



**MEMOIRE**  
présenté à

l'Université Transilvania de Brasov, Roumanie

pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université Transilvania de Brasov, Roumanie  
et de l'Université d'Artois, France

Spécialité : **Science pour l'ingénieur**, option : **Mécanique**

par

**Răzvan Gabriel DRĂGAN**

**ETUDES SUR LE DIAGNOSTIQUE DES SYSTEMES  
PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE**

Soutenu le 5 décembre 2015 devant le jury composé de :

M. ARGHIR, Professeur, Université Technique Cluj-Napoca (Roumanie).

E. CICALĂ, Maître de Conférences, Université de Bourgogne

*Rapporteurs*

F. BREABĂN, Université d'Artois.

C. I. OLTEANU, Professeur, Université Transilvania de Braşov (Roumanie).

O. MUNTEANU, Professeur, Université Transilvania de Braşov (Roumanie).

L. BERETEU, Professeur, Université Polytechnique de Timisoara (Roumanie).

P. VANTOMME, Professeur, Université de Picardie.

F. BRACHELET, Ingénieur de Recherche HDR, Université d'Artois.

Membres



## REMERCIEMENTS

La thèse est réalisée en cotutelle avec l'Université d'Artois, France et représente les résultats de recherche déroulée au long de trois ans, avec le support scientifique et logistique d'un nombre important de personnes et institutions, auxquels je dois apporter toute ma reconnaissance et auxquels je veux suivant remercier.

Une grande partie des recherches expérimentales de la thèse ont été possibles due à l'accès qui m'a été assuré dans les laboratoires du *Département de Conception de produit, Mécatronique et Environnement*. En ce qui concerne une partie consistante des expérimentations, je dois mentionner l'importance spéciale du stage à l'Université d'Artois, Laboratoire LGCgE.

Je désire remercier à mes directeurs de thèse, Prof. Ciprian Iustin OLTEANU de l'Université Transilvania de Brasov et Prof. Florin BREABAN de l'Université d'Artois et aux coordinateurs de recherche pour leur support qui m'ont aidé réaliser la thèse à un niveau scientifique élevé.

Je tiens ensuite à exprimer ma gratitude à Mme Professeur Ileana Rosca pour son soutien, aussi bien sur le plan scientifique que personnel, ainsi que pour le temps qu'elle m'a consacré pendant toute la durée de la thèse. Je suis tout autant reconnaissant au Docteur Frank Brachelet, qui a coencadré cette thèse - il m'a fait profiter autant de ses connaissances et savoir-faire que de son enthousiasme, de sa rigueur et de son ouverture d'esprit. Il a guidé mes premiers pas à Béthune, m'aidant permanent pendant mon stage.

Pour les expérimentations en thermographie infrarouge active avec le laser CO<sub>2</sub> et le générateur microonde, M Dr. Samang Keo m'a aidé et m'a guidé dans la mise au point des nouveaux cas. Dans l'expérimentation j'ai eu aussi l'opportunité de travailler avec prof. Sorin Zamfira.

Je tiens à remercier spécialement à Mme Francine Monchau pour le fait de m'avoir mis à la disposition les échantillons en céramique nécessaires:

Pas en dernier, je désire remercier particulièrement à ma famille et à mes proches pour leur compréhension et leur support moral et financier accordé au long de mon stage doctoral.

## RÉSUMÉ

La thèse intitulée *Etudes sur le diagnostic des systèmes par thermographie infrarouge* propose des recherches théoriques et expérimentales dans un domaine complexe - le domaine des méthodes d'analyse non-destructive, spécialement la thermographie infrarouge utilisant des diverses sources d'excitation thermique: laser à CO<sub>2</sub>, lampes photographiques à halogène, sources électriques, micro-ondes et induction électromagnétique.

L'analyse par thermographie infrarouge a été appliquée sur des divers systèmes soit du génie civil, soit de l'ingénierie médicale, dans le but de détecter des défauts internes et de surface, micro-fissures, des métaux englobés, et, en même temps, l'analyse de leur influences dans le processus de transfert thermique.

La thèse est structurée en six chapitres dont trois s'occupent de l'introduction, les objectifs de la recherche, les conclusions, les contributions originales et la valorisation des résultats (publiés et contrats de recherches), ainsi que le développement futur du sujet de la thèse. Les trois chapitres suivants développent le sujet de la thèse en commençant avec une analyse rigoureuse de la littérature suivie par des études théoriques et expérimentales sur l'analyse des systèmes par thermographie infrarouge:

Le travail contient 181 figures et 12 tableaux à travers lesquels sont mis en évidence les résultats et des informations de haut niveau scientifique.

Pendant le stage doctoral ont été réalisées et publiées 10 articles dans les volumes des conférences internationales dont pour six le docteur est premier auteur.

## MOTS CLES

Thermographie, sources thermique, température, béton, céramiques, défaut, induction, laser, logiciel ComsolMultiphysics.



## **ABSTRACT**

The thesis “Research concerning the systems analyze by infrared thermography” proposes theoretical and experimental researches in the very complex domain of non destructive inspection methods, especially the infrared thermography – CO2 laser excitation, halogen lamps, electric heat sources, microwaves and electromagnetic induction. The thermographic analyze was applied on materials used in constructions and biomedical engineering, the goal being the internal and external defect detection, micro cracks, the detection of the embed metallic materials and also the analysis of their thermal influence in the heat transfer process. The thesis is structured in six chapters and, among them: three are concerned on introduction, thesis objectives, conclusions, original contribution and thesis valorization (published papers and research grants)/future research directions. The next three develop, consistently, the thesis subject, beginning with critical analyze of the specialized literature that is followed by theoretical study, and the experimental study of systems by infrared thermography. The PhD thesis contains 181 figures and 12 tables in which are illustrated and highlighted results and information with a high scientific degree. During the research program, the author elaborated and published 10 papers in the proceedings of different scientific events in Romania and abroad, in six of them being the first author.

## **KEY WORDS**

Thermography, thermic source, temperature, beton; ceramics; default, induction, laser, and ComsolMultiphysics software.

# TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	1
Résumé/mots clés	2
Abstract/key words	3
Table des matières	4
Figures et tableaux	6
<b>Introduction</b>	13
<b>Chapitre 2. Étude bibliographique concernant l'analyse des systèmes par thermographie infrarouge</b>	16
2.1. Evaluation non destructive des systèmes	17
2.1.1. Evaluation non destructive par ultrasons	17
2.1.2. Méthode de contrôle impact-écho	19
2.1.3. Méthode d'évaluation par radiographie	20
2.1.4. Evaluation non-destructive par courants de Foucault	21
2.2. Evaluation non destructive des systèmes par thermographie infrarouge	22
2.2.1. Notions générales	22
2.2.2. Spectre électromagnétique	23
2.2.3. Emissivité, corps noir, gri et non-gri	24
2.2.4. Principe de mesure de la température par thermographie infrarouge et le milieu de transmission de la radiation	26
2.2.5. Principe de fonctionnement d'une caméra thermographique et les détecteurs IR utilisés dans l'imagerie thermographique	27
2.2.6. Thermographie infrarouge ACTIVE et PASSIVE	28
2.2.7. Thermographie infrarouge en constructions	35
2.2.8. Dispositifs d'excitation thermique	36
2.3. Conclusions	40
<b>Chapitre 3. Objectifs de la thèse</b>	41
<b>Chapitre 4. Études théoriques sur l'évaluation des systèmes par thermographie infrarouge</b>	43
4.1. Bases théoriques du transfert de chaleur	43
4.1.1 Champs de température	43
4.1.2. Gradient de température	44
4.1.3. Flux thermique	44
4.1.4. Température et ses unités de mesure	45
4.1.5. Modes de transfert thermique	45
4.2. Modélisation de la réponse thermique des structures	54
4.2.1. Méthode de modélisation	54
4.2.2. Structures de constructions civiles	58
4.2.3. Structures biocéramiques	69
4.3. Conclusions	75
<b>Chapitre 5. CONTRIBUTIONS EXPERIMENTALES</b>	78
5.1. Conception des expérimentations pour déterminer par thermographie infrarouge les défauts des matériaux biocéramiques et des tissus osseux	78

5.1.1. Objectifs des expérimentations	78
5.1.2. Sélection des méthodes d'analyse par thermographie infrarouge des matériaux biocéramiques et des tissus osseux	79
5.1.3. Analyse des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active à impulsions utilisant le laser CO <sub>2</sub>	79
5.1.4. Analyse des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active avec excitation thermique donnée par une résistance électrique	97
5.1.5. Analyse des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active à impulsions	105
5.1.6. Analyse de l'adhérence sur les systèmes osseux des membranes d'acide poly lactique par thermographie infrarouge active à impulsions	115
5.1.7 Choix de la méthode optimale pour le dépistage des défauts internes dans les systèmes biocéramiques par TIR (laser CO <sub>2</sub> ; lampes à halogène)	128
5.2. Conception des expérimentations pour l'analyse par thermographie infrarouge active en constructions	133
5.2.1. Objectifs des expérimentations	133
5.2.2. Choix des méthodes d'analyse par thermographie infrarouge des systèmes	133
5.2.3 Analyse du béton armé par thermographie infrarouge active en vue de détecter l'armature en acier, en utilisant un générateur de microondes	134
5.2.4 Détection des défauts dans les matériaux de construction, essayes sur des plaques plâtrées par thermographie infrarouge active avec une source électrique d'excitation thermique	146
5.2.5 Analyse du transfert thermique et de la distribution de température pour des plaques en béton armé par thermographie infrarouge active et simultanément par un système de senseurs de température	147
5.2.6 Analyse des soudures en constructions en vue de détecter les défauts par thermographie infrarouge et par induction électromagnétique	153
5.3. Conclusions	159
5.3.1 Conclusions concernant l'analyse expérimentale des systèmes biocéramiques par thermographie infrarouge active	159
5.3.2 Conclusions concernant l'analyse expérimentale des systèmes utilisés en constructions par thermographie infrarouge active	161
<b>Chapitre. 6. CONCLUSIONS FINALES. CONTRIBUTIONS ORIGINALES. VALORISATION DE LA RECHERCHE. PERSPECTIVES</b>	163
6.1. Conclusions finales	163
6.2. Contributions originales	169
6.3. Valorisation de la recherche	171
6.4. Perspectives de développement de la recherche	173
<b>Bibliographie</b>	175
<b>ANNEXES</b>	181
Annexe 1. Modélisation de la réponse thermique des plaques en béton armé	181
Annexe 2. Modélisation de la réponse thermique pour un échantillon de HA-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	186
Annexe 3. Résultats de l'analyse des systèmes de constructions par TIR active	192
Annexe 4. Analyse des cordons de soudure avec grande porosité	198

## LISTE FIGURES

- Fig. 2.1.** Réflexion ultrasonique d'un défaut circulaire.
- Fig. 2.2.** Phénomène de diffraction dans un réservoir d'eau.
- Fig. 2.3.** Méthode de détection du défaut par ultrasons : la méthode en transmission avec deux transducteurs (a) ; la méthode « pulse-écho » où un seul transducteur est nécessaire (b).
- Fig. 2.4.** Principe théorique de fonctionnement de la méthode „Impact-écho”.
- Fig. 2.5.** Principe de la méthode d'EN par radiographie.
- Fig. 2.6.** Principe de la méthode d'EN par courants de Foucault.
- Fig. 2.7.** Spectre électromagnétique domaine de mesure en infrarouge.
- Fig. 2.8.** Emissivité  $\varepsilon$  d'un matériau en fonction de l'angle d'observation  $\varphi$ .
- Fig. 2.9.** Rapport entre la radiation émise et les caractéristiques de la surface du matériau.
- Fig. 2.10.** Présentation schématique des essais par thermographie infrarouge.
- Fig. 2.11.** Transmission et absorption mesurées dans l'atmosphère à 10 m du niveau du sol à une humidité de 50%.
- Fig. 2.12.** Schéma bloc d'une camera thermographique.
- Fig. 2.13.** Méthodes utilisées dans l'évaluation par thermographie infrarouge.
- Fig. 2.14.** Principe de l'évaluation par thermographie infrarouge passive.
- Fig. 2.15.** Exemple de propagation d'une onde thermique par conduction à travers un élément d'aluminium à une fréquence de 10 Hz.
- Fig. 2.16.** Principe de fonctionnement et l'installation expérimentale utilisée dans TL.
- Fig. 2.17.** Installation expérimentale utilisée dans le laboratoire de génie civil et environnement (LGCgE), Université Artois.
- Fig. 2.18.** Méthode de calcul du décalage de phase et d'amplitude du signal sinusoïdal en TL.
- Fig. 2.19.** Installation expérimentale et le principe de la thermographie à impulsion (TP).
- Fig. 2.20.** Evolution de la température : matrice ED des données (a) ; profil de la température pour les pixels contenant le défaut (en rouge pointillé) et ceux sans défaut (en bleu continu).
- Fig. 2.21.** Principe de la thermographie infrarouge active.
- Fig. 2.22.** Lampes photographiques utilisées pour la thermographie infrarouge à impulsions.
- Fig. 2.23.** Phénomène d'interaction des photons des deux niveaux énergétiques de l'atome.
- Fig. 2.24.** Structure du magnétron.
- Fig. 2.25.** Interaction entre les nuages d'électrons et le champ de la cavitation.
- 
- Fig. 4.1.** Gradient de température.
- Fig. 4.2.** Modes de transfert thermique.
- Fig. 4.3.** Schéma du transfert thermique par conduction thermique.
- Fig. 4.4.** Transfert thermique unidirectionnel par conduction thermique à travers une paroi homogène.
- Fig. 4.5.** Convection thermique entre une surface chauffée et l'air en mouvement.

- Fig. 4.6.** Pouvoir d'émission du corps noir.
- Fig. 4.7.** Valeurs de l'émissivité pour des matériaux divers.
- Fig. 4.8.** Modèle en SolidWorks de la plaque en béton, armée avec trois barres longitudinales  $\phi 12$ .
- Fig. 4.9.** Mode de choix de : phénomène physique (a) ; type de transfert thermique (b) ; régime de transfert thermique (c).
- Fig. 4.10.** Mode d'importation du modèle 3D de SolidWorks en Comsol Multiphysics.
- Fig. 4.11.** L'introduction dans la fenêtre du logiciel des propriétés du béton.
- Fig. 4.12.** L'introduction dans la fenêtre du logiciel des propriétés de l'acier.
- Fig. 4.13.** Définition des éléments de la plaque en béton sans armature (a) ; définition des éléments d'armature étant dans l'intérieure de la plaque (b).
- Fig. 4.14.** Source d'échauffement [W] et la formule de calcul (a) ; flux thermique ; coefficient de convection de l'aire et la température extérieure (b).
- Fig. 4.15.** Modèle 3D de la plaque de béton simple (a) et les éléments de la surface discrétisée (b).
- Fig. 4.16.** Distribution thermique après 60 minutes : sur la surface supérieure de la plaque de béton (a) ; sur la surface inférieure (b).
- Fig. 4.17.** Evolution de la température dans de la plaque de béton représentée en différentes sections après 60 de minutes.
- Fig. 4.18.** Evolution du champ de température après:  $t=0$  min (a);  $t=15$  min (b),  $t=30$  min (c);  $t=45$  min (d),  $t=60$  min (e).
- Fig. 4.19.** Ligne du profile thermique de la plaque (ligne rouge).
- Fig. 4.20.** Profile thermique de la plaque de béton distribué en temps (surface supérieure).
- Fig. 4.21.** Profile thermique de la plaque en béton distribué sur l'épaisseur (échauffement de droite à gauche).
- Fig. 4.22.** Modèle3D de la plaque (a); détail des éléments de division de l'ensemble barre-plaque (b); détail des éléments de division de la surface de la barre d'acier et de la plaque an béton (c).
- Fig. 4.23.** Distribution thermique après 60 minutes, sur la surface : extérieure (a) ; inférieure (b).
- Fig. 4.24.** Champ de température après : 0 (a); 15 (b), 30 (c); 45 (d) et 60 (e) min., détail de l'armature (f).
- Fig. 4.25.** Profile thermique de la plaque de béton distribué en temps (pour la surface supérieure).
- Fig. 4.26.** Profile thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 15 minutes (a) et 30 minutes (b).
- Fig. 4.27.** Profile thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 45 minutes (a) et 30 minutes (b).
- Fig. 4.28.** Modèle 3D de l'échantillon en  $Al_2O_3$  (a); discrétisation des surfaces (b); détail du défaut (c).
- Fig. 4.29.** Distribution de la température sur la surface du défaut après 5 s (a) ; section dans la zone du défaut en même moment (b) ; division du modèle en zones par des plans parallèles (c).
- Fig. 4.30.** Evolution du champ de température dans l'échantillon de  $Al_2O_3$  (surface non chauffée),  $t = 5s$ .
- Fig. 4.31.** Evolution du champ de température dans l'échantillon de  $Al_2O_3$  (surface chauffée),  $t = 5s$ .
- Fig. 4.32.** Profile thermique de la surface de l'échantillon de  $Al_2O_3$  avant le démarrage de la source.

- Fig. 4.33.** Profile thermique de la surface de l'échantillon de  $Al_2O_3$  5 s après le démarrage de la source (méthode par transmission).
- Fig. 4.34.** Profile thermique de la surface de l'échantillon de  $Al_2O_3$  5 s après le démarrage de la source (méthode par réflexion).
- Fig. 5.1.** Schéma de base du principe d'analyse des systèmes par thermographie infrarouge active.
- Fig. 5.2.** Schéma des sources d'excitation thermique et leurs domaines d'application.
- Fig. 5.3.** L'installation expérimentale utilisée.
- Fig. 5.4.** Laser  $CO_2$  (a); tête de découpage du laser  $CO_2$  (b).
- Fig. 5.5.** Dispositif de déviation du faisceau laser.
- Fig. 5.6.** Dispositif de déviation du faisceau laser : en place sur l'équipement (a) ; schéma optique du principe de fonctionnement (b).
- Fig. 5.7.** Caméra thermographique FLIR SC5000 (a); image captée par le logiciel spécialisé ALTAIR (b).
- Fig. 5.8.** Echantillons en HA- $Al_2O_3$  (a); polissage des surfaces des échantillons avec du papier abrasif (b).
- Fig. 5.9.** Processus de réalisation du défaut intérieur
- Fig. 5.10.** Image de l'échantillon en HA- $Al_2O_3$  (a); dimensions de l'échantillon et du défaut interne (b).
- Fig. 5.11.** Réalisation d'un défaut de surface sur un échantillon et le défaut résultant.
- Fig. 5.12.** Schéma d'essais de l'échantillon en plâtre (a) ; protection de l'opérateur par une plaque en verre (b).
- Fig. 5.13.** Image thermographique de la zone chauffée après 25 s (a); la variation de la température moyenne dans la zone chauffée en fonction de temps (b).
- Fig. 5.14.** Schéma de l'analyse des systèmes biocéramique par TIR active, en utilisant un laser  $CO_2$ .
- Fig. 5.15.** Transformation de l'image en matrice de valeurs de température.
- Fig. 5.16.** Image thermographique de l'échantillon témoin (a) ; variation de la température moyenne par rapport au temps (b).
- Fig. 5.17.** Image de l'échantillon sans défauts (a) ; image de l'échantillon avec défaut interne (b) ; le contraste entre les deux images a et b (c) ; le contraste entre les images de l'échantillon avec défaut au moment initial et après 3 s de l'arrêt du laser (d).
- Fig. 5.18.** Profile de température sur la direction du défaut interne dans l'échantillon d'HA- $Al_2O_3$ .
- Fig. 5.19.** Evolution en temps de la température de l'échantillon: sans défaut (a); avec défaut interne (b).
- Fig. 5.20.** Contraste thermique temporel entre la zone avec défaut et la zone sans défaut, du même échantillon avec défaut interne.
- Fig. 5.21.** Profile thermique 3D de l'échantillon avec défaut interne.
- Fig. 5.22.** Image thermographique de l'échantillon de HA- $Al_2O_3$  avec défaut de surface.
- Fig. 5.23.** Evolution en temps de la température pour l'échantillon avec défaut de surface.
- Fig. 5.24.** Contraste thermique temporel entre les deux zones d'intérêt.
- Fig. 5.25.** Image thermographique de l'échantillon avec défaut et le vecteur de température sur la direction du défaut.

- Fig. 5.26.** Profile thermique de l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par le défaut de surface : initial (a) ; au moment de l'excitation thermique (b).
- Fig. 5.27.** Profile thermique de l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par le défaut de surface : à 2 s après le démarrage du laser (a) ; à la fin de l'analyse - 87 s (b).
- Fig. 5.28.** Profile 3D de l'échantillon d'HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec défaut de surface.
- Fig. 5.29.** L'installation expérimentale.
- Fig. 5.30.** Principe de la méthode d'analyse par thermographie infrarouge en transmission.
- Fig. 5.31.** Résistance électrique, source de chaleur (a) et le système d'excitation thermique (b).
- Fig. 5.32.** Source de courant GW InsteK GPC – 3030D.
- Fig. 5.33.** Evolution en temps de la température moyenne sur la surface de l'échantillon.
- Fig. 5.34.** Image thermographique de l'échantillon avec défaut au  $t=3,8$  s après le démarrage de la source d'excitation thermique.
- Fig. 5.35.** Profile thermique sur la direction du défaut de l'échantillon: sans défaut (a); avec défaut (b).
- Fig. 5.36.** Profile 3D de l'échantillon avec défaut au  $t = 3,8$  s.
- Fig. 5.37.** Evolution de la température en fonction du temps d'analyse dans la zone du défaut (ligne rouge) et dans la zone sans défaut (ligne verte) de l'échantillon sans défaut (a) ; évolution de la température en fonction du temps d'analyse dans la zone du défaut (ligne rouge) et dans la zone sans défaut (ligne verte) de l'échantillon avec défaut (a).
- Fig. 5.38.** Evolution par rapport au temps d'analyse de la température dans la zone avec défaut et le signal électrique enregistré par la caméra thermographique.
- Fig. 5.39.** Contraste thermique temporel entre les zones avec et sans défaut.
- Fig. 5.40.** L'installation expérimentale.
- Fig. 5.41.** Caméra thermographique FLIR ThermaCam S45.
- Fig. 5.42.** Lampes à halogène *Kaiser Videolight 6* pour l'excitation thermique.
- Fig. 5.43.** Générateur d'impulsions.
- Fig. 5.44.** Forme du signal électrique enregistré avec l'oscilloscope.
- Fig. 5.45.** Schéma de l'échantillon ayant un défaut interne en diamètre  $\varnothing = 1$  mm.
- Fig. 5.46.** Schéma de l'installation expérimentale.
- Fig. 5.47.** Images thermographique de l'échantillon avec défaut interne dans les différentes étapes de l'excitation thermique, aux moments :  $t = 0$  s (a);  $t = 3$  s (b);  $t = 9$  s (c);  $t = 16$  s (d).
- Fig. 5.48.** Evolution de la température dans la zone avec défaut et la zone sans défaut.
- Fig. 5.49.** Contraste thermique temporel entre la zone avec défaut et la zone sans défaut durant l'analyse.
- Fig. 5.50.** Profile thermique de surface sur la direction du défaut interne.
- Fig. 5.51.** Images thermographique de l'échantillon avec défaut de surface dans les différentes étapes de l'excitation thermique, aux moments :  $t = 0$  s (a);  $t = 3$  s (b);  $t = 9$  s (c);  $t = 16$  s (d).
- Fig. 5.52.** Evolution de la température dans la zone avec défaut et la zone sans défaut.
- Fig. 5.53.** Contraste thermique temporel entre la zone avec défaut et la zone sans défaut durant l'analyse.
- Fig. 5.54.** Profile thermique de surface sur la direction du défaut de surface.

- Fig. 5.55.** Images thermographique de l'échantillon avec défaut interne dans les différentes étapes de l'excitation thermique, aux moments :  $t = 0$  s (a);  $t = 3$  s (b);  $t = 9$  s (c);  $t = 16$  s (d).
- Fig. 5.56.** Evolution de la température dans la zone avec défaut et la zone sans défaut.
- Fig. 5.57.** Contraste thermique temporel entre la zone avec défaut et la zone sans défaut durant l'analyse.
- Fig. 5.58.** Composition chimique de l'acide polylactique (PLA).
- Fig. 5.59.** Processus d'obtention de l'acide polylactique (PLA).
- Fig. 5.60.** Processus d'obtention de la poly-lactide.
- Fig. 5.61.** Régénération du tissu osseux. L'apparition des ostéoblastes après 6 semaines de l'implantation (PLLA a été utilisé comme support pour BMP).
- Fig.5.62.** Installation expérimentale.
- Fig.5.63.** Schéma de l'installation expérimentale.
- Fig. 5.64.** Echauffement de la membrane pour l'application l'échantillon d'os.
- Fig.5.65.** Moment du bombardement à impulsions.
- Fig.5.66.** Image thermographique de l'os sans membrane appliquée.
- Fig.5.67.** L'échantillon avec la membrane partiellement adhérente (a); Image thermographique (b).
- Fig.5.68.** Membrane adhérente correctement sur la surface osseuse (a); image thermographique (b).
- Fig.5.69.** Différences entre les images thermographiques de l'os simple et de celui avec la membrane incorrectement appliquée.
- Fig.5.70.** Variation de la température moyenne sur la surface à membrane correctement adhérente.
- Fig.5.71.** Représentation de la variation de température entre la zone adhérente et un point de l'os.
- Fig.5.72.** Evolution de la température pour excitation thermique par : lampes photographiques à halogène (a), laser CO<sub>2</sub> (b).
- Fig.5.73.** Contraste thermique pour excitation thermique par : lampes photographiques à halogène (a), laser CO<sub>2</sub> (b).
- Fig.5.74.** Image thermographique de l'échantillon en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pour l'excitation thermique par : laser CO<sub>2</sub> (a), lampes photographiques à halogène (b).
- Fig.5.75.** Pondération des critères.
- Fig. 5.76.** Installation expérimentale.
- Fig. 5.77.** Générateur de microondes.
- Fig. 5.78.** Vue d'ensemble de l'antenne de transmission des microondes pour l'excitation thermique des échantillons en béton (a); intérieur de l'antenne (b).
- Fig. 5.79.** Section dans la plaque en béton et positionnement des barres d'armature à l'intérieur.
- Fig. 5.80.** Le principe d'analyse par thermographie active avec microonde de l'échantillon en béton.
- Fig. 5.81** Schéma de l'analyse thermographique de l'échantillon par transmission dans le 1er cas.
- Fig. 5.82.** Distribution de température sur la surface de l'échantillon dans les différents moments de l'excitation thermique.
- Fig. 5.83.** Evolution de la température devant l'armature (rouge) et devant la zone sans armature (bleu).



- Fig. 5.84.** Profile thermique de la plaque en béton après 290 s du démarrage du générateur de microondes.
- Fig. 5.85.** Profile 3D des températures enregistrées sur la surface de l'échantillon.
- Fig. 5.86.** Histogramme de l'image thermographique enregistrée par la caméra au moment  $t=290$  s.
- Fig. 5.87.** Schéma de l'analyse thermographique de l'échantillon par transmission dans le IIème cas.
- Fig. 5.88.** Distribution de température sur la surface de l'échantillon dans les différents moments de l'excitation thermique.
- Fig. 5.89.** Evolution de la température devant l'armature (rouge) et devant la zone sans armature (bleu).
- Fig. 5.90.** Profile thermique de la plaque en béton après 290 s du démarrage du générateur de microondes.
- Fig. 5.91.** Histogramme de l'image thermographique enregistrée par la caméra au moment  $t=290$  s.
- Fig. 5.92.** Profile 3D des températures enregistrées sur la surface de l'échantillon.
- Fig. 5.93.** Schéma de l'analyse thermographique de l'échantillon par transmission dans le IIIème cas.
- Fig. 5.94.** Distribution de la température sur la surface de l'échantillon en différentes étapes d'excitation thermique.
- Fig. 5.95.** Evolution de la température devant l'armature (rouge) et devant la zone sans armature (bleu).
- Fig. 5.96.** Profile thermique de la plaque en béton après 290 s du démarrage du générateur de microondes.
- Fig. 5.97.** Histogramme de l'image thermographique enregistrée par la caméra au moment  $t=290$  s.
- Fig. 5.98.** Profile 3D des températures enregistrées sur la surface de l'échantillon.
- Fig. 5.99.** Echantillon en béton armé : image (a) ; modèle 3D (b).
- Fig. 5.100.** Installation d'échauffement et de fixation de l'échantillon en béton armé.
- Fig. 5.101.** Schéma d'emplacement des senseurs de température sur la surface : supérieure (a) ; inférieure (b).
- Fig. 5.102.** Installation expérimentale.
- Fig. 5.103.** Evolution de la température de l'échantillon enregistrées par la matrice de senseurs sur la surface : supérieure (a) ; inférieure (b).
- Fig. 5.104.** Différences entre les valeurs de température enregistrées par la matrice de senseurs entre les deux surfaces de l'échantillon ( $\Delta T$ ).
- Fig. 5.105.** Carte thermique initiale de l'échantillon : image (a) ; profile thermique initial sur la ligne  $L1$  (b).
- Fig. 5.106.** Carte thermique de l'échantillon : image (a) ; profile thermique sur la ligne  $L2$  (b) après 35 min.
- Fig. 5.107.** Différence de température entre les deux profiles thermiques, sur les lignes  $L1$  et  $L2$ .
- Fig. 5.108.** Profile de l'image thermographique après 35 minutes du démarrage de la source de chaleur.
- Fig. 5.109.** Principe de base de la détection des fissures par thermographie infrarouge active avec induction.
- Fig. 5.110.** Installation expérimentale.
- Fig. 5.111.** Installation d'échauffement des échantillons par induction.
- Fig. 5.112.** Dimensions géométriques de l'échantillon.

**Fig. 5.113.** Détail de couture de soudure fissurée.

**Fig. 5.114.** Opération de soudure des échantillons.

**Fig. 5.115.** Échantillon avec le cordon de soudure fissuré.

**Fig. 5.116.** Image thermographique de l'échantillon avec une microfissure dans le cordon de soudure, 30 s après l'arrêt de la source.

**Fig. 5.117.** Représentation graphique de l'évolution de la température par rapport au temps.

**Fig. 5.118.** Contraste thermique temporel entre la zone avec fissure et la zone sans fissure.

## LISTE TABLEAUX

**Tableau 2.1.** Avantages et désavantages de l'évaluation non-destructive par thermographie infrarouge

**Tableau 2.2.** Coefficients d'émissivité thermique pour des matériaux non-métallique en génie civile.

**Tableau 2.3.** Classification des lasers.

**Tableau 2.4.** Domaines de fréquences usuels des microondes.

**Tableau 4.1.** Coefficient de conductivité thermique pour des matériaux différents.

**Tableau 4.2.** Équations différentielles du transfert thermique par conduction thermique

**Tableau 4.3.** Valeurs du coefficient de convection pour des différents fluides.

**Tableau 5.1.** Comparaison des propriétés des bio-polymères avec celles des matériaux plastiques conventionnelles.

**Tableau 5.2.** Capacité de biodégradabilité des polymères utilisés en reconstruction du tissu osseux (exprimée en *mois*).

**Tableau 5.3.** Qualificatifs accordés pour chaque critère.

**Tableau 5.4.** Coefficient de pondération.

**Tableau 5.5.** Score final  $N_i \gamma_i$  obtenu par les méthodes d'analyse par TIR.

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

Découverte en 1800 par l'astronome anglais Sir William Herschel, la radiation infrarouge est à la base de la technique nommée *thermographie*. Du point de vue étymologique, le terme est à l'origine composé des deux mots grecs : *therme* – chaleur et *graphein* – écrire. La radiation infrarouge n'est pas visible à l'œil libre mais elle est perçue de l'humain comme chaleur. Tout objet, ayant une température plus grande que zéro absolu, émet de la radiation thermique, donc y compris un glacier.

La thermographie infrarouge permet de mesurer des températures à distance, sans contact, ce qui est indispensable dans le cas des équipements qui ne peuvent pas être arrêtés ou qui ne permet pas le contact direct. Par ça on peut la nommer *méthode d'investigation non destructive et non invasive* parce qu'elle n'intervient pas et n'influence d'aucune manière le système testé. Elle est aussi une méthode ultrasensible, en indiquant des différences de température de dixième de degré spatial et temporel.

La plupart des matériaux communs sont « opaques » pour la radiation infrarouge, même s'ils sont transparents pour la lumière visible – d'ici, la thermographie infrarouge est limitée à l'analyse des surfaces et elle ne peut pas « voir » directement la distribution de la température dans l'intérieur des corps mais seulement indirect, dans la mesure où la distribution superficielle est une résultante de la distribution en volume.

La méthode d'auscultation par thermographie infrarouge a pénétré récemment dans la pratique des inspections non destructives, étant encore encadrée dans la catégorie des méthodes spéciales. Le progrès technique général et l'évolution exponentielle des équipements informatique ont déterminé l'évolution spectaculaire des caméras en infrarouge, indispensables pour l'investigation thermographique.

L'applicabilité de cette méthode est très vaste, dans des divers domaines : énergétique, génie civil, électronique, médecine etc. dans le domaine des constructions, la thermographie infrarouge est largement appliquée, de l'efficacité énergétique des bâtiments jusqu'à l'étude détaillée des matériaux et des systèmes de construction.

Un autre domaine important est représenté par la médecine, où la thermographie offre des résultats de grand intérêt en ce qui concerne le dépistage précoce des maladies et permet une

évaluation de l'état des patients dans les périodes pré- et post- opératoires. Dans ce sens, on peut affirmer que la thermographie est unique, ayant la capacité de visualiser des changements du point de vue physiologique des processus métaboliques par dépistage des non uniformités dans la distribution de température à la surface du corps humain.

La recherche de cette thèse a été développée dans l'esprit du dépistage des défauts des matériaux à destinations multiples. L'approche adaptée suivi un long processus jalonné des plusieurs étapes : les bases théoriques de la thermographie, le matériel utilisé dans l'auscultation utilisé fréquemment dans le génie civil et pour les matériaux à destinations non conventionnelles, méthodes d'analyse de la réponse aux différents types de génération de l'énergie thermique.

En plus, la recherche a été dirigée vers les matériaux composites à des caractéristiques particulières, imposées par leur domaine d'utilisation comme, par exemple, les biomatériaux. Ceux-ci se trouvent être à présent dans une dynamique particulière de leur développement, en accord avec la multiplication continue des applications médicales, soit les biomatériaux utilisés dans la construction des implants, soit les biomatériaux absorbables destinés à servir de support pour des cellules vivantes qui se développent après l'implantation et qui peuvent générer un support supplémentaire au tissu naturel en remplaçant le matériau absorbé. Dans tous ces cas, l'homogénéité du matériau, le respect d'une certaine uniformité de la porosité qui favoriserait la circulation des liquides vitaux, est essentielle. Pour ces raisons, l'analyse par thermographie infrarouge, aussi relevant à des basses températures, a été dirigée vers cette classe de systèmes.

Partant de ces considérations, la thèse doctorale intitulée *Etudes sur le diagnostic des systèmes par thermographie infrarouge* envisage de réaliser des études théoriques et expérimentales dans le vaste domaine des méthodes non destructives d'auscultation appliquées sur des systèmes conventionnelles de génie civil mais aussi sur les biosystèmes utilisés dans la réalisations implants de protection, comme les membranes protectrice en poly-lactides, ou dans la construction des prothèses absorbables intervertébrales.

Le mémoire de thèse est structuré en six chapitres, dont trois s'occupent de l'introduction, les objectifs de la recherche, les conclusions, contributions originales et perspectives de développement et les trois autres développent successivement, d'une manière consistant le sujet, commençant avec l'étude bibliographique dans le domaine suivie par les études théoriques de l'analyse par thermographie infrarouge des systèmes, le modélisation de la réponse thermique à des différentes sources d'excitation, des structures en génie civil et des bio-structures.

La *Bibliographie* consiste d'un nombre important de titres qui ont eu un rôle important dans le développement de la thèse, elle nécessitant un spectre large des connaissances les plus divers.

## CHAPITRE 2

# ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT L'ANALYSE DES SYSTEMES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

L'étude concerne les différentes méthodes de contrôle non destructif des systèmes du point de vue des phénomènes gouvernants, avantages, désavantages, domaine d'application etc. Les méthodes non destructives ont été sélectionnées à base d'une étude préliminaire de leur applicabilité sur les matériaux abordés dans cet ouvrage. D'autres considérations de base prises en compte sont basées sur les aspects économiques, la sécurité de l'opérateur, la protection des matériaux durant les essais, la précision, la vitesse de mesure et le traitement des données expérimentales.

Une fois les matériaux à étudier établis, a été effectuée une recherche bibliographique approfondie afin de trouver les méthodes les plus adaptées aux types de matériaux sélectionnés. Les matériaux sélectionnés pour cette recherche sont : le béton et les biocéramiques avec leurs systèmes composés comme, par exemple, le béton armé, dans le but commun de détecter les diverses anomalies dans leur structure.

Compte tenu de ces exigences, la thermographie infrarouge a été sélectionnée comme méthode d'inspection destinée à détecter les anomalies existantes dans la structure des matériaux qui vient d'être mentionnés/sélectionnés. Suivant, a été développée l'étude de cette méthode non destructive du point de vue des : variantes définies par des différents phénomènes physiques, le mode d'essai en fonction du but proposé, installations expérimentales etc.

Le béton représente un des matériaux les plus utilisés en génie civil, ayant un bon comportement durant l'exploitation et une résistance au feu supérieure par rapport aux autres matériaux de construction. Le béton peut être défini comme un conglomérat artificiel obtenu par le mélange d'un matériel inert (l'agrégat) avec un liant (ciment) et de l'eau jusqu'à une distribution uniforme: le système eau – ciment représente la partie active, ayant le rôle de lier l'agrégat et de remplir les espaces [Rap2006]. L'agrégat forme le système rigide du béton ce que lui donne des caractéristiques supérieures au mélange eau – ciment. Comme est déjà bien connu, le béton a une très bonne résistance aux sollicitations de compression mais, sa résistance en traction ou en flexion il est très peu résistant. A cause de ce dysfonctionnement, il est nécessaire

d'être renforcé par armatures avec des barres d'acier ayant des diamètres divers, établis en fonction des valeurs des contraintes qui sont supposées à solliciter l'élément de construction.

Une autre application de la thermographie infrarouge a été l'étude des biomatériaux, plus spécialement, les biocéramiques. L'implantation des matériaux artificiels dans l'organisme humain représente un grand intérêt non seulement du point de vue de sa réponse mécanique et fonctionnelle, mais aussi de part de son intégration dans l'organisme et son fonctionnement ultérieur en synergie avec la structure osseuse. Connaissant l'importance de ce type de matériau, le fait de trouver une méthode d'analyse qui n'influence pas du tout sa structure a été très sensible et, finalement, la thermographie infrarouge s'est avéré d'être la meilleure en ce sens.

Dans ce même chapitre sont présentées aussi des données expérimentales qui démontrent l'applicabilité de la thermographie dans l'étude des matériaux plus haut mentionnés.

## **2.1. EVALUATION NON DESTRUCTIVE DES SYSTÈMES**

L'évaluation non destructive (EN) suppose l'auscultation d'un système ou objet en utilisant des techniques qui assurent son bon fonctionnement après les essayes.

On peut affirmer que l'EN des matériaux offre la possibilité de détection des premiers signaux d'un default en permettant l'intervention sur l'objet ou sur le système avant qu'il soit détérioré ou non fonctionnel. Du point de vue de son utilité, des multiples domaines peuvent être mentionnés, parmi lesquels les plus connus seront : le contrôle de la qualité, maintenance, médecine, recherche etc. Pour appliquer l'EN en vue d'amélioration de la qualité des produits ou d'évaluer leur intégrité, il faut en tenir compte d'une série de critères pour le choix de la méthode : aspects économiques, applicabilité dans la détection du défaut, les propriétés du matériau etc. [Shull2001- Paul2005].

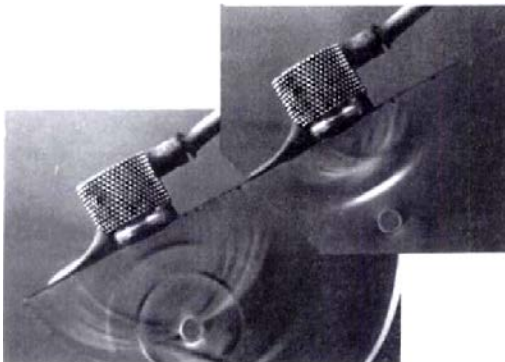
### **2.1.1. Evaluation non destructive par ultrasons**

L'évaluation non destructive par ultrasons [Shull2001- Paul2005] est parmi les méthodes les plus souvent utilisées en EN. Les ondes ultrasons sont des ondes soniques réalisées aux fréquences trop élevées (~20000 Hz) pour être perçues par l'oreille humaine et qui ont la capacité de se propager dans des milieux solides. Pendant leur propagation dans l'intérieur des matériaux, elles peuvent interagir avec les solides en formes diverses qui peuvent être décrites

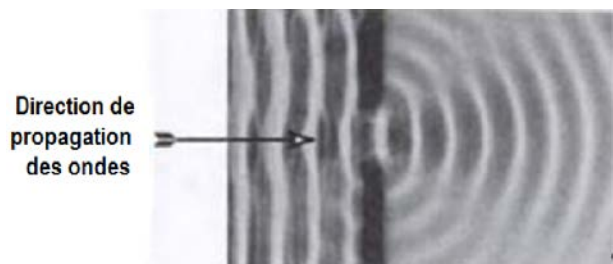
par des instruments mathématiques : dans l'application des EN, l'intervalle de fréquence commence à 50 kHz et peut arriver à des valeurs d'ordre de GHz.

D'habitude, quand on mentionne les ultrasons, ceux-ci sont perçus comme des ondes se propageant par l'air mais qui ont aussi la capacité de traverser des corps fluides et solides. Dans une analogie avec le spectre électromagnétique visible, le phénomène de la propagation des ondes sonores est inversé.

En haut de la figure 2.1 est visible le comportement d'une onde ultrasonique qui se propage dans un corps solide et rencontre un défaut circulaire. Le défaut produit la diffusion des ultrasons de même façon qu'une pierre formant des ondes circulaires après l'impact avec l'eau. Cette diffusion des ondes peut être détectée comme un écho dont les propriétés sont liées à la position, à la forme et à la taille du défaut. Dans la figure 2.2 est présenté le phénomène de diffraction dans un réservoir d'eau: on peut observer la modification de la forme de l'onde après la rencontre avec l'obstacle.

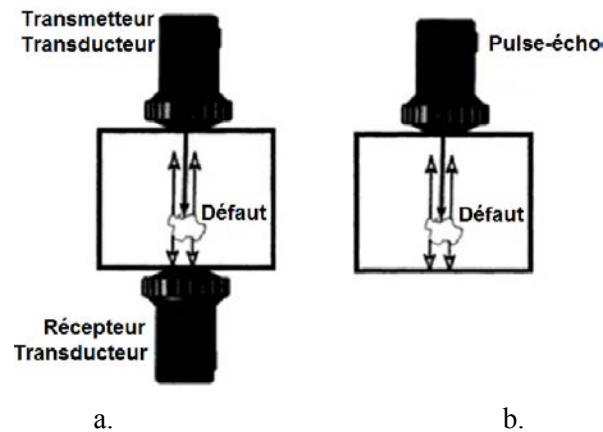


**Fig. 2.1.** Réflexion ultrasonique d'un défaut circulaire. [Shull2001]



**Fig. 2.2.** Phénomène de diffraction dans un réservoir d'eau. [Shull2001]

Pour l'auscultation des défauts en matériaux métalliques, initial a été développée une méthode avec ultrasons qui nécessitait deux transducteurs – méthode nommée « par transmission » (fig. 2.3, a). Suivant, a été développée une autre méthode basée sur le concept d'impulsions ultrasoniques, où un seul transducteur avait un double rôle – de transmetteur et de récepteur (la méthode pulse-écho, fig. 2.3 b). L'évaluation non-destructive par ultrasons a une applicabilité très large, dans des nombreux domaines comme: l'industrie aérospatiale, médecine, contrôle des tuyaux, en énergétique, voies ferrées etc.



**Fig. 2.3.** Méthode de détection du défaut par ultrasons : la méthode en transmission avec deux transducteurs (a) ; la méthode « pulse-écho » où un seul transducteur est nécessaire (b). [Shull2001]

### 2.1.2. Méthode de contrôle impact-écho

La méthode IMPACT- ECHO [Paul2005- Car2001, Chia2008] représente une méthode de contrôle non destructif utilisée dans l'auscultation du béton et de la maçonnerie, à base de la propagation d'une onde de choc à travers la structure du matériau analysé. Le principe de base de cette méthode est d'utiliser une sphère qui, en frappant le matériau étudié, crée une onde de choc qui est ultérieurement transformée en signal électrique. Cette transformation est assurée par un transducteur et, ensuite, le signal est transmis vers un système d'acquisition permettant la visualisation de la forme de l'onde choc qui est dépendante de temps et de la fréquence et qui mène à la détection de la zone du défaut. La profondeur  $L$  à laquelle est localisé le défaut dans le béton résulte de la relation [Tao2010] :

$$L = \beta \frac{v}{n \cdot F}, \quad (2.1)$$

où:  $F$  est la fréquence de résonance,  $v$  est la vitesse de l'onde de compression;  $\beta$  - est égal à 2 si le matériau du béton a une impédance mécanique réduite (air) ou 4 en cas contraire (armature métallique), alors que  $n$  est le facteur de forme quand on mesure l'épaisseur d'une plaque de béton.

#### Applications de la méthode Impact-Echo:

On peut mentionner une série d'applications où la méthode impact-écho est utilisée:

- Détermination de l'épaisseur des plaques en béton ;
- Dépistage des fissures et des défauts en béton ;



- Dépistage des délaminations;
- Analyse des fissures de surface ;
- Evaluation des éléments en béton armé ;
- Evaluation de la maçonnerie ;
- Evaluations des composantes multistratifiées ;
- Evaluation des plaques en contact avec le sole ;
- Analyse des éléments en béton cellulaire ;
- Evaluation des tuiaux en béton ;
- Diagnostique des structures pour les ponts et pour constructions civiles.

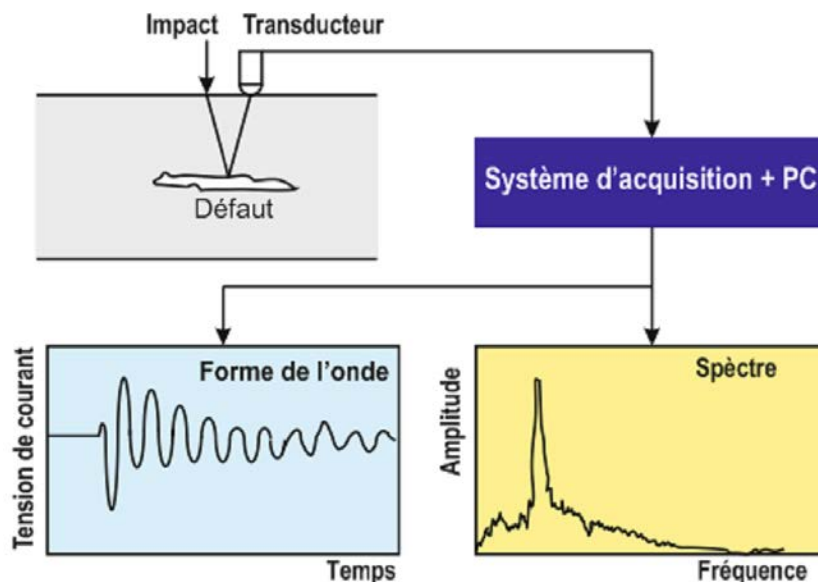


Fig. 2.4. Principe théorique de fonctionnement de la méthode „Impact-écho”. [Tao2010]

### 2.1.3. Méthode d'évaluation par radiographie

Les rayons X ont été découverts il y a plus de 100 ans, par William Röntgen, découverte qu'il a continué d'utiliser pour la détection des défauts dans des divers matériaux.

EN des matériaux et systèmes par radiographie peut être définie comme une technique utilisant une radiation pénétrante ayant une longueur d'onde petite (rayons X,  $\gamma$  ou neutrons), dans le but de détecter les défauts, des modifications, des fissures etc.

Le processus d'auscultation suppose l'utilisation d'une source de radiation pour les transmettre vers le matériau où elles pénètrent dans son intérieur et les différences d'absorption sont enregistrées sur un film photographique disposé sur le côté opposé du matériau analysé.

L'application de cette méthode suppose une série de risques auxquels est soumis l'opérateur si les mesures de sécurité ne sont pas respectées en totalité:

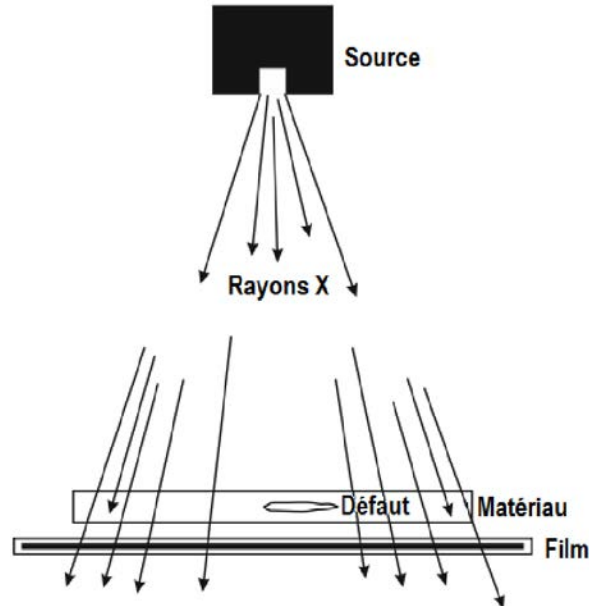


Fig. 2.5. Principe de la méthode d'EN par radiographie.

Les générateurs de rayons X peuvent être classifiés en trois catégories :

Industriels: 40-400 kV;

Systèmes à haute résolution: 30 – 150 kV;

Systèmes de pouvoir: >400 kV.

#### 2.1.4 Evaluation non destructive par courants de Foucault

Cette méthode suppose l'utilisation d'un champ magnétique alternatif [*P.E. MIX*] et peut être utilisée pour tout matériau conducteur électrique. Le champ magnétique alternatif assure une circulation des courants de Foucault dans l'échantillon visé et, par leur intermédiaire, seront déterminés les paramètres influençant la conductivité. [Paul2005, Xiao2014]. Une fissure ou un défaut à l'intérieur du matériau influence la conductivité électrique dans la zone respective et, en réduisant le champ magnétique secondaire augmente l'impédance de la bobine. La profondeur de pénétration  $dp$  des courants de Foucault peut être calculée par la relation (2.2) :

$$dp = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}, \quad (2.2)$$

où:  $f$  est la fréquence,  $\sigma$  est la conductibilité du matériau et  $\mu$ , la perméabilité.

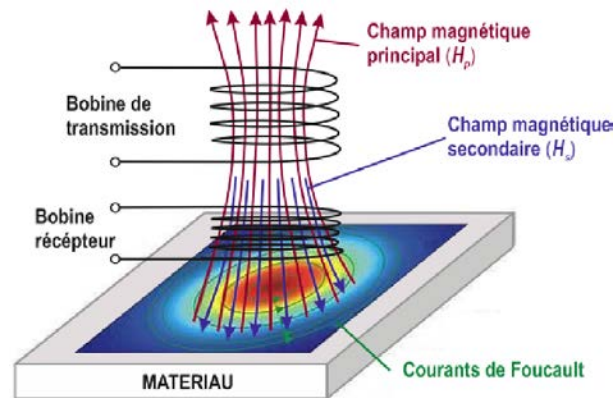


Fig. 2.6. Principe de la méthode d'EN par courants de Foucault.

## 2.2. EVALUATION NON DESTRUCTIVE DES SYSTÈMES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

### 2.2.1. Notions générales

La thermographie infrarouge est une méthode non destructive qui permet l'auscultation et l'évaluation d'un matériau sans affecter son fonctionnalité ou son utilité suivante. [Xav2001, Wald2009].

Par rapport aux méthodes classiques de EN, présentées plus haut, l'acquisition des données par thermographie infrarouge est sûre, non invasive et non contact, permettant l'auscultation des surfaces étendues et le dépistage des défauts internes situés à des profondeurs de l'ordre des millimètres. Un autre aspect qui met de plus en valeur cette méthode est la vitesse d'inspection. [Clem2008].

La détection des défauts par thermographie se base sur le phénomène physique de transfert de chaleur. Pratiquement, pour visualiser un défaut à travers cette méthode, il est nécessaire d'exciter thermique ou mécanique un matériau ou un système et le défaut sera visible comme des imperfections du transfert thermique. La radiation thermique enregistrée par le système thermographique est fortement dépendante d'un paramètre important – l'émissivité, c'est-à-dire la capacité d'un matériau ou d'un système d'émettre ; d'absorber ou de réfléchir de l'énergie.

La thermographie en infrarouge est de deux types :

- thermographie infrarouge active;
- thermographie infrarouge passive.

La littérature de spécialité envoie vers une analyse des avantages et désavantages de la thermographie infrarouge (Tableau 2.1).

**Tableau 2.1.** Avantages et désavantages de l'évaluation non-destructive par thermographie infrarouge [Tao2010].

AVANTAGES	DESAVANTAGES
Méthodes sans contact	Limitation de la méthode au dépistage des défauts situés dans le voisinage de la surface du matériau
Temps de mesure réduit	
Protection de l'opérateur (aucun type de radiation qui pourrait mettre en danger l'humain n'est pas impliqué)	Cout élevé du matériel (caméra infrarouge, systèmes d'excitation dans le cas de la thermographie active)
Résultats facile à interpréter	Influence des phénomènes de transfert thermique - conductivité, convection, radiation – dans le processus d'interprétation des résultats
Une large variété des domaines d'application	Influence de l'émissivité du matériau dans le processus de mesure
Possibilité de mesure des objets en mouvement	

### 2.2.2. Spectre électromagnétique

Tout objet à une température au-dessus de zéro absolu (-273,15°C) a la capacité d'émettre de la radiation infrarouge. La radiation infrarouge correspond à des longueurs d'onde entre 0,74 et 1000  $\mu\text{m}$  [Xav2001, Mald2001, Bal2002]. L'œil humain n'a pas la capacité de voir dans le domaine infrarouge du spectre électromagnétique et pour analyser un objet du point de vue de la radiation thermique il faut utiliser des caméras thermographiques qui reçoivent la radiation thermique et la transforment en images visibles, qui sont appelées aussi cartes thermiques ou thermo grammes.

Une surface émet de l'énergie d'une certaine température, nommée *radiation spectrale* et définie par la loi de Planck. L'énergie de radiation libérée dépend de la longueur d'onde. Celle-ci peut être écrite sous la forme d'une relation entre l'énergie et la longueur d'onde, en utilisant la constante de Planck :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (2.3)$$

où:  $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$  J·s est la constante de,  $c = 299792458$  m/s est la vitesse de la lumière,  $\lambda$  [m], la longueur d'onde et  $E$  [J] est l'énergie libéré.

La longueur d'onde est exprimée par la relation suivante, comme inverse proportionnellement avec la fréquence  $f$ :

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (2.4)$$

Le domaine de radiation infrarouge du spectre électromagnétique est partagé en [Xav2001, Mald2001, Bal2002]:

1. Domaine infrarouge proche ( $0,7 \div 2 \mu\text{m}$ );
2. Domaine infrarouge moyen ( $3 \div 5 \mu\text{m}$ );
3. Domaine infrarouge éloigné ( $8 \div 14 \mu\text{m}$ ).

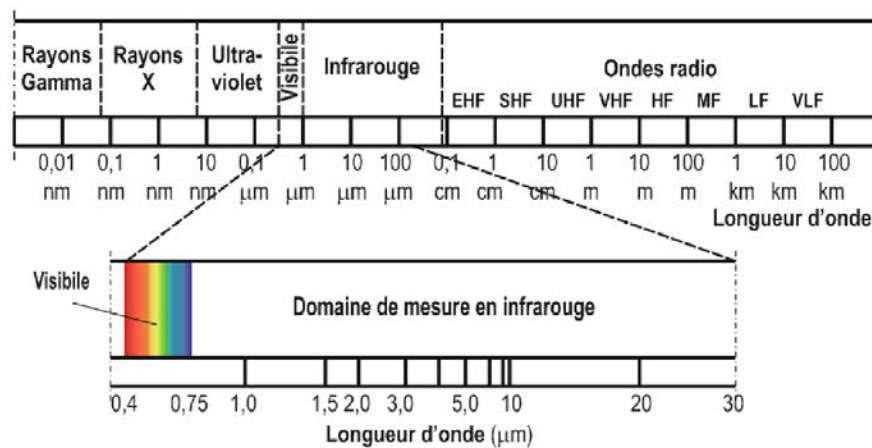


Fig. 2.7. Spectre électromagnétique domaine de mesure en infrarouge. [Mald2001]

### 2.2.3. Emissivité, corps noir, gris et non gris

L'*émissivité* représente la propriété d'un matériau d'émettre, d'absorber ou de réfléchir l'énergie. Elle est représentée par un coefficient qui peut varier entre 0 et 1, en même temps étant dépendant de l'angle d'observation, comme présenté dans la figure 2.8.

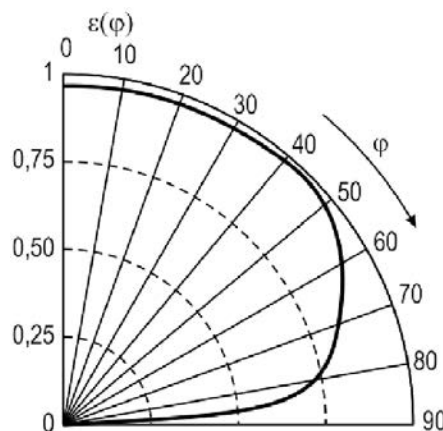


Fig. 2.8. Emissivité  $\varepsilon$  d'un matériau en fonction de l'angle d'observation  $\varphi$  [Mald2001].

On peut observer que la valeur du coefficient d'émissivité change avec le changement de l'angle d'observation : pour l'angle  $\varphi = 0$ , l'émissivité est  $\varepsilon = 1$ . L'énergie thermique d'un corps est décrite par la loi de Stephan- Boltzmann [Mald2001, Bal2002]:

$$W = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4, \quad (2.5)$$

où:  $W$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] est le flux radiant sur l'unité de surface,  $\sigma = 5,6373 \cdot 10^{-12} \text{ Wcm}^{-2}\text{K}^{-4}$  est la constante de Stephan-Boltzmann,  $E$  est l'émissivité de la surface du matériau et  $T$  [ $^{\circ}\text{K}$ ] est la température de la surface.

Les caractéristiques de l'énergie émise par les trois types de matériaux du point de vue de l'émissivité – corps noir, gris et non gris, sont illustrées dans la figure 2.8. Le flux radiant ( $W$ ) émis par la surface représente l'aire positionnée sous chacune des courbes.

Du point de vue de l'émissivité propre, les corps peuvent être classifiés en :

1. Le **corps noir** est le corps qui garde permanent la valeur de son émissivité égale à l'unité, indépendamment de la longueur d'onde. Il n'émet pas et ne transmet pas de l'énergie, ayant la réflectivité ( $\rho$ ) et la transmission ( $t$ ) égales à zéro.

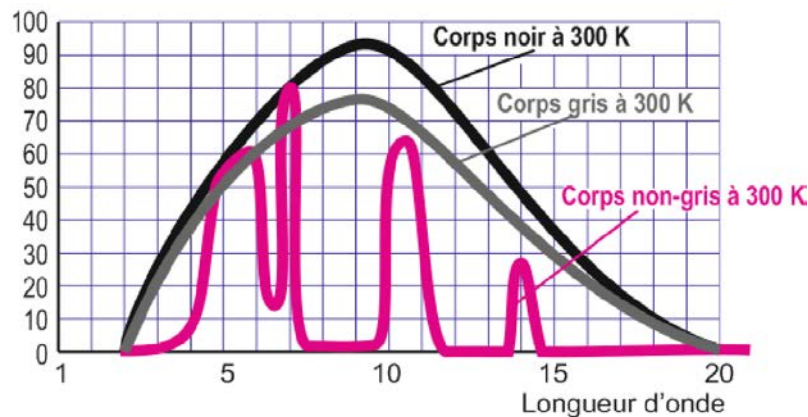


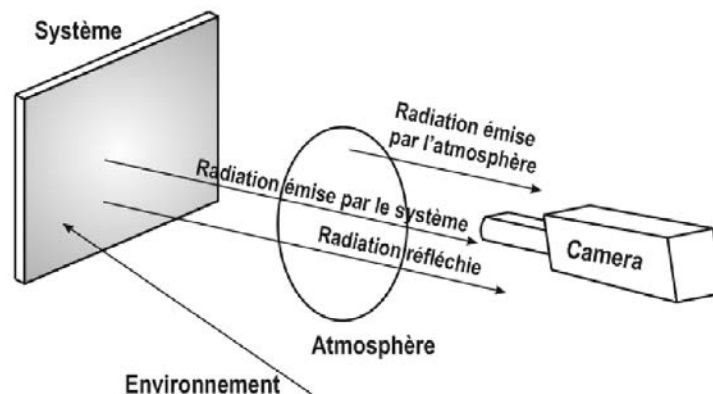
Fig. 2.9. Rapport entre la radiation émise et les caractéristiques de la surface du matériau. [Amm1999]

2. Le **corps gris** a l'émissivité en dessous de la valeur maximale, entre 0 et 1, la même pour n'importe quelle longueur d'onde. Ce type de corps ne transmet pas de l'énergie, la transmission ( $t$ ) étant égale à zéro. Ses composantes importantes sont celles d'émissivité et de réflexion.
3. Le **corps non gris** a, en comparaison avec les deux autres types de corps, l'émissivité variable en fonction de la longueur d'onde – on peut dire qu'il pourrait être transparent à l'énergie en infrarouge – et transmet énergie de la sources vers derrière : tous les trois composantes : émissivité, transmission et réflexion ont la même importance pour ce corps.

On peut affirmer qu'un corps noir peut exister seulement su point de vue théorique, en réalité il n'existe pas. En général, les solides organiques peints ou les métaux oxydés peuvent être considérés comme corps gris parce qu'ils n'atteignent jamais l'émissivité égale à l'unité mais elle est toujours constante. Si on parle des métaux lustrés et d'autres matériaux brillants, leur émissivité est réduite et on peut les appeler aussi *corps gris* mais avec une grande réflexivité : dans le cas des corps non-gris, on peut mentionner des matériaux qui présentent la propriété de changer leur émissivité en fonction de la longueur d'onde, comme par exemple le verre, des gazes etc. [Amm1999]

#### **2.2.4. Principe de mesure de la température per thermographie infrarouge et le milieu de transmission de la radiation**

Un des plus importants instruments de la thermographie infrarouge est la caméra infrarouge qui permet de capter la radiation thermique et de visualiser les champs thermiques provenant des surfaces visées sous forme de cartes thermiques.



**Fig. 2.10.** Présentation schématique des essais par thermographie infrarouge. [Xav2001].

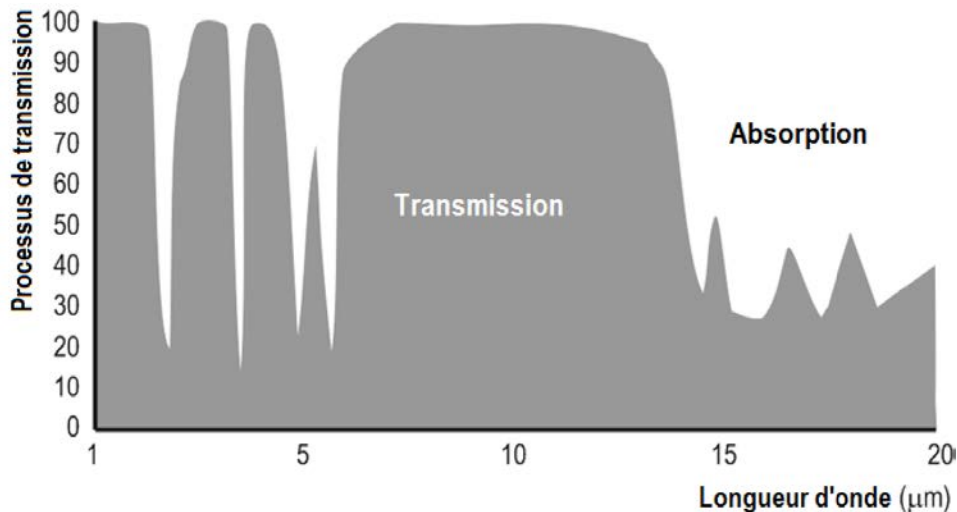
La camera thermographique possède en sa structure un détecteur qui enregistre la radiation dans les seuils 3-5  $\mu\text{m}$  et 8-12  $\mu\text{m}$ .

Les conditions idéales dans le cas de la mesure de la radiation thermique seraient accomplies quand toute la radiation émise par le corps pourrait être captée et enregistrée par la camera, sans prendre en compte les possible facteurs perturbateurs comme l'atmosphère, l'émissivité du matériau etc. [Amm1999].

L'absorption atmosphérique n'est pas prise en compte dans le cas des mesure à des distances courtes par rapport à l'objet (quelques mètres) : plus la distance entre l'objet et

l'instrument croît, plus l'absorption atmosphérique est importante, ce qui peut générer des erreurs dans l'interprétation des résultats : ces problèmes sont résolus par l'application des corrections sur les paramètres des appareils utilisés :

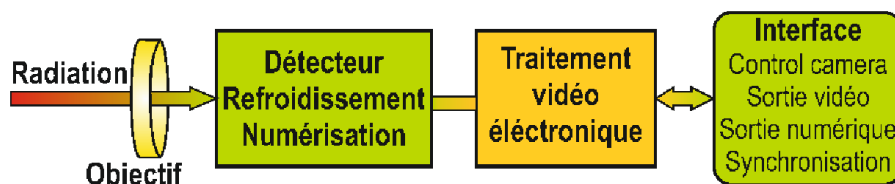
Dans la figure 2.11 sont présentées les caractéristiques de la transmission spectrale sur un trajet de 140 mètres à travers l'atmosphère terrestre et avec l'humidité de 50 %.



**Fig. 2.11.** Transmission et absorption mesurées dans l'atmosphère à 10 m du niveau du sol à une humidité de 50%. [Amm1999]

### 2.2.5. Principe de fonctionnement de la camera thermographique et les détecteurs IR utilisés dans l'imagerie thermographique

Les caméras thermographiques convertissent le rayonnement infrarouge en images visibles. Les principaux éléments composant une caméra thermographique sont : les lentilles, un détecteur en forme de matrice à plan focal (FPA - focal plan array), un système de refroidissement du détecteur, composants électronique et les logiciels requis pour le traitement et la visualisation d'images.



**Fig. 2.12.** Schéma bloc d'une camera thermographique.

Afin d'assurer la qualité des résultats, le choix des détecteurs (des caméras) doit s'aligner aux applications spécifiques. La plupart des caméras contiennent un détecteur de type micro-



bolomètre (FPA) qui ne nécessite pas un système de refroidissement et, donc, le cout est plus réduit et la caméra est plus compacte: le détecteur FPA fournit des résolutions entre  $160 \times 120$  et  $1024 \times 1024$  pixels. [Flir2012].

Pour des applications plus spéciales, sont utilisées des caméras qui opèrent à base de l'effet photoélectrique intrinsec. Pour ce type de détecteurs sont utilisés des matériaux qui ont la capacité d'absorber des photons et d'élever leus électrons à un niveau énergétique plus élevé, en produisant des changements de conductivité, de tension ou d'intensité du courant.

### 2.2.6. Thermografieinfrarouge ACTIVE et PASIVE

Dans la figure 2.13 sont détaillées les deux catégories de thermographie : passive et active[Xiao2014, Val2000]. Dans les deux cas, l'analyse consiste à détecter un gradient de température qui peut indiquer la présence d'un défaut ou d'un fonctionnement defectueux produisant une augmentation ou une diminution de température [Xav2001, Clem2008, Mald1998, Iba2004, Benit2009]. La thermographie infrarouge active peut être divisée en accord avec le type d'excitation : thermografie Loch-in et par impulsions et la vibro-thermographie [Clem2008].

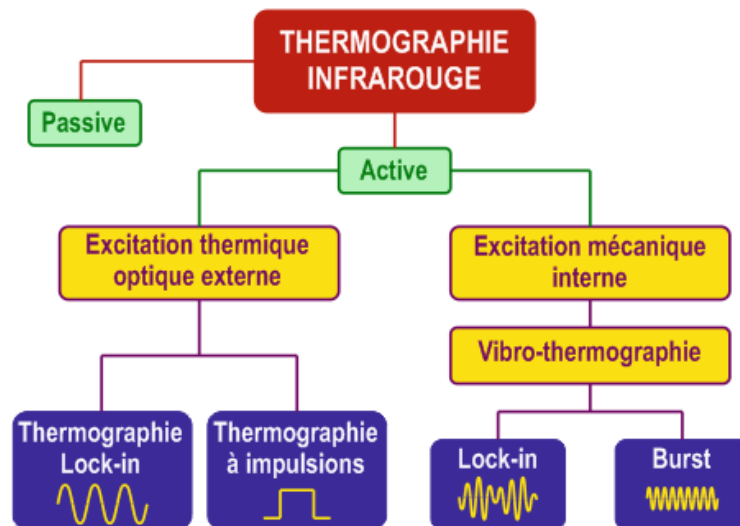


Fig. 2.13. Méthodes utilisées dans l'évaluation par thermographie infrarouge. [Clem2008]

#### 2.2.6.1. Termographie infrarouge PASIVE

La *thermographie infrarouge passive* peut s'appliquer à l'auscultation du rayonnement des systèmes sans que des facteurs extérieurs d'excitation thermique interviennent, leur température étant influencée par des facteurs naturels. Pratiquement, la méthode suppose l'étude

du gradient de température des systèmes dans un milieu naturel [Xav2001]. Dans la figure 2.14 est présenté le principe de la thermographie infrarouge passive : la différence entre la température ambiante et celle du corps étudié est suffisante pour l'obtention d'un contraste thermique visible sur les images thermographiques [Guib2007].

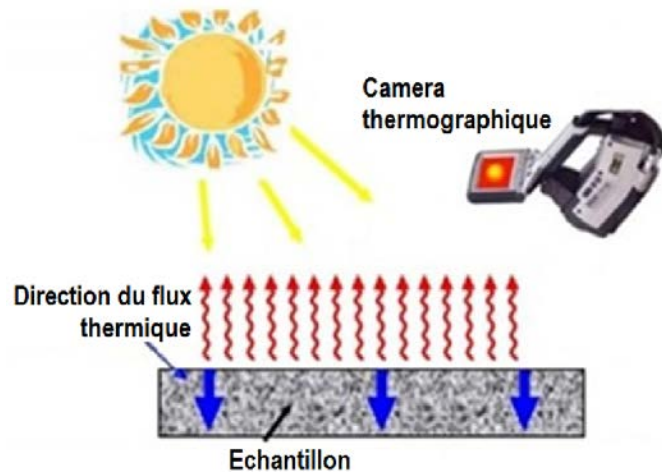


Fig. 2.14. Principe de l'évaluation par ththermographie infrarouge passive. [Xav2001]

### 2.2.6.2. Thermographie infrarouge ACTIVE

La *thermographie infrarouge active* utilise des différents types de sources extérieures d'excitation thermique ou mécanique dans le but de détecter des défauts, fissures ou imperfections dans la structure du système visé. Les sources extérieures sont utilisées pour créer un contraste thermique entre les zones avec des défauts et les zones sans défauts. L'excitation peut être externe si l'énergie est transmise vers la surface et ensuite elle se propage à travers le matériau jusqu'à la rencontre d'un défaut ou interne si l'énergie est injectée dans le matériau pour stimuler seulement le défaut. D'habitude, l'excitation externe est obtenue par l'utilisation des sources optiques : lampes photographiques ou lampes à l'halogène. L'excitation interne est basée sur l'utilisation des ondes ultrasoniques, en induisant des oscillations mécaniques dans le matériau en vue de détecter les défauts internes.

#### 2.2.6.2.1. Thermographie Lock-in

La *thermographie Lock-in* est basée sur une excitation thermique périodique de l'échantillon avec une intensité modulée, par induction des ondes dans sa masse. La réponse thermique est enregistré en même temps avec des cameras thermographiques et décomposée par un amplificateur Lock-in pour extraire l'amplitude et la phase de modulation [Xav2001, Clem2008, Iba2004, Guib2007].

D'habitude sont utilisées les ondes sinusoïdales, transmises par l'air jusqu'à rencontrer le matériau et ensuite elles pénètrent dans sa masse. Dans le cas où elles rencontrent un défaut, des modifications apparaissent dans l'amplitude et dans la phase du signal de réponse de la surface.

Le phénomène sur lequel se base la pénétration de l'énergie à travers la masse du matériau est nommé diffusion thermique et peut être décrit par la loi de Fourier 3D [Clem2008] :

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (2.6)$$

où:  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  [m<sup>2</sup>/s] représente la diffusion thermique du matériau ausculté,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] est la densité du matériau et  $\lambda$  [W/mK] est la conductivité thermique.

Les ondes thermiques périodiques se propageant dans un milieu homogène demi-infini peuvent être exprimées par la loi de Fourier:

$$T(z, t) = T_0 \exp\left(-\frac{z}{\mu}\right) \cos\left(\frac{2\pi \cdot z}{\lambda} - \omega t\right), \quad (2.7)$$

où:  $T_0$  [°C] est le changement initial de la température produite par la source de chaleur,  $\omega = 2\pi f$  [rad/s] est la modulation de fréquence;  $f$  [Hz] est la fréquence,  $\lambda = 2\pi \mu$  [m] est la longueur d'onde et  $\mu$  [m] est la longueur de la diffusion thermique [Xav2001, Clem2008, Iba2004, Guib2007], exprimée par:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f}}. \quad (2.8)$$

Dans la figure 2.15 on peut observer la pénétration d'une onde thermique à travers la surface d'un solide, dans ce cas, une plaque en aluminium. En utilisant la relation (2.8) il est possible de montrer que l'onde parcourt moins de 0,4 mm par matériau plastique, 11 mm par aluminium et presque 16 mm en air [Clem2008]. Donc on peut affirmer qu'une onde thermique se propage plus profond plus la diffusion du matériau est grande.

### **Installation expérimentale pour l'auscultation par thermographie Lock-in**

Un équipement utilisant TL est présenté dans la figure 2.16. L'excitation thermique est assurée par deux lampes à halogène qui transmettent vers l'échantillon des ondes sinusoïdales ayant une fréquence modulée  $\omega$  établie par l'opérateur en fonction de l'objectif de l'expérimentation. Pour favoriser l'échauffement uniforme de la surface de l'échantillon,

plusieurs lampes sont utilisées afin de s'approcher de l'état idéal d'équilibre en fonction des propriétés thermiques du matériau et de la profondeur du défaut.

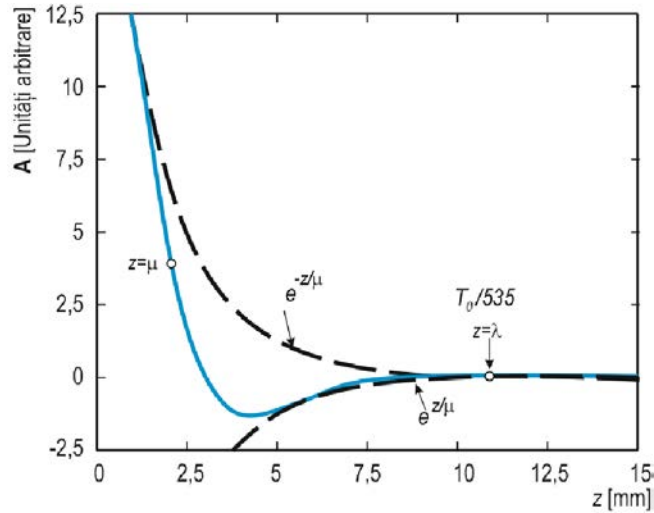


Fig. 2.15. Exemple de propagation d'une onde thermique par conduction à travers un élément d'aluminium à une fréquence de 10 Hz. [Clem2008]

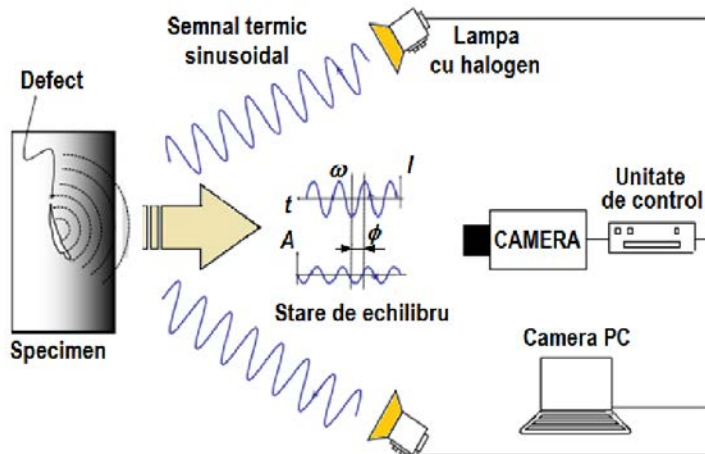


Fig. 2.16. Principe de fonctionnement et l'installation expérimentale utilisée dans TL. [Clem2008]



Fig. 2.17. Installation expérimentale utilisée dans le laboratoire de génie civil et environnement (LGCgE), Université Artois.

Dans la figure suivante (2.17) est présentée m'installation expérimentale du Laboratoire d'ingénierie civile et environnement (LGCgE), de l'Université d'Artois.

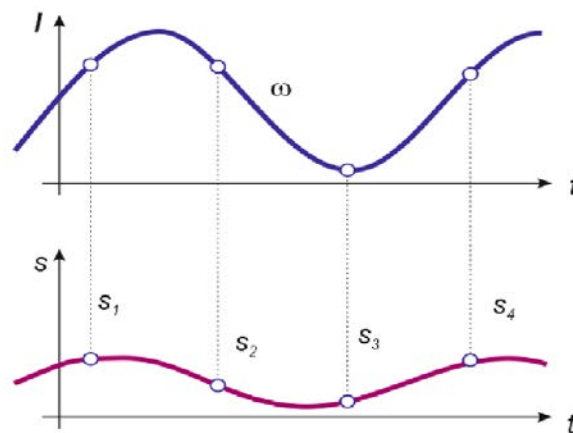
### Traitement des données TL

La méthode de stimulation sinusoïdale est celle en quatre points, illustrée plus bas, dans la figure 2.15. [Xav2001, Clem2008, Guib2007, Liu2012, Man2008].

Au dessus (ligne bleu) est le signal d'entrée, noté avec «  $I$  » et en dessous est représenté le signal de réponse «  $S$  ». On peut observer que les deux signaux sinusoïdaux ont la même forme, la différence étant de changement de phase et d'amplitude qui peuvent être calculées en utilisant les relations suivantes :

$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} , \quad (2.9)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}\right). \quad (2.10)$$



**Fig. 2.18.** Méthode de calcul du décalage de phase et d'amplitude du signal sinusoïdal en TL. [Clem2008]

La méthode en quatre points, présentée plus haut, est une méthode rapide applicable aux signaux sinusoïdale mais le signal est affecté par le bruit. Celui-ci peut être réduit par des divers méthodes :

- Détermination de la moyenne des plusieurs points ;
- Augmentation des cycles;
- Utilisation de la régression quadratique et des valeurs synthétiques pour le calcul de la phase et de l'amplitude du signal ;
- Extraction des informations sur l'amplitude et sur la phase en utilisant la transformée discrète de Fourier (DFT – discrète Fourier transform).

La transformée Fourier discrète (TDF) peut être utilisée pour tous les types de signaux, ce que la rend très utile dans le traitement et dans l'interprétation des données obtenues par thermographie infrarouge ayant un l'avantage majeur de réduire le bruit des signaux. Son désavantage consiste dans le fait qu'elle est lente. Pour résoudre ce problème, un algorithme calcul basé sur la transformée Fourier rapide (FFT) qui a été implémenté aussi dans les logiciels spéciaux.

## Applications de TL

L'aire des applications de TL est importante dans l'analyse des systèmes par thermographie infrarouge :

- mesure des couche déposées sur des divers matériaux,
- détection des délaminations dans les matériaux composite stratifiés,
- détection de la corrosion ou; encore, dans l'inspection des œuvres d'art, pièces de patrimoine etc.

### 2.2.6.2.2. Thermographie à impulsions

La *thermographie à impulsions* (TP) est basée sur l'échauffement de la surface du matériau par de impulsions thermiques fournis par des sources de pouvoir comme les lampes flash photographiques. Après le contact avec la surface et l'impulsion thermique, la chaleur va pénétrer vers l'intérieur du matériau: la variation de température d'un matériau sans défaut sera uniforme, alors que si un défaut interne est présent, il sera signalé comme une non uniformité thermique observable à l'aide d'une calera thermographique [Clem2008, Mald1998].

### Installation expérimentale

L'installation expérimentale utilisée en TP (fig. 2.19) a dans sa structure deux lampes flash qui chauffent la surface du matériau, la température étant mise en évidence à l'aide d'une caméra thermographique. Pour le contrôle du laps de temps entre le lancement de l'impulsion thermique et l'enregistrement avec la camera thermographique une unité de synchronisation est nécessaire.

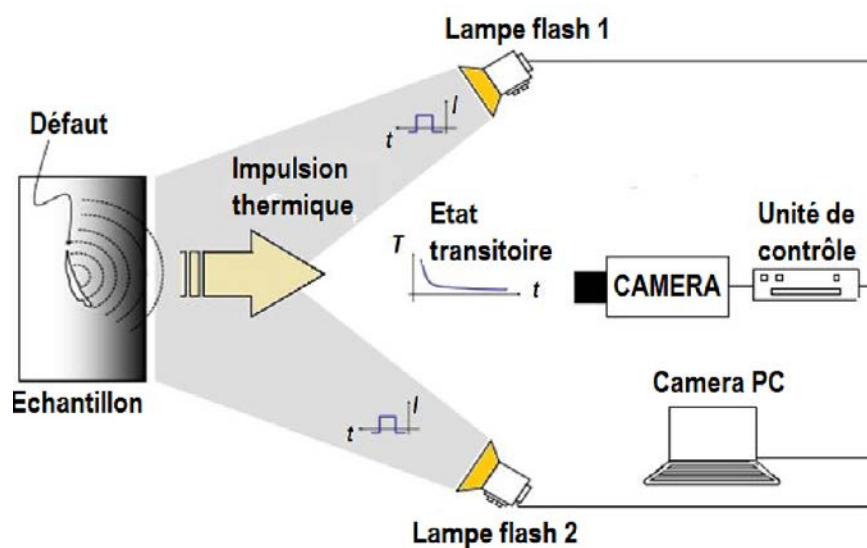
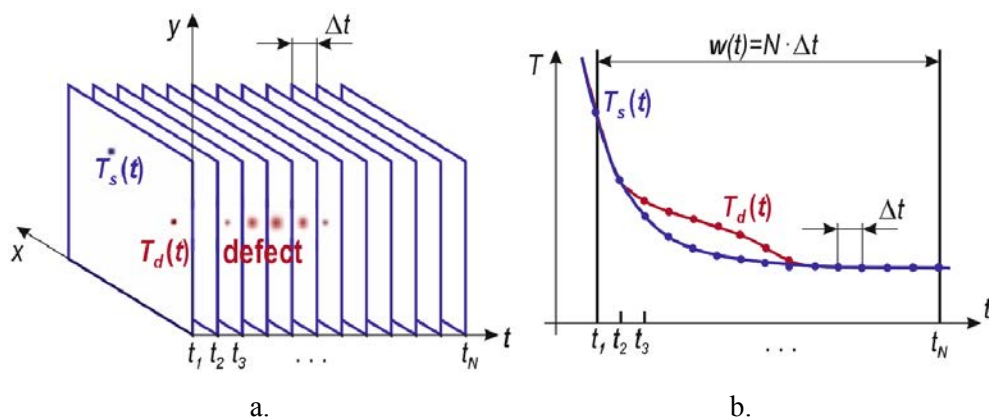


Fig. 2.19. Installation expérimentale et le principe de la thermographie à impulsion (TP). [Clem2008]

Les données sont enregistrées sous forme de matrices 3D dans lesquelles  $x$  et  $y$  représentent les coordonnées spatiales et  $t$  est le temps. L'analyse de la décroissance ou de la croissance des températures en fonction de temps mène au dépistage des zones suspectes correspondantes à des défauts internes. L'excitation thermique à impulsions peut être mise en œuvre en utilisant des lampes flash, le laser, la stimulation thermique par jets d'eau ou d'air ; la durée d'une impulsion pourrait varier de  $\mu s$ ,  $ms$  jusqu'à  $s$ , en fonction de l'épaisseur et des propriétés thermiques du matériau. Après l'excitation thermique, la chaleur diffuse à travers la surface du matériau vers son intérieur.



**Fig. 2.20.** Evolution de la température : matrice ED des données (a) ; profil de la température pour les pixels contenant le défaut (en rouge pointillé) et ceux sans défaut (en bleu continu). [Clem2008]

Pour appliquer TP, deux méthodes sont valables : la méthode de par transmission, où la source d'excitation se trouve derrière le matériau et la caméra est devant lui et la méthode par réflexion où la caméra et la source d'excitation par impulsion sont de même côté de l'échantillon, placées sous des angles différents.

### Traitement des données TP

Même si la TP est une méthode facile d'implémenter, le traitement des données est assez difficile et, pour cette raison, ont été développées plusieurs techniques de traitement des données. Une des plus utilisées est basée sur le contraste thermique des images enregistrées par la camera thermographiques pendant toute la durée de l'excitation thermique ou pour les valeurs maximale et minimale. Le contraste thermique est défini par l'analyse de deux zones d'intérêt, une zone sans défaut et une dans laquelle se trouve le supposé défaut : dans les relations suivantes sont présentés

deux types de contraste thermique utilisés en TP : le contraste standard ( $C^s(t)$ ) et le contraste absolu ( $C^a(t)$ ) [Clem2008].

$$C^s(t) = \frac{T_d(t) - T_s(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)} \quad (2.11)$$

$$C^a(t) = \Delta T(t) = T_d(t) - T_s(t) \quad (2.12)$$

où:  $T_d(t)$  est la température de la zone avec défaut au moment  $t$ ,  $T_s(t)$  est la température de la zone sans défaut au moment  $t$ ,  $T(t)$  est la température au moment  $t$  et  $t_0$  est le début de l'excitation thermique du matériau.

Si  $\Delta T(t) = 0$  aucun défaut n'est détecté.

## 2.2.7. Thermographie infrarouge en constructions

### 2.2.7.1. Thermographie infrarouge PASSIVE en constructions

La thermographie infrarouge est une technique utilisée d'assez peu de temps en génie civil. L'inspection des éléments des constructions, des bâtiments par thermographie infrarouge passive (TIP) suppose la visualisation des variations de température sur la surface des systèmes et le dépistage des éventuels défauts en conditions naturelles. Parmi les anomalies les plus fréquentes sont : délaminations, fissures, infiltrations d'eau, gauges thermiques etc. La période propice d'auscultation des structures par thermographie infrarouge passive en génie civil est celle d'hiver, autour de 0°C, dû aux différences entre la température de l'intérieur et celle de l'extérieur à laquelle s'ajoute l'émissivité des matériaux qui varie entre 0,90 et 0,96. L'utilité majeure de l'inspection des bâtiments par TIP est celle d'autorisation énergétique des constructions. [Maier2005, Pett1980, Chown1983].

Dans le Tableau 2.2 sont présentés les coefficients d'émissivité thermique pour une série des matériaux non-métallique utilisés en génie civile.

**Tableau 2.2.** Coefficients d'émissivité thermique pour des matériaux non-métallique en génie civile.

Matériau	Emissivité $\varepsilon$
Béton	0,94
Sable	0,93
Brique	0,93-0,94



Plâtre	0,90-0,96
Bois	0,96
Gypse	0,9
Peinture	0,90-0,95
Argile	0,95
Verre	0,3-0,96

### 2.2.7.1. Thermographie infrarouge ACTIVE en constructions

La thermographie infrarouge en génie civil se retrouve pleinement dans l'étude des matériaux et systèmes de construction, en utilisant des sources supplémentaires pour l'excitation thermique et des caméras thermographiques pour l'observation des variations de températures, le but étant celui de dépistage et de localisation des défauts.

L'analyse du processus de refroidissement et de réchauffement pendant ou après l'excitation thermique avec une source interne ou externe de chaleur représente une technique utile dans l'analyse et la caractérisation des matériaux non-métalliques comme [Mald1993, Dane1998, Maier2005] : béton, maçonnerie, matériaux isolants, fibres d'armature du béton etc. Par TIR active on peut détecter des différents défauts : espaces en béton ou en maçonnerie, délaminations des matériaux composites ayant des densités, capacités caloriques, conductivités thermiques différentes.

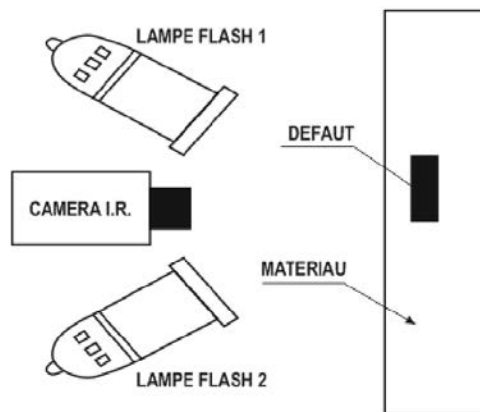


Fig. 2.21. Principe de la thermographie infrarouge active.

### 2.2.8. Dispositifs d'excitation thermique

La thermographie active est une technique qui nécessite une stimulation thermique des matériaux et systèmes analysés, ce qui est possible en utilisant des dispositifs spéciaux basés sur le contact direct des échantillons avec un liquide chaud, la stimulation thermique par un gaz chaud, l'émission de radiation thermique des lampes différentes [ Mald2001].

### 2.2.8.1. Lampes photographiques à halogène

La stimulation thermique avec des lampes à halogène (fig. 2.22) est une des plus répandues des techniques dans la thermographie infrarouge active. La méthode consiste en utilisant deux lampes photographiques à halogène pour la stimulation thermique par émission des impulsions thermiques et l'échauffement uniforme des surfaces des échantillons analysés. En fonction de la diffusivité thermique et de l'épaisseur de l'échantillon, la stimulation peut de produire dans des intervalles de temps entre quelques millisecondes et quelques secondes. La chaleur émise sous forme d'impulsions thermiques est absorbée par le matériau par le phénomène de diffusion thermique en provoquant un régime transitoire [Brown2013].



Fig. 2.22. Lampes photographiques utilisées pour la thermographie infrarouge à impulsions.

### 2.2.8.2. Laser

Le laser représente un instrument important d'excitation thermique dans l'analyse des systèmes par TIR active. Dans ce cas, un flux laser est utilisé comme source d'excitation ponctuelle de la surface appartenant à l'objet testé. Ce type d'excitation est d'habitude utilisé pour la détection des défauts très petits (microfissures de surface) [Hong2006, Burr2011, SamAng2013a].

Le laser est un système qui a la capacité de générer et d'amplifier la radiation cohérente à des fréquences dans le domaine infrarouge, violet ou visible du spectre électromagnétique. Le principe de base de son fonctionnement s'appuie sur l'amplification des micro-ondes par stimulation de l'émission de la radiation. Si ce principe est prolongé aux fréquences optiques il devient LASER - *Light amplification by stimulated emission of radiation* [Anth1986]. Pratiquement, cet effet est le résultat de la transition entre les niveaux de vibration à l'échelle

atomique dans un milieu résonant - une cavité formé des éléments optique. Ici sont générés de photons ensuite amplifiés sur l'axe du laser. [SamAng2013a, Laza2007]. L'absorption excite les atomes de  $E_1$  et  $E_2$ , la plupart provenant d'une source de photons nommée source de pompage.

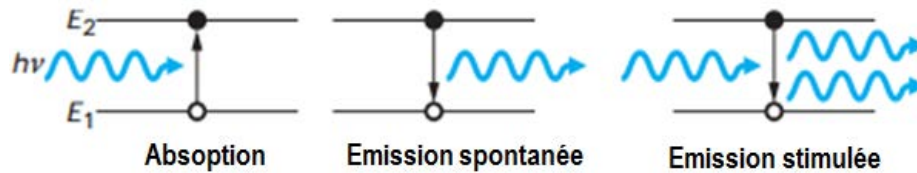


Fig. 2.23. Phénomène d'interaction des photons des deux niveaux énergétiques de l'atome [Laza2007].

L'*émission spontanée* d'un photon d'énergie correspondante se produit très peu de temps après l'absorption, d'après une direction et avec des caractéristiques aléatoires. Ceci représente un phénomène de retour à l'état de base du niveau d'énergie.

L'*émission stimulée* se produit comme conséquence de la collision d'un photon excité, incident, d'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$ . Il va produire un deuxième photon polarisé et en phase, émis sur la direction du photon stimulé.

L'*inversion de la population*  $n_2 > n_1$ , est très importante dans le processus d'apparition de l'effet laser et est produit par une source de pompage.

### Catégories des lasers existants:

Les lasers sont classifiés en fonction de la source de stimulation. Dans le tableau 2.3 est présentée la classification des lasers et leurs différentes utilisations.

Tableau 2.3. Classification des lasers [Laza2007].

Nom	Longueur d'onde	Pouvoir/Energie	Fréquence	Utilisation
Lasers à gaz				
HeNe	632 nm	100mW		Mesure
Ar <sup>+</sup>	448 nm	100 mW		Domaines divers
CO <sub>2</sub>	10,6 μm	kW		Fabrication
Excimer KrF	248 nm	100 W	kHz	Ablation
Lasers à corps solide				
Rubin	694 nm	100 mJ/pls		Divers
Nd/YAG	1,06 μm	1 ÷ 100 J/pls	1 până la 1000 Hz	Divers
Saphyre dopé de titan	800nm	μJ/pls	kHz	Ablation

Laser à semi-conducteurs				
AsGa	904nm	mW	kHz	Divers
Laser avec substance colorante				
Rhodamine	400–800 nm	$\mu\text{J/pls}$		Mesure
Laser à femto secondes				
TiSa (Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	800 nm	nJ/pls	kHz ÷ MHz	Divers
Yb:KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1030 nm	100 $\mu\text{J/pls}$	kHz ÷ MHz	Divers

### 2.2.8.3. Microondes

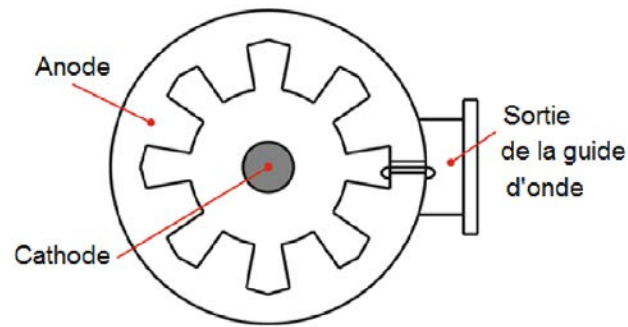
Les microondes sont des ondes hertziennes dont les longueurs d'ondes sont comprises dans l'intervalle 1 mm (300 GHz) et 1 m (0,3 GHz). Les longueurs d'onde et les bandes de fréquence des microondes sont mentionnées dans le Tableau 2.4 [SamAng2013a].

**Tableau 2.4.** Domaines de fréquences usuels des microondes [SamAng2013a].

NOM	BANDE DE FREQUENCE	LONGUEUR D'ONDE
ELF (extremly low frequency)	30 ÷ 300 Hz	10000 ÷ 1000 km
VF (voice frequency)	300 ÷ 3000 Hz	1000 ÷ 100 km
VLF (very low frequency)	3 ÷ 30 kHz	100 ÷ 10 km
LF (low frequency)	30 ÷ 300 kHz	10 ÷ 1 km
MF (medium frequency)	0,3 ÷ 3 MHz	1000 ÷ 100 m
HF (high frequency)	3 ÷ 30 MHz	100 ÷ 10 m
VHF (very high frequency)	30 ÷ 300 MHz	10 ÷ 1 m
UHF (ultra high frequency)	0,3 ÷ 3 GHz	100 ÷ 10 cm
SHF (super high frequency)	3 ÷ 30 GHz	10 ÷ 1 cm
EHF (extremly high frequency)	30 ÷ 300 GHz	10 ÷ 1 mm
	300 ÷ 3000 GHz	1 ÷ 0,1 mm

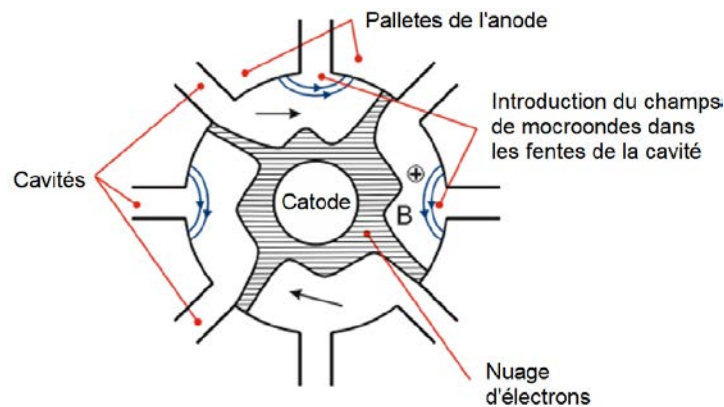
Une des principales applications des microondes est le réchauffement - industriel ou ménager (four à microondes), à des fréquences entre 915 MHz et 2,45 GHz, générées par un dispositif nommé magnétron.

Du point de vue constructif, le magnétron est une chambre électronique, vidée ayant la forme cylindrique d'un anode en cuivre (la structure résonante) et un cathode émetteur d'électrons, placé dans son centre, comme dans la figure 2.24 [SamAng2013a, Rous2003, CursOradea].



**Fig. 2.24.** Structure du magnétron [CursOradea]

L'*anode* en cuivre a un set de palettes disposées radiale en formant entre elles des canaux avec une profondeur de  $\sim \frac{1}{4} \lambda_g$  et qui deviennent résonantes à la fréquence des microondes. Les canaux sont couplés mutuellement par le champ dispersif au but ouverts et, ainsi, la structure entière forme un circuit résonant. En mode d'opération  $\pi$ , les charges électriques des palettes adjacentes ont des polarités opposées.



**Fig. 2.25.** Interaction entre les nuages d'électrons et le champs de la cavitation [CursOradea].

## 2.3. CONCLUSIONS

Ce chapitre présente une recherche sur les méthodes d'évaluation non destructive des systèmes du point de vue de leur classification, leurs performances, des phénomènes physiques sur lesquels elles s'appuient, le mode d'utilisation et le matériel nécessaire pour leur mise en œuvre. La première méthode abordée a été l'EN par ultrasons en étalant les explications sur sa signification, les fréquences utilisées, l'appareillage nécessaire et les modes d'application – par transmission et pulse-écho. L'évaluation par ultrasons est une des plus répandue parmi les méthodes non-destructives d'auscultation des matériaux.

En second a été présentée la méthode Impact-écho, applicable seulement en constructions, dans l'inspection du béton et de la maçonnerie. Le principe de base est d'utiliser une sphère qui frappe le matériau à étudier et crée une onde de choc, transformée ultérieurement en signal électrique. Suivant, a été étudiée la méthode d'évaluation non destructive par radiographie – le principe de la méthode, le mode d'utilisation et, en même temps, le risque auquel est soumis l'opérateur dans les situations où elle n'est pas appliquée avec suffisamment de précaution. L'évaluation non destructive par courants de Foucault suppose d'utiliser un champ magnétique alternatif et peut être appliquée pour n'importe quel matériau conducteur électrique.

La recherche développée dans cette thèse a été réalisée pour évaluer la possibilité d'application de toutes ces méthodes d'EN sur deux types de matériaux : le béton et les biocéramiques. A la fin a été constaté que l'application d'une seule méthode pour toutes les deux catégories de matériaux est impossible ou, au moins, elle n'est pas sûre pour l'intégrité de leur structure.

C'est pour ça que, finalement, l'option adoptée s'est portée sur une autre méthode – la thermographie infrarouge. Elle est aussi une méthode d'auscultation non destructive mais elle n'affecte le fonctionnement ou l'utilité ultérieure de l'objet testé. En comparaison avec les autres méthodes classiques, mentionnées avant, l'acquisition des données par thermographie infrarouge est la seule non invasive et non contact, en permettant l'analyse des surfaces grandes et la détection des défauts internes situés à des profondeurs d'ordre des millimètres [*C.I.-Castanedo*]. Ensuite, ont été présentés des aspects théoriques, des phénomènes sur lesquels la méthode se base, des installations expérimentales utilisées, la classification en fonction du mode d'excitation thermique des matériaux etc.

A la fin du chapitre ont été présentés des expérimentations préliminaires qui ont démontré l'applicabilité et l'efficacité de la thermographie infrarouge sur les bétons et sur les biocéramiques. Les premières expérimentations préliminaires ont été réalisées sur béton par la thermographie infrarouge active corrélée avec un système de senseurs, en utilisant comme source d'excitation thermique une source électrique. La deuxième série d'applications sur béton a utilisé un générateur de micro ondes et l'auscultation par thermographie infrarouge. Pour les matériaux biocéramiques a été recherchée une source qui pourrait permettre la pénétration dans la masse du matériau jusqu'à la rencontre de l'onde de chaleur avec le défaut. La source adéquate s'est avérée d'être le laser CO<sub>2</sub>.

## OBJECTIFS DE LA THÈSE

L'instigation de la recherche constituant cette thèse doctorale est l'importance de l'étude des matériaux par des méthodes non destructives, en vue d'améliorer les qualités des matériaux, d'en trouver des nouveaux, de détecter leurs défauts internes etc.

Le but de la thèse a été d'étudier en détails les méthodes non destructives utilisées en présent et de trouver la méthode optimale qui pourrait être appliquée sur des matériaux différents - biocéramiques, matériaux pour les constructions, matériaux industriels métalliques et non métalliques etc. à base de ces exigences, la méthode qui s'est avérée applicable est la thermographie infrarouge, ce qui a permis d'établir les lignes générales de la recherche

- détection des défauts internes des biocéramiques par thermographie infrarouge active utilisant des excitateurs thermiques différents – laser CO<sub>2</sub>, électriques et lampes photographiques ;
- analyse des soudures par thermographie infrarouge en utilisant l'induction électromagnétique et l'excitation de matériaux par des courants de Foucault ;
- étude du transfert thermique des bétons corrélée avec des matrices de senseurs ;
- détection de l'armature en béton par thermographie infrarouge et excitation à micro ondes ;
- détection des différents défauts d'autres structures de génie civil.

En vue de résoudre les problèmes énoncés plus haut, a été générée une liste d'objectifs généraux :

1. Une étude bibliographique complexe du niveau actuel de l'expertise dans le domaine de l'analyse des systèmes par méthodes non destructives et thermographie infrarouge ;
2. Une étude théorique des phénomènes de transfert thermique qui sont à la base de la thermographie infrarouge ;
3. Une modélisation utilisant des logiciels spéciaux à base des modèles mathématiques du transfert de chaleur supposant :
  - l'analyse complexe du phénomène de transfert thermique,

- modélisation de la réponse thermique des structures pour valider l'utilisation de la thermographie infrarouge dans le dépistage des défauts et dans l'analyse du transfert thermique ;
4. Réalisation des échantillons avec des défauts contrôlés pour chaque expérimentation ;
  5. La conception des installations expérimentales qui remplissent tous les exigences et les paramètres optimales pour obtenir des résultats concluent dans chacun des cas. Ceci suppose :
    - choix de la méthode adéquate au système étudié,
    - assemblage des installations expérimentales pour chacune des méthodes de thermographie infrarouge choisies – avec laser CO<sub>2</sub>; avec des courant de Foucault, avec des lampes photographiques, avec des sources électriques,
    - établissement des conditions d'expérimentation ;
  6. Réalisation des routines pour interpréter les résultats obtenus dans l'analyse expérimentale et pour traiter d'images basées sur des méthodes numériques avancées ;
  7. Une étude comparative entre différentes méthodes de thermographie infrarouge et entre différents paramètres fonctionnels – temps d'excitation, température d'excitation des échantillons, la taille de défauts induits, méthode en transmission/réflexion ;
  8. Synthèse de l'étude à base des résultats obtenus.

Partant de ces objectifs, la thèse doctorale doit apporter des éléments novateurs et d'originalité qui pourraient lui conférer un niveau satisfaisant dans l'ingénierie.



## ETUDES THEORIQUES SUR L'ÉVALUATION DES SYSTÈMES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

Ce chapitre est dédié à l'étude détaillée des phénomènes physiques étant à la base d'auscultation par thermographie infrarouge et les préliminaires des expérimentations, la modélisation et la simulation des méthodes utilisées.

### 4.1. BASES THÉORIQUES DU TRANSFERT DE CHALEUR

*Le transfert de chaleur* peut être défini comme la propagation de la chaleur dans l'espace, en représentant en même temps l'échange d'énergie thermique entre deux systèmes ayant des températures différentes [Badea2005]. Le transfert de chaleur est basé sur les deux principes fondamentaux de la thermodynamique : le premier exprime la loi de conservation d'énergie thermique dans les processus de transfert, alors que le deuxième démontre que le transfert de chaleur est toujours réalisé d'une température élevée vers une température plus basse.

La thermodynamique permet de déterminer la quantité totale d'énergie nécessaire à un corps pour passer d'un état à l'autre pendant son interaction avec le milieu environnant [Jann2008].

#### 4.1.1 Champs de température

L'état thermique et le degré d'échauffement d'un corps sont déterminés de sa température. Dans un milieu solide, liquide ou gazeux, chaque point  $M(x, y, z)$  peut être défini par une certaine température, en fonction de ses coordonnées et du temps [Badea2005, Jann2008] :

$$T = T(x, y, z, \tau). \quad (4.1)$$

La relation (4.1) définit *le champ de température non-stationner et tridimensionnel*. Dans le cas où le champ de température ne dépend pas de temps, alors on peut dire qu'il est *stationnaire et permanent*. Une autre variante de champ de température est *le champ stationnaire unidirectionnel* qui ne dépend pas de temps mais d'une seule dimension :

$$T = T(x). \quad (4.2)$$

### 4.1.2. Gradient de température

Le lieu géométrique dans lequel les points connectés ont la même température s'appelle **surface isotherme**. Au long de la direction normale d'une surface isotherme, la variation de température sur unité de longueur est maximale, variation qui est donnée par le gradient de température (fig. 4.1). [Badea2005, Jann2008].

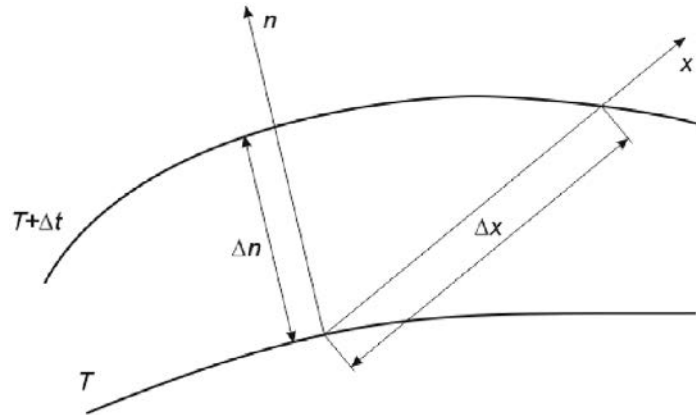


Fig. 4.1. Gradient de température. [Badea2005]

### 4.1.3. Flux thermique

Le **flux thermique** représente la quantité de chaleur qui pénètre à travers une surface isotherme pendant l'unité de temps :

$$Q = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} \text{ [W]}; \quad (4.3)$$

où:  $\Delta Q$  [J] est la quantité de chaleur et  $\Delta \tau$  [s] est l'intervalle de temps.

Le flux thermique peut être classifié en trois catégories :

#### 1. Flux thermique unitaire de surface

Le flux thermique de surface représente le flux thermique transmis à travers une surface unitaire :

$$q_s = \frac{Q}{S} \text{ [W/m}^2\text{]}; \quad (4.4)$$

où:  $Q$  [W] est le flux thermique et  $S$  [m<sup>2</sup>] est l'unité de surface.

#### 2. Flux thermique unitaire linéaire

Le flux thermique unitaire linéaire représente le flux transmis à travers une unité de longueur :

$$q_l = \frac{Q}{L} \text{ [W/m]}; \quad (4.5)$$

### 3. Flux thermique unitaire volumique

Le flux thermique unitaire volumique est le flux transmis à travers une unité de volume :

$$q_v = \frac{Q}{V} \text{ [W/m}^3\text{]}. \quad (4.6)$$

#### 4.1.4. Température et ses unités de mesure

La température peut être exprimée par des échelles absolues ou relatives. Les échelles absolues sont : *Rankine*, notée avec « R » et l'échelle *Kelvin*, dans le système métrique, notée avec « K ». les échelles relatives sont *Fahrenheit*, en système impérial et notée avec « F » et *Celsius*, en système métrique, notée avec « C ». [Amm1999].

La conversion entre les échelles mentionnées plus haut est possible par les relations :

$$T \text{ Celsius} = 5/9 (T \text{ Fahrenheit} - 32) ;$$

$$T \text{ Fahrenheit} = 9/5 T \text{ Celsius} + 32 ;$$

$$T \text{ Rankine} = T \text{ Fahrenheit} + 459,7 ;$$

$$T \text{ Kelvin} = T \text{ Celsius} + 273,16.$$

Dans la littérature est mentionnée la notion de *zéro absolu* qui représente une température de 0°K, égale à -273,16° C et à -459,70° F.

#### 4.1.5. Modes de transfert thermique

Le transfert thermique peut être accompli en trois modes fondamentales : conduction, convection et radiation.

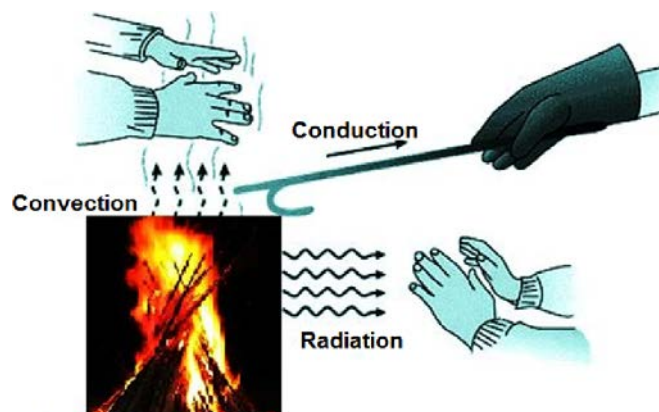


Fig. 4.2. Modes de transfert thermique.

#### 4.1.5.1. Conduction thermique

La **conduction thermique** représente le transfert de chaleur à travers un milieu solide, liquide ou gazeux sans déplacer les particules formant le milieu respectif, sous l'influence d'une différence de température [Badea2005, Jann2008, Lel1992]. La propagation de la chaleur par conduction thermique à l'intérieur d'un corps est basée sur la transmission par vibration des atomes, des molécules ou par des électrons libres. Elle est décrite par l'équation de Fourier, dans laquelle la densité du flux de température est proportionnelle avec le gradient de température :

$$Q = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \text{ [W]}, \quad (4.7)$$

$$q_s = -\lambda \cdot \text{grad } T \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (4.8)$$

où:  $\lambda$  [W/(mK)] est le coefficient de conductivité thermique,  $S$  [m<sup>2</sup>] est la surface,  $Q$  [W] et  $q_s$  [Wm<sup>2</sup>] représentent le flux thermique et le flux thermique unitaire de surface et  $T$  [K] est la température.

Les signes minus des deux équations montrent la direction de propagation du flux thermique : d'une température plus élevée vers une température basse.

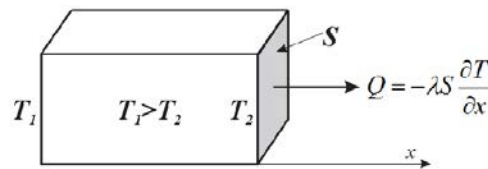


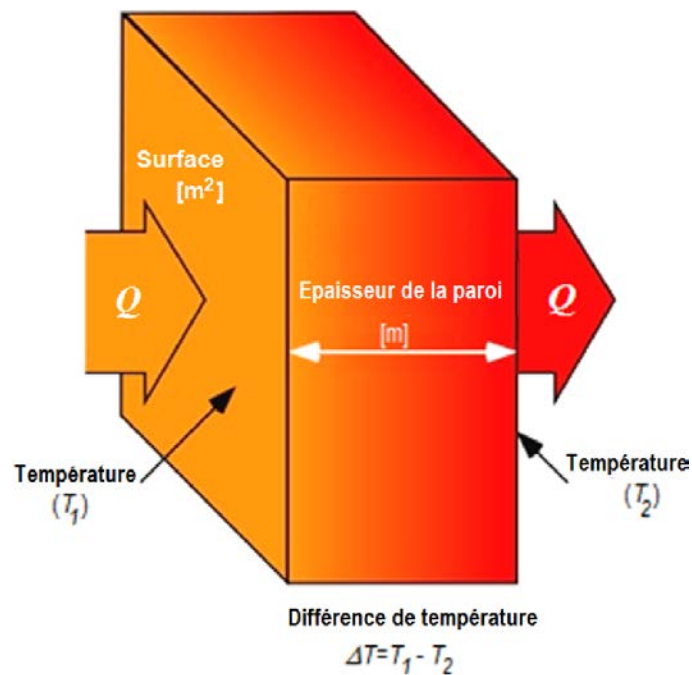
Fig. 4.3. Schéma du transfert thermique par conduction thermique.

Le coefficient de conductivité thermique est en connexion avec la nature du matériau traversé par le transfert thermique conductif [Badea2005]. Dans le Tableau 4.1 sont présentées les valeurs du coefficient de conductivité thermique pour une série de matériaux fréquemment utilisés. Dans la figure 4.4 est montré le transfert thermique par conduction à travers une paroi homogène.

Tableau 4.1. Coefficient de conductivité thermique pour des matériaux différents [Jann2008].

MATERIAU	$\lambda$ W/(mK)
Argent	419
Cuivre	386
Aluminium	204

Acier	45
Acier inoxydable	15
Béton simple	1,40
Béton armé	1,62 ÷ 2,03
Brique pleine	0,80
Eau	0,60
Gypse	0,48
Brique avec des creuses verticales	0,46 ÷ 0,75
B.C.A.	0,25 ÷ 0,34
Bois	0,17 ÷ 0,41
Polystyrène expansé	0,036 ÷ 0,047
Laine minérale	0,042 ÷ 0,050
Polystyrène extrudé	0,027
Air	0,026



**Fig. 4.4.** Transfert thermique unidirectionnel par conduction thermique à travers une paroi homogène.

### *Équations différentielles de la conduction thermique*

L'équation gouvernant le transfert thermique par conduction est l'équation de Fourier, en la définissant comme unidirectionnelle en régime permanent par des corps isotropes et homogènes, dans l'absence d'autres sources internes de chaleur [Badea2005, Jann2008] :

$$q_s = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (4.9)$$

La conduction thermique à travers un matériau est influencée par des certains paramètres :

- chaleur spécifique  $c_p$ ,
- densité du matériau  $\rho$ ,
- diffusion thermique  $a$ ,
- dimensions géométriques de l'élément à travers lequel se produit le transfert thermique conducteur.

La *diffusivité thermique* est la propriété du matériau définissant sa capacité de transporter de la chaleur par transfert thermique :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}, \quad (4.10)$$

où:  $\lambda$  est le coefficient de conductivité thermique,  $\rho$  est la densité du matériau et  $c_p$  la chaleur spécifique.

Une fois tous ceux-ci étant connus, l'équation générale de la conduction thermique peut être énoncée :

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla^2 T + \frac{q_v}{\lambda}, \quad (4.11)$$

où:  $a$  est la diffusivité thermique du matériau,  $\nabla^2 T$ , le Laplacien de la température,  $q_v$  est le flux thermique unitaire volumique.

Dans le Tableau 4.2 sont présentées les équations générales de la conduction thermique pour des différents régimes de transfert.

**Tableau 4.2.** Équations différentielles du transfert thermique par conduction thermique [Badea2005].

NOM DE L'EQUATION	REGIME DE TRANSFERT	EQUATION
Equation générale de la conduction thermique	Transitoire – avec sources intérieures de chaleur	$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla^2 T + \frac{q_v}{\lambda}$
Equation de Fourier	Transitoire – sans sources intérieures de chaleur	$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla^2 T$
Equation de Poisson	Constant – avec sources intérieures de chaleur	$\nabla^2 T + \frac{q_v}{\lambda} = 0$
Equation de Laplace	Constant – sans sources intérieures de	$\nabla^2 T = 0$

	chaleur	
--	---------	--

#### 4.1.5.2. Convection thermique

La *convection thermique* est définie dans la littérature comme étant le processus de transfert thermique entre une paroi et un fluide, comme par exemple, l'air, sous l'action d'une différence de température entre les deux milieux [Badea2005, Jann2008, Le1992]. La convection thermique est déterminée par la conduction dans la couche limite près de la paroi, par l'accumulation d'énergie dans l'intérieur et par le mouvement des particules de fluide. En même temps, un facteur important est le mouvement de mélange du fluide et sa vitesse, ce qui permet la séparation de la convection thermique en deux grandes catégories :

- *Convection thermique libre* ou *naturelle* est déterminée par le mouvement libre du fluide généré par la variation de sa densité en accord avec la température.

- *Convection thermique forcée* est déterminée par un mouvement forcé du fluide généré par des facteurs externes comme : des pompes, différences de niveau, ventilateurs etc.

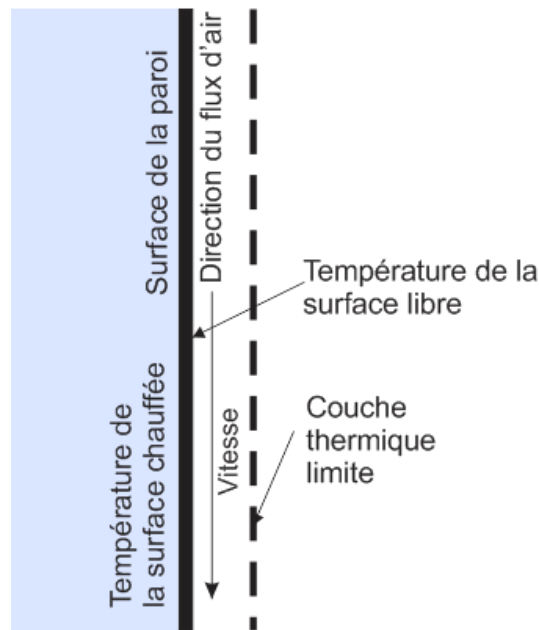
L'équation fondamentale valable pour le transfert thermique par convection a été énoncée par Newton en 1701 :

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T_f - T_p) = \alpha \cdot S \cdot \Delta T \text{ [W]}, \quad (4.12)$$

où:  $\alpha$  [W/(m<sup>2</sup>K)] est le coefficient de convection,  $T_f$ ,  $T_p$  [K] sont les températures du fluide et de la paroi et  $S$  [m<sup>2</sup>], la surface de la paroi.

Sous forme de flux thermique unitaire de surface, il est :

$$q_s = \alpha \cdot \Delta T \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (4.13)$$



**Fig. 4.5.** Convection thermique entre une surface chauffée et l'air en mouvement [Amm1999].

Le *coefficient de convection* représente le flux thermique transmis par convection à travers une surface isotherme pour une différence de température de 1 degré Kelvin. Il peut varier sa valeur au long d'une surface de transfert de chaleur et, pour ça, on utilise dans les calculs une valeur moyenne. Il dépend d'une série de facteurs : vitesse du fluide, température, géométrie de la surface chauffée, le type du fluide etc.

Dans le Tableau suivant (4.3) sont présentées les valeurs du coefficient de convection pour des différents fluides, en formes différentes de convection thermique. Pour le cas de la convection du flux thermique transmis nous avons:

$$\bar{q} = \bar{q}_{cond} + \bar{q}_{conv} \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (4.14)$$

où  $\bar{q}_{cond}$  représente le flux transmis par conduction et celui est décrit par la formule

$\bar{q}_{cond} = -\lambda \cdot \nabla T$ ,  $\bar{q}_{conv}$  étant le flux transmis par convection :

$$\bar{q}_{conv} = \rho \cdot \bar{w} \cdot h \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (4.15)$$

où:  $\rho$  est la densité du fluide,  $\bar{w}$  est la vitesse du fluide et  $h$ , l'enthalpie.

A cause de la difficulté d'application des équations au-dessus, pour des calculs appliqués en ingénierie, l'équation de Newton devient :

$$\bar{q}_s = \bar{\alpha} \cdot S \cdot (T_p - T_s) \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (4.16)$$

**Tableau 4.3.** Valeurs du coefficient de convection pour des différents fluides [Badea2005].



TYPE DE CONVECTION	FLUID	COEFFICIENT DE CONVECTION - $\alpha$ W/(M <sup>2</sup> K)
Convection libre	Gaz	6 – 30
Convection forcée	Gaz	30 – 300
Convection forcée	Huile	60 – 1800
Convection forcée	Eau	500 – 40000
Ébullition	Eau	3000 – 120000
Condensation	Vapeurs	6000 – 120000

Un des paramètres importants dans la convection thermique est représenté par l'hydrodynamique du fluide, qui peut être écoulement laminaire et un écoulement turbulent. L'écoulement laminaire est caractérisé par l'écoulement du fluide en couches parallèles sans transfert de masse entre elles. L'écoulement turbulent suppose un mélange continu du fluide en générant des pulsations transversales et longitudinales de la vitesse d'écoulement et en formant des tourbillons de fluide [Badea2005].

Entre les deux régimes d'écoulement on trouve un troisième – l'écoulement transitoire dans lequel les particules du fluide a, alternativement, des zones d'écoulement laminaire et turbulent. Le mode d'écoulement du fluide est déterminé par le rapport entre les forces d'inertie et les forces de frottement intérieur (de viscosité), nommé aussi le critère Reynolds, décrit par :

$$R_e = \frac{\rho \cdot w \cdot l}{\eta} = \frac{w \cdot l}{\nu}, \quad (4.17)$$

où:  $\rho$  est la densité [kg/m<sup>3</sup>],  $\nu$  est la viscosité cinétique [m<sup>2</sup>/s],  $\eta$  est la viscosité dynamique [Ns/m<sup>2</sup>] et  $l$  est la longueur[m].

#### 4.1.5.3. Radiation thermique

La *radiation thermique* représente le processus de transmission de chaleur entre deux corps séparés par un espace et ayant des températures différentes. Tout corps à une température plus élevée que 0 °K émet une radiation électromagnétique sous forme d'énergie. Le transport d'énergie est réalisé par l'intermédiaire des photons qui se déplacent à la vitesse de la lumière en espace en fonction de la longueur d'onde de la radiation des corps. Ainsi ; on peut dire que la radiation est caractérisée par la longueur d'onde ou par sa fréquence [Badea2005] :

$$\nu = c / \lambda, \quad (4.18)$$

où:  $\lambda$  est la longueur d'onde ;  $\nu$  est la fréquence et  $c$  est la vitesse de la lumière:  $c = 2,998 \cdot 10^8$  m/s.

Un corps qui émet de la radiation thermique vers un autre corps a la propriété, à son tour, de recevoir de la radiation d'autres corps. La radiation reçue peut être absorbée en totalité ou peut être réfléchiée, en fonction de son émissivité.

La relation qui est à la base du transfert de chaleur par radiation a été établie expérimental, en 1879, par Josef Stefan (1835 - 1893) et théoriquement par Ludwig Boltzmann en 1884, ainsi résultant l'équation Stefan – Boltzmann (1844 - 1906) qui exprime le flux thermique émis par un corps noir [Badea2005, Clem2005, Incrop] :

$$q = \sigma_0 \cdot S \cdot T^4 \text{ [W]}, \quad (4.19)$$

$$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4), \quad (4.20)$$

où:  $\sigma_0$  est le coefficient de radiation du corps noir;  $S$  [m<sup>2</sup>], la surface et  $T$  [K], la température.

#### A. Loi de Planck

En 1900, Max Planck a fondé la distribution spectrale de l'intensité de radiation émise par un corps noir, connue sous le nom de *Loi de Planck* [Clem2005, Incrop]. Pratiquement, la radiation thermique et représente la distribution du pouvoir de radiation  $I_\lambda$  en fonction de température et de la longueur d'onde [Badea2005, Clem2005, Incrop]:

$$I_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( e^{hc/\lambda kT} - 1 \right)} \text{ [W/(m}^2 \mu\text{m)}], \quad (4.21)$$

où:  $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$  J·s est la constante de Planck;  $k = 1,3805 \cdot 10^{-23}$  J/K, la constante de Boltzmann;  $c = 2,998 \cdot 10^8$  m/s, la vitesse de la lumière;  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $T$ , la température absorbante de la surface.

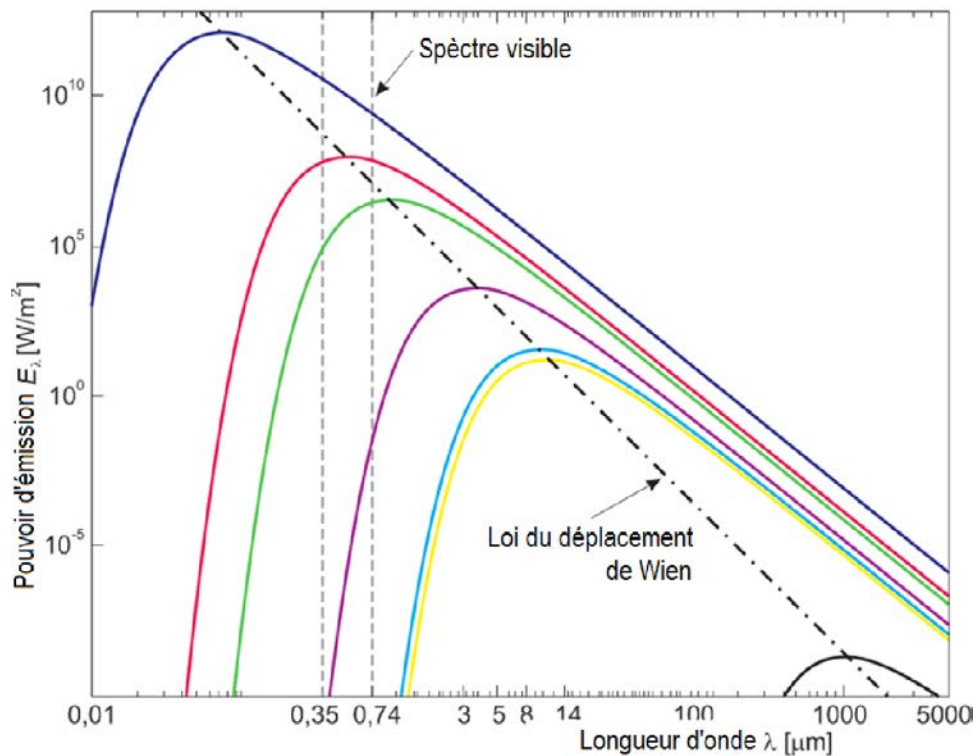
A base de la relation (4.21), le pouvoir d'émission peut être écrit comme :

$$E_\lambda(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)} \text{ [W/(m}^2 \mu\text{m)}], \quad (4.22)$$

où:  $C_1$  et  $C_2$  sont les constantes de Planck pour la radiation ayant les valeurs :

$$C_1 = 2\pi hc^2 = 2,742 \cdot 10^8 \text{ (W} \cdot \mu\text{m}^4) / \text{m}^2,$$

$$C_2 = hc/k = 1,439 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}.$$



**Fig. 4.6.** Pouvoir d'émission du corps noir. [Clem2005]

De l'image au-dessus on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le pouvoir d'émission est variable avec la longueur d'onde ;
- La quantité d'énergie émise augmente en même temps que la température ;
- Plus la longueur d'onde est petite, plus augmente la différence entre les valeurs de température.

### ***B. Loi de Wien***

Wilhelm Wien a réussi de mesurer en 1893 la distribution spectrale d'un corps noir pour des différentes températures en trouvant que l'énergie de pointe est proportionnelle avec la longueur d'onde lui correspondante [Badea2005].

$$\lambda_{\max} T = C_3 = 2897,8 \text{ } [\mu\text{mK}]. \quad (4.23)$$

### ***C. Loi de Stefan – Boltzmann***

Loi de Stefan – Boltzmann est formulée ainsi : le pouvoir total d'émission du corps noir est proportionnel avec sa température absolue au pouvoir quatre :

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \text{ } [\text{W/m}^2], \quad (4.24)$$

où:  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  et  $C_0 = 5,67 [W/(m^2K^4)]$  sont les coefficients de radiation du corps noir.

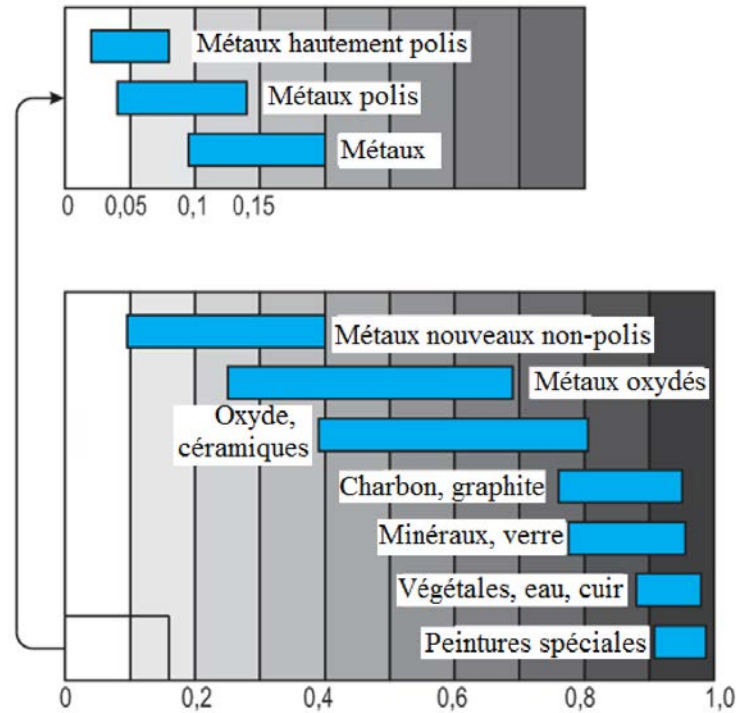


Fig. 4.7. Valeurs de l'émissivité pour des matériaux divers. [Badea2005]

Dans le cas des corps gris, le pouvoir total d'émission sera calculé par la relation :

$$E = \varepsilon(T) \cdot E_0 = \sigma \cdot T^4 = \varepsilon(T) \cdot C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 [W/m^2], \quad (4.25)$$

où:  $\varepsilon(T)$  représente l'émissivité totale du corps.

Dans la figure 4.7 sont présentées des valeurs de l'émissivité thermique en fonction de la nature du matériau utilisé. De cette figure, une série de conclusions peut être mise en évidence :

- L'émissivité des métaux est petite et elle augmente en même temps que l'apparition des oxydes sur la surface des matériaux ;
- L'émissivité des matériaux non-métalliques a des valeurs plus élevées que les matériaux métallique ;
- L'émissivité est en connexion serrée avec la nature de la surface des matériaux.

## **4.2. MODÉLISATION DE LA RÉPONSE THERMIQUE DES STRUCTURES**

Ce sous-chapitre a eu comme but de développer une méthode de modélisation de la réponse thermique des structures analysées par la thermographie. Les matériaux utilisés l'analyse du transfert thermique, la détection des défauts internes et des matériaux présents dans leur masse ont été le béton armé et les matériaux biocéramiques. Partant des bases du premier sous chapitre « Bases du transfert thermique » dans lequel ont été étudiés les phénomènes du point de vue physique et mathématique, ultérieurement ont pu être développés des logiciels pour le calcul et l'introduction correcte des données d'entrée et l'interprétation des résultats par des logiciels spécialisés dans la modélisation avec élément fini.

### **4.2.1. Méthode de modélisation**

Pour modéliser la réponse thermique des matériaux étudiés, a été choisie la méthode de l'élément fini en utilisant des logiciels performants comme : Matlab 2010, Comsol Multiphysics et Solid Works 2010.

Pour modéliser la réponse thermique, une série des paramètres d'entrée très importants on du être pris en compte :

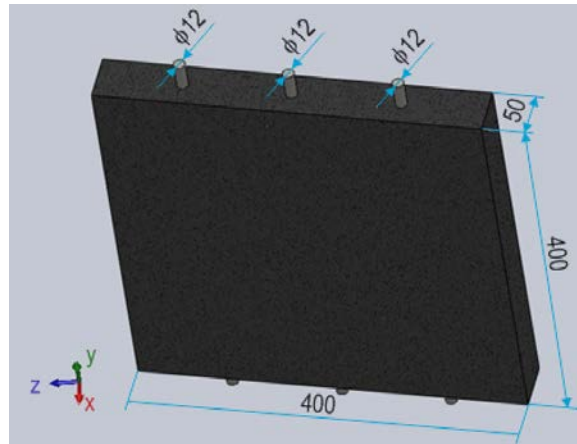
- réaliser d'un modèle 3D respectant la configuration géométrique et la nature du matériau ;
- définir les temps et le mode d'échauffement – radiation, convection ou conduction;
- connaître les températures ambiante et initiale pour l'excitation thermique des matériaux;Definirea modelelor de încălzire: radiație, convecție, conducție termică;
- préciser les propriétés du matériau : émissivité, capacité calorifique, conductivité thermique, coefficient d'expansion thermique, densité, module de Young etc. ;
- définir les éléments géométrique en tenant compte de surfaces courbes, si le cas ;
- vérifier les équations de base pour la modélisation etc.

Pour la modélisation de la réponse thermique a été cherché un logiciel dédié à la modélisation en élément fini, dans ce cas, Comsol Multiphysics.

Comsol Multiphysics est un logiciel destiné à l'analyse par élément fini, à la résolution et à la simulation pour des différentes applications physiques et d'ingénierie. Une qualité importante de ce logiciel est l'interface de communication avec Matlab qui est destiné aux calculs numérique et aux représentations graphiques.

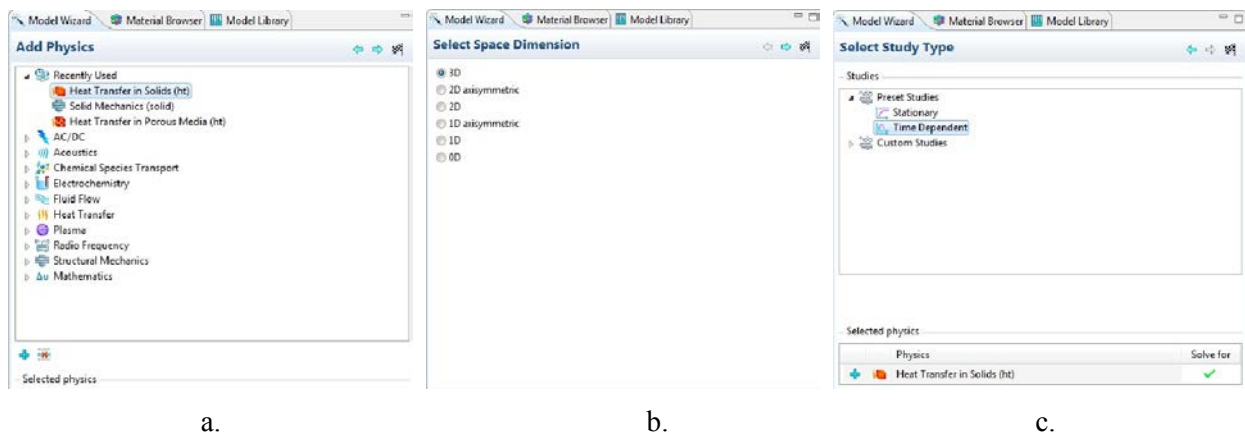
#### 4.2.1.1. Présentation de la procédure

Le procédé de modélisation contient l'algorithme de description de la réponse thermique en utilisant Comsol Multiphysics et Solid Works. Pratiquement, les modèles ont été réalisés en Solid Works, ensuite importés en Comsol où a été faite la simulation avec élément fini.



**Fig. 4.8.** Modèle en SolidWorks de la plaque en béton, armée avec trois barres longitudinales  $\phi 12$ .

Après la conception, la plaque de béton 400×400×50 mm en SolidWorks a été analysée avec élément fini en Comsol Multiphysics. Dans un premier temps, ont été précisés le type du phénomène – dans ce cas, le transfert thermique, le type de transfert thermique (1D, 2D ou 3D) et le régime de transfert (stationnaire ou en fonction de temps) (fig. 4.9).



**Fig. 4.9.** Mode de choix de : phénomène physique (a) ; type de transfert thermique (b) ; régime de transfert thermique (c).

Comsol permet de créer des modèles simples. Pour générer des modèles plus complexes, formés de plusieurs éléments et englobés dans la masse du matériau, il faut utiliser de logiciels

de modélisation 3D. Grâce à l'interface entre SolidWorks et Comsol, cette procédure est plus facile à réaliser (fig. 4.10).

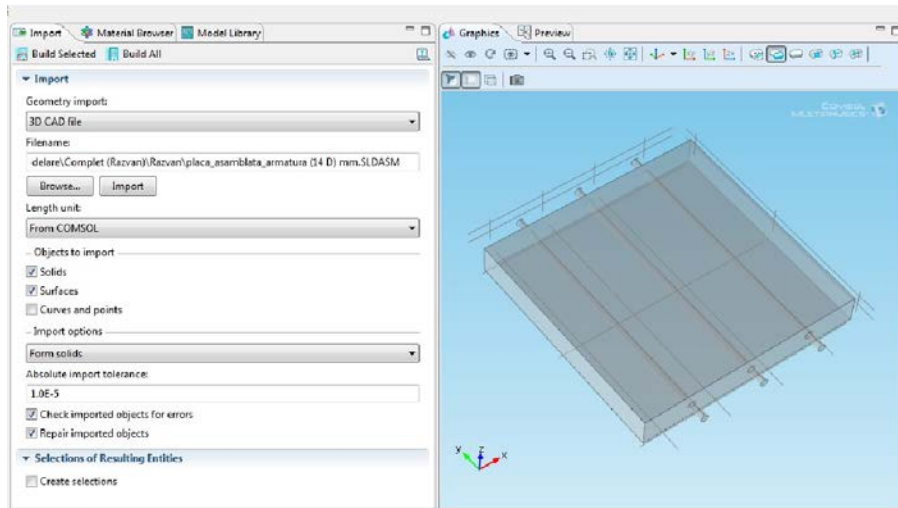


Fig. 4.10. Mode d'importation du modèle 3D de SolidWorks en Comsol Multiphysics.

Après l'importation du modèle 3D de la plaque de béton armé, a été nécessaire de préciser les propriétés des matériaux : béton et armature en acier (fig. 4.11, fig. 4.12).

Property	Name	Value	Unit	Property group
✓ Heat capacity at constant pr...	Cp	750	J/(kg...	Basic
✓ Density	rho	2300[k...	kg/...	Basic
✓ Thermal conductivity	k	1.8[W/...	W/(...	Basic
Coefficient of thermal expan...	alpha	10e-6[...	1/K	Basic
Young's modulus	E	25e9[Pa]	Pa	Young's mod
Poisson's ratio	nu	0.33	1	Young's mod

Fig. 4.11. L'introduction dans la fenêtre du logiciel des propriétés du béton.

Property	Name	Value	Unit	Property group
✓ Heat capacity at constant pr...	Cp	475[J/(...	J/(kg...	Basic
✓ Thermal conductivity	k	44.5[W...	W/(...	Basic
✓ Density	rho	7850[k...	kg/...	Basic
Relative permeability	mur	1	1	Basic
Electrical conductivity	sigma	4.032e...	S/m	Basic
Relative permittivity	epsil...	1	1	Basic
Coefficient of thermal expan...	alpha	12.3e-6[1/K]	1/K	Basic
Young's modulus	E	200e9[...	Pa	Young's r
Poisson's ratio	nu	0.33	1	Young's r

Fig. 4.12. L'introduction dans la fenêtre du logiciel des propriétés de l'acier.

Le choix et la définition des surfaces des éléments ont été réalisés pour chacun séparément : la plaque en béton avec des trous égaux en diamètres avec les barres et les armatures. Le moindre élément a été choisi à la valeur de 0,001 m, alors que le plus grand avait 0,02 m (fig. 4.13, a și 4.13, b). În figurile următoare sunt prezentate definirea elementelor de suprafață a plăcii din beton și a armăturilor din oțel în Comsol.

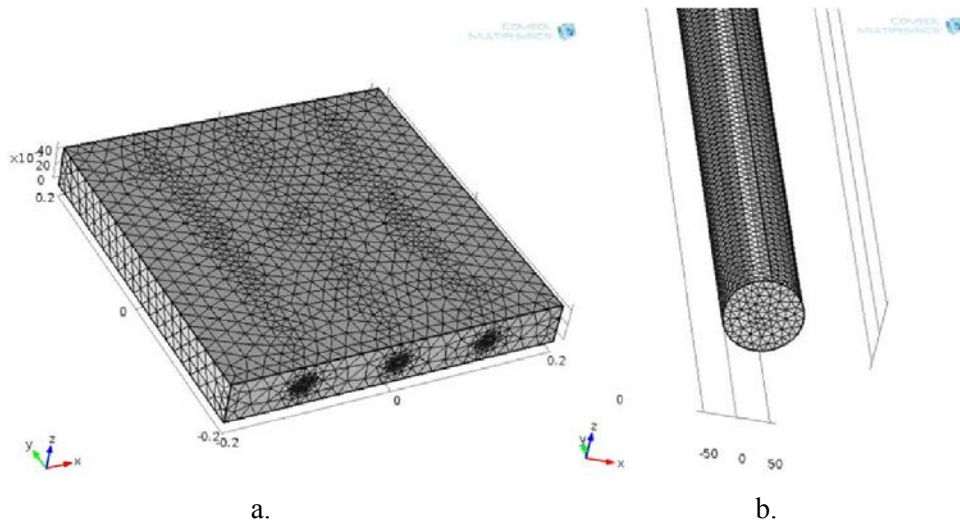


Fig. 4.13. Définition des éléments de la plaque en béton sans armature (a) ; définition des éléments d'armature étant dans l'intérieur de la plaque (b).

Une fois le modèle entier fini et les propriétés pour les matériaux définies, vont être introduits les paramètres thermiques : le flux thermique, la source de chaleur et le pouvoir de chauffage, les valeurs initiales de la température du modèle 3D d'où l'excitation thermique commence, la température ambiante, l'isolation des surfaces du modèle, les équations de transfert thermique. Dans la figure 4.14, a et b est présenté le flux thermique, le coefficient de convection et la source d'échauffement de l'élément.

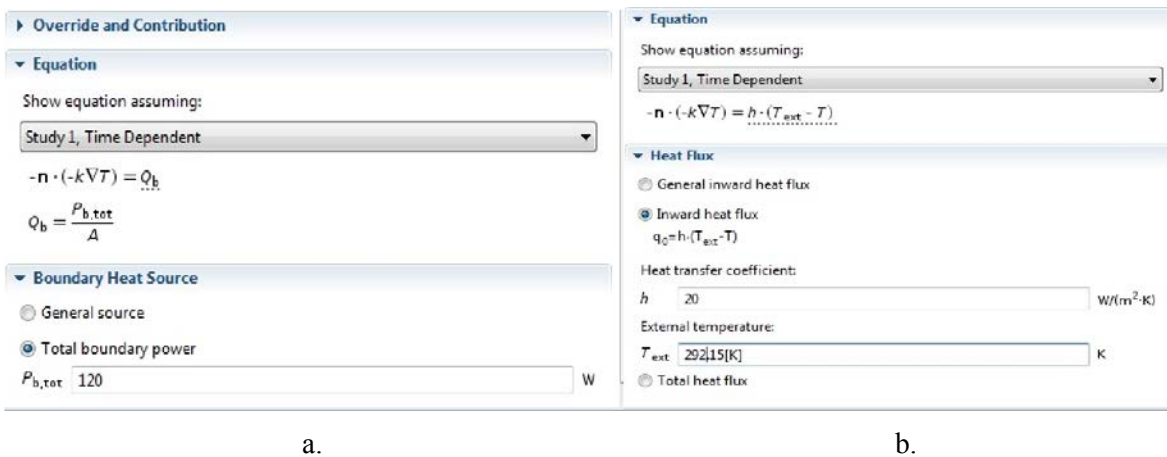


Fig. 4.14. Source d'échauffement [W] et la formule de calcul (a) ; flux thermique ; coefficient de convection de l'aire et la température extérieure (b).

### 4.2.2. Structures de constructions civiles

La section présente analyse la réponse thermique des éléments structurels de génie civile en béton simple et en béton armé et, par cette analyse, la validation de la méthode de détection



des armatures dans le béton par thermographie, en condition de laboratoire et de chantier afin de pouvoir l'utiliser ensuite pour d'autres applications liées au transfert thermique.

Pour l'analyse de la réponse des structures civiles, une plaque 400×400×50 mm en béton avec des armatures en acier de diamètres entre 12 et 18 mm a été considérée. (voir **Annexe 1**). La simulation a pris en considération des différents diamètres de l'armature pour analyser l'influence du coefficient de conductivité thermique de l'armature dans le processus de transfert thermique. En même temps, a été suivie le champ thermique sur la surface de la plaque et les différences de températures entre les armatures et le béton pour une détection ultérieure de l'armature avec la camera thermographique.

#### ***Propriétés physiques et thermiques du béton***

Le **béton** est un aggloméré artificiel obtenu par le mélange d'un matériau inerte (l'agrégat) avec un liant (le ciment) et de l'eau jusqu'à une distribution uniforme. L'ensemble eau – ciment représente la composante active ayant le rôle de lier l'agrégat et de remplir les espaces de l'intérieur.

Le béton considéré fait partie de la classe de résistance C16/20, où 20 représente la résistance minimale de compression [Mpa] déterminée sur des cubes de béton avec l'arête de 150 mm et 16 représente la résistance minimale à la compression, déterminée sur des cubes de béton avec l'arête de 150 mm et l'hauteur de 300 mm [NE 012-1: 2007].

Pour l'analyse de la réponse thermique de l'élément de béton a été nécessaire d'introduire dans le logiciel Comsol les propriétés physiques :

- densité -  $\rho = 2300 \text{ Kg/m}^3$ ,
- conductivité thermique -  $\lambda = 1,80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,
- capacité thermique à pression constante -  $C_p = 750 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$ ,
- coefficient de dilatation thermique -  $\alpha = 10^{-6} \text{ 1/K}$ ,
- coefficient d'élasticité -  $E = 25 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ ,
- coefficient de Poisson -  $\nu = 0,33$ .

#### ***Propriétés physiques et thermiques de l'acier pour l'armature du béton***

Pour **armer** la plaque a été considéré un acier pour les constructions, PC 52 avec les diamètres entre 12 et 18 mm.

Les paramètres pour Comsol ont été :

- densité -  $\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$ ,

- conductivité thermique -  $\lambda = 44,50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,
- capacité thermique à pression constante -  $C_p = 475 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$ ,
- coefficient de dilatation thermique -  $\alpha = 12,30\cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ,
- coefficient d'élasticité -  $E = 200\cdot 10^9 \text{ Pa}$ ,
- coefficient de Poisson -  $\eta = 0,33$ .

#### 4.2.2.1. Modélisation de la réponse thermique pour une plaque de béton simple (sans armatures)

Pour modéliser la réponse thermique d'une *plaque de béton simple* (sans armature), a été choisie une des mêmes dimensions que la précédente, chauffée uniformément avec une source de chaleur placée dans la zone inférieure, pendant 60 minutes, avec une période de 1 min. Le pouvoir du flux thermique transmis par la source était de 120 W. Les températures initiales considérées pour la plaque et pour le milieu ambiant étaient de 17°C et, respectivement, de 19°C (fig. 4.15).

Dans ce cas, l'équation de base pour la modélisation du transfert de chaleur à travers les corps solides, en fonction de temps est présentée plus bas (4.26) :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (4.26)$$

où:  $\rho$  représente la densité du matériau [ $\text{kg/m}^3$ ];  $C_p$  est la capacité thermique massique [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ];  $T$  est la température [ $^\circ\text{C}$ ];  $t$  est le temps [ $\text{s}$ ];  $Q$  représente le flux thermique [ $\text{W}$ ] et  $k$  est le coefficient de conductivité thermique du matériau [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ].

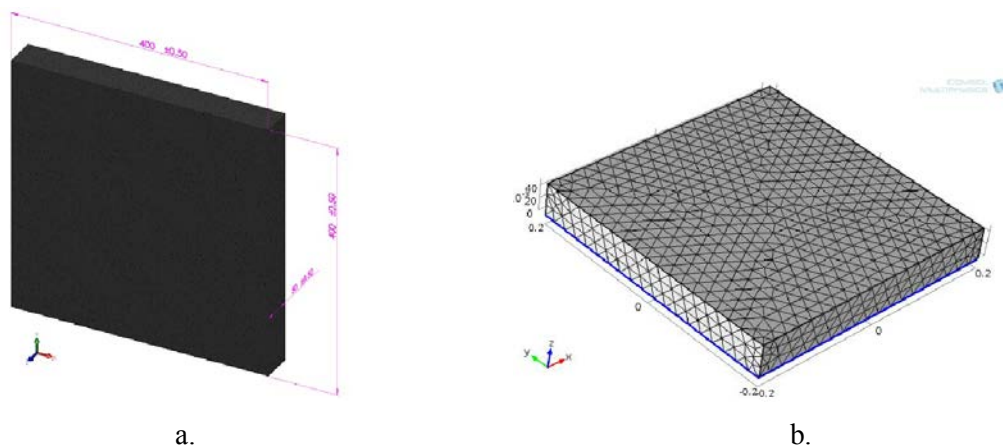
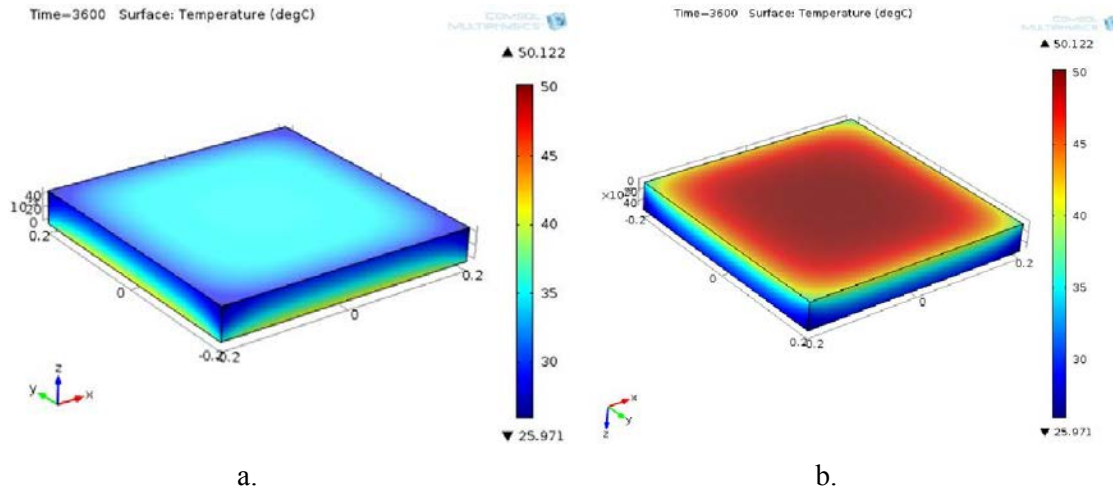


Fig. 4.15. Modèle 3D de la plaque de béton simple (a) et les éléments de la surface discrétisée (b).

Après 60 minutes de chauffage, a résulté la distribution de température sur la surface extérieure et inférieure (chauffée) de la plaque, illustrée dans la figure suivante (fig. 4.16, a et 4.16, b).



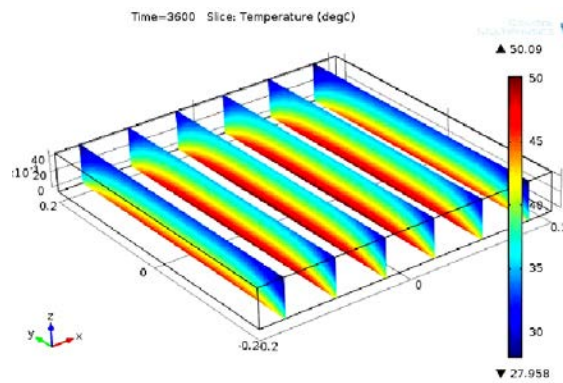
**Fig. 4.16.** Distribution thermique après 60 minutes : sur la surface supérieure de la plaque de béton (a) ; sur la surface inférieure (b).

Suivant le deuxième principe de la thermodynamique, on peut observer la propagation du flux thermique à travers l'épaisseur de la plaque de béton de la surface inférieure (chauffée) vers la surface supérieure (froide). La différence de température  $\Delta T$ , enregistrée entre la surface inférieure ( $T_i = 50,122^\circ C$ ) et la surface supérieure ( $T_s = 25,971^\circ C$ ), en fonction de l'épaisseur de la plaque en béton est calculée avec la relation suivante :

$$\Delta T = T_i - T_s = 24,151^\circ C . \quad (4.27)$$

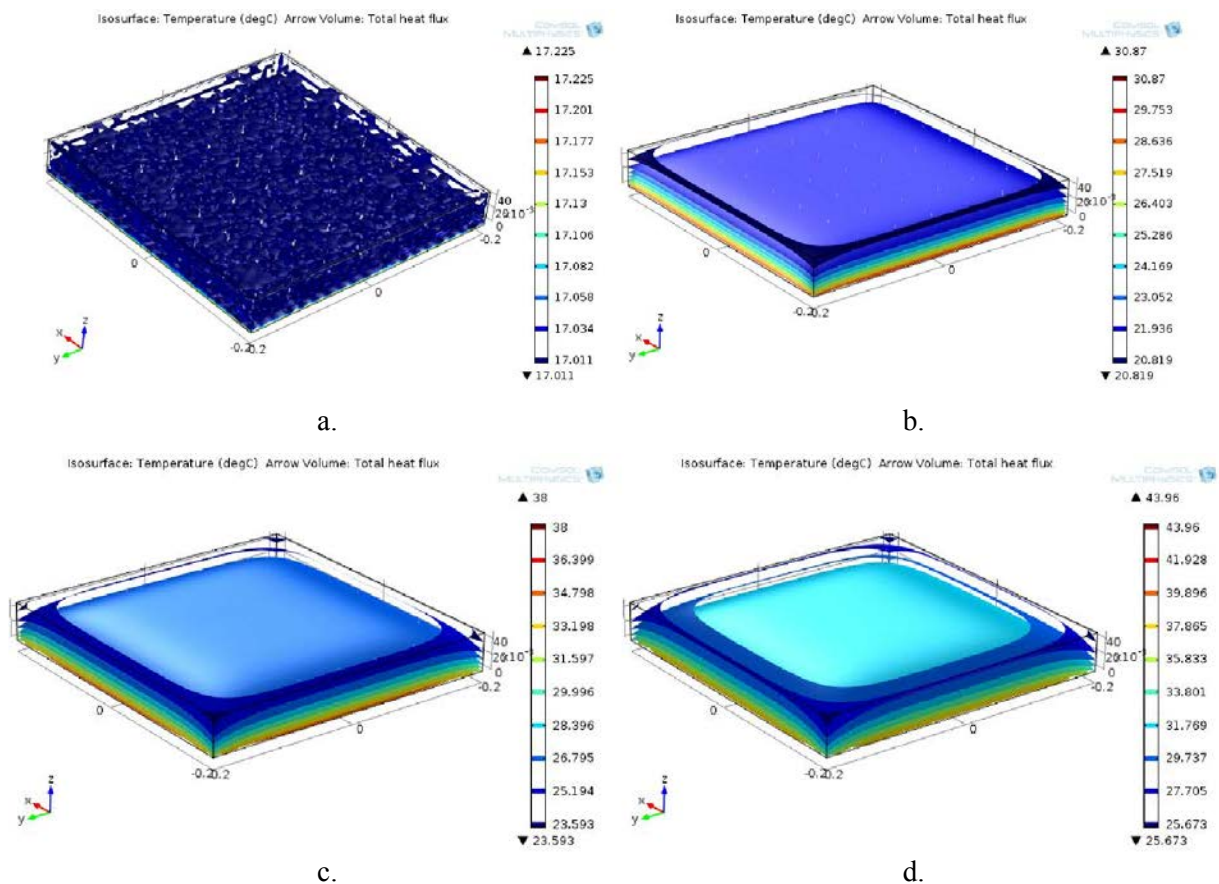
De la relation précédente on peut observer qu'une plaque en béton si,ple ayant l'épaisseur de 50 mm a la capacité de retenir l'énergie correspondante à une variation de température de 24,151 °C, la différence enregistrée après 60minutes d'échauffement.

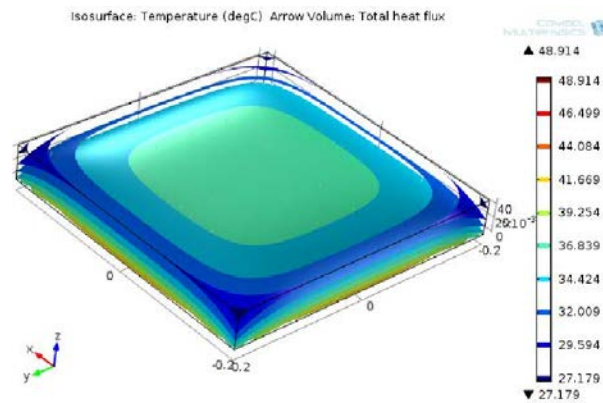
Din relația de mai sus se poate observa că o placă de beton simplu având grosimea de 50 de mm are capacitatea de a reține energia corespunzătoare unei variații de temperaturi de 24,151 °C, diferența înregistrată după 60 de minute de încălzire. Pour voir le gradient de température, la plaque a été divisée en six sections égales (fig. 4.17).



**Fig. 4.17.** Evolution de la température dans de la plaque de béton représentée en différentes sections après 60 de minutes.

De la figure 4.17 on peut observer une concentration de la température vers le milieu de la plaque de béton. L'évolution du champ de température et des surfaces isothermes ont été enregistrées à chaque 15 minutes jusqu'à la fin de la simulation (fig. 4.18, a, b și c).

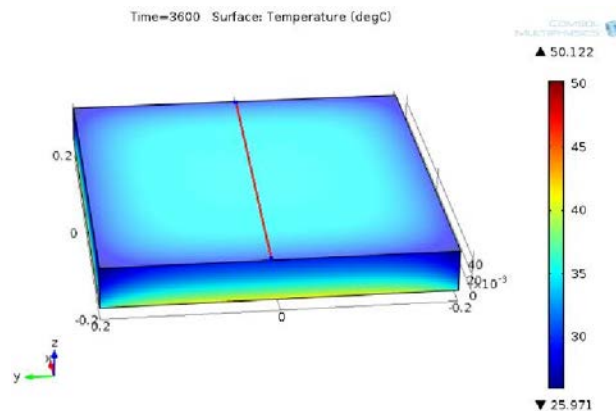




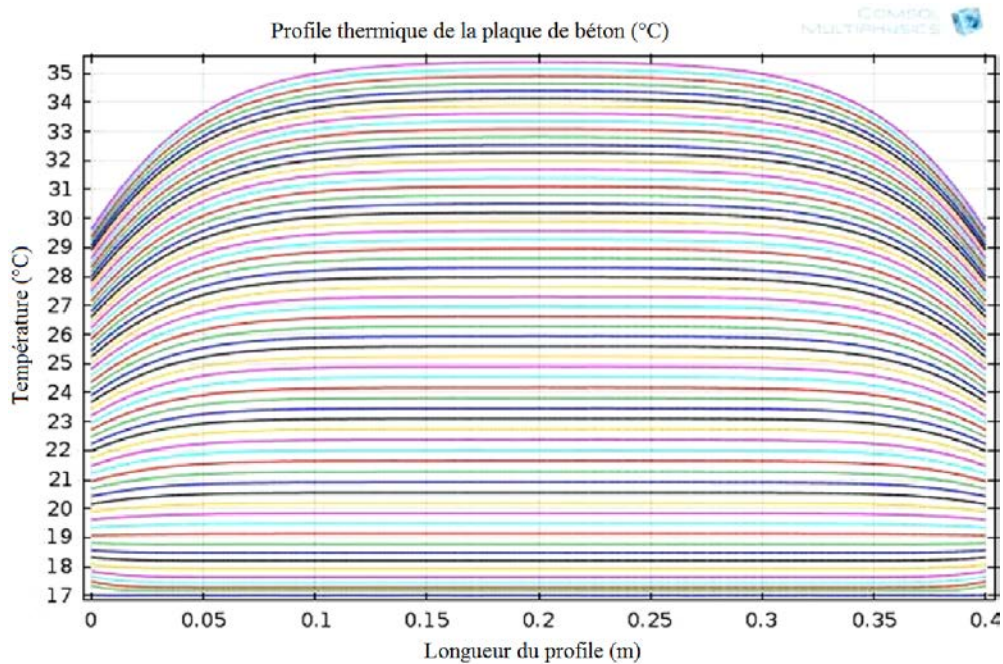
e.

**Fig. 4.18.** Evolution du champ de température après:  $t=0$  min (a);  $t=15$  min (b),  $t=30$  min (c);  $t=45$  min (d),  $t=60$  min (e).

Pour déterminer le profil thermique, la surface extérieure de la plaque a été coupée avec une ligne (fig. 4.19) et la valeur de la température a été enregistrée en chaque point. En même temps, pour visualiser l'évolution temporelle de ce profil, les profils thermiques ont été représentés après chaque 60 s (fig. 4.19).



**Fig. 4.19.** Ligne du profil thermique de la plaque (ligne rouge).



**Fig. 4.20.** Profile thermique de la plaque de béton distribué en temps (surface supérieure).

Dans la figure 4.20 on observe une évolution courbe de la température qui est maximale dans le centre de la plaque et qui diminue vers les extrémités, due à la perte de chaleur sur ses surfaces latérales et à l'influence de la convection thermique, le fluide situé dans le voisinage de la couche conductrice, près de la surface latérale génère un refroidissement. Du graph 4.20 peut être calculée la différence de température en fonction de temps, en considérant des différentes zones – dans ce cas, la différence entre la zone de courbure maximale et les zones marginales de la plaque.

Du graph présenté dans la figure précédente on peut calculer la variation de la température pour des zones différentes : en occurrence les zones de courbure maximale et celle d'extrémité vers les bords de la plaque :

$$\Delta T = T_f - T_0 = 36,839 - 17,037 = 19,802^\circ\text{C}, \quad (4.28)$$

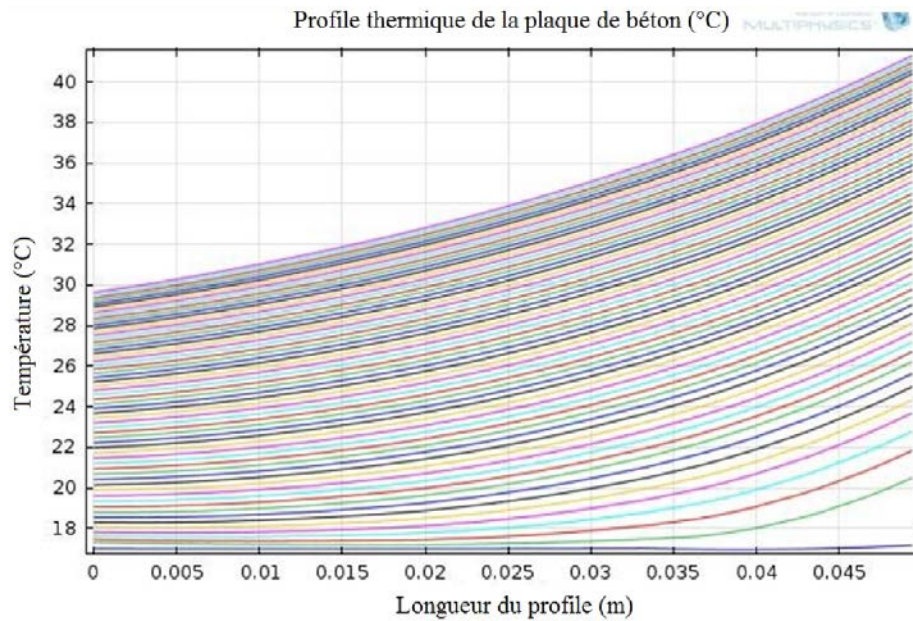
où :  $\Delta T_{\max}$  représente la variation de la température maximale en temps ;  $T_0$  est la température initiale de la plaque en béton ;  $T_f$  est la température finale (après 60 minutes) :

$$\Delta T = T_f - T_0 = 32,009 - 17,011 = 14,998^\circ\text{C}, \quad (4.29)$$

où :  $\Delta T_{\min}$  représente la variation de la température minimale en temps ;  $T_0$  est la température initiale de la plaque en béton ;  $T_f$  est la température finale (après 60 minutes).

Dans la figure suivante est représenté le profile thermique de la plaque en béton par rapport à son épaisseur et le temps.





**Fig. 4.21.** Profil thermique de la plaque en béton distribué sur l'épaisseur (échauffement de droite à gauche).

#### 4.2.2.2. Modélisation de la réponse thermique d'une plaque en béton armé (barres à $\varnothing=12$ mm)

Pour **modéliser la réponse thermique d'une plaque de béton armé** (barres avec  $\varnothing=12$  mm), a été considérée une plaque armée avec trois barres longitudinales d'acier profilé pour constructions, ayant le diamètre  $\varnothing=12$  mm et la longueur de 500 mm. Les dimensions de la plaque ont été gardées comme dans le cas précédent:  $400 \times 400 \times 50$  mm. L'ensemble plaque et barres englobées a été chauffé uniformément avec une source de chaleur dans la partie inférieure temps de 60 minutes avec un pas de 1 minute. Le pouvoir du flux thermique transmis par la source de chaleur a été fixé, comme dans le cas précédent, à une valeur de 120 W. Les températures initiales, considérées pour la plaque et pour le milieu ambiant ont été de  $17^\circ\text{C}$ , respectivement, de  $19^\circ\text{C}$ .

Le modèle de la plaque de béton armé réalisé en SolidWorks a été ensuite importé en Comsol et simulé. La distribution de température sur les deux surfaces de la plaque – en contact avec la source de chaleur et celle supérieure, ont été ensuite observées : après 60 minutes, la distribution thermique sur les deux côtés a été enregistrée (fig. 4.22, a, b, c).

Suivant, a été suivie la différence de température sur les deux faces de la plaque en béton armé : la surface en contact avec la source d'échauffement et la surface libre (supérieure). La distribution thermique sur ces deux côtés après 60 minutes est visible dans la figure 4.23, a et 4.23, b.

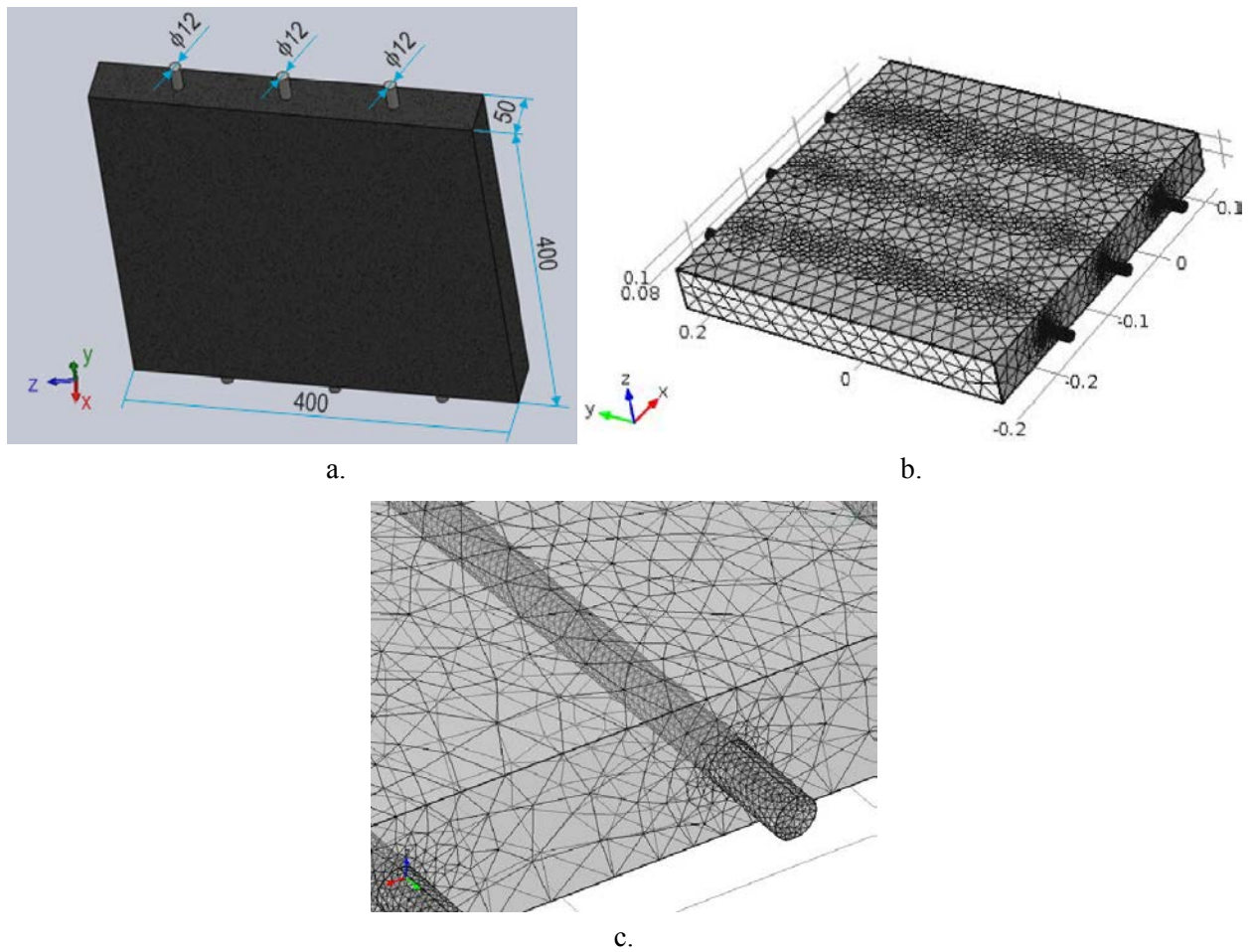


Fig. 4.22. Modèle 3D de la plaque (a); détail des éléments de division de l'ensemble barre-plaque (b); détail des éléments de division de la surface de la barre d'acier et de la plaque en béton (c).

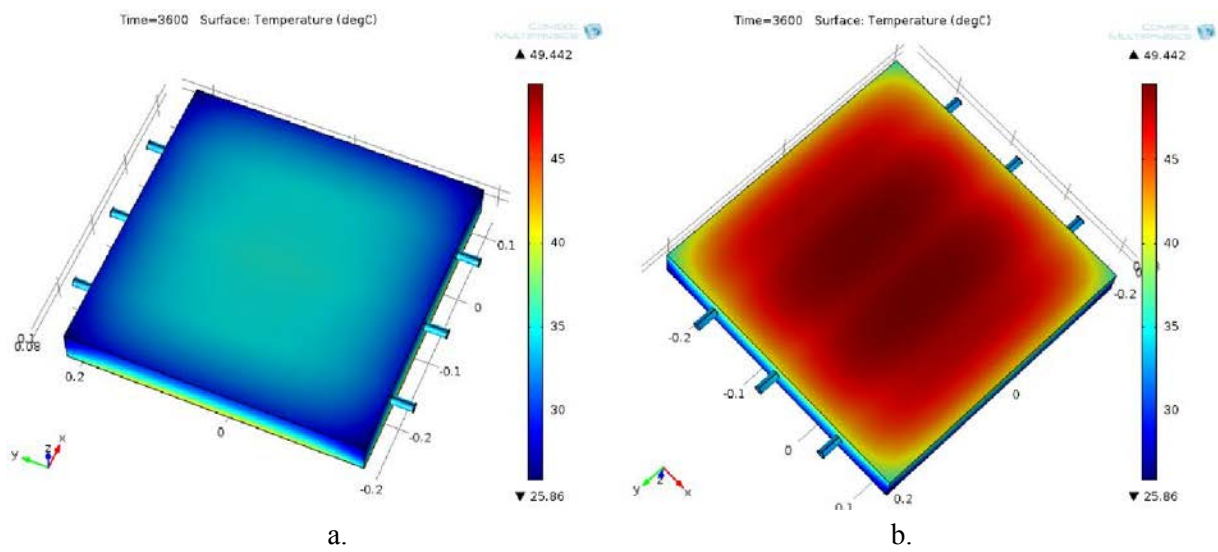
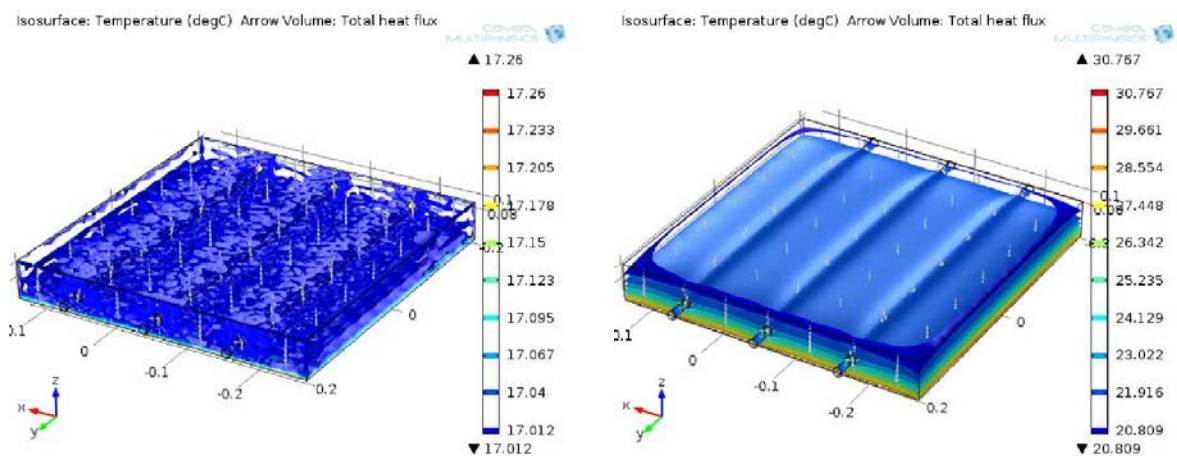


Fig. 4.23. Distribution thermique après 60 minutes, sur la surface : extérieure (a) ; inférieure (b).

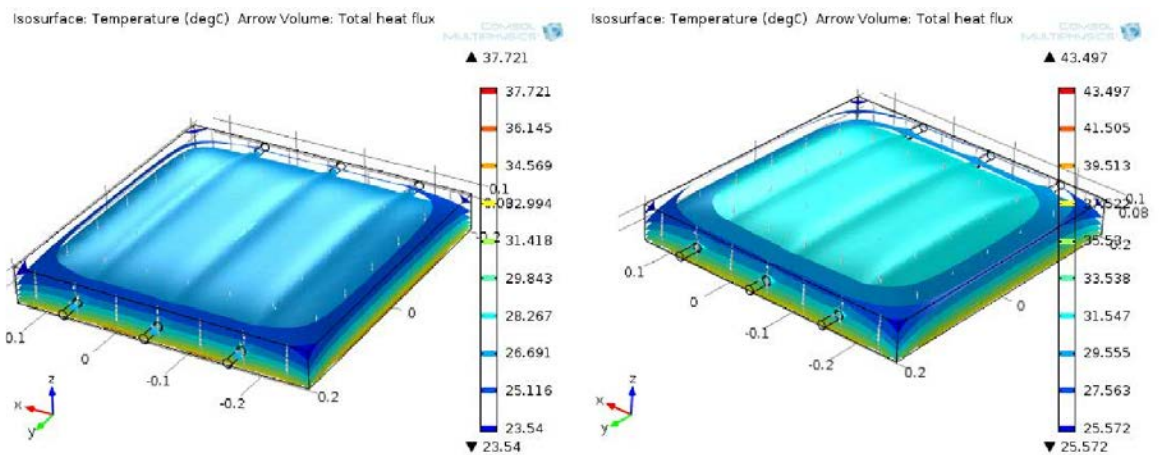


Analysant les deux figures (fig. 4.23, a et fig. 4.23, b) on observe dans la première, une modification sensible de la distribution de température sur la surface de la plaque de béton due au coefficient de conductivité thermique des barres d'acier  $\lambda = 44,50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , beaucoup plus grand que celui du béton  $\lambda = 1,80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Dans la figure 4.17, b, le réseau interne d'armature est facilement observable. La clarté de cette modification de température sur la surface en contact avec la source de chaleur est due au coefficient de conductivité thermique différent pour les deux types de matériaux et due au flux de chaleur qui augmente la température, pénétrant la couverture de béton (19 mm) de l'armature. Dès que le flux de chaleur rencontre l'armature de béton, dû au coefficient de conductivité thermique beaucoup plus grand, celle-ci va se chauffer plus fortement. L'évolution du champ de température et des surfaces isothermes dans la plaque en béton ont été déterminé chaque 15 minutes, jusqu'à la fin de la simulation : comme ça a été possible de mettre en évidence l'influence du béton sur le champs thermique (fig. 4.24, a, b, c, d, e, f) [Dragan2014a].



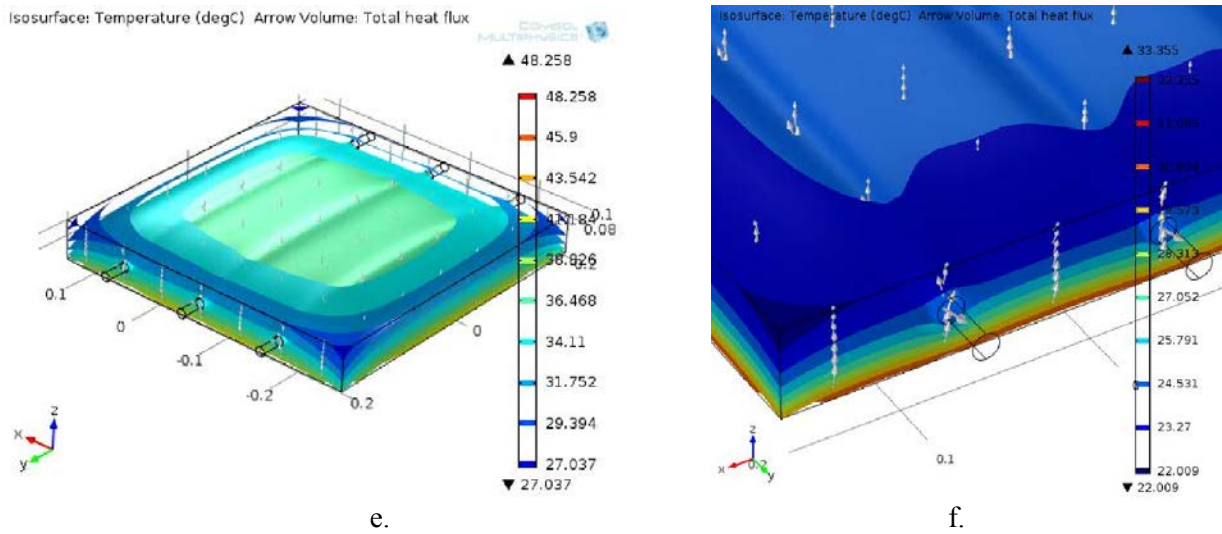
a.

b.



c.

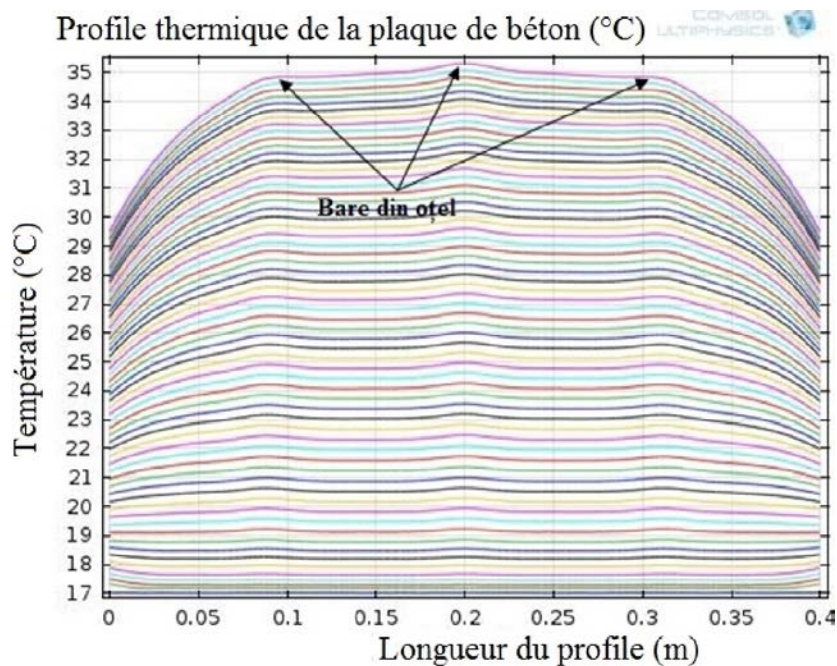
d.



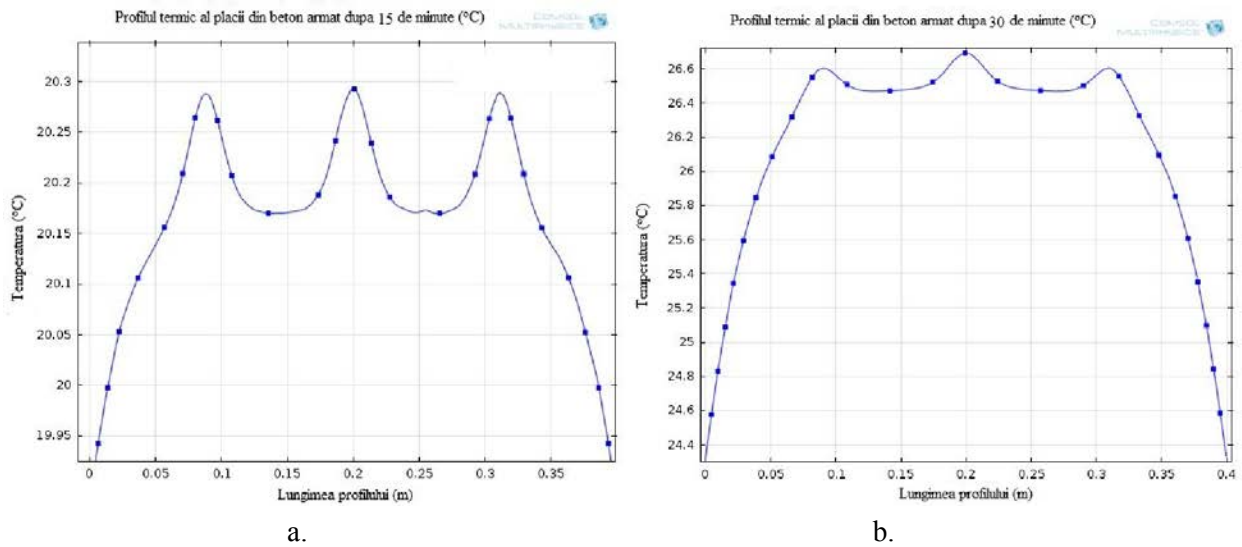
**Fig. 4.24.** Champ de température après : 0 (a); 15 (b), 30 (c); 45 (d) et 60 (e) min., détail de l’armature (f).

De figure 4.24, on peut observer la croissance en temps de la température de la surface chauffée vers la surface extérieure et, à cause de la diffusion thermique du béton et de son épaisseur, la différence thermique entre l’armature et le béton sur la surface extérieure devient très petite.

Pour détecter les différences de température entre l’armature d’acier et le béton sur la surface extérieure, a été réalisé un profil thermique de la plaque de béton armé, où on peut observer que, dans les zones des trois armatures de l’intérieur de la plaque, apparaît un changement de température qui évolue en fonction du flux de chaleur et de temps. (fig. 4.25).

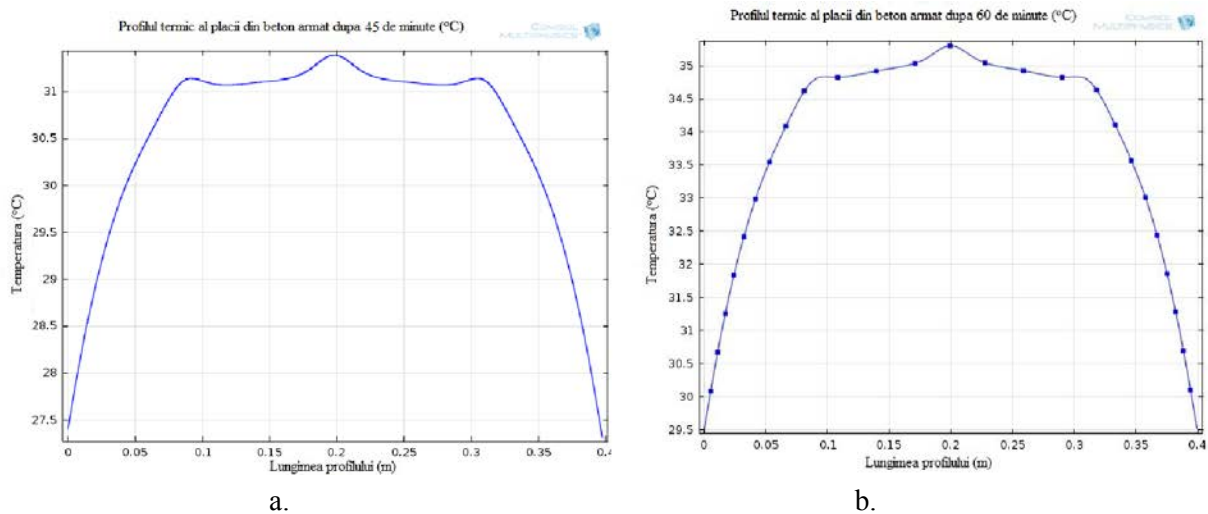


**Fig. 4.25.** Profil thermique de la plaque de béton distribué en temps (pour la surface supérieure).



**Fig. 4.26.** Profile thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 15 minutes (a) et 30 minutes (b).

Dans la figure 4.26, a est présenté le profile thermique de la plaque dans la zone des armatures après 15 minutes de chauffage alors que dans la figure 4.26, b se trouve le même profil réalisé après 30 minutes.



**Fig. 4.27.** Profile thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 45 minutes (a) et 30 minutes (b).

Dans le graph de la figure 4.26, a, après 15 minutes d'échauffement a résulté une différence de température entre l'armature et le béton  $T_a - T_b = 0,14$  °C. Dans le graph suivant, pour un échauffement de 30 minutes, la différence de température résultante a été  $T_a - T_b = 0,22$  °C. Finalement, le profile thermique de la plaque en béton montre que au moment 45 minutes  $T_a - T_b = 0,31$  °C (fig. 4.27.a), et que après 60 minutes d'échauffement  $T_a - T_b = 0,34$  °C (fig. 4.27.b).

### 4.2.3. Structures biocéramiques

Les matériaux utilisés dans le domaine médical doivent satisfaire des certaines qualités dans le but de permettre l'obtention d'une réponse biologique optimal. La colonisation osseuse d'une greffe, par exemple, dépend des caractéristiques poreuses des matériaux et, spécialement, de la taille et la répartition des pores de leurs interconnexions [Burg2000, Engin1999, Flaut2001, Klaw1971, Liu2013].

Pour l'optimisation de l'efficacité biologique de ces matériaux, des nouveaux procédés d'élaboration et des nouvelles méthodes de vérification ont été étudiés. Ceux-ci sont, principalement, basés sur des répliques d'une structure poreuse existante (d'origine naturelle) ou sur l'utilisation des agents liquides ou solides qui pourraient générer une porosité contrôlable pendant l'obtention du matériau [Ohji2013]. Ces agents poreux peuvent être ajoutés en état solide (par pression) ou en état liquide (en suspension). Le mélange sèche de l'agent poreux avec de la poudre céramique permet d'obtenir un composite qui, ultérieurement, est formé par pressage uni axiale ou isostatique pour lui donner une forme mécanique. Les traitements thermique adéquates et optimisés vont permettre la génération d'une macroporosité par l'élimination progressive de l'agent poreux et en gardant, en même temps, l'architecture de la macroporosité [Jin2009, Sal2012, Kram2013].

Le mélange en état liquide peut être obtenu par :

- ajout du porogène dans la suspension de substance minérale en état liquide ou solide ;
- formatage du mélange dans des moules en gypse pour obtenir des formes complexes, proches de celles anatomiques ;
- couler la suspension céramique sur un édifice comme, par exemple, un moule polyuréthane imprégnée avec de la barbotine ce qui va générer, après séchage et traitement thermique, une structure poreuse interconnectée.

Une autre méthode est celle de thermo-formatage et de la combinaison chimie – formatage. Le procédé a été décrit dans les travaux de Deschamps [Hom2007] et, ensuite, transposé pour diverses céramiques [Monch2001], comme la hydroxyapatite. A ça s'est ajouté le processus de construction de l'édifice organique qui assure une architecture permettant le contrôle individuel de chaque échantillon par chimie – formatage. Le porogène utilisé est un polymère qui forme de billes soudées entre elles, soit par un procédé thermique soit par un solvant. La taille des zones de contact dépend du diamètre des billes et de la durée du traitement (thermique ou chimique). Le choix du type de matériau pour le porogène est basé sur quelques principes :

- il doit être thermoplastique;
- il doit avoir une structure amorphe telle que, au-delà de la température vitreuse, il existe une zone transitoire ayant le caractère de caoutchouc, dans lequel la viscosité diminue en fonction de température et fait que le produit soit facile à formater;
- il doit avoir un coefficient thermique rapproché de ceux de la matrice minérale ;
- il doit permettre une élimination propre à des températures moindres que 500°C. Si on choisit PMMA (fréquemment utilisé en médecine), celui va dégager des produits peu toxiques (CO<sub>2</sub> et vapeurs d'eau) et très peu des déchets [Yosh1997] ;
- il doit avoir des formes sphériques qui permettent des nombreux contacts entre les composantes, distributions homogènes et, par conséquent, la possibilité de reproduction de l'architecture. Les billes de PMMA, utilisées pour la réalisation des céramiques testées, existent avec des diamètres de quelques micromètres jusqu'à quelques millimètres. La sélection granulométrique est longue en temps et peut être faite à l'aide des tamis vibrantes dans les gammes suivantes : (0-100 µm), (100-200 µm), (200-300 µm), (400-500 µm), (500-600 µm), (600-700 µm) et (> 700 µm).

Dans ce sous chapitre sont présentées la modélisation et la simulation de la réponse thermique des structures en matériaux biocéramiques. Dans ce but, a été considéré un échantillon cylindrique, réalisé en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ayant l'épaisseur  $g = 15,30$  mm et le diamètre  $\varnothing = 3$  mm, dont la porosité moyenne est estimée à des diamètres entre 500 et 600 µm [Nguy2013]. Pour simuler la réponse thermique, à l'intérieur de l'échantillon ont été réalisés des défauts de différentes dimensions entre 0,5 et 1,2 mm (voir Annexe 2), plus grandes que la porosité fonctionnelle nécessaire. Ceux-ci vont permettre l'application de la méthode pour le dépistage des éventuels défauts, sous forme de trous qui dépassent la taille normale de la porosité fonctionnelle et qui peuvent influencer décisif la qualité biologique de l'implant par modification du flux de liquides biologique, modification de la densité et, pas en dernier, par la modification des propriétés mécaniques de résistance.

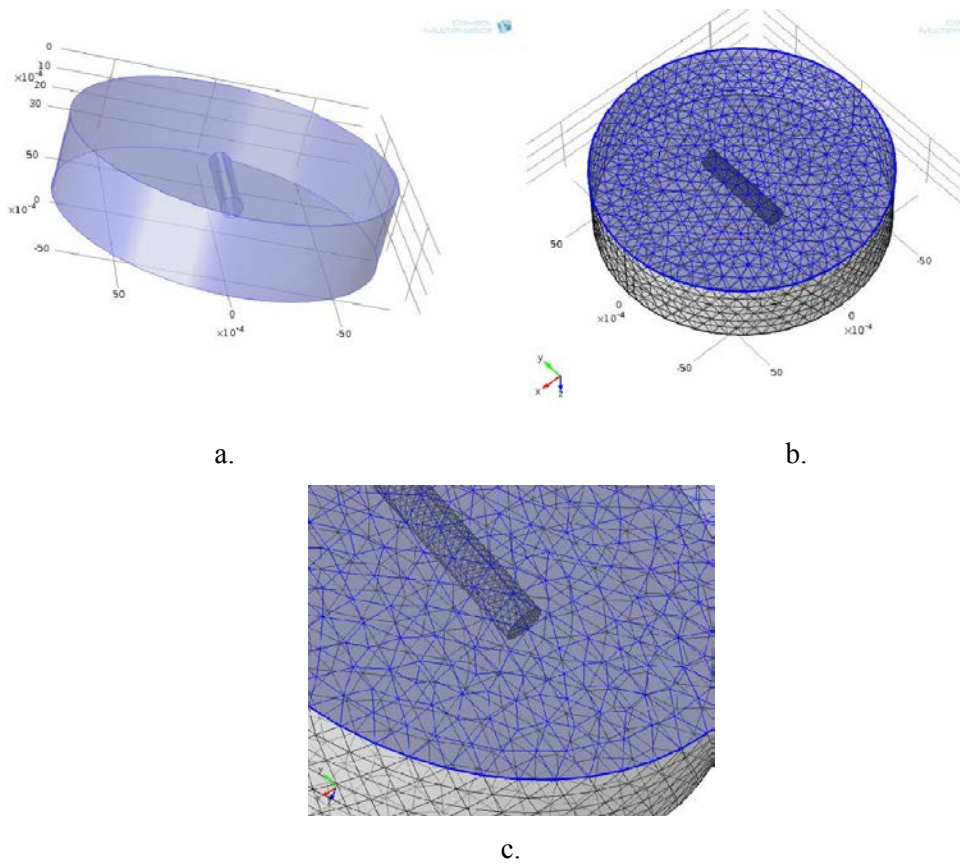
La méthode suppose de réaliser un modèle 3D de l'échantillon en SolidWorks et, après l'importation en Comsol Multiphysics, la modélisation de la réponse thermique. L'initialisation des propriétés physiques et thermiques dans le logiciel d'analyse avec élément fini est très importante parce qu'une analyse démarrée avec des propriétés erronées peut générer des erreurs majeures dans le calcul.



#### 4.2.3.1. Modélisation d'un échantillon ayant un défaut interne long de 5 mm et $\phi = 1$ mm

Dans les préliminaires de l'expérimentation, il a été nécessaire de réaliser un défaut interne dans la masse de l'échantillon biocéramique.

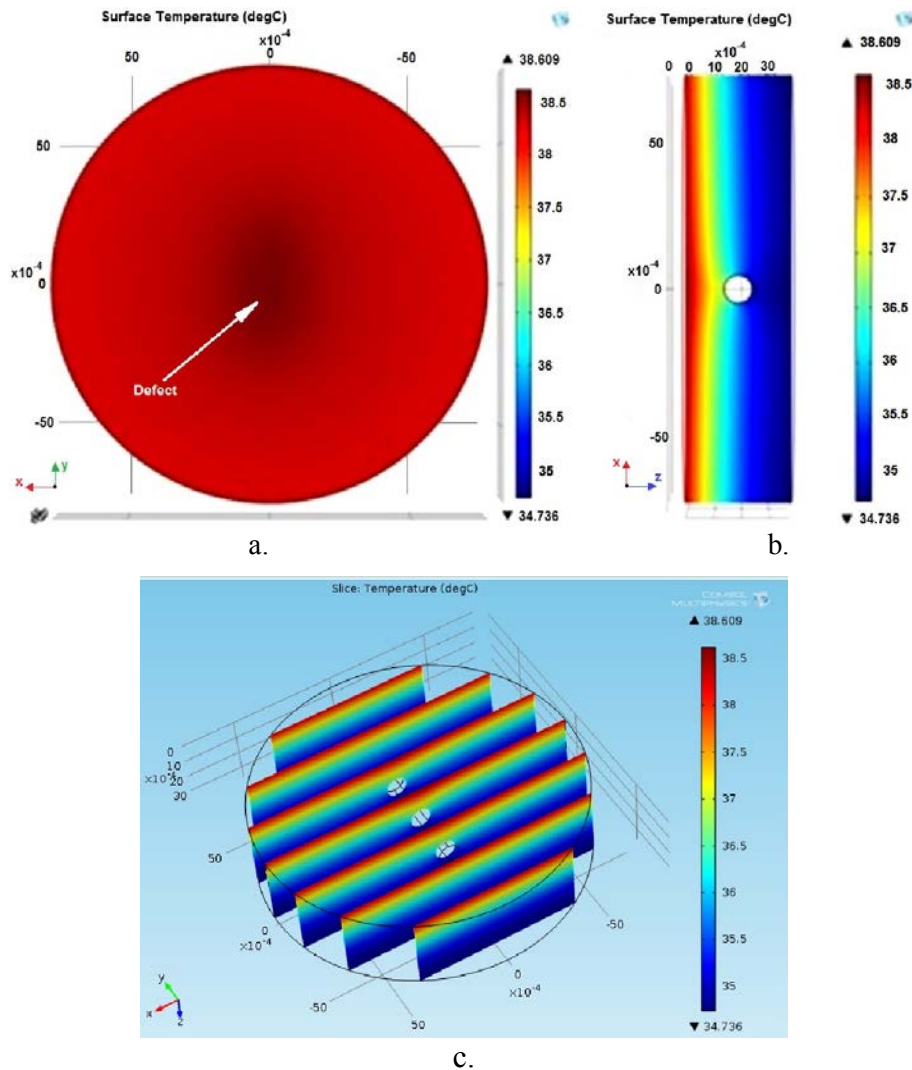
Il a été placé au centre de l'échantillon et avait les dimensions  $l = 5$  mm et  $\phi = 1$  mm. Après sa création 3D, le modèle a été transféré en Comsol Multiphysics où ont été effectués le model de calcul pour le transfert thermique et la discrétisation de tous les surfaces, y compris les parois du défaut interne (fig. 4.28)



**Fig. 4.28.** Modèle 3D de l'échantillon en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (a); discrétisation des surfaces (b); détail du défaut (c).

L'échauffement de l'échantillon a duré 50 secondes et ensuite, a été utilisée la méthode par réflexion pour la détection du défaut. Celle-ci peut être définie comme une méthode dans laquelle l'échauffement et la visualisation de la zone d'intérêt se fait de même côté du défaut.

Dans la figure suivante (fig. 4.29) est représentée la distribution de température (vue frontale et section dans le zone du défaut) 5 s après le démarrage de la source de chaleur et y on peut observer l'influence du défaut sur le transfert de chaleur. L'influence se doit à l'amincissement du matériel dans la zone du défaut et par la différence entre les coefficients de conductivité thermique.



**Fig. 4.29.** Distribution de la température sur la surface du défaut après 5 s (a) ; section dans la zone du défaut en même moment (b) ; division du modèle en zones par des plans parallèles (c).

Dans les figures suivantes (fig. 4.30 et 4.31) est présentée l'évolution du champ de température par l'analyse des surfaces d'intérêt de l'échantillon dans les cas des méthodes par réflexion et par transmission. Premièrement a été analysé, en transmission, le champ de température après une stimulation thermique de 5 s de la surface qui n'était pas en contact avec la source de chaleur. Dans la deuxième phase été analysé, en réflexion, le champ de température et la direction de propagation pour la surface en contact avec la source de chaleur.

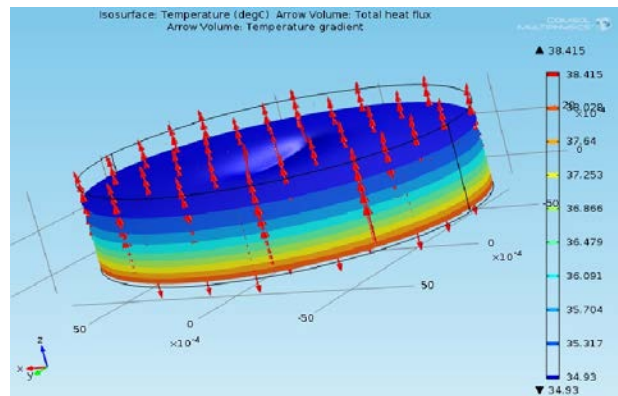


Fig. 4.30. Evolution du champ de température dans l'échantillon de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (surface non chauffée), t = 5s.

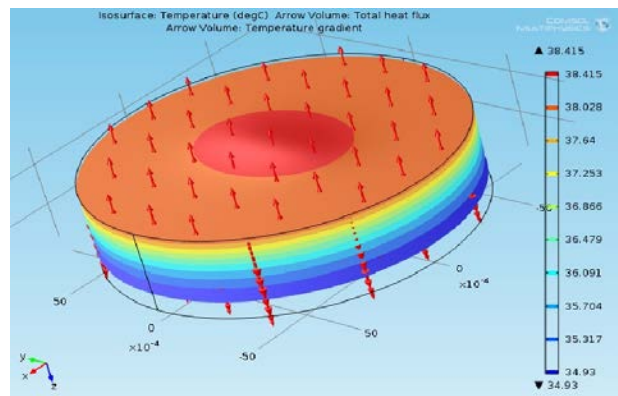


Fig. 4.31. Evolution du champ de température dans l'échantillon de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (surface chauffée), t = 5s.

Pour évidencier la différence de température entre le défaut et le reste de l'échantillon, dans le cas des méthodes d'analyse par réflexion et par transmission, on été tracés des profils thermiques pour la température initiale (fig. 4.32) et après 5 s d'échauffement (fig. 4.33 et fig. 4.34).

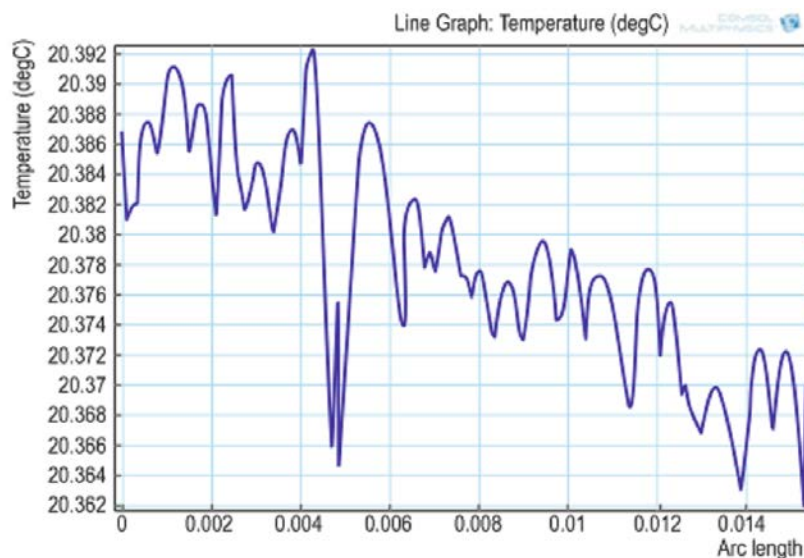
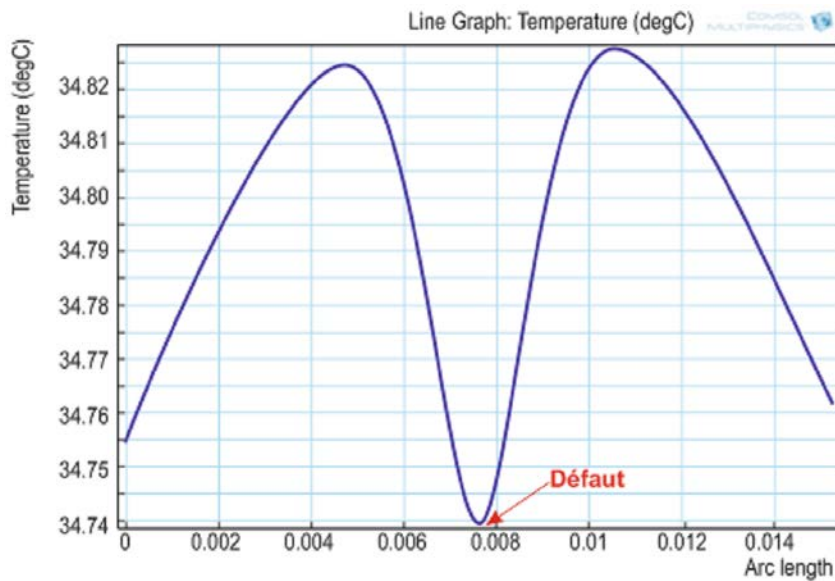


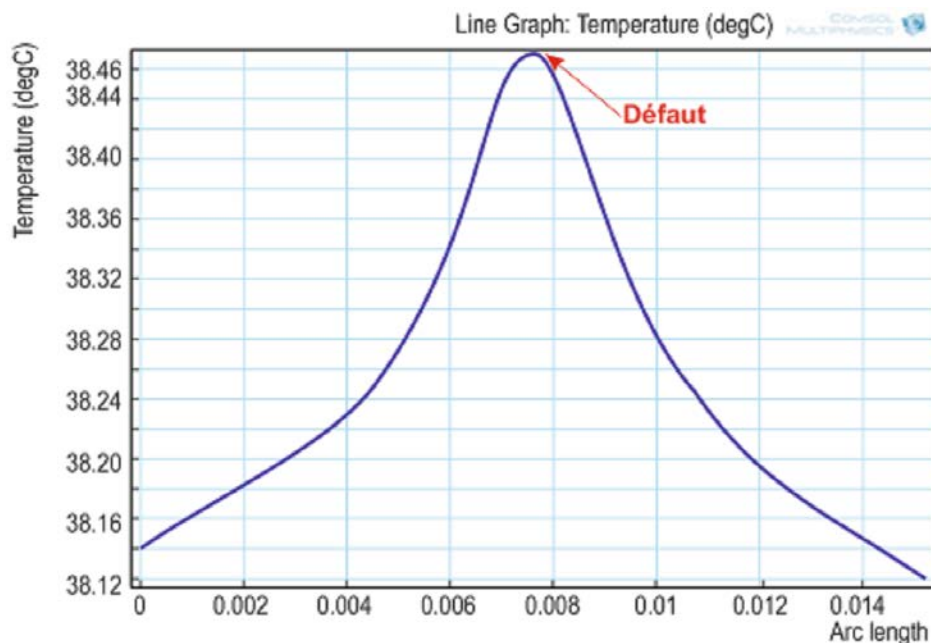
Fig. 4.32. Profile thermique de la surface de l'échantillon de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avant le démarrage de la source.





**Fig. 4.33.** Profile thermique de la surface de l'échantillon de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5 s après le démarrage de la source (méthode par transmission).

On peut observer dans le cas de la méthode par transmission (Fig. 4.26) une différence maximale entre la température du matériau en dehors du défaut et la température dans la zone avec défaut de  $0,07\text{ }^\circ\text{C}$ , alors que pour la méthode par réflexion a été enregistrée une différence de  $0,31\text{ }^\circ\text{C}$ .



**Fig. 4.34.** Profile thermique de la surface de l'échantillon de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5 s après le démarrage de la source (méthode par réflexion).

En faisant une comparaison entre les deux méthodes d'analyse s'est avérée que la méthode par réflexion fourni une différence de température considérablement plus grande que celle obtenue par la méthode de transmission, ce qui mène à la conclusion que des résultats expérimentales concluents pourraient obtenus dans le cas d'étude des défauts dans les matériaux biocéramiques par thermographie en infrarouge, en validant ainsi la méthode.

### **4.3. CONCLUSIONS**

Par l'étude comprise dans cette section, on a démontré la modélisation et la simulation par élément fini du comportement du point de vue du transfert thermique des deux matériaux visés dans la recherche – le béton et les biocéramiques. Le but de ces expérimentations a été de valider la méthode d'analyse par thermographie infrarouge active.

La première partie du chapitre consiste de la modélisation et de la simulation du comportement de transfert thermique du béton simple et du béton armé. La thermographie infrarouge s'est avérée d'être une méthode bonne et efficace, fournissant des informations correctes sur les habilités de transfert thermique du béton simple et permettant l'utilisation des sources de chaleur afin de détecter le réseau d'armature dans le cas du béton armé.

Dans la deuxième partie a été présentée une étude du comportement thermique des matériaux biocéramiques, dans le but de détecter des défauts internes par leur stimulation thermique. Ici, aussi, la méthode s'est avérée d'être efficace, en fournissant des informations et des résultats qui démontrent la possibilité d'utilisation la thermographie infrarouge dans l'auscultation des matériaux biocéramiques.

Les modèles des échantillons en béton simple et en béton armé, comme ceux en biocéramiques ont été créés par le logiciel SolidWorks. Cette méthode de conception des modèles a permis de représenter des plaques en béton simples et armées, ainsi que des échantillons en biocéramiques avec des défauts internes, contrôlés des différents diamètres.

#### **Modélisation et simulation avec Comsol Multiphysics**

Après la conception des modèles géométriques à l'aide du logiciel SolidWorks, a été nécessaire de les analyser par simulation en élément fini dans un logiciel spécialisé - Comsol Multiphysics. L'analyse du comportement thermique es matériaux a permis d'obtenir des résultats concluants, en permettant une modélisation du flux thermique nécessaire à la stimulation thermique des échantillons avec des paramètres imposés et la modélisation du

transfert de chaleur. Par l'intermédiaire de cette méthode, les suivantes expérimentations ont pu être conduites avec succès :

- l'analyse des modifications des gradients de température qui ont permis la visualisation du réseau d'armature de l'intérieur des plaques en béton armé et des défauts internes existants dans les cylindres en matériau biocéramique ;
- la mise en évidence du profil 3D des champs thermiques résultants comme conséquence de la stimulation thermique des matériaux ;
- l'analyse des profils en sections imposées dans les matériaux analysés ;
- la mise en évidence du réseau d'armature du point de vue de l'influence de leur coefficient de conductivité de l'acier, leur diamètre et leur position dans le béton ;
- la génération des graphes de température en fonction du temps d'excitation thermique et du flux thermique ;
- la comparaison entre les méthodes de thermographie infrarouge active par transmission et par réflexion thermique.

## CONTRIBUTIONS EXPERIMENTALES A L'ANALYSE DES SYSTEMES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

L'objectif global de cette section a été l'étude expérimentale des systèmes par thermographie infrarouge active. Partant d'une étude bibliographique rigoureuse, ont été choisies et testées des méthodes d'analyse par thermographie infrarouge applicable dans des divers domaines et, ainsi, validées expérimentalement. Dans la figure 5.1 est présenté le schéma de base du principe d'analyse des systèmes par thermographie infrarouge active, le sujet principal de ce chapitre.

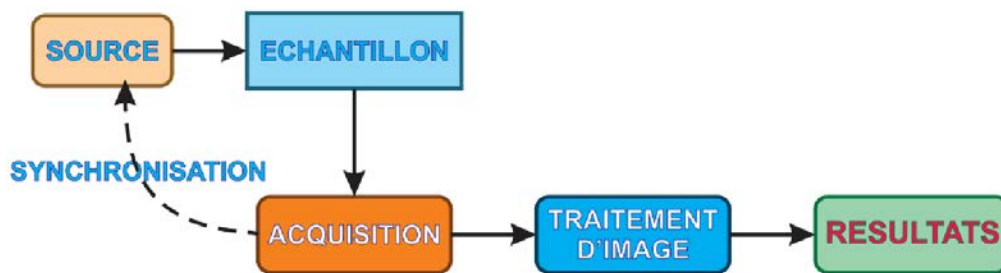


Fig. 5.1. Schéma de base du principe d'analyse des systèmes par thermographie infrarouge active.

De même, pour cette étude a été envisagé l'utilisation des plusieurs types d'excitation en vue de détecter, à travers la réponse thermique, les défaut induits dans des différents systèmes. Dans la figure 5.2 sont présentées les différentes sources d'excitation thermique utilisées dans ce chapitre pour valider les méthodes d'analyse thermographique et les différents systèmes analysés.

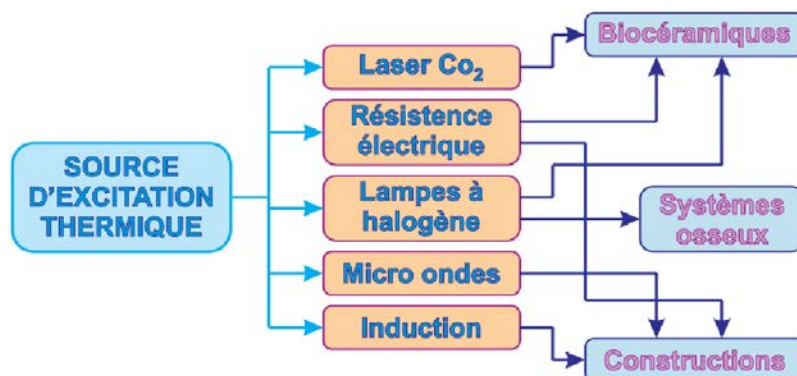


Fig. 5.2. Schéma des sources d'excitation thermique et leurs domaines d'application.

## **5.1. CONCEPTION DES EXPERIMENTATIONS POUR DETERMINER PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ACTIVE LES DEFAUTS DES MATERIAUX BIOCERAMIQUES ET DES TISSUS OSSEUX**

La conception de la partie expérimentale de l'analyse des systèmes biocéramiques a supposé une bonne connaissance des structures, de l'applicabilité des méthodes et du comportement thermique. Un autre point important a été le choix et la construction des équipements ou des dispositifs adéquats à l'accomplissement des objectifs proposés.

### **5.1.1 Objectifs des expérimentations**

Les objectifs d'une expérimentation doivent s'adresser à l'évaluation quantitative et qualitative de l'ensemble formé du phénomène étudié et des grandeurs mesurées. Les expérimentations par thermographie infrarouge sur les matériaux biocéramiques ont eu comme but principal la détection des différents types de défauts en utilisant les méthodes actives.

La notion d'analyse des systèmes par TIR (thermographie infrarouge), ses applications et ses principes de base ont été expliqués dans le deuxième chapitre de cet ouvrage.

Les objectifs établis sont basés sur le type des systèmes à analyser, les méthodes susceptibles d'être appliquées, les installations et le matériel nécessaire pour la détection des défauts, la possibilité d'interprétation des résultats, les conditions du milieu environnant nécessaires pour le déroulement les expérimentations :

- déroulement les expérimentations :
- appliquer et comparer des différentes méthodes d'analyse des systèmes en biocéramiques par thermographie infrarouge active ;
- dépister des défauts internes et de surface ;
- construire un set des routines en l'utilisation des logiciels pour obtenir des résultats correctes et concluants ;
- exciter thermique les systèmes analysés par des différentes sources thermiques et les comparer ultérieurement ;
- trouver des méthodes efficaces d'analyse, à temps réduits de mesure et compilation ;
- réaliser des échantillons dans des conditions contrôlées et induire des défauts contrôlés ;
- assurer la possibilité de développer les méthodes sur d'autre matériaux et systèmes.

Une fois établis les objectifs des expérimentations, les étapes suivantes ont été :

- concevoir l'installation expérimentale ;

- établir les conditions optimales pour le déroulement des expérimentations du point de vue du milieu ambiant, choix et emplacement du matériel etc. ;
- effectuer les tests.

### **5.1.2 Sélection des méthodes d'analyse des systèmes biocéramiques par thermographie infrarouge active**

Tenant compte des matériaux analysés, le critère principal de choix des méthodes a été leur précision et leur possibilité de fournir des résultats correctes et ensuite utilisable sans nuire à l'intégrité des systèmes testés :

- l'analyse des biocéramique par thermographie infrarouge active avec excitation thermique par impulsions fournis par un laser CO<sub>2</sub>;
- l'analyse des biocéramique par thermographie infrarouge active avec excitation thermique par une source électrique de type résistance;
- l'analyse des biocéramique par thermographie infrarouge active avec excitation thermique par impulsions fournis par des lampes photographiques à halogène.

Après le choix des méthodes d'analyse par thermographie a été nécessaire de choisir aussi, des caméras infrarouges performantes, ayant les caractéristiques correspondantes pour accomplir les objectifs visés.

Pour l'analyse des systèmes biocéramiques par thermographie infrarouge active avec laser CO<sub>2</sub>, a été choisie une caméra thermographique de grande sensibilité et qui ne se superpose pas sur le domaine infrarouge du laser CO<sub>2</sub> (10,6  $\mu\text{m}$ ) utilisé. Son domaine de mesure est compris entre 3 et 5  $\mu\text{m}$ . Pour l'analyse par thermographie infrarouge active avec lampes photographiques à halogène a été choisie une caméra thermographique performante qui a le domaine de mesure de 7,5 – 13  $\mu\text{m}$ .

### **5.1.3 Analyse des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active avec impulsions utilisant le laser CO<sub>2</sub>**

#### **5.1.3.1. Conception de l'installation expérimentale d'analyse thermographique en utilisant le laser CO<sub>2</sub>**

La partie expérimentale concernant l'analyse des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active a été réalisée à l'Université d'Artois, France, sous la

coordination du Professeur Florin Breaban, alors que l'installation expérimentale a été développée ensemble avec Dr.ing. Sam Ang Keo qui avait démontré l'applicabilité de la thermographie active dans la détection des défauts de l'armature du béton avec des fibres charbon [SamAng2013b].

L'installation expérimentale est composée des éléments suivants (fig.5.3) :

- Caméra thermographique FLIR SC 5000;
- Laser CO<sub>2</sub>;
- Système de déviation du faisceau laser ;
- Vitre de protection ;
- Trépied caméra thermographique ;
- Support pour les échantillons ;
- Système de contrôle de la caméra et d'acquisition des résultats expérimentaux ;
- Interrupteur pour le contrôle du temps d'excitation ;
- chronomètre pour le contrôle du temps d'excitation thermique des échantillons.

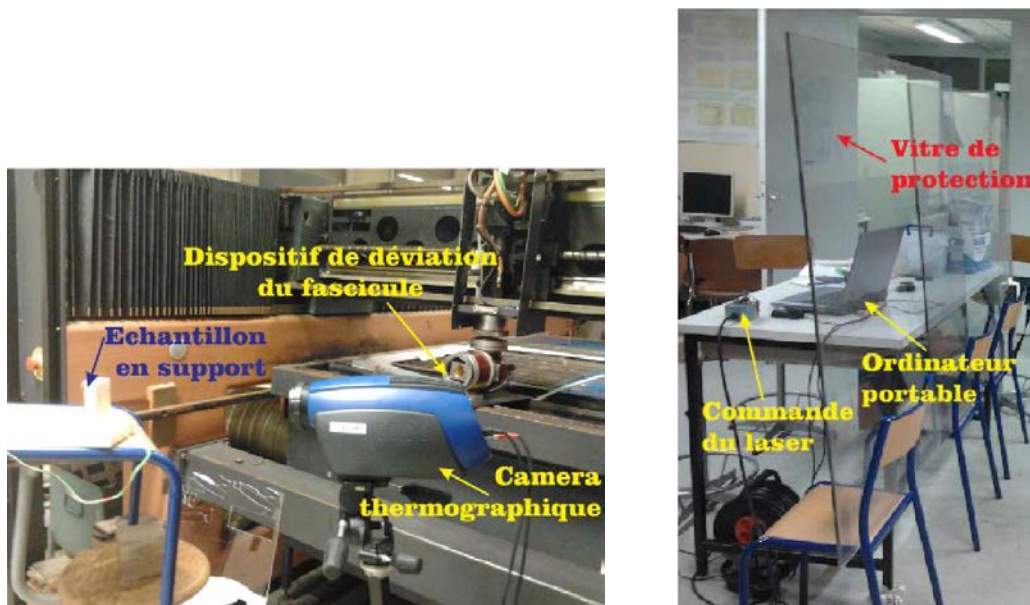
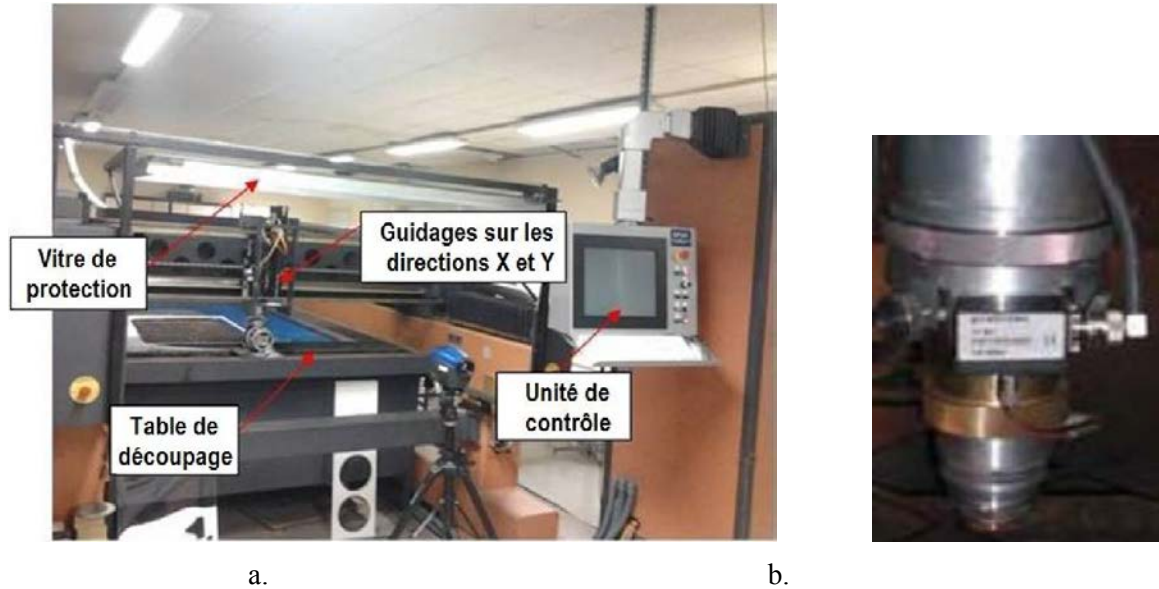


Fig. 5.3. L'installation expérimentale utilisée.

## 1. Laser CO<sub>2</sub>

Le système **laser** utilisé pour l'excitation thermique des échantillons biocéramiques contient un laser couramment utilisé pour le découpage de précision des matériaux (fig. 5.4.a). Il est accompagné par un système de commande qui agit à base des schémas CAD et offre la possibilité de découper des matériaux métalliques et non métalliques d'après des coordonnées

2D. Il est prévu d'une tête de focalisation (fig. 5.4, b) pour rendre le faisceau convergent jusqu'au diamètre de 0,20 mm. Son domaine opératif est en infrarouge, avec une longueur d'onde de 10,60  $\mu\text{m}$ .

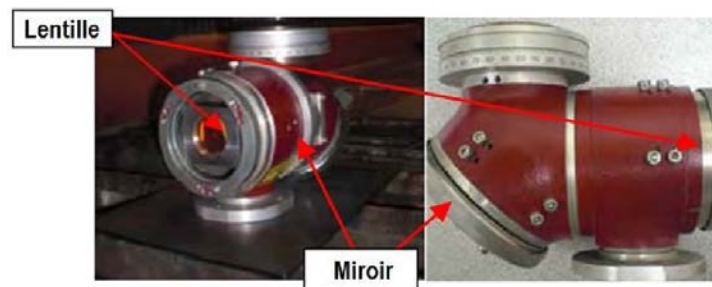


**Fig. 5.4.** Laser CO<sub>2</sub> (a); tête de découpage du laser CO<sub>2</sub> (b).

## 2. Dispositif de déviation du faisceau laser

Le laser utilisé pour l'excitation thermique des échantillons biocéramiques est destiné au découpage des matériaux et a la direction de concentration du faisceau perpendiculaire sur la table de découpage.

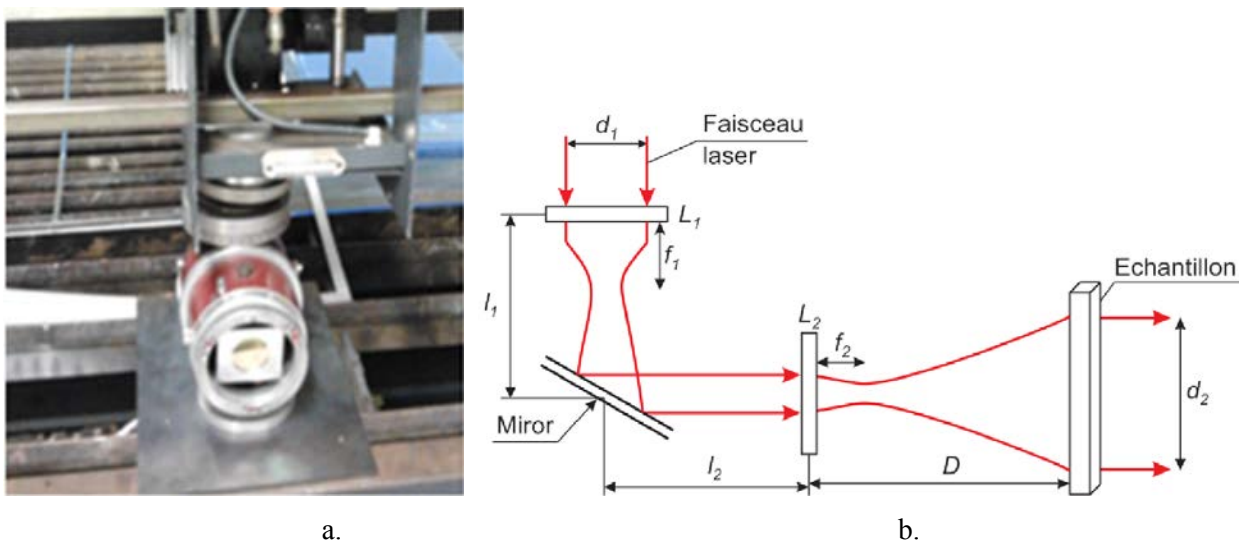
Pour pouvoir l'utiliser à l'excitation thermique des échantillons, a été nécessaire de concevoir un dispositif de déviation du faisceau laser de la direction verticale, verticale sur la table de découpage, vers la direction horizontale, parallèle à la surface de la table, c'est-à-dire, perpendiculaire sur l'échantillon testé et d'agrandir son diamètre afin de chauffer toute la surface de l'échantillon testé. [SamAng2013b]. Dans ce but a été utilisé un dispositif de déviation (fig. 5.5).



**Fig. 5.5.** Dispositif de déviation du faisceau laser.



L'utilisation de ce dispositif s'est basée sur une étude détaillée d'optique (fig. 5.6) pour trouver les paramètres idéaux d'excitation thermique. Dans ce schéma, les symboles représentent:  $d_1$  et  $d_2$  les diamètres du faisceau laser entrant dans le dispositif et, respectivement, du faisceau dans la proximité de l'échantillon,  $L_1$  et  $L_2$  sont la première et la deuxième lentille,  $l_1$  et  $l_2$  sont les distances de la première lentille au miroir et, respectivement, du miroir à la deuxième lentille,  $f_1$  et  $f_2$  sont les distances focales,  $D$  est la distance entre la deuxième lentille  $L_2$  et l'échantillon étudié. La direction du faisceau est changée par le miroir et la modification de son diamètre est réalisée par la lentille  $L_2$ .



**Fig. 5.6.** Dispositif de déviation du faisceau laser : en place sur l'équipement (a) ; schéma optique du principe de fonctionnement (b). [SamAng2013b].

Le faisceau laser transmis passe à travers la lentille  $L_1$  et est dévié par le miroir du dispositif une longueur  $l_1$ . Suivant il est dévié et passe à travers la lentille  $L_2$  et se dirige vers l'échantillon. Le rôle de la lentille  $L_2$  est de modifier par amplification le diamètre du faisceau laser de façon qu'il chauffe toute la surface de l'échantillon.

De l'analyse du schéma optique du dispositif laser (fig. 5.6), le diamètre du faisceau qui chauffe l'échantillon peut être calculé. En fonction de diamètre à chauffer, la distance nécessaire entre l'échantillon et le dispositif peut être aussi calculé :

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - 1}, \quad (5.1)$$

$$d_2 = D \cdot \frac{d_1}{f} = 0,155 \cdot D. \quad (5.2)$$

### 3. Caméra thermographique

Pour ces expérimentations, a été choisie une caméra thermographique qui opère dans un domaine d'ondes infrarouge différent de la longueur d'onde du laser CO<sub>2</sub> (10,60 μm) : FLIR SC5000 (fig. 5.7). Elle est pourvue d'un détecteur InSb 320x256 pixels qui assure une sensibilité correspondante. La fréquence des images et le temps d'intégration sont programmables, alors que d'autres caractéristiques techniques à mentionner sont :

- domaine fonctionnel en infrarouge : 2,50 μm – 5,10 μm;
- nombre des pixels : 320x256;
- intervalle de température pour un fonctionnement optimale : -20°C ... +55°C;
- fréquence d'enregistrement des images : 5Hz – 380 Hz pour la qualité maximale ;
- logiciel d'analyse et de contrôle de la caméra: ALTAIR.

La caméra thermographique bénéficie d'une interface pour la connexion à l'ordinateur, contrôlée par le logiciel spécialisé.

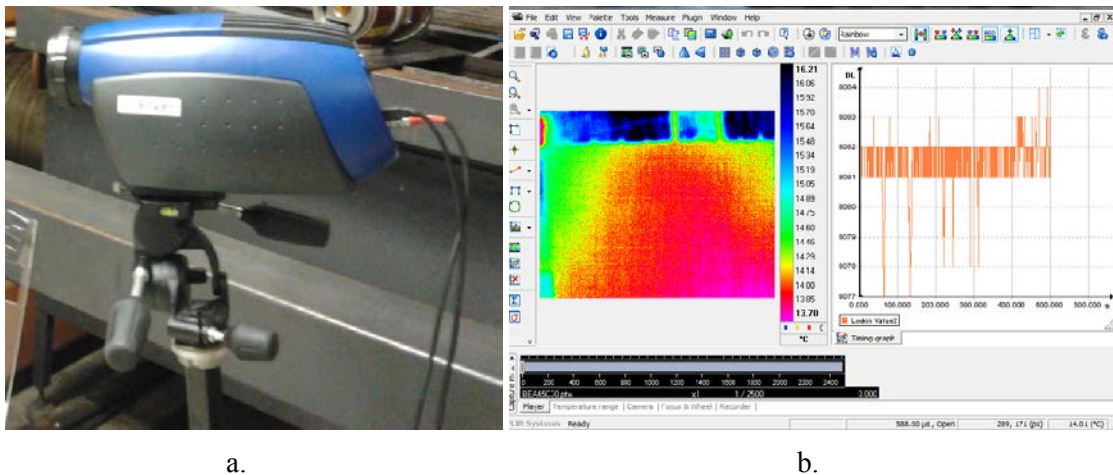


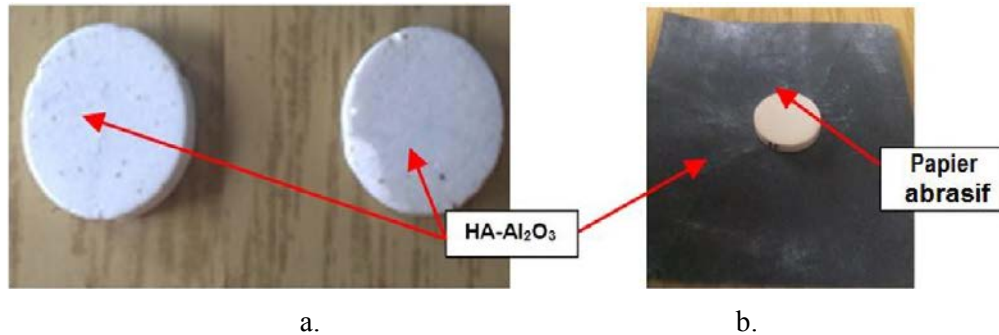
Fig. 5.7. Caméra thermographique FLIR SC5000 (a); image captée par le logiciel spécialisé ALTAIR (b).

#### 4. Echantillons en biocéramiques

Les **biocéramiques** testées étaient sous formes d'**échantillons cylindriques** en matériau biphasique – hydroxyapatite (HA) dopée avec de l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) qui est un matériau bio-inerte et qui a des propriétés mécanique et la biocompatibilité très bonnes [Ioano2012].

La substance pour la fabrication des échantillons a été obtenue par précipitation aqueuse dans un bioréacteur à doubles parois qui maintiennent la température intérieure constante. Après ce procédé a résulté une substance solide mais encore trop humide. La déshydratation complète at la purification de cette substance ont été accomplies par séchage à hautes températures. Après l'obtention de la poudre, elle a été mélangée avec de l'eau deionisée, résultant le mélange final.

Suivant, ceci a été tourné dans des moules en gypse et ainsi, résultant la forme finale des échantillons (fig. 5.8, a). Le pas suivant a assuré leur surface plane et la finition par polissage des surfaces avec du papier abrasif très fin.

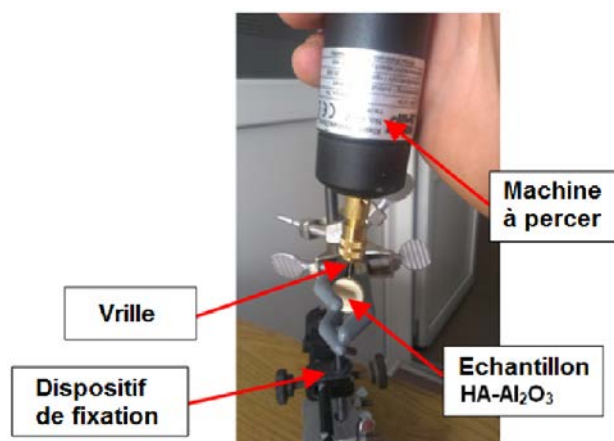


**Fig. 5.8.** Echantillons en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a); polissage des surfaces des échantillons avec du papier abrasif (b).

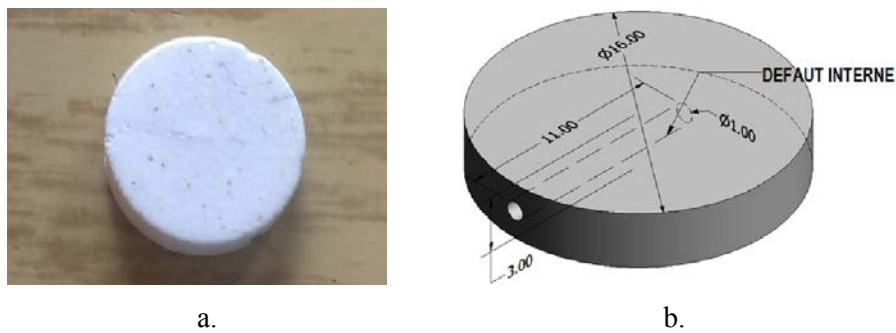
Suivant, sont présenté les échantillons de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec des défauts internes et les échantillons homogènes sans défauts et leur technologie de réalisation.

#### a) Echantillon à défaut interne

Pour le défaut interne, l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a été bien fixé dans un dispositif et percé avec une vrille (figure 5.9) de 1 mm dans un premier cas, en résultant un trou de 1 mm diamètre et une profondeur de 11 mm. Le processus de perçage a été très délicat dû à l'épaisseur mince et au matériau cassant de l'échantillon. En final ont résulté des échantillons cylindriques de 15,3 mm diamètre et une épaisseur de 3 mm et présentant un défaut intérieur en forme cylindrique de 1 mm et 11 mm profondeur (figure 5.10).



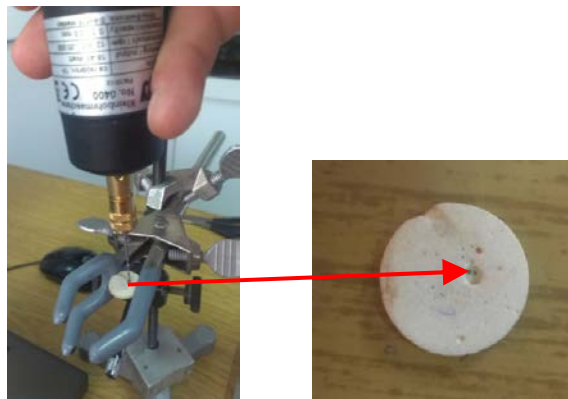
**Fig. 5.9.** Processus de réalisation du défaut interne.



**Fig. 5.10.** Image de l'échantillon en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a); dimensions de l'échantillon et du défaut interne (b).

### b) Echantillon à défaut de surface

Les **défauts de surface** ont été réalisés toujours par perçage avec la même perceuse, en résultant un défaut avec la profondeur de 1 mm et le diamètre de 1,2 mm (fig. 5.11) et, ainsi, simulant une porosité agrandie de l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Fig. 5.11.** Réalisation d'un défaut de surface sur un échantillon et le défaut résultant.

### c) Echantillon sans défaut

Pour comparer les résultats obtenus et pour pouvoir appliquer le traitement d'image en vue de détecter le défaut a été nécessaire de fabriquer un échantillon sans défaut. Pour celui ont été respecté les procédés techniques, les caractéristiques géométriques et le type de matériau présentés avant.

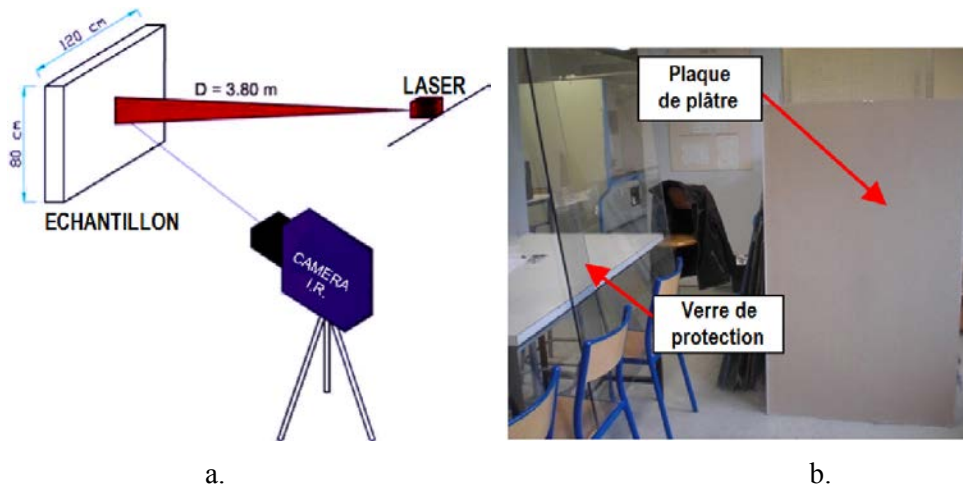
## 5. Description des expérimentations

Pour l'auscultation des échantillons en matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active avec excitation par laser CO<sub>2</sub>, ont été utilisés les matériels et les procédures décrits plus haut. Ensuite, ont été précisées les paramètres optimaux pour les essais par thermographie infrarouge en utilisant le laser à CO<sub>2</sub>, comme suivant:

### a) Vérification de l'efficacité du dispositif de déviation du faisceau laser

Avant le début des expérimentations proprement-dites, le dispositif de déviation du faisceau laser a été vérifié ensemble avec le laser afin d'obtenir une zone d'échauffement uniforme et d'une température optimale qui n'affecterait l'intégrité structurale des échantillons. Le dispositif de déviation du faisceau laser a été testé sur une plaque de plâtre de 1200x800x12 mm.

Le dispositif laser de découpage a été démonté et remplacé par le dispositif de déviation du faisceau. La plaque de plâtre placée de même côté que la caméra, à une distance de 3,80 m en face du laser. Un verre de protection placé entre la zone de travail du laser et la zone de contrôle a assuré la sécurité de l'opérateur (fig. 5.12 a et b).



**Fig. 5.12.** Schéma d'essais de l'échantillon en plâtre (a) ; protection de l'opérateur par une plaque en verre (b).

La durée de l'excitation a été établie à 25 s, en analysant la surface avec caméra thermographique. Après l'excitation thermique avec le laser CO<sub>2</sub>, l'enregistrement a continué jusqu'à 205 s en observant l'inertie thermique de l'échantillon.

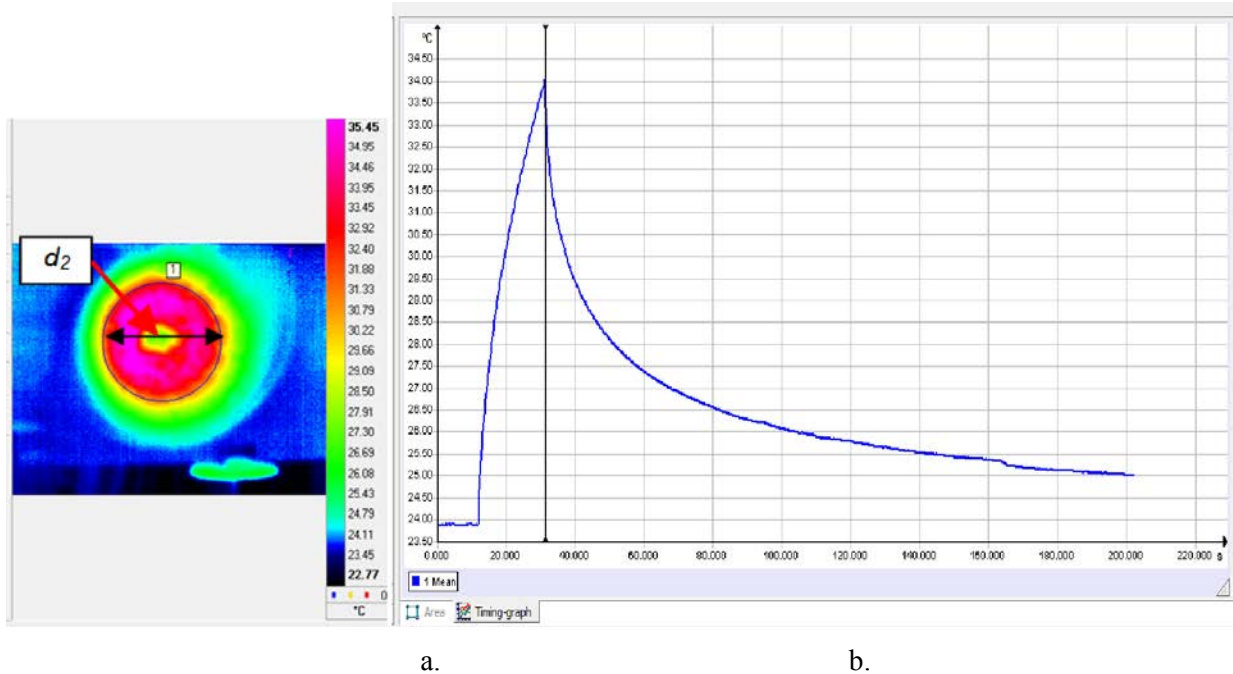
Dans la figure 5.13 est visible l'image thermographique de l'échantillon après 25 s d'échauffement et le graphique de la variation de la température moyenne dans la zone chaude, obtenus par le logiciel ALTAIR.

En utilisant les équations (5.1) et (5.2) on peut établir le diamètre de la zone chauffée comme :

$$d_2 = D \cdot \frac{d_1}{f} = 0,155 \cdot D = 0,155 \cdot 3,80 = 0,589 \text{ m.} \quad (5.3)$$

Il est visible que l'échauffement n'est pas uniforme du à la répartition spatiale du faisceau après avoir eu quitté le dispositif de déviation.

Après avoir eu testé l'efficacité du dispositif de déviation du faisceau laser et de l'utilisation du laser à CO<sub>2</sub> comme source d'excitation thermique, il est possible de passer à m'emplacement des éléments de l'installation expérimentale et des échantillons en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Fig. 5.13.** Image thermographique de la zone chauffée après 25 s (a); la variation de la température moyenne dans la zone chauffée en fonction de temps (b).

### b) L'emplacement optimal du matériel et des échantillons

En vue d'un emplacement optimal des composantes de l'installation expérimentale ont été pris en considération :

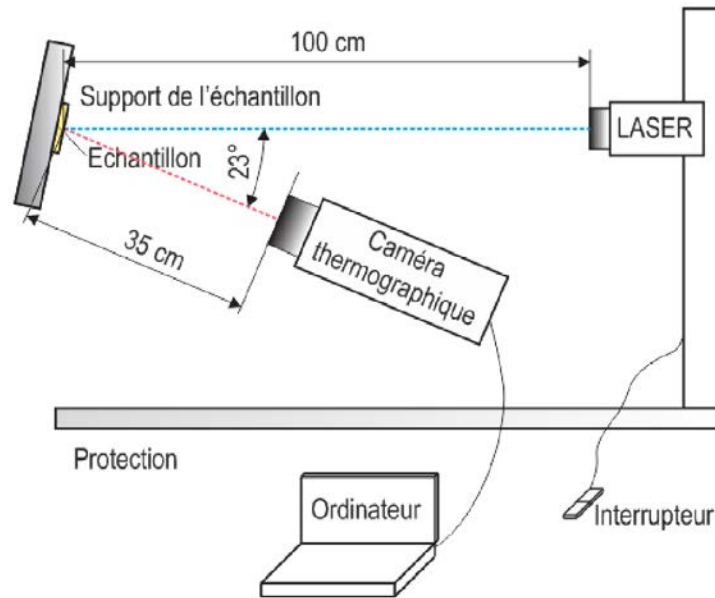
- les dimensions de l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- les performances de la caméra thermographique et les capacités de focalisation de l'image par rapport aux dimensions réduites de l'échantillon;
- l'échauffement uniforme de l'échantillon;
- la sécurité de l'opérateur;
- l'accès aux équipements et aux échantillons pendant les expérimentations.

Dans la figure 5.14 est présenté la méthode d'analyse et l'emplacement des équipements et des échantillons de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 6. Résultat de l'analyse des biocéramiques par TIR active en utilisant le laser CO<sub>2</sub>



Dans l'analyse des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active avec impulsions utilisant le laser CO<sub>2</sub> ont été utilisés trois types d'échantillons en vue de valider cette méthode : avec défaut interne, sans défaut et avec un défaut de surface. Chacun d'eux a été chauffé et analysé dans des conditions identiques, présentés plus haut.



**Fig. 5.14.** Schéma de l'analyse des systèmes biocéramique par TIR active, en utilisant un laser CO<sub>2</sub>.

Pour l'analyse des résultats ont été créés des routines de calcul pour traitement d'image et pour l'analyse de l'évolution de la température, en utilisant le logiciel Matlab 2010. Elles représentent des algorithmes qui permettent l'analyse du contraste entre les échantillons avec défaut et ceux sans défaut, l'évolution de la température en temps, dans des zones différentes sur leurs surfaces, l'obtention d'images claires etc. Les images enregistrées par la caméra thermographique ont été transformées en fichier ASCII et, sous cette forme, introduites dans l'algorithme de programmation. Suivant, les images étaient transformées en matrices 3D avec deux dimensions représentant les coordonnées sur les directions  $X$  et  $Y$  et la troisième représentant la température (sur l'axe  $Z$ ).

Ainsi, l'image est convertie en matrice de nombre représentant la température en fonction de la résolution de la caméra. À chaque température a été attribuée une couleur en fonction de sa valeur et, finalement, s'est créée une carte thermique de l'échantillon (fig.5.15).

La détection des défauts internes est basée sur la conduction thermique. Le corps chauffé va émettre de la radiation thermique à la surface par conduction thermique, le rayonnement infrarouge étant détecté par la caméra. La chaleur se propagerait différemment en fonction de la

conductivité thermique du matériau : matériau analysé et l'air inclus dans le défaut interne [Dragan2013].

En cas de présence d'un défaut, la température se distribue non uniformément sur la surface de l'échantillon dû aux différents coefficients de diffusivité thermique, dépendante de la capacité thermique du matériau, sa densité et ses dimensions.

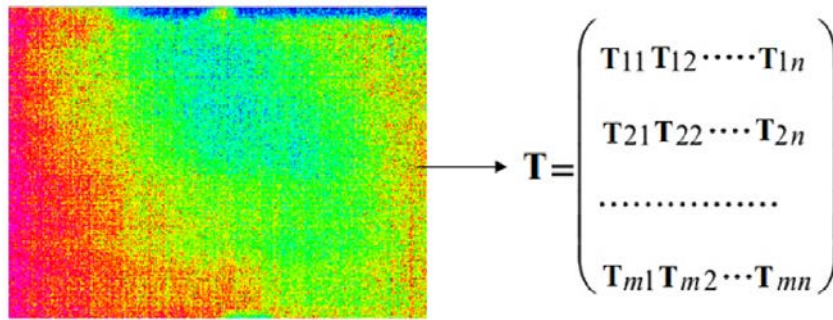


Fig. 5.15. Transformation de l'image en matrice de valeurs de température.

Le temps d'excitation thermique a été établi à 3 s, suffisant pour un échauffement uniforme, en utilisant un échantillon témoin, sans défauts pour le valider. En même temps, pour préserver l'intégrité structurale des échantillons à analyser, a été utilisé un échantillon témoin.

Dans la figure 5.16, on peut observer que l'échauffement est uniforme un moment donné, mais il n'est pas durant toute la période d'excitation thermique [Dragan2013c].

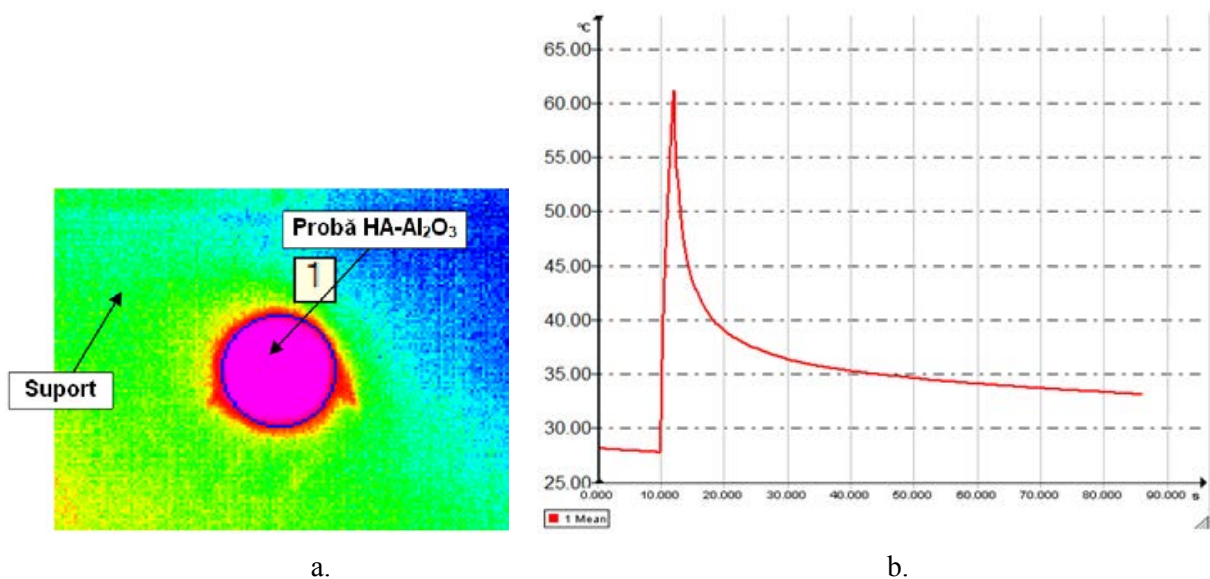


Fig. 5.16. Image thermographique de l'échantillon témoin (a) ; variation de la température moyenne par rapport au temps (b).



Après la vérification de l'applicabilité de la méthode, l'échantillon avec un défaut interne a été soumis à cette analyse. L'échantillon a les dimensions de la figure 5.10.

**a) Résultats de l'analyse par thermographie infrarouge de l'échantillon en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec défaut interne**

Dans les expérimentations ont été chauffés deux échantillons : avec et sans défaut interne, dans des conditions identiques en étant analysés simultanément avec la caméra thermographique. La méthode choisie a été celle par réflexion, l'échauffement et l'enregistrement des images thermographiques étant de même côté des échantillons.

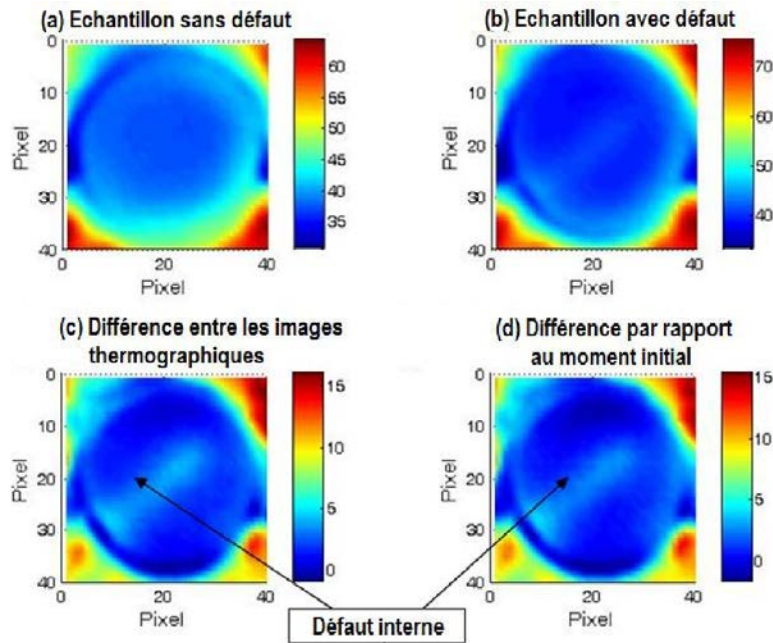
L'échauffement a été divisé en trois étapes :

- enregistrement de la température initiale (environnante) - 10 s ;
- excitation thermique des échantillons – 3s ;
- enregistrement du temps de récupération – 74 s.

Le temps résultant total d'analyse est de 87 s. Après l'excitation, la localisation du défaut s'est avérée d'être très difficile et, pour surmonter cette difficulté, a été créé un algorithme de calcul en Matlab 2010 pour déterminer le contraste entre l'échantillon de référence (sans défaut) et celui avec défaut et, respectivement, entre les températures de l'échantillon avec défaut : initiale et après l'excitation. Dans la figure 5.17 sont présentées les images thermographiques avec et sans application de la méthode du contraste.

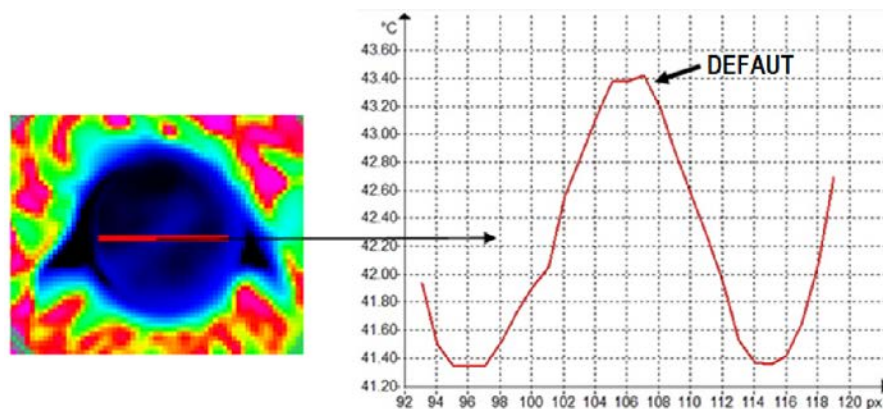
Dans la figure 5.17, a on peut observer l'image thermographique de l'échantillon sans défaut à 3 secondes après l'arrêt de l'excitation thermique. Ceci a été nécessaire pour générer le contraste et pour mettre en évidence le défaut interne qui est difficilement visible, ce qu'on peut voir dans la figure 5.17; b. dans cette figure est montrée l'image thermographique de l'échantillon à défaut interne enregistrée à 3 secondes après l'arrêt du laser. Le défaut interne est peu visible et ça a imposé d'augmenter le contraste entre les deux échantillons: avec et sans défaut.

En 5.17, c, est présentée l'image résultante de la différence entre les images thermographiques : de l'échantillon avec défaut (fig. 5.17, b) d'une côté et, de l'autre côté, de l'échantillon sans défaut (fig. 5.17, a). On peut observer que le défaut devient visible mais la réalisation des mêmes températures pour les deux échantillons au moment de l'excitation est impossible. Pour éviter cette situation a été réalisé un autre contraste basé sur la différence des images thermographiques de l'échantillon avec défaut, avant et après l'excitation et au moment de détection du défaut. Cette image est illustrée dans la figure 5.17, d.



**Fig. 5.17.** Image de l'échantillon sans défauts (a) ; image de l'échantillon avec défaut interne (b) ; le contraste entre les deux images a et b (c) ; le contraste entre les images de l'échantillon avec défaut au moment initial et après 3 s de l'arrêt du laser (d).

Si on observe le profil thermique sur la direction du défaut interne, enregistré après 3,4 secondes du moment de l'arrêt d'excitation par le laser (fig. 5.18), est évidente, dans l'intervalle compris entre 98 et 114 pixels de l'image, une différence considérable de température. Celle-ci indique clairement la présence et l'influence du défaut interne de l'échantillon d'HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

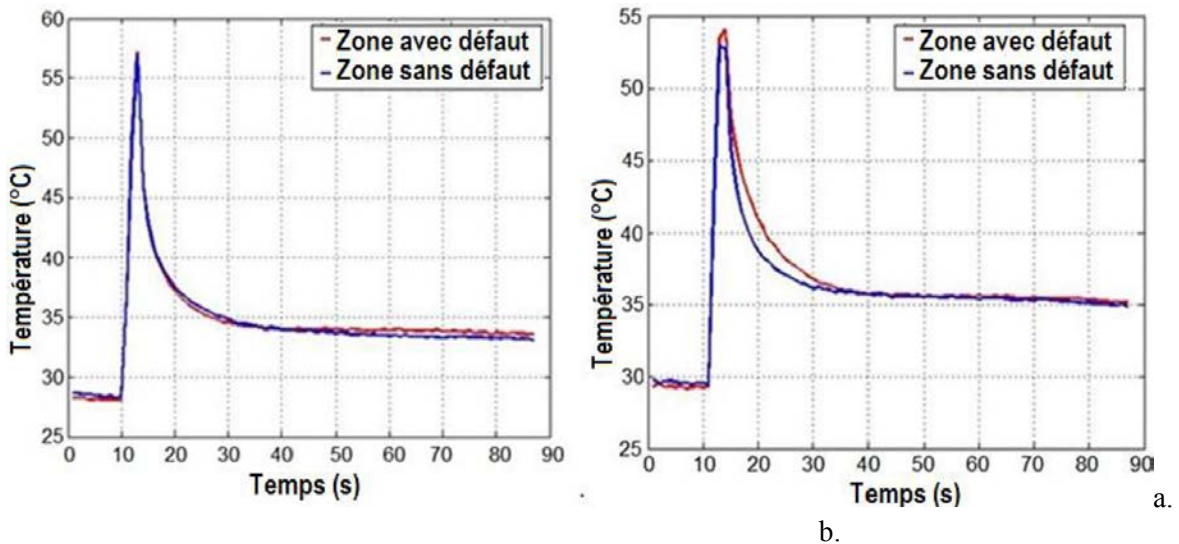


**Fig. 5.18.** Profile de température sur la direction du défaut interne dans l'échantillon d'HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Après avoir eu déterminé la zone avec défaut de l'échantillon, a été réalisé un graph de variation de la température en fonction de temps afin de visualiser les différences enregistrées entre les zones avec et sans défaut. Dans la figure 5.19 est présentée l'évolution de la

température en temps pour l'échantillon en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sans défaut (5.19, a) et avec défaut (5.19, b). Cet algorithme de calcul de l'évolution de la température entre les deux zones, pour les deux échantillons, a été créé pour étudier l'influence du défaut interne dans le processus de transfert thermique à travers les matériaux biocéramiques et pour visualiser exactement le moment d'apparition du défaut sur l'image thermographique.

Dans la figure 5.19, a (échantillon sans défaut) on observe une croissance de température du moment de démarrage du laser jusqu'au moment de son arrêt (après 3 s) de 28,42 °C à 56,81 °C, donc une augmentation de 28,39 °C de la température pendant cet intervalle de temps. Après l'arrêt de la source de chaleur, la température a diminué de 56,81 °C jusqu'à 33,43 °C. On peut observer que la différence entre les deux trajets est très mince, donc des différences de température indiquant un défaut ne sont pas enregistrées [Dragan2013c].



**Fig. 5.19.** Evolution en temps de la température de l'échantillon: sans défaut (a); avec défaut interne (b).

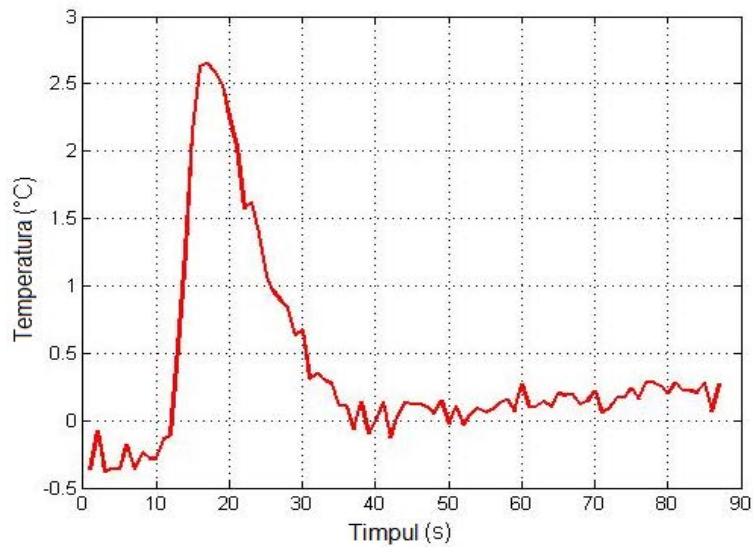
Dans la figure 5.19, b (échantillon avec défaut interne) on observe une croissance de température de 29,36°C à 54,82°C en 3 s. Après l'arrêt du laser, la température a décrie à 34,95°C jusqu'à la fin de 87 s. la ligne rouge de l'image qui représente la zone du défaut interne se modifie après l'arrêt du laser, ce qui indique le fait que le défaut est visible pendant la période de refroidissement de l'échantillon.

Ensuite, a été analysé le contraste thermique en fonction de temps entre la zone avec défaut et la zone sans défaut, les deux étant dans le même échantillon – celui avec défaut (fig. 5.19). On peut observer que dans la zone avec défaut s'enregistre une croissance maximale de température de 2,7 degrés Celsius. La mise en évidence du contrasté s'est basée sur la relation:

$$\Delta T = T_1 - T_2, \quad (5.4)$$

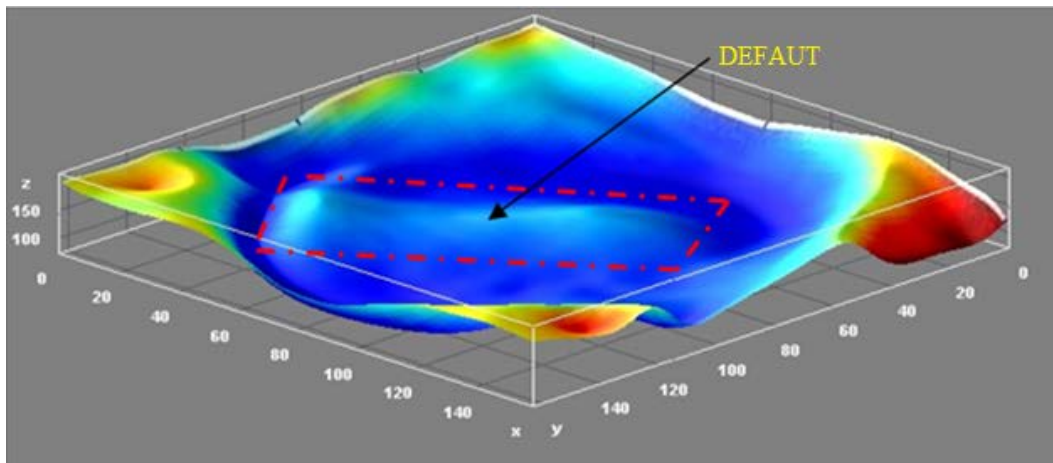
où:  $T_1$  est la température enregistrée au cours de l'expérimentation pour la zone avec défaut;  $T_2$  est la température enregistrée au cours de l'expérimentation pour la zone sans défaut et  $\Delta T$  représente le contraste thermique temporel entre les deux zones.

Le contraste thermique visible entre les zones avec défaut et sans défaut dans la figure 5.20, représente une différence de température de 2,7 degrés Celsius.



**Fig. 5.20.** Contraste thermique temporel entre la zone avec défaut et la zone sans défaut, du même échantillon avec défaut interne.

Pour rendre évidente l'influence du défaut dans l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a été créé un profil thermique de l'image thermographique, utilisant un logiciel de traitement d'image *Image J*, dans lequel à chaque couleur qui représente une température a été attribué un point de coordonnées  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  (fig. 5.21).

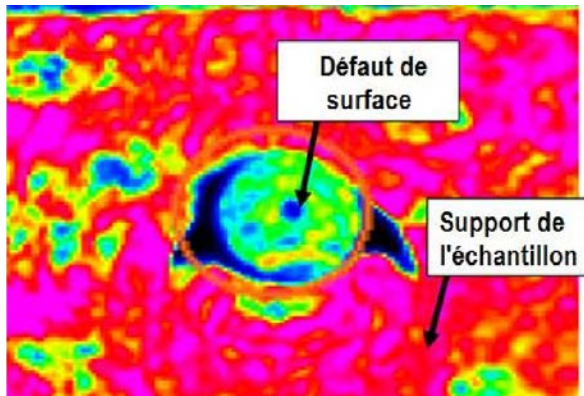


**Fig. 5.21.** Profile thermique 3D de l'échantillon avec défaut interne.

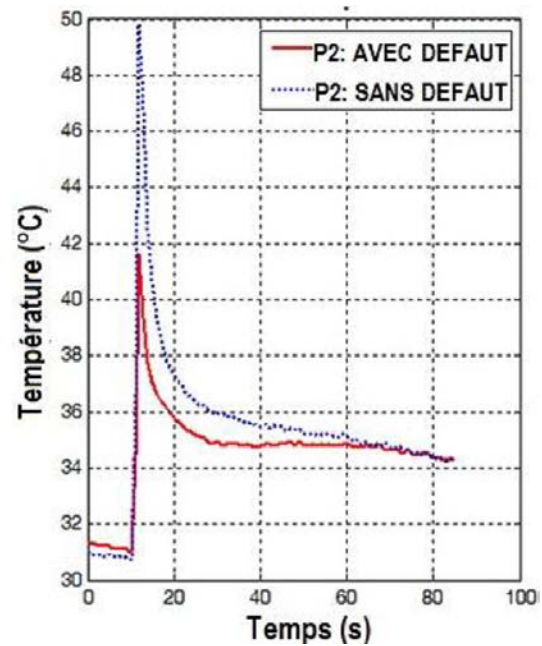
**b). Résultats de l'analyse par thermographie infrarouge de l'échantillon en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec défaut de surface**

Dans cette étape, comme dans la précédente, ont été utilisés deux échantillons: un avec défaut de surface et un autre homogène, sans défaut. Le but était d'étudier l'influence des défauts de surface dans le processus de transfert thermique dans les matériaux biocéramiques. Les propriétés, les dimensions des échantillons et des défauts de surface étaient celles mentionnées dans les sections précédentes. Le temps d'excitation thermique est aussi de 3 s, la durée totale de l'analyse des échantillons étant de 87 s.

Dans la figure 5.22 est montrée l'image de l'échantillon avec défaut de surface enregistrée à 1 s après le démarrage du laser.



**Fig. 5.22.** Image thermographique de l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec défaut de surface.

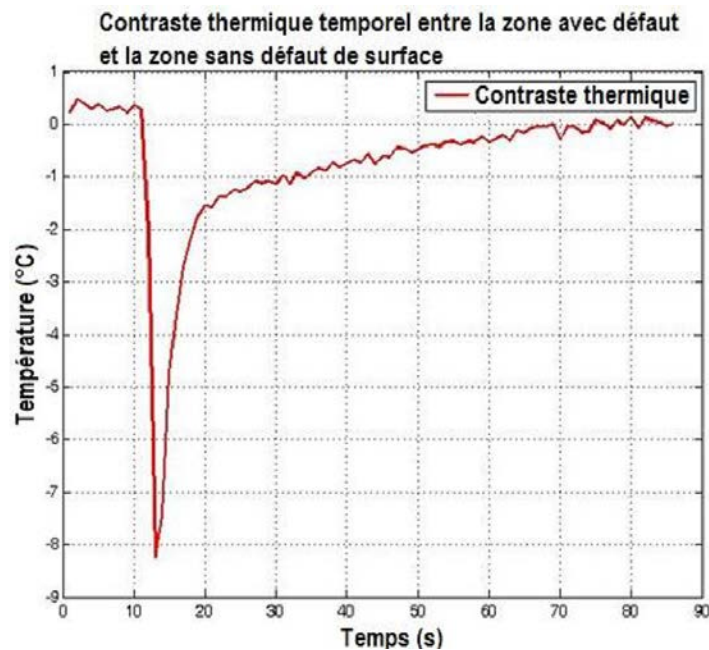


**Fig. 5.23.** Evolution en temps de la température pour l'échantillon avec défaut de surface.

L'évolution en temps de la température dans la zone avec défaut et dans la zone sans défaut se trouve dans la figure 5.23. La variation de la température dans les deux zones visées a été déterminée utilisant le logiciel Matlab 2010.

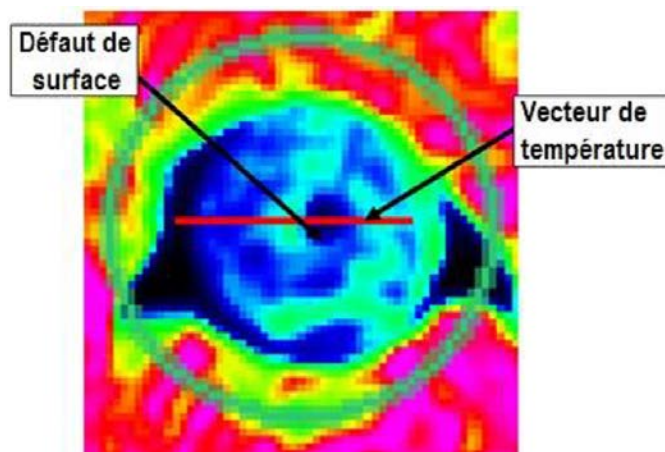
En analysant l'évolution de la température dans les deux zones : avec et sans défaut de surface (fig. 5.23), on peut observer des différences considérables de contraste entre elles. De même, le moment d'apparition du défaut durant le transfert thermique à tracers l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> peut être déterminé avec précision.





**Fig. 5.24.** Contraste thermique temporel entre les deux zones d'intérêt.

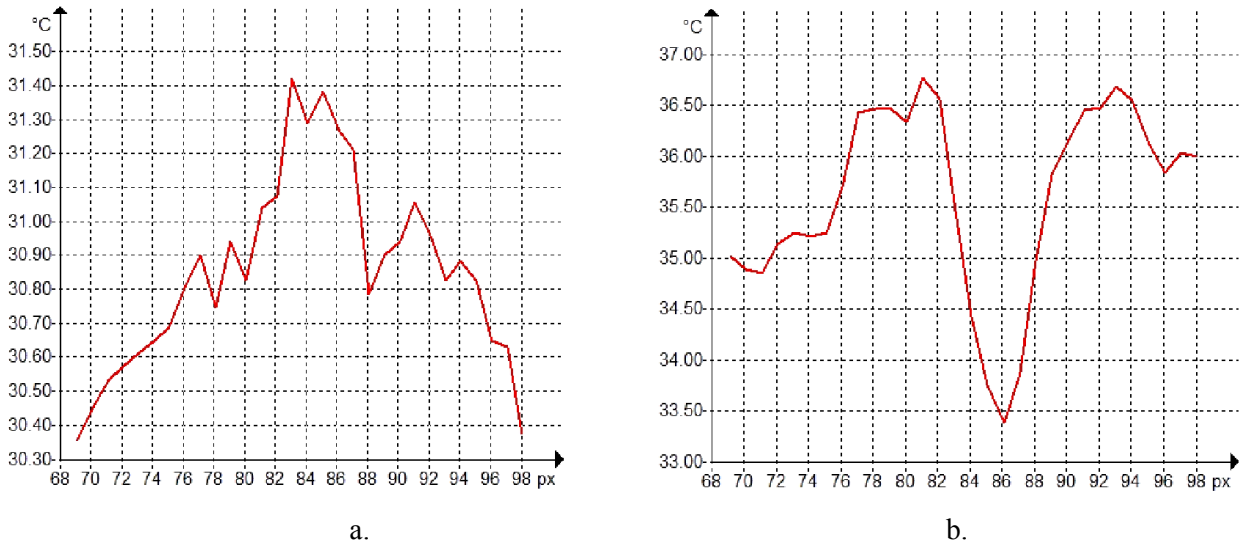
Dans la variation du contraste thermique temporel (fig. 5.24), la différence enregistrée par la caméra entre les zones avec et sans défaut démontre un phénomène inverse par rapport au cas de l'échantillon avec défaut interne : la température décroît dans la zone du défaut de surface par rapport à la zone sans défaut, alors que pour le défaut interne, elle croît par rapport à la température de la zone sans défaut.



**Fig. 5.25.** Image thermographique de l'échantillon avec défaut et le vecteur de température sur la direction du défaut.

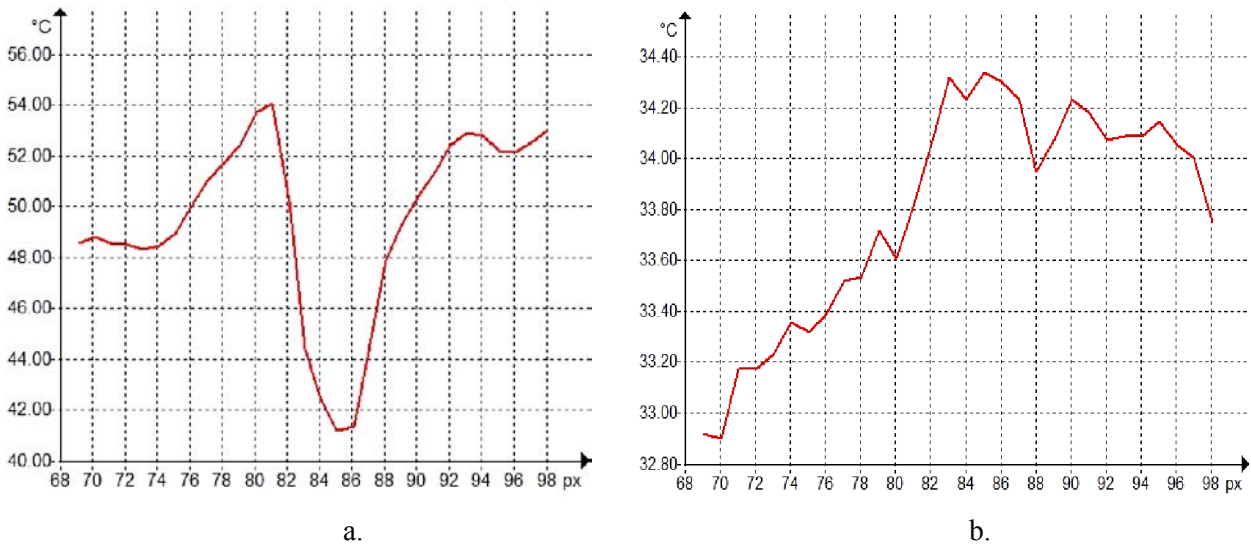
Pour une étude plus exacte de l'influence du défaut de surface les profils de température sur la ligne de la figure 5.25 a été tracé. Ont été choisies des images thermographiques de

l'échantillon avant du démarrage du laser CO<sub>2</sub>, au moment du démarrage, après 2 s d'échauffement et à la fin de la période d'analyse - après 87 s (fig. 5.26, a, b et 5.27, a, b).



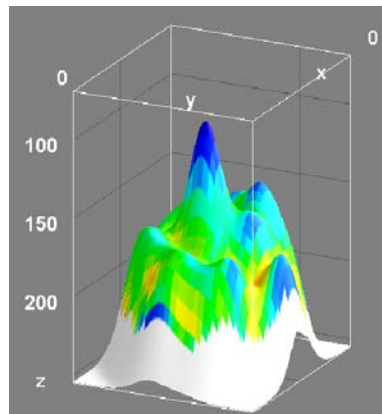
**Fig. 5.26.** Profil thermique de l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par le défaut de surface : initial (a) ; au moment de l'excitation thermique (b).

Le profil thermique de l'échantillon avec défaut de surface avant l'excitation thermique de la figure 5.26, a montré que les températures ne sont pas égales sur toute la longueur de la ligne du profil – il y a une variation entre 30,3 et 31,4°C. Après le démarrage du laser (fig. 5.25, b) les températures dans le voisinage du défaut de surface augmentent et celui-ci devient visible, entre les pixels 82 et 92.



**Fig. 5.27.** Profil thermique de l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par le défaut de surface : à 2 s après le démarrage du laser (a) ; à la fin de l'analyse - 87 s (b).

Le profile thermique de l'échantillon sur la direction du défaut à 2 s de démarrage du laser (fig. 5.27, a) permet de saisir une croissance de la température dans la zone sans défaut jusqu'à 54°C et dans la zone de défaut jusqu'à approximativement 41°C. En ce moment, l'influence du défaut de surface dans le processus de transfert thermique dans les biocéramique est la plus visible. Dans la représentation du profile thermique sur la direction du défaut de surface après la fin de l'analyse de l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (fig. 5.27, b) on observe une certaine uniformisation de la température sur la surface de l'échantillon, le défaut n'étant plus visible.



**Fig. 5.28.** Profile 3D de l'échantillon d'HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec défaut de surface.

Dans la figure 5.28 est représenté le profile 3D de l'image thermographique pour l'échantillon avec défaut de surface. On observe dans la zone du défaut une différence de température qui permet de le rendre visible.

La zone bleu foncé qui représente le défaut montre une température plus basse par rapport au reste de l'échantillon, chaque couleur occupant un point de coordonnées sur l'axe Z de l'image. Le profile a été réalisé avec le logiciel spécialisé de traitement d'image *ImageJ*.

#### **5.1.4. Analyse des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active avec excitation thermique donnée par résistance électrique**

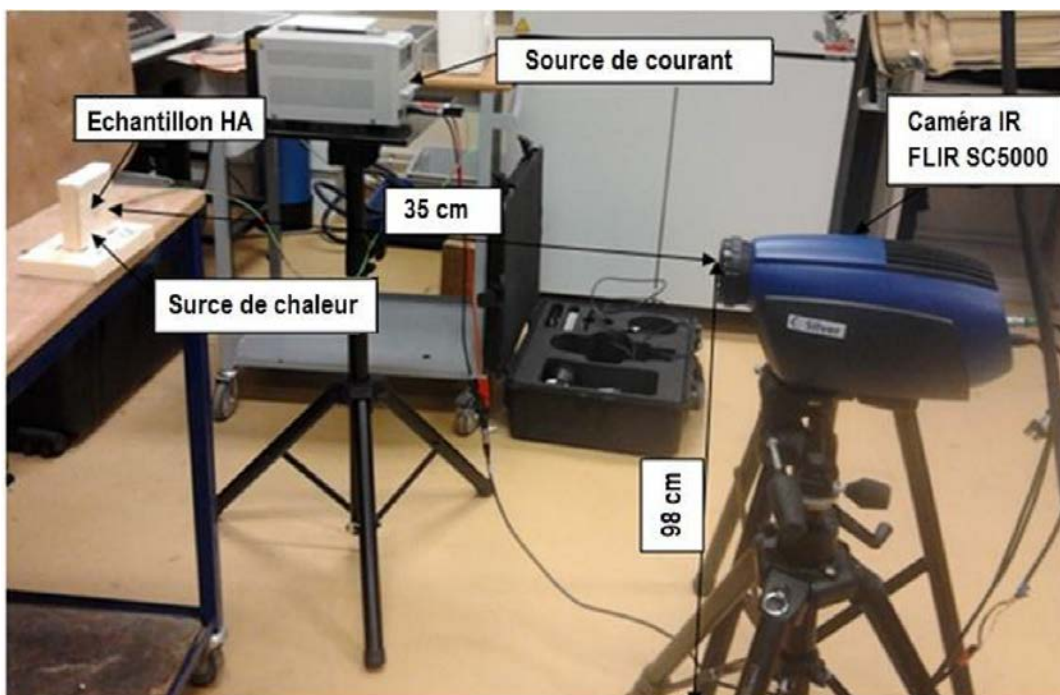
##### **5.1.4.1. Conception de l'installation expérimentale par thermographie des matériaux biocéramiques avec excitation thermique induite par une résistance électrique**

Pour accomplir les objectifs établis dans la section 5.1.1 s'est imposé l'assemblage d'une installation expérimentale qui pourrait mener à l'obtention des résultats résolvents et corrects dans la détection, du point de vue du transfert thermique, de l'influence des défauts de surface



pour les matériaux biocéramiques. L'installation expérimentale est composée des éléments (fig. 5.29) :

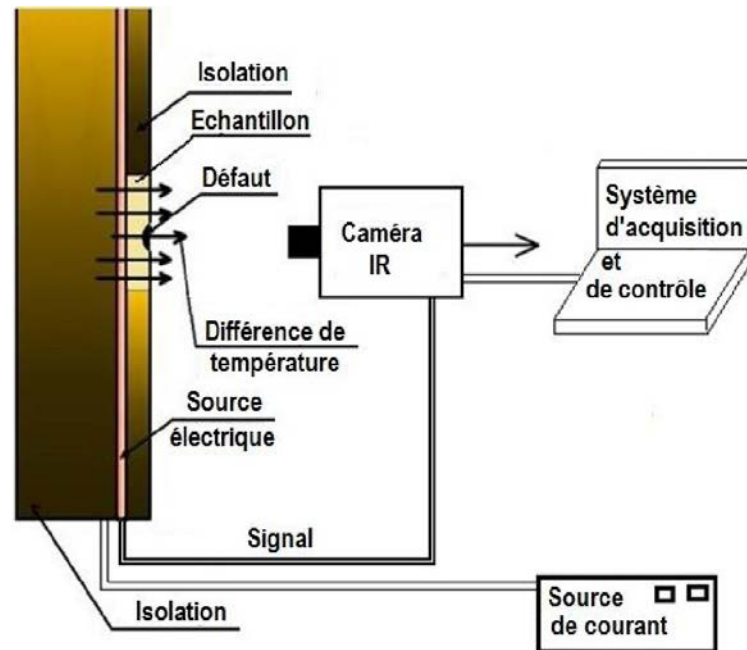
- Caméra thermographique FLIR SC 5000 ;
- Support isolateur pour les échantillons;
- Système de déviation du faisceau laser ;
- Trépied pour la caméra thermographique ;
- Système centrale d'acquisition des données et de contrôle de la caméra ;
- L'excitateur thermique – résistance électrique ;
- Source programmable de courant pour la source d'excitation thermique.



**Fig. 5.29.** L'installation expérimentale.

La méthode choisie pour l'auscultation par thermographie infrarouge avec excitation électrique des échantillons en biocéramiques a été celle par transmission qui consiste en l'échauffement des échantillons sur une côté et l'enregistrement des images de l'autre côté (fig. 5.30).

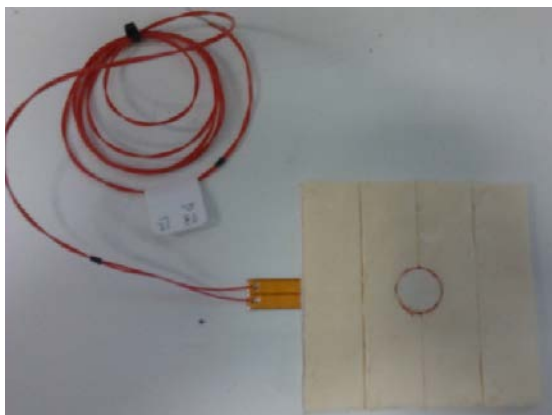
Dans la figure 5.30 on peut observer la propagation de la température différemment dans la zone du défaut, à base de la conduction thermique.



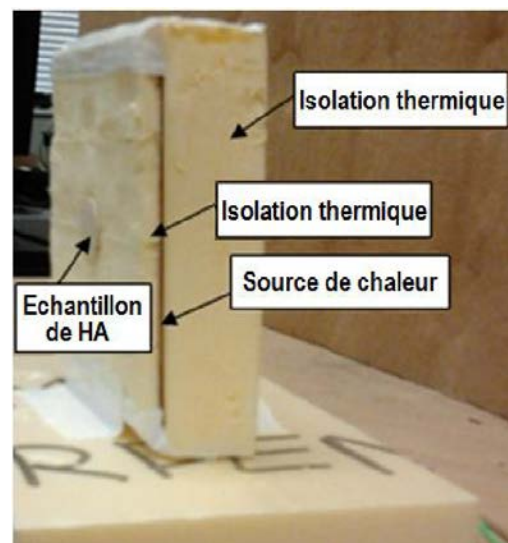
**Fig. 5.30.** Principe de la méthode d'analyse par thermographie infrarouge en transmission.

Autour de l'échantillon et derrière la résistance thermique a été fixé un matériau isolateur (polystyrène extrudé) pour isoler les côtés latéraux de l'échantillon et pour diriger le flux thermique vers celui-ci. La résistance est alimentée par une source programmable de courant qui est aussi connectée à la caméra qui est pourvue d'une entrée Lock-in pour l'analyse du signal électrique transmis vers la caméra. A son tour, la caméra est connectée à un ordinateur portable ayant installé un logiciel d'analyse des images thermographiques et de contrôle de la caméra.

### 1. Source d'excitation thermique des échantillons en biocéramiques



a.



b.

**Fig. 5.31.** Résistance électrique, source de chaleur (a) et le système d'excitation thermique (b).

La **source d'excitation thermique** des échantillons de HA est constituée par une résistance électrique plane (fig. 5.31, a) qui répond à la nécessité de chauffer uniformément, alors que les pertes de chaleur sont évitées par leur isolation et l'isolation de la source de chaleur. Derrière la résistance a été collée une couche de polystyrène épaisse de 3 cm et sur la face antérieure, une couche mince de polystyrène épaisse de 5 cm, suffisante pour englober l'échantillon testé (fig. 5.31, b).

## 2. Source de courant

Pour échauffer les échantillons avec la résistance électrique, a été nécessaire d'utiliser une source de courant GW InsteK GPC – 3030D (fig. 5.31) fournissant à la sortie  $0 \div 3$  A et  $0 \div 30$  V.



**Fig. 5.32.** Source de courant GW InsteK GPC – 3030D.

L'appareil présente trois canaux de sortie ; le canal 1 et le canal 2 sont ajustable alors que le canal 3 est fixé à 5V/3A. Il a aussi un système de protection à la surcharge et au polarité inverse en cas d'utilisation défectueuse. Il a été utile pour les expérimentations parce que il a permis la connexion de la caméra thermographique aux canaux de sortie en vue d'enregistrement du signal et du temps exacte d'excitation thermique.

L'intensité et la tension du courant ont été calculées en fonction du flux thermique nécessaire pour échauffer les échantillons de HA; la relation de base étant la suivante:

$$Q = \frac{R \cdot I^2}{S} \quad [\text{W/m}^2], \quad (5.5)$$

où:  $Q$  est le flux de chaleur exprimé en  $\text{W/m}^2$ ;  $R$  est la résistance du circuit électrique exprimée en Ohm;  $I$  représente le courant [A] et  $S$  - la surface, en  $\text{m}^2$ .

Pour induire un flux thermique puissant et appliquer un choc thermique sur l'échantillon, a été considéré un flux thermique de  $500 \text{ W/m}^2$  d'où a résultée une tension électrique  $U=9,3$  V et un courant  $I=0,342$  A.

### 3. Caméra thermographique

Pour l'application qu'on présente dans cette section, a été utilisée une caméra thermographique FLIR SC 5000 dont les caractéristiques techniques ont été décrites dans la section précédente. Une caractéristique importante qui l'a recommandée a été la possibilité de connecter le signal électrique généré par la source et, ainsi, offrant des informations sur la durée des impulsions électriques appliqués aux échantillons.

### 4. Echantillons de HA

La technologie de fabrication des échantillons de HA a été décrite au début du chapitre ; pour cette application étant fabriqués des échantillons en HA sans alumine, avec l'épaisseur de 3 mm et le diamètre de 15,3 mm. Ont été réalisés deux types d'échantillons : un sans défaut et un autre avec un défaut de surface en simulant ainsi une grande porosité. Leurs surfaces ont été bien nettoyées et polies afin d'obtenir des surfaces sans porosités démesurées et sans autres défauts de surfaces dus à la fabrication. Le défaut provoqué a une profondeur de 1 mm et un diamètre de 1,2 mm.

#### 5.1.4.2. Résultats de l'analyse par thermographie infrarouge de l'échantillon en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec défaut surface en utilisant une source électrique pour l'excitation thermique

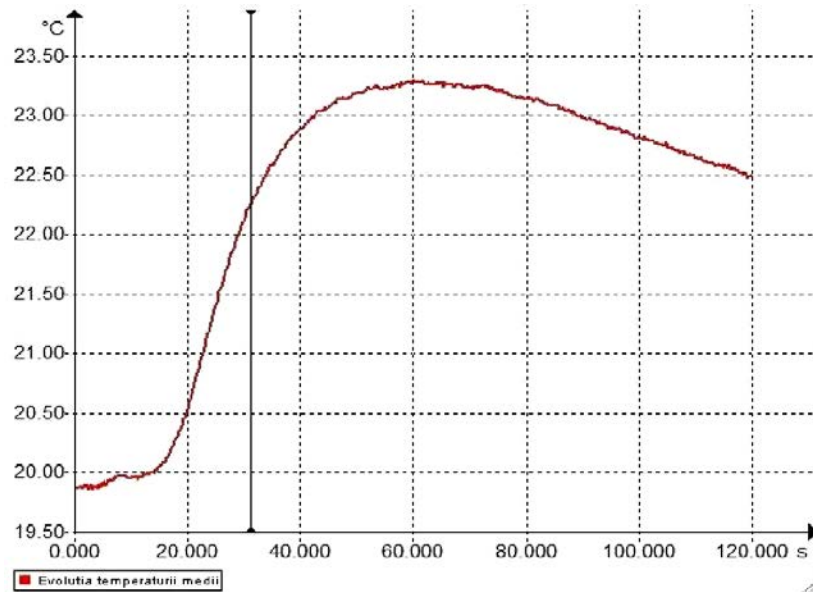
Les deux échantillons en biocéramique ont été chauffés pendant 10 s, après 3,8 s étant possible déjà l'observation, avec la caméra thermographique, des changements de température sur leurs surfaces, suffisantes pour rendre évidente la zone du défaut. La caméra est connectée à une source de courant pour pouvoir établir l'amplitude et la période du signal, nécessaires pour déterminer le temps exact d'excitation thermique des échantillons.

Si  $T_1 = 19,72^\circ\text{C}$  est la température initiale au moment  $t = 0$  s et  $T_2 = 20,37^\circ\text{C}$  est la température initiale au moment  $t = 3,8$  s, après le démarrage de la source, au moment où le défaut devient visible :

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 0,65^\circ\text{C} . \quad (5.6)$$

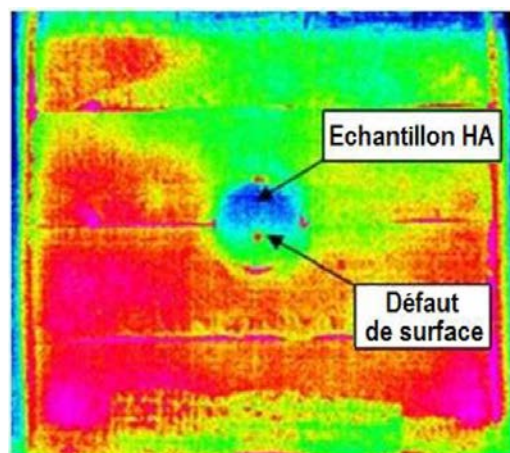
Il en résulte que la différence de température nécessaire détecter le défaut est de seulement  $0,65^\circ\text{C}$ .

Dans la figure 5.33 est montrée l'évolution, de la température moyenne sur la surface de l'échantillon pendant toute la durée de l'échauffement et du refroidissement : on observe une croissance et un revenu de la température linéaire sur sa surface.



**Fig. 5.33.** Evolution en temps de la température moyenne sur la surface de l'échantillon.

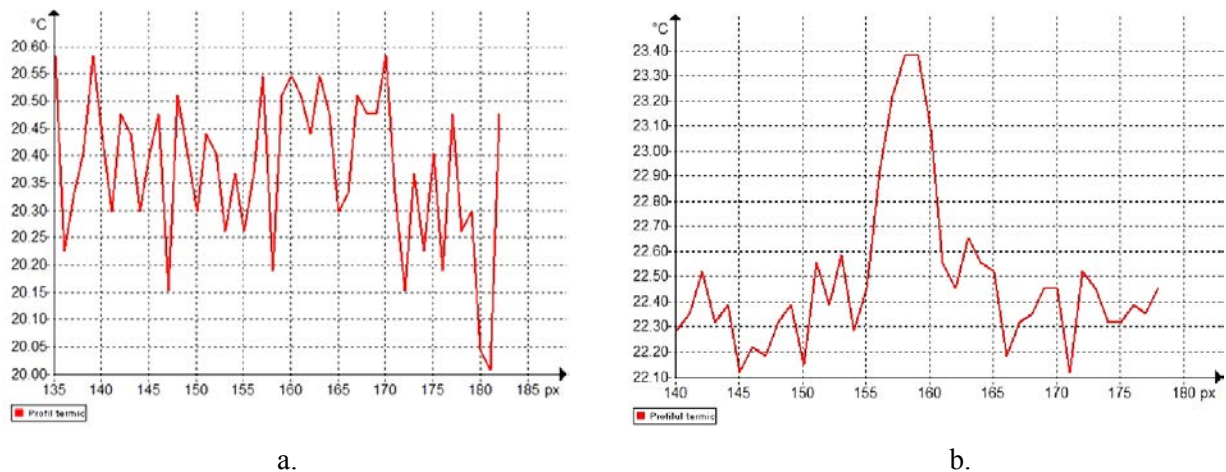
Dans la figure 5.34 est présentée l'image thermographique enregistrée au  $t = 3,8$  s après le démarrage de la source d'excitation thermique. On peut observer clairement l'apparition d'une différence de température qui représente le défaut sur la surface de l'échantillon.



**Fig. 5.34.** Image thermographique de l'échantillon avec défaut au  $t=3,8$  s après le démarrage de la source d'excitation thermique.

L'influence du défaut du point de vue du transfert thermique par l'échantillon HA est au mieux mise en évidence par le profil thermique en fonction du nombre des valeurs de température (pixels) enregistré par la caméra thermographique sur la direction du défaut. Le profil tracé est au  $t = 3,8$  s après le démarrage de la source de chaleur dans la variante sans défaut (fig. 5.35, a) et la variante avec défaut (fig. 5.35, b).

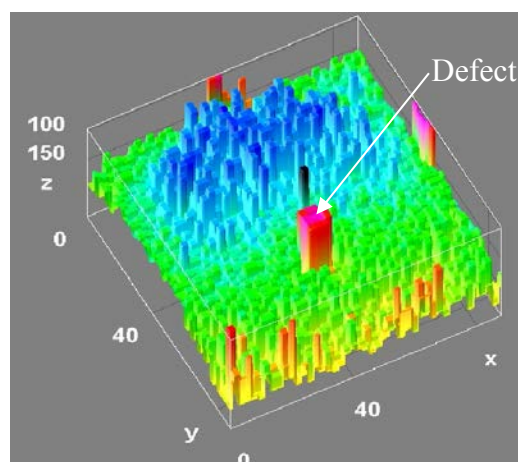




**Fig. 5.35.** Profil thermique sur la direction du défaut de l'échantillon: sans défaut (a); avec défaut (b).

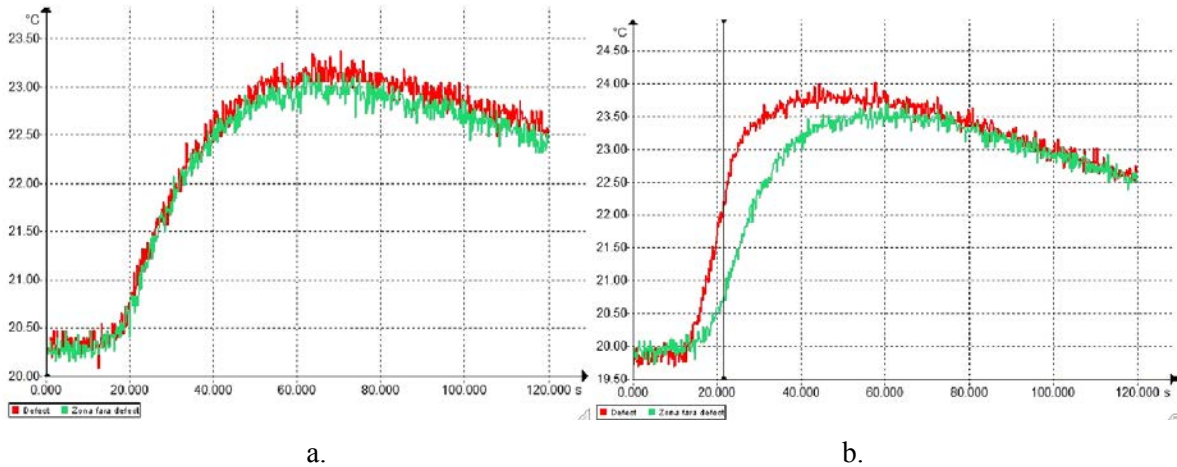
Le changement de la distribution de température (fig. 5.35, b) est dû à l'influence du défaut dans la zone avec défaut de la surface de l'échantillon, où l'épaisseur diminue de 3 mm à 2 mm. Comme on utilise une méthode de transmission et le défaut est en surface, le échauffement étant fait de derrière vers l'avant, la température dans la zone du défaut augmente.

La zone avec défaut peut être aussi illustrée par un profil 3D (fig. 5.36) de l'échantillon au  $t = 3,8$  s dans lequel à chaque pixel de l'image est attribué un point de coordonnées spatiales.



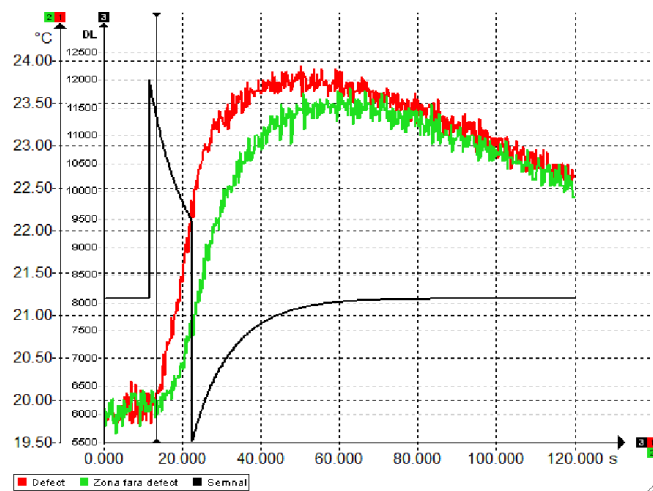
**Fig. 5.36.** Profil 3D de l'échantillon avec défaut au  $t = 3,8$  s.

Des images thermographiques on peut voir la zone avec défaut et le moment où celui-ci devient visible mais on ne peut pas saisir exactement le moment où il commence à influencer le champ de température. C'est pour ça qu'il a été nécessaire de représenter l'évolution de la température dans les deux zones : avec et sans défaut en fonction de temps (fig. 5.37, a et b).



**Fig. 5.37.** Evolution de la température en fonction du temps d'analyse dans la zone du défaut (ligne rouge) et dans la zone sans défaut (ligne verte) de l'échantillon sans défaut (a) ; évolution de la température en fonction du temps d'analyse dans la zone du défaut (ligne rouge) et dans la zone sans défaut (ligne verte) de l'échantillon avec défaut (a).

En figure 5.37, a, on peut observer l'évolution de la température en fonction de temps dans la zone correspondant à la position du défaut et dans la zone sans défaut. Les deux courbes sont rapprochées et les valeurs n'indiquent pas la présence d'une influence thermique majeure, alors que dans la figure 5.37, b on observe, par la différence entre les deux courbes, le transfert thermique non uniforme dans l'échantillon de HA.



**Fig. 5.38.** Evolution par rapport au temps d'analyse de la température dans la zone avec défaut et le signal électrique enregistré par la caméra thermographique.

Pour détecter exactement le moment où la température est modifiée dans la zone avec défaut, a été nécessaire d'étudier l'évolution par rapport au temps d'analyse de la température et le temps d'excitation thermique, visible par son enregistrement (fig. 5.38).

De la figure 5.39 on observe que l'excitation thermique commence après 11 s du démarrage de la caméra thermographique et fini après autres 10 s. Le défaut est visible après 3,8 s du démarrage de la source. On peut affirmer que la température commence à se modifier dans la zone du défaut au  $t=2,2$  s après le démarrage de la source de chaleur.

La différence de température entre les zones avec et sans défaut est mise en évidence par un contraste thermique temporel (fig. 5.39).

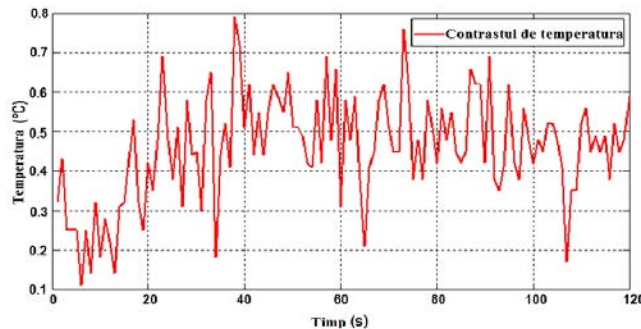


Fig. 5.39. Contraste thermique temporel entre les zones avec et sans défaut.

## 5.1.5 Analyse des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active à impulsions

### 5.1.5.1. Conception de l'installation expérimentale d'analyse des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active à impulsions

Dans cette partie expérimentale, on a envisagé la détection des défauts dans les biocéramiques par thermographie infrarouge à impulsions. Dans ce but, il a été nécessaire de fournir des échantillons avec des défauts contrôlés ayant des diamètres et des longueurs déterminées, connus, le choix d'une source capable de produire des différences thermiques détectable par la caméra thermographique ayant une grande sensibilité et la conception d'un générateur des signaux pour le contrôle de la source d'excitation thermique et le « bombardement » des échantillons avec des impulsions thermiques.

L'installation expérimentale est composée par (fig. 5.40) :

- Caméra thermographique *FLIR ThermaCam S45*;
- Support isolateur pour les échantillons;
- Trépied pour la caméra ;
- Système centrale d'acquisition des données et de contrôle de la caméra thermographique ;



- Système d'excitation thermique constitué par deux lampes photographiques à halogène *Kaiser Videolight 6* ;
- Générateur d'impulsions.



Fig. 5.40. L'installation expérimentale.

### 1. Caméra thermographique FLIR *ThermaCam S45*

La caméra utilisée dans ces expérimentations est de grande précision de type **FLIR Systems**, modèle *ThermaCam S45* (fig. 5.41) :

- avec une résolution 320×240 pixels ;
- focus automatique et normale ;
- intervalle de mesure de la température – 40°C ÷ 2000°C ;
- précision de ±2°C.

Elle permet le contrôle, l'analyse et l'enregistrement des images par l'interface PC et le logiciel *ThermaCam Researcher Pro*, aussi produit par **FLIR Systems**.



Fig. 5.41. Caméra thermographique FLIR *ThermaCam S45*.

## 2. Système d'excitation thermique des échantillons

L'excitation des échantillons est réalisée par sollicitation de leurs surfaces avec des impulsions thermiques. Pour obtenir des résultats concluants a été nécessaire de réaliser un **générateur des signaux** et de le connecter à deux lampes photographiques *Kaiser Videolight 6* à halogène (fig. 5.43), ayant chacune un pouvoir de 1000 W, un système de refroidissement (ventilateur) et un système de protection à la surchauffe (thermostat). Pour diriger les impulsions thermiques, les lampes sont munies de quatre volets (barndoors).

Pour le contrôle des lampes flash était nécessaire un **générateur d'impulsions** (fig. 5.44) constitué d'un microcontrôleur qui dirige un relais de 12 V ayant la possibilité de régler la fréquence des signaux et des intervalles, en transmettant des signaux électrique vers un relais de 220 V, connecté avec les lampes flash à halogène.



Fig. 5.42. Lampes à halogène *Kaiser Videolight 6* pour l'excitation thermique.

La fréquence maximale pour le générateur est de 6 impulsions par seconde, de forme représentée dans la figure 5.45, enregistrée par un oscilloscope Agilent Technologies.

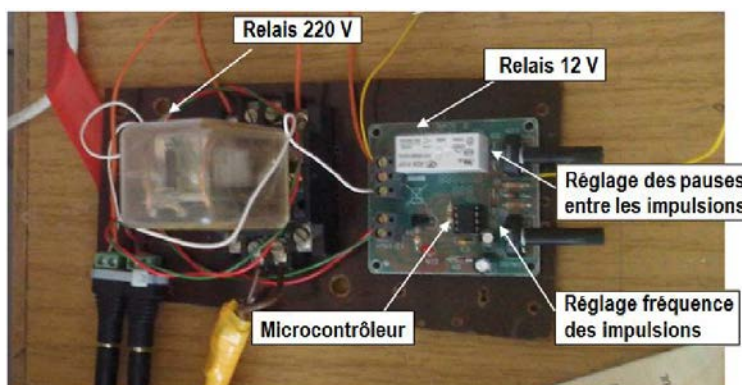


Fig. 5.43. Générateur d'impulsions.

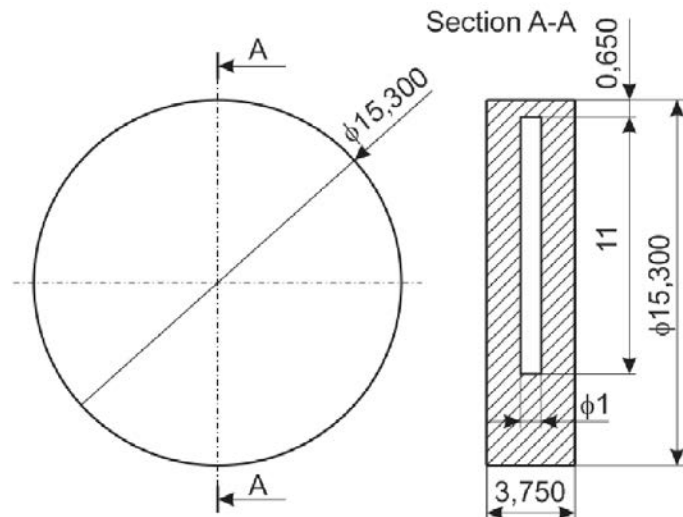


Fig. 5.44. Forme du signal électrique enregistré avec l'oscilloscope.

En comparant la caméra thermographique FLIR S5000 qui avait la possibilité de connecter la source de courant et d'enregistrer le signal électrique simultanément avec la distribution de température, la caméra thermographique utilisée dans cette expérimentation, FLIR ThermaCam S545 n'a pas cette option et, pour ça, a été nécessaire d'enregistrer le signal avec un oscilloscope pour l'établissement de la période et de l'amplitude.

### 3. Echantillons en matériau biocéramique

Les **échantillons** analyses dans ces expérimentations sont d'un matériau diphasiques, compose de hydroxyapatite (HA) dopée avec alumine P( $Al_2O_3$ ), réalisées par le même procédé technologique et dans lesquels ont été pratiqués des défauts internes ayant le pour assurer le contraste thermique (fig. 5.45).



**Fig. 5.45.** Schéma de l'échantillon ayant un défaut interne en diamètre  $\varnothing = 1$  mm.

#### 5.1.5.2. Résultats de l'analyse par thermographie infrarouge de l'échantillon de HA- $Al_2O_3$ par thermographie à impulsions

Pour détecter les défauts des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge avec impulsions en utilisant des lampes à halogène pour l'excitation thermique, la méthode par réflexion a été adoptée.

La caméra est placée sur un trépied sur la direction normale de l'échantillon, à une distance de 40 cm de celui-ci et à une hauteur par rapport au sol de 97,5 cm. Les lampes photographiques ont été placées de même côté de l'échantillon en formant un angle avec la direction normale de  $31^\circ$  et à une distance de 47 cm par rapport à l'échantillon (fig. 5.45). Le schéma de l'installation expérimentale est illustré dans la figure 5.46. Trois types de défauts ont été étudiés : deux

internes avec des couvertures différentes et un de surface. La méthode de réalisation des défauts est restée la même comme pour les expérimentations précédentes mais, cette fois, a été obtenu un défaut interne, placé asymétrique dans l'intérieur de l'échantillon, dans le but d'étudier un cas intermédiaire entre les défauts précédents internes et ceux de surface.

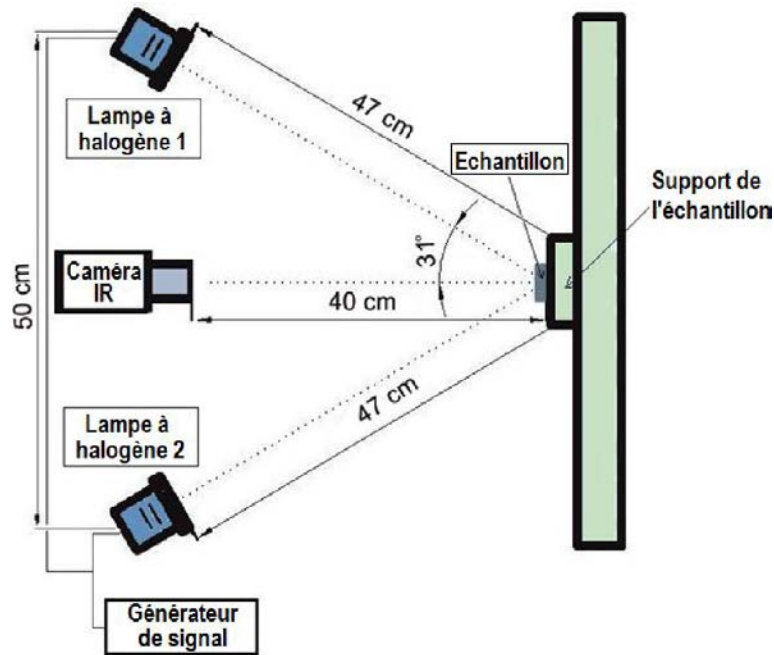


Fig. 5.46. Schéma de l'installation expérimentale.

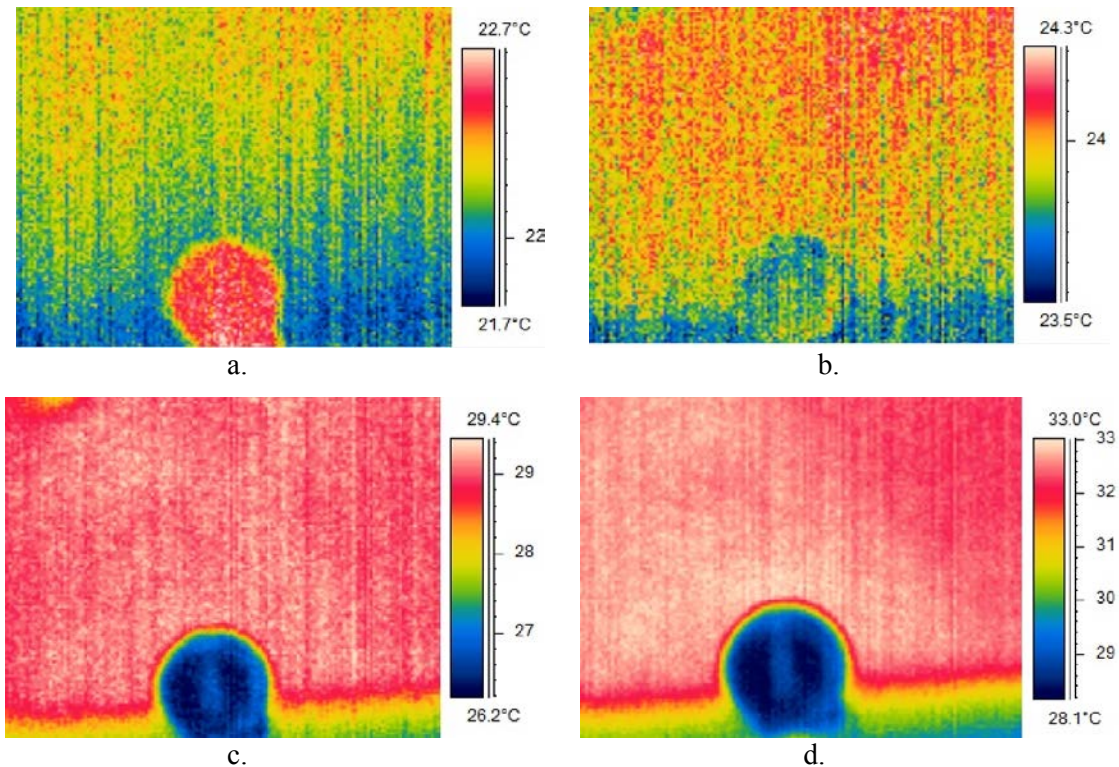
Chaque échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a été bombardé avec des impulsions produits par le générateur d'impulsions et ensuite transmis thermiquement par l'intermédiaire des lampes à halogène. Pour détecter le champ de température des échantillons et la détection des défauts ont été utilisées des fréquences différentes des impulsions : 0,5 Hz, 1 Hz, 3Hz et 6Hz. Ainsi, a été favorisée l'analyse des résultats dans des conditions différentes de bombardement avec des impulsions thermiques des échantillons testés [Dragan2014b].

## A. Résultats de l'analyse par thermographie infrarouge de l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à une fréquence de 3 Hz

### A.1. Résultats de la détection des défauts internes couverts d'une épaisseur de 1,5 mm

L'échantillon soumis à l'analyse avait un défaut interne de 1 mm en diamètre et une longueur de 11 mm. La distance entre la surface étudiée de l'échantillon et le défaut (couverture) est égale à 1,5 mm. L'échantillon a reçu des impulsions thermiques pendant 40 s, avec un temps d'observation avant le démarrage de la source de 4 s et un temps d'analyse sur la zone de refroidissement de 20 s. Les images ont été enregistrées par la caméra FLIR ThermoCam S45 et analysées par le logiciel

FLIR ThermaCam Researcher Pro 2.1. La caméra est contrôlée par l'ordinateur auquel elle est connectée via le slot FireWire et réglée à une vitesse d'enregistrement de 3Hz, égale à la vitesse de bombardement thermique des échantillons. Dans la figure 5.47 sont présentées les cartes thermiques enregistrées à différents moments: à la température initiale, après 3 s, 9 s après le démarrage de la source et 16 s quand le défaut est parfaitement visible.

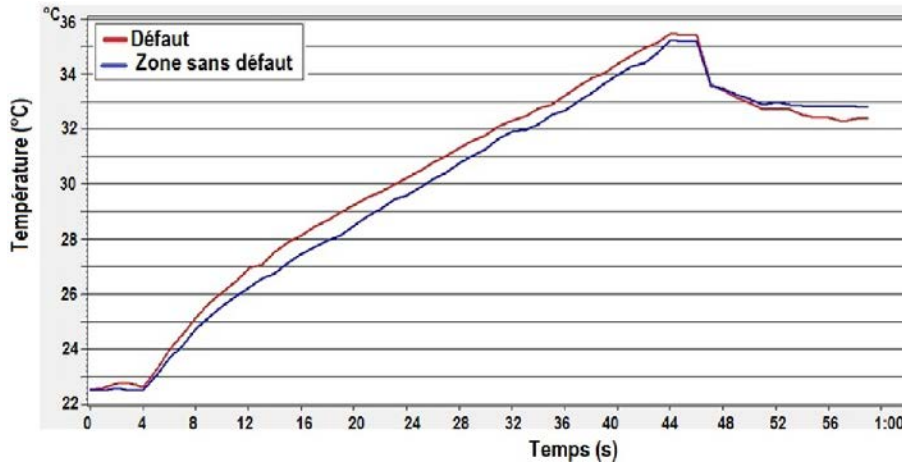


**Fig. 5.47.** Images thermographique de l'échantillon avec défaut interne dans les différentes étapes de l'excitation thermique, aux moments :  $t = 0$  s (a);  $t = 3$  s (b);  $t = 9$  s (c);  $t = 16$  s (d).

La cartes thermiques sont enregistrées à différents moments : à la température initiale, après 3 s, 9 s après le démarrage de la source et 16 s quand le défaut est parfaitement visible. La carte thermique au moment  $t=0$  représente sa surface dans l'ambient, sans signaler aucun défaut (fig. 5.47, a). Après 3 s, les modifications du champ thermique sont insuffisantes pour montrer le défaut (fig. 5.47, b). Au bout de 9 s, après le démarrage de la source thermique, le défaut commence à devenir visible (fig. 5.47, c). A cause de l'air de l'intérieur de l'échantillon, le transfert thermique à travers celui-ci est modifié – la température dans la zone du défaut est plus élevée, dû à l'épaisseur plus mince du matériau. Après 16 s du démarrage de la source thermique (fig. 5.47, d), on peut observer que le défaut devient parfaitement visible, le contraste entre le matériau et le défaut étant maximal.



Comme la visualisation de la distribution thermique sur la surface des échantillons s'est avérée insuffisante, a été étudiée l'évolution de la température par rapport au temps en choisissant la zone à défaut de l'échantillon, en tenant compte des images précédentes, et la zone dans défaut. Dans la figure 5.48 est présentée l'évolution de la température dans les deux zones.



**Fig. 5.48.** Evolution de la température dans la zone avec défaut et la zone sans défaut.

L'évolution de la température pour la zone avec défaut et celle sans défaut a été aussi tracée (fig. 5.48) : au début les deux lignes sont rapprochées par leurs valeurs et immédiatement, après le démarrage des lampes à halogène, les lignes commencent à se séparer de plus en plus clairement. Dans la période de relaxation thermique de l'échantillon on peut observer l'égalisation des deux températures et, vers le final, la température dans la zone avec défaut (ligne rouge) décroît en dessous de la température de la zone sans défaut. La différence maximale est enregistrée autour du moment  $t = 20$  s, plus précisément, après 16 secondes du démarrage de la source (fig. 5.49), moment où la présence d'un défaut dans l'échantillon est clairement indiquée (fig. 5.47, c). La différence entre les deux zones distribuées en temps est décrite par un contraste thermique temporel (fig. 5.50).

Dans la figure 5.49 a été présentée la distribution thermique du contraste temporel de température entre la zone avec défaut et la zone sans défaut de l'échantillon. Après l'analyse, il résulte une différence jusqu'à  $0,90$  °C entre les deux zones d'intérêt.

Dans la figure 5.50 on observe la modification de champs de température dans la zone du défaut par rapport aux zones qui l'entourent, en indiquant clairement la présence d'un défaut dans l'échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en, en même temps, en validant cette méthode dans l'analyse non destructive par TIR active.

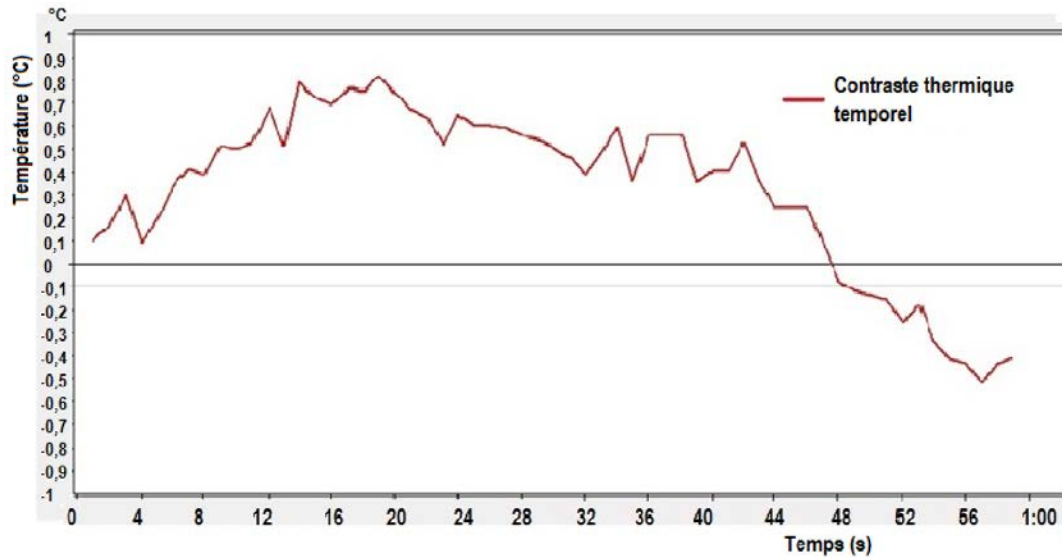


Fig. 5.49. Contraste thermique temporel entre la zone avec défaut et la zone sans défaut durant l'analyse.

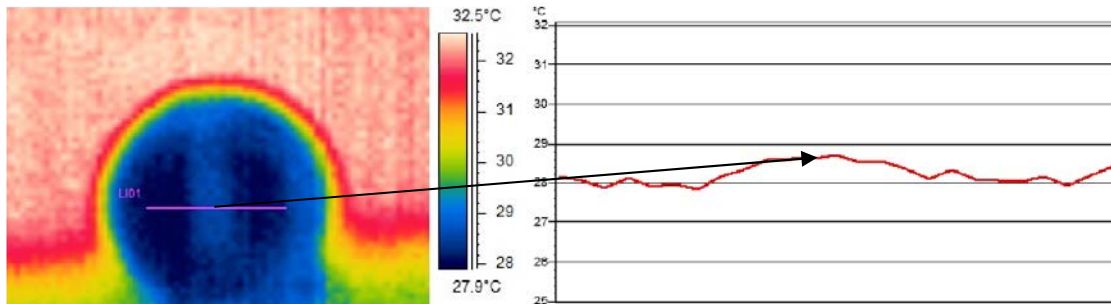
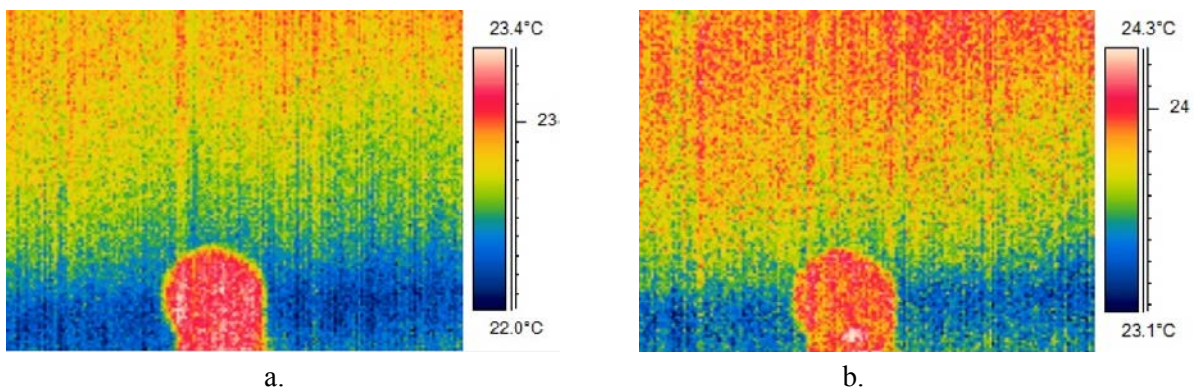


Fig. 5.50. Profile thermique de surface sur la direction du défaut interne.

## A.2. Résultats concernant la détection des défauts externe dans l'échantillon d'HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Pour cette étape expérimentale a été utilisé un échantillon en biocéramique de HA- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans lequel a été induit un défaut de surface (qui pourrait reproduire une porosité agrandie de sa surface) ayant un diamètre  $\varnothing = 1$  mm et une profondeur de 1 mm. Dans la figure 5.51 sont données des images thermographiques enregistrées en différents moments après le démarrage de source d'excitation thermique.



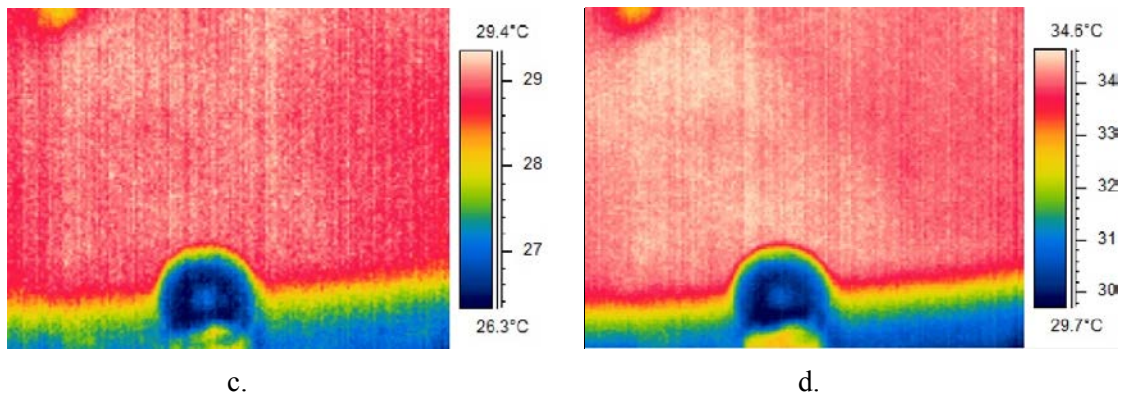


Fig. 5.51. Images thermographique de l'échantillon avec défaut de surface dans les différentes étapes de l'excitation thermique, aux moments :  $t = 0$  s (a);  $t = 3$  s (b);  $t = 9$  s (c);  $t = 16$  s (d).

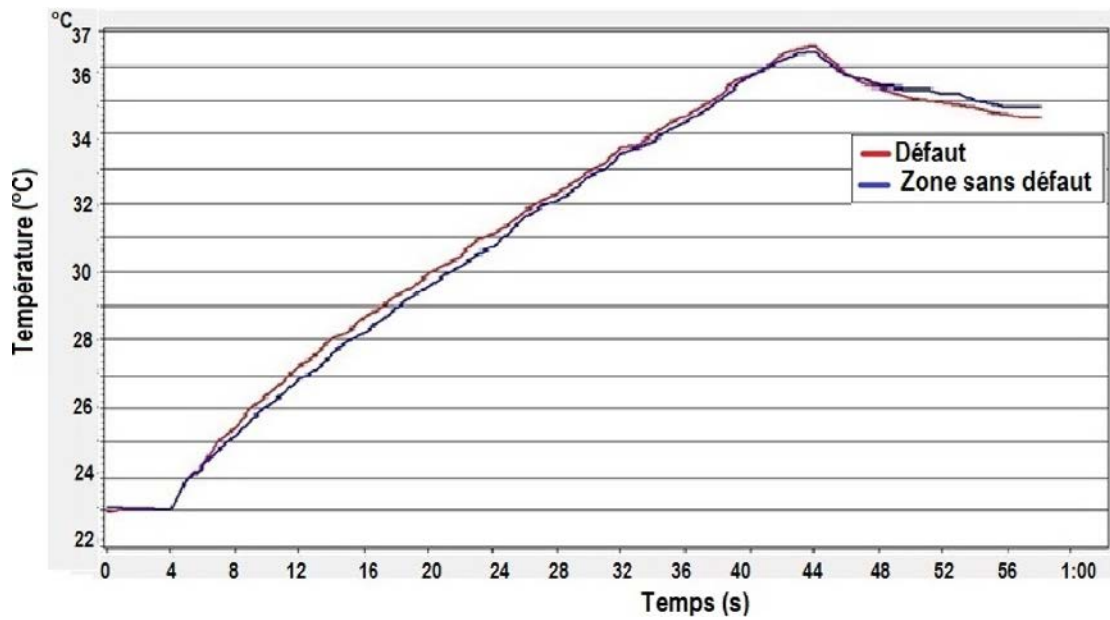


Fig. 5.52. Evolution de la température dans la zone avec défaut et la zone sans défaut.

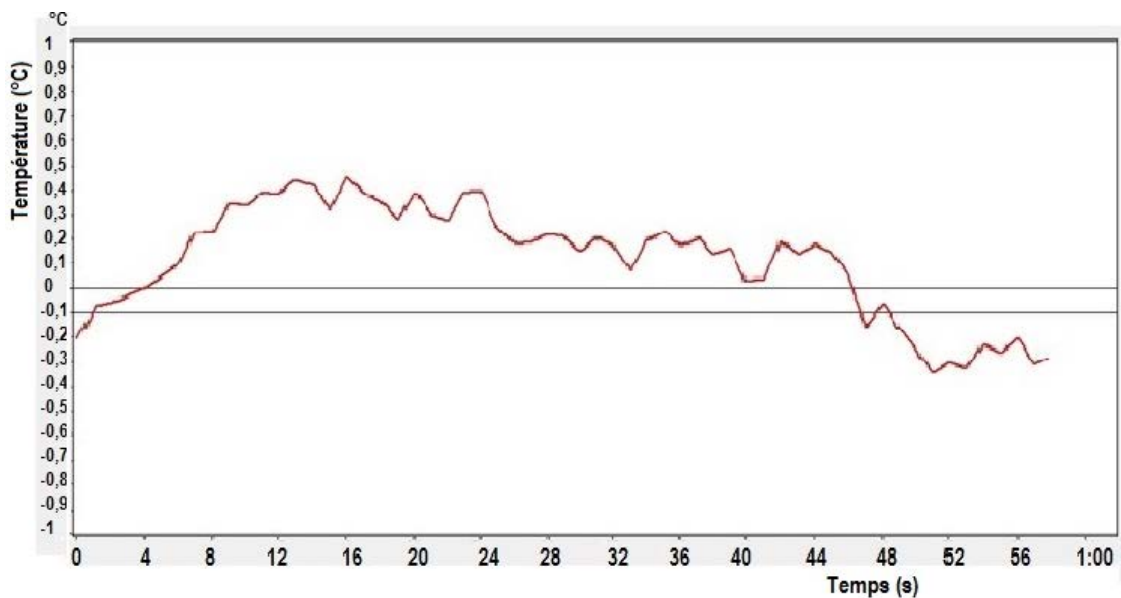




Fig. 5.53. Contraste thermique temporel entre la zone avec défaut et la zone sans défaut durant l'analyse.

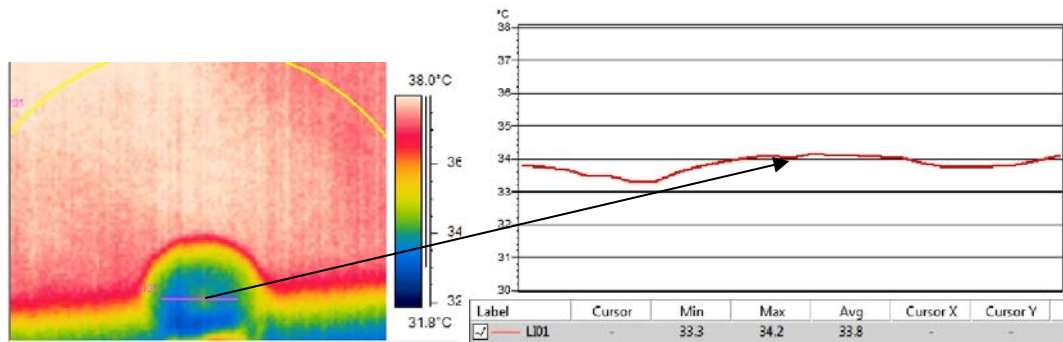


Fig. 5.54. Profil thermique de surface sur la direction du défaut de surface.

### A.3. Résultats de la détection des défauts internes couverts d'une épaisseur de 3 mm

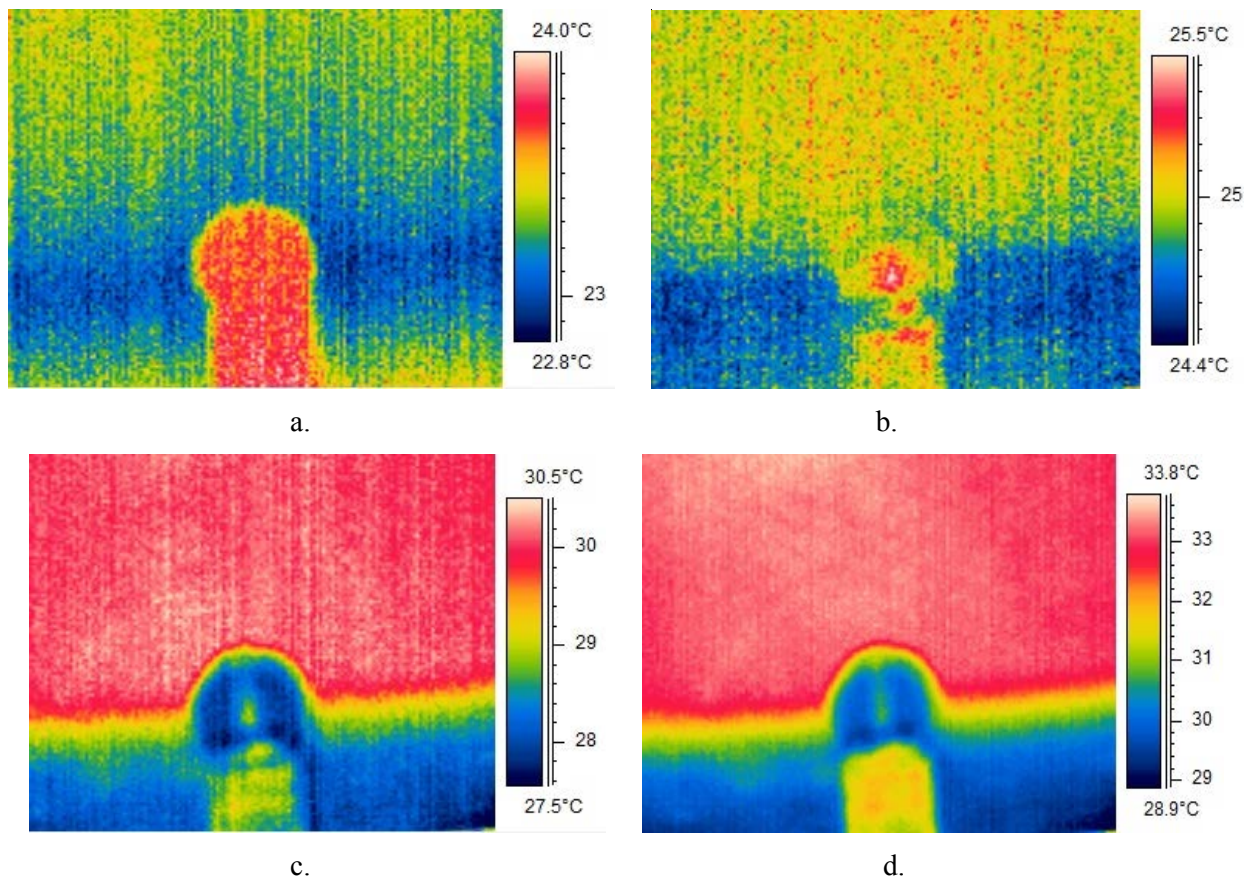


Fig. 5.55. Images thermographique de l'échantillon avec défaut interne dans les différentes étapes de l'excitation thermique, aux moments :  $t = 0$  s (a);  $t = 3$  s (b);  $t = 9$  s (c);  $t = 16$  s (d).

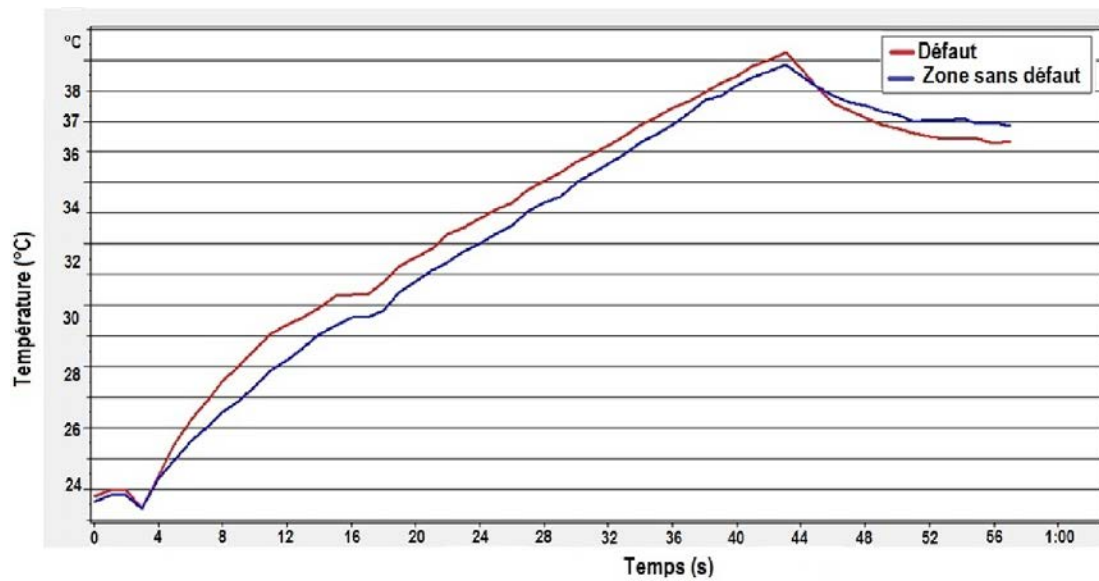


Fig. 5.56. Evolution de la température dans la zone avec défaut et la zone sans défaut.

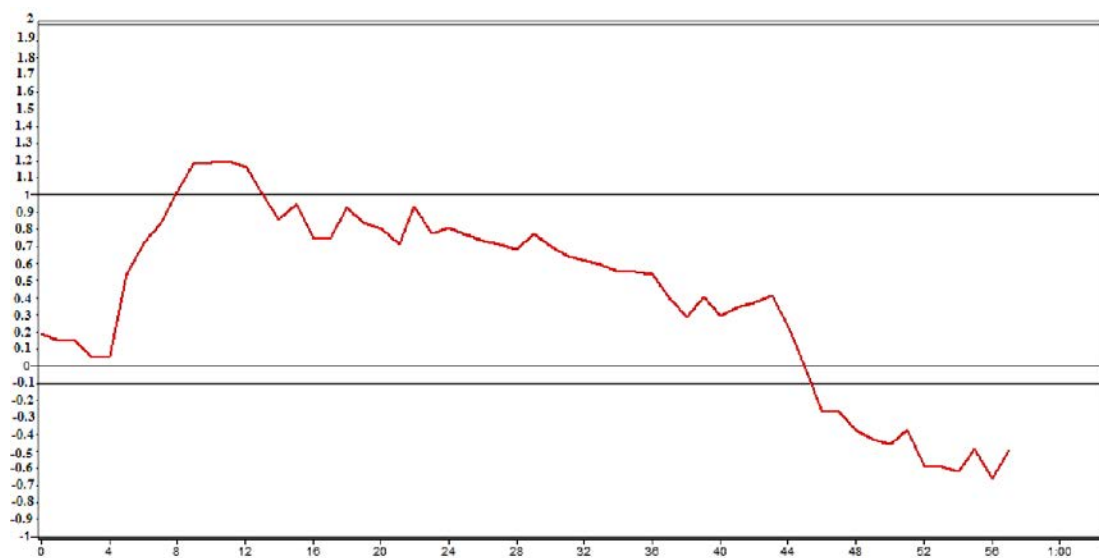


Fig. 5.57. Contraste thermique temporel entre la zone avec défaut et la zone sans défaut durant l'analyse.

## 5.1.6 Analyse de l'adhérence sur des systèmes osseux de la membrane d'acide poly-lactique par TIR active à impulsions

### 5.1.6.1 Notions introductives

Les polymères naturels et thermoplastiques biodégradables sont des matériaux comme l'amidon et d'autres produits à formule incertaine, comme l'acide poly-lactique (PLA), l'acide poly-glycogène (PGA), poly-hydroxy-alcoolate (PHA), poly  $\epsilon$ -caprolactame (PCL) et poly-

hydroxy-butyrate (PHB). L'unité de base pour le PLA est l'acide lactique qui est produit par synthèse chimique ou par des processus fermentatifs des carbohydrates. Par condensation, deux molécules d'acide lactique sont converties en lactide, un produit cyclique. Cette lactide peut être purifiée par distillation sous vide, étant, ensuite, transformée par des divers procédés de polymérisation en acide poly-lactique (PLA) ou en poly-lactide.

L'acide poly-lactique est un matériau thermoplastique qui présente des hautes valeurs de la résistance à traction et du module d'élasticité, et ainsi se rapprochant, voir même dépassant, les qualités des matériaux plastiques d'origine pétrochimique. Il peut résulter avec des différentes propriétés mécaniques en fonction de processus de fabrication : injection, thermo formatage, extrusion en feuilles ou pellicules, laminage en pellicules etc.

Ce polymère peut être utilisé dans une grande variété d'applications, à cause de ses nombreuses variantes en fonction de la masse moléculaire et de son degré de cristallinité. Si l'orientation est bi axiale, l'acide poly-lactique peut rester stable jusqu'à une température de  $\sim 130 - 150^\circ\text{C}$ . Il présente aussi des propriétés optiques excellentes, un comportement très bon au fléchissement et à la torsion [David2005]. Dans la figure 5.58 est présentée schématiquement la composition chimique de l'acide polylactique.

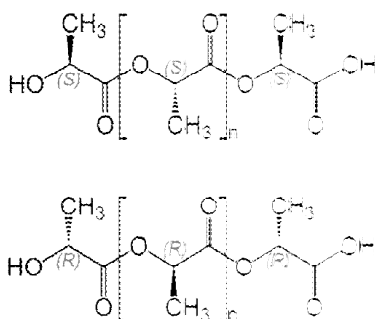


Fig. 5.58. Composition chimique de l'acide polylactique (PLA). [DAVID2005]

#### 5.1.6.1.1 Polymères à base d'acide polylactique

L'acide lactique est largement trouvé dans la nature étant le plus répandu des hydroxy acides. Il est un monomère non-toxique, obtenu par des réactions chimique et, aussi, par fermentation des carbohydrates, des sources régénérables comme l'amidon de maïs, le blé, les pommes de terre, le riz, la betterave à sucre et d'autre produits très riches en amidon.

L'acide lactique représente le hydroxy acide le plus simple, avec un atome de carbone non-symétrique, présentant deux configurations optiquement actives. L'isomère L est l'intermédiaire dans le métabolisme des carbohydrates dans les organismes humaines et animales alors que les

énantiomères D- et L- sont synthétisés par des bactéries et par microorganismes. PLA est un polymère biodégradable, obtenu de l'acide lactique par polycondensation directe ou par le processus de polymérisation avec ouverture du cycle du dimère cyclique (lactide) [DAVID2005]. Dans la figure 5.59 est présenté le processus d'obtention de l'acide polylactique.

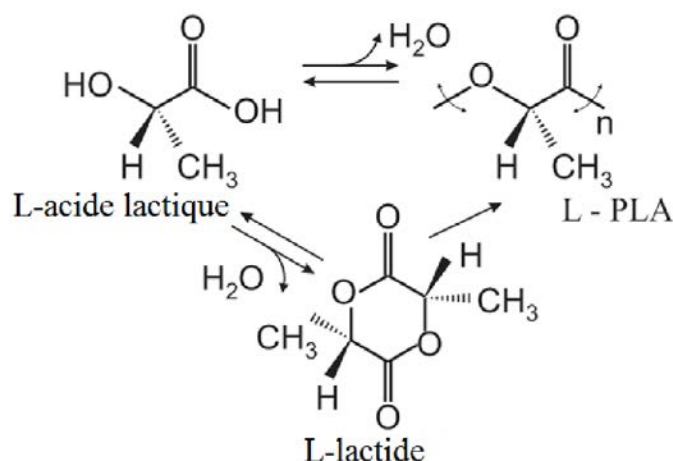


Fig. 5.59. Processus d'obtention de l'acide polylactique (PLA). [DAVID2005]

Colle la polycondensation directe représente un processus d'équilibre, des problèmes avec l'élimination des traces d'eau peuvent se présenter, ce qui limite l'obtention d'un produit à masse moléculaire élevée. Mais, des études utilisant la polycondensation directe en présence d'un mélange azéotrope de solvants montrent qu'il est possible d'avoir un point d'ébullition élevé. Le D-acide lactique ensemble avec le L-acide lactique, en mélange ou séparés, peuvent être polymérisés à l'oligomère correspondant, ayant une petite masse moléculaire. Suivant, par un processus de Trans estérification interne, celui est dépolymérisé catalytique en lactide.

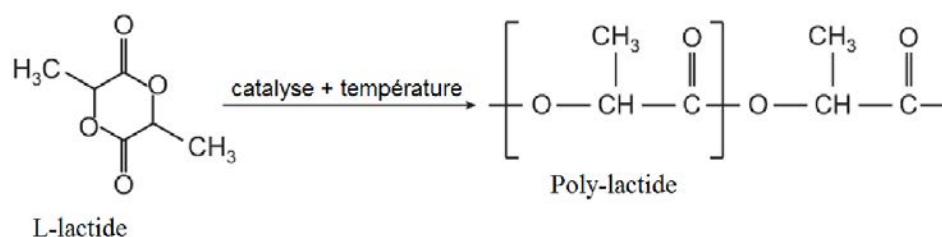
Pendant la polymérisation, trois stéréo-isomères peuvent se former :

- L-lactide;
- D-lactide;
- Mezi-lactide.

Après purification, durant la phase seconde, ces trois stéréo-isomères peuvent être transformés par polymérisation catalytique avec ouverture du cycle en polyesters correspondants, ayant une masse moléculaire élevée. Ce type de polymérisation catalytique avec ouverture du cycle peut être obtenu par fondue, en solution, masse ou émulsion, en utilisant toujours un catalyseur nécessaire pour initier la réaction. La polymérisation catalytique avec ouverture du cycle peut être réalisée par mécanisme anionique, cationique, H-active ou par radicaux libres, en fonction de système initiateur.

La poly-lactide est un polymère biodégradable plastique, obtenu de l'acide polylactique. Ce polymère est résistant au contact avec l'eau mais il ne résiste pas à des températures plus hautes que 55°C. Même si la poly-lactide est insoluble dans l'eau, certains microorganismes vivant dans le milieu marin peuvent la décomposer en dioxyde de carbone et eau. La poly-lactide nécessite des modifications pour des diverses applications pratiques comme, par exemple, l'augmentation de la flexibilité par ajout de plastifiants. Ce polymère peut être transformé, comme la majorité des matériaux thermoplastiques en : fibres, pellicules, par thermo formation ou par injection.

Dans le processus d'extraction de l'amidon, les céréales sont moulées. L'amidon résultant est transformé pour obtenir le dextrose non-raffiné qui, par fermentation, va mener à l'acide lactique. L'acide lactique résultant sera condensé pour la production de la lactide – un dimère cyclique intermédiaire utilisé comme monomère pour l'obtention du polymère. La lactide est distillée sous vacuum et, ainsi, purifiée. Ensuite, elle est soumise à l'ébullition sans solvants pour l'ouverture de la structure de l'anneau pour la polymérisation. Le résultat obtenu est la poly-lactide (Fig.5.60) [David2005].



**Fig. 5.60.** Processus d'obtention de la poly-lactide. [David2005]

L'acide polylactique a des nombreuses propriétés ressemblant aux matériaux plastiques dérivant des hydrocarbures, ce qui le rend très utile dans des nombreuses applications. Il est un polymère thermoplastique utilisé en emballage dû à sa température de transition véreuse d'approximative 60°C qui est beaucoup plus élevée par rapport à la température d'utilisation des produits emballés. L'acide polylactique crée une barrière résistant contre les vapeurs d'eau et les gazes permanents, ayant une haute résistance aux solvants. Les avantages de l'obtention d'un polymère à grande masse moléculaire sont concrétisés dans sa transformation en fibres et pellicules par injection et thermo-formation etc. [Rapa2011]. Dans le Tableau 5.1 on peut observer les propriétés de l'acide polylactique comparées avec celles d'autres matériaux plastiques conventionnelles.

**Tableau 5.1.** Comparaison des propriétés des bio-polymères avec celles des matériaux plastiques conventionnelles. [Rapa2011]

Propriétés	U.M.	LDPE <sup>a</sup>	PP <sup>b</sup>	PLA <sup>d</sup>		Polymères à base d'amidon	
Densité	$g/cm^3$	<0,920	0,910	1,25	1,21	1,33	1,12
Résistance à la traction	$MPa$	10	30	53	48	26	30
Module de traction	$GPa$	0,32	1,51	3,5	-	2,1-2,5	0,371
Elongation à rupture	%	400	150	6,0	2,5	27	886
Résistance à l'impact Izod, des échantillons pré coupés	$KJ/m^2$	sans rupture	4	0,33	0,16	-	-
Module de flexion	$GPa$	0,2	1,5	-	3,8	1,7	0,18

L'acide polylactique (PLA) est un candidat excellent pour le remplacement des polymères d'origine pétrochimique parce qu'il est biodégradable et produit des sources régénérables. Il est très résistant à la traction mais sa fragilité et sa rigidité en état pure limitent son domaine d'application. C'est pour ça que des nouvelles classes à flexibilité améliorée et avec des meilleures propriétés à l'impact ont été créées. Dans ce but, l'acide polylactique (PLA) avec ses isomères L- et D- en rapport 96 : 4 ont été mélangés en fondu avec des divers plastifiants comme : bi-éthyle-hexyl adipate (DOA), tri acétate glycéryl (GTA) et tri-butyle O-acétyl-citrate (TBAC). En fonction de mélange, ont été obtenus des matériaux à des propriétés thermiques et mécaniques différentes. Les meilleures propriétés mécaniques ont résulté du mélange avec la plastifiant ayant la plus petite masse moléculaire – GTA. En ce qui concerne la relation entre la quantité de plastifiant – nature, la température de transition véreuse (qui été de 62°C pour l'acide polylactique) a abaissé jusqu'à 30°C, alors que les propriétés d'impact et de rigidité ont été améliorées. La proportion de cristallisation a augmentée dans le mélange DOA et l'élongation à rupture et la résistance à rupture ont grandi dans le mélange (PLA-GTA, PLA-TBAC). Les propriétés d'impact grand et moyen ont été améliorées dans les compositions PLA-DOA et PLA-TBAC [Mura2008].

#### 5.1.6.1.2 Matériaux polymériques et composites utilisés dans la reconstruction osseuse

Les biomatériaux utilisés pour la régénération ou pour l'aguerrissement du tissu osseux peut être encadrés en deux catégories : matériaux cellulaires et matériaux acellulaires. Ces deux catégories servent aussi comme support pour des médicaments et substances. Les matériaux acellulaires représentent les structures sur lesquelles n'ont pas été encore cultivées des composantes cellulaires. Ils sont des structures spongieuses qui permettent le développement

dans leur intérieur du tissu osseux. L'autre catégorie de matériaux – les cellulaires, sont les structures auxquelles a été ajoutée une composante cellulaire avant d'être implantés. L'utilisation de ces matériaux comme support pour les facteurs de croissance a conduit à l'amélioration de l'efficacité des implants dans la technologie de récupération du tissu osseux. Les protéines morphogénétiques osseuses (BMP) sont nécessaires dans le processus de reconstruction du tissu osseux. Certaines recherches ont démontré que si celles-ci existent en un grand numéro, elles peuvent déterminer la reconstruction du tissu osseux [Petr2014]. Les biomatériaux qui sont utilisés dans ce domaine sont de type céramique, composite ou polymérique. Les matériaux de type céramique, ensemble avec les polymères peuvent être séparés en deux catégories :

- matériaux absorbables ou biodégradables ;
- matériaux non-absorbables (bio-stables).

Les polymères synthétiques biodégradables choisis pour la régénération du tissu osseux doivent présenter une bonne corrélation entre les propriétés mécaniques et physiques et la durée de dégradation, imposées par la zone où sont implantés. La biodégradabilité d'un polymère est strictement influencée des facteurs comme : la structure chimique, le caractère hydrophile, le degré de cristallinité, les températures de transition véreuse et de fonte, la masse moléculaire etc. La biodégradabilité des différents polymères utilisés dans la récupération et régénération du tissu osseux, peut être observée dans le Tableau 5.2 suivant.

**Tableau 5.2.** Capacité de biodégradabilité des polymères utilisés en reconstruction du tissu osseux (exprimée en mois). [Petr2014]

	PGA	PLA	DLPLA	PCL	PDO	PGA-TMC	85/15 DLPLG	75/25 DLPLG	65/35 DLPLG	50/50 DLPLG
T <sub>t</sub> <sup>0</sup> C	225-230	173-178	Amorphe	58-63	-	-	Amorphe	Amorphe	Amorphe	Amorphe
T <sub>g</sub> <sup>0</sup> C	35-40	60-65	55-60	-65-60	-10-0	-	50-55	50-55	45-50	45-50
T <sub>biodégradation</sub>	6-12	>24	12-16	>24	6-12	6-12	5-6	4-5	3-4	1-2

### 5.1.6.1.3 Rôle des protéines morphogénétiques dans la régénération du tissu osseux

En 1960, Urist a réussi d'obtenir une matrice osseuse déminéralisée et ont observé que les propriétés ostéo-conductrices de la matrice doivent être gérées par un facteur de croissance. Ce facteur de croissance a été nommé la protéine morphogénétique osseuse (BMP), après des études faites sur un lapin et une souris pour la purifier [Petr2014]. Les protéines morphogénétiques ont été soumises à des multiples études pour déterminer leur capacité de régénérer le tissu osseux.

Jusqu'en 2000, ont été clonés et caractérisés presque 15 composés de la famille BMP. Le résultat de ces recherches a été que les deux protéines humaines : rhBMP-2 et rhBMP-7 sont capables de participer à la régénération du tissu et à la guérison des fractures. Beaucoup d'expérimentation ont eu comme but d'introduire du BMP dans des endroits bien établis afin de réparer les défauts osseux ou de remplir les trous du tissu osseux. Les structures utilisées comme support pour l'injection du BMP sont les matrices osseuses déminéralisées, composites à base de collagène, TCP, PLA, copolymères (PGLA) etc. Le transport parfait du BMP doit assurer son libération lente afin d'être absorbé, en sachant qu'il a une structure résistante à la déformation, jusqu'à l'apparition du tissu nouveau.

Ces protéines morphogénétiques osseuses (BMP) sont des molécules actives du point de vue biologique, capables de participer à la formation du tissu osseux nouveau. Elles sont utilisées ensemble avec des biomatériaux biodégradables ayant le rôle de greffon pour la régénération.

Une des plus importantes fonctions du système destiné au transport du BMP est de lui établir une concentration adéquate, afin d'assurer la réparation du tissu osseux dans la location désirée. Une autre fonction importante est le contrôle de la masse osseuse induite. Les expérimentations ont démontré que si on choisit une structure adéquate pour le support BMP, la masse de tissu nouveau induite par les protéines morphogénétiques osseuses est approximativement identique, en dimensions et forme, avec celle du support. Le matériau utilisé comme support doit être biocompatible et il ne doit pas stopper la formation de tissu osseux nouvel, mais la majorité de ces expérimentations ont donné des résultats non concluants et non reproductibles. A été mis en évidence le fait que le développement plus rapide du tissu osseux s'est produit quand le diamètre des pores de la hydroxyapatite, comme matériau support, était dans l'intervalle 200-400 $\mu\text{m}$  [Petr2014].

Un autre sujet de recherche a été d'utiliser les polymères biodégradables comme support pour les protéines morphogénétiques osseuses. Fergusson a utilisé un copolymère semé par des protéines morphogénétiques bovines pour réparer des différents défauts osseux. Il a trouvé qu'après 16 semaines, le polymère existait encore à côté de tissu nouvel. En conclusion il a été établi que l'utilisation des polymères ayant une longue durée de dégradation est un inconvénient dans la régénération complète du tissu osseux.

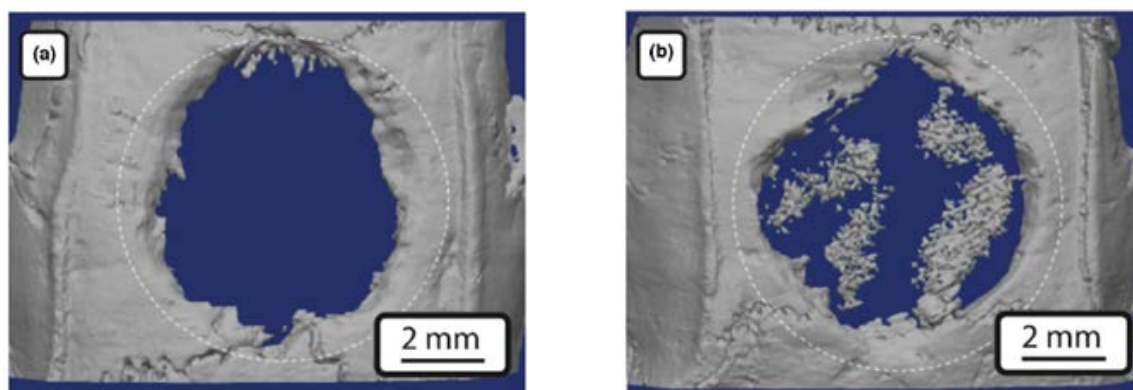
L'utilisation des particules de PDLGA avec la taille de 150-500 $\mu\text{m}$ , comme support pour rhBMP-5 a conduit à la guérison complète des défauts du fémur de 2,5 cm, alors que le polymère s'est dégradé progressivement jusqu'à la disparition totale.



D'autres recherches de Miyamoto ont été dirigées vers la découverte des meilleures structures polymériques comme support pour BMP. En ce but il a fait des implants musculaires aux souris, en utilisant DLPLA avec des masses moléculaires différentes. Le résultat obtenu a démontré que seulement le support en DLPLA ayant la masse moléculaire de 650 était convenable mais, la quantité de tissu osseux régénéré a été trop petite pour le considérer comme une expérimentation réussite. Le support polymérique a été complètement dégradé en deux semaines. Les faibles résultats de Miyamoto se doivent à la haute acidité produite de DLPLA 650 dans le milieu, tel que le tissu osseux a été détruit et la dégradation du polymère, trop rapide.

Pour remédier ces problèmes, ont été synthétisés d'autres polymères de type acide poly-DL-lactique-co- polyéthylène-glycol qui a permis une augmentation de la masse moléculaire du polymère, ce qui a conduit à la réduction de la vitesse de dégradation et à la disparition de l'acidité. Ce copolymère s'est avéré d'être beaucoup meilleur que le précédent, en mettant en évidence la formation d'une quantité plus grande de tissu osseux.

D'autres recherches ont visé l'utilisation d'un copolymère PLA6500 – PEG3000 comme support pour BMP. Les expérimentations ont été effectuées en vivo et ont mis en évidence un bon développement du tissu osseux, mais au centre de l'os ont été observé des réminiscences du polymère qui n'était pas encore complètement dégradé.



**Fig. 5.61.** Régénération du tissu osseux. L'apparition des ostéoblastes après 6 semaines de l'implantation (PLLA a été utilisé comme support pour BMP). [Kane2013]

Par l'utilisation d'un autre bloc copolymère, poly-D, L-lactique-co-p dyoxanone-co-polyéthylène-glycol (PLA-DOA-PEG), afin de contrôler la vitesse de dégradation du support pour le BMP, on a constaté qu'à la fin le tissu osseux ne contenait plus du polymère non-dégradé. Une autre découverte a été l'enrichissement plus grand en calcium de l'os dont la formation a été induite par ce polymère par rapport à celui basé sur le collagène. Dans la figure

5.61 sont visibles les études faites sur un fémur de souris. L'os a commencé de se guérir après approximativement 6 semaines [Kane2013].

#### **5.1.6.1.4 Autres domaines d'application des membranes PLA**

Le premier domaine d'application a été l'évaluation de la faisabilité des équivalents du tissu du foie à base de propagation sélective. Le but était de vérifier l'efficacité des cellules hépatiques des souris, placées sur un support de PLLA, en présence de nicotine-amide, de diméthyle sulfate-oxyde et d'oncostatine M. Les tests ont été effectués en vivo et aussi en vitro. La quantité d'albumine cultivée après les cellules hépatiques obtenues par PLLA a été améliorée d'une manière significative, tel qu'après 4 semaines sont arrivés à la même quantité que celle produite par une souris adulte en trois jours. Mais, plus que ça, en utilisant la technologie d'implantation de tissu hépatique dans la cavité péritonéale, a été observé une amélioration drastique de l'apparition des cellules greffon avec de l'albumine, après 15 jours de l'opération [Lam1993]. Une autre étude a visé l'augmentation de l'efficacité de régénération du nerf périphérique par l'utilisation de PLLA comme support pour les cellules Schwann. Celles-ci ont été cultivées et injectées dans un support en PLLA et ensuite implantées dans le nerf sciatique d'une souris. Mais l'étude n'a pas eu de résultats favorables – après quatre mois aucune modification significative n'a pas été observée. Même s'ils n'ont pas obtenu des résultats favorables, l'étude a fourni des observations prometteuses pour d'autres éventuelles investigations supplémentaires [Eva2002].

#### **5.1.6.2. Conception de l'installation expérimentale**

Cette partie expérimentale a eu comme but l'évaluation de l'efficacité de l'adhérence des membranes d'acide polylactique sur des systèmes osseux en utilisant la thermographie infrarouge active à impulsions. En ce sens a été nécessaire de réaliser des échantillons osseux sur lesquels a été appliquée la pellicule d'acide polylactique. L'expérimentation a nécessité trois types d'échantillons : sans pellicule, avec la pellicule appliquée correctement, sans délamination et avec la pellicule appliquée avec défauts. L'installation expérimentale (dont les composantes ont été présentées dans la section 5.1.5.1 de l'ouvrage) est illustrée dans la figure 5.62 et est composée de :

- Caméra thermographique FLIR „ThermaCam S45”;
- Support isolateur pour les échantillons testés;
- Trépied pour la caméra thermographique ;
- Système central d'acquisition des données et de contrôle de la caméra thermographique ;

- Système d'excitation thermique formé par deux lampes photographiques à halogène „Kaiser Videolight 6”;
- Générateur d'impulsions.



Fig.5.62. Installation expérimentale.

Pour obtenir des images claires la caméra a été placée à une distance optimale de 40 cm de l'échantillon, compte tenu de sa petitesse et les lampes à une distance de 42 cm pour permettre un échauffement uniforme de l'échantillon. Dans la figure 5.63 est présentée schématiquement l'installation expérimentale.

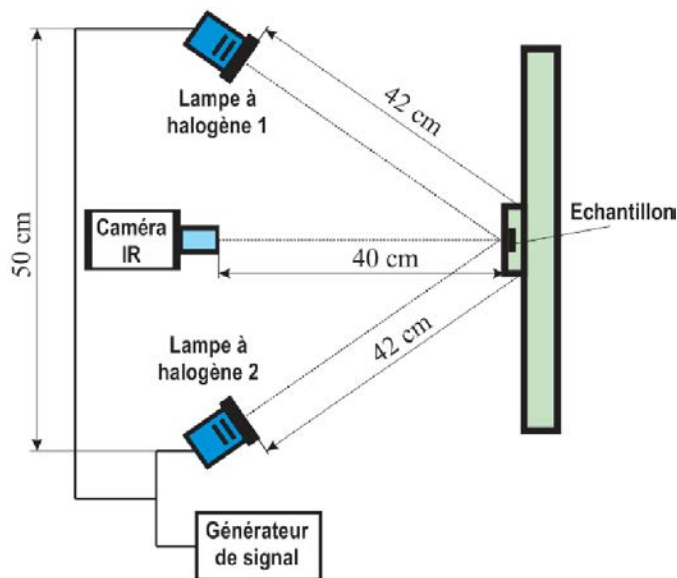


Fig.5.63. Schéma de l'installation expérimentale.

Pour cette expérimentation ont été utilisés des échantillons osseux extraits d'une côte bovine, ayant de dimensions de 3,5 x 2 cm. Après la réalisation de la membrane, celle-ci a été appliquée sur l'os en l'échauffant à hautes températures (fig. 5.64).



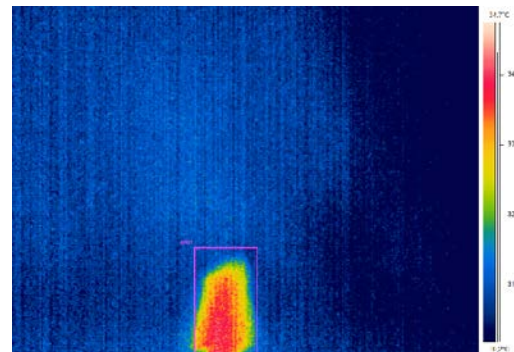
**Fig. 5.64.** Echauffement de la membrane pour l'application l'échantillon d'os.

### 5.1.6.3. Résultats

Après la préparation de l'installation expérimentale, les échantillons ont été excités thermiquement (fig : 5.65) par les deux lampes photographiques à halogène, chacune de pouvoir 100 W. Les échantillons ont été soumis à des impulsions d'une durée de 10 s, espacés de même temps. Suivant, leur refroidissement a été analysé pendant 10 s, avec la caméra réglée (par son logiciel fourni par FLIR) pour enregistrer des images à une fréquence de 1 Hz.



**Fig.5.65.** Moment du bombardement à impulsions.

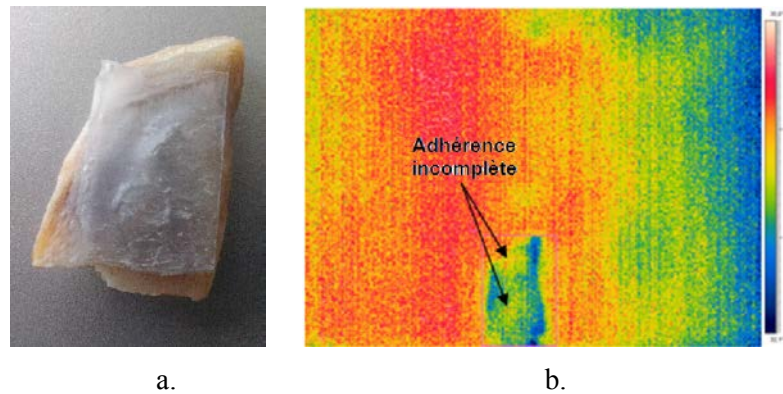


**Fig.5.66.** Image thermographique de l'os sans membrane appliquée.

Pendant la première phase, l'analyse a été effectuée sur l'échantillon sans membrane appliquée, en utilisant un morceau d'os simple, ce qui a donné à la fin de la procédure décrite plus haute, l'image de la figure 5.66. On peut observer l'échauffement de l'échantillon, par excitation thermique, jusqu'à 37°C et, aussi, l'homogénéité de son champs thermique – ils n'y sont pas des différences considérables sur sa surface qui pourraient indiquer des défauts. Cette analyse aura le rôle de référence pour les suivantes.

Dans l'étape suivante a été simulée une situation où la membrane d'acide polylactique n'a pas adhéré complètement sur la surface de l'os, en laissant expressément de zones sans contact

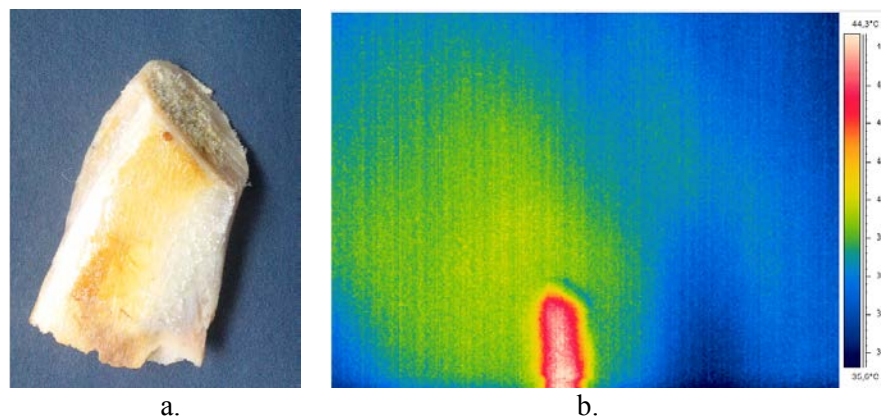
entre elle et l'os (fig. 5.67.a). Il est bien visible au milieu de l'os et dans la partie droit en haut, comme la membrane n'est pas en contact avec l'os.



**Fig.5.67.** L'échantillon avec la membrane partiellement adhérente (a); Image thermographique (b).

En utilisant la méthode de la réflexion - la caméra et la source d'excitation thermique étant placées de même côté de la surface visée de l'échantillon, la membrane qui n'a pas complètement adhéré au support osseux a été plus chauffée que le reste de l'échantillon, où elle a adhéré correctement.

Dans la suivante étape, a été analysé un échantillon sur lequel la membrane a été correctement appliquée (fig. 5.68, a) et a adhéree en proportion de 98 %..

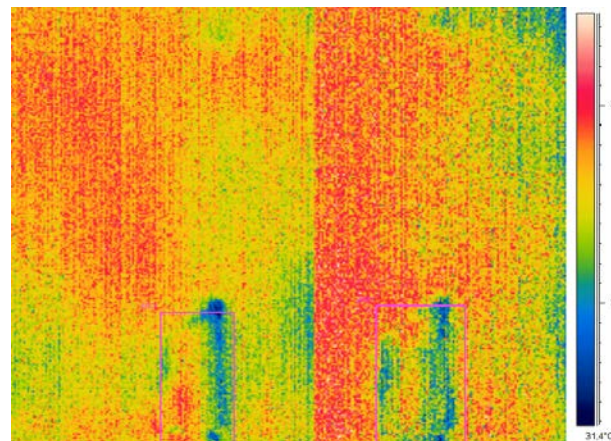


**Fig.5.68.** Membrane adhéree correctement sur la surface osseuse (a); image thermographique (b).

Dans l'image 5.68, b on observe la membrane adhéree sur la surface de l'os, sans des différences de température significantes pour indiquer une adhérence partielle.

Par répétition de l'expérimentation sur des échantillons différents, avec la membrane appliquée correctement ou non, on a pu établir, par comparaison des images thermographiques, les différences entre les os avec la membrane adhéree en totalité et ceux sur lesquels la membrane n'avait pas adhéré correctement, en totalité (fig. 5.69).

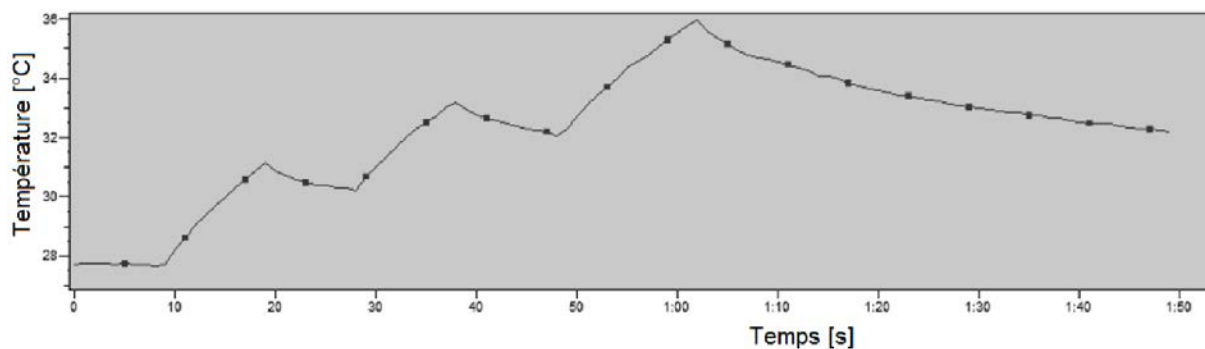




**Fig.5.69.** Différences entre les images thermographiques de l'os simple et de celui avec la membrane incorrectement appliquée.

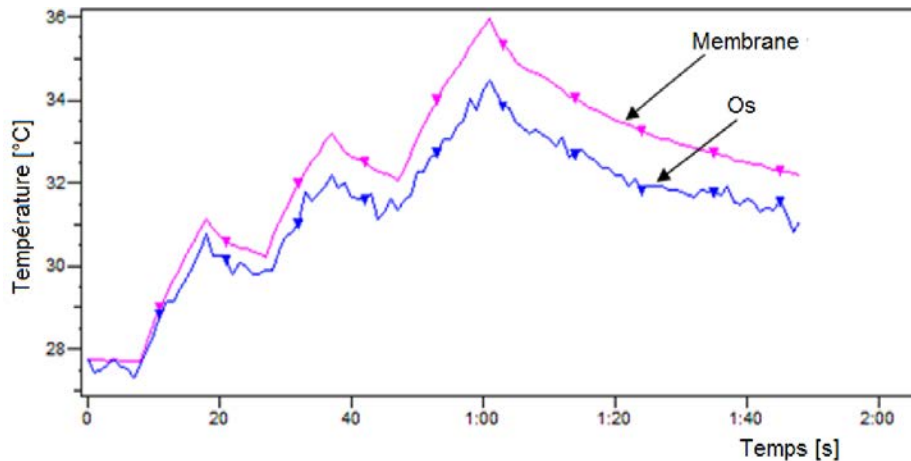
Dans le cas où la membrane adhère complètement, la chaleur est distribuée uniformément, alors que dans le cas d'un défaut d'adhérence celui va s'opposer à l'homogénéisation de la température sur la surface.

Dans la figure 5.70 est tracée la variation de la température moyenne sur la surface de l'échantillon en temps et on peut observer clairement les impulsions thermiques et leur durée.



**Fig.5.70.** Variation de la température moyenne sur la surface à membrane correctement adhérente.

Une comparaison entre la température de l'aire d'intérêt (avec la membrane correctement adhérente) et un point de la surface osseuse qui n'est pas en contact avec la membrane est représentée dans la figure 5.71.



**Fig.5.71.** Représentation de la variation de température entre la zone adhérente et un point de l'os.

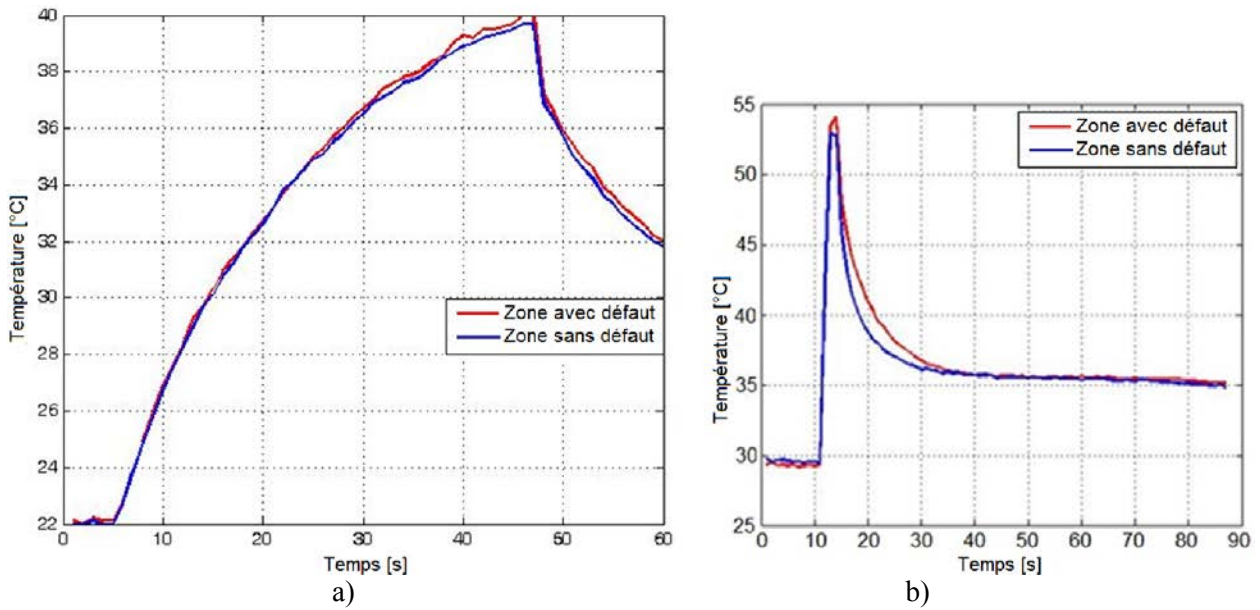
Suivant la ligne rose, on peut observer la variation de température de la zone d'adhérence et en suivant la ligne bleue, on voit la température dans un point de l'os qui n'est pas en contact avec la membrane, durant toute l'expérimentation. Il est à observer que, dans la zone où la membrane est adhérente, la température augmente uniformément par rapport au point dans lequel n'existe pas de contact avec la membrane où la température a des variations importantes d'une impulsion à un autre.

### 5.1.7 Choix de la méthode optimale de dépistage des défauts internes dans les systèmes biocéramiques par TIR active (laser CO<sub>2</sub>/lampes à halogène)

Dans cette section, est envisagée une étude comparative entre deux méthodes en thermographie infrarouge avec deux types d'excitation thermique, utilisées afin de détecter les défauts intérieurs des systèmes biocéramiques. Dans les deux cas, la méthode d'analyse par réflexion et le même type de matériau et défaut pour l'échantillon (HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ont été utilisés.

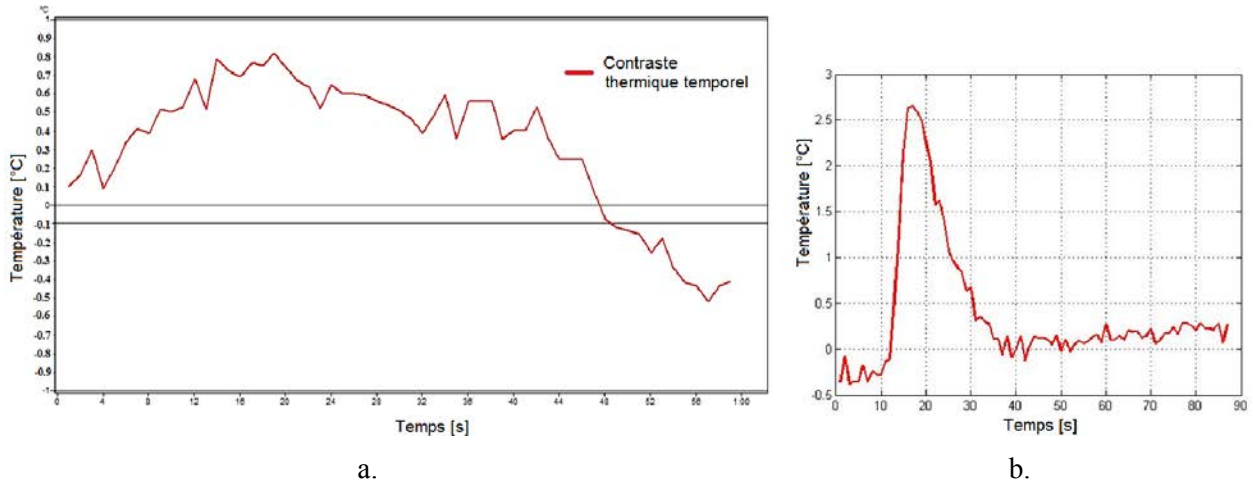
Le temps d'excitation thermique par laser CO<sub>2</sub> a été de 3 s, temps imposé par le pouvoir du laser compte tenu de l'intégrité structurale et fonctionnelle de l'échantillon. Pour la méthode d'excitation par lampes photographiques à halogène, le temps d'excitation thermique par impulsions a été de 40 s. Pour comparer l'évolution de la température en temps ont été analysées les deux représentations graphiques (fig. 5.72 a et b). Dans la figure 5.72, a, on peut observer que la zone avec défaut interne est plus chaude, indiquant dans le temps d'échauffement et aussi pendant le refroidissement qu'il y existe un défaut. Dans la figure 5.72, b, on voit une augmentation de température dans le zone du défaut mais ceci est plus visible durant le refroidissement de l'échantillon.





**Fig.5.72.** Evolution de la température pour excitation thermique par : lampes photographiques à halogène (a), laser CO<sub>2</sub> (b).

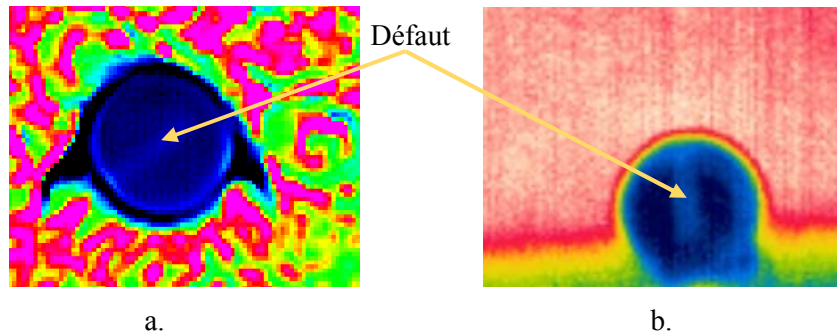
Pour mieux analyser les différences de température enregistrées après l'excitation thermiques, des contrastes thermiques entre le défaut et la zone sans défaut ont été réalisés (fig. 5.73).



**Fig.5.73.** Contraste thermique pour excitation thermique par : lampes photographiques à halogène (a), laser CO<sub>2</sub> (b).

Dans la figure 5.73 on peut observer une augmentation considérablement plus grande entre le défaut et la zone sans défaut dans le cas de l'excitation thermique par laser CO<sub>2</sub> (5.73, b), la différence de température arrivant jusqu'à la valeur de 2,7 °C. Pour l'excitation thermique par lampes photographiques à halogène de l'échantillon en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, la différence de température

entre les deux zones est beaucoup plus petite – de 0,8 °C. Pour les deux types d'excitation thermique, les images thermographiques sont montrées dans la figure 5.74.



**Fig.5.74.** Image thermographique de l'échantillon en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pour l'excitation thermique par : laser CO<sub>2</sub> (a), lampes photographiques à halogène (b).

En comparant les deux images de 5.74 (les images sont brutes, sans traitement), on observe que pour l'excitation thermique avec des lampes à halogène, l'image du défaut est plus claire que pour le cas d'excitation avec laser CO<sub>2</sub>, même si les différences de température ne sont pas aussi grandes.

#### 5.1.7.1. Choix de la source optimale d'excitation thermique en utilisant l'analyse multicritères

L'analyse multicritères décrit une approche structurale utilisée dans le but de déterminer la méthode optimale parmi les options alternatives qui satisfont une série d'objectifs [Leo2014]. A base des résultats obtenus, pour le choix de la méthode et de la source d'excitation thermique on a fait l'option pour la méthode multicritères. Ainsi, pour des différents critères d'intérêt ont été accordés des qualificatifs de 1 à 5. Dans le Tableau 5.6 suivant sont montrés les critères choisis et les qualificatifs accordés pour les deux cas d'excitation thermique des échantillons en HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Tableau 5.3.** Qualificatifs accordés pour chaque critère.

Critère	Abréviation	Laser à CO <sub>2</sub>	Lampes à halogène
Vitesse de la méthode	Vm	5	2
Cout de l'équipement	Co	2	5
Sécurité de l'utilisateur	Su	3	4
Qualité des images sans aucun traitement	Ci	4	5
Risc de dégradation de l'échantillon	Re	3	5
Possibilité de déplacement de l'équipement	Pe	2	4

##### 5.1.7.1.1. Justification des qualificatifs accordés

a) *Vitesse de la méthode* représente la vitesse de détection du défaut de l'intérieur de l'échantillon. Dans ce cas, a été éprouvé que pour l'excitation par laser le défaut devient visible tout de suite après l'arrêt du laser (après 3 s d'excitation thermique), alors que pour l'excitation par lampes photographiques, il est observable à 9 s après le démarrage de la source.

b) *Coût de l'équipement* – il est plus grand pour l'excitation par laser.

c) *Sécurité de l'utilisateur* représente un facteur important dans l'expérimentation. Dans le cas du laser a été considéré le danger d'abîmer la peau ou d'autres organes de l'opérateur. Pour les lampes à halogène, une utilisation incorrecte peut causer des brûlures de la peau ou des problèmes oculaires.

d) *Qualité des images sans aucun traitement* – ont été considérées les images thermographiques dans le meilleur moment de détection du défaut. Pour le laser, le défaut est clairement visible mais dans le cas des lampes photographiques le contraste entre le défaut et le reste de l'échantillon est plus évident en fournissant une image d'une qualité plus élevée.

e) *Risque de dégradation de l'échantillon* envoie vers la température maximale à laquelle sont gardées l'intégrité structurelle et la conservation des propriétés de l'échantillon après l'excitation thermique pour visualiser le défaut. Ainsi, ont été trouvées les valeurs de 55°C pour le laser et 40°C pour les lampes photographiques.

f) *Possibilité de déplacement de l'équipement* concerne la possibilité de déplacer l'installation formée par la caméra thermographique, le système d'acquisition des données, la source d'excitation thermique, en vue d'effectuer les analyses thermographiques. Dans ce cas, il s'avère que le système avec laser est très difficilement de déplacer son gabarit, alors que l'installation avec des lampes est beaucoup plus portable.

Après l'attribution des qualificatifs, chaque critère est comparé d'après les règles suivantes :

- Le critère le plus important va obtenir la valeur 1 ;
- Si les deux critères ont la même importance, les deux vont obtenir la valeur 1/2;
- Le critère le moins important va obtenir la valeur 0.

Pour déterminer le score final, pour chaque méthode, a été utilisée la formule suivante (formule Frisco) qui donne le coefficient de pondération du Tableau 5.4 [Bob2005] :

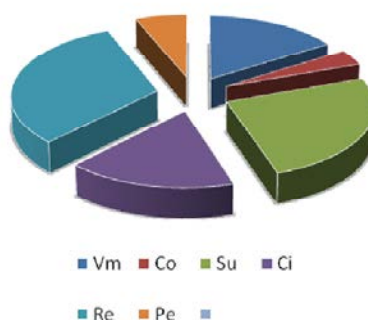
$$\gamma_i = \frac{p + m + 0.5 + \Delta_p}{-\Delta_p + \frac{N}{2}}, \quad (5.7)$$

où:  $\gamma_i$  représente le coefficient de pondération ;  $p$  est la somme des qualificatifs accordés ;  $\Delta_p$  est la différence entre le score des critères ;  $m$  représente le nombre des critères dépassés ;  $N$  est le nombre des critères considérés en calcul et  $\Delta_p'$  est la différence entre les scores des critères.

**Tableau 5.4.** Coefficient de pondération.

	$V_m$	$C_o$	$S_u$	$C_i$	$R_e$	$P_e$	$Scor$	$\Delta p$	$m$	$-\Delta p'$	$\gamma_i$
$V_m$	1/2	0	0	1/2	1	1	3.0	<b>1.0</b>	<b>5</b>	<b>1.5</b>	<b>1.46</b>
$C_o$	1	1/2	0	0	0	1/2	2.0	<b>0.0</b>	<b>0</b>	<b>2.5</b>	<b>0.33</b>
$S_u$	1	1	1/2	1	1	1/2	5.0	<b>3.0</b>	<b>2</b>	<b>-0.5</b>	<b>2.33</b>
$C_i$	1/2	1	0	1/2	1/2	1	3.5	<b>1.5</b>	<b>4</b>	<b>1.0</b>	<b>1.58</b>
$R_e$	1/2	1	1	1/2	1/2	1	4.5	<b>2.5</b>	<b>7</b>	<b>0.0</b>	<b>2.90</b>
$P_e$	0	1/2	1/2	0	0	1/2	1.5	<b>-0.5</b>	<b>3</b>	<b>3.0</b>	<b>0.56</b>

Dans la figure 5.75 sont représentés les critères sur lesquels s'est basé l'analyse multicritères en fonction de la valeur du coefficient de pondération.



**Fig.5.75.** Pondération des critères.

**Tableau 5.5.** Score final  $N_i \gamma_i$  obtenu par les méthodes d'analyse par TIR.

Critère	Abréviation	$\gamma_i$	Laser à CO <sub>2</sub>	$N_i \gamma_i$	Lampes à halogène	$N_i \gamma_i$
Vitesse de la méthode	Vm	1.46	5	7.3	2	2.92
Cout de l'équipement	Co	0.33	2	0.66	5	1.65
Sécurité de l'utilisateur	Su	2.33	3	6.99	4	9.32
Qualité des images sans aucun traitement	Ci	1.58	4	6.32	5	7.9
Risc de dégradation de l'échantillon	Re	2.90	3	8.7	5	14.5
Possibilité de déplacement de l'équipement	Pe	0.56	2	1.12	4	2.24
				<b>31.09</b>		<b>38.53</b>

A la fin de l'analyse multicritère, a résulté que la méthode optimale de dépistage des défauts internes dans les systèmes biocéramiques, par thermographie infrarouge est la méthode

qui utilise l'excitation thermique à impulsions donnés par des lampes photographiques à halogène.

## **5.2. CONCEPTION DE L'EXPÉRIMENTATION POUR L'ANALYSE DES SYSTÈMES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE EN GÉNIE CIVILE**

La conception de l'expérimentation pour l'analyse des systèmes de génie civile a supposé, en première instance, une bonne maîtrise des structures spécifiques, leur destination et leur comportement thermique. En même temps a été nécessaire d'étudier les phénomènes thermiques qui gouvernent les méthodes d'analyse par thermographie infrarouge et leurs limites. Le but principal a consisté de concevoir une installation expérimentale à l'aide des équipements modernes, avec des performances élevées en vue d'obtenir les résultats désirés et tarés par des erreurs dans les limites acceptables.

### **5.2.1 Objectifs des expérimentations**

Les objectifs importants en vue d'analyser les systèmes utilisés en constructions sont :

1. Appliquer plusieurs méthodes d'auscultation par thermographie infrarouge active sur le même matériau ou sur des matériaux différents ;
2. Détecter des défauts de surface, des fissures, des défauts internes, des inclusions ;
3. Tester plusieurs sources d'excitation thermique ;
4. Contrôler les défauts induits dans les échantillons et les inclusions ;
5. Appliquer des méthodes qui n'affecteraient l'intégrité de l'opérateur ;
6. Conception des routines de calcul pour faciliter l'interprétation des résultats ;
7. Créer la possibilité de développer les méthodes sur d'autres types de matériaux et systèmes utilisés en constructions.

Les étapes suivies pour accomplir les objectifs proposés sont

- concevoir l'installation expérimentale ;
- établir les conditions optimales pour l'expérimentation du point de vue de l'environnement, emplacement du matériel par rapport aux échantillons etc. ;
- dérouler les essais.

### **5.2.2 Choix des méthodes d'analyse par thermographie infrarouge**

Le choix de méthodes utilisées s'est basé sur une étude approfondie des éléments participants aux expérimentations et sur la prise en compte des limitations des équipements visés à fournir des résultats corrects qui ne pourraient pas affecter l'intégrité des systèmes :

1. Analyse du béton par thermographie infrarouge active par excitation thermique avec des microondes en vue de détecter l'armature d'acier englobée ;
2. Analyse du transfert thermique et de la distribution de température dans des plaques de béton armé en utilisant simultanément la thermographie active et un système de senseurs de température ;
3. Détection des défauts dans des matériaux de construction par des essais sur des plaques plâtrées par thermographie infrarouge active avec une source électrique d'excitation thermique ;
4. Analyse des soudures en vue de détecter des défauts (fissures, microfissures, discontinuités, porosités) par induction électromagnétique et thermographie infrarouge en parallèle.

Pour pouvoir accomplir tous les objectifs énoncés plus haut, a été nécessaire de sélectionner une caméra thermographique très nouvelle qui aurait la capacité de détecter des très petites différences de température. Un autre but a été celui d'utiliser une caméra thermographique ordinaire, utilisée dans l'inspection des bâtiments, afin de lui trouver des éventuelles applications dans le laboratoire, dans les cas de l'étude du transfert de chaleur à travers une paroi en béton.

### **5.2.3 Analyse du béton armé par thermographie infrarouge active en vue de détecter l'armature en acier en utilisant un générateur de microondes**

Dans le domaine du contrôle non destructif par thermographie infrarouge active, sont présentées relativement peu d'applications avec signal d'excitation sous forme de microondes. Le plus souvent, les échantillons utilisés étaient de petites dimensions, ce qui permettait de les placer dans la cavité d'un four ou dans un guide de microondes.

En [SamAng2013a] est présenté un système d'excitation à microondes qui permet d'ausculter des échantillons assez volumineux, ce qui correspond mieux aux nécessités du génie civil. Celui-ci permet la transmission directe des microondes vers l'échantillon par l'intermédiaire d'une antenne an forme de cornet.

Les résultats obtenus montrent que le système et la méthode sont opérationnels, avec des perspectives surtout en génie civil. Sur une application classique de type délamination d'un matériau composite, la source s'est avérée d'avoir des possibilités similaires à d'autres sources classiques. La méthode permet de détecter des éléments métalliques de formes diverses (anneaux métalliques, armature de béton, barres) et de les positionner parce que la présence des éléments métalliques occasionne des phénomènes de réflexion, de diffraction et d'interférence des ondes électromagnétiques qui peuvent être observés par les augmentations de températures provoquées.

Les diverses expérimentations menés en modifiant les conditions de sollicitation ; d'observation ou de configuration des échantillons ont accompli l'objectif de démontrer qu'il s'agit bien des phénomènes électromagnétiques dont les gradients de concentration produisent des gradients de température et qu'il n'est pas le cas d'une simple diffusion de chaleur. Les déplacements des point de maximum de température, du décalage entre les profils, les variations de distance entre les extrêmes ont confirmé les résultats de l'étude [SamAng2013a].

### 5.2.3.1. Installation expérimentale

L'installation expérimentale (fig. 5.76) a été réalisée par dr.ing. Sam Ang Keo de l'Université Artois, France. Ici, j'ai aussi participé aux essais et à la fabrication des nouveaux échantillons sous la coordination du Professeur HDR Florin Breaban et du Dr-IGR Frank Brachelet, pendant mon stage à l'Université d'Artois, en 2013.

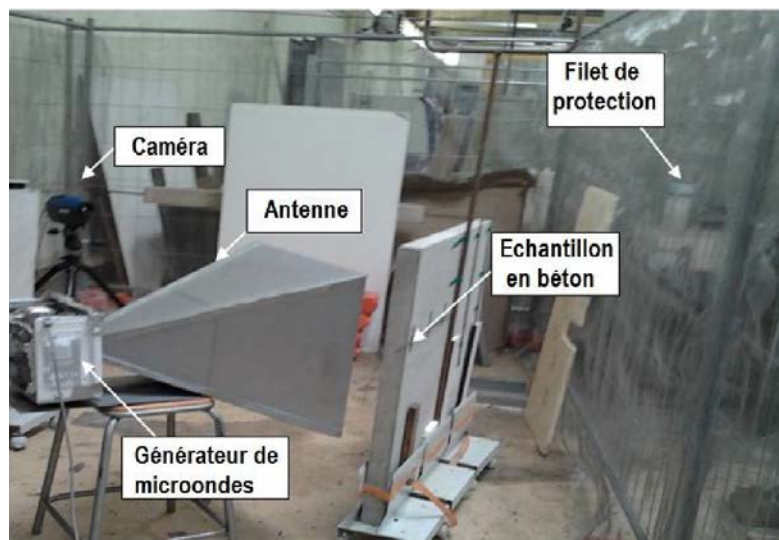


Fig. 5.76. Installation expérimentale.



Les opérations principales de l'expérimentation ont été : établissement des paramètres à étudier, fabrication des échantillons en béton armé et choix du matériel adéquat. L'installation expérimentale présentée dans la figure 5.76 est composée des suivants éléments principaux :

- Générateur de microondes ;
- Antenne pour concentrer et diriger les microondes générées;
- Délimitation et protection de la zone de travail par un réseau métallique spécial ;
- Support pour les échantillons en béton ;
- Système centrale d'acquisition et contrôle de la caméra thermographique ;
- Détecteur pour les fuites de microondes ;
- Caméra thermographique FLIR SC 5000;
- Trépied pour la caméra ;
- Echantillons en béton simple et armé.

### 1. Caméra thermographique

Pour cette expérimentation a été utilisée une caméra thermographique FLIR SC 5000 dont les caractéristiques sont présentées dans la section précédente 5.1.3.1.3.

### 2. Générateur de microondes et l'antenne pour concentrer et diriger les microondes générées

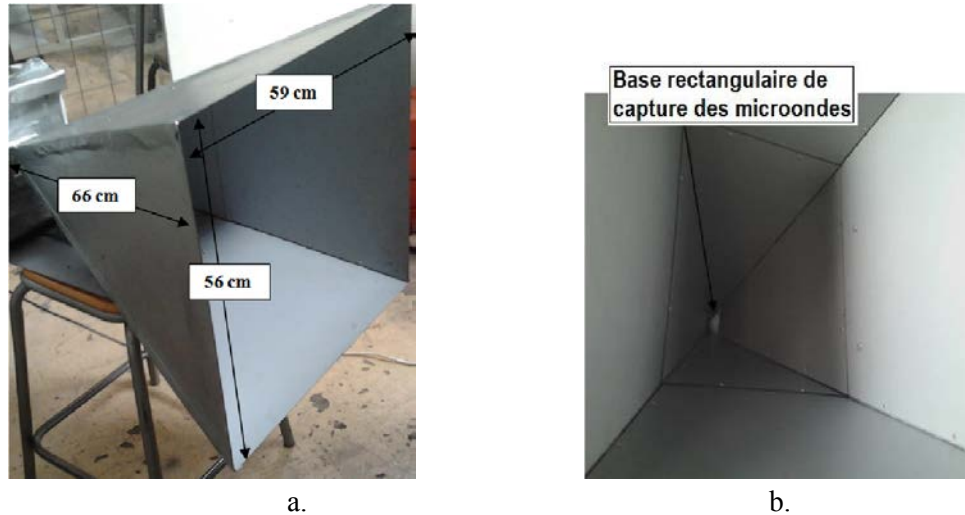
Le générateur de microondes (fig. 5.77) a la base un magnétron ayant un pouvoir maximal de 800 W et une fréquence de 2,45 GHz.



Fig. 5.77. Générateur de microondes.

Dans le but de chauffer l'échantillon en béton armé, une antenne a été nécessaire pour diriger l'énergie électromagnétique vers l'objet analysé. Elle a la capacité d'émettre des radiations électromagnétiques dans le milieu de propagation. Pour diriger l'énergie

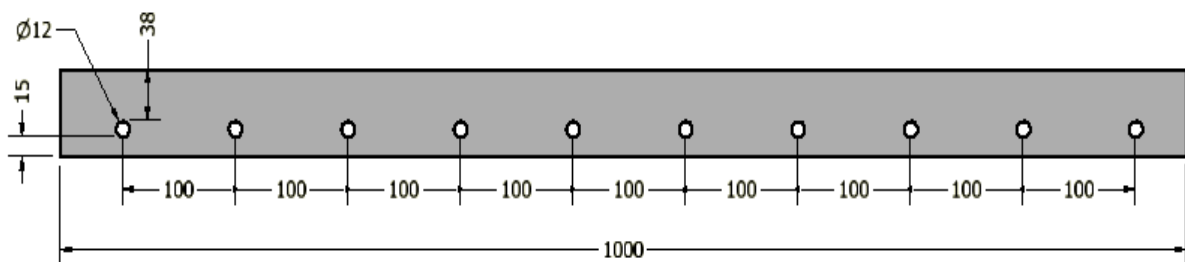
électromagnétique provenant de générateur de microondes, a été choisie une antenne de forme trapézoïdale (fig. 5.78) [SamAng2013a].



**Fig. 5.78.** Vue d'ensemble de l'antenne de transmission des microondes pour l'excitation thermique des échantillons en béton (a); intérieur de l'antenne (b).

### 5.2.3.2. Rezultats

Les échantillons étaient deux plaques en béton, dont une en béton armé, avec des barres en acier de 12 mm en diamètre, placées sur une seule direction à une distance de 100 mm. La couverture de béton était de 15 mm d'un côté et de 38 mm de l'autre côté, ce qui résulte dans une épaisseur totale de la plaque de 65 mm. (fig. 5.79).



**Fig. 5.79.** Section dans la plaque en béton et positionnement des barres d'armature à l'intérieur.

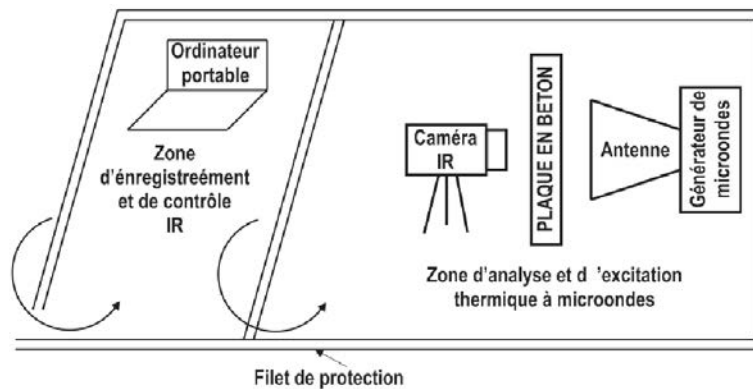
Le but des essais pour cet expérimentation a été de détecter les barres d'armature de l'intérieur des plaques en béton par excitation thermique avec des microondes et l'analyse par thermographie infrarouge. Le temps total d'auscultation a été choisi de 500 s à une fréquence d'enregistrement de la caméra de 5 Hz. La première phase a visé l'enregistrement de la distribution de température sur la surface de l'échantillon maintenu dans le milieu ambiant, à la

température du laboratoire (10 s). Après les premières dix secondes, le générateur est mis en route et la plaque est excitée thermique pendant 300 s. Le reste du temps (190 seconde), l'enregistrement des images thermographique continu pendant la période de refroidissement de l'échantillon. Pour toute la durée résulte un nombre total de  $f \cdot 500 = 5 \cdot 500 = 2500$  images.

Pour tester l'efficacité de la méthode, elle a été appliquée sous différents angles d'emplacement de l'antenne et de la caméra, d'où on résulté trois cas.

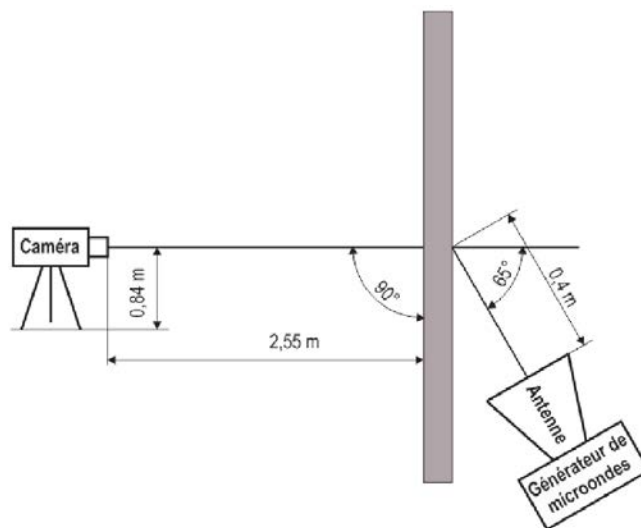
**Ier cas – Caméra placée sur la direction normale au centre de la plaque en béton et l'antenne du générateur à 65° par rapport à la normale**

Dans la figure suivante (fig. 5.80), est présenté le schéma de principe d'analyse par thermographie active à microonde de l'échantillon armé.



**Fig. 5.80.** Le principe d'analyse par thermographie active avec microonde de l'échantillon en béton.

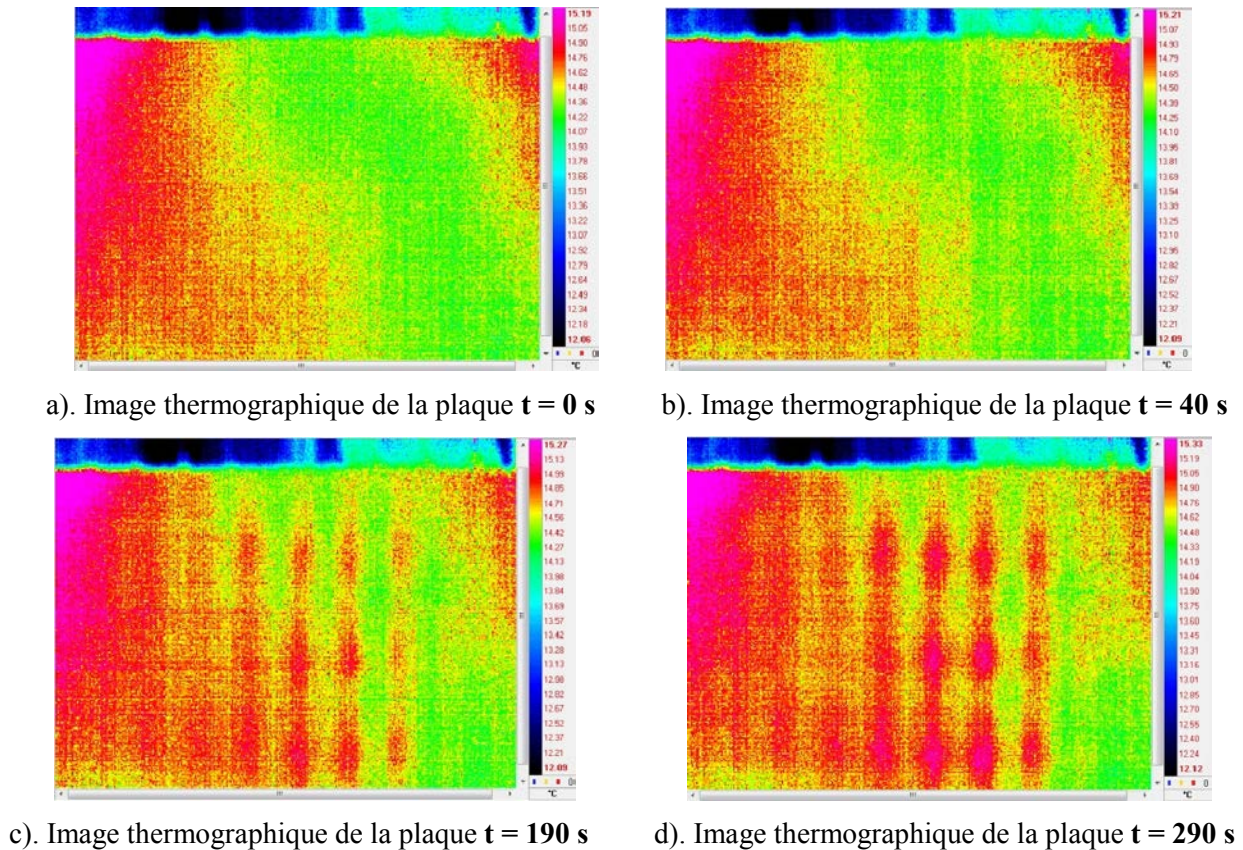
La méthode d'analyse dans ce cas a été celle par transmission, l'échantillon en béton étant placé entre la source d'excitation (générateur de microondes) et la caméra thermographique (fig. 5.81).



**Fig. 5.81** Schéma de l'analyse thermographique de l'échantillon par transmission dans le 1er cas.

L'excitation thermique de l'échantillon a duré 5 minutes durant lesquels une caméra a enregistré des images avec une fréquence de 5 images par seconde.

De l'analyse des images enregistrées par la caméra, on constate que le contraste maximal se produit après 290 s du démarrage du générateur de microondes. Dans la figure 5.82 sont présentée quelques étapes d'échauffement, de la température initiale jusqu'à l'enregistrement du contraste maximale.



**Fig. 5.82.** Distribution de température sur la surface de l'échantillon dans les différents moments de l'excitation thermique.

L'enregistrement et la visualisation des images ont été réalisés avec le logiciel ALTAIR de FLIR Systems. Les mêmes étapes d'échauffement ont été suivies pour tous les cas d'analyse présentés dans les sous-sections suivantes, dans le but de comparer les résultats influencés par l'angle de positionnement du générateur et de son antenne.

Dans la figure 5.83 a été réalisée la représentation graphique de l'évolution de la température en deux points de l'image : un point thermique de l'armature interne du béton et un point de la zone en béton où l'armature n'est pas présente. La température a été analysée dans les deux cas en fonction du temps total d'excitation thermique et de refroidissement de l'échantillon



en béton armé. En analysant la figure 5.83, on peut observer comme la différence de température entre l'échantillon en béton et l'armature en acier devient visible depuis le début de l'excitation thermique avec le générateur de microondes ; la différence maximale enregistrée entre les deux milieux étant de 0,3°C.

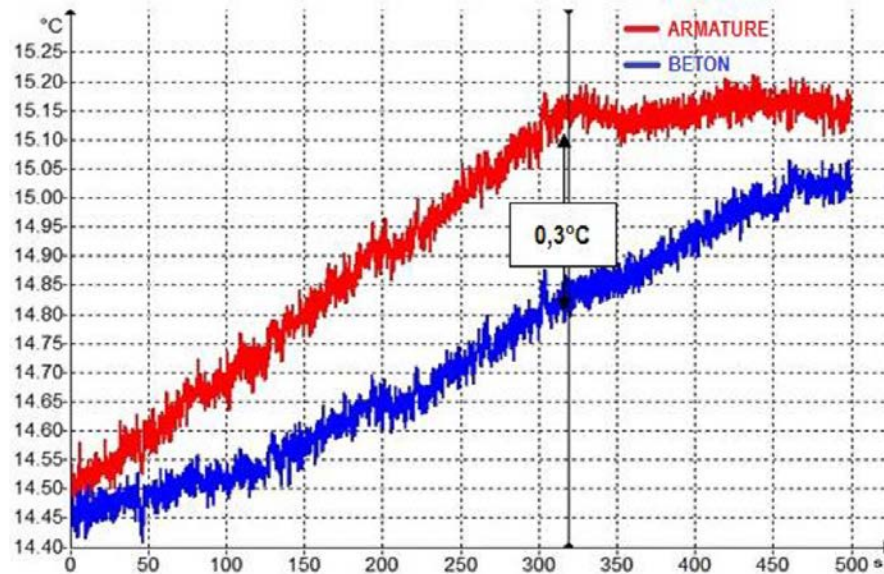


Fig. 5.83. Evolution de la température devant l'armature (rouge) et devant la zone sans armature (bleu).

Pour démontrer et rendre évidente la différence de température entre l'évolution de la température dans la zone de l'armature et l'évolution de la température de l'échantillon en béton, a été nécessaire de déterminer un profile thermique de surface illustré dans la figure 5.84. Dans la figure on observe une croissance de l'amplitude de la température, en fonction du nombre des pixels sur la direction analysée ; sont notées les valeurs indiquant la présence de l'armature en acier seulement dans les zones où elle est la plus visible.

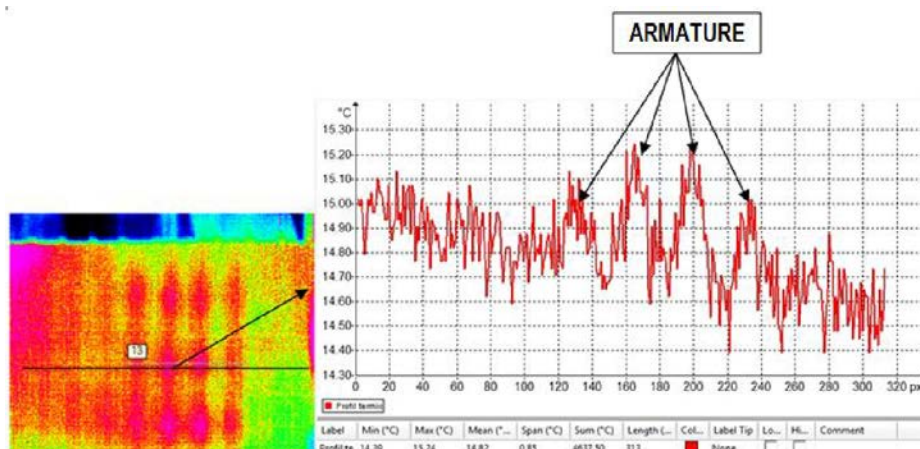


Fig. 5.84. Profile thermique de la plaque en béton après 290 s du démarrage du générateur de microondes.

Pour une meilleure interprétation du profil thermique de la figure 5.65, à base de l'image enregistrée par la caméra, un profil thermique 3D a été créé. Le profil a été conçu en utilisant la physique des couleurs – chaque nuance étant déterminé de sa position sur les axes X, Y et Z. Les axes X et Y de la représentation graphique représente la résolution de la caméra thermographique  $320 \times 240$  pixels, alors que la température déterminée par une certaine nuance représente l'axe Z. Le profil thermique de la plaque en béton, représenté en 2D (fig. 5.66) et en 3D (fig. 5.85), après 290 s du démarrage du générateur de microondes est représentatif pour le moment où le contraste entre le béton et l'armature est maximale.

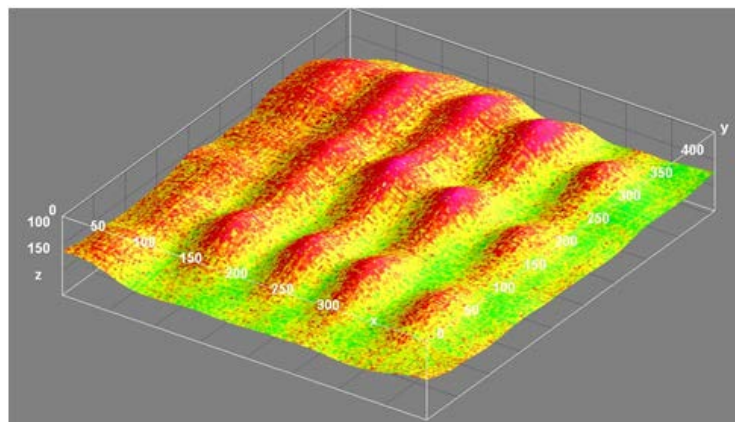


Fig. 5.85. Profil 3D des températures enregistrées sur la surface de l'échantillon.

Pour le même moment, pour connaître la valeur de chaque nuance de couleur de l'image de figure 5.67, a été construite le histogramme de l'image thermographique au moment  $t=290$  s (fig. 5.68). Dans la figure 5.86 on peut voir le nombre total de pixels attribués à chaque nuance de couleur et, automatiquement, à chaque valeur de la température sur la surface de l'image analysée.

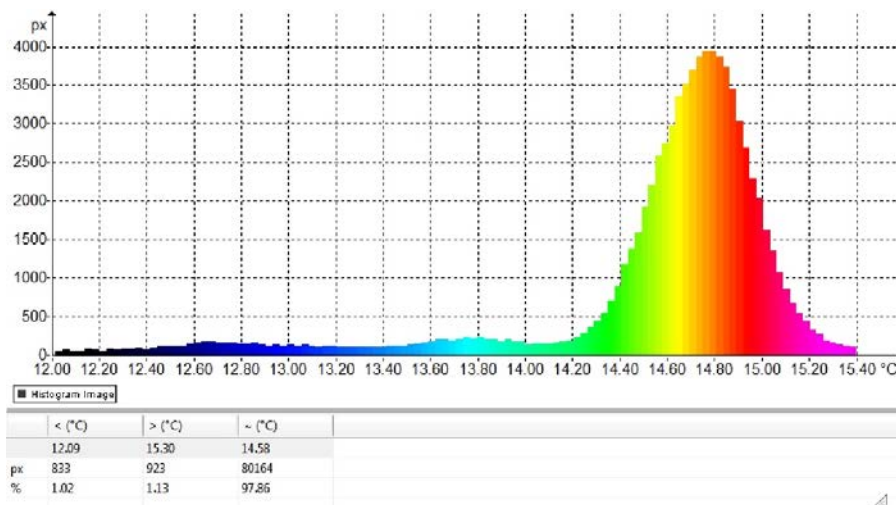


Fig. 5.86. Histogramme de l'image thermographique enregistrée par la caméra au moment  $t=290$  s.

IIème cas – Caméra placée sur la direction normale au centre de la plaque en béton et l'antenne du générateur à 45° par rapport à la normale de l'échantillon en béton

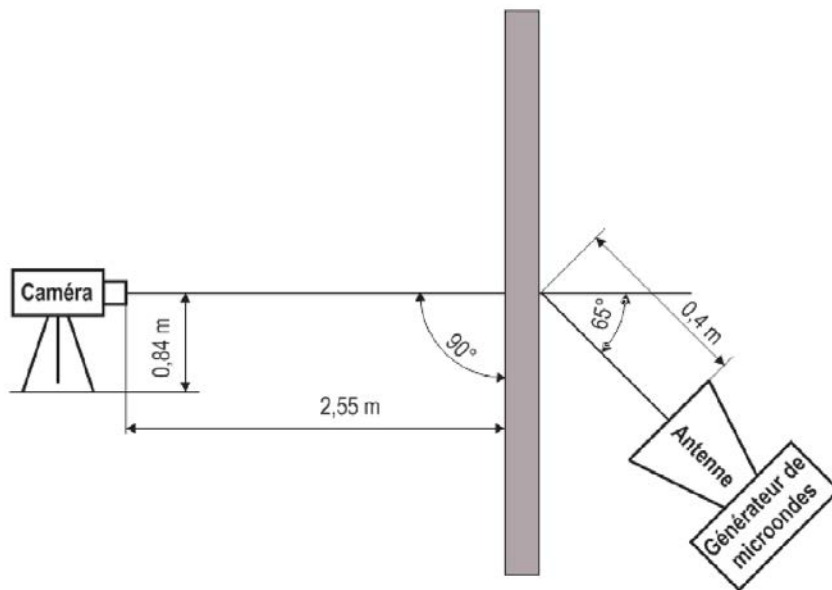


Fig. 5.87. Schéma de l'analyse thermographique de l'échantillon par transmission dans le IIème cas.

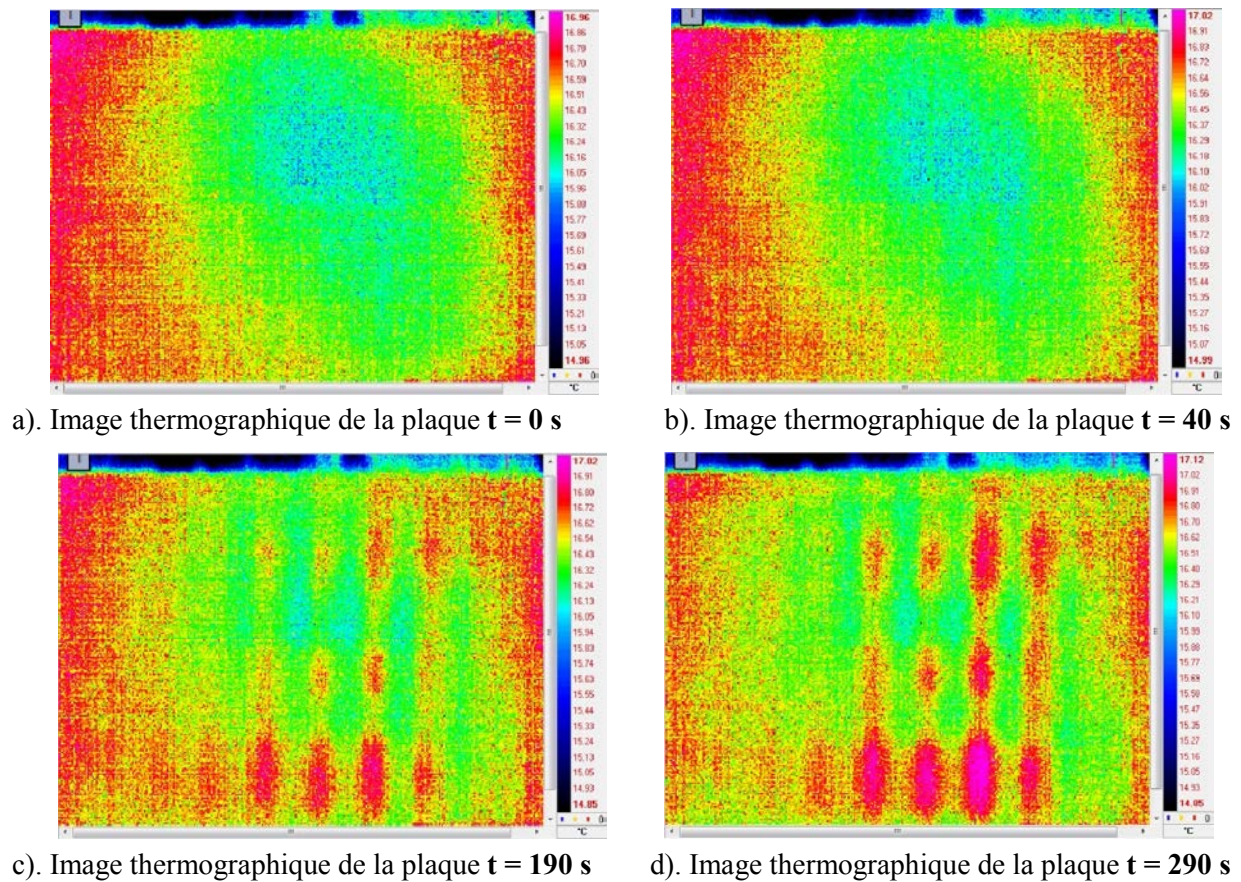


Fig. 5.88. Distribution de température sur la surface de l'échantillon dans les différents moments de l'excitation thermique.



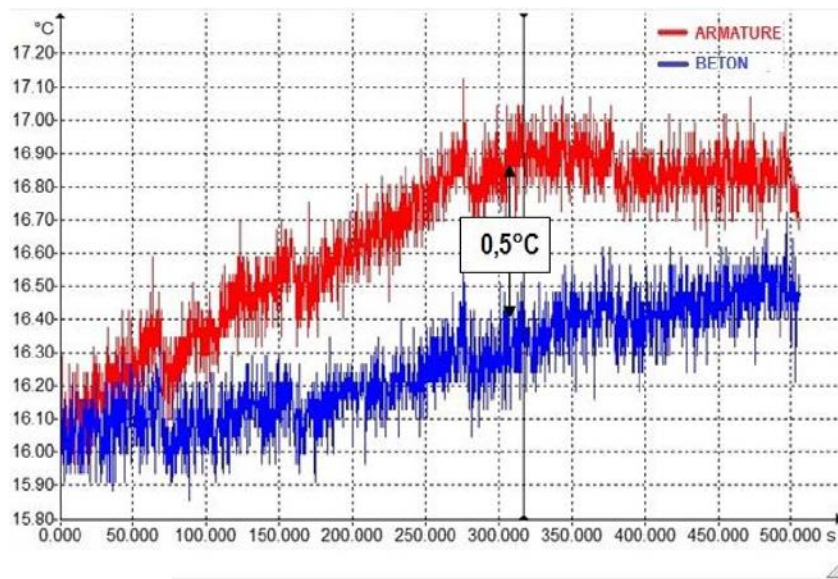


Fig. 5.89. Evolution de la température devant l’armature (rouge) et devant la zone sans armature (bleu).

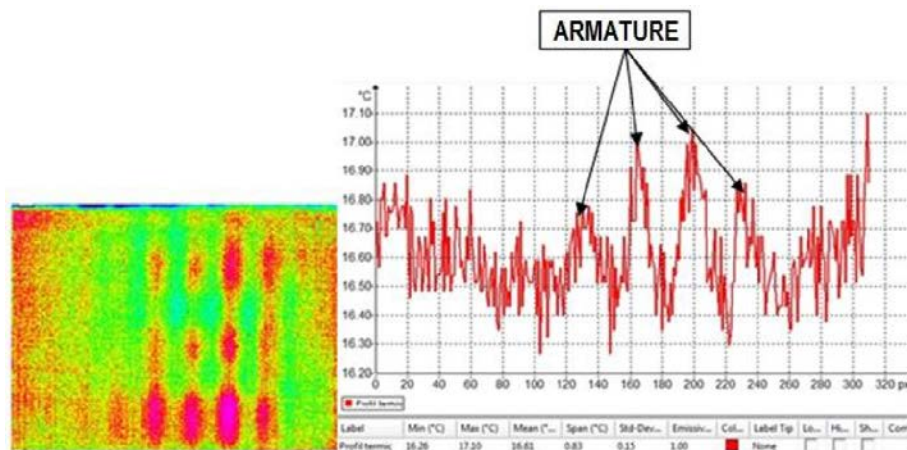


Fig. 5.90. Profile thermique de la plaque en béton après 290 s du démarrage du générateur de microondes.

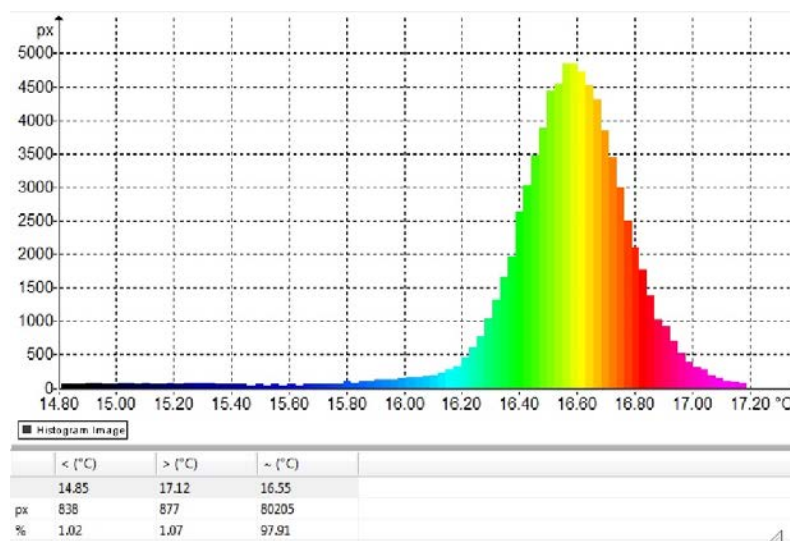


Fig. 5.91. Histogramme de l'image thermographique enregistrée par la caméra au moment  $t=290$  s.

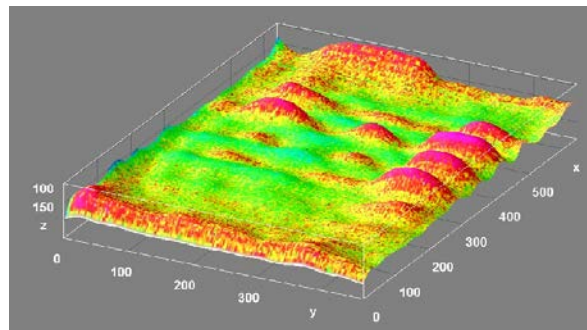


Fig. 5.92. Profile 3D des températures enregistrées sur la surface de l'échantillon.

### IIIème cas – Caméra et l'antenne du générateur placées sur la direction normale, au centre de la plaque en béton

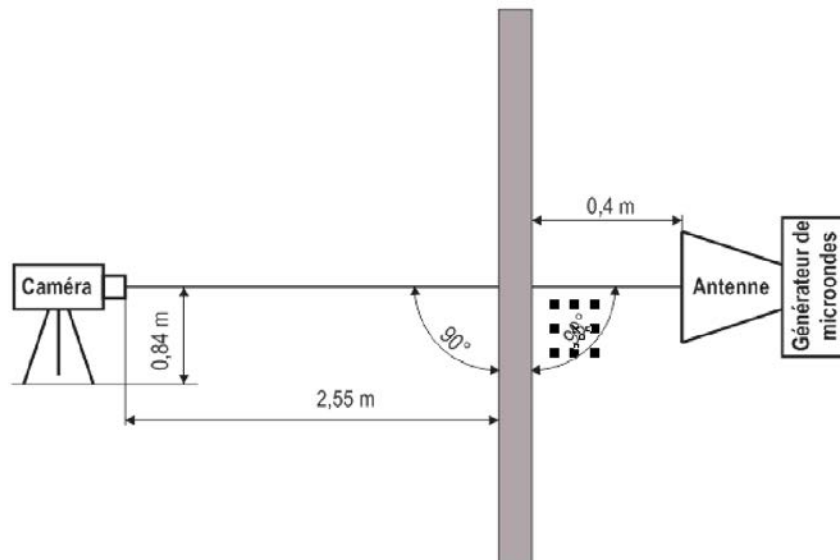
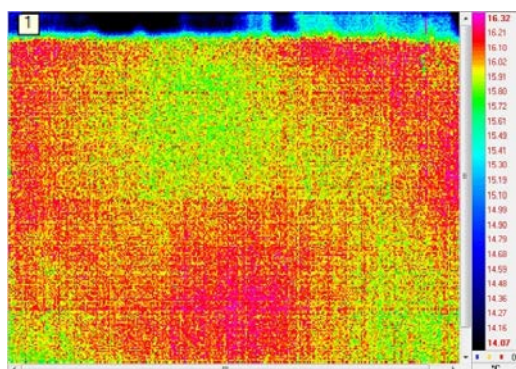
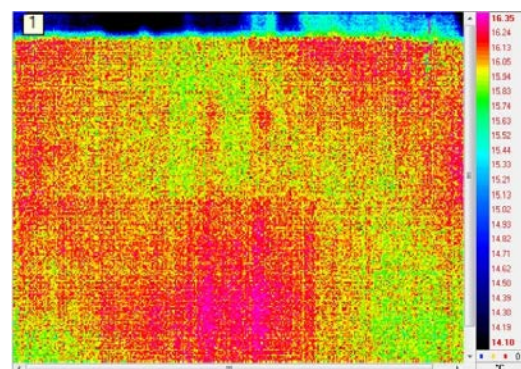


Fig. 5.93. Schéma de l'analyse thermographique de l'échantillon par transmission dans le IIIème cas.

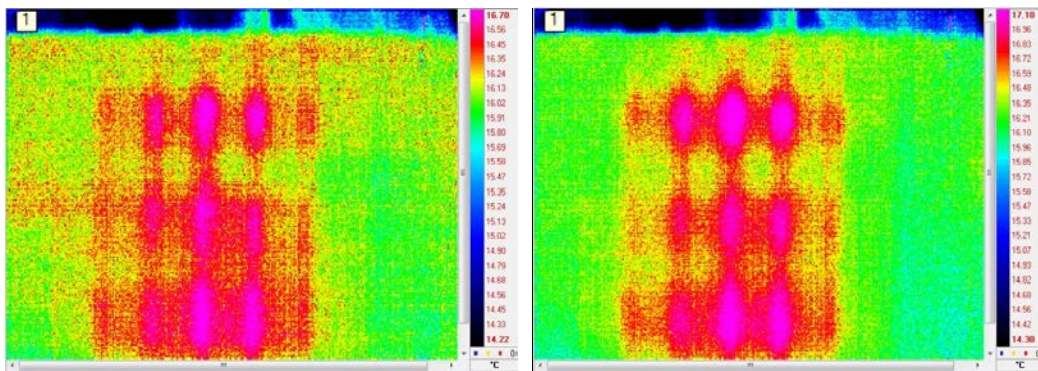


a). Image thermographique de la plaque  $t = 0$  s



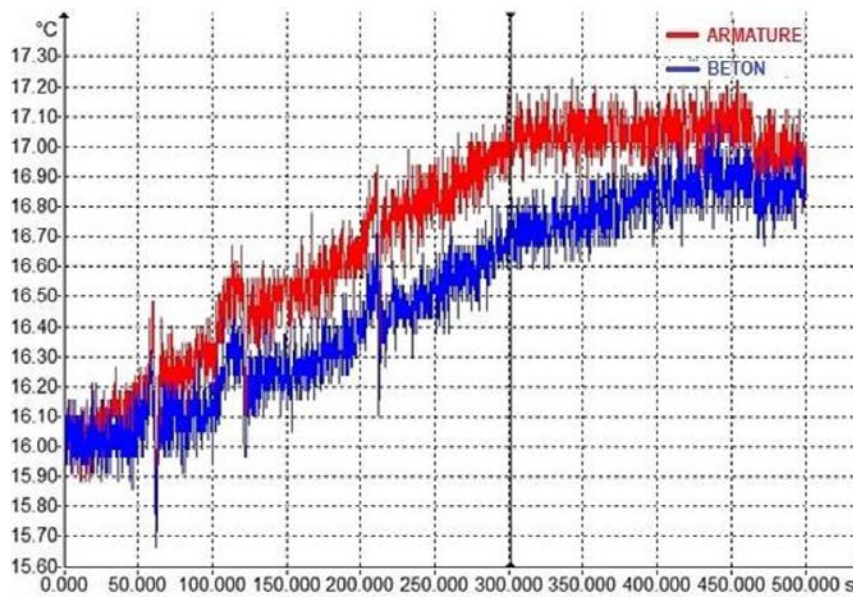
b). Image thermographique de la plaque  $t = 40$  s



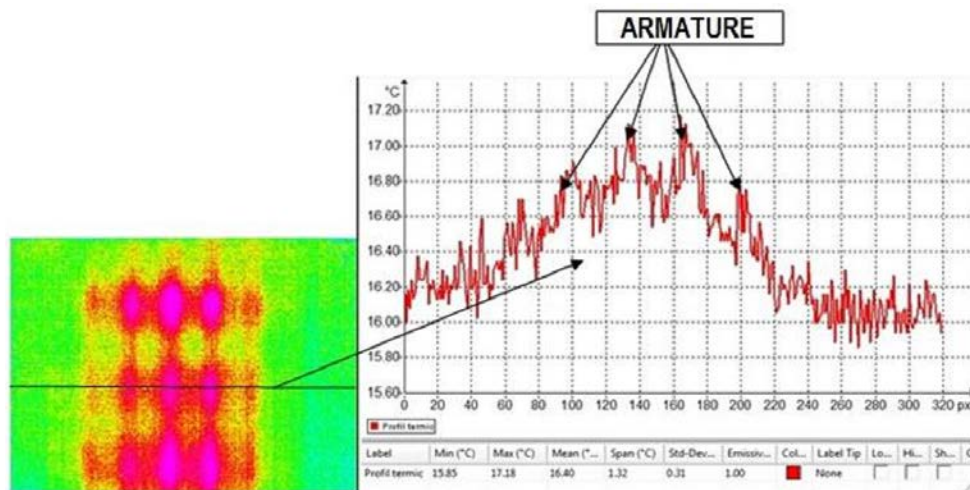


c). Image thermographique de la plaque  $t = 190$  s      d). Image thermographique de la plaque  $t = 290$  s

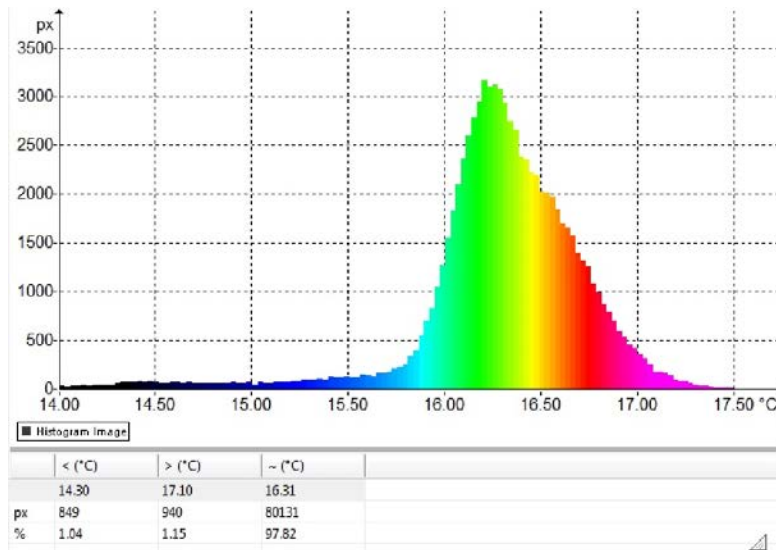
**Fig. 5.94.** Distribution de la température sur la surface de l'échantillon en différentes étapes d'excitation thermique.



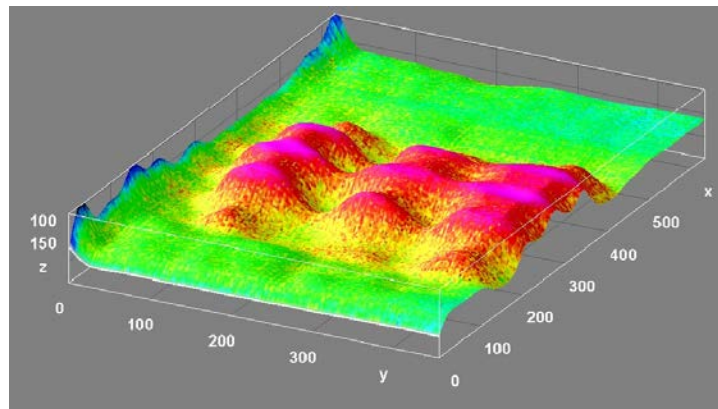
**Fig. 5.95.** Evolution de la température devant l'armature (rouge) et devant la zone sans armature (bleu).



**Fig. 5.96.** Profile thermique de la plaque en béton après 290 s du démarrage du générateur de microondes.



**Fig. 5.97.** Histogramme de l'image thermographique enregistrée par la caméra au moment  $t=290$  s.



**Fig. 5.98.** Profil 3D des températures enregistrées sur la surface de l'échantillon.

#### 5.2.4. Détection des défauts dans les matériaux de construction, essais sur des plaques plâtrées par TIR active avec une source électrique d'excitation thermique

Une autre expérimentation destinée à détecter l'armature du point de vue de sa position et des éventuelles coupures de champ, a été initiée sur un modèle expérimental, d'école, ayant une structure en plaques plâtrées et un réseau d'armature en acier, en utilisant la stimulation thermique donnée par une source électrique (voire l'Annexe 3). Ce type d'expérimentation peut constituer une direction de recherche avec des perspectives de développement importantes dans l'inspection des structures civiles en béton armé.

## 5.2.5 Analyse du transfert thermique et de la distribution de température pour des plaques en béton armé par thermographie infrarouge active et simultanément par un système de senseurs de température

### 5.2.5.1 Echantillon en béton armé

Pour cette expérimentation a été réalisé **un échantillon en béton**, armé au milieu avec des barres en acier, qualité OB37, disposées sous forme d'un réseau à mailles carrées de 10 cm (fig. 5.99).

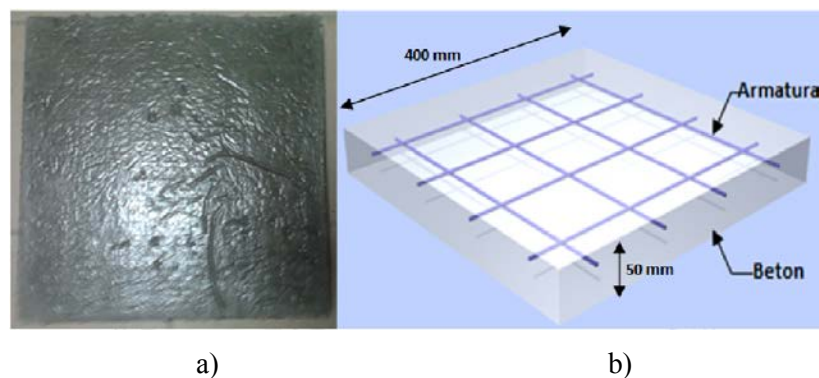


Fig. 5.99. Echantillon en béton armé : image (a) ; modèle 3D (b).

L'échantillon a été fabriqué dans une hale appartenant à une entreprise spécialisée dans la fabrication des préfabriquées en béton. La vérification du matériau utilisé de part de sa qualité pour pouvoir être intégré dans la classe C40/50 a été faite dans un laboratoire spécialisé.

L'échantillon est soutenu pendant les expérimentations par un support, cadre en profile carré d'acier 15×15 mm.

### 5.2.5.2 Installation d'échauffement et de soutien de l'échantillon

L'excitation thermique de l'échantillon en béton armé a été réalisée par **une source de chaleur** de 2000 W. Pour soutenir l'échantillon pendant les expérimentations un cadre en d'acier d'un tuyau rectangulaire de 15×15 mm.

Pour éviter les pertes importantes de chaleur sur le contour de l'installation, on a choisi de la fermer autour avec des briques réfractaires. Compte tenu de la forme et des dimensions de la source de chaleur, entre elle et l'échantillon a été placée une plaque en acier 370×70×10 mm, pour uniformiser la distribution de chaleur (fig. 5.100).

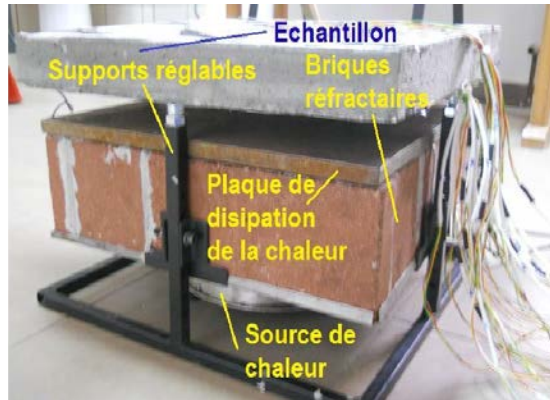


Fig. 5.100. Installation d'échauffement et de fixation de l'échantillon en béton armé.

### 5.2.5.3 Montage du système

La **matrice de senseurs** utilisés en parallèle avec la caméra thermographique est formée par 26 senseurs placés sur la surface de l'échantillon, 13 senseurs sur la face supérieure et 13 autres, sur la partie inférieure (fig. 5.101).

Pour l'acquisition des valeurs enregistrées par les senseurs de température, on a utilisé une **plaque ARDUINO** qui fonctionne à base d'un microcontrôleur Atmel 328P, alors que la programmation, la visualisation et l'enregistrement des données à l'aide d'une routine de programme développée par l'auteur dans le langage correspondant à la plaque.

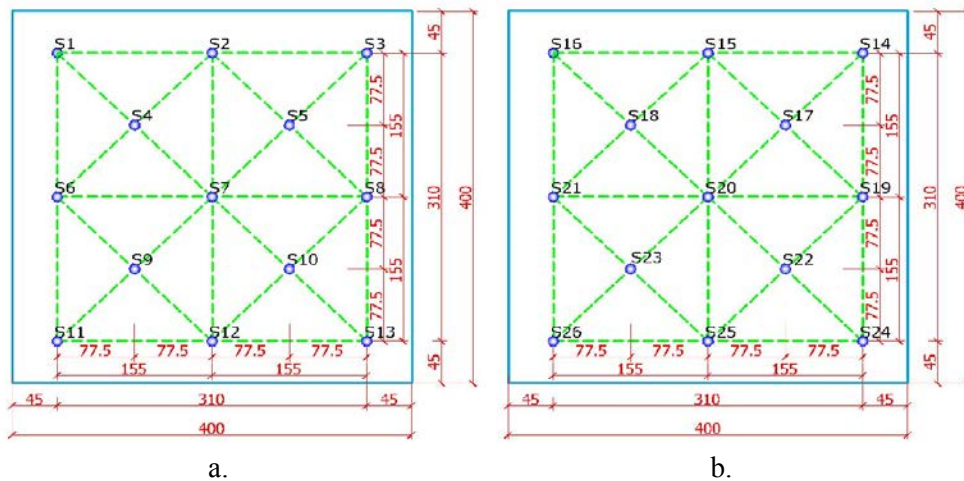


Fig. 5.101. Schéma d'emplacement des senseurs de température sur la surface : supérieure (a) ; inférieure (b).

L'échantillon en béton armé ayant les senseurs de température montés sur lui a été fixé sur le cadre d'acier à une distance de 4 cm par rapport à la plaque de distribution de la chaleur, alors que la caméra thermographique est placée à une distance de 90 cm en tenant compte de la taille de l'échantillon et son encadrement dans l'angle optique de la caméra thermographique. Pour



l'enregistrement des images thermiques, a été utilisée une caméra FLIR BCAM SD qui fonctionne dans le domaine infrarouge ( $7,5 \div 13 \mu\text{m}$ ), un détecteur de type FPA (focal plane array) avec une résolution de  $120 \times 120$  pixels. La caméra fonctionne avec le logiciel ThermalCAM QuickReport 1.2 (fig. 5.102).

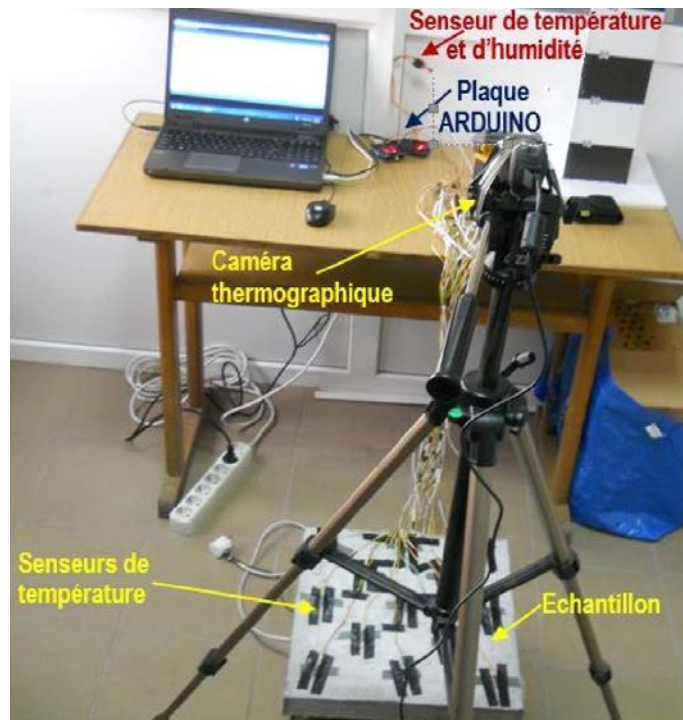


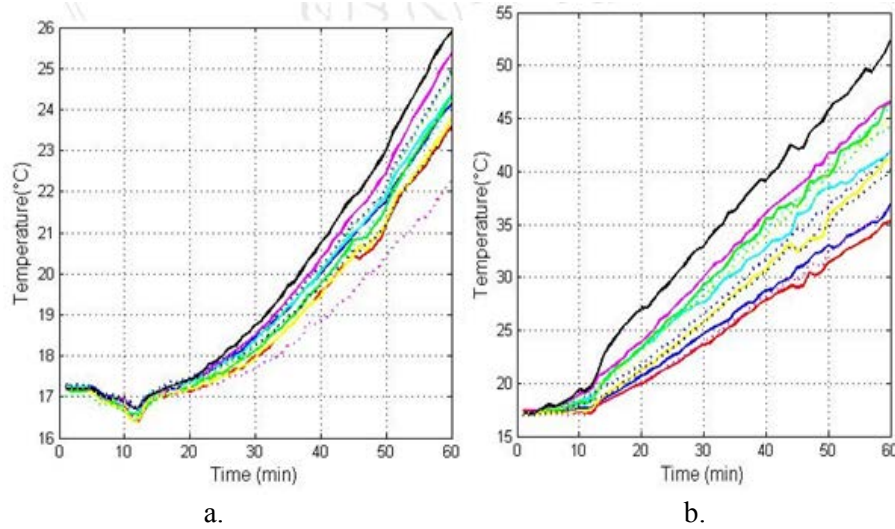
Fig. 5.102. Installation expérimentale.

Durant les essais, le milieu ambiant a été surveillé par un senseur de température et d'humidité. La période d'excitation thermique de l'échantillon a été établie à 60 minutes et l'intervalle d'enregistrement des senseurs de température et de la caméra thermographique a été fixé à 60 secondes. Les mesures ont envisagé la capture simultanée des données des senseurs et des images thermiques. La température ambiante a été prise en compte et, ensuite, la source de chaleur a démarré, l'enregistrement étant fait avec une cadence optimisée par des tests successifs.

#### 5.2.5.4. Rezultats

Les températures sur les deux surfaces de l'échantillon : inférieure et supérieure ont été enregistrées par la matrice de senseurs de température et par la caméra FLIR BCAM SD, en suivant l'évolution en temps de la température, ainsi que les différences entre les deux séries de températures enregistrées à l'aide d'un logiciel numérique - Matlab 2010.





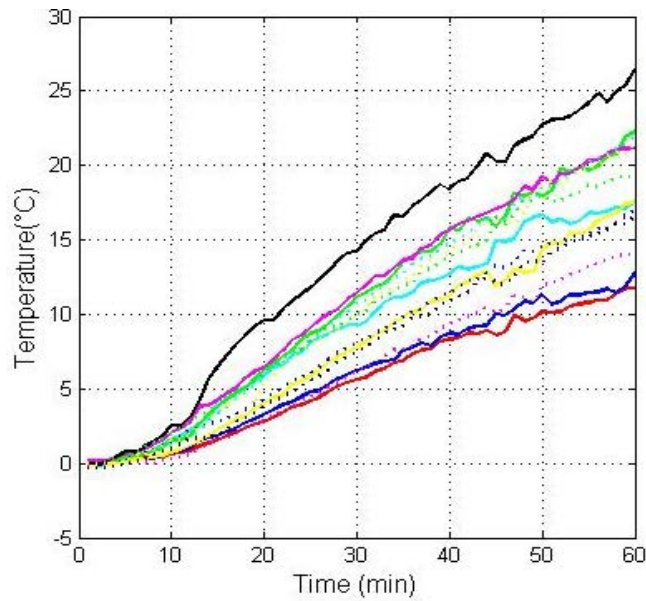
**Fig. 5.103.** Evolution de la température de l'échantillon enregistrées par la matrice de senseurs sur la surface : supérieure (a) ; inférieure (b).

Dans la figure 5.103 on observe l'évolution de la température sur les deux surfaces de l'échantillon : supérieure (visée par la caméra thermographique) et inférieure (surface chauffée par la source de chaleur). En analysant les deux figures, résulte que les températures sur la surface inférieure augmentent plus rapidement et avec des valeurs absolues supérieures par rapport aux températures de la surface supérieure fluctuent plus lentement et avec des valeurs absolues plus petites. On considère que cette situation se doit au fait que les deux surfaces sont séparées par l'échantillon en béton armé avec l'épaisseur de 50 mm et peut constituer le point de départ pour le calcul des coefficients de conductibilité thermique :

$$\Delta T = T_{int} - T_{ext} , \quad (5.8)$$

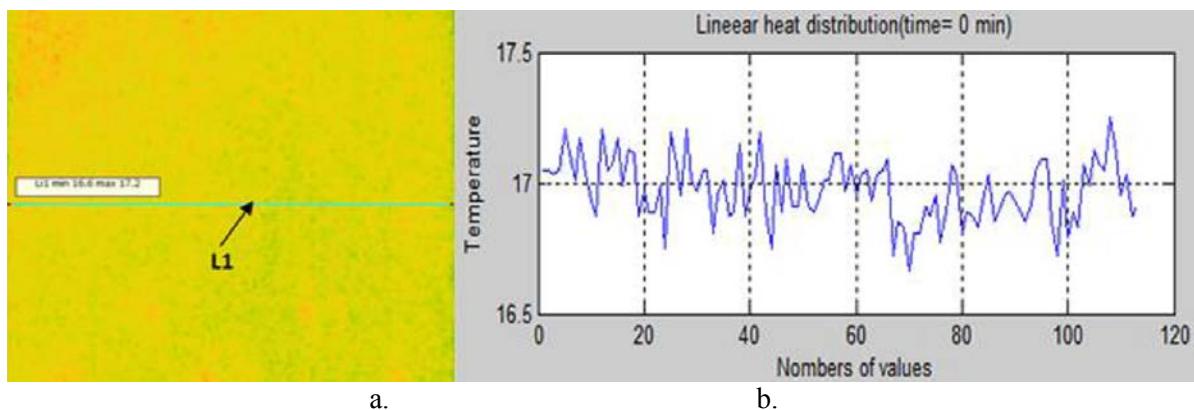
où:  $\Delta T$  est la différence de température entre la surface inférieure et supérieure [°C];  $T_{int}$  sont les températures enregistrées sur la surface inférieure de l'échantillon par les senseurs de température [°C];  $T_{ext}$  sont les températures enregistrées sur la surface supérieure de l'échantillon par les senseurs de température [°C].

Les différences de température entre les valeurs enregistrées par la matrice de senseurs entre les deux surfaces de l'échantillon sont présentées dans la figure 5.104. On peut conclure que dans l'épaisseur de 50 mm de béton entre les deux surfaces, pendant un intervalle de temps de 60 minutes, approximativement 50 % de la quantité de chaleur est absorbée.



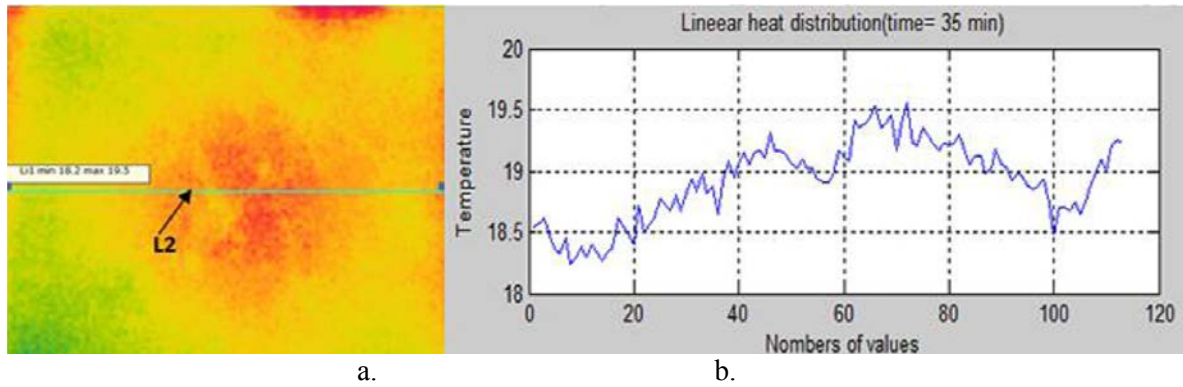
**Fig. 5.104.** Différences entre les valeurs de température enregistrées par la matrice de senseurs entre les deux surfaces de l'échantillon ( $\Delta T$ ).

Durant les essais avec les matrices de senseurs, la surface supérieure de la plaque a été visée avec la caméra thermographique et les cartes thermiques ont été enregistrées avec une cadence de 60 secondes, pendant 60 minutes, à l'aide du logiciel ThermalCAM QuickReport 1.2. L'interprétation des résultats a été faite par une routine de calcul conçue par l'auteur, dans le langage Matlab 2010, les images étant transformées en matrices numériques distribuées en temps.



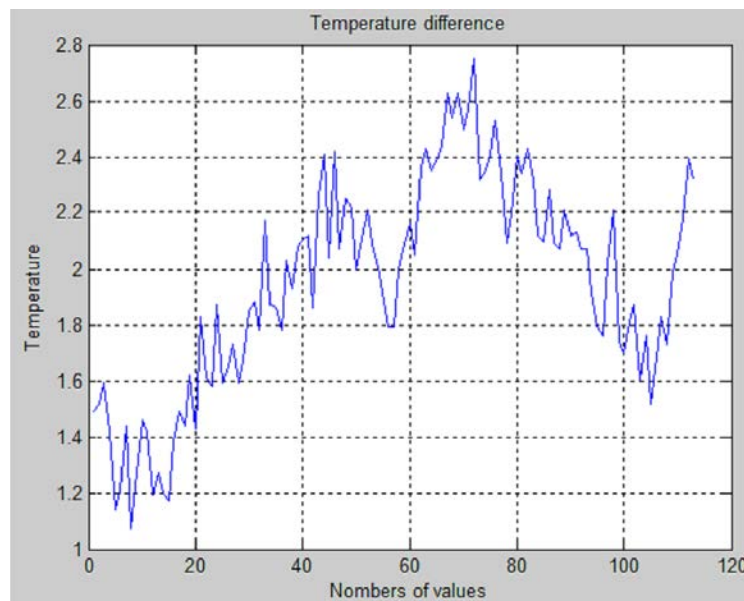
**Fig. 5.105.** Carte thermique initiale de l'échantillon : image (a) ; profil thermique initial sur la ligne *L1* (b).

Dans les figure 5.105 et 5.106 sont montrées les cartes thermiques: initiale et après 35 minutes du démarrage de la source de chaleur, ainsi que le profil thermique résultant après le traitement par la routine en Matlab 2010 pour la ligne thermique indiquée dans les figures.



**Fig. 5.106.** Carte thermique de l'échantillon : image (a) ; profil thermique sur la ligne L2 (b) après 35 min.

Dans la figure 5.107 est montrée l'évolution de la différence entre la température initiale (avant le démarrage de la source de chaleur) et la température enregistrée après 35 minutes du démarrage de l'échauffement, traitée par la routine en Matlab 2010 du profil thermique pour les deux images.



**Fig. 5.107.** Différence de température entre les deux profils thermiques, sur les lignes L1 et L2.

Pour rendre évidente la distribution de température sur la surface de l'échantillon en béton armé, les images thermographiques ont été traitées par un logiciel spécialisé, *ImageJ*.

En utilisant la conversion thermique en couleurs conventionnelles, chaque nuance de l'image occupe un point dans le système de coordonnées.

Dans la figure 5.108 est présenté le profil 3D de l'image thermographique après 35 minutes du démarrage de la source de chaleur. Le profil a été aussi calculé dans Matlab 2010, les données étant ensuite importées pour servir à la réalisation du profil dans le logiciel *ImageJ*.

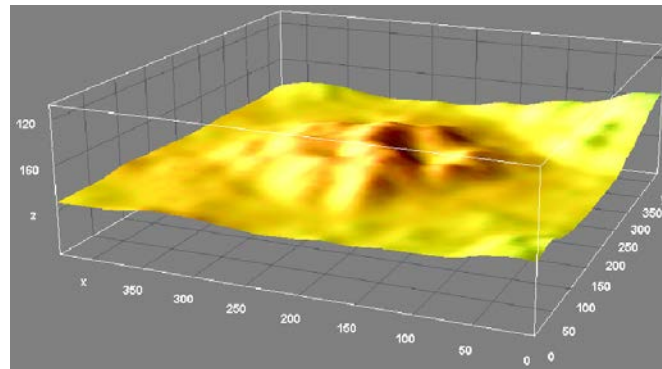


Fig. 5.108. Profile de l'image thermographique après 35 minutes du démarrage de la source de chaleur.

### 5.2.6 Analyse des soudures en vue détecter les défauts (fissures, microfissures, discontinuités, porosités) par thermographie infrarouge et par induction électromagnétique

Cette partie expérimentale a comme but de détecter les défauts dans les joints soudés à l'aide de la thermographie infrarouge active et par induction et de trouver une éventuelle applicabilité ultérieure dans le contrôle non destructif des éléments de structures métalliques soudées, utilisées en constructions. Ce procédé consiste en induire des courants de Foucault dans un matériau conducteur, en général métallique. Les courants ont le rôle de générer un échauffement résistif qui peut être surveillé à l'aide d'une caméra thermographique. Après ce type d'excitation thermique, les fissures se chauffent plus que le reste du matériau homogène dû à une plus grande densité locale de courants de Foucault  $I$  [Gern2012, Udo2008]. Dans la figure 5.109 est représenté le principe de la méthode utilisée dans ces expérimentations.

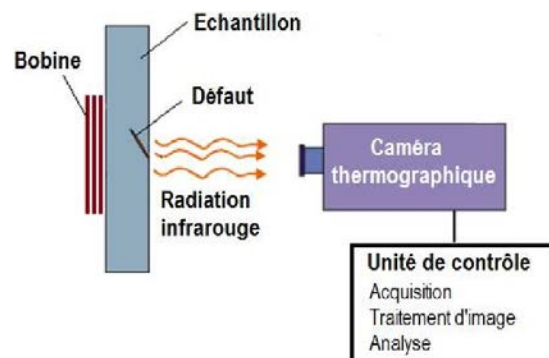


Fig. 5.109. Principe de base de la détection des fissures par thermographie infrarouge active avec induction.

#### 5.2.6.1. Installation expérimentale

Pour dérouler l'expérimentation, ont été réalisés des échantillons sans et avec des différents défauts et une installation expérimentale a dû être conçue (fig. 5.92) :

1. Caméra thermographique FLIR ThermaCam S45 ;
2. Installation d'échauffement des échantillons par induction ;
3. Système central d'acquisition et de contrôle de la caméra thermographique ;
4. Trépied pour la caméra thermographique ;
5. Echantillons à étudier.

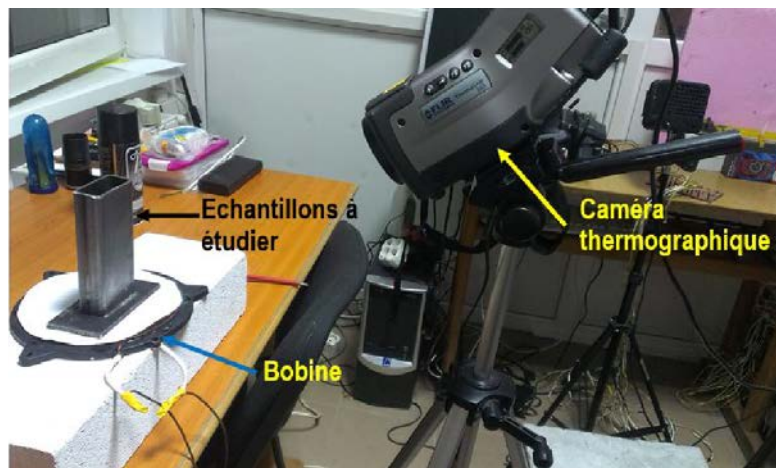


Fig. 5.110. Installation expérimentale.

### 1. Caméra thermographique

Pour l'expérimentation a été utilisée une caméra **thermographique** *FLIR ThermaCam S45* dont les caractéristiques sont présentées dans la première section de ce chapitre (5.1.5.1, point 1).

### 2. Installation d'échauffement par induction des échantillons

L'excitation thermique des échantillons, en vue de détecter les fissures et les microfissures présentes dans les cordons de soudure, a été réalisée en utilisant une **plaque à induction** pour la cuisine laquelle a été modifiée de la manière que sa bobine interne soit directement (fig. 5.111). La bobine fonctionne à une haute fréquence,  $\sim 50$  de kHz, fournie par le générateur de la plaque, alors que le pouvoir était de 2000 W. En même temps, de la plaque ménagère, le programmeur a été aussi utile pour un meilleur contrôle du pouvoir et du temps d'excitation thermique des échantillons.

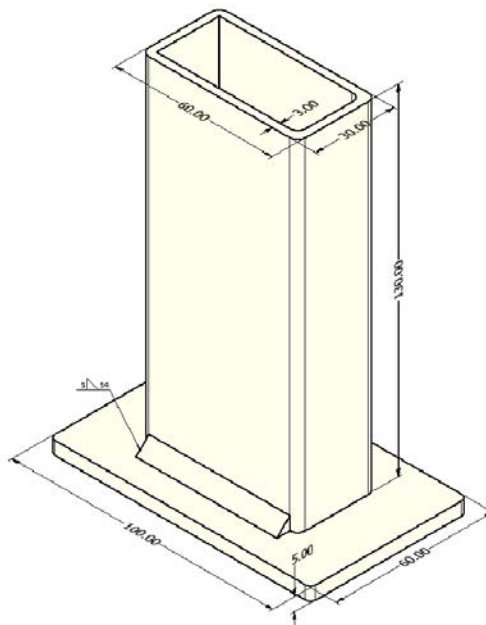




**Fig. 5.111.** Installation d'échauffement des échantillons par induction.

### 3. Echantillons

Les échantillons étaient en acier, résultant d'un profile carré  $30 \times 60 \times 130$  mm, avec l'épaisseur  $g=3$  mm, soudé à la base sur le contour sur une plaque métallique rectangulaire  $60 \times 100$  mm et  $g=5$  mm (fig. 5.112).



**Fig. 5.112.** Dimensions géométriques de l'échantillon.

De ce modèle, ont été réalisés quatre types de d'échantillons : sans défaut, avec une microfissure de taille de  $100 \div 500 \mu\text{m}$  dans le cordonne de soudure (fig. 5.112), avec grande porosité et avec une fissure couverte de peinture. Dans la figure 5.113 on voit la fissure créée dans le cordonne de soudure.

Les échantillons ont été soudés dans des conditions optimales d'équipement et de personnel. Dans la figure 5.114 est montrée l'opération de soudure des échantillons par la technologie WIG (wolfram inerte gaz) avec une seule couche de soudure. Le principe WIG

suppose la formation d'un arc électrique entre l'électrode non fusible en wolfram et le métal à souder. Dans ce cas, l'arc électrique, l'électrode de wolfram et le bain de métal fondu sont protégés par un gaz inerte [VISAN2008].

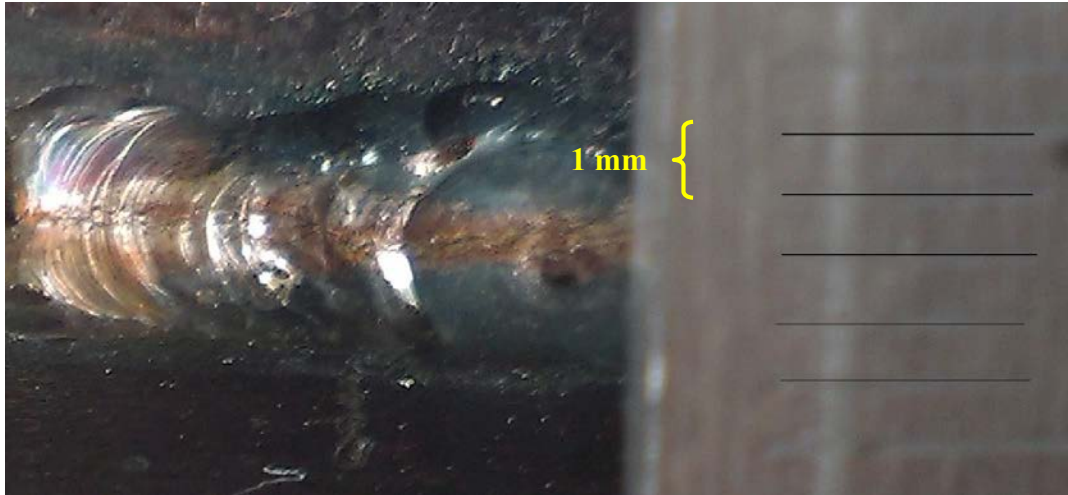


Fig. 5.113. Détail de couture de soudure fissurée.



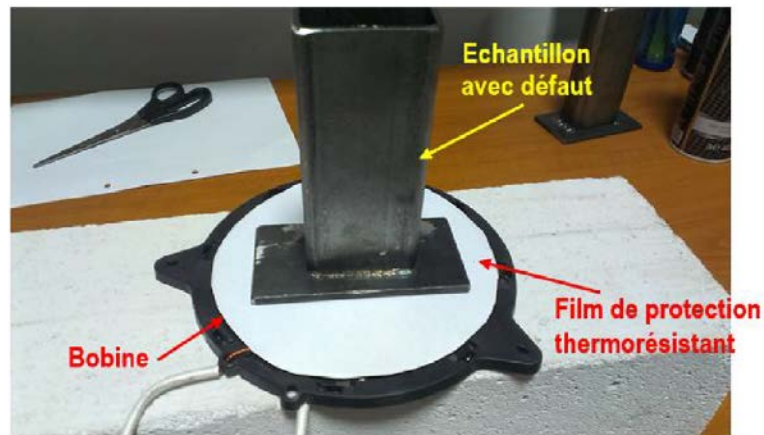
Fig. 5.114. Opération de soudure des échantillons.

#### 4. Resultats dans la détection des mico fissures dans le cordonne de soudure

Dans ce cas a été fabriqué un échantillon dont les dimensions et propriétés ont été présentées plus haut et qui avait induit un défaut en forme de fissure dans le cordonne de soudure en base de la plaque en acier. La fissure a été obtenue par flexion de l'échantillon jusque celui-ci a cédé, ainsi résultant une microfissure de surface.

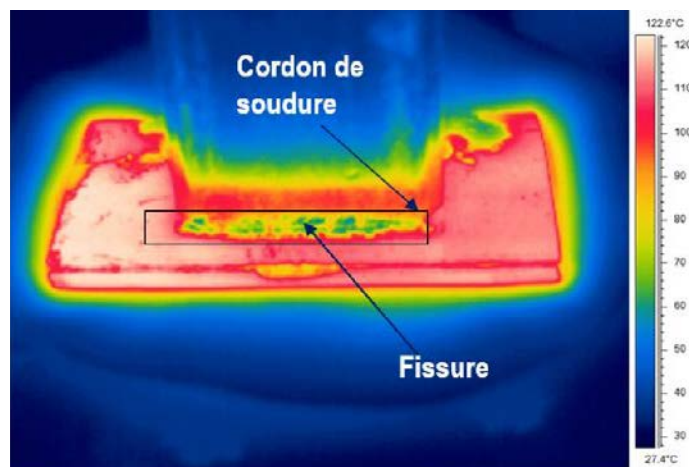
L'échantillon fissuré était ensuite placé sur la bobine (fig.5.115) et excité pendant 20 secondes.





**Fig. 5.115.** Échantillon avec le cordon de soudure fissuré.

Le champ de température émis de l'échantillon a été analysé pendant l'échauffement et le refroidissement, avec la caméra thermographique. Le temps total d'analyse est de 120 s, dont 20 s représente l'excitation thermique, 10 s il reste à sa température initiale et le reste de temps est la période de refroidissement. Dans la figure 5.97 on peut observer sa carte thermique enregistrée pendant le refroidissement, 30 s après l'arrêt de la source.

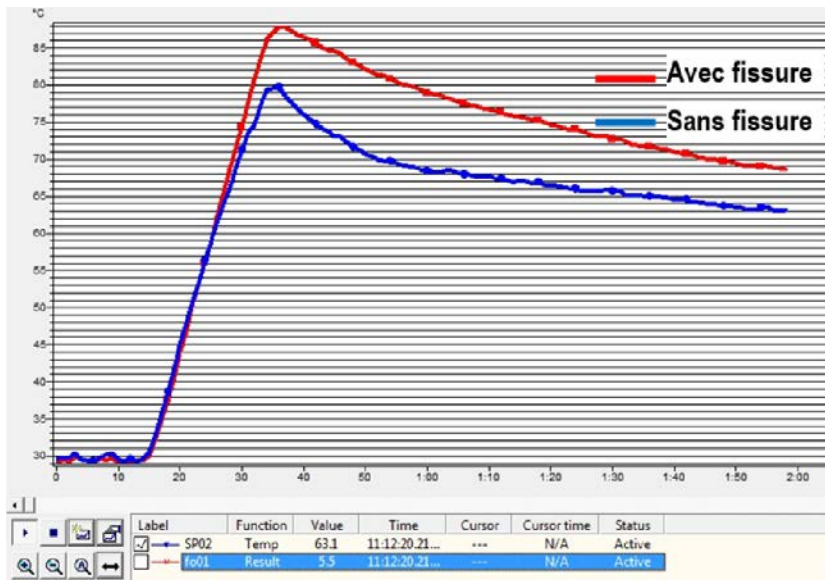


**Fig. 5.116.** Image thermographique de l'échantillon avec une microfissure dans le cordon de soudure, 30 s après l'arrêt de la source.

Pour avoir de l'information claire sur l'influence du défaut dans le gradient de température enregistré, a été nécessaire de réaliser une représentation graphique de l'évolution de la température par rapport au temps, en deux points : un point dans la zone avec fissure et l'autre dans la zone sans fissure (fig. 5.117).

On peut observer de la figure 5.98 une influence nette de la microfissure dans le cordon de soudure pendant la période d'analyse de l'échantillon. On peut observer aussi que le défaut

devient visible tout de suite après l'arrêt de la source d'excitation dans la zone de refroidissement de la variation de température en temps. Celui-ci est provoqué par une augmentation brusque de la température jusqu'àuprès la valeur de 88°C, suivie d'une relaxation de la température dans laquelle la zone avec la fissure influence le gradient thermique enregistré par la caméra thermographique.



**Fig. 5.117.** Représentation graphique de l'évolution de la température par rapport au temps.

Pendant l'analyse de l'échantillon avec fissure dans la couture de soudure, a été enregistrée une différence de température résultant du contraste thermique temporel (fig. 5.99) et exprimée par la relation

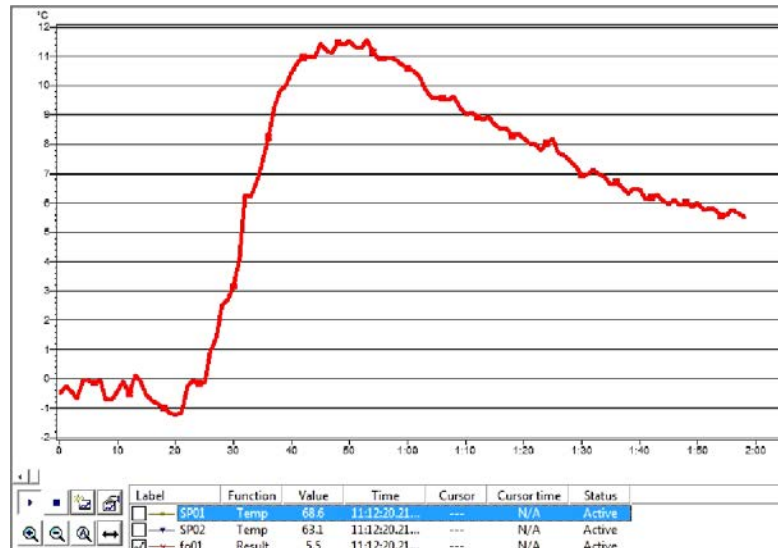
$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_s(t), \quad (5.9)$$

où:  $\Delta T(t)$  représente le contraste thermique temporel,  $T_d(t)$  est la température donnée par le point thermique de la microfissure en fonction du temps d'analyse et  $T_s(t)$  est la température donnée par le point thermique de la zone sans microfissure en fonction du temps d'analyse.

En analysant la figure 5.118, on peut observer une différence maximale de température de 11,70 degrés Celsius après approximativement 20 s de l'arrêt de l'excitation thermique et, aussi, on peut voir que le défaut est visible pendant toute la période d'analyse, en gardant une différence importante entre les températures de la fissure et le reste de la couture soudée.

Dans l'Annexe 4 de cet ouvrage sont présentés les résultats expérimentales concernant la détection des porosités des coutures de soudure, la détection de l'influence de la couverture des

microfissures avec de la peinture et les résultats concernant les éléments soudés avec des coutures soudées continûment et correctement.



**Fig. 5.118.** Contraste thermique temporel entre la zone avec fissure et la zone sans fissure.

## 5.3. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre sont présentées les expérimentations sur l'analyse par thermographie infrarouge active des différents domaines : le génie civil et les biosystèmes. Les tests expérimentaux ont été réalisés dans des laboratoires munis du matériel performant d'analyse, de stimulation thermique et du personnel qualifié pour réaliser des différents types d'échantillons.

### 5.3.1. Conclusions concernant l'analyse expérimentale des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active

Dans le domaine des biocéramiques ont été implémentées les différentes méthodes d'analyse par thermographie infrarouge active dans le but de détecter les différents types des défauts internes et de surface et, en même temps, leur comportement thermique. En plus de la multitude des méthodes d'analyse appliquée, a été démontrée l'efficacité de plusieurs types d'excitation thermique.

*1. Detectarea defectelor interne prin termografie în infraroșu activă utilizând laserul cu CO<sub>2</sub> ca sursă de excitare termică.*

L'utilisation de la thermographie infrarouge active, en utilisant le laser CO<sub>2</sub> dans la détection des défauts internes des matériaux biocéramiques, a constitué un intérêt majeur de cette recherche. Pour les essais expérimentaux ont été créés des échantillons réalisés en conditions de laboratoire sous une surveillance spécialisée particulière. La méthode utilisée a été celle par réflexion et, après analyse des matériaux biocéramiques, nous pouvons énoncer une série de conclusions :

- temps d'excitation thermique et d'analyse réduits, de l'ordre des secondes, jusqu'à la détection du défaut interne ;
- pour l'interprétation des résultats, les logiciels performants ont favorisé des temps réduits de compilation ;
- la méthode s'est avérée efficace, pouvant observer nettement l'apparition du défaut par modifications du gradient de température de la surface des échantillons et sa position dans la masse de matériau ;
- les représentations graphiques soulignent clairement les différences de température et sa distribution par rapport au temps ;
- la méthode a pu être appliquée sur des échantillons avec des surfaces et des défauts petits, d'ordre des millimètres ;
- les résultats obtenus démontrent les perspectives de développement futur de la méthode sur d'autres structures biocéramiques ou composites.

## *2. Détection des défauts de surface et de leurs influences dans le processus de transfert thermique dans les structures biocéramiques par thermographie infrarouge active, en utilisant le laser CO<sub>2</sub> comme source d'excitation thermique*

Dans cette partie, partant des expérimentations précédentes et des installations expérimentales disponible, ont été réalisées des essais qui ont mené à des résultats concluants concernant l'étude de l'influences des défauts et des porosités de surface des structures biocéramiques. La méthode aussi utilisée a été celle par réflexion et elle a été validée par les images thermographiques obtenues et par leurs représentations graphiques permettant de préciser la position du défaut et son influence dans le processus de transfert thermique. La méthode s'est démarquée par :

- temps d'analyse réduits (de l'ordre des secondes) ;
- interprétation des résultats par des logiciels performants ;

- une manière de présentation des résultats qui est simple à visualiser et comprendre le défaut et ses influences dans la structure ;
- la possibilité de détecter des défauts des petites dimensions sur des échantillons avec petites surfaces ( $\sim 0,00016 \text{ m}^2$ ).

### *3. Détection des porosités de surface et de leurs influences dans le processus de transfert thermique dans les structures biocéramiques par thermographie infrarouge active, en utilisant une source électrique pour l'excitation thermique*

Basé sur les déterminations du point antérieur, on a désiré de détecter les porosités de surface des structures biocéramiques par la méthode en transmission. Celle-ci suppose l'excitation thermique d'une surface de l'échantillon et l'analyse avec la caméra thermographique de la surface opposée et du transfert thermique, à travers les propriétés de diffusion thermique, et la visualisation de la distribution de température sur la surface. Mais cette méthode aurait été assez risquée dans le cas du laser  $\text{CO}_2$ , vu les dimensions très réduites de l'échantillon et, par conséquence, pour l'excitation thermique a été choisie une source électrique. Ma méthode s'est avérée d'être efficace, en fournissant des résultats concluants et en aboutissant de détecter les défauts.

### *4. Détection des défauts internes par thermographie infrarouge active, en utilisant des lampes photographiques à halogène pour l'excitation thermique*

L'application de la thermographie infrarouge active en utilisant des lampes photographiques à halogène pour l'excitation thermique dans la détection des défauts internes des biocéramique a démontré, par les résultats interprétés à l'aide des logiciels spéciaux, son faisabilité. Comme dans le cas des défauts détectés en utilisant le laser  $\text{CO}_2$ , a été utilisée la méthode par réflexion dans le désir de trouver une alternative à l'utilisation d'un laser.

## **5.3.2. Conclusions concernant l'analyse expérimentale des systèmes utilisés dans les constructions par thermographie infrarouge active**

### *1. Analyse du béton armé par thermographie infrarouge active dans le but de détecter l'armature en acier en utilisant un générateur de microondes.*

Dans ce cas a été appliquée la thermographie infrarouge comme méthode de détection du réseau d'armature en acier englobe dans des plaques de béton, en utilisant comme part actif

d'excitation thermique un générateur de microondes. La méthode a accompli ce but, étant possible la détection des armatures dans la plaque en béton et, en même temps, a été analysée et précisée leurs influence du point de vue du transfert thermique, en enregistrant des différences de température entre l'armature et le béton. Les logiciels spécialisée ont permis l'interprétation des résultats obtenus par l'analyse thermographique et, ainsi, ont rendues possibles les représentations du gradient de température et de la distribution thermique de la plaque après l'excitation, des profils thermiques par rapport au temps d'excitation, le traitement d'image et l'obtention des profils 3D. Les résultats peuvent être présentés de la manière qu'ils sont facile à interpréter et à comprendre.

*2. Analyse du transfert thermique et de la distribution de température pour des plaques en béton armé, en utilisant la thermographie infrarouge active et un système de senseurs de température.*

En tenant compte de possibilités de l'équipement thermographique qui permet l'analyse de la distribution thermique sur une seule surface, on a envisagé une analyse simultanée des deux surfaces d'une plaque en béton armé en vue d'évaluer le transfert par conductivité à travers une paroi de béton. Ceci s'est réalisé en utilisant des senseurs de température et une plaque de développement avec un microcontrôleur programmable et, en même temps, la plaque de béton a été surveillée du point de vue du gradient de température avec une caméra thermographique.

La capacité d'un mur en béton de retenir et de transmettre la chaleur et la distribution de la chaleur sur sa surface ont été ainsi démontrés. On peut aussi affirmer que par cet expérimentation a été mise en évidence une limite de l'analyse par thermographie infrarouge.

*3. Inspection des coutures de soudure des systèmes de construction en vue de détecter les défauts (fissures, microfissures, discontinuités, porosités) par thermographie infrarouge active avec induction électromagnétique*

Une dernière partie des contributions expérimentales dans l'auscultation par thermographie infrarouge a été constituée par l'analyse des systèmes métalliques des constructions en utilisant l'excitation thermique par induction. Pour ça, a été analysé un pilon métallique soudé sur une plaque de base en acier. Dans cette jointe ont été induits des défauts contrôlés sous forme de fissures, discontinuités et porosités de la couture de soudure.

La méthode s'est avérée d'être applicable et utile, étant possible la détection des microfissures et d'autres défauts et en ouvrant la perspective de son utilisation dans le contrôle non destructif de la qualité des soudures effectuées dans un atelier ou sur un chantier.



Une conclusion de synthèse sur ce chapitre serait qu'il a accompli les objectifs proposés, le but de chaque type d'expérimentation, en fournissant des résultats concrets et, en même temps des ouvertures vers des nouvelles recherches expérimentales dans ce domaine

## CONCLUSIONS. CONTRIBUTIONS ORIGINALES ET VALORISATION DE LA RECHERCHE. PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT DE LA RECHERCHE

La thèse doctorale intitulé *Etudes sur le diagnostic des systèmes par thermographie infrarouge* a eu comme but de d'accomplir des recherches théoriques et pratiques dans le domaine des auscultations non destructives appliquées sur des systèmes conventionnels de génie civil et, aussi, sur des biosystèmes pour des implants.

En général, l'amélioration à long terme des performances des méthodes d'analyse non-destructive des matériaux suppose la conception des nouvelles solutions constructives qui assureraient une meilleure résolution de l'analyse expérimentale et une meilleure implémentation des résultats obtenus dans la conception des matériaux et systèmes nouveaux avec des caractéristiques supérieures sans utiliser à tout prix des installations compliquées et onéreuses.

Ce chapitre met en évidence les conclusions de chaque chapitre, les contributions personnelles et originelles de l'auteur, la valorisation des résultats de la recherche et son possible développement en futur.

### 6.1. CONCLUSIONS FINALES

La recherche décrite dans ce mémoire de thèse s'est proposée de mettre en évidence des nouvelles connaissances dans le domaine des méthodes non destructives d'analyse des systèmes en proposant un concept *d'analyse intégrée* qui pourrait activer les aspects particuliers concernant les technologies de fabrication des matériaux de différents types, partant d'une base commune, indépendamment de leur architecture ou des conditions d'exploitation fonctionnelle spécifiques.

Les *objectifs scientifiques* établis dans une étape initiale ont été intégralement accomplis et ont été matérialisés sous forme de produits innovants avec caractère d'originalité.

Le *Chapitre 2, Étude bibliographique concernant l'analyse des systèmes par thermographie infrarouge*, présente une recherche sur les méthodes d'évaluation non destructive

des systèmes du point de vue de leur classification, leurs performances, des phénomènes physiques sur lesquels elles s'appuient, le mode d'utilisation et le matériel nécessaire pour leur mise en oeuvre.

La première méthode abordée a été l'EN par ultrasons en étalant les explications sur sa signification, les fréquences utilisées, l'appareillage nécessaire et les modes d'application – par transmission et pulse-écho. L'évaluation par ultrasons est une des plus répandue parmi les méthodes non-destructives d'auscultation des matériaux.

En second a été présentée la méthode Impact-écho, applicable seulement en constructions, dans l'inspection du béton et de la maçonnerie. Le principe de base est d'utiliser une sphère qui frappe le matériau à étudier et crée une onde de choc, transformée ultérieurement en signal électrique.

Suivant, a été étudié la méthode d'évaluation non destructive par radiographie – le principe de la méthode, le mode d'utilisation et, en même temps, le risque auquel est soumis l'opérateur dans les situations où elle n'est pas appliquée avec suffisamment de précaution. L'évaluation non destructive par courants de Foucault suppose d'utiliser un champ magnétique alternatif et peut être appliqué pour n'importe quel matériau conducteur électrique.

La recherche développée dans cette thèse a été réalisée pour évaluer la possibilité d'application de toutes ces méthodes d'EN sur deux types de matériaux : le béton et les biocéramiques. A la fin a été constaté que l'application d'une seule méthode pour toute les deux catégories de matériaux est impossible ou, au moins, elle n'est pas sûre pour l'intégrité de leur structure.

C'est pour ça que, finalement, l'option adopté s'est porté sur une autre méthode – la thermographie infrarouge. Elle est aussi une méthode d'auscultation non destructive mais elle n'affecte le fonctionnement ou l'utilité ultérieure de l'objet testé. En comparaison avec les autres méthodes classiques, mentionnées avant, l'acquisition des données par thermographie infrarouge est la seule non invasive et non contact, en permettant l'analyse des surfaces grandes et la détection des défauts internes situés à des profondeurs d'ordre des millimètres [*C.I.-Castanedo*]. Ensuite, ont été présenté des aspects théoriques, des phénomènes sur lesquels la méthode se base, des installations expérimentales utilisées, la classification en fonction du mode d'excitation thermique des matériaux etc..

Le *Chapitre 4, Etudes théoriques sur l'évaluation des systèmes par thermographie infrarouge* s'est occupé des notions liées au transfert thermique, aux propriétés du matériau ainsi

que de l'appareil mathématique à la base des phénomènes de transfert thermique (convection et conduction, radiation). Le transfert thermique à travers des échantillons en béton et en matériaux biocéramiques a été aussi, simulé. Le but de ces expérimentations a été de valider la méthode d'analyse par thermographie infrarouge active.

La première partie du chapitre consiste de la modélisation et de la simulation du comportement de transfert thermique du béton simple et du béton armé. La thermographie infrarouge s'est avérée d'être une méthode bonne et efficace, fournissant des informations correctes sur les habilités de transfert thermique du béton simple et permettant l'utilisation des sources de chaleur afin de détecter le réseau d'armature dans le cas du béton armé.

Dans la deuxième partie a été présentée une étude du comportement thermique des matériaux biocéramiques, dans le but de détecter des défauts internes par leur stimulation thermique. Ici, aussi, la méthode s'est avérée d'être efficace, en fournissant des informations et des résultats qui démontrent la possibilité d'utilisation la thermographie infrarouge dans l'auscultation des matériaux biocéramiques.

Les modèles des échantillons en béton simple et en béton armé, comme ceux en biocéramiques ont été créés par le logiciel SolidWorks. Cette méthode de conception des modèles a permis de représenter des plaques en béton simples et armées, ainsi que des échantillons en biocéramiques avec des défauts internes, contrôlés des différents diamètres.

#### ***Modélisation et simulation par le logiciel Comsol Multiphysics***

Après la conception des modèles géométriques à l'aide du logiciel SolidWorks, a été nécessaire de les analyser par simulation en élément fini dans un logiciel spécialisé - Comsol Multiphysics. L'analyse du comportement thermique es matériaux a permis d'obtenir des résultats concluants, en permettant une modélisation du flux thermique nécessaire à la stimulation thermique des échantillons avec des paramètres imposés et la modélisation du transfert de chaleur. Par l'intermède de cette méthode, les suivantes expérimentations ont pu être conduites avec succès :

- l'intermède de cette méthode, les suivantes expérimentations ont pu être conduites avec succès :
- l'analyse des modifications des gradients de température qui ont permis la visualisation du réseau d'armature de l'intérieur des plaques en béton armé et des défauts internes existants dans les cylindres en matériau biocéramique ;

- la mise en évidence du profil 3D des champs thermiques résultants comme conséquence de la stimulation thermique des matériaux ;
- l'analyse des profils en sections imposées dans les matériaux analysés ;
- la mise en évidence du réseau d'armature du point de vue de l'influence de leur coefficient de conductivité de l'acier, leur diamètre et leur position dans le béton ;
- la génération des graphs de température en fonction du temps d'excitation thermique et du flux thermique.

Le *Chapitre 5, Contributions expérimentales à l'analyse des systèmes par thermographie infrarouge* s'est concentré sur les essais expérimentales concernant l'analyse par thermographie infrarouge active des systèmes appartenant à des différents domaines – le génie civil et l'ingénierie biomédicale. Les expérimentations ont été réalisées dans des laboratoires disposant de matériel performant d'analyse et de fabrication des échantillons. Dans l'analyse expérimentale des systèmes biocéramiques par thermographie infrarouge active, ont été abordées avec succès des différentes méthodes d'analyse par TIR. Ces méthodes ont été appliquées sur des divers matériaux biocéramiques dans le but de détecter des défauts internes et de surface et, en même temps, d'étudier leur comportement thermique.

### ***Conclusions concernant l'analyse expérimentale des matériaux biocéramiques par thermographie infrarouge active***

Dans le domaine des biocéramiques ont été implémentées les différentes méthodes d'analyse par thermographie infrarouge active dans le but de détecter les différents types des défauts internes et de surface et, en même temps, leur comportement thermique. En plus de la multitude des méthodes d'analyse appliquée, a été démontrée l'efficacité de plusieurs types d'excitation thermique.

#### ***1. Détection des défauts internes par thermographie infrarouge active, en utilisant le laser CO<sub>2</sub> comme source d'excitation thermique***

L'utilisation de la thermographie infrarouge active, en utilisant le laser CO<sub>2</sub> dans la détection des défauts internes des matériaux biocéramiques, a constitué un intérêt majeur de cette recherche. Pour les essais expérimentaux ont été créés des échantillons réalisés en conditions de laboratoire sous une surveillance spécialisée particulière. La méthode utilisée a été celle par réflexion et, après analyse des matériaux biocéramiques, nous pouvons énoncer une série de conclusions :

- temps d'excitation thermique et d'analyse réduits, de l'ordre des secondes, jusqu'à la détection du défaut interne ;
- pour l'interprétation des résultats, les logiciels performants ont favorisé des temps réduits de compilation ;
- la méthode s'est avérée efficace, pouvant observer nettement l'apparition du défaut par modifications du gradient de température de la surface des échantillons et sa position dans la masse de matériau ;
- les représentations graphiques soulignent clairement les différences de température et sa distribution par rapport au temps ;
- la méthode a pu être appliquée sur des échantillons avec des surfaces et des défauts petits, d'ordre des millimètres ;
- les résultats obtenus démontrent les perspectives de développement futur de la méthode sur d'autres structures biocéramiques ou composites.

*2. Détection des défauts de surface et de leurs influences dans le processus de transfert thermique dans les structures biocéramiques par thermographie infrarouge active, en utilisant le laser CO2 comme source d'excitation thermique*

Dans cette partie, partant des expérimentations précédentes et des installations expérimentales disponible, ont été réalisées des essais qui ont mené à des résultats concluants concernant l'étude de l'influences des défauts et des porosités de surface des structures biocéramiques. La méthode aussi utilisée a été celle par réflexion et elle a été validée par les images thermographiques obtenues et par leurs représentations graphiques permettant de préciser la position du défaut et son influence dans le processus de transfert thermique. La méthode s'est démarquée par : Timpi reduși de analiză (de ordinul secundelor);

- temps d'analyse réduits (de l'ordre des secondes) ;
- interprétation des résultats par des logiciels performants ;
- une manière de présentation des résultats qui est simple à visualiser et comprendre le défaut et ses influences dans la structure ;
- la possibilité de détecter des défauts des petites dimensions sur des échantillons avec petites surfaces ( $\sim 0,00016 \text{ m}^2$ ) ;
- les résultats obtenus soutiennent les futurs développements de la méthode sur d'autres structures biocéramiques ou composites.

*3. Détection des porosités de surface et de leurs influences dans le processus de transfert thermique dans les structures biocéramiques par thermographie infrarouge active, en utilisant une source électrique pour l'excitation thermique*

Basé sur les déterminations du point antérieur, on a désiré de détecter les porosités de surface des structures biocéramiques par la méthode en transmission. Celle-ci suppose l'excitation thermique d'une surface de l'échantillon et l'analyse avec la caméra thermographique de la surface opposée et du transfert thermique, à travers les propriétés de diffusion thermique, et la visualisation de la distribution de température sur la surface. Mais cette méthode aurait été assez risquée dans le cas du laser CO<sub>2</sub>, vu les dimensions très réduites de l'échantillon et, par conséquent, pour l'excitation thermique a été choisie une source électrique. Ma méthode s'est avérée d'être efficace, en fournissant des résultats concluants et en aboutissant de détecter les défauts.

*3. Détection des porosités de surface et de leurs influences dans le processus de transfert thermique dans les structures biocéramiques par thermographie infrarouge active, en utilisant une source électrique pour l'excitation thermique*

Le but de l'analyse a été de détecter dans les structures biocéramiques les porosités de surface dépassant les limites admises et leurs influences dans la structure du matériau. Mais cette méthode aurait été assez risquée dans le cas du laser CO<sub>2</sub>, vu les dimensions très réduites de l'échantillon et, par conséquent, pour l'excitation thermique a été choisie une source électrique. La méthode s'est avérée d'être efficace, en fournissant des résultats concluants et en aboutissant de détecter les défauts.

## **Conclusions concernant l'analyse expérimentale des systèmes utilisés dans les constructions par thermographie infrarouge active**

*1. Analyse du béton armé par thermographie infrarouge active dans le but de détecter l'armature en acier en utilisant un générateur de microondes*

Dans ce cas a été appliquée la thermographie infrarouge comme méthode de détection du réseau d'armature en acier englobé dans des plaques de béton, en utilisant comme partie active d'excitation thermique un générateur de microondes. La méthode a accompli ce but, étant possible la détection des armatures dans la plaque en béton et, en même temps, a été analysée et précisée leurs influence du point de vue du transfert thermique, en enregistrant des différences de



température entra l'armature et le béton. Les logiciels spécialisée ont permis l'interprétation des résultats obtenus par l'analyse thermographique et, ainsi, ont rendues possibles les représentations du gradient de température et de la distribution thermique de la plaque après l'excitation, des profils thermiques par rapport au temps d'excitation, le traitement d'image et l'obtention des profils 3D. Les résultats peuvent être présentés de la manière qu'ils sont facile à interpréter et à comprendre.

*2. Analyse du transfert thermique et de la distribution de température pour des plaques en béton armé, en utilisant la thermographie infrarouge active et un système de senseurs de température*

En tenant compte de possibilités de l'équipement thermographique qui permet l'analyse de la distribution thermique sur une seule surface, on a envisagé une analyse simultanée des deux surfaces d'une plaque en béton armé en vue d'évaluer le transfert par conductivité à travers une paroi de béton. Ceci s'est réalisé en utilisant des senseurs de température et une plaque de développement avec un microcontrôleur programmable et, en même temps, la plaque de béton a été surveillée du point de vue du gradient de température avec une caméra thermographique.

La capacité d'un mur en béton de retenir et de transmettre la chaleur et la distribution de la chaleur sur sa surface ont été ainsi démontrés. On peut aussi affirmer que par cette expérimentation a été mise en évidence une limite de l'analyse par thermographie infrarouge.

*3. Inspection des coutures de soudure des systèmes de construction en vue de détecter les défauts (fissures, microfissures, discontinuités, porosités) par thermographie infrarouge active avec induction électromagnétique*

Une dernière partie des contributions expérimentales dans l'auscultation par thermographie infrarouge a été constituée par l'analyse des systèmes métalliques des constructions en utilisant l'excitation thermique par induction. Pour ça, a été analysé un pilon métallique soudé sur une plaque de base en acier. Dans cette jointe ont été induits des défauts contrôlés sous forme de fissures, discontinuités et porosités de la couture de soudure.

La méthode s'est avérée d'être applicable et utile, étant possible la détection des microfissures et d'autres défauts et en ouvrant la perspective de son utilisation dans le contrôle non destructif de la qualité des soudures effectuées dans un atelier ou sur un chantier.

## **6.2. CONTRIBUTIONS ORIGINALES**

L'ouvrage s'est proposé une étude détaillée des méthodes non destructives (NDT – non destructive techniques) utilisées, basée sur des références de spécialité et de trouver la solution optimale d'analyse qui permettrait leurs applications aux matériaux dans divers domaines - matériaux biocéramique, matériaux de construction (béton simple, béton armé, structures métalliques), systèmes osseux. La conclusion résultante a été que la méthode applicable à cette fin est la thermographie infrarouge.

Après l'établissement de la méthode optimale, durant la recherche doctorale et la rédaction du mémoire de thèse une série de contributions personnelles et originelles de l'auteur se sont précisées.

### **1. Contributions théoriques**

En ce qui concernent les études théoriques effectuées dans cette thèse on peut mentionner :

- Réalisation d'une étude synthétique théorique des phénomènes de transfert de chaleur qui constituent la base de l'étude des systèmes par thermographie infrarouge ;
- Modélisation géométrique des échantillons en béton et biocéramiques utilisant le logiciel CAD SolidWorks ;
- Modélisation des défauts internes dans les échantillons biocéramiques et la modélisation des barres d'armatures englobées dans les échantillons en béton ;
- Simulation de la réponse thermique des échantillons en béton simple et armé avec des barres en acier ayant les diamètres entre 12 et 16 mm par élément fini avec le logiciel Comsol Multiphysics ;
- Simulation de la réponse thermique des échantillons en HA avec des défauts internes cylindriques ayant les diamètres entre 0,5 et 1,2 mm ;
- Générer les graphs de température et les cartes thermiques résultantes après l'excitation thermique des échantillons.

### **2. Contributions expérimentales**

- Fournissant des échantillons d'essais pour chaque analyse expérimentale et produisant des défauts contrôlés en leur intérieur
- Utilisation des installations expérimentales performantes ayant la capacité de fournir des résultats concluantes et des temps réduits d'analyse par TIR active ;

- Concevoir un programme pour l'interprétation des résultats obtenus par l'analyse expérimentale ;
- Développement d'une méthode d'analyse expérimentale par TIR en utilisant des différentes sources d'excitation thermique: des sources électriques, le laser CO<sub>2</sub>, des lampes photographiques à halogène, un générateur de microondes ;
- Détection des défauts internes ayant des dimensions variées dans les échantillons en matériau biocéramique (HA et H4 doppée avec alumine) par TIR en utilisant le laser CO<sub>2</sub> et des lampes photographiques pour l'excitation thermique ;
- Analyse de l'influence des défauts de surface dans biocéramiques sur le processus de transfert thermique par TIR active en utilisant des sources d'excitation thermique comme : le laser CO<sub>2</sub>, des résistances électriques et des lampes photographiques à halogène ;
- Analyse de la qualité de l'adhérence aux tissus osseux des membranes protétiques en acide polylactique par TIR active avec des lampes photographiques à halogène ;
- Détection du réseau d'armature en acier englobé dans béton par TIR active avec microondes ;
- Analyse du transfert thermique et de la distribution de température dans les plaques en béton armé en utilisant TIR active avec résistance électrique pour l'excitation thermique et, en parallèle, un réseau de senseurs de température pour l'analyse des températures de surfaces sur les deux côtés de la plaque ;
- Dépistage des défauts de type micro-fissures, grande porosité, discontinuités dans les cordons de soudure par TIR active et induction électromagnétique ;
- Mise en forme et la consolidation, basée sur les résultats obtenus et les méthodes étudiées, des conclusions finales de l'ouvrage.

### **6.3. VALORISATION DE LA RECHERCHE**

Les recherches scientifiques effectuées durant le stage doctoral ont conduit à des travaux publiés dans des volumes des conférences nationales et internationales et dans des revues.

La liste des ouvrages publiés par l'auteur de la thèse est :

**[L1]. DRAGAN Razvan Gabriel, ROSCA Ileana – Constanta, MONCHAU Francine, OLTEANU Ciprian, ZAMFIRA Constantin, BALTES Liana, *Active Pulse Thermography***

*Applied to Defect Detection in Bioceramic Materials*, ACME 2014, Iasi, publié en *Applied Mechanics and Materials*, vol. 659, Pp. 371-376, ISSN: 1662-7482, 2014. [link fișier]

<http://www.scientific.net/AMM.659.371>

[L2]. DRAGAN Razvan Gabriel, ROSCA Ileana – Constanta, CAZANGIU Diana and LEONTE Alexantru Stefan, *Thermal Response for a Reinforced Concrete Slab Analyzed with Active Infrared Thermography and Comsol Multiphysics*, *Applied Mechanics and Materials*, ISSN: 1583-7904, International Conference of Advanced Manufacturing Technologies, 2014.

[L3]. LEONTE Alexandru Stefan, NEDELCU Anisor and DRAGAN Razvan Gabriel, *Determination of Optimal Nondestructive Technique (NDT) Using Multi-criteria Analysis*, *Applied Mechanics and Materials*, ISSN: 1583-7904, International Conference of Advanced Manufacturing Technologies ICAMaT 2014.

[L4]. DRAGAN Razvan Gabriel, ROSCA Ileana – Constanta, Sam-Ang KEO, Florin BREABAN, *Active Thermography Method Using an CO<sub>2</sub> Laser for Thermal excitation*, *Applied to Defect Detection in Bioceramic Materials*, E-Health and Bioengineering (EHB 2013) ISBN: 978-1-4799-2372-4, 2013. [link fichier]

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6707235>

[L5]. DRAGAN Razvan Gabriel, ROSCA Ileana – Constanta, Franck BRACHELET, Florin BREABAN, *Active thermography based on the heat transfer process in determining the influence of micro defects in bio-ceramic materials surface*, E-Health and Bioengineering (EHB 2013) ISBN: 978-1-4799-2372-4, 2013. [link fichier]

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6707236>

[L6]. Sam-Ang KEO, Florin Breaban, R.G. DRAGAN, Didier Defer, Franck Brachelet, *Analysis on Effects of Diffraction and Interference on Detection of Steel Reinforcement by Microwave Thermography*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (accepté pour publication)

[L7]. Diana Cazangiu, Razvan Dragan, Ileana Rosca, *Simulation Software Development for Analysis of the Mechanical Behaviour of the Composite Materials*, The 8th International Conference INTER-ENG 2014 Interdisciplinarity en Engineering, Tîrgu - Mureș, România, 2014. (acceptată spre publicare, există dovada)

[L8]. DRAGAN Razvan Gabriel, Sorin – Constantin ZAMFIRA, ROSCA Ileana – Constanta, Ciprian OLTEANU, *Studiul transferului termic și al distribuției de temperatură pe suprafața*

*betonului armat folosind termografia în infraroșu activă și un sistem de senzori de temperatură (Etude du transfert thermique et de la distribution de température sur la surface du béton armé en utilisant la thermographie infrarouge active et un système de senseurs de température)*, dans le volume de la conférence Sesiunea Științifică de Toamnă a Academiei Oamenilor de Știință din România cu tema: Eco-Economia și Dezvoltarea Durabilă (*Session scientifique d'automne de l'Académie des scientifiques de Roumanie avec la thématique Eco-économie et Développement Durable*), Brașov, 2013.

[L9]. Diana CAZANGIU, Gabriel DIMA, **Razvan DRAGAN**, Ileana ROSCA, *Structural Analysis of the Main Rotor Blade for a Light Helicopter – Case of Hovering Flight Mode*, Anals of the Oradea University, volume XIII, 2014.

[L10]. **Razvan Gabriel DRAGAN**, *Optimizarea sistemelor de ventilație cu ajutorul camerelor de termoviziune*, dans le volume de la conférence: A XV – a Sesiune de Comunicări Științifice a Școlii Doctorale Creativitate și Inventică, Brașov, 2012.

Les 10 publications peuvent être systématisées comme suivant:

- - 1 article publié en ISI journal ;
- - 3 article publié en ISI Proceedings;
- - 4 articles dans les volumes des conférences internationales avec comité de lecture – en cours d’indexation ISI proceedings ;
- - 2 articles publiés dans des revues roumaines.

## **6.4. PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT DE LA RECHERCHE**

Partant des résultats obtenus durant la recherche doctorale et tenant compte des multiples développements de la recherche théorique et de l'équipement expérimental utilisés pour accomplir les objectifs de la thèse, le domaine de l'auscultation des systèmes par thermographie infrarouge ouvre des perspectives généreuses d'approfondir des certaines parties de l'étude ou d'aborder des directions connexes :

- Concevoir des modèles mathématiques développés pour le transfert thermique et la réponse thermique des matériaux biocéramiques sous excitation avec des différentes sources – laser, impulsions, électrique etc. ;
- Concevoir des modèles mathématiques développés pour le transfert thermique et la réponse thermique des matériaux utilisés en génie civil sous excitation par induction;

- Vérifier expérimentalement les modèles conçus ;
- Prolonger les méthodes testées sur les échantillons en biocéramiques à d'autres biomatériaux comme, par exemple, les membranes de protection pour les composantes des implants ;
- Adapter les méthodes d'inspection par thermographie infrarouge étudié au bilan thermique des bâtiments et concevoir une méthode rapide et efficace de diagnostic;
- Modélisation par élément fini de l'excitation thermique par microondes dans le cas de la détection des défauts internes et de surface et, aussi, des armatures dans les éléments de construction en béton;
- Développement de l'amélioration des propriétés de matériaux à base de l'analyse par thermographie infrarouge active et passive.

## BIBLIOGRAPHIE

- [Amm1999] F. Ammirato, P. Zayicek, *Infrared Thermography Field Application Guide*, California, USA.
- [Anth1986] Anthony E. Siegman, *Lasers*, May 1.
- [Badea2005] Badea A., *Bazele transferului de căldură și masă*, Editura Academiei, București.
- [Bal2002] C.A. Balaras, A.A. Argiriou, *Infrared thermography for building diagnostics*, *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 171-183.
- [Benit2009] 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.
- [Best2008] S.M. Best, A.E. Porter, E.S. Thian, J.Huang, *Bioceramics: Past, present and for the future*, *European Ceramic Society*, vol. 28, pp. 1319-1327.
- [Bob2005] S. Bobancu, *Creativitate și Inventica*, Universitatea Transilvania.
- [Brown2013] Jeff R. Brown, H.R. Hamilton, *Quantitative infrared thermography inspection for FRP applied to concrete using single pixel analysis*, *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 1292-1302.
- [Burg2000] K.J.L. Burg, S. Porters, J.F. Kellam, *Biomaterial developments for bone tissue engineering*, *Biomaterials*, 2000, 21, 2347–3259.
- [Gaut1998] O. Gauthier, J.M. Bouler, E. Aguado, P. Pilet, G. Daculsi, *Macroporous biphasic calcium phosphate ceramics: influence of macropore diameter and macroporosity percentage on bone ingrowth*, *Biomaterials*, vol. 19, pp. 133-139.
- [Burr2011] 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.
- [Car2001] N.J. Carino, *The Impact-echo Method: an Overview*, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, USA.
- [Chia2008] 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.
- [Chown1983] Chown G, Burn K. *Thermographic identification of building enclosure defects and deficiencies*, *Canadian Building Digest*.



- [Clem2008] Clemente Ibarra-Castanedo, Marc Genest, Jean-Marc Piau, Stéphane Guibert, Abdelhakim Bendada and Xavier P. V. Maldague, Active Infrared Thermography Techniques for the Nondestructive Testing of Materials, Computer Vision and Systems Laboratory, Laval University, Canada.
- [Clem2005] Clemente Ibarra Castanedo, Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase, Faculté des sciences et de génie, Université Laval.
- [Comsol2011] Introduction to Comsol Multiphysics, COMSOL 4.2a.
- [CursOradea] Producerea energiei microundelor. Construcția, funcționarea și protecția magnetronului; tipuri constructive, curs Inginerie electrică și tehnologia informației, Universitatea din Oradea.
- [Dane1998] Danesi S, Salerno A, Wu D, Busse G., Cooling down thermography: principle and results in NDE, Proceeding of the international society for optical engineering, Thermosense XX, Orlando. pp. 266–274.
- [Dara2002] Akbar Darabi, Xavier Maldague, Neural network based defect detection and depth estimation in TNDE, NDT & E International, vol. 35, pp. 165-175.
- [David2005] David E. Henton, Patrick Gruber, Jim Lunt, and Jed Randall, Polylactic Acid Technology, Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites, pp. 527-578.
- [Dragan2013a] **DRAGAN Razvan Gabriel**, ROSCA Ileana – Constanta, Franck BRACHELET, Florin BREABAN, Active thermography based on the heat transfer process in determining the influence of micro defects in bio-ceramic materials surface, E-Health and Bioengineering (EHB 2013) Conference, Iasi.
- [Dragan2013b] **DRAGAN Razvan Gabriel**, Sorin – Constantin ZAMFIRA, ROSCA Ileana – Constanta, Ciprian OLTEANU, Studiul transferului termic și al distribuției de temperatură pe suprafața betonului armat folosind termografia in infraroșu activă și un sistem de senzori de temperatură, Sesiunea Științifică de Toamnă a Academiei Oamenilor de Știință din România cu tema: Eco-Economia și Dezvoltarea Durabilă, Brașov.
- [Dragan2013c] **DRAGAN Razvan Gabriel**, ROSCA Ileana – Constanta, Franck BRACHELET, Florin BREABAN, Active thermography based on the heat transfer process in determining the influence of micro defects in bio-ceramic materials surface, E-Health and Bioengineering (EHB 2013) Conference, Iasi.
- [Dragan2014a] **DRAGAN Razvan Gabriel**, ROSCA Ileana – Constanta, CAZANGIU Diana, LEONTE Alexantru Stefan, Thermal Response for a Reinforced Concrete Slab Analyzed

- with Active Infrared Thermography and Comsol Multiphysics, 7th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies; ICAMaT 2014 București.
- [Dragan2014b] **DRAGAN Razvan Gabriel**, ROSCA Ileana – Constanta, MONCHAU Francine, OLTEANU Ciprian, ZAMFIRA Constantin, BALTES Liana, Active Pulse Thermography Applied to Defect Detection in Bioceramic Materials, The 6th international conference on advanced concepts in mechanical engineering; ACME 2014 Iași.
- [Engin1999] N.O. Engin, A.C. Tas, Manufacture of macroporous calcium hydroxyapatite bioceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 1999, 19, 2569–2572.
- [Eva2002] Evans GR., Brandt K, Katz S, Chauvin P, Otto L, Bogle M, Wang B, Meszlenyi RK, Lu L, Mikos AG, Patrick CW Jr., Bioactive poly(L-lactic acid) conduits seeded with Schwann cells for peripheral nerve regeneration, *Biomaterials*, vol. 23, 841-848.
- [Flaut2001] B. Flautre, M. Descamps, C. Delecourt, M. Blary, P. Hardouin, H.A. Porous ceramic for bone replacement: role of the pores and interconnections-experimental study in the rabbit, *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 2001, 12, 679–682.
- [Flir2012] *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals, A Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry*, FLIR Systems.
- [Gen2011] Genest M., Dudzinski D. C., Bulmer S., Kersey R. K., Crack Detection using Induction Thermography for Thermomechanical Fatigue Tests, *AIP Conference Proceedings*, vol. 1335, pp. 1727.
- [Guib2007] Stéphane Guibert, La thermographie infrarouge a détection synchrone appliquée aux matériaux composites, Maître ès sciences (M.Sc.) Mémoire, Génie électrique, Université Laval, Canada, 2007.
- [Hench1991] L.L. Hench, Bioceramics: From Concept to Clinic, *American Ceramic Society*, vol. 74(7), pp. 1487-1510, 1991.
- [Hong2006] Hongjoon Kim, Kyungyoung Jhang, Minjea Shin, Jaeyeol Kim A noncontact NDE method using a laser generated focused-Lamb wave with enhanced defectdetection ability and spatial resolution, *NDT & E International*, vol. 39, pp. 312-319.
- [Horn2007] J. C. Hornez, F. Chai, F. Monchau, N. Blanchemain, M. Descamps, H.F. Hildebrand, Biological and physico-chemical assessment of hydroxyapatite (HA) with different porosity, *Biomolecular Engineering*, 24, 5, 505-509.
- [Iba2004] C. Ibarra-Castanedo, X.Maldague, Defect Depth Retrieval from Pulsed Phase Thermographic Data on Plexiglas and Aluminum Samples, in *SPIE Procedures Thermosense XXVI*.

- [Incrop] Incropera F.P., De Witt D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, USA.
- [Ioano2012] Teodora Georgiana Ioanovici, Contribuții la sinteza de hidroxiapatită dopată cu magneziu și cercetări asupra proprietăților mecanice in vederea utilizării ei in implanturi osoase, Universitatea “Politehnica” din Timișoara.
- [Jann2008] Yves Jannot, Transferts thermiques, Ecole des Mines Nancy.
- [Jin2009] Jin Ik Lim, Yong-Keun Lee, EVA-enhanced embedding medium for histological analysis of 3D porous scaffold material. *Micron*, 40, , 756-760.
- [Klaw1971] J.J. Klawitter, S.F. Hulbert, Application of porous ceramics for the attachment of load boring orthopaedic applications, *Biomed. Mater. Symp.*, 2, 161–167.
- [Kram2013] A. Kramschuster, L.-S. Turng, Chap. 17 - Fabrication of Tissue Engineering Scaffolds, *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*, pp. 427-446, 2013.
- [Kane2013] Robert Kane<sup>1</sup> and Peter X. Ma, Mimicking the nanostructure of bone matrix to regenerate bone, *Materials Today*, vol. 16, pp. 418-423.
- [Lam1993] K. H. Lam, J. M. Schakenraad H. Esselbrugge, J. Feijen and P. Nieuwenhuis, The effect of phagocytosis of poly(L-lactic acid) fragments on cellular morphology and viability, *Journal of Biomedical Materials Research*, Vol. 27, 1569-1577.
- [Laza2007] Sylvain Lazare, Éric Mottay, *Spectrométries laser en analyse et caractérisation*, Techniques Ingénieur, vol. Référence: R2685.
- [Lel1992] René Leleu, *Transferts de chaleur*, Techniques Ingénieur.
- [Leo2014] LEONTE Alexandru Stefan, NEDELICU Anisor, **DRAGAN Razvan Gabriel**, Determination of Optimal Nondestructive Technique (NDT) Using Multi-criteria, Analysis 7<sup>th</sup> International Conference on Advanced Manufacturing Technologies; ICAMaT 2014, Bucureșt.
- [Liu2012] 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.
- [Liu2013] Y. Liu, J. Lim, S. H. Teoh, Review: Development of clinically relevant scaffolds for vascularised bone tissue engineering, *Biotechnology Advances*, vol. 31, pp. 688-705.
- [Maier2005] Ch. Maierhofer, A. Brink, M. Rollig, H. Wiggerhauser, 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.

- [MAld1993] Maldague XPV. Non-destructive evaluation of materials by infrared thermography, London.
- [Mald1998] 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.
- [Mald2001] X. Maldague, Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation, Laval University, Quebec, Canada.
- [Man2008] 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.
- [Monch2001] F. Monchau, Elaboration et caractérisations physico-chimiques et biologiques de biocéramiques utilisées comme substituts osseux. Thèse de doctorat d'université, Université de Lille 2.
- [Mura2008] Marius Murariua, Amália Da Silva Ferreira, Mirosław Pluta, Leila Bonnauda, Michaël Alexandria, Philippe Dubois, Polylactide (PLA)–CaSO<sub>4</sub> composites toughened with low molecular weight and polymeric ester-like plasticizers and related performances, *European Polymer Journal*, vol. 44, pp. 3842–3852.
- [NE 012-1:2007] Normativ pentru producerea și executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat.
- [Nguy2013] Nguyen Trong-Khoa. Modélisation de l'écoulement dans une biocéramique à pores sphériques interconnectés. Application aux bioréacteurs, Thèse de doctorat d'université, Université d'Artois.
- [Ohji2013] T. Ohji, Chapter 11.2.2 – Porous Ceramic Materials, *Handbook of Advanced Ceramics (Second Edition)*, pp. 1131-1148.
- [Paul2005] Paul E. Mix, *Introduction to Nondestructive Testing - Second Edition*.
- [Pett1980] Petterson B, Axen B. Thermography; testing of the thermal insulation and airtightness of buildings, Swedish Council for Building Research, Stockholm.
- [Petr2014] Petrescu Rareș, Studii privind obținerea membranelor din acid polilactic, Universitatea Transilvania din Brașov.
- [Rap2006] P. Rapișca, *Materiale de construcții*.
- [Rapa2011] Maria RÂPĂ, Elena GROSU, Andreiana SCHEAU, Cristian Florian STĂNESCU, Tehnologii Disponibile pentru Procesarea Polimerilor Biodegradabili, Simpozionul „Impactul Acquis-ului comunitar asupra echipamentelor și tehnologiilor de mediu - ACQUISTEM“, ediția a VIII-a, Agigea.

- [Rous2003] Georges Roussy, Jean-François Rochas, Claude Oberlin, *Chauffage diélectrique - Technologies, Techniques Ingénieur*, vol. Référence D5941.
- [Sal2012] A. Salerno, S. Zeppetelli, E. Di Maio, S. Iannace, P.A. Netti, Architecture and properties of bimodal porous scaffolds for bone regeneration prepared via supercritical CO<sub>2</sub> foaming and porogen leaching combined process, *The Journal of Supercritical Fluids*, vol.67, pp. 114-122.
- [SamAng2013a] Sam Ang KEO, Développement d'une méthode de thermographie infrarouge active par excitation micro-ondes appliquée au contrôle non destructif, L'université D'Artois Faculté des Sciences Appliquées de Béthune, Thèse soutenue le 9 décembre.
- [SamAng2013b] Sam-Ang Keo, Franck Brachelet, Florin Breaban, and Didier Defer, Development of an Infrared Thermography Method with CO<sub>2</sub> Laser Excitation, Applied to Defect Detection in CFRP, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 80.
- [Shull2001] Peter J. Shull, *Nondestructive Evaluation Theory, Techniques, and Applications*, the Pennsylvania State University Altoona, Pennsylvania.
- [Tao2010] Tao Du, Thermographie infrarouge active par induction électromagnétique application à l'auscultation d'éléments en béton renforcé, L'université D'Artois Faculté des Sciences Appliquées de Béthune, Thèse soutenue le 29 Juin.
- [Udo2008] Udo NETZELMANN and Günter WALLE, Induction Thermography as a Tool for Reliable Detection of Surface Defects in Forged Components, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.
- [Val2000] 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.
- [Visan2008] Daniel VIȘAN, Tehnologii de Sudare, Universitatea "Dunărea de Jos", Galați.
- [Wald2009] Waldemar Minkina, Sebastian Dudzik, *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*.
- [Xav2001] Xavier P.V. MALDAGUE, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. Canada.
- [Xiao2014] Xiao Chen, Dibo Hou, Ling Zhao, Pingjie Huang, Guangxin Zhang, Study on defect classification in multi-layer structures based on Fisher linear discriminate analysis by using pulsed eddy current technique, *NDT & E International*, vol. 67, pp. 46-5.
- [Yosh1997] E. Yoshii, Cytotoxic effects of acrylates and methacrylates: Relationships of monomer structures and cytotoxicity, *J. Biomed. Mat. Res.*, 37, pp.517-524.

# ANNEXES

## Annexe 1

### 1.1. Modélisation de la réponse thermique pour une plaque en béton armé (barres $\varnothing=14$ mm)

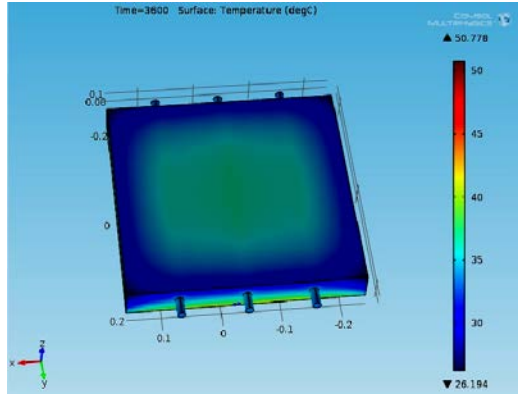


Fig. 1.1. Distribution thermique sur la surface extérieure de la plaque en béton armé après 60 minutes.

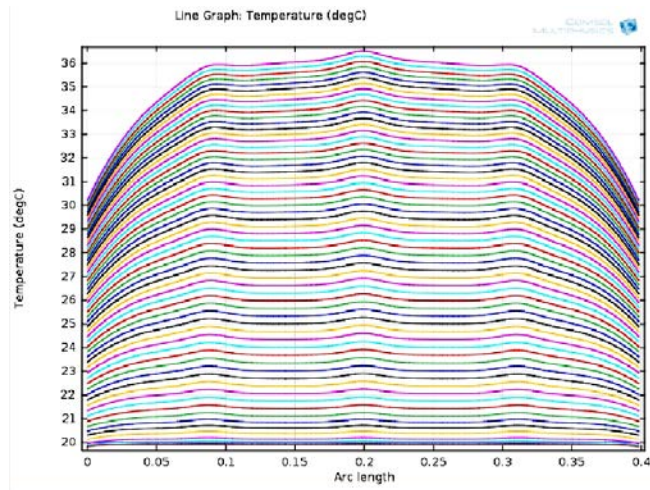


Fig. 1.2. Profil thermique de la plaque en béton armé avec des barres  $\varnothing 14$  mm distribué en temps (surface supérieure).

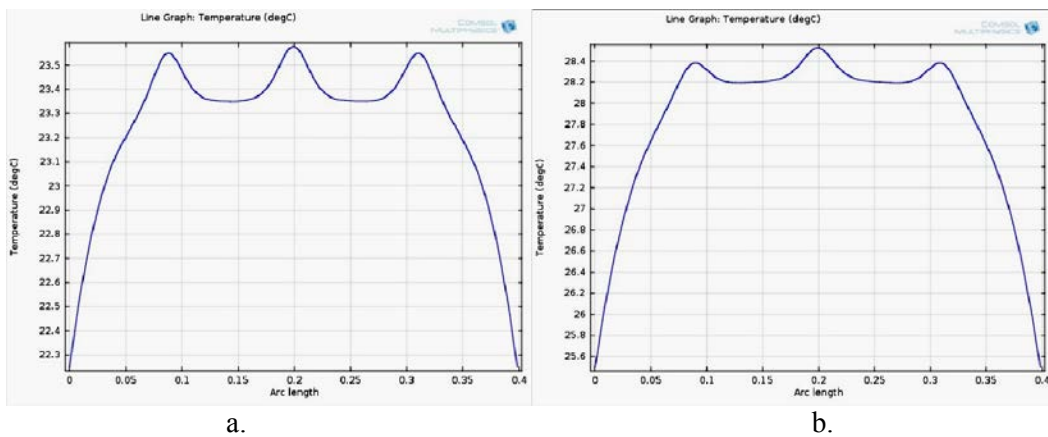
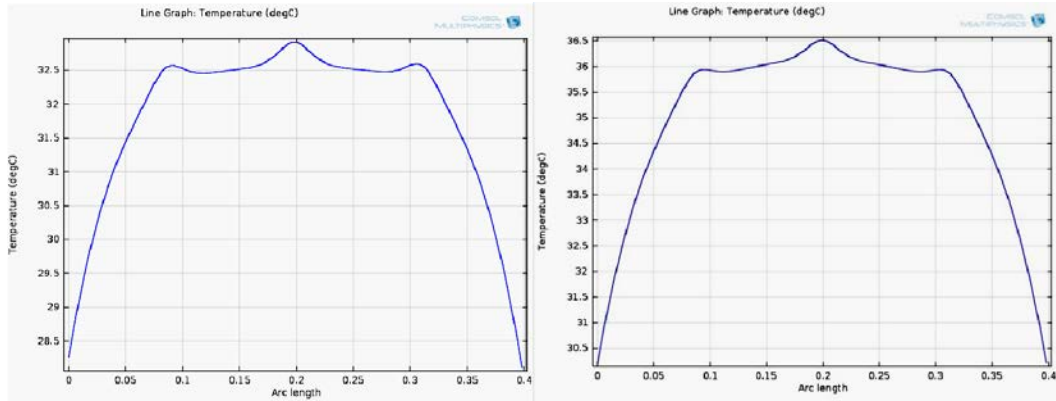


Fig. 1.3. Profil thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 15 min (a) ; 30 min. (b).

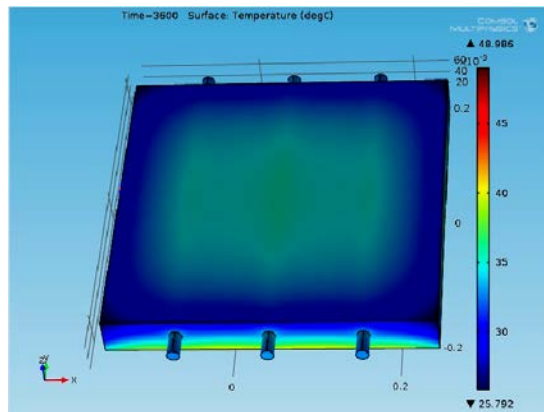


a.

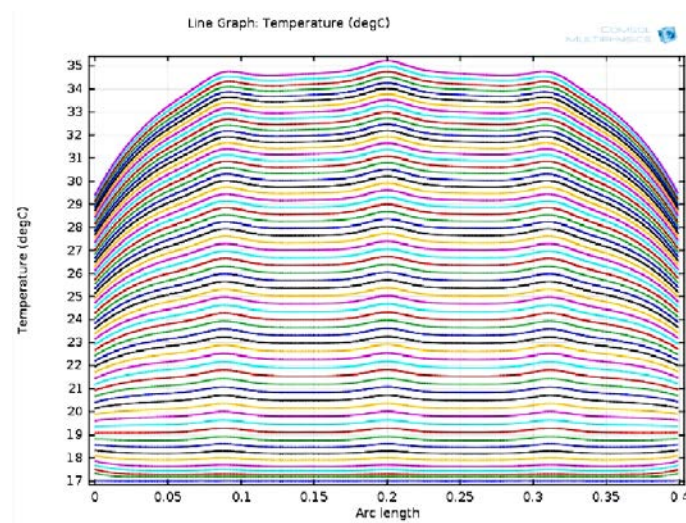
b.

**Fig. 1.4.** Profile thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 45 min (a) ; 60 min. (b).

## 1.2. Modélisation de la réponse thermique pour une plaque en béton armé (barres $\varnothing=16$ mm)

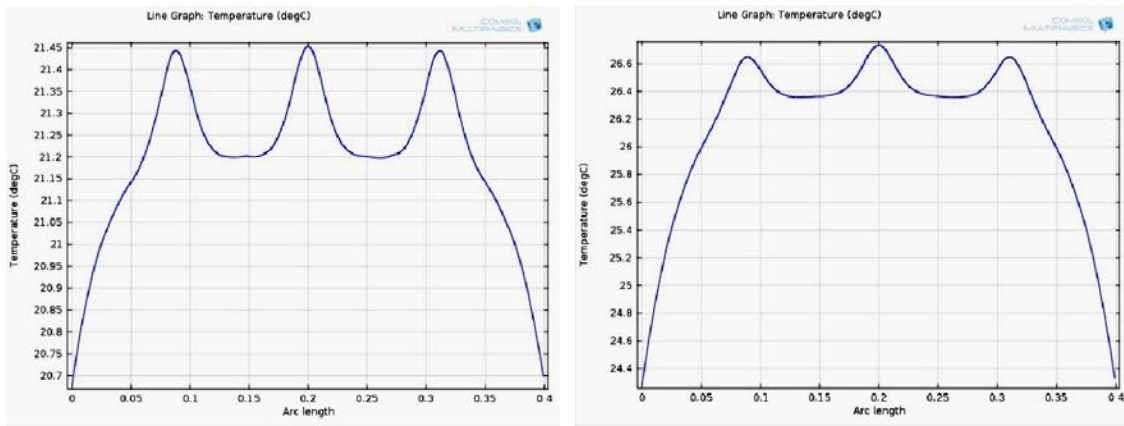


**Fig. 1.5.** Distribution thermique sur la surface extérieure de la plaque en béton armé avec des barres  $\varnothing 16$  mm après 60 minutes.



**Fig. 1.6.** Profile thermique de la plaque en béton armé avec des barres  $\varnothing 16$  mm distribué en temps (surface supérieure).

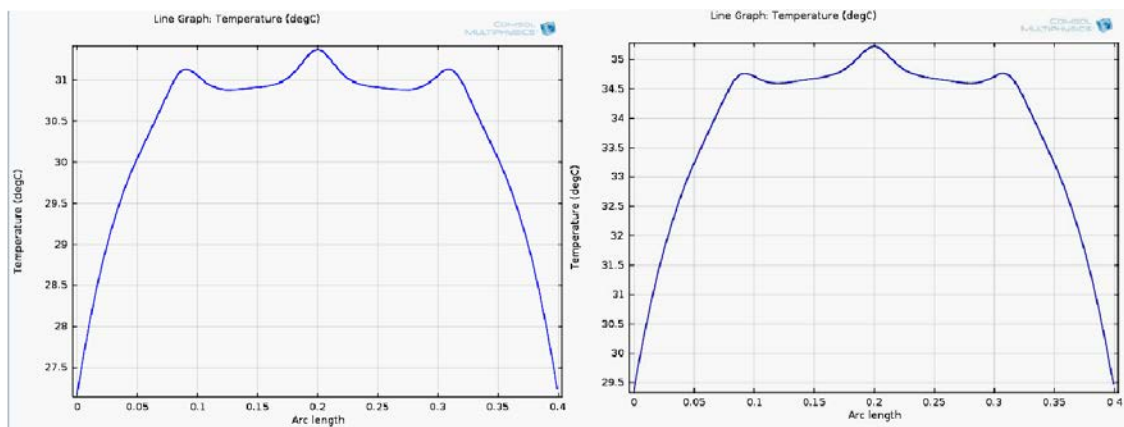




a.

b.

**Fig. 1.7.** Profile thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 15 min (a) ; 30 min. (b).

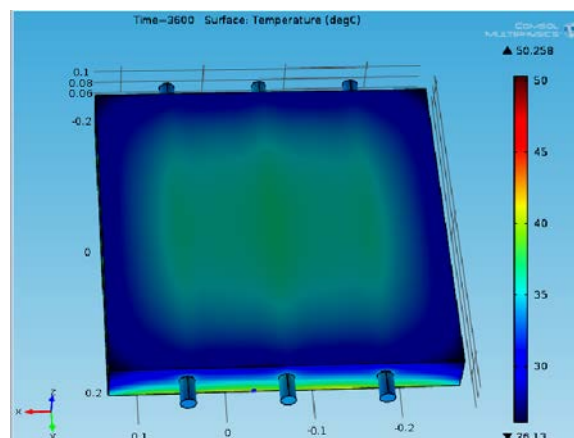


a.

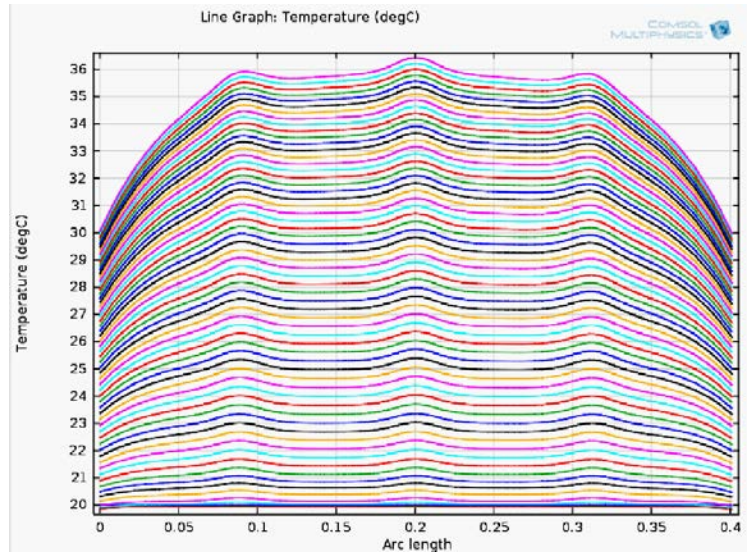
b.

**Fig. 1.8.** Profile thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 45 min (a) ; 60 min. (b).

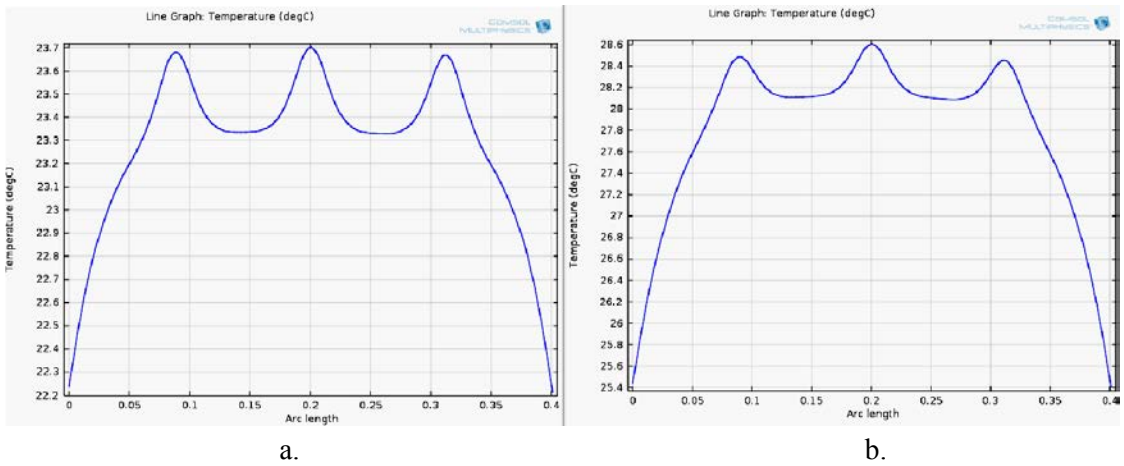
### 1.3. Modélisation de la réponse thermique pour une plaque en béton armé (barres $\varnothing=18$ mm)



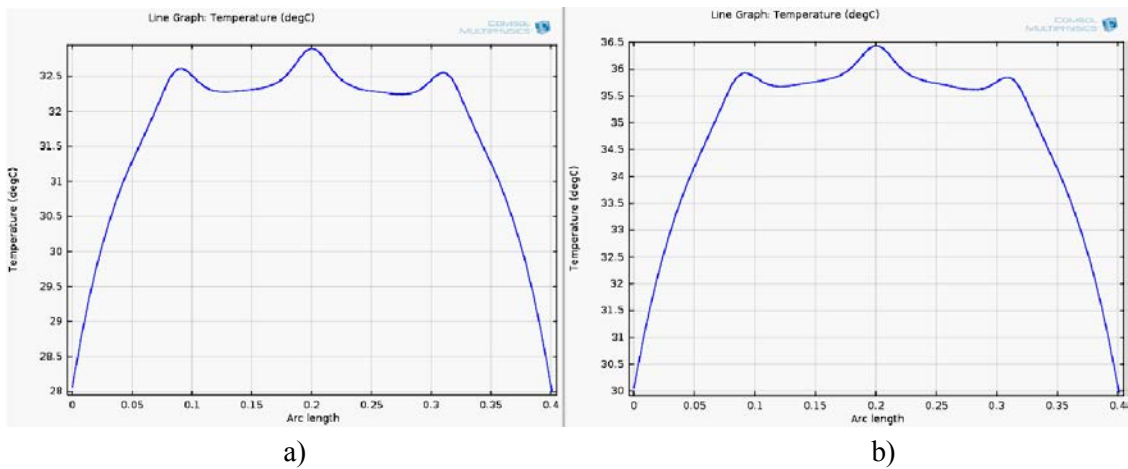
**Fig. 1.9.** Distribution thermique sur la surface extérieure de la plaque en béton armé avec des barres  $\varnothing$  18 mm après 60 minutes.



**Fig. 1.10.** Profile thermique de la plaque en béton armé avec des barres Ø18 mm distribué en temps (surface supérieure).



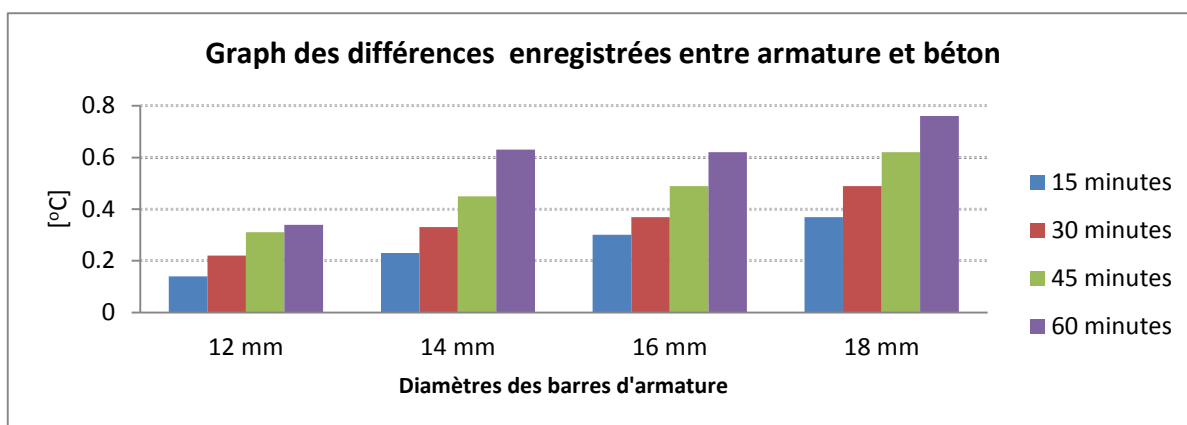
**Fig. 1.11.** Profile thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 15 min (a) ; 30 min. (b).



**Fig. 1.12.** Profile thermique de la plaque en béton (surface supérieure) après : 45 min (a) ; 60 min. (b).

**Tableau 1.** Valeurs et différences entre les températures enregistrés dans la zone de température maximale de l'armature en acier et le béton.

Diamètre de la barre (mm)	Excitation thermique											
	15 minutes			30 minutes			45 minutes			60 minutes		
	T <sub>armature</sub> (°C)	T <sub>béton</sub> (°C)	Différence (°C)	T <sub>armature</sub> (°C)	T <sub>béton</sub> (°C)	Différence (°C)	T <sub>armature</sub> (°C)	T <sub>béton</sub> (°C)	Différence (°C)	T <sub>armature</sub> (°C)	T <sub>béton</sub> (°C)	Différence (°C)
<b>12 mm</b>	21,37	21,23	0,14	26,69	26,47	0,22	31,39	31,08	0,31	35,2	34,86	0,34
<b>14 mm</b>	23,58	23,35	0,23	28,54	28,21	0,33	32,91	32,46	0,45	36,54	35,91	0,63
<b>16 mm</b>	21,45	21,20	0,30	26,73	26,36	0,37	31,37	30,88	0,49	35,22	34,60	0,62
<b>18 mm</b>	23,70	23,33	0,37	28,60	28,11	0,49	32,90	32,28	0,62	36,44	35,68	0,76



## ANEXA 2

### 2.1. Modélisation de la réponse thermique pour un échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ayant un défaut interne de 500 μm

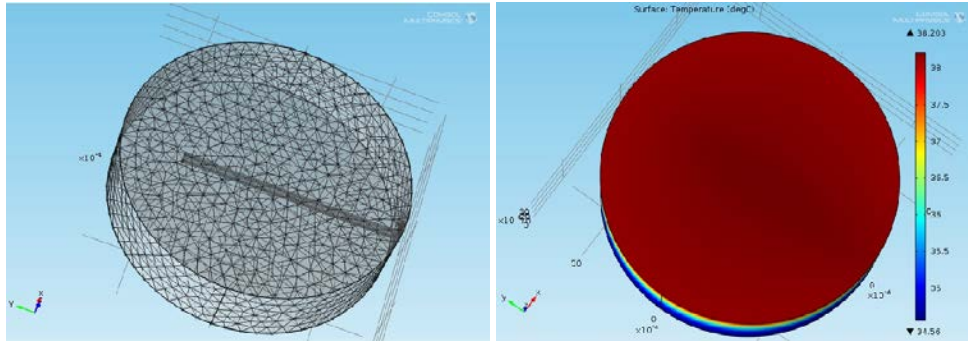


Fig. 2.1. Distribution de la température sur la surface chauffée après 5 secondes.

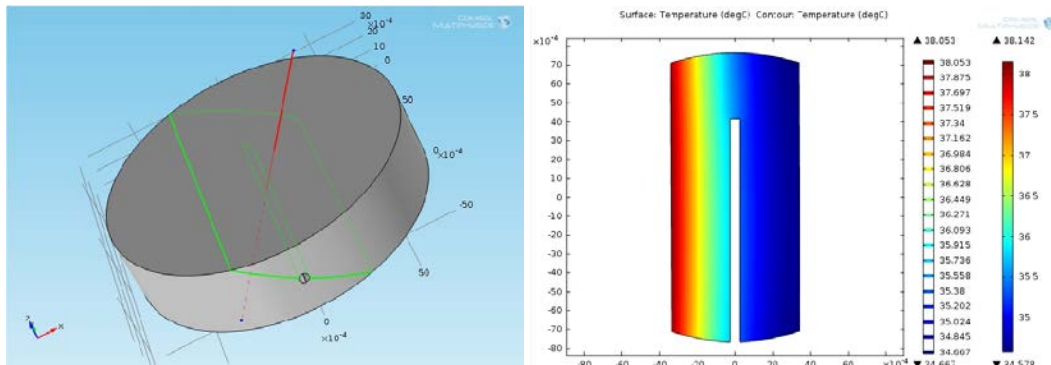


Fig. 2.2. Section à travers l'échantillon (à gauche) et l'évolution de la température à 5 s après le démarrage de la source d'excitation thermique (droite).

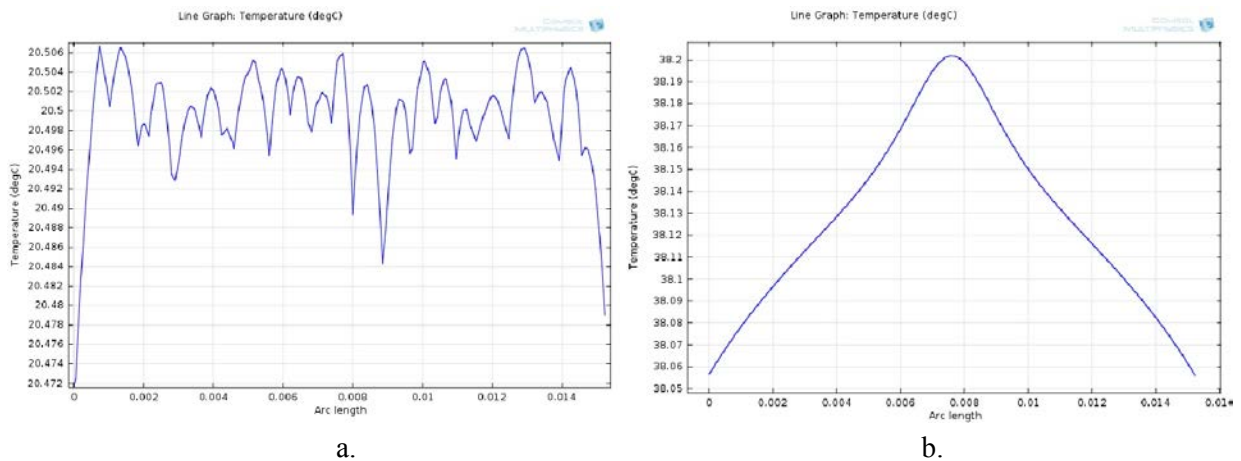


Fig. 2.3. Profil thermique de l'échantillon dans la zone avec défaut interne au moment initial (a) ; à 5 s après le démarrage de la source d'excitation (b).

## 2.2. Modélisation de la réponse thermique pour un échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec un défaut interne de 600 µm

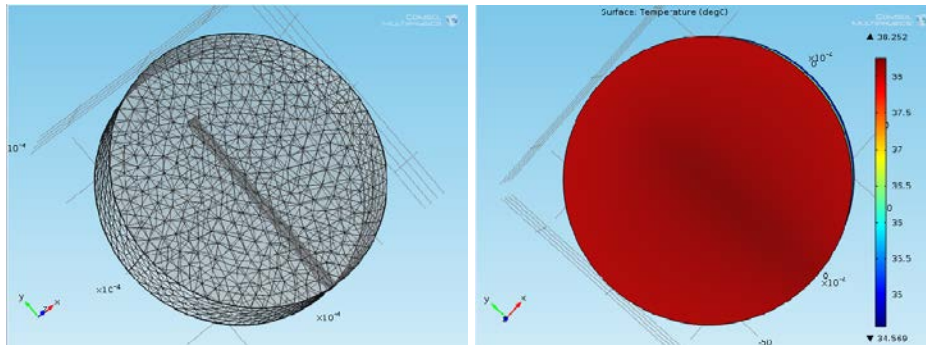


Fig. 2.4. Distribution de la température sur la surface chauffée à après 5 s.

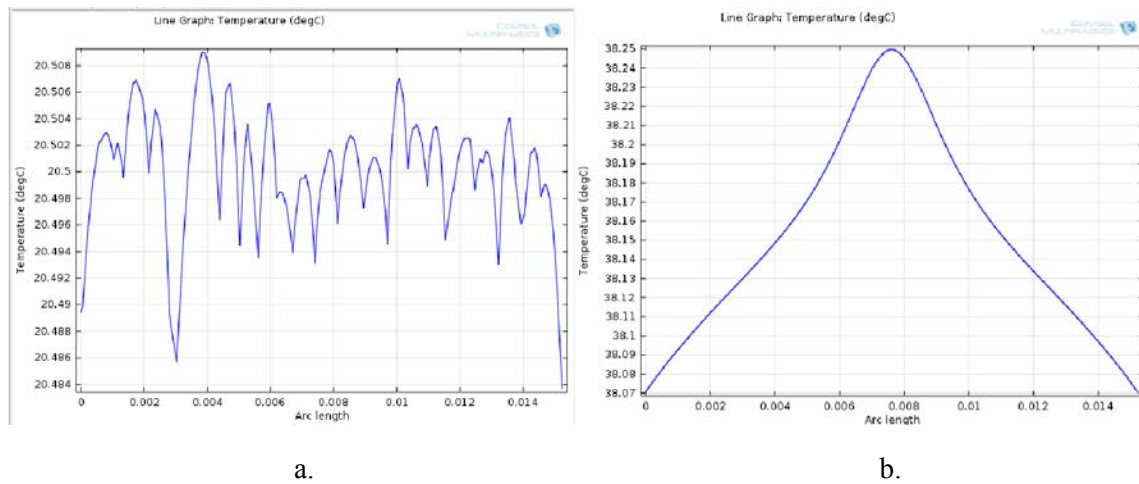


Fig. 2.5. Profile thermique de l'échantillon dans la zone avec défaut interne au moment initial (a) ; à 5 s après le démarrage de la source d'excitation (b).

## 2.3. Modélisation de la réponse thermique pour un échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec un défaut interne de 700 µm

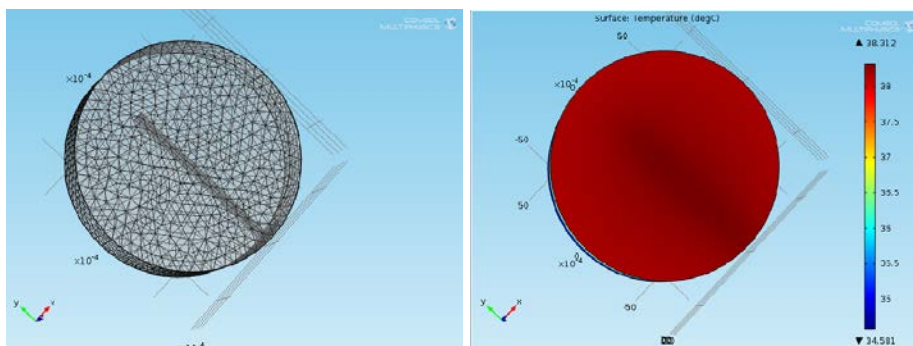
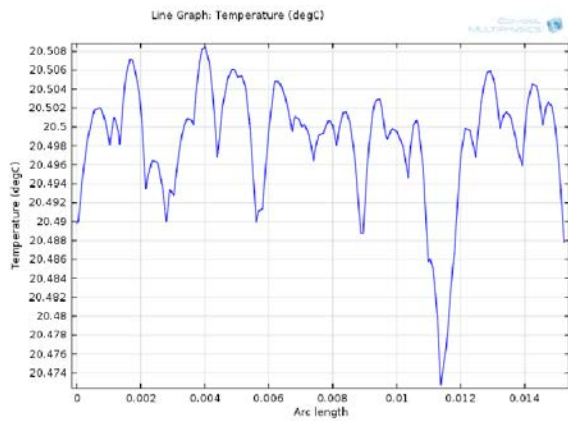
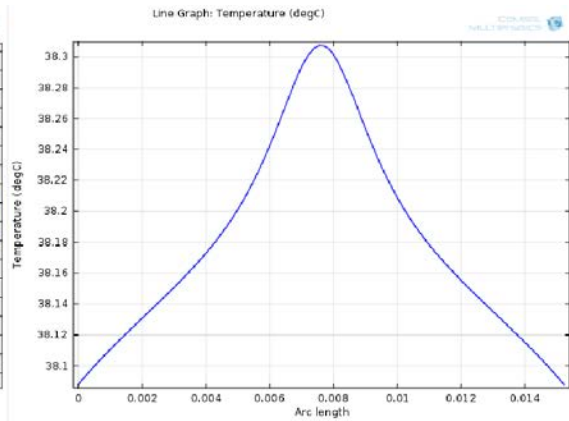


Fig. 2.6. Distribution de la température sur la surface chauffée à après 5 s.





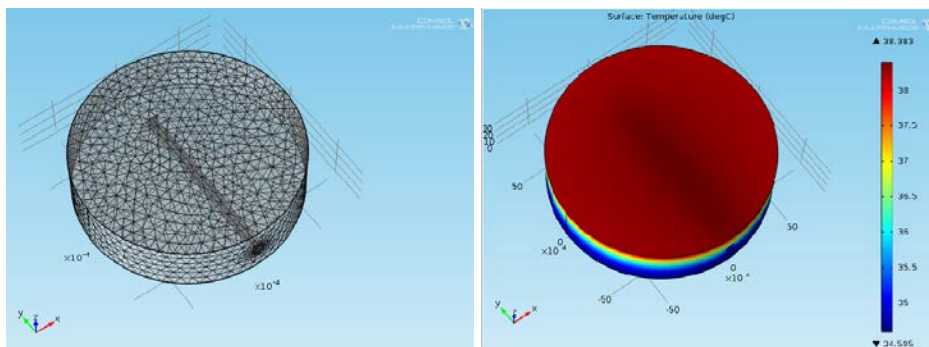
a.



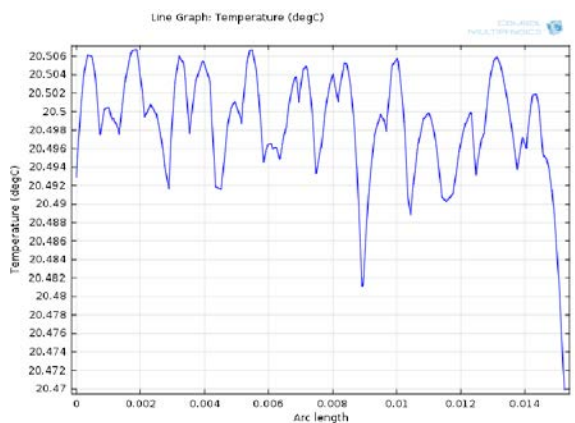
b.

**Fig. 2.7.** Profile thermique de l'échantillon dans la zone avec défaut interne au moment initial (a) ; à 5 s après le démarrage de la source d'excitation (b).

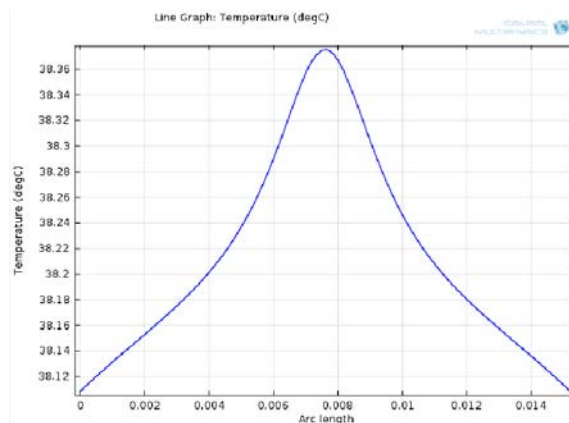
#### 2.4. Modélisation de la réponse thermique pour un échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec un défaut interne de 800 μm



**Fig. 2.8.** Distribution de la température sur la surface chauffée à après 5 s.



a.



b.

**Fig. 2.9.** Profile thermique de l'échantillon dans la zone avec défaut interne au moment initial (a) ; à 5 s après le démarrage de la source d'excitation (b).

## 2.5. Modélisation de la réponse thermique pour un échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec un défaut interne de 900 μm

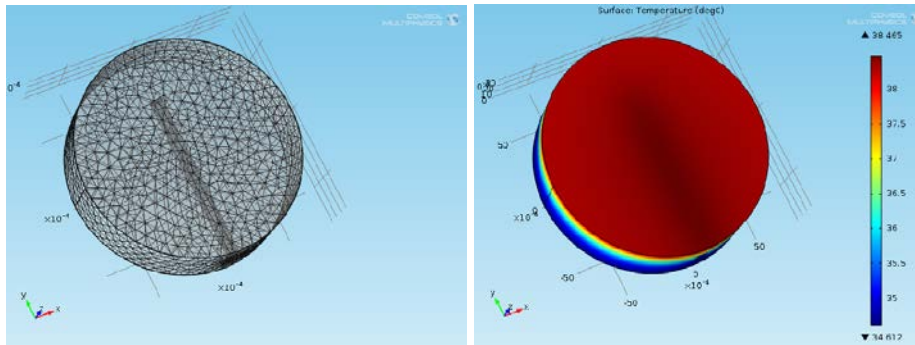


Fig. 2.10. Distribution de la température sur la surface chauffée à après 5 s.

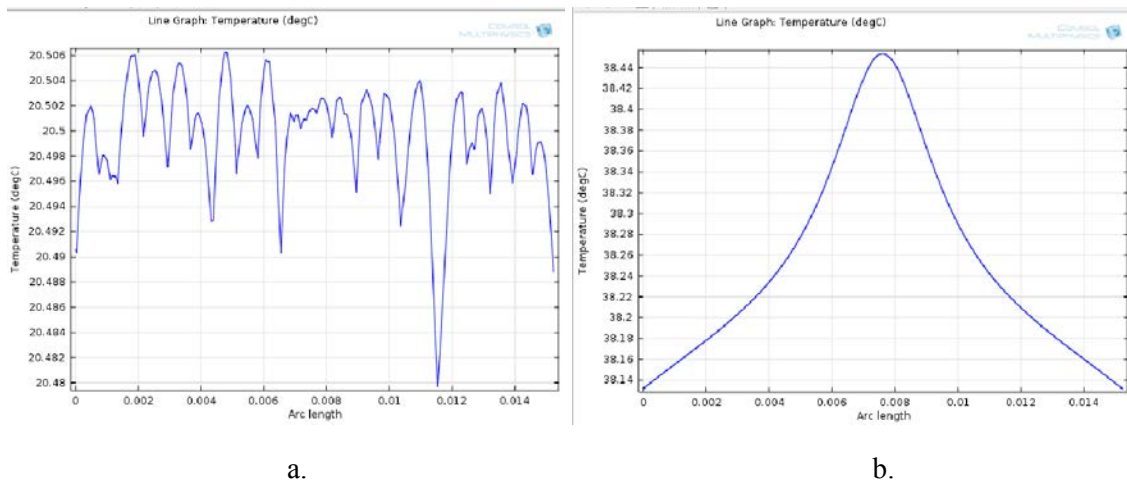


Fig. 2.11. Profil thermique de l'échantillon dans la zone avec défaut interne au moment initial (a) ; à 5 s après le démarrage de la source d'excitation (b).

## 2.6. Modélisation de la réponse thermique pour un échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec un défaut interne de 1 mm

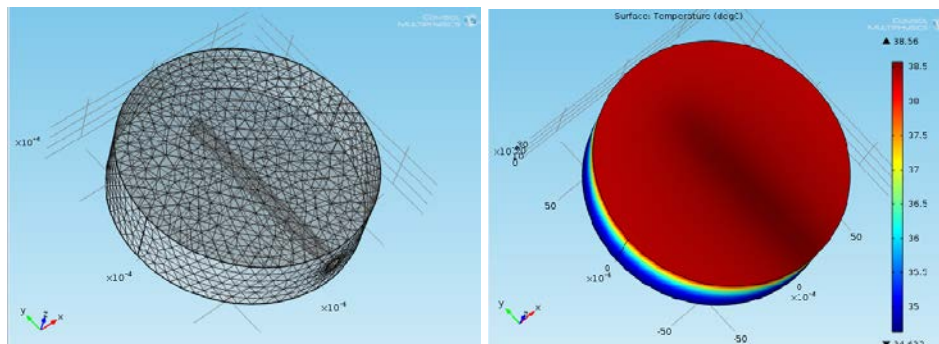
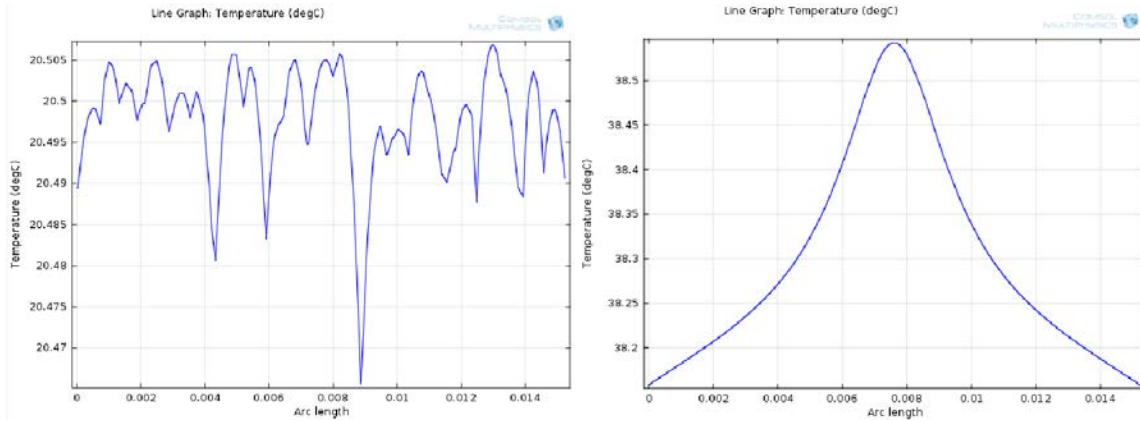


Fig. 2.12. . Distribution de la température sur la surface chauffée à après 5 s.



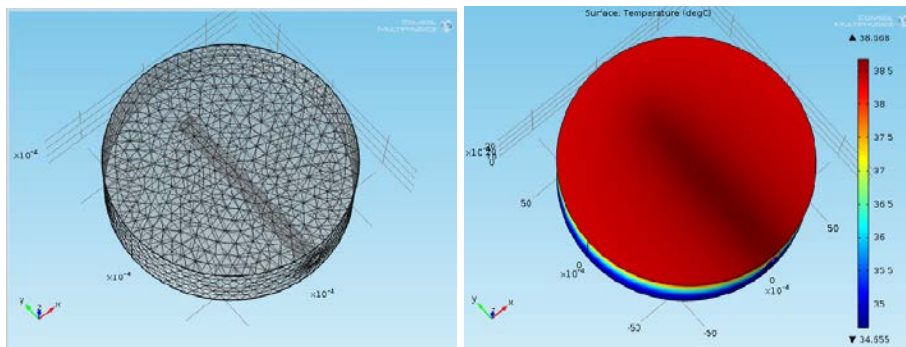


a.

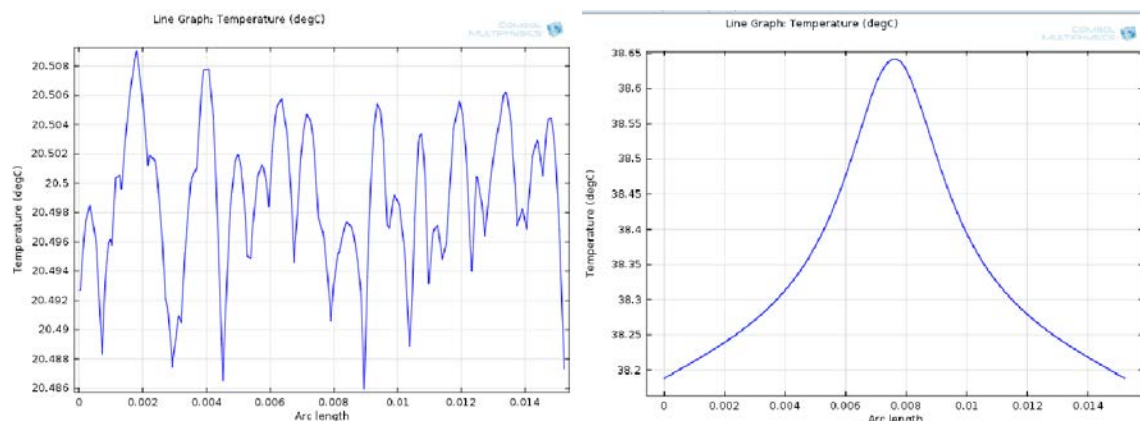
b.

**Fig. 2.13.** Profil thermique de l'échantillon dans la zone avec défaut interne au moment initial (a) ; à 5 s après le démarrage de la source d'excitation (b).

### 2.7. Modélisation de la réponse thermique pour un échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec un défaut interne de 1,1 mm



**Fig. 2.14.** Distribution de la température sur la surface chauffée à après 5 s.

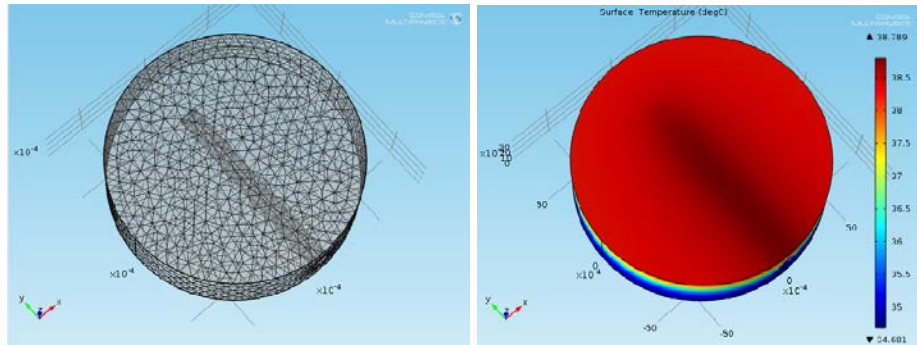


a.

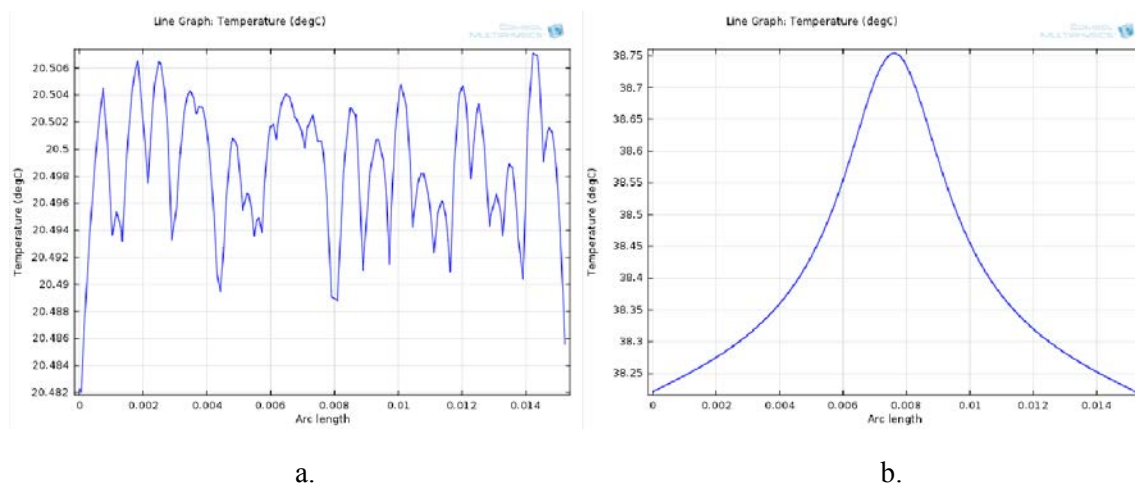
b.

**Fig. 2.15.** Profil thermique de l'échantillon dans la zone avec défaut interne au moment initial (a) ; à 5 s après le démarrage de la source d'excitation (b).

## 2.8. Modélisation de la réponse thermique pour un échantillon de HA-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec un défaut interne de 1,2 mm



**Fig. 2.16.** Distribution de la température sur la surface chauffée à après 5 s.



**Fig. 2.17.** Profile thermique de l'échantillon dans la zone avec défaut interne au moment initial (a) ; à 5 s après le démarrage de la source d'excitation (b).

**Tabel 2.1.** Valeurs enregistrées et différences entre échantillon et défaut 5 s après le démarrage de la source.

Taille du défaut	Température du défaut °C	Température de l'échantillon °C	Différence °C
500 µm	38,20	38,06	0,14
600 µm	38,25	38,07	0,18
700 µm	38,30	38,08	0,22
800 µm	38,37	38,09	0,28
900 µm	38,45	38,12	0,33
1,00 mm	38,55	38,15	0,40
1,10 mm	38,65	38,18	0,47
1,20 mm	38,75	38,20	0,55

## ANNEXE 3

### Résultats de l'analyse des systèmes de constructions par TIR active avec une source électrique pour l'excitation thermique

#### Détection du réseau d'armature

Cette méthode de laboratoire démontre l'applicabilité de TIR dans la détection des armatures en acier, des lacunes déterminées par des défauts, problèmes de continuité des barres d'armature (interromptions) et le positionnement des superpositions des barres. Les expérimentations ont été menées sur des plaques en plâtre avec l'épaisseur  $g = 12$  mm et les côtés  $L = 500$  mm,  $l = 300$  mm. Les barres d'armature utilisées étaient de 12 mm diamètre et une longueur de 400 mm.

Les barres ont été montées entre deux plaques en plâtre et fixées à une distance réciproque entre les axes de 100 mm (fig. 3.1).



**Fig. 3.1.** Montage des barres d'armature entre les plaques de plâtre.

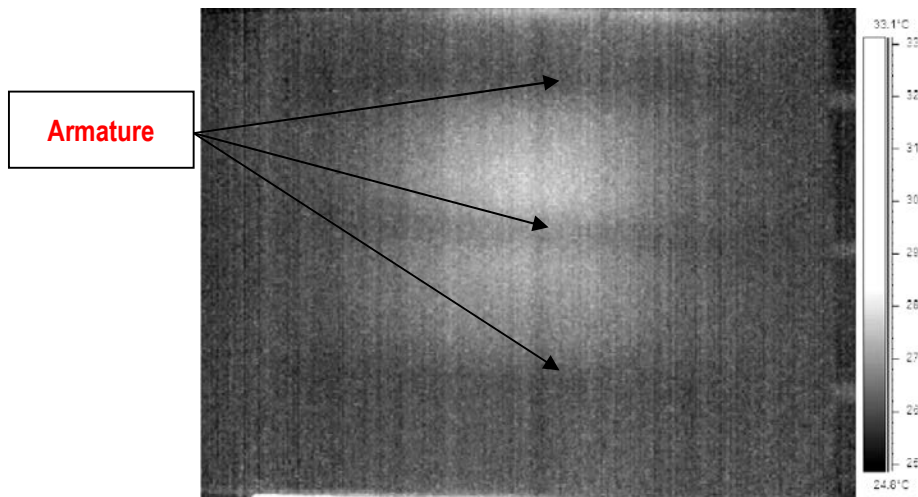
Après l'assemblage de l'échantillon, les barres ont été chauffées par une source thermique formée par une résistance électrique et une plaque de dissipation de la chaleur. Le temps d'échauffement était établi à 8 minutes. Dans la figure 3.2 on peut observer l'installation expérimentale, au laboratoire, composée par :

- Camera thermographique FLIR Thermacam S45, décrite dans le chapitre 5 de l'ouvrage ;
- Source électrique d'excitation thermique des échantillons ;
- Trépied pour la caméra ;
- Thermocouple pour le contrôle de la température de la source ;
- Système d'acquisition des données.



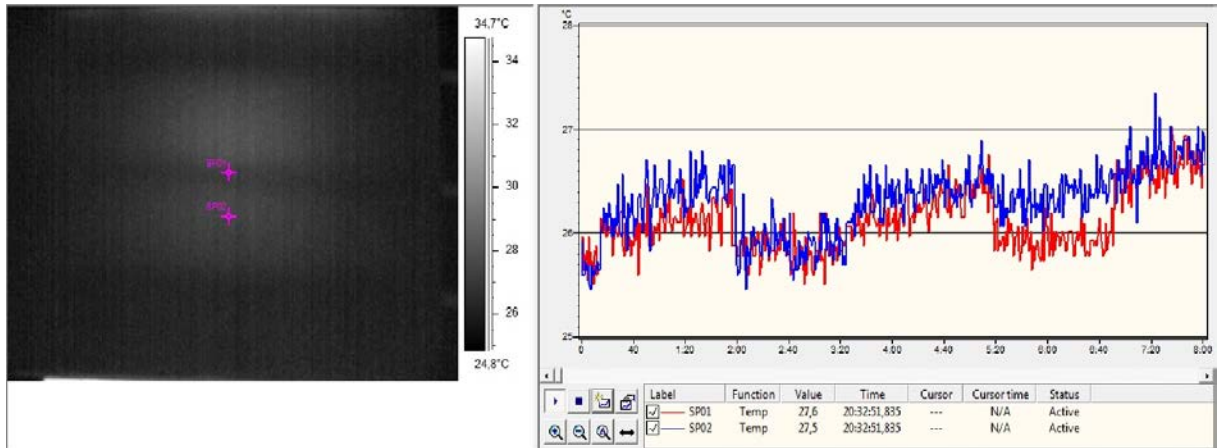
**Fig. 3.2.** Installation expérimentale.

Dans la figure 3.3 on observe l'image thermographique de l'échantillon à 6 minutes après le démarrage de la source d'excitation. D'ici est bien visible qu'après 6 minutes le réseau d'armature devient visible, en existant un contraste suffisant entre l'armature et le reste de la plaque.



**Fig. 3.3.** Distribution thermique sur la surface de l'échantillon à 6 minutes après le démarrage de la source d'excitation.

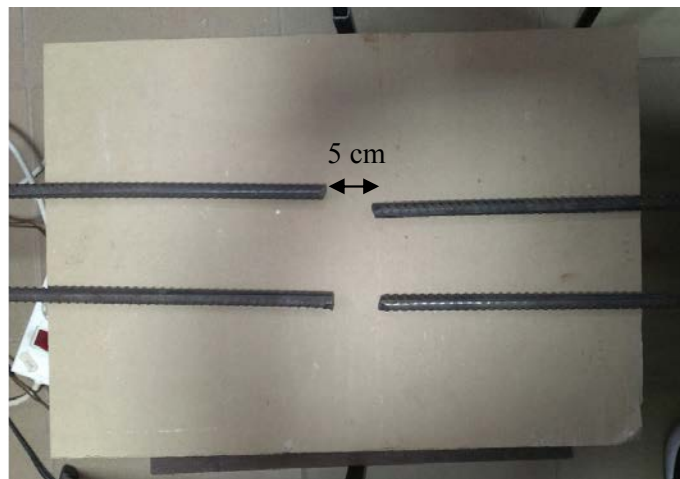
Pour déterminer l'évolution de la température dans le cas des deux matériaux (la plaque en plâtre et l'armature en acier), a été tracé le graph de la figure 3.4. Les différences entre les évolutions de température dans la zone de plaque en plâtre et dans les armatures sont bien visibles et une valeur maximale de la différence, de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , se développe exactement dans le point visibilité maximale, c'est-à-dire, après 6 minutes et 20 secondes.



**Fig. 3.4.** Evolution en temps des températures dans la zone de plaque en plâtre et dans les armatures.

### 3.2. Détection des interruptions des armatures

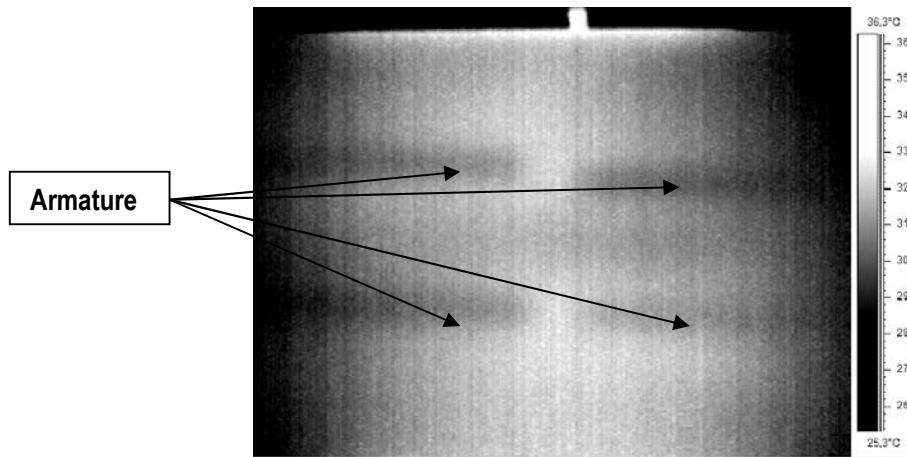
Pour ces tests a été utilisée la même installation expérimentale que pour le point 3.1, mais les barres ont été placées l'une après l'autre, à une distance de 5 cm (fig. 3.5).



**Fig. 3.5.** Placement des barres d'armature.

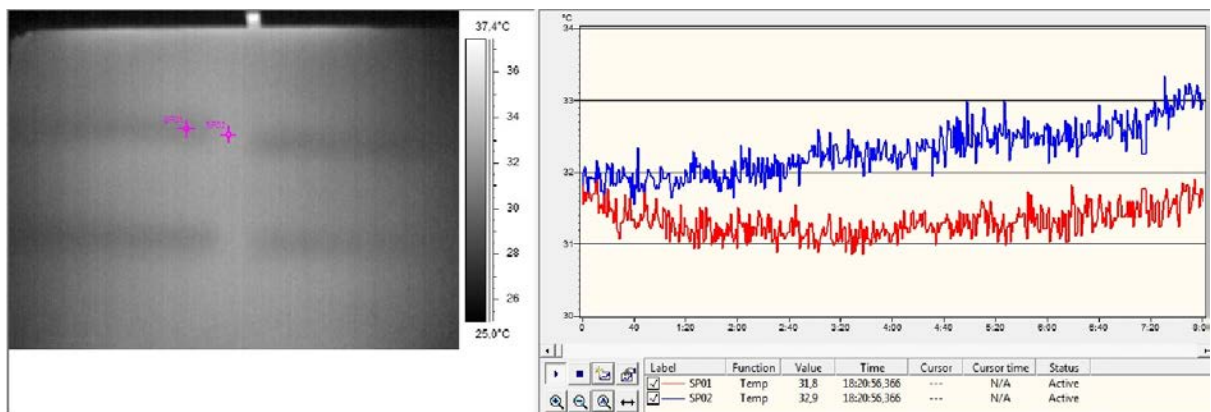
L'échauffement de l'échantillon a duré 8 minutes et l'image a été captée à 6 minutes après le démarrage de la source. La distribution de la température sur la surface de l'échantillon est présentée dans la figure suivante (fig. 3.6) à 6 minutes après le démarrage de la source.





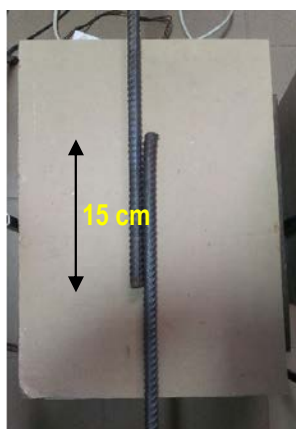
**Fig. 3.6.** Distribution thermique sur la surface de l'échantillon enregistrée par la caméra thermographique.

Dans la figure 3.7, représentant la distribution de température en fonction de temps d'excitation thermique, on peut observer facilement la différence entre armature et le reste de l'échantillon.

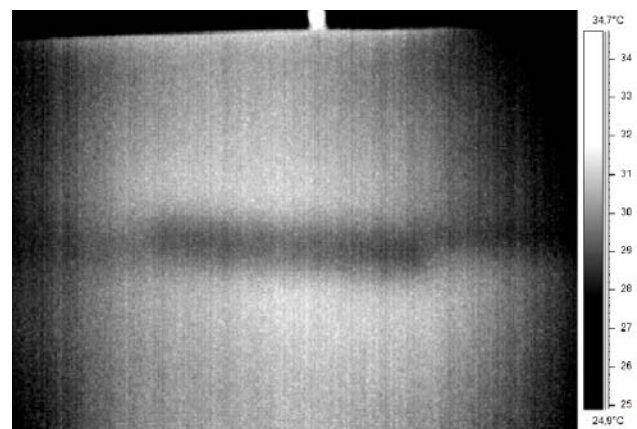


**Fig. 3.7.** Evolution en temps des températures dans la zone de plaque en plâtre et dans les armatures.

### 3.3. Superposition des barres d'armature



**Fig. 3.8.** Placement des barres d'armature à l'intérieure de l'échantillon.



**Fig. 3.9.** Image obtenue après l'excitation thermique de l'échantillon.

### 3.4. Détection des défauts internes sous forme de lacunes remplies avec de l'air

Par ces expérimentations on a désiré d'analyser l'influence des défauts sous forme de lacune de matériau remplie avec de l'air, dans les plaques en plâtre. Dans ce but ont été réalisées des lacunes ayant l'épaisseur de 12 mm et placées comme dans la figure 3.9.

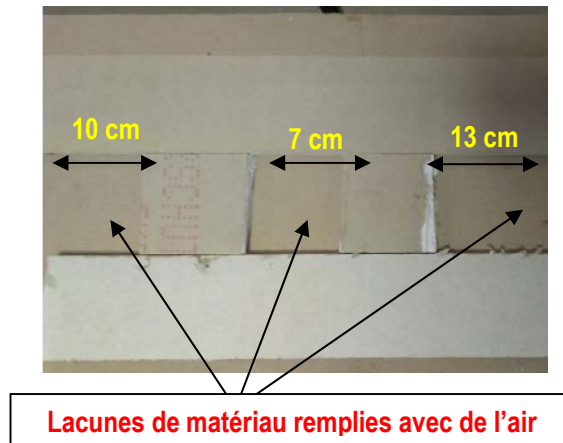


Fig. 3.9. Défauts contrôlés à l'intérieur de l'échantillon en plâtre.

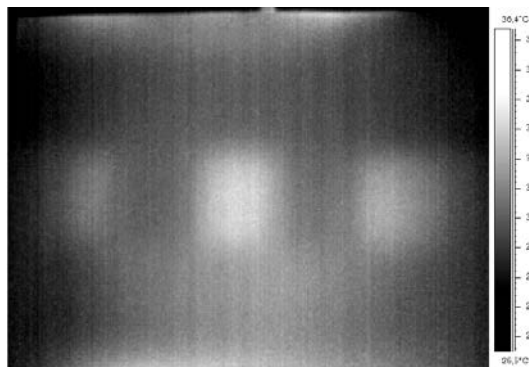


Fig. 3.10. Image thermographique obtenue à 6 minutes après le démarrage de la source d'excitation thermique.

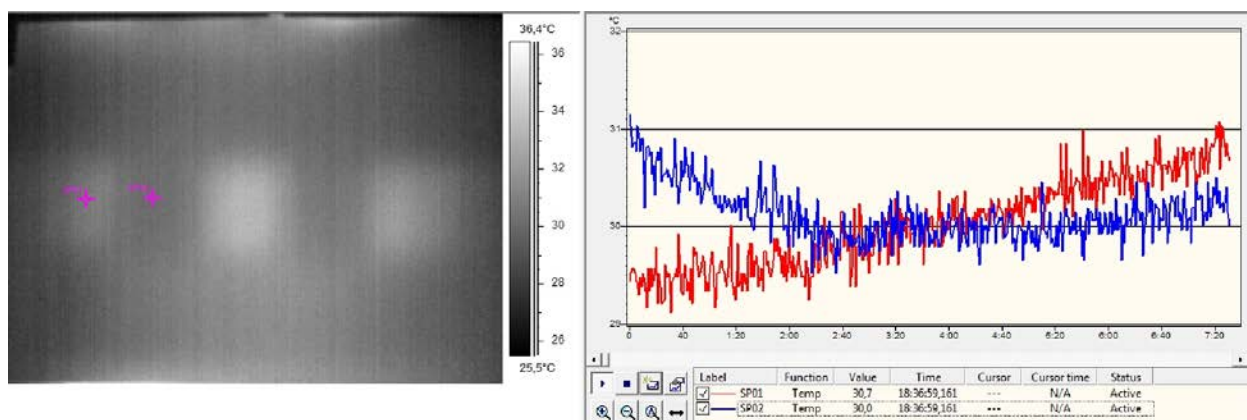
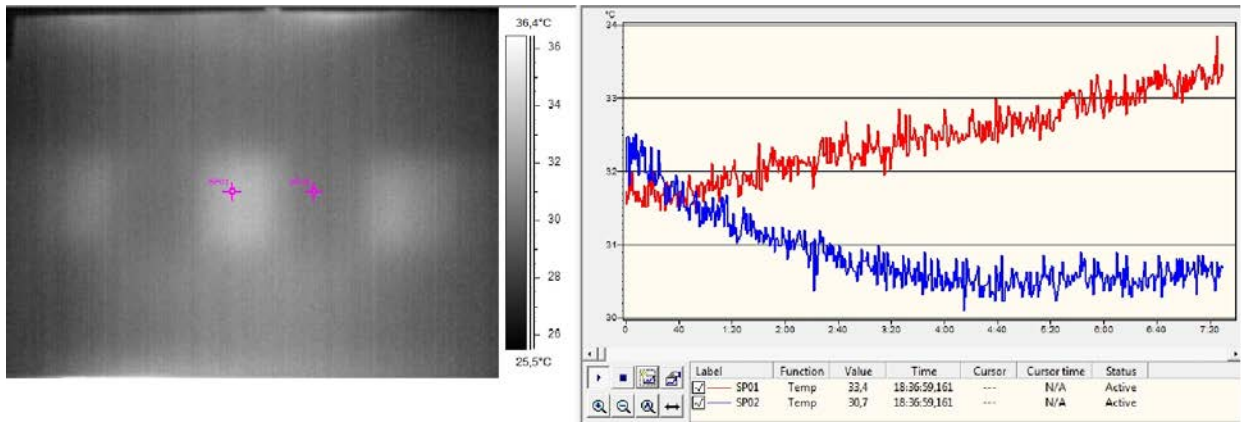
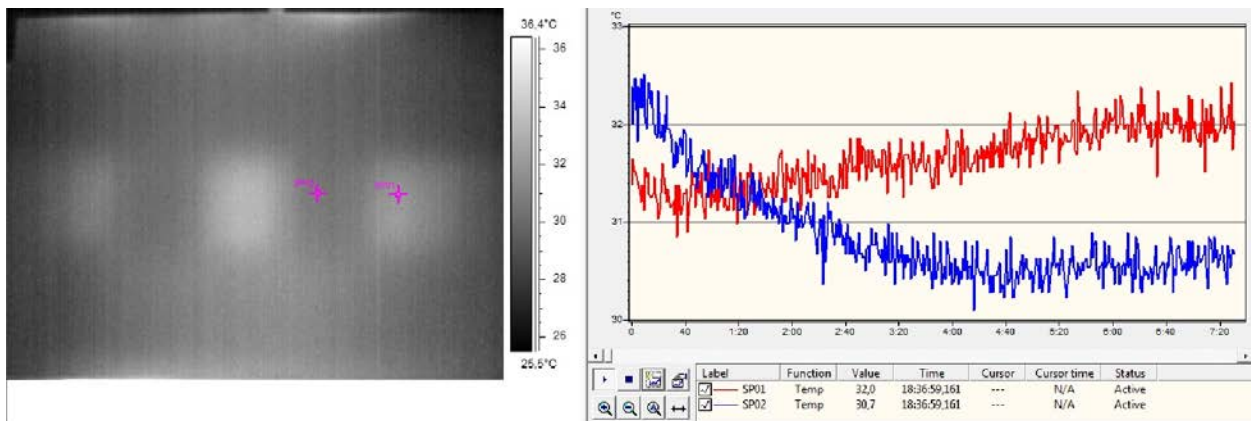


Fig. 3.11. Evolution en temps de la température dans la zone du premier défaut.





**Fig. 3.12.** Evolution en temps de la température dans la zone du deuxième défaut.

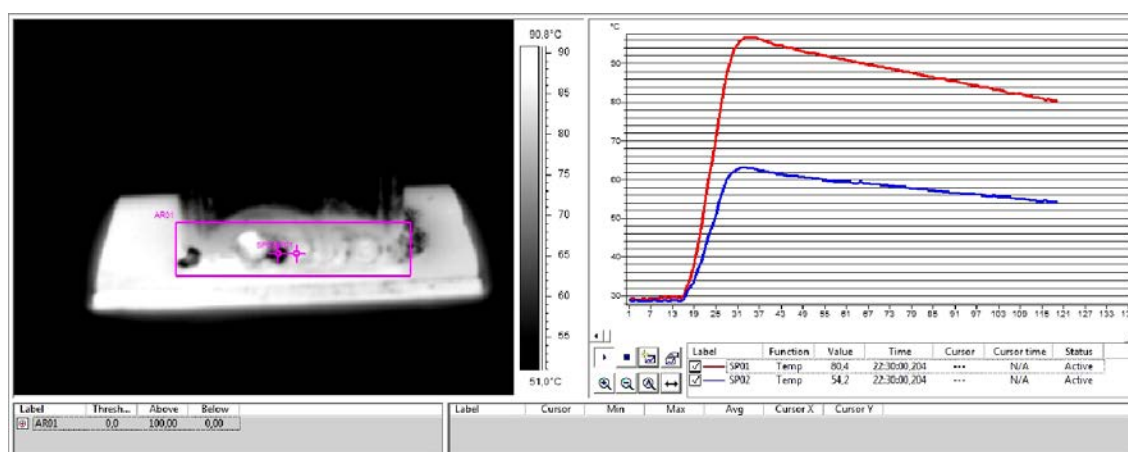


**Fig. 3.13.** Evolution en temps de la température dans la zone du troisième défaut.

## ANNEXE 4

### Analyse des cordons de soudure avec grande porosité

Cette expérimentation a supposé l'exécution d'un cordon de soudure en coin avec un appareil de soudure à gaz inerte, la réalisation des lacunes de matériau provenant d'une grande porosité et l'analyse thermographique ultérieure après l'excitation à l'aide d'une bobine d'induction. L'échantillon a été chauffé pendant 20 secondes et à 15 secondes après le démarrage de la source d'excitation a commencé l'enregistrement de la distribution de température par la caméra thermographique, enregistrement qui a continué encore durant toute la période de refroidissement de 95 secondes.



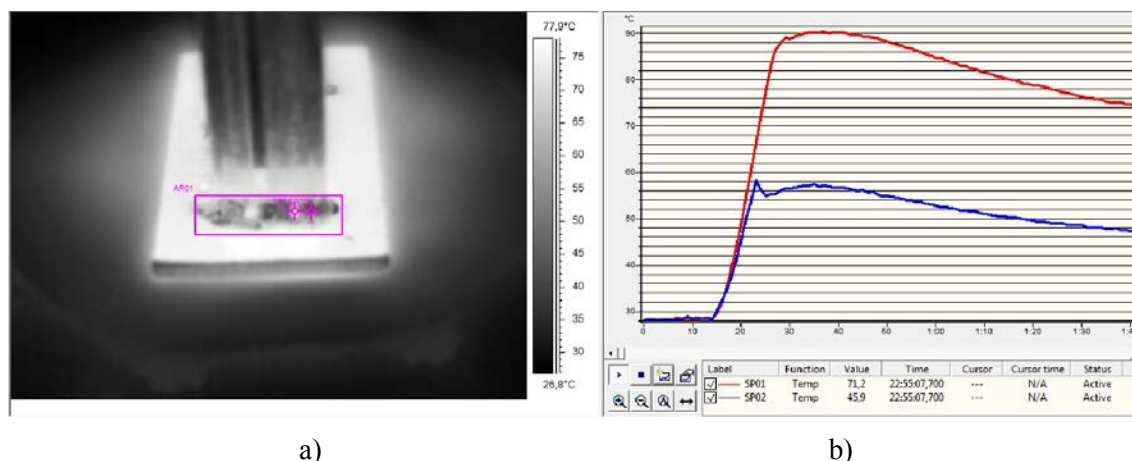
**Fig. 4.1.** Image thermographique obtenue dans la période de refroidissement (a) ; l'évolution de la température dans la zone à grande porosité et dans la zone avec la soudure correcte (b).

Dans la figure 4.1 est l'image thermographique ensemble avec l'évolution en temps de la température dans un point à défaut (ligne rouge) et dans un point sans défaut (ligne bleue). De l'analyse des deux figures on peut observer, dans la zone à grande porosité, une croissance de température de jusqu'à 38°C par rapport à la zone avec la soudure correcte. Ce phénomène se produit à cause de l'amincissement du cordon de soudure dans la zone à grande porosité et de la génération des différences de température entre le défaut et le cordon correctement exécuté.

### 4.2. Analyse des cordons de soudure avec des discontinuités

Par le même procédé de soudure et utilisant le même type de matériau comme dimensions et qualité, on a réalisé un cordon de soudure avec interruptions dans le but de l'analyser par TIR, en état d'excitation thermique par induction.

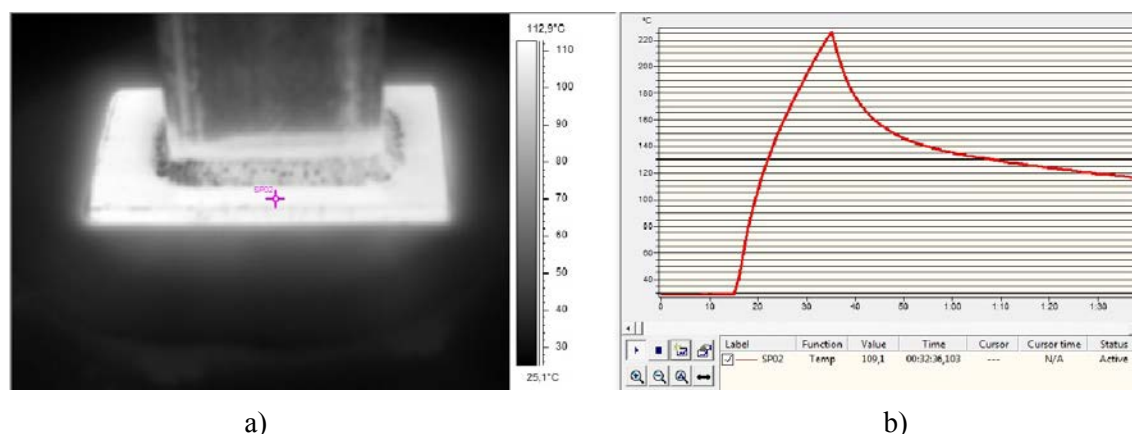
Dans la figure 4.2, a est présentée la distribution de température sur la surface analysée où on peut observer les discontinuités représentés dans une couleur blanche et dans la figure 4.2, b, est donné le graph de l'évolution de la température dans les deux points d'intérêt. Il est facile a observer une différence considérable entre le défaut et le cordonne de soudure correctement exécuté, ce qui indique clairement la présence du défaut dans le cordonne.



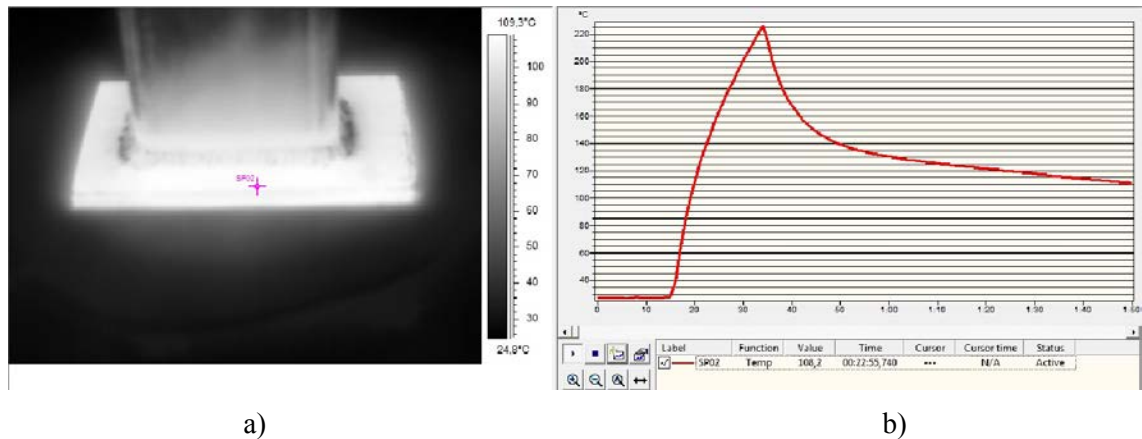
**Fig. 4.2.** Image thermographique obtenue dans la période de refroidissement (a) ; l'évolution de la température dans la zone à interruptions et dans la zone avec la soudure correcte (b).

#### 4.3. Analyse des cordonne de soudure couverts avec une couche de peinture

Dans ce cas on a désiré d'analyser un cordonne de soudure en deux moments : simple et peint. Dans ce but ont été captées des images de la distribution thermique de surface et graphs de l'évolution en temps de la température dans les zones d'intérêt. En première instance a été étudiée l'évolution de la température dans un point de la plaque de base, dans les deux cas : avec et sans peinture pour déterminer si les températures de surface et les formes des graphs sont semblants.



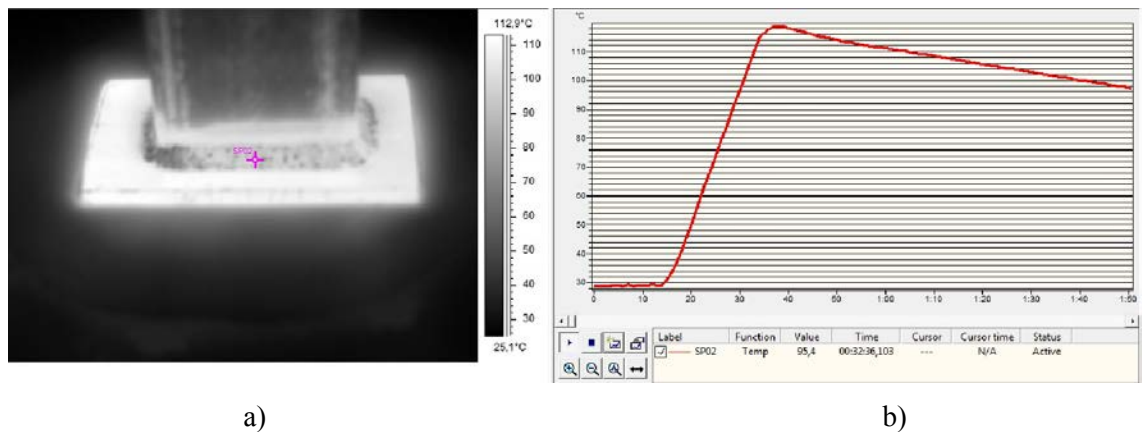
**Fig. 4.3.** Image thermographique de l'échantillon sans peinture (a) ; évolution de la température sur la plaque de base (b).



**Fig. 4.4.** Image thermographique de l'échantillon peint (a) ; évolution de la température - plaque de base (b).

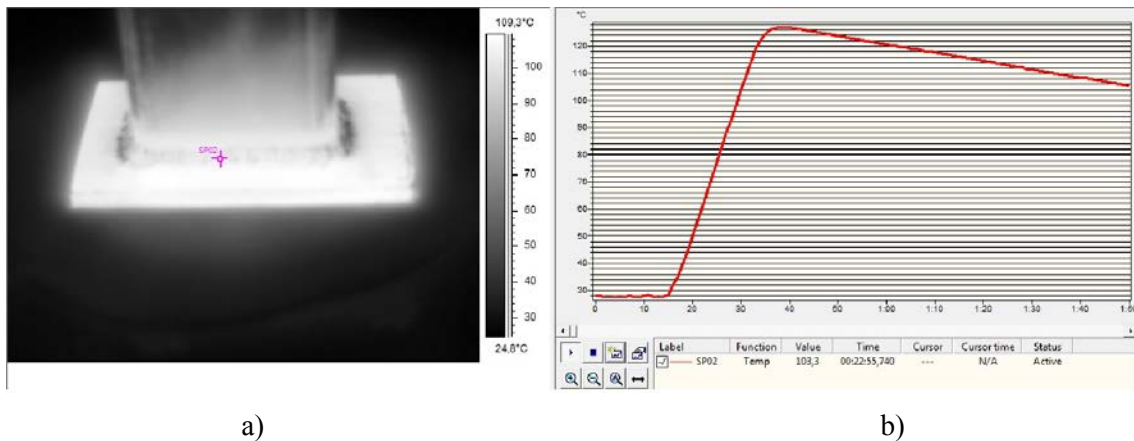
De l'analyse des figures 4.3 et 4.4 on peut observer que l'évolution, en fonction temps d'excitation thermique, de la température dans un point situé dans les même coordonnées dans les deux cas est quasiment identique.

Dans la figure 4.5 est représentée l'évolution de la température dans un point du cordonne de soudure qui n'est pas couvert d'une couche de peinture.



**Fig. 4.5.** Echantillon sans peinture sur le cordonne de soudure. Image thermographique (a) ; évolution des températures en fonction de temps d'excitation thermique (b).

Dans la figure 4.5 on peut voir l'image thermographique de l'échantillon soudé et couvert de peinture et l'évolution de la température dans le même point, comme dans la figure 4.4.



**Fig. 4.6.** Echantillon après l'application de la peinture sur le cordonne de soudure. Image thermographique (a) ; évolution des températures en fonction de temps d'excitation thermique (b).

De l'analyse des figures 4.5 et 4.6 résulte une croissance de la température de 4°C dans le cas du cordonne peint dans les mêmes conditions pour les deux cas.

L'explication réside dans la modification de l'émissivité du matériau après la couverture avec de la peinture.

