THESE DE DOCTORAT

UNIVERSITE PARIS OUEST NANTERRE LA DEFENSE

Ecole doctorale 139 : Connaissance, Langage, Modélisation

Spécialité : Energétique et Génie des Procédés

Présentée par

Eric KUHN

CONTRÔLE NON DESTRUCTIF D'UN MATÉRIAU EXCITÉ PAR UNE ONDE ACOUSTIQUE OU THERMIQUE. OBSERVATION PAR THERMOGRAPHIE

Soutenue le 6 décembre 2013 devant le jury composé de :

Simone MATTEI	Rapporteur	Pr. Université de Bourgogne
Moussa KARAMA	Rapporteur	Pr. Ecole Nationale d'ingénieurs de Tarbes
Philippe HERVE	Directeur de thèse	Pr. Émérite Université Paris-Ouest
Hassen BEJI	Président	Pr. Université de Picardie
Claude BATHIAS	Examinateur	Pr. Émérite Université Paris-Ouest
Pierre POTET	Examinateur	Président de NIT (New Imaging Technologies)
Emmanuel VALOT	Examinateur	Mcf. Université Paris-Ouest

Table des matières

Table des matières v
Remerciements ix
Nomenclature xii
Introduction 1
Chapitre 1 Méthodes de Contrôle Non Destructif : application aux composites stratifiés 3
1.1) Les composites stratifiés 4
1.1.1) Propriétés des matériaux composites 4
1.1.2) Défauts présents dans les composites stratifiés 6
1.1.3) Délaminage 8
1.2) Méthodes traditionnelles de contrôle non destructif (CND) 10
1.2.1) Ressuage 10
1.2.2) Contrôle d'étanchéité 12
1.2.3) Magnétoscopie 12
1.2.4) Courants de Foucault 13
1.2.5) Analyse vibratoire 14
1.2.6) Emission acoustique 15
1.2.7) Ultrasons 15
1.2.8) Radiographie 18
1.2.9) Tomographie 19
1.2.10) Contrôle visuel 20
1.2.11) Interférométrie holographique 20
1.2.12) Interférométrie de Speckle 21
1.2.13) Thermographie 22
1.2.14) Synthèse 24
1.3) Méthodes CND couplées 27
1.3.1) CND électromagnétique acoustique 27
1.3.2) CND Magnéto-optique 28
1.4) Conclusion 29
Chapitre 2 Rayonnement thermique et techniques de traitement d'images : théories et applications 31

2.1) Rappels théoriques sur les ondes lumineuses 32
2.1.1) Nature et définition du rayonnement thermique 32
2.1.2) Principes physiques de la thermographie 34
2.1.2.1) Transfert d'énergie par rayonnement 34
2.1.2.2) Lois fondamentales du rayonnement thermique 36
2.1.2.3) Principe de la mesure de température 42
2.1.2) Caméra infrarouge 44
2.2) Traitement d'image 47
2.2.1) Etude du gradient 49
2.2.2) Estimation des coefficients du polynôme au sens des moindres carrés 50
2.2.3)Transformée de Fourier 51
2.2.4)Analyse en composantes principales (PCA) 52
2.2.5)Analyse en composantes indépendantes (ICA) 53
2.3) Conclusion 53
Chapitre 3 Excitation d'un délaminage dans un composite par ultrasons observé par thermographie 55
3.1) Description et mise en place des essais thermosoniques 57
3.1.1) Principe 57
3.1.2) Matériel 58
3.1.3) Protocole expérimental 58
3.2) Premiers résultats sur l'impact 35J 61
3.2.1) Fin de la génération d'ultrasons : refroidissement 62
3.2.2) Excitation mécanique : chauffage 62
3.2.3) Suivi de l'évolution de température au cours du temps 64
3.3) C-scan 66
3.3.1) Principe et protocole expérimental 66
3.3.2) Résultats 68
3.4) Comparaison C- scan et thermosonique 70
3.4.1) Délimitation du délaminage 70
3.4.2) Evolution de la température de seuil (T_{seuil}) 72
3.4.3) Ecart relatif sur la détection 75
3.4.4) Détection des délaminages 40J, 50J et 60J 77
3.5) Analyse 80
3.6) Traitement d'images 81

3.6.1) Introduction 81
3.6.2) Analyse du post-traitement 84
3.6.2.1) Mappage de l'image post-traitée 86
3.6.2.2) Détermination du seuil 86
3.6.2.3) Comparaison des aires 87
3.6.2.4) Moyenne et écart type en fonction de la puissance et de la distance 89
3.7) Conclusion 95
3.8) Perspectives 95
Chapitre 4 Excitation d'un délaminage dans un composite par une onde thermique observé par thermographie 97
4.1) Description et mise en place des essais thermographiques 98
4.1.1) Principe 98
4.1.2) Choix du matériel 98
4.1.3) Trajet du faisceau laser et propriétés d'utilisation du faisceau 101
4.1.4) Propriétés de l'enregistrement 107
4.2) Repérage de la position du délaminage 109
4.2.1) Protocole expérimental 109
4.2.2) Problème de décalage selon l'axe des *y* 110
4.2.3) Problème de déformation de la cavité du laser CO_2 111
4.2.4) Etude de l'évolution de la température 111
4.2.4.1) Prise en compte de la déformation de la cavité laser 111
4.2.4.2) Recalage temporel 112
4.2.4.3) Influence de la diffusion de la chaleur sur les mesures réalisées 114
4.2.4.4) Influence de la quantité d'énergie sollicitant l'échantillon 115
4.3) Détermination de la taille du défaut 118
4.3.1) Protocole expérimental 118
4.3.1.1) Méthode Flash 118
4.3.1.2) Sollicitation périodique 121
4.3.3) Principe de la "pseudo-détection" synchrone 124
4.3.3.1) Amplitude 124
4.3.3.2) Phase 126
4.4) Conclusion 129
4.5) Perspectives 129
Conclusions et perspectives 131

Bibliographie 137
Table des figures 143
Liste des tableaux 147
Annexes 149

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Philippe HERVÉ, pour toute la confiance qu'il m'a accordée ainsi que pour son soutien tout au long de ces travaux de recherche.

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans l'entreprise VISIOLASER qui a lancé ce sujet de recherche. Mes remerciements vont au président de cette entreprise, Monsieur Bernard ROUX, qui m'a permis de naviguer avec liberté au cours de ces années de thèse.

Je remercie Monsieur Hassen BEJI, Professeur à l'université de Picardie Jules Verne, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Toute ma gratitude à Madame Simone MATTEI, Professeure à l'Université de Bourgogne et Monsieur Moussa KARAMA, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Mes remerciements à Monsieur Claude BATHIAS, Professeur émérite de l'Université Paris Ouest Nanterre La Défense, Monsieur Pierre POTET, Président de l'entreprise NIT, d'avoir accepté d'être membres de mon jury.

Je remercie Monsieur Emmanuel VALOT, Maître de Conférences à l'Université Paris Ouest Nanterre La Défense, pour son aide précieuse et son soutien dans l'encadrement de cette thèse.

Grâce à Monsieur Olivier CASULA, responsable de laboratoire au CEA/LIST, des essais ont pu être réalisés au sein du CEA dans le cadre de la bibliographie. Ses conseils, au long de cette thèse, m'ont été précieux.

Merci à Monsieur Hubert VOILLAUME, chef d'équipe de recherche chez EADS, pour m'avoir prêté une sonotrode ainsi que des échantillons de composites aéronautiques. Sans cette aide précieuse, la thèse n'aurait pu être aussi aboutie.

Je tiens à remercier Monsieur Robin CONSEIL, Docteur à l'Université de Franche-Comté, pour son aide dans le développement de l'algorithme du traitement d'images.

Merci à l'ENSAM Paris qui m'a permis d'utiliser leurs calculateurs pour le traitement d'images.

Les essais par ultrasons ont été réalisés au sein de l'Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports. Ceci n'aurait pu être possible sans Monsieur Jérôme ROUSSEAU, Maître de Conférences. Merci à lui.

Je tiens à remercier Sasha, Jérémy, Nicolas, Julien-Pierre, Rahim, Wang du LEME pour leur aide et leur sympathie au quotidien.

Nomenclature

a_p	Coefficients du polynôme caractéristique	Sans unité (s.u)
A_c	Différence d'amplitude entre températures	K
c_0	célérité de la lumière dans le vide	$2{,}9978.10^{8}$ m.s^{-1}
C_p	Capacité calorifique	J.K^{-1}
d	Distance	m
e	Ecart type	s.u
E	Energie	J
f	Fréquence	Hz
v	Fréquence	Hz
h	Constante de Planck	$6{,}626.10^{-34}$ J.s
h_{conv}	Coefficient de convection thermique	W.m^{-2}.K^{-1}
k	Conductivité thermique	W.m^{-1}.K^{-1}
k_B	Constante de Boltzmann	$1{,}3806.10^{-23}$ J.K^{-1}
L	Luminance	W.cm^{-2}.sr^{-1}.cm
n_r	Indice de réfraction	s.u
n_1	Vecteur unitaire	s.u
n_2	Vecteur unitaire	s.u
P	polynôme caractéristique	s.u
q	Chaleur	W
t	Temps	s
t_{laser}	Temps pendant lequel le laser illumine l'échantillon	s
t_{expo}	Temps d'immobilisation des miroirs	s
T	Température	K
T_{amb}	Température ambiante	K
T_{seuil}	Température de seuil	K
Ts_c_max	Température maximale sur une zone saine lors du chauffage	K
Td_c_max	Température maximale sur une zone saine lors du chauffage	K
x	Coordonnée spatiale	s.u
y	Coordonnée spatiale	s.u
z	Coordonnée spatiale	s.u
$d\Phi^a$	Flux de rayonnement absorbé	W

$d\Phi^i$	Flux de rayonnement incident	W
$d\Phi^r$	Flux de rayonnement réfléchi	W
$d\Phi^T$	Flux de rayonnement transmis	W
α	Facteur d'absorption	s.u
Δ	Direction	s.u
ε	Emissivité	s.u
θ	Angle solide	s.u
λ	longueur d'onde	µm
ρ	Facteur de réflexion	s.u
σ	Nombre d'onde	cm^{-1}
τ	Facteur de transmission	s.u
Φ	Phase	s.u
Ω	Angle solide	s.u

Introduction

Dans l'ensemble des secteurs industriels, les matériaux doivent généralement être contrôlés régulièrement en cours de production, en cours de fonctionnement ou lors de la maintenance afin de déterminer s'ils présentent des défauts ou non. Les techniques employées pour réaliser cette vérification ne doivent évidemment pas endommager la structure. De nombreuses méthodes ont été développées au cours de ces dernières décennies et ont toutes été regroupées sous le terme de Contrôle Non Destructif (CND).

Les méthodes de CND ont été initialement développées vers le milieu du vingtième siècle, en particulier pour les structures métalliques, encore couramment utilisées dans l'industrie de nos jours. Cela concerne par exemple le contrôle par ressuage, la radiographie, les ultrasons ou les courants de Foucault [1]. Cependant, l'émergence progressive de nouveaux matériaux et le désir d'améliorer la précision des résultats ont stimulé la recherche vers l'amélioration des méthodes existantes et le développement de nouvelles. De nos jours, le domaine du CND fait intervenir plusieurs domaines de la physique : la mécanique, la thermique, la magnétostatique ou encore l'optique pour la détection de divers défauts. Chaque spécialité a été adaptée suivant les besoins de l'industrie. Selon le type d'industrie considérée, la caractérisation de l'intégrité de la pièce n'est pas la même. En effet, dans des domaines à hauts risques où la vie humaine est en jeu, les mesures mises en place sont drastiques et ceci implique des moyens financiers importants. Réussir à diminuer ces coûts tout en conservant la même qualité de détection est un des objectif de la thèse.

Les mathématiques, l'informatique ainsi que l'électronique gravitent autours du CND. Par exemple, les techniques de traitements d'images s'appuient sur des modèles mathématiques programmés par la suite. De plus, la robotique est un élément indispensable afin d'automatiser les essais pour obtenir des résultats reproductibles. L'évolution de la technologie a aussi permis d'augmenter l'expertise au niveau des défauts dans les structures. L'étude des matériaux a permis de créer et de développer d'autres types de matériaux pouvant remplacer ceux déjà existants car possédant des caractéristiques physiques performantes.

Après une lente maturation à partir des années 1920, les composites stratifiés étaient passés au statut de matériaux d'avenir dans les années 1980 [2]. A cette époque, il n'était déjà plus possible de parler de nouveauté mais plutôt de généralisation de leur usage et de leur industrialisation. De nos jours, ce type de matériaux est couramment utilisé dans de nombreux domaines et, en particulier, prend son essor en aéronautique. En effet, la proportion de composites sur un avion commercial est passé de 15% avant les années 2000 à 50% en 2010 [3] et cette tendance ne fait que se confirmer. Les avantages principaux des stratifiés à matrice polymère sont leur légèreté et leur rigidité. La masse de l'avion est ainsi réduite, entrainant une consommation en carburant moindre. Toutefois, le composite est plus sensible aux impacts que les matériaux métalliques, ce qui nécessite de pouvoir détecter avec précision l'apparition de défauts en cours de fabrication ou en phase de maintenance.

Depuis la fin des années 1970, la recherche de défauts dans les composites s'est intensifiée. Plusieurs types de défauts peuvent être présents au sein de ces matériaux, et ceux-ci peuvent être situés aussi bien en surface qu'à l'intérieur du stratifié, et ainsi rester invisibles à l'œil nu. Leur nature et leur

provenance ne sont pas les mêmes. Le mode de rupture le plus critique est le délaminage. Pour le détecter, de nombreuses méthodes de CND existent déjà, mais elles ne donnent pas encore entière satisfaction. Par exemple, une méthode peut donner de bons résultats mais la taille de l'échantillon doit être petite ou alors elle n'est pas adaptée à tous les types de matériaux. Ces dernières années, pour améliorer la qualité de la détection mais aussi pour améliorer les possibilités d'analyse, différentes méthodes de CND couplées ont été développées.

En considérant les divers avantages de chaque méthode CND, le choix du moyen de détection s'est finalement porté sur la thermographie IR. Le domaine militaire est le premier à employer la thermographie infrarouge pour la détection de cibles. Mais elle est aussi employée dans de nombreux domaines tels que la médecine, la géologie ou le génie civil. Dans ce dernier domaine, elle est utilisée de façon passive car elle permet par exemple de mesurer les capacités d'isolation d'un bâtiment. Dans le domaine aéronautique, le matériau à contrôler est soumis à une excitation extérieure maîtrisée puis le rayonnement émis par celui-ci est alors analysé. Il s'agit alors de thermographie active. Plusieurs types d'excitations sont employées afin de générer un flux de chaleur dans la pièce à inspecter : par méthode optique, mécanique ou électrique. Une caméra IR permet d'obtenir un champ de luminance de la surface du matériau testé.

Ce manuscrit présente dans un premier temps les méthodes de CND en expliquant leur mise en œuvre ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Cette étude comparative a permis de dégager les méthodes les plus prometteuses.

L'objectif principal de cette thèse est de réaliser un prototype permettant une inspection rapide, sans contact et peu coûteuse de plaques stratifiées en carbone/époxyde. Le composite étant par nature un diélectrique, les méthodes employant une excitation électrique ne peuvent pas être prises en compte et peuvent par conséquent être écartées d'office. Dans le cas idéal, la méthode optique pure répond au cahier des charges fixé. L'excitation mécanique, bien qu'étant en contact avec le composite, permet d'élargir la compréhension des signaux enregistrés par la caméra IR. Afin de faire la différence entre ces deux techniques, la première est appelée la thermographie et l'autre thermosonique.

Cette méthode nécessite une compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. La caméra IR enregistre des images brutes qu'il faut traiter numériquement afin de faire ressortir l'information souhaitée. Plusieurs méthodes de traitement d'images existent depuis de nombreuses années alors que d'autres sont encore en cours de développement. Certaines, sont basées sur l'analyse de l'évolution de la courbe de réponse en température, d'autres sur une étude spatiale/temporelle.

Deux bancs d'essais ont été réalisé dans le cadre de cette étude : le premier pour la thermosonique et le second pour la thermographie. Des essais en ultrasons C-scan ont été réalisés. Cette méthode employée dans le domaine aéronautique sert de référence. Les résultats obtenus par les deux prototypes ont été comparés à cette technique permettant ainsi une analyse constructive de la précision de la détection des défauts.

Chapitre 1

Méthodes de Contrôle Non Destructif : application aux composites stratifiés

La première partie de ce chapitre introductif a pour but de résumer les propriétés des matériaux composites et leur utilisation dans le domaine aéronautique. La raison de la présence dans les stratifiés de différents défauts ainsi que leur nature y est résumée. L'étude se focalise sur le défaut le plus critique : le délaminage.

La seconde partie est axée sur l'étude des différentes méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) et notamment leur fonctionnement, leurs applications dans l'industrie mais aussi leurs avantages et inconvénients. Ceci a permis d'établir un tableau classifiant ces techniques suivant les critères importants à notre étude justifiant la méthode employée par la suite : la thermographie infrarouge.

1.1) Les composites stratifiés

1.1.1) Propriétés des matériaux composites

Trois grandes familles de fibres sont utilisées dans l'industrie : la fibre de verre, la fibre de carbone et la fibre aramide. Le Tableau 1.1 présente les caractéristiques globales des différentes fibres. Les fibres de carbone et de Kevlar possèdent de meilleures propriétés mécaniques comme un module d'Young plus grand, une résistance à la traction plus importante et une densité plus faible que les fibres de verre (qui sont cependant moins chères). Les domaines d'application de cette dernière sont principalement les transports terrestres. Etant donné les hautes propriétés mécaniques des fibres de carbone et de Kevlar, les industries aéronautique, aérospatiale et du sport de haut niveau se sont intéressées à celles-ci.

	Acier	**Aluminium**	**Verre**	**Carbone HR**	**Carbone HM**	**Kevlar 49**
Densité ($kg.m^{-3}$)	7800	2800	2600	1750	1810	1450
***Diamètre fibre* (µm)**	/	/	5 - 24	5 - 7	5 - 12	12
***Module d'élasticité en traction* (GPa)**	210	70	73	230	400	120
***Résistance à la traction* (MPa)**	500 - 1200	80 - 500	3400	3000 - 4000	2800	3000
Prix de revient	1 - 5	4	1	10 - 15	30 - 50	2 - 3

Tableau 1.1 : Propriétés mécaniques de différentes fibres [4]

C'est pourquoi cette étude s'est porté sur les composites en fibre de carbone et matrice en résine époxyde. Le prix de ces composites stratifiés reste élevé mais il n'a jamais cessé de diminuer avec l'augmentation des volumes de production. Les valeurs de prix indiqués dans le Tableau 1.1 donnent

un ordre d'idée de la valeur des fibres sur le marché. Elles sont basées sur le prix d'un kilogramme d'acier correspondant à la base 1.

Suivant les procédés de fabrication utilisés pour réaliser les fibres de carbone, on différencie les fibres « Haute Résistance » (HR) et les fibres « Haute Module » (HM). Les propriétés physiques et mécaniques dépendent de la nature chimique du précurseur, des conditions et des procédés de fabrication. Les fibres de carbone sont caractérisées par leur faible densité, leur résistance à la traction élevée, leur souplesse, leur tenue à la température, leur faible coefficient de dilatation thermique et leur résistance chimique (Tableau 1.2).

Les fibres HM sont définies par un coefficient d'élasticité élevé, tandis que les fibres HR sont particulièrement résistantes à la traction.

	Fibres UD		**Tissus équilibrés**	
Caractéristiques	**Fibres HR**	**Fibres HM**	**Tissus HR**	**Tissus HM**
Physiques				
Masse volumique ($kg.dm^{-3}$)	1,73 à 1,8	1,8 à 2	1,6	1,6
Thermique				
Capacité thermique massique (kJ/(kg.K))	0,7	0,7	0,7	0,7
Conductivité thermique (W/mK)	8 à 35	80 à 160	4 à 17	40 à 80
Caractéristiques mécaniques des filaments vierges				
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	2400 à 4200	1850 à 2760	600	350
Module d'élasticité en traction (GPa)	200 à 245	330 à 690	70	85
Taux d'allongement à la rupture en traction (%)	1,33 à 1,55	0,32 à 0,73	0,85	0,4
Module de Colomb (GPa)	12,2	3,2 à 9,2	5	5
Tenue au choc	Faible	Faible	Moyen/Faible	Moyen/Faible

Tableau 1.2 : Propriétés physiques de l'UD en fibres de carbone

1.1.2) Défauts présents dans les composites stratifiés

Les sources de défauts couramment introduits dans les matériaux composites lors de leur mise en œuvre et de leur usinage comprennent (Figure 1.1) :

- Inclusions : les supports papiers accidentellement inclus dans le matériel en cours de fabrication peuvent avoir un effet dégradant sur les propriétés mécaniques [5].

- Vide : il apparaît suite à une pénétration capillaire lente et inégale de la résine dans les espaces entre les filaments pendant le processus d'imprégnation [6].

- Microfissures : les chargements thermiques cycliques sont à l'origine de ces microfissures [7].

- Oxydation : elle est la conséquence d'un couplage entre la diffusion de l'oxygène au sein de la matière et des réactions chimiques de l'espèce oxydante avec le réseau époxyde, réactions qui sont activées thermiