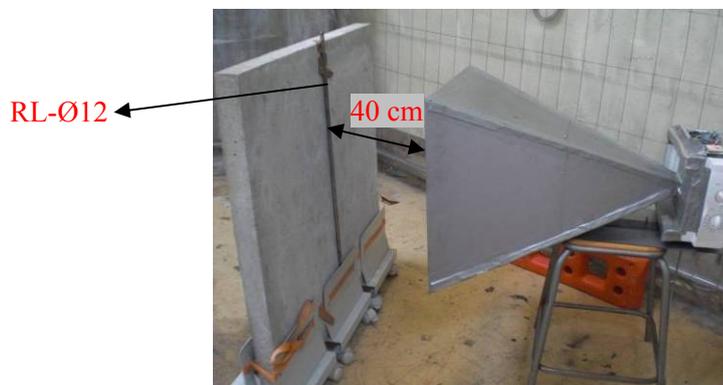


Figure 3- 15 : Dispositif de l'essai sur une barre métallique contre le mur en béton

III.1.2.3. Résultats

Un thermogramme à un instant où il y a un contraste (entre l'endroit de l'armature et celui du béton dans la zone chauffée) maximal est présenté dans Figure 3- 16 ci-dessous.

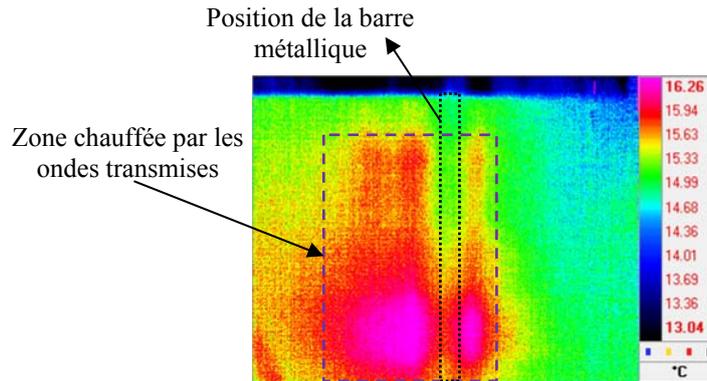


Figure 3- 16 : Thermogramme dans le cas de l'incidence normale de source

Le thermogramme montre une zone chauffée par les micro-ondes qui chauffent la surface de l'autre côté. Ce résultat nous montre la possibilité de pénétration des micro-ondes dans la profondeur du mur en béton. Il est à noter également que l'endroit abrité par la barre qui est un obstacle aux micro-ondes n'a pas été chauffé du fait que les ondes sont réfléchies.

III.1.2.4. Impact de la position de la caméra

Pour évaluer la dimension exacte d'un objet dans le sens parallèle à une surface détectée par une caméra infrarouge, la caméra doit être placée dans un axe perpendiculaire à la surface détectée. Par contre, lors de nos essais de thermographie infrarouge sur des échantillons de mur en béton et de mur en béton armé, la caméra a été placée selon une direction faisant un angle β (du côté gauche) par rapport à l'axe perpendiculaire (Δ) à la surface détectée pour ne pas être soumis au faisceau de micro-ondes et pour pouvoir aussi détecter la totalité de la surface chauffée par les micro-ondes. Cette direction (angle β) doit être donc prise en compte dans la déduction de la position d'une barre (armature dans le mur en béton armé) ainsi que le décalage (sur le thermogramme) par rapport à sa position réelle. A cet effet, les relations géométriques simples correspondantes aux différents cas de thermogrammes obtenues sont présentées dans les figures ci-dessous.

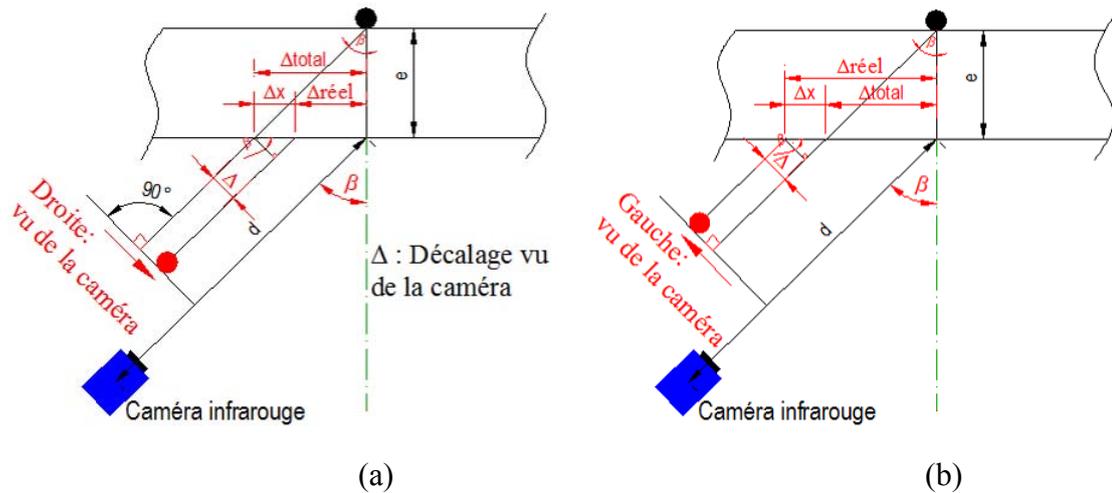


Figure 3- 17: Relations géométriques dans le cas du décalage à gauche sur le thermogramme

Sur la Figure 3- 17, le décalage réel $\Delta_{réel}$ (si la caméra est placée dans la direction perpendiculaire à la surface détectée) d'une barre dans le mur du béton à la profondeur « e » (épaisseur de la couche d'enrobage) peut être déduit de deux façons différentes correspondant à deux cas de décalages (Δ) sur les thermogrammes obtenus. Dans le cas où le thermogramme montre le décalage Δ à **droite** par rapport à sa position réelle (Figure 3- 17.a), le décalage réel de cette barre est déterminé par :

$$\Delta_{réel} = \Delta_{total} - \Delta_x = e \cdot \tan\beta - (\Delta/\cos\beta) \quad (1)$$

Dans l'autre cas où le thermogramme donne le décalage Δ à **gauche** par rapport à sa position réelle (Figure 3- 17.b), le décalage réel de la barre est :

$$\Delta_{réel} = e \cdot \tan\beta + (\Delta/\cos\beta) \quad (2)$$

Le décalage réel dans ces deux cas ci-dessus est à **gauche** de la position de la barre. Dans le cas contraire où le décalage réel est à **droite** de la position de la barre, la relation pour déterminer cette valeur est montrée dans Figure 3- 18 ci-dessous :

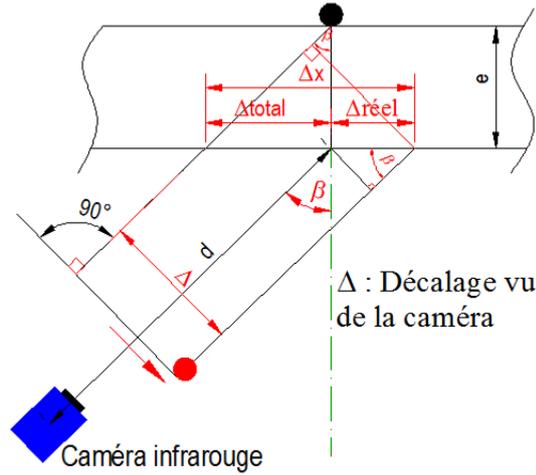


Figure 3- 18: Relations géométriques dans le cas de décalage à droite sur le thermogramme

Dans ce cas, il n’y a qu’un cas de décalage Δ à **droite** dans le même sens que le décalage réel déterminé par:

$$\Delta_{\text{réel}} = (\Delta/\sin\beta) - e \cdot \tan\beta \tag{3}$$

III.1.2.5. Effet de l’angle d’incidence de la source

L’étude sur l’effet de la modification de direction de l’antenne a été effectuée avec des essais par méthode en transmission ayant le dispositif expérimental visible sur Figure 3- 19 ci-dessous.

L’échantillon a été chauffé en mettant l’antenne à 40 cm dans la direction, et la caméra a été mise dans l’autre côté à 2.6 m du mur dans la direction normale au mur. Quatre essais ont été effectués correspondant aux quatre directions de la source ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ et 60°).

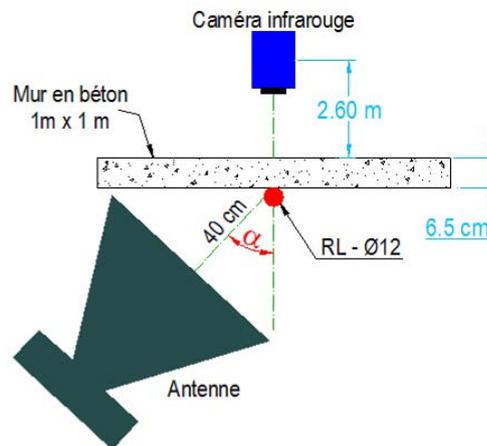


Figure 3- 19: Essais avec une barre fixe et en changeant l’incidence de l’antenne

Les thermogrammes obtenus pour ces essais sont présentés Figure 3- 20. Ils permettent d'évaluer les variations de « Δ » et de « d » lors des changements de direction de l'antenne. Ces deux valeurs changent légèrement en fonction des directions de la source, ce qui correspond aux aspects d'optique géométrique.

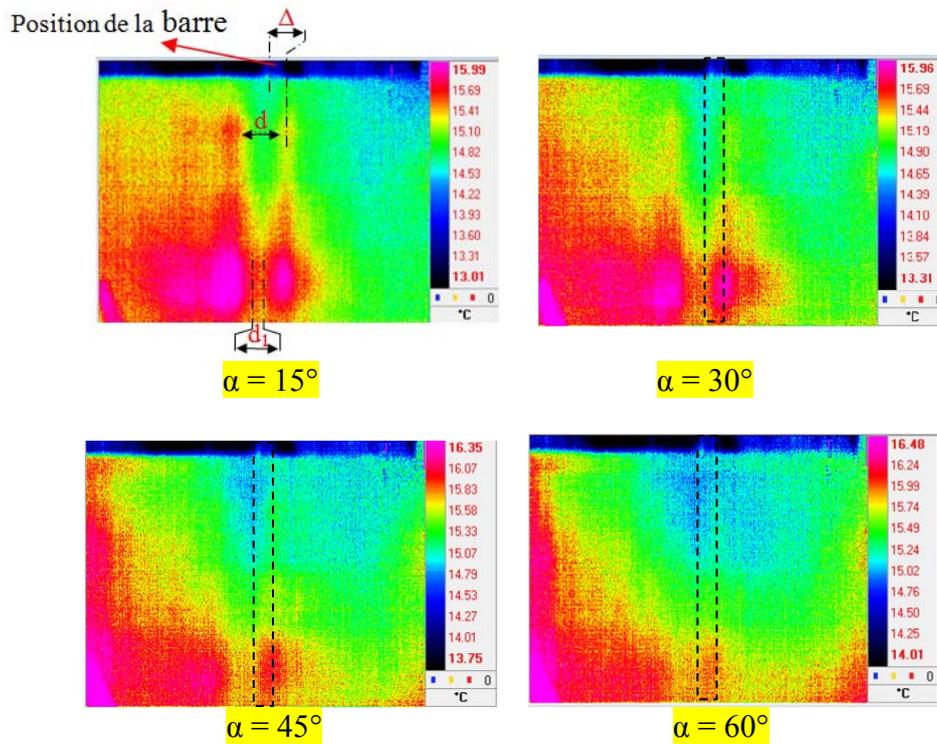


Figure 3- 20: Thermogrammes des essais avec la barre et en changeant l'incidence de l'antenne

Les évolutions de ces deux valeurs sont présentées dans la Figure 3- 21.

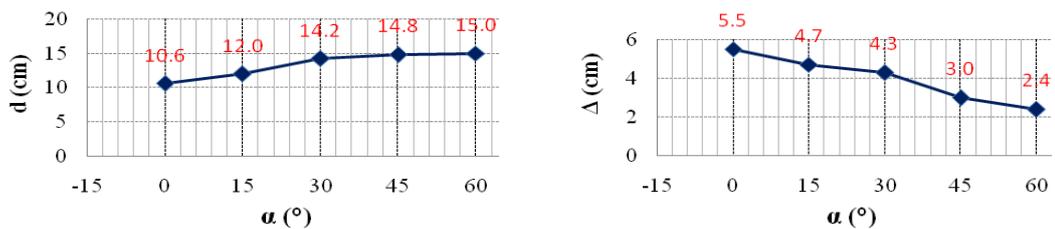


Figure 3- 21: Evolution de « d » et de « Δ » en fonction de direction de l'antenne

La valeur de « d » est augmente légèrement avec la direction de l'antenne tandis que la valeur de « Δ » diminue (*la source se situe à droite par rapport aux thermogrammes*). On observe que la valeur de « d_1 » augmente également. « d » et « d_1 » signifie l'effet de l'obstacle aux micro-ondes.

III.1.2.6. Effet de la translation de la source

En gardant la position de la caméra infrarouge, on fixe aussi une incidence normale ($\alpha = 0^\circ$) de l'antenne (voir les dispositifs de la Figure 3- 22), et on décale la position de la barre vers la gauche (vue de caméra).

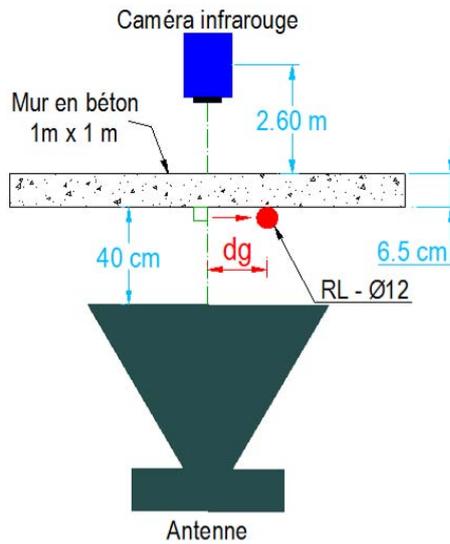


Figure 3- 22: Essais en décalant la barre et en gardant la direction normale de l'antenne

Les thermogrammes obtenus sont présentés Figure 3- 23 pour les différents décalages de la barre à la surface du béton.

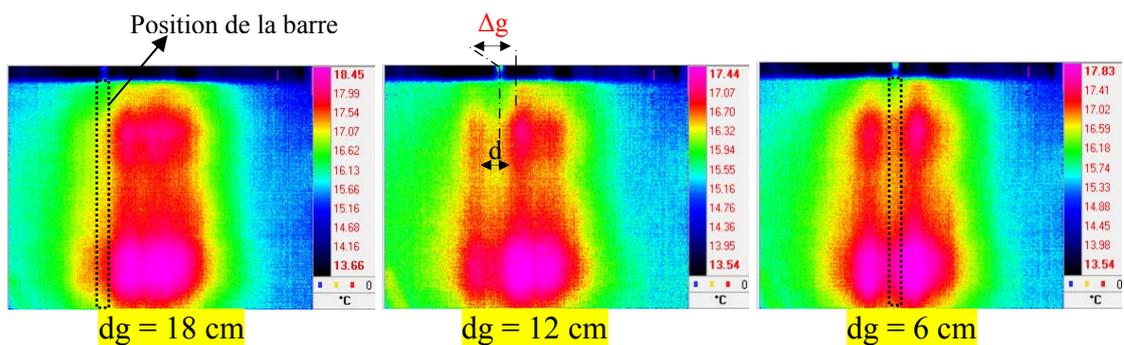


Figure 3- 23: Thermogrammes des essais à direction normale de l'antenne et décaler la barre

Le décalage de 18 cm est un peu trop grand par rapport à la dimension de la zone chauffée par les micro-ondes. Dans ce cas, on ne voit pas d'écart « d », ce qui nous confirme encore que cet écart est vraiment dû à l'obstacle des micro-ondes devant l'interférence détectée.

Pour des décalages de 12 cm et de 6 cm, l'écart dû à la présence d'un obstacle apparait de façon à ce que la barre se situe au milieu de cet écart. Pour ces deux cas de décalage, l'écart a presque la même valeur (10.2 cm pour le décalage de 6 cm, et 10.4 cm pour le décalage de 12 cm) ; ce dont on doit tenir compte lorsqu'il y a plusieurs barres car il y aura plusieurs écarts autour des barres, ainsi qu'une superposition de zones de températures plus élevées.

III.2. Détection d'un réseau d'armatures dans un élément en béton

Les résultats obtenus lors de la détection d'une pièce métallique derrière une plaque de bois d'un centimètre d'épaisseur nous ont encouragés à poursuivre vers la détection d'armatures métalliques à l'intérieur d'une paroi en béton. Il existe actuellement des outils reconnus pour la détection de ces armatures métalliques dans le béton. Nous pouvons citer les appareils de type « Ferroskan » qui sont des détecteurs électromagnétiques dimensionnés pour ce type d'application. Ces appareils peuvent réaliser ce type d'auscultation et estimer les épaisseurs d'enrobage en effectuant un balayage d'une dalle en béton armé [22]. La méthode permet de restituer les informations sous forme d'images traduisant les coefficients de réflexion et de transmission des micro-ondes [23], et par une méthode de coefficients de réflexion des micro-ondes en champ lointain [24]. Ce type de résultats reste encore inaccessible par thermographie infrarouge active à partir des sources de sollicitation classiques.

Une autre utilisation, décrite depuis des années 1990, est l'application du système de chauffage par micro-ondes sur le béton pour accélérer son processus d'hydratation et donc l'évolution de sa résistance mécanique. Dans ce type d'application, la température du béton chauffé par les micro-ondes a augmenté de 23 °C à 50 – 60 °C après quelques minutes d'échauffement. A la fréquence de 2.45 GHz, les micro-ondes peuvent pénétrer jusqu'à 2 cm de profondeur dans le béton frais [25].

III.2.1. Détails sur la conception des murs

Les dimensions des échantillons (la largeur et la longueur de la dalle) doivent être en rapport avec l'ouverture de l'antenne pour minimiser les effets de diffraction de leurs extrémités [24]. En plus, il faut qu'elles correspondent accessoirement aux tailles des structures réelles en génie civil, ce qui est un des objectifs souhaités dans le développement de cette nouvelle méthode. Pour ces raisons, une surface d'échantillon de 1 m × 1 m a été retenue pour les essais. Les dimensions et les paramètres des échantillons sont montrés en détail sur la Figure 3- 24 ci-dessous.

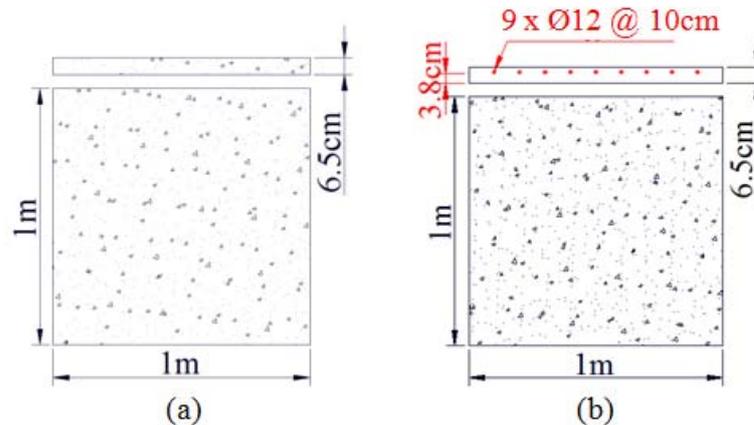


Figure 3- 24: Schémas des échantillons, (a) Mur en béton, (b) Mur en béton armé

Deux échantillons ont été préparés, l'un est une paroi en béton de dimension de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ et de 6.5 cm d'épaisseur et l'autre est une paroi de mêmes dimensions (Figure 3- 24) comportant des armatures. La formulation suivante du béton a été utilisée 1:1.6:4.45:4.7 (eau/ciment/sable/gravier). Du ciment haute performance de type I 52.5R, du sable (0/4) et des graviers (4/12) ont été utilisés. Les armatures verticales étaient les barres haute adhérence (HA) de 12 mm de diamètre espacées régulièrement de 10 cm entre les axes des barres, comme représentés dans Figure 3- 24.b.

Une épaisseur d'enrobage du béton de 3.8 cm sur l'un des côtés de la surface exposée aux micro-ondes a été mesurée. Cette valeur de l'enrobage correspond aux valeurs couramment rencontrées dans les structures de génie civil. Généralement, elles se situent dans un intervalle allant de 1 cm à 5 cm selon les ouvrages. Les échantillons ont été exposés à la température ambiante et à l'humidité ambiante pendant 1 mois avant d'être auscultés par thermographie infrarouge au bout de 2 mois.

III.2.2. Dispositif expérimental

Les échantillons ont été placés à 40 cm de l'ouverture de l'antenne (distance selon l'axe de l'antenne). La caméra infrarouge a été placée à 2.32 m de l'échantillon faisant une direction de 30° entre l'axe de la caméra et la ligne perpendiculaire à l'axe de l'échantillon. Cette configuration permet de détecter l'ensemble de la zone chauffée par le faisceau de micro-ondes (Figure 3- 25). L'antenne a été placée avec un angle de 45° permettant de chauffer l'échantillon avec une distance suffisamment éloignée pour qu'elle puisse être vue par la caméra. Une zone de 31 cm de haut sur 98 cm de long a été observée.

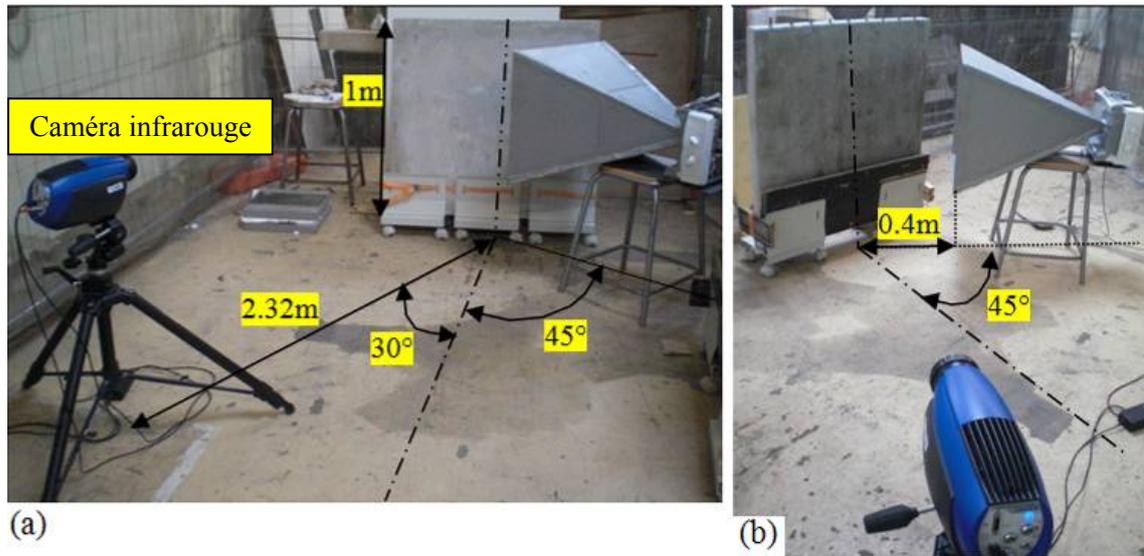


Figure 3- 25: Dispositif expérimental, (a) Essai sur mur en béton, (b) Essai sur mur en béton armé

Les deux murs ont été chauffés avec une puissance moyenne de 600 W pendant 5 mn. Cette procédure a été réitérée pour les deux types de murs avec et sans armatures.

III.2.3. Premières observations

En appliquant l'algorithme de contraste à tous les points sur la surface des murs en béton et en béton armé, les thermogrammes à l'instant initial sont présentés Figure 3- 26. On n'observe un faible gradient de température à la surface de chaque éprouvette à l'instant initial, mais il y a un écart de températures d'environ 5 °C entre les deux éprouvettes (Figure 3- 26.a et Figure 3- 26.b). Les essais ont été réalisés à des dates différentes et la température ambiante du hall d'essai avait sensiblement changé. Ceci nous impose de calculer le contraste au temps initial et de le soustraire des contrastes à chaque instant avant d'estimer la visualisation.

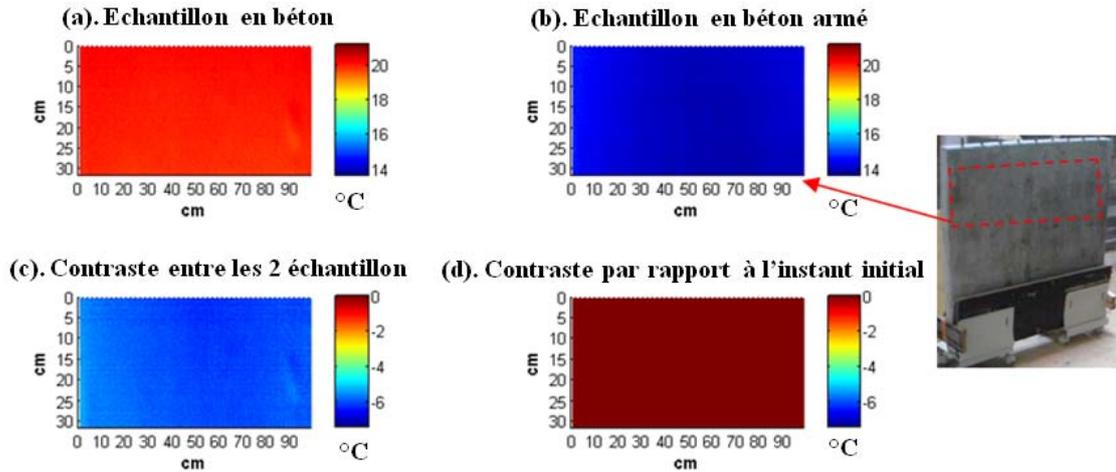


Figure 3- 26: Thermogrammes et contrastes des murs à l'instant initial

La Figure 3- 27 montre les thermogrammes à l'instant de 250 s. L'algorithme de contraste met en évidence une alternance de zones plus et moins chaudes qui reproduit la périodicité des armatures dans le mur en béton (Figure 3- 27.d). Afin d'observer plus précisément à l'évolution spatiale de cette alternance, un profil horizontal a été extrait sur l'image de contraste thermique (Figure 3- 28).

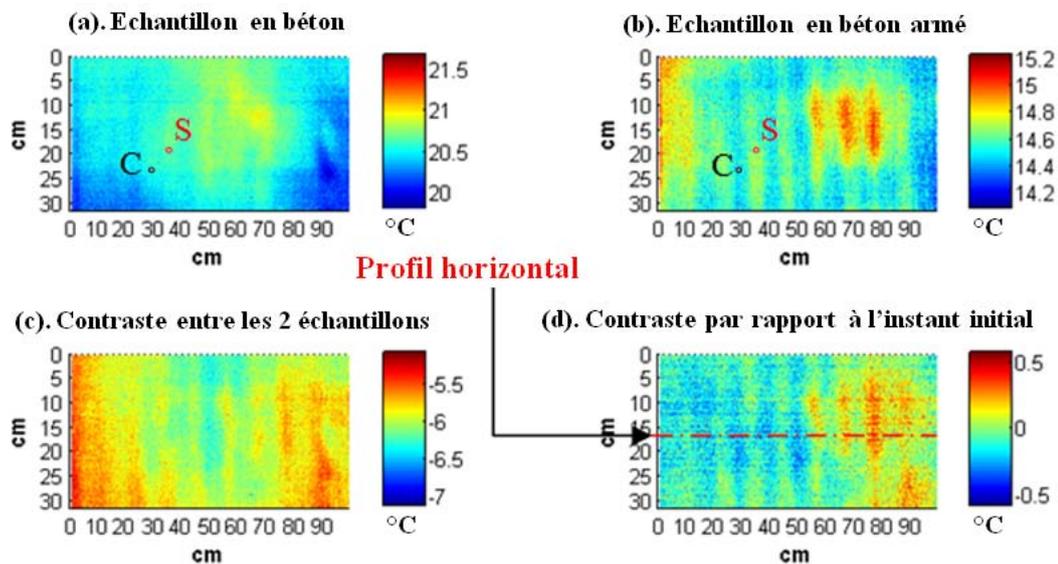


Figure 3- 27: Thermogrammes des essais sur les échantillons de murs à l'instant 250 s

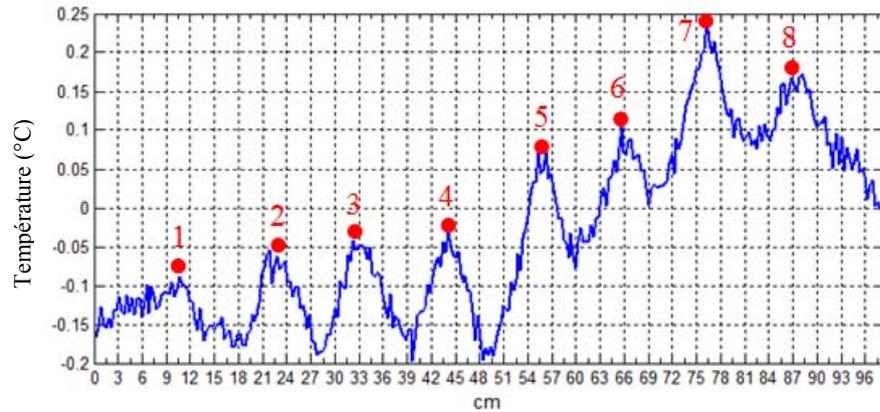


Figure 3- 28: Profil horizontal sur le contraste à 250 s par rapport à l'instant initial

Sur la Figure 3- 28, la courbe de température présente huit points correspondant à des maxima. Ces points distants de 10 cm en moyenne correspondent aux positions des armatures dans le mur soumis à la diffusion des micro-ondes.

On peut expliquer la présence de températures plus élevées aux endroits des armatures par la superposition des micro-ondes incidentes et réfléchies par les armatures au niveau de la surface. Ces élévations ne peuvent pas être dues à une diffusion de la chaleur entre le plan des armatures et la surface qui nécessiterait plusieurs minutes voire plusieurs dizaines de minutes. L'apparition des échauffements est extrêmement rapide. Le phénomène de concentration de l'énergie est quasiment instantané. L'élévation de température provient d'un stockage d'énergie plus important aux endroits des concentrations. Ce mécanisme de transfert thermique dans une dalle en béton armé soumise aux micro-ondes a été expliqué théoriquement et numériquement dans [26] et [27] depuis les années 1990.

Bien que toutes les armatures se situent au même niveau (3.8 cm de la surface), les sommets du profil des températures ne présentent pas les mêmes valeurs de température. La zone des armatures à proximité de l'ouverture de l'antenne (numéros 5, 6, 7, et 8) qui est orientée à 45° par rapport à l'axe de l'éprouvette, reçoit un rayonnement plus intense. On observe dans cette partie des températures plus élevées que la zone des armatures plus éloignées de l'antenne (numéros 1, 2, 3, et 4). La neuvième armature est invisible dans les thermogrammes parce qu'elle n'était pas exposée aux micro-ondes en effet l'ouverture de l'antenne se limite à 56 cm × 59 cm et placée à 0.4 m de l'échantillon, elle ne peut pas le chauffer sur toute sa largeur (1 m).

L'analyse de la fonction de contraste permet de déterminer un temps optimal au bout duquel le thermogramme présente un maximum de contraste, visible sur la Figure 3- 27.d . Il représente le contraste entre la zone au droit de l'armature et la zone « inter-armatures ». La courbe de contraste temporel ci-dessous (Figure 3- 29) montre que le thermogramme (Figure 3- 27.d) présente un contraste maximal à l'instant $t = 250$ s (zone au droit de l'armature/ zone inter-armature) de 0.25 °C.

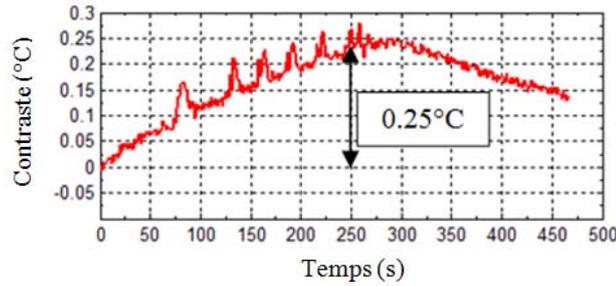


Figure 3- 29: *Contraste temporel entre la zone du béton et la zone de l'armature*

Figure 3- 30 présente l'évolution de deux points situés dans la zone au droit de l'armature (S) et dans la zone inter-armature (C) des deux éprouvettes en béton et en béton armé ("S" et "C" dans Figure 3- 27.a et Figure 3- 27.b). Les échantillons ont été chauffés pendant 300 s. Pour le mur en béton, les deux courbes (Figure 3- 30.a) présentent une augmentation des températures identique de 0.75 °C, élévation de 20.05 °C à 20.80 °C. Les courbes sont aussi modulées par les phases de fonctionnement du magnétron comme les cas précédents sur les composites et le panneau de bois. A la fin de la période de chauffage, on observe également le début d'une phase de relaxation.

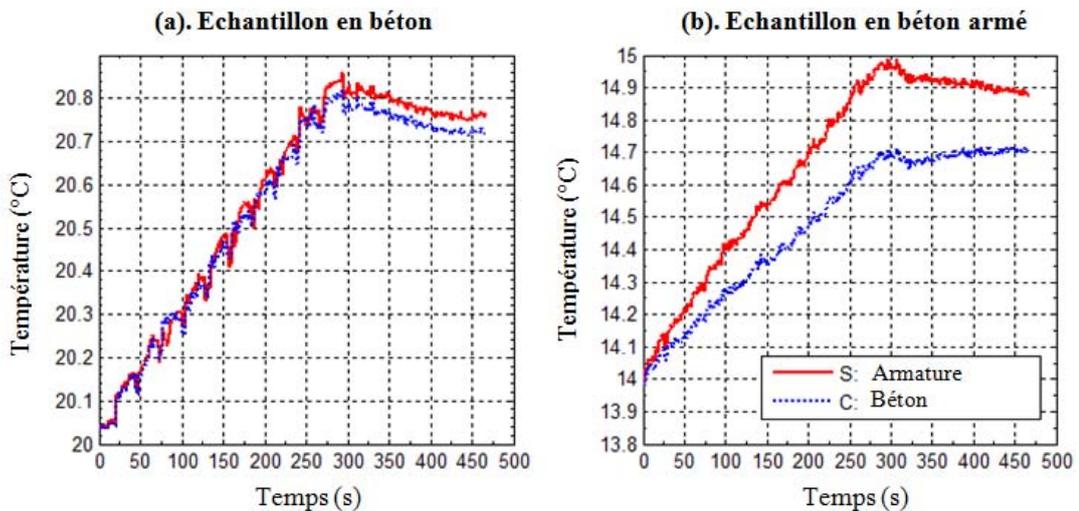


Figure 3- 30: *Evolution des températures des points dans la zone inter-armature et la zone au droit de l'armature*

Les courbes de l'essai sur l'échantillon en béton armé présentent des évolutions différentes de températures. (Figure 3- 30.b). Les augmentations observées sont de 1 °C (de 14 °C à 15 °C) sur la zone de l'armature et de 0.7 °C (de 14 °C à 14.7 °C) sur la zone de béton considérée.

La proportion d'eau dans les compositions du béton (Eau/Ciment) a une influence sur la constante diélectrique du béton [28-29]. Un exemple tiré de la littérature montre les variations de la constante diélectrique pour différents rapport E/C et pour différentes humidités (Figure 3- 31).

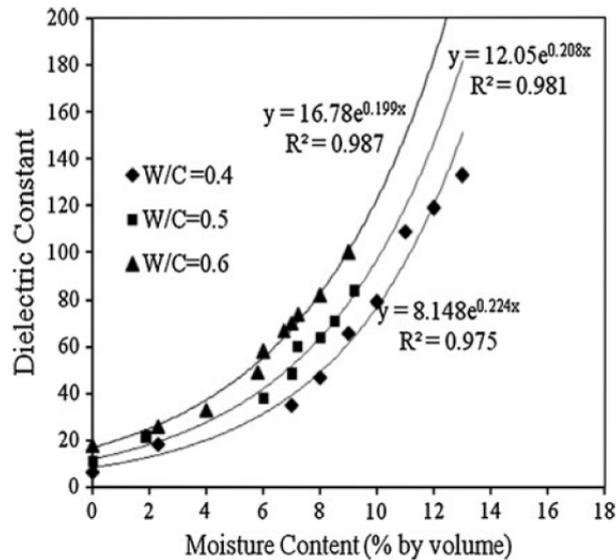


Figure 3- 31: Effet de la teneur en eau sur la constante diélectrique du béton [29]

Le béton est un matériau diélectrique (non métallique) et non magnétique, ce qui rend sa perméabilité (μ^*) très proche de celle de l'espace libre ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m). La permittivité complexe (ϵ^*) est définie par :

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \tag{1}$$

Où : ϵ' est la partie réelle de la permittivité complexe

ϵ'' est la partie imaginaire de la permittivité complexe ; et $j^2 = -1$

En divisant cette équation par la permittivité de l'espace libre ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m), on obtient des propriétés sans dimension:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \tag{2}$$

Où : ϵ_r^* est la permittivité complexe relative

ϵ_r' est la partie réelle de la permittivité complexe relative ou **la constante diélectrique**

ϵ_r'' est la partie imaginaire de la permittivité complexe relative ou **le facteur de perte**

La **constante diélectrique** indique la quantité d'énergie venue du champ électrique extérieur et stockée dans un matériau. Elle est supérieure à 1 pour la plupart des solides et liquides. Le **facteur de perte** nous permet de savoir comment l'énergie du matériau est dissipée vers un champ électrique extérieur ; sa valeur est toujours positive et

habituellement plus petite que la constante diélectrique pour des matériaux diélectriques.

Le béton, qui n'est pas un matériau homogène, a sa constante diélectrique qui varie selon ses formulations et qui dépend aussi de la fréquence. L'étude sur un béton, ayant une composition avec les proportions en eau/ciment/sable/gravier suivantes 1 :2.22 :5.61 :7.12 selon [30] donne les évolutions de la constante diélectrique du béton en fonction de la fréquence et des conditions d'humidité dans le béton comme présenté sur la Figure 3- 32 ci-dessous.

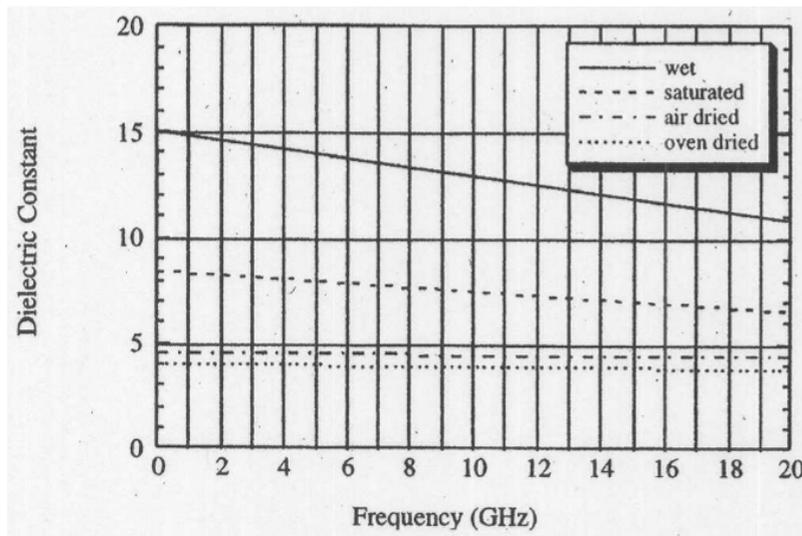


Figure 3- 32: Constante diélectrique mesurée du béton en fonction de la fréquence [30]

Ce niveau de constante diélectrique du béton autorise une pénétration des micro-ondes dans le béton qui lui est proportionnelle. Cela peut permettre d'envisager un échauffement volumique mais surtout cette propriété conduit dans notre approche à pouvoir détecter les armatures en acier dans le béton au cours de la phase de chauffage. Ceci est donc radicalement différent des autres méthodes de thermographie infrarouge qui observent le résultat de transfert de chaleur par conduction avec des constantes de temps beaucoup plus longues et avec des propriétés différentes.

La profondeur de pénétration (d_p) des ondes dans les matériaux diélectriques de faible conductivité électrique est définie par la relation ci-dessous [30] :

$$d_p = (2/\sigma) \times (\epsilon'/\mu_0)^{0.5} \quad (3)$$

Dans cette relation, σ représente la conductivité

; avec $\sigma = (\epsilon_r' \epsilon_0 \tan \delta) \cdot (2\pi f)$ [mho par mètre ou $S.m^{-1}$]

La tangente de perte : $\tan \delta = (\epsilon_r''/\epsilon_r') = (\epsilon_r''/\epsilon_r')$

f désigne la fréquence [Hz]

La conductivité du béton dépend de la fréquence mais aussi de la teneur en eau du béton :

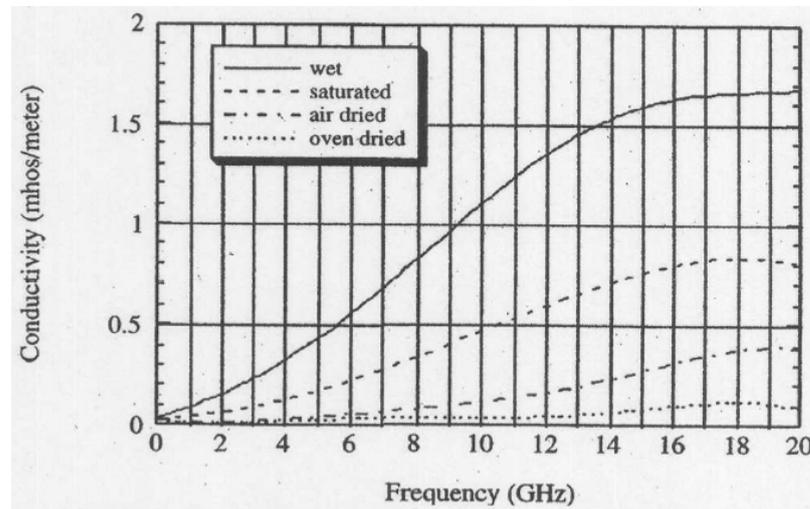


Figure 3- 33: Conductivité électrique du béton [30]

Ces premiers d'essais sur les échantillons en béton et béton armé viennent confirmer l'intérêt d'une sollicitation par micro-ondes.

Les premières observations montrent la possibilité de révéler la présence des armatures enfouies ici à une profondeur de 3.8 cm dans le béton. Il s'agit d'une profondeur d'enrobage réaliste par rapport aux grandeurs utilisées dans les structures du génie civil. La méthode de thermographie infrarouge associée à une excitation de micro-ondes offrent des perspective intéressantes pour l'auscultation en génie civil.

Dans la configuration proposée ici, la méthode peut être utilisée pour détecter les armatures verticales. Le magnétron et l'antenne cornet émettent des ondes dont le champ électrique est polarisé verticalement. Il sera donc possible de visualiser directement à l'aide de la caméra infrarouge les positions, l'espacement, et le nombre des barres principales dans certains types des structures (poteaux, murs, ou éléments préfabriqués). L'observation peut de plus être réalisée de façon quasi instantanée. Il est important de noter que les échauffements observés restent très limités et ne sont pas susceptibles d'altérer le support inspecté.

III.2.4. Phénomènes d'interférence

Cette possibilité de visualiser les armatures métalliques dans la paroi en béton est due aux interactions des ondes incidentes avec les obstacles qu'elles rencontrent. Ces interactions donnent lieu à des phénomènes d'interférences et de diffractions que nous allons étudier dans la suite de chapitre.

La **diffraction** est un phénomène de déviation des rayons lumineux qui intervient lorsque la lumière rencontre un obstacle comme une ouverture ou un bord d'écran et qui ne peut s'expliquer ni par une réflexion ni par une réfraction.

L'**interférence** est un phénomène qui se produit quand deux ou plusieurs ondes lumineuses se superposent pour donner une nouvelle onde dont l'amplitude dépend du déphasage entre ces ondes [31]. La diffraction et l'interférence ont la même origine, à savoir la répartition d'intensité résultant de la **superposition d'ondes** émises par plusieurs sources lumineuses. Le terme « interférences » est réservé en pratique au cas d'un ensemble discret de sources ponctuelles cohérentes, la diffraction traitant celui d'un ensemble continu de telles sources.

Il n'est pas toujours évident de distinguer ces deux phénomènes. Les phénomènes de diffraction et d'interférences sont profondément liés : le phénomène de diffraction lui-même résulte de l'interférence d'une infinité d'ondes. Lors de l'examen de la superposition de deux ondes, il s'agit d'interférences, quand on a un ensemble de points qui diffractent l'onde incidente et quand les ondes diffractées interfèrent entre elles, on parle de diffraction. Dans le cas des interférences produites par une lame à faces parallèles, il n'y a pas de diffraction. **HUYGHENS**, physicien hollandais (1628-1695) a émis l'hypothèse sur la nature ondulatoire de la lumière. Selon la contribution de **HUYGENS (1678)**, la lumière se propage de proche en proche et chaque point atteint par elle se comporte comme une source secondaire qui émet une ondelette sphérique avant l'amplitude et la phase de celle de l'onde incidente, dont la superposition reconstruit l'onde réelle. D'après **FRESNEL (1818)**, ces sources secondaires sont mutuellement cohérentes et toutes les ondelettes peuvent donc interférer entre elles au point d'observation ; l'amplitude complexe de la vibration lumineuse au point d'observation est la somme des amplitudes complexes des vibrations produites par toutes les sources secondaires. Ce principe de HUYGENS – FRESNEL peut être expliqué dans le schéma de la

Figure 3- 34 ci-dessous.

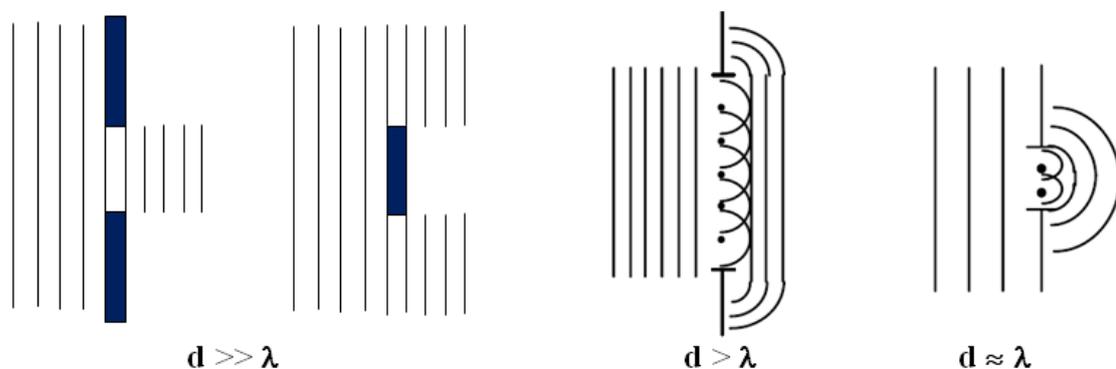


Figure 3- 34: Diffraction d'une onde plane par une ouverture ou un obstacle

La diffraction modifie la propagation rectiligne des ondes selon la dimension relative à l'ouverture (ou de l'obstacle) et à la longueur d'onde. Lorsque la largeur d de l'ouverture ou de l'obstacle est très supérieure à la longueur d'onde ($d \gg \lambda$), les parties des fronts d'onde se heurtant à l'obstacle sont arrêtés, mais les autres parties continuent leur propagation dans la direction initiale. Quand la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle diminue ($d \approx \lambda$), les fronts d'onde se propagent dans toute la région située derrière l'ouverture ou l'obstacle ; c'est le phénomène de diffraction. Lorsque la largeur d est comparable à la longueur d'onde ($d \approx \lambda$), les fronts d'onde diffractés sont circulaires ou sphériques (à trois dimensions). Le phénomène de diffraction avec un petit obstacle n'est pas facile à observer comme dans le cas des armatures dans le mur en béton armé.

En pratique, la direction des ondes incidentes n'est pas toujours normales à la surface du milieu qu'elles pénètrent, et ces ondes sont aussi réfractées.

La loi de **Snell –Descarte** traduit ce phénomène [32-33].

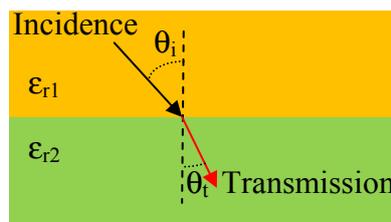


Figure 3- 35: Loi de Snell-Descartes de la réfraction

Dans Figure 3- 35, ϵ_{r1} est la constante diélectrique du milieu 1, ϵ_{r2} est la constante diélectrique du milieu 2, θ_i est l'angle de l'onde incidente et θ_t est l'angle de l'onde transmise dans le milieu 2. D'après cette loi, on obtient la relation suivante :

$$(\epsilon_{r1})^{0.5} \cdot \sin\theta_i = (\epsilon_{r2})^{0.5} \cdot \sin\theta_t \tag{4}$$

Le coefficient de réflexion pour la polarisation perpendiculaire ou électrique transversale (TE) et le coefficient de réflexion pour la polarisation parallèle ou magnétique transversale (TM) peuvent être déterminés par [30]:

$$R_{TE} = [(\epsilon_{r1})^{0.5} \cdot \cos\theta_i - (\epsilon_{r2})^{0.5} \cdot \cos\theta_t] / [(\epsilon_{r1})^{0.5} \cdot \cos\theta_i + (\epsilon_{r2})^{0.5} \cdot \cos\theta_t] \tag{5}$$

$$R_{TM} = [(\epsilon_{r2})^{0.5} \cdot \cos\theta_i - (\epsilon_{r1})^{0.5} \cdot \cos\theta_t] / [(\epsilon_{r2})^{0.5} \cdot \cos\theta_i + (\epsilon_{r1})^{0.5} \cdot \cos\theta_t] \tag{6}$$

Les principes des phénomènes de diffraction, d'interférences et la loi de Snell-Descartes ci-dessous nous permettent de comprendre globalement comment ce produit la pénétration des micro-ondes dans l'échantillon du mur en béton armé. D'ailleurs les micro-ondes se propagent dans le **béton** avec une **vitesse moins élevée** que dans **l'air**. Cette **vitesse dans le béton** (milieu diélectrique) est déterminée par :

$$v = c / (\epsilon_r')^{0.5} \quad (7)$$

Où : $c = 3 \times 10^8$ m/s (vitesse de lumière dans le vide) ; ϵ_r' : constante diélectrique du béton.

Dans le béton, la longueur d'onde (λ) des micro-ondes est une fonction de la fréquence d'oscillation (f) et de leur vitesse (v) :

$$\lambda = v/f = (1/f) \times [c/(\epsilon_r')^{0.5}] \quad (8)$$

L'étude par [30] donne l'évolution des longueurs d'onde des micro-ondes dans le béton en fonction de la fréquence des micro-ondes et aussi de l'état d'humidité du béton, cette caractéristique est présentée dans Figure 3- 36 ci-dessous.

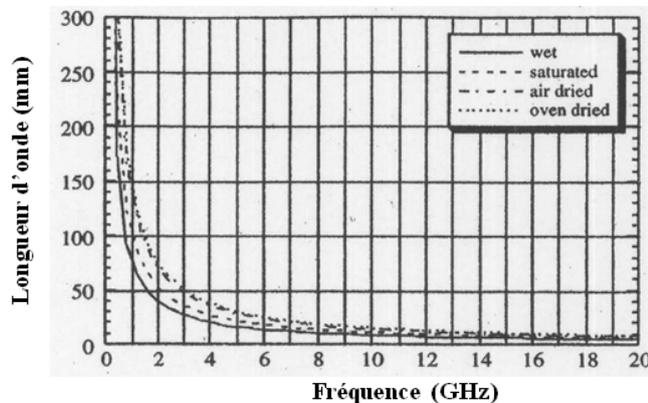


Figure 3- 36: Longueur d'onde du béton en fonction de la fréquence et de l'humidité dans le béton [30]

D'après la Figure 3- 36, la longueur d'onde des micro-ondes à **2.45 GHz** dans un béton sec (air dried) est de **6 cm**. Cette valeur peut varier pour un autre béton ayant une autre composition. Sa valeur passe de **12 cm** dans **l'air** à **6 cm** dans le **béton** ; c'est cette dernière valeur qui intervient dans les phénomènes de diffraction et d'interférences des micro-ondes dans le mur en béton armé.

III.2.5. Effet de l'angle d'incidence de l'onde de sollicitation

Le béton est un matériau opaque pour la lumière visible, mais plus ou moins absorbant pour les micro-ondes selon la valeur de sa constante diélectrique. De ce fait, les micro-ondes peuvent pénétrer dans le béton jusqu'à une profondeur limite plus profonde que l'enrobage des armatures dans le mur en béton armé, ce qui peut engendrer des phénomènes de diffraction et d'interférences des micro-ondes lorsqu'elles rencontrent des obstacles dans le mur (armatures du mur). Pour vérifier ces phénomènes dans le mur en béton armé, des essais en faisant varier la direction du faisceau de l'antenne ont été effectués avec deux méthodes de détection : réflexion et transmission. L'intérêt de ces essais est d'observer comment les interférences modifient les thermogrammes lors de changement de direction de l'antenne micro-ondes.

Les armatures n'ayant pas été placées dans le plan médian des échantillons mais légèrement décalées, il est possible de bénéficier de deux valeurs d'enrobage possible, 1.5 cm et 3.8 cm. Il suffit de changer le côté à chauffer lors des essais pour teste les deux valeurs d'enrobage. Ces deux séries d'essais ont été faites avec une puissance moyenne de 600 W et une durée d'échauffement de 5 mn. L'ensemble de ces essais a été fait dans des conditions similaires que les essais précédents.

III.2.5.1. Essais sur le mur en béton armé dans le cas d'enrobage 1.5 cm

III.2.5.1.1. Essais avec l'enrobage de 1.5 cm par méthode en réflexion

Les dispositifs expérimentaux utilisés lors de cette série d'essais sont présentés Figure 3- 37 ci-dessous. Dans cette méthode de sollicitation par réflexion, la caméra infrarouge a été placée dans le même côté que l'antenne qui chauffe le mur.

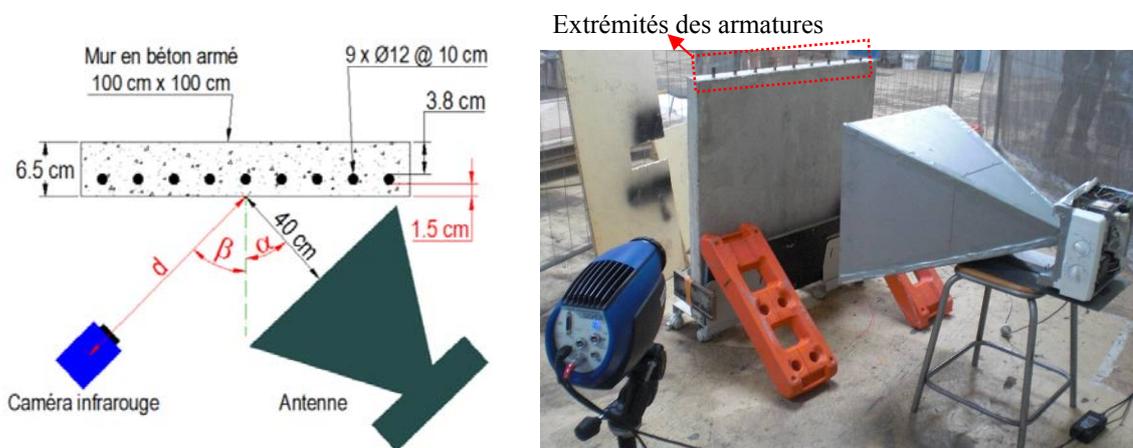


Figure 3- 37: Essais par méthode de réflexion sur le mur en béton armé avec l'enrobage de 1.5 cm

La caméra a été mise à une distance « d » selon une direction « β ». L'antenne a été placée à la distance de 40 cm selon une direction « α ». Les essais ont été effectués pour 5 valeurs de α : 0° (normale à la surface de l'échantillon), 15° , 30° , 45° et 60° . Les distances « d » et l'angle « β » ont été changées pour chaque essai de manière à pouvoir détecter la surface du mur lors de chaque changement de α . Ces valeurs (β , d) sont : (55° , 1.84 m), (55° , 1.84 m), (45° , 2.11 m), (30° , 2.32 m) et (30° , 2.32 m) correspondant respectivement aux valeurs de α citées ci-dessus.

Les thermogrammes de chaque essai à l'instant où il y a un contraste maximal, entre une zone au droit d'une armature et une zone inter-armature sont montrées sur la Figure 3- 38 ci-dessous.

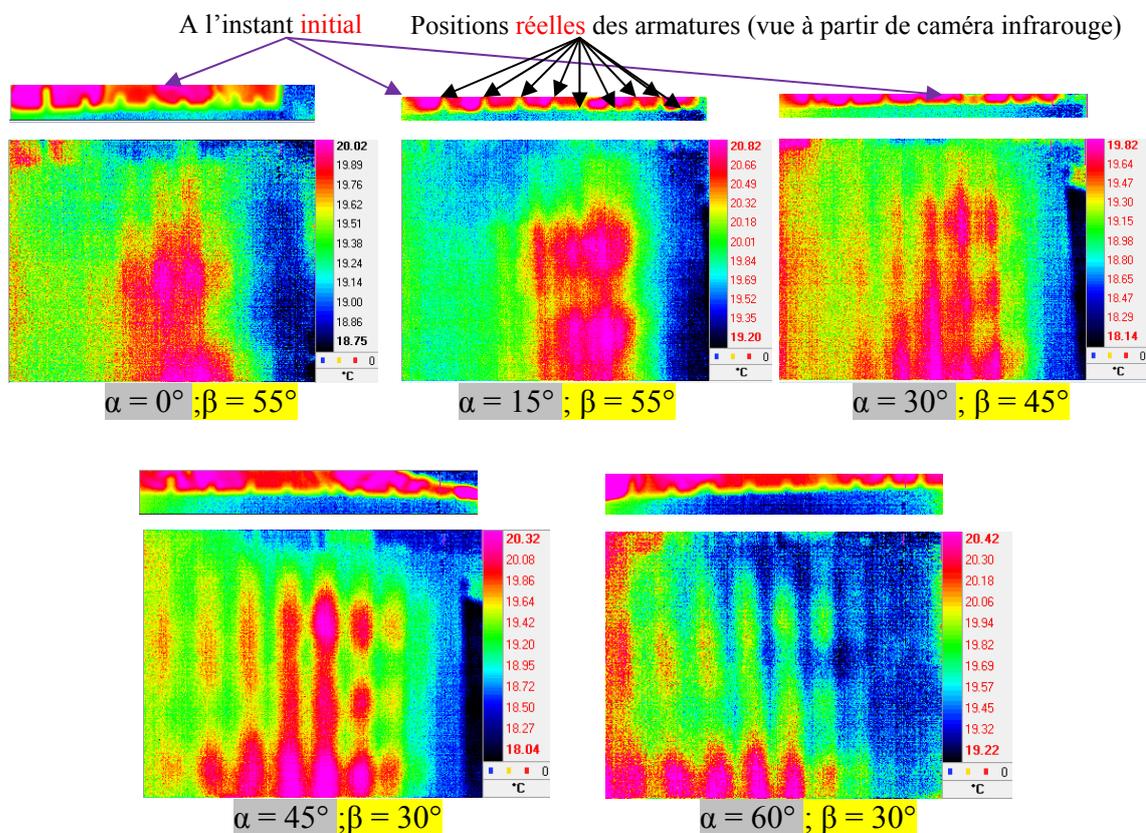


Figure 3- 38: Thermogrammes des essais par réflexion sur le mur dans le cas de 1.5 cm d'enrobage

Au dessous de chaque thermogramme de la Figure 3- 38, une petite fenêtre montre les positions réelles des armatures dans le mur et peut servir de références pour évaluer le décalage de ces positions sur les thermogrammes après l'échauffement par les micro-ondes. Cette fenêtre est située au dessus du thermogramme à l'instant initial (voir les extrémités des armatures montrées dans Figure 3- 37). Lorsque l'antenne est placée dans la direction normale à la surface du mur, les micro-ondes sont trop réfléchies, ce qui ne permet pas de voir les interférences avec la couche des armatures. Cela signifie

que dans direction normale le faisceau de micro-ondes ne devrait pas être utilisé dans la détection par cette nouvelle méthode (réflexion) de thermographie infrarouge.

Lorsqu'on augmente l'incidence de l'antenne (α), les interférences de la couche des armatures décale légèrement vers la gauche (en tenant compte l'effet de β). En plus, on observe qu'aux directions $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 60^\circ$, l'interférence est bien apparue sur la surface du mur parce que ces directions sont proches de l'**angle de Brewster** (voir la remarque ci-dessous) pour le béton.

III.2.5.1.2. Essais avec l'enrobage de 1.5 cm par méthode en **transmission**

Pour vérifier la création d'un système d'interférences au niveau de la couche des armatures, des essais par la méthode en transmission ont été réalisés sur le même mur en béton armé.

Le dispositif expérimental est présenté sur la Figure 3- 39 ci-dessous.

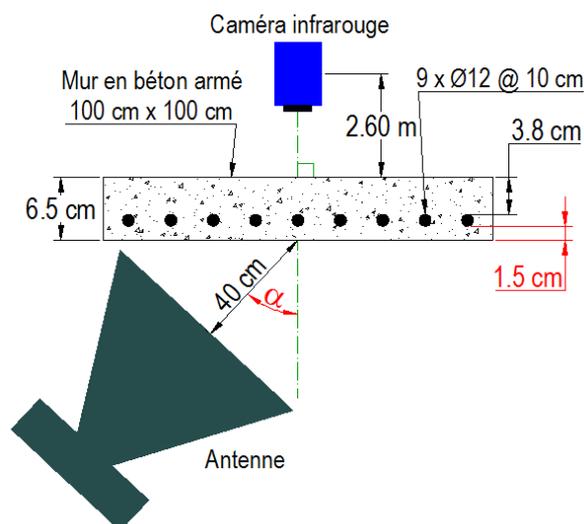


Figure 3- 39: Essais par méthode de **transmission** sur le mur en béton armé avec 1.5 cm d'enrobage

Dans cette méthode, la caméra infrarouge se situe de l'autre côté de l'antenne par rapport à l'échantillon. La caméra a été placée dans la direction normale du mur à une distance fixe de 2.6m. L'antenne est quant à elle placée à une distance fixe de 40cm par rapport à la surface sollicitée du mur et seule l'angle d'incidence α varie comme dans le cas de la méthode de réflexion.

Les thermogrammes montrant un contraste maximal sont montrés dans la Figure 3- 40 pour différentes valeurs de α .

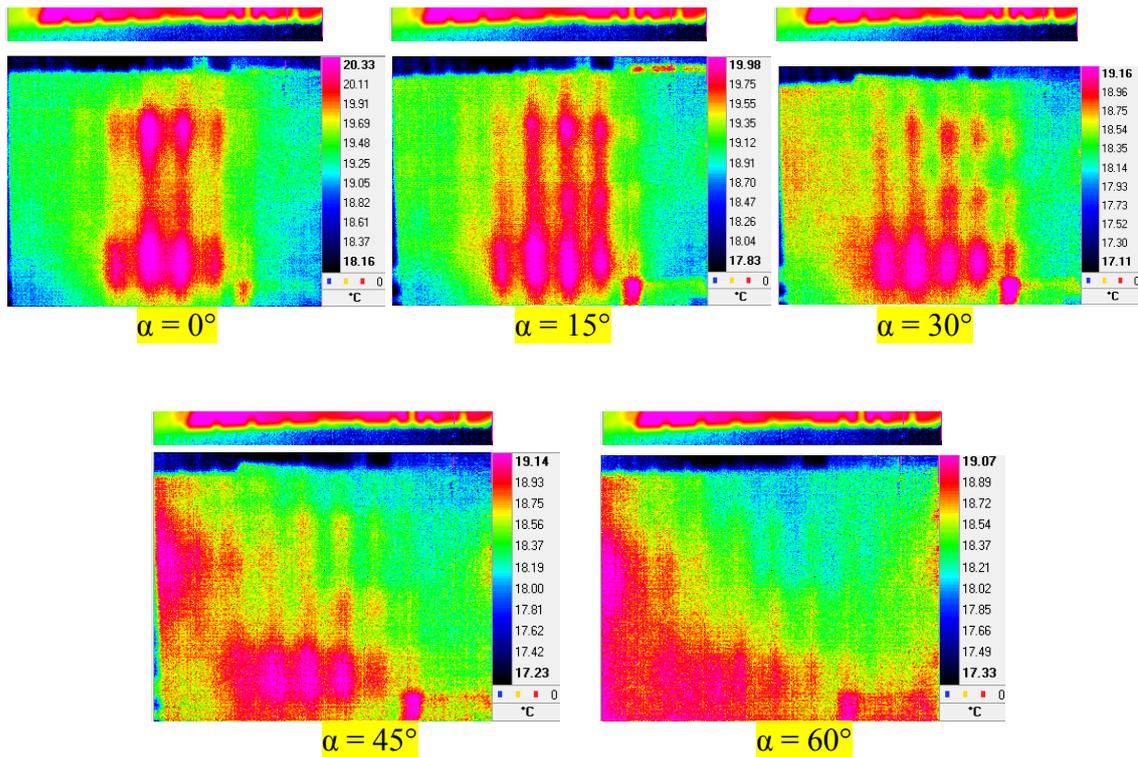


Figure 3- 40: Thermogrammes des essais par *transmission* sur le mur avec 1.5 cm d'enrobage

Le thermogramme pour une incidence $\alpha = 0^\circ$ montre des zones dont les températures sont plus élevées au niveau des zones inter-armatures. Les maximums atteints par la température se situent quasiment au milieu de ces espacements, ceci peut s'expliquer par le fait que les micro-ondes qui arrivent au niveau des armatures sont réfléchies et diffractées, les ondes qui arrivent entre deux armatures sont quant à elles en partie absorbées selon la profondeur. La superposition de ces deux phénomènes conduit à observer des zones des températures plus élevées au niveau de la face arrière de la paroi. Lorsqu'on change la direction de l'antenne, les interférences se décalent légèrement comme dans le cas de méthode de réflexion.

III.2.5.2. Essais sur le mur en béton armé dans le cas d'enrobage 3.8 cm

III.2.5.2.1. Essais avec l'enrobage de 3.8 cm par méthode en réflexion

Dans cet essai, le dispositif de mesure et de sollicitation est resté identique mis à part que la paroi a été retournée afin de solliciter la couche d'enrobage de 3.8 cm. Les thermogrammes obtenus durant ces essais sont montrés Figure 3- 41 :

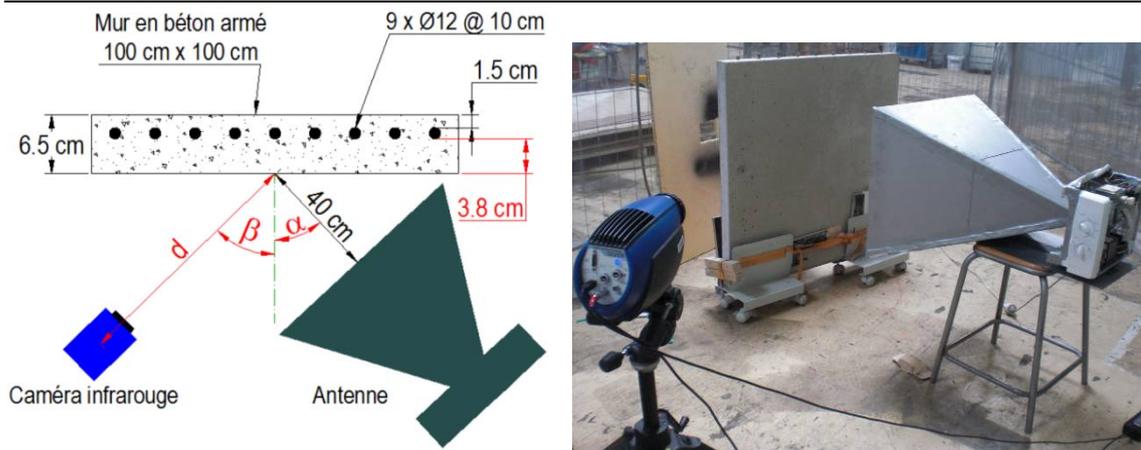


Figure 3- 41: Essais par méthode en réflexion sur le mur en béton armé avec l'enrobage de 3.8 cm

Dans ce cas d'essais, les thermogrammes sont présentés dans Figure 3- 42.

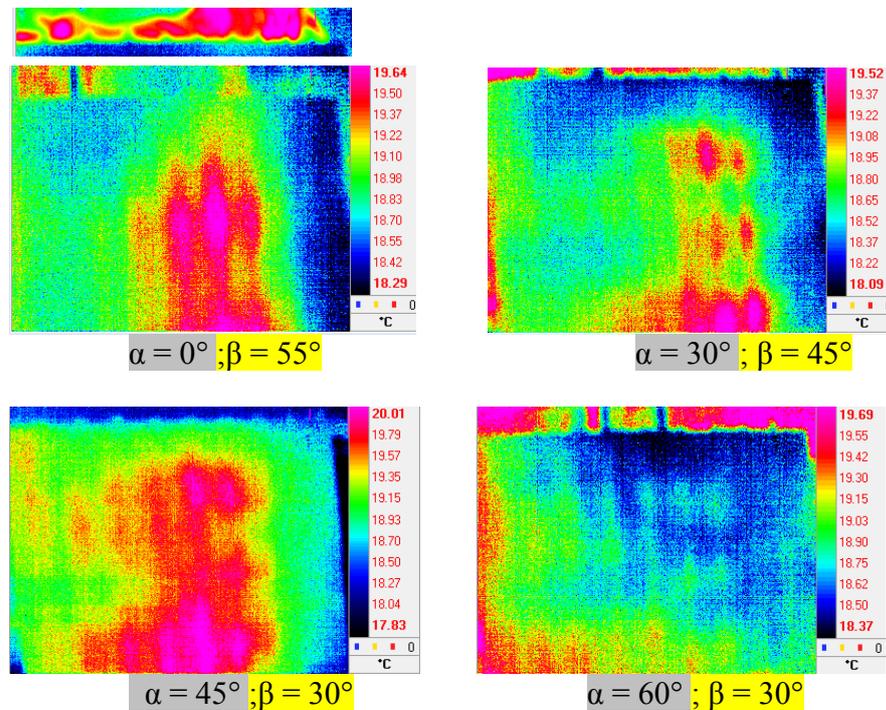


Figure 3- 42: Thermogrammes des essais en réflexion sur le mur dans le cas de 3.8 cm d'enrobage

Une remarque importante portant sur cette série d'essais est de constater que le contraste présenté par le thermogramme pour $\alpha = 60^\circ$ est minime car les armatures se situent plus profondément dans le mur, ce qui allonge le trajet effectué par les ondes incidentes pour arriver jusqu'aux armatures et ensuite être réfléchies jusqu'à la surface de détection. L'absorption est plus importante. Cela nous indique également que les interférences détectées sont réellement provoquées par la couche des armatures dans le mur et non par les défauts du faisceau micro-ondes diffusé par l'antenne.

III.2.5.2.2. Essais avec l'enrobage de 3.8 cm par méthode en **transmission**

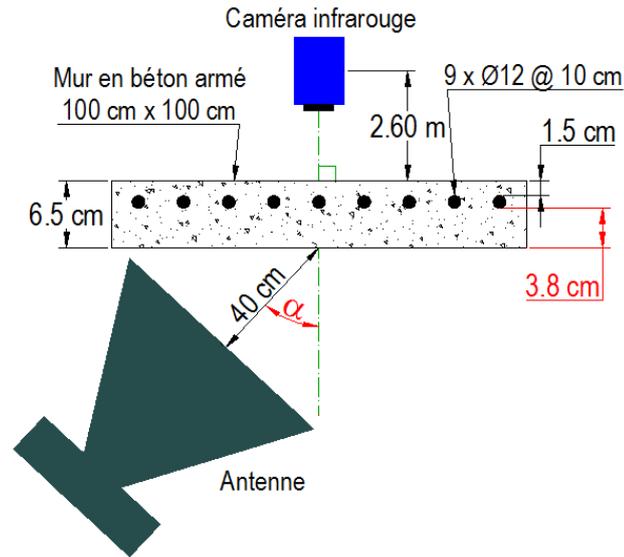


Figure 3- 43: Essais par méthode en **transmission** sur le mur en béton armé avec 3.8 cm d'enrobage

Les dispositifs expérimentaux des essais présentés dans Figure 3- 43 sont les mêmes que le cas de l'enrobage de 1.5 cm, mis à part que le mur est sollicité de l'autre côté (côté de 3.8 cm d'enrobage).

Les thermogrammes de ces essais sont montrés dans Figure 3- 44 ci-dessous.

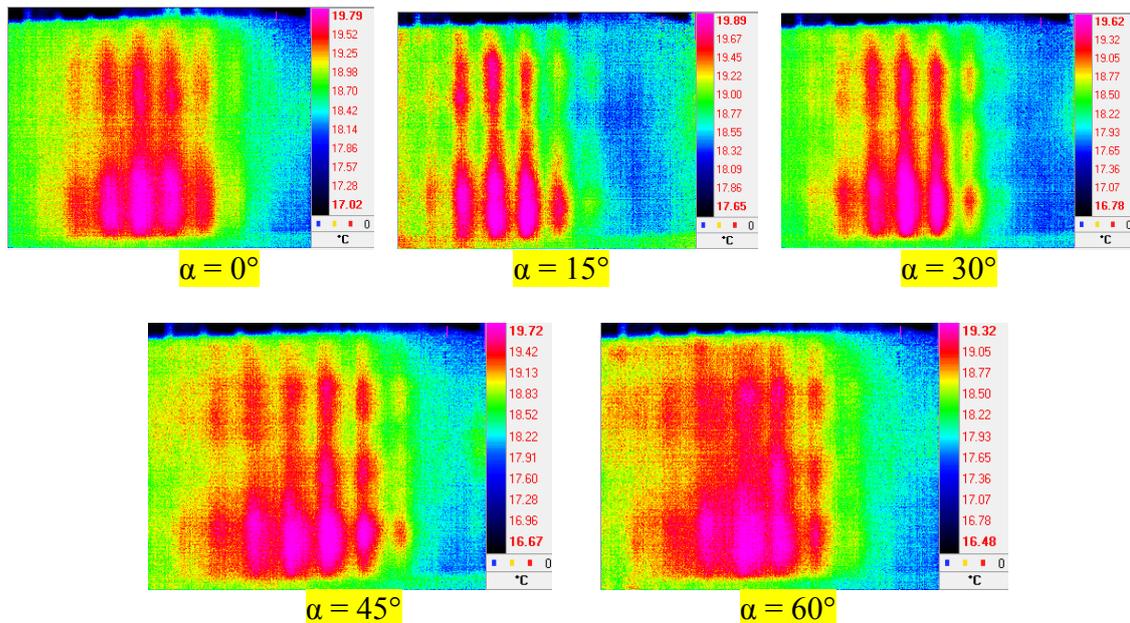


Figure 3- 44: Thermogrammes des essais en **transmission** sur le mur avec 3.8 cm d'enrobage

Ces thermogrammes confirment le décalage des interférences de la couche des armatures lors de changement de direction de l'antenne comme dans le cas de l'enrobage de 1.5 cm. En plus, les interférences dans ce cas sont plus marquées que dans le cas de l'enrobage de 1.5 cm parce que les armatures sont plus proches à la surface détectée ; ce qui peut confirmer la diffraction des micro-ondes derrière la couche des armatures.

*****Remarque** : Angle de Brewster : c'est l'angle d'incidence ($\theta_i = \theta_b$) pour lequel l'énergie est transmise totalement dans un matériau diélectrique et la valeur du coefficient de réflexion est nulle. La valeur de cette angle est donnée par :

$$\theta_b = \tan^{-1}(\epsilon_{r2}/\epsilon_{r1})^{0.5} \quad (9)$$

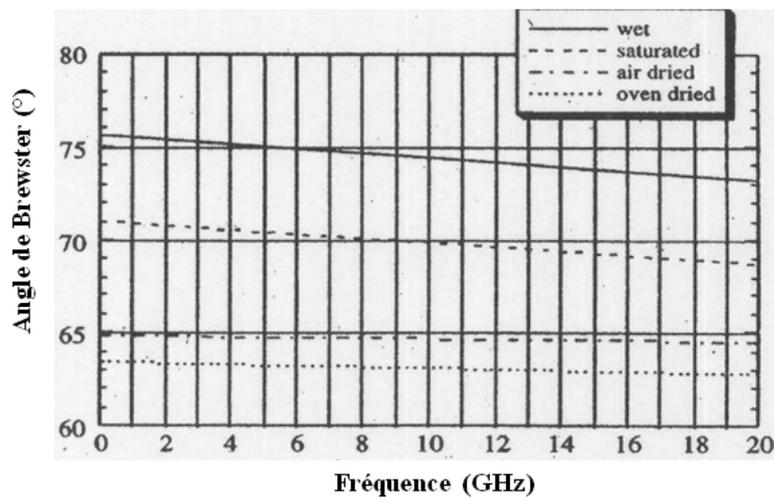


Figure 3- 45: Angle de Brewster dans le béton [30]

D'après la Figure 3- 45, le béton sec (air dried) a un angle de Brewster de 65° à la fréquence de 2.45 GHz. Par contre, cet angle peut avoir des valeurs différentes pour des compositions différentes du béton.

III.2.6. Effet des espacements des armatures

Pour mettre en évidence les phénomènes de diffraction et d'interférence, des essais sur un échantillon composé de 3 couches (placoplâtre-armatures-placoplâtre) ont été effectués. L'intérêt de ses essais est de faire varier les espacements des armatures pour constater leur influence sur les effets de diffractions et d'interférence.

Le but de ces essais c'est d'étudier les interférences du réseau d'armatures dans le mur en béton armé lors de changement des espacements entre ces armatures. Comme le béton est un matériau non homogène, c'est difficile de réaliser plusieurs échantillons avec la variation des espacements en obtenant le béton de même propriété diélectrique.

De ce fait, des explications de ces phénomènes ont été déduit de l'étude sur plaque de plâtre qui est un matériau plus homogène.

Les détails des dispositifs expérimentaux sont présentés sur les Figure 3- 46 et Figure 3- 47 et correspondent respectivement à la méthode en transmission et celle en réflexion.

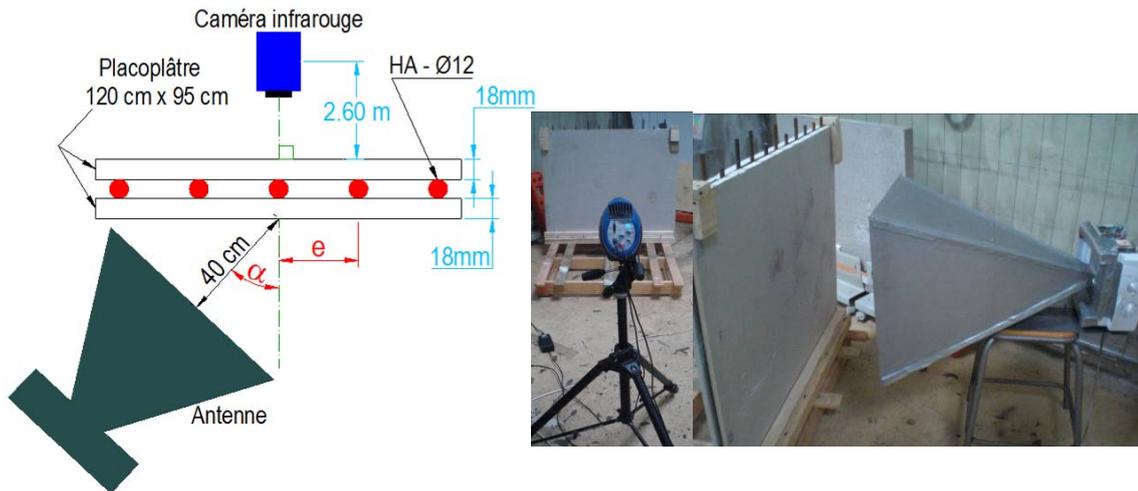


Figure 3- 46: Essais sur l'échantillon 3 couches par méthode de *transmission*

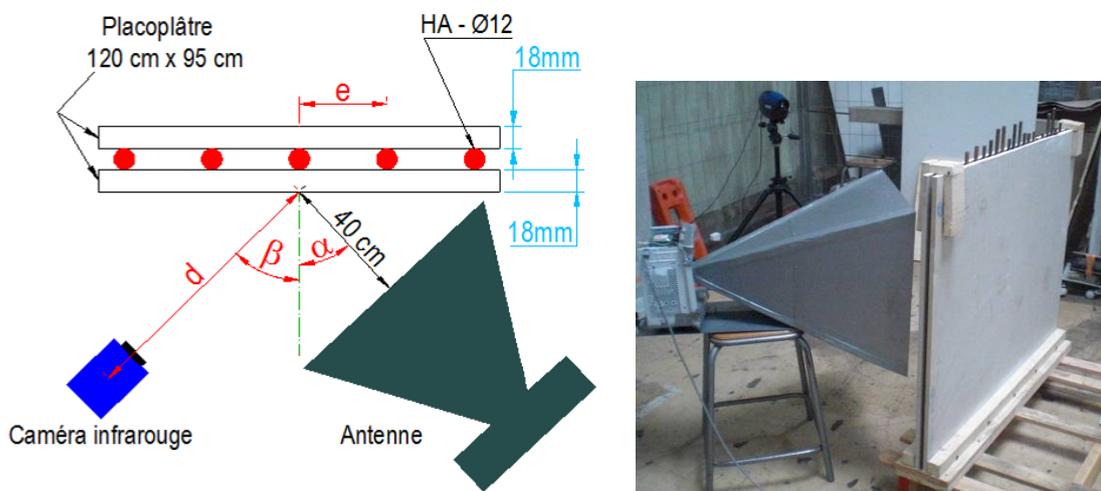


Figure 3- 47: Essais sur échantillon 3 couches par méthode de *réflexion*

L'échantillon se compose de 2 couches de plaque de plâtre de 18 mm d'épaisseur et de dimensions 1.2 m × 0.95 m avec une couche des armatures (même type d'armatures que le cas du mur en béton : barres à haute adhérence 12 mm de diamètre) à l'intermédiaire. Les espacements des armatures « e » ont été variés à 3 valeurs : 5 cm, 10 cm, et 20 cm correspondant à 3 séries d'essais à faire. Pour chaque série d'essais, les directions de sollicitation ont été changées comme dans le cas des essais sur le mur en béton armé (caméra dans la direction normale pour les essais par transmission, et direction de β pour les essais par réflexion ; l'antenne est dans la direction de α).

III.2.6.1. Cas d'un espacement des barres (e) égale à 5 cm (360 W, 5 mn)

Dans ce cas, l'échantillon a été chauffé avec la puissance de 360 W pendant 5 mn. Les thermogrammes des essais par méthodes de transmission à 3 différentes directions de l'antenne sont présentés dans Figure 3- 48.

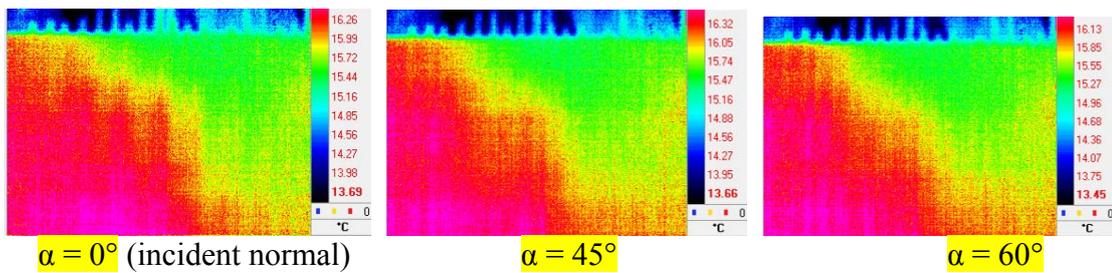


Figure 3- 48: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 5$ cm par *transmission*

D'après ces essais par transmission, on voit que les ondes ne sont pas bien transmises à travers des couches de plâtre avec cette valeur d'espacement des armatures.

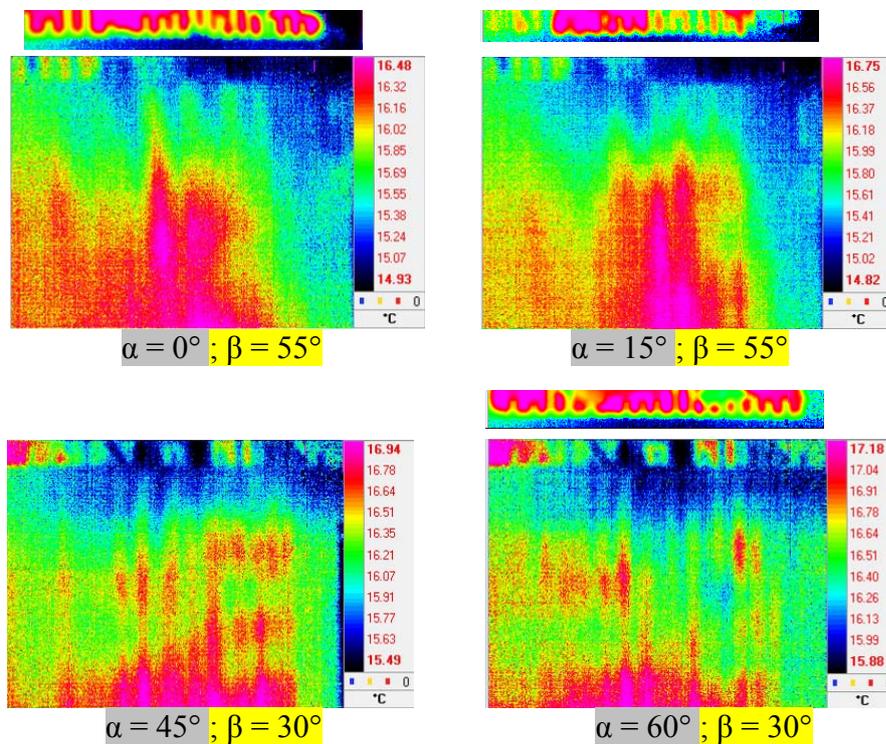


Figure 3- 49: Thermogrammes essais sur 3 couches dans le cas $e = 5$ cm par *réflexion*

Pour la méthode de réflexion, les thermogrammes (Figure 3- 49) montrent qu'avec les directions d'antenne de 15° et normale, il y a trop de réflexion, qu'on ne peut pas voir les interférences des armatures alors que les autres 2 directions (45° et 60°) sont mieux pour ce type de matériau et d'espacement, ce qui favorise aux micro-ondes à pénétrer dans l'échantillon.

III.2.6.2. Cas d'un espacement des barres (e) égale à 10 cm (600 W, 3 mn)

Dans ce cas, l'échantillon a été chauffé avec la puissance de 600 W pendant 3 mn. Les thermogrammes des essais par méthodes de transmission à 5 différentes directions de l'antenne sont présentés dans Figure 3- 50.

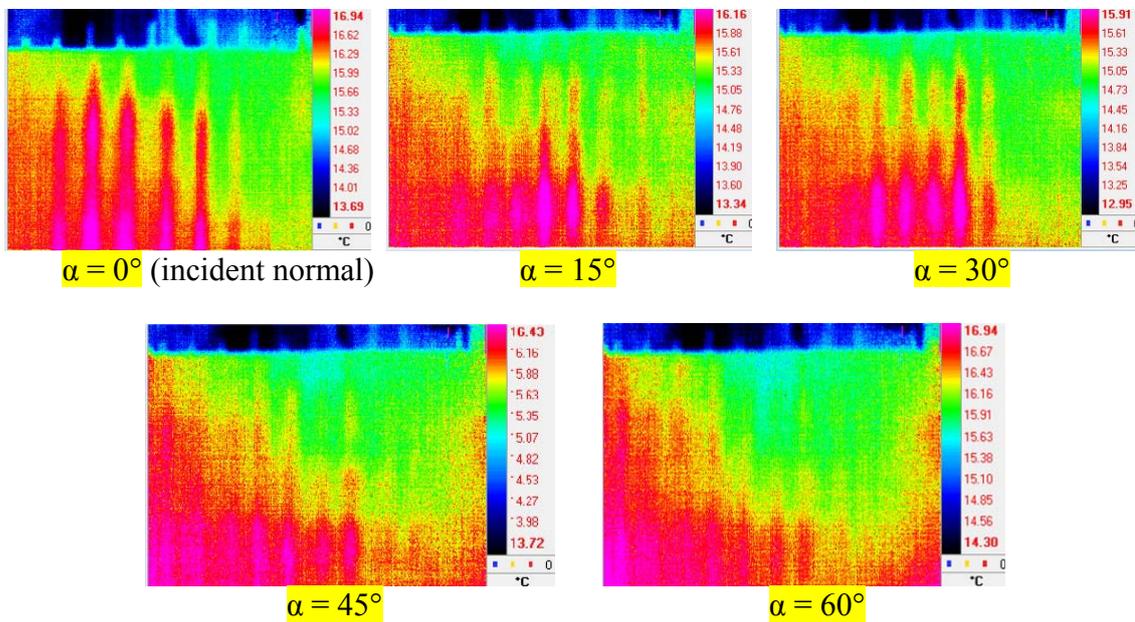


Figure 3- 50: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 10\text{ cm}$ par *transmission*

D'après ces essais par transmission, on observe qu'avec cette valeur d'espacement des armatures (ce qui correspond à la **longueur d'onde des micro-ondes**, et le cas de l'échantillon en béton armé), les thermogrammes montrent bien la concordance avec des conclusions sur les phénomènes d'interférences dans des essais avec le mur en béton armé.

Les thermogrammes des essais par la méthode en réflexion sont présentés dans la Figure 3- 51 ci-dessous :

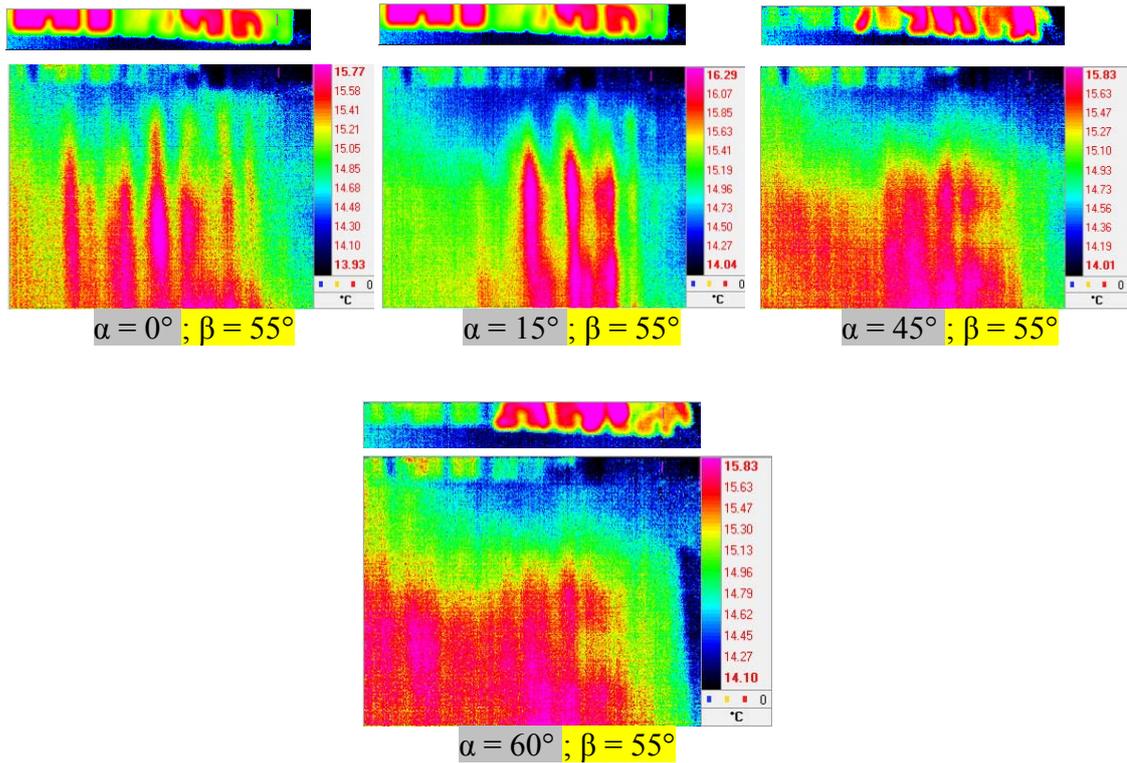


Figure 3- 51: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 10 \text{ cm}$ par réflexion

III.2.6.3. Cas d'espacement des barres (e) égale à 20 cm (600 W, 3 mn)

L'échantillon a été chauffé avec la puissance de 600 W pendant 3 mn. Les thermogrammes des essais par méthodes de transmission et de réflexion sont présentés dans Figure 3- 52 et Figure 3- 53.

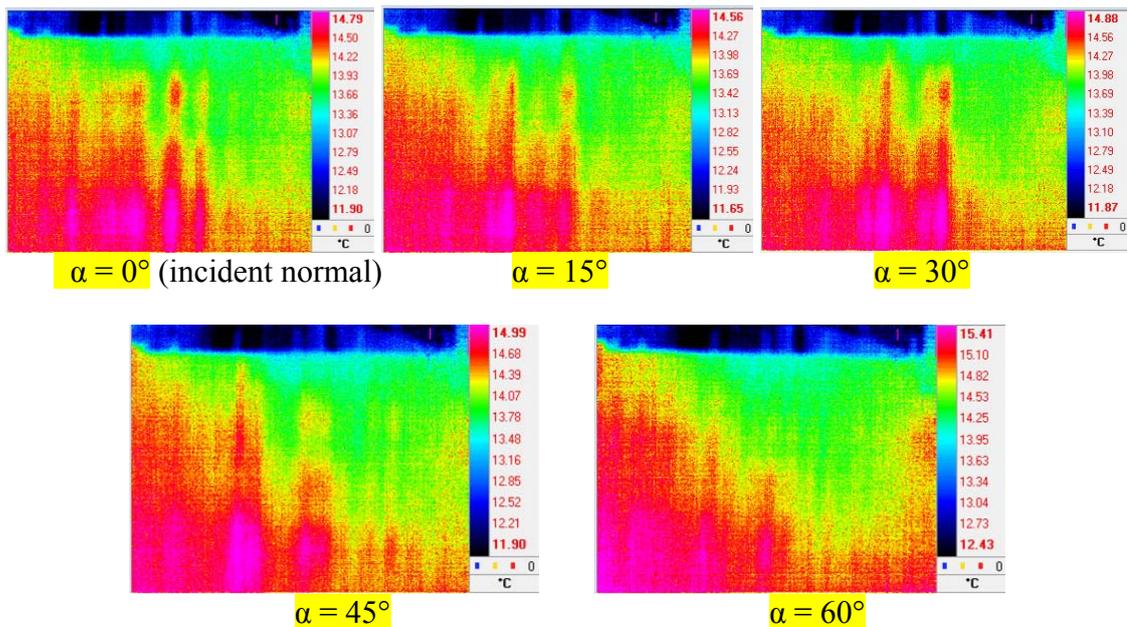


Figure 3- 52: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 20 \text{ cm}$ par transmission

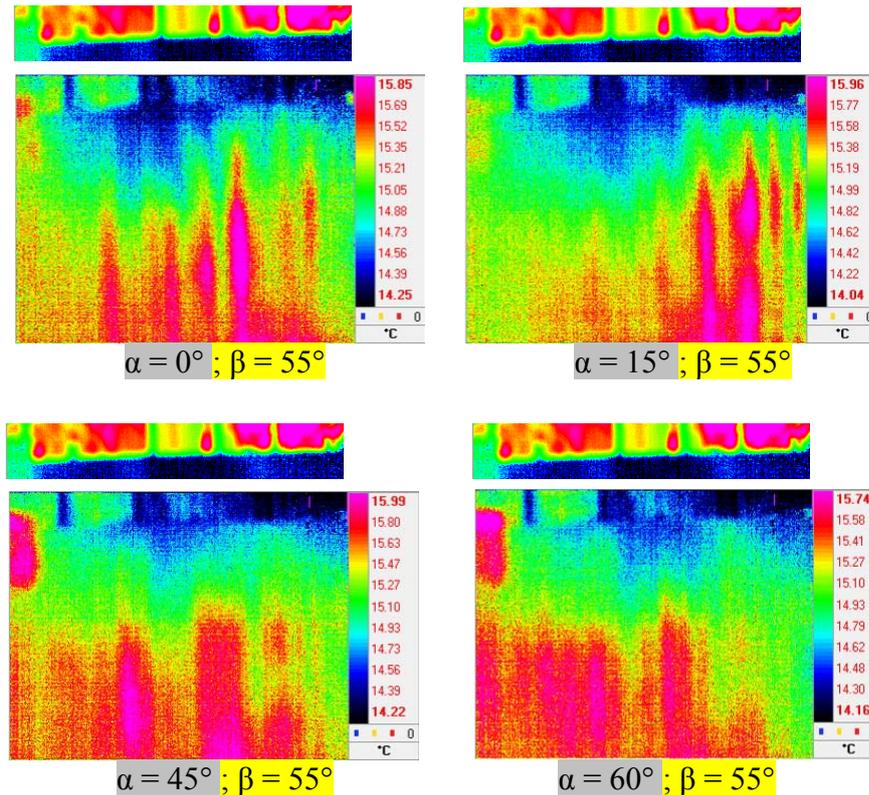


Figure 3- 53: Thermogrammes des essais obtenus pour 3 couches dans le cas $e = 20 \text{ cm}$ par réflexion

Dans ce cas d'espacement de 20 cm (ce qui est **plus grande** que la valeur de la **longueur d'onde des micro-ondes** de 12 cm dans l'espace libre), il apparait le même phénomène que dans le cas des essais dans la partie précédente sur une barre métallique et une pièce métallique (l'interaction entre les micro-ondes et une barre métallique provoque les interférences autour de cette barre).

Ces séries d'essais à différentes valeurs d'espacement des armatures montrent des résultats qui correspondent bien aux conclusions précédentes sur des phénomènes de diffraction et d'interférence dans le mur en béton armé.

IV. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter les premiers essais d'auscultation par thermographie infrarouge active avec une nouvelle source d'excitation micro-ondes. Les premiers résultats montrent que le système et la méthode sont déjà opérationnels mais surtout qu'elle pourrait ouvrir quelques perspectives d'applications intéressantes pour l'auscultation en génie civil.

Sur une application classique de défaut de type délaminage, la source a montré qu'elle offrait des possibilités comme d'autres sources classiques.

La présence d'inclusions métalliques provoquent des phénomènes de réflexion, de diffraction et d'interférences des ondes électromagnétiques qui peuvent être observés grâce à aux élévations de température provoquées. La méthode permet de détecter les éléments métalliques, de les positionner. Elle a été d'abord testée avec un anneau métallique collé au dos d'un panneau de bois puis avec un réseau d'armatures métalliques dans un mur en béton mais aussi avec une simple barre. Les différentes expériences qui ont été menées en modifiant les conditions de sollicitations, d'observation ou de configuration des échantillons ont eu pour but de confirmer qu'il s'agissait bien de phénomènes électromagnétiques dont les gradients de concentration provoquaient des gradient de température et non de simples diffusion de chaleur. Les déplacements des maximums de température, les décalages des profils, les variations d'espacement entre les extremums ont permis de confirmer cette hypothèse.

REFERENCES DU CHAPITRE 3

- [1] H. Wiggenhauser, "Active IR-applications in civil engineering," *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, pp. 233-238, 2002.
- [2] C. A. Balaras, A. A. Argiriou, "Infrared thermography for building diagnostics," *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 171-183, 2002.
- [3] E. Grinzato, V. Vavilov, T. Kauppinen, "Quantitative infrared thermography in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 29, pp. 1-9, 1998.
- [4] Ch. Maierhofer, A. Brink, M. Röllig, H. Wiggenhauser, "Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the near surface region," *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, pp. 271-278, 2002.
- [5] Ch Maierhofer, A. Brink, M. Röllig, H. Wiggenhauser, "Quantitative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental results and numerical simulations," *Construction and Building Materials*, vol. 19, pp. 731-737, 2005.
- [6] Ch Maierhofer, A. Brink, M. Röllig, H. Wiggenhauser, "Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography," *Infrared Physics & Technology*, vol. 49, pp. 213-217, 2007.
- [7] M. Marchetti, S. Ludwig, J. Dumoulin, L. Ibos, A. Mazioud, "Active Infrared Thermography for Non-Destructive Control for Detection of Defects in Asphalt Pavements," presented at the 9th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Krakow, Poland, 2008.
- [8] M. R. Clark, D. M. McCann, M. C. Forde, "Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges," *NDT & E International*, vol. 36, pp. 265-275, 2003.

-
- [9] Chia-Chi Cheng, Tao-Ming Cheng, Chih-Hung Chiang, "Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves," *Automation in Construction*, vol. 18, pp. 87-92, 2008.
- [10] Frédéric Taillade, Marc Quiertant, Karim Benzarti, Christophe Aubagnac, "Shearography and pulsed stimulated infrared thermography applied to a nondestructive evaluation of FRP strengthening systems bonded on concrete structures," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 568-574, 2011.
- [11] Jeff R. Brown, H. R. Hamilton, "Quantitative infrared thermography inspection for FRP applied to concrete using single pixel analysis," *Construction and Building Materials*, 2010.
- [12] R. Sen and G. Mullins, "Application of FRP composites for underwater piles repair," *Composites Part B: Engineering*, vol. 38, pp. 751-758, 2007.
- [13] M. V. Seica and J. A. Packer, "FRP materials for the rehabilitation of tubular steel structures, for underwater applications," *Composite Structures*, vol. 80, pp. 440-450, 2007.
- [14] L. De Lorenzis and J. G. Teng, "Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures," *Composites Part B: Engineering*, vol. 38, pp. 119-143, 2007.
- [15] S. B. Kim, *et al.*, "Development of aqua epoxy for repair and strengthening of RC structural members in underwater," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 3079-3086, 2009.
- [16] ACI 503R-93, *Use of epoxy compounds with concrete*: American Concrete Institute, 1998.
- [17] W. L. Lai, *et al.*, "Characterization of the deterioration of externally bonded CFRP-concrete composites using quantitative infrared thermography," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, pp. 740-746, 2010.
- [18] Liu Junyan, Tang Qingju, Liu Xun, Wang Yang, "Research on the quantitative analysis of subsurface defects for non-destructive testing by lock-in thermography," *NDT & E International*, vol. 45, pp. 104-110, 2012.
- [19] Juan Monzó-Cabrera, J. L. Pedreño-Molina, A. Toledo, "Feedback control procedure for energy efficiency optimization of microwave-heating ovens," *Measurement*, vol. 42, pp. 1257-1262, 2009.
- [20] J.L. Pedreño-Molina, J. Monzó-Cabrera, M. Pinzolas, "A new procedure for power efficiency optimization in microwave ovens based on thermographic measurements and load location search," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 34, pp. 564-569, 2007.
-

-
- [21] Stavrou S. and Saunders S. R., "Review of constitutive parameters of building materials," in *Antennas and Propagation, 2003. (ICAP 2003). Twelfth International Conference on (Conf. Publ. No. 491)*, 2003, pp. 211-215 vol.1.
- [22] Reuben BARNES, Tony ZHENG, "Research on Factors Affecting Concrete Cover Measurement," *The e-journal of Nondestructive Testing*, 2008.
- [23] Oguz Gunes, Oral Buyukozturk, "Simulation-based microwave imaging of plain and reinforced concrete for nondestructive evaluation," *International Journal of the Physical Sciences*, vol. 7, pp. 383-393, 2012.
- [24] K. Arunachalam, V. R. Melapudi, L. Udpa, S. S. Udpa, "Microwave NDT of cement-based materials using far-field reflection coefficients," *NDT & E International*, vol. 39, pp. 585-593, 2006.
- [25] Markku Leivo, "Radio wave heater for concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp. 677-682, 1996.
- [26] L. E. Lagos, W. Li, M. A. Ebadian, T. L. White, R. G. Grubb, D. Foster, "Heat transfer within a concrete slab with a finite microwave heating source," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 38, pp. 887-897, 1995.
- [27] Zdenek P. Bazant, F. ASCE, and Goangseup Zi, "Decontamination of Radionuclides from Concrete by Microwave Heating. I: Theory," *Engineering Mechanics - ASCE*, vol. 129, pp. 777-784, 2003.
- [28] Hong C., Rhim, Oral Büyüköztürk, "Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range," *ACI Materials Journal*, vol. 95, pp. 262-271, 1998.
- [29] M. Jamil, M. K. Hassan, H. M. A. Al-Mattarneh, M. F. M. Zain, "Concrete dielectric properties investigation using microwave nondestructive techniques," *Materials and Structures*, 2012.
- [30] Hong C. Rhim, Oral Büyüköztürk, "Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range," *ACI Materials Journal*, vol. 95, pp. 265-271, 1998.
- [31] Michel HENRY, "Optique ondulatoire, Interférences. Diffraction. Polarisation," *Techniques Ingénieur*, vol. A191, 1982.
- [32] Jean-Jacques LABARTHE, "COURS OPTIQUE ONDULATOIRE," ed. Université Paris-Sud Orsay, 2004.
- [33] André MOUSSA, Paul PONSONNET,, *Cours de Physiques Tome I - Optique*. Saint-Etienne (Loire): Impressions Dumas, 1988.
-

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans ce manuscrit constituent une contribution au développement de techniques de contrôles non destructifs d'ouvrages du génie civil destinés à aider les gestionnaire de parc d'ouvrages dans leur décision de politique de maintenance. Les travaux ont conduit au développement d'une méthode de thermographie infrarouge active associée à un système original d'excitation micro-ondes.

Les méthodes classiques de stimulation en thermographie infrarouge active appliquée au contrôle non destructif reposent sur des effets de la diffusion de la chaleur dans le volume. Le principe est le suivant : Un dépôt de chaleur est appliqué en surface (flash, lampes, laser, ..) ou dissipée par les armatures métalliques (induction) et se diffuse dans l'élément ausculté. Un défaut structural ou des variations des propriétés thermiques du matériau ne peuvent être détectés que si leur présence a une influence suffisante sur le phénomène de conduction thermique pour avoir des répercussions détectable sur le champ des températures de surface. Cette approche basée sur les phénomènes de conduction thermique a essentiellement permis de détecter des anomalies de type résistance thermique ou des gradients de propriétés thermophysiques de matériau. Les constantes de temps des phénomènes restreignent ce type d'auscultation à des défauts proches de la surface. Leur forme et leur position font que les armatures métalliques de renforcement employées en Génie Civil n'ont que très peu d'influence sur les températures de surfaces. Alors qu'elles concentrent une part significative des problématiques de l'évaluation non destructive des ouvrages en béton avec par exemple les phénomènes de corrosion, les armatures métalliques ne peuvent faire l'objet d'investigation par thermographie infrarouge.

L'objectif de ce travail de thèse a été de développer une approche de thermographie infrarouge exploitant les phénomènes de radiothermie. La propagation d'un rayonnement électromagnétique dans un élément en béton peut produire différents effets. Dans le domaine des micro-ondes, le béton est un milieu partiellement absorbant. Une partie de l'énergie électromagnétique crée une dissipation de chaleur volumique dont la zone d'effet va dépendre essentiellement de la constante diélectrique du béton donc en particulier de sa teneur en eau. Ce n'est pas cet effet qui a été visé dans ce travail. Les parties métalliques se comportent comme des réflecteurs électromagnétiques. Les inclusions métalliques dans le béton provoquent des réflexions, des phénomènes de diffraction et des phénomènes d'interférences pour les réseaux d'armatures. Il apparaît des zones de concentration d'énergie électromagnétique qui se traduisent par des échauffements. Cet effet peut être observé par une caméra infrarouge.

Dans le cadre de ce travail de thèse, un générateur spécifique a été intégralement conçu et réalisé à partir d'un magnétron de 2.45 GHz et de puissance 800 W issu du commerce. Il a été couplé avec une antenne cornet pyramidale adaptée pour diffuser les ondes sur des surfaces de l'ordre d'un mètre carré. Cette source de rayonnement a été caractérisée et un diagramme de rayonnement a été tracé à partir de mesures réalisées en champ lointain. Une grande attention a été portée à la dangerosité potentielle de la source et il était impératif que la personne qui réalisait des expérimentations ou même les personnes à proximité du dispositif ne soient pas soumises au rayonnement micro-ondes. Un soin particulier a été apporté à la fabrication d'une enceinte de protection qui crée une cage de Faraday autour de tout le dispositif expérimental.

Le premier test de la source a été effectué sur une configuration classiquement étudiée en thermographie infrarouge active. Il s'agit de la détection d'une couche résistive subsurfacique parallèle à la surface d'accès d'un élément en béton. Un défaut de collage d'un renfort composite sur une plaque de béton a servi de configuration test. Soumis au rayonnement micro-ondes, la couche de composite conductrice a entraîné une dissipation de chaleur qui se diffuse différemment en fonction de la qualité du collage. La résistance thermique introduite par le décollement provoque un échauffement plus important en présence du défaut de collage. Cette première application a servi d'illustration à la discussion dans le chapitre 1, et avait déjà été abordée avec d'autres méthodes de chauffage direct : technique lock-in associée à des lampes halogène et thermographie à phase pulsée avec une source surfacique issue du couplage d'un faisceau laser CO₂ et d'un dispositif optique réalisé spécifiquement pour cette application.

Grace à cette source micro-onde, nous avons ensuite abordé la détection d'inclusions métalliques dans un matériau.

Les premiers essais ont mis en évidence l'existence du phénomène attendu de diffraction qui crée des gradients de température sur la surface observée. Cette expérimentation a également mis en avant la possibilité de détection d'une pièce métallique placée à l'arrière d'une paroi en bois relativement épaisse et peu conductrice. Il est apparu de façon quasi-instantanée un champ de température image radiothermique du champ de diffraction.

Le champ de l'étape suivante a consisté à rapprocher l'objet de l'étude des configurations rencontrées dans les ouvrages. Une barre métallique a été placée contre une plaque de béton. Le rayonnement a provoqué l'apparition d'un champ de diffraction dont l'effet radiothermique a été observé en face arrière. L'effet d'une modification de l'incidence de la source, d'une translation et d'un déplacement de la barre a été étudié. Les résultats ont confirmé qu'il s'agissait bien d'un phénomène de diffraction.

Le chapitre 3 a décrit l'application de la stimulation micro-onde sur une paroi renforcée par un réseau d'armatures métalliques, ce qui a permis de mettre en évidence les phénomènes d'interférences et de diffraction générés dans la structure. Un nombre important de tests réalisés pour différentes configurations sont venus confirmer l'existence de ces phénomènes et nous ont conduits à déterminer l'évolution quantitative de paramètres influençant la visualisation des images thermiques.

Perspectives

Ce travail de thèse constitue une première étape qui a mis en évidence la possibilité de recourir à une source micro-ondes pour ausculter les ouvrages en béton renforcé. Le potentiel de cette technique appelle des développements complémentaires. Le passage in situ nécessite la mise au point d'un protocole d'essai qui permettent de maîtriser les risques pour les opérateurs. Une meilleure connaissance des propriétés diélectriques des matériaux et des caractéristiques de l'antenne en champ proche permettrait d'exploiter au mieux la répartition géométrique des figures d'interférences pour en déduire des informations plus fines sur les réseaux d'armatures. L'utilisation d'un générateur de micro-ondes travaillant dans une bande de fréquence plus élevée comme la bande X pourrait conduire à une diminution des phénomènes de diffraction et à l'obtention d'une meilleure résolution des défauts. La mise en évidence de l'état de corrosion des armatures ou l'évaluation de la teneur en eau du matériau sont peut-être des perspectives de recherches à développer dans l'avenir.

Un système d'excitation de surface par association d'un dispositif optique et d'un Laser CO₂ d'ouverture réglable a été développé. Le système optique de déviation du faisceau laser permet de focaliser la sollicitation thermique à un endroit précis de l'échantillon. IL s'agit d'une source de chauffage surfacique tout à fait originale et dont l'uniformité doit pouvoir être améliorée.

ANNEXE

PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

PUBLICATIONS DANS DES REVUES

1. Sam Ang KEO, Didier DEFER, Florin BREABAN, Franck BRACHELET
« Comparison between Microwave Infrared Thermography and CO₂ Laser Infrared Thermography in Defect Detection in Applications with CFRP », **Materials Sciences and Applications**, Vol. 4, No. 10, 2013, pp. 600-605. (Open Access)
2. Sam Ang KEO, Franck BRACHELET, Florin BREABAN, Didier DEFER
« Development of an Infrared Thermography Method with CO₂ Laser Excitation, Applied to Defect Detection in CFRP », **World Academy of Science, Engineering and Technology**, Vol. 7, No. 8, 2013, pp. 192-197. (Open Access)
3. Sam Ang KEO, Franck BRACHELET, Florin BREABAN, Didier DEFER
« Steel Detection in Reinforced Concrete Wall by Microwave Infrared Thermography », **NDT&E International**, Elsevier (Scencedirect) – en révision
4. Sam Ang KEO, Franck BRACHELET, Florin BREABAN, Didier DEFER
« Defect Detection in CFRP by Infrared Thermography with CO₂ Laser Excitation Compared to Conventional Lock-in Infrared Thermography », **Composites Part B: Engineering**, Elsevier (Scencedirect) – en révision
5. Sam Ang KEO, Franck BRACHELET, Didier DEFER, Florin BREABAN
« Defects Detection by Infrared Thermography with a New Microwave Excitation System », **Mechanics & Industry** – Under Review.
6. Sam Ang KEO, Franck BRACHELET, Didier DEFER, Florin BREABAN
« Détection de Défauts par Thermographie Infrarouge avec Un Nouveau Système d'Excitation Micro-ondes », Contrôles Essais Mesures, Revue de Technologies et Applications de Contrôles pour les Laboratoires et L'industrie.

CONFERENCES INTERNATIONALES AVEC ACTE ET COMMITES

1. Sam Ang KEO, Franck BRACHELET, Florin BREABAN, Didier DEFER
« Development of an Infrared Thermography Method with CO₂ Laser Excitation, Applied to Defect Detection in CFRP », **International Conference on Composite Materials (ICCM)**, Amsterdam 8-9 août 2013, Issue 80 of World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET):
<http://www.waset.org/journals/waset/v80/v80-30.pdf>
2. Sam Ang KEO, Franck BRACHELET, Didier DEFER, Florin BREABAN
« Détection de Défauts par Thermographie Infrarouge avec Un Nouveau Système d'Excitation Micro-ondes », **3^{ème} Congrès International sur l'Ingénierie des Risques Industriels (CIRI2013)**, Reims 3-5 juillet 2013.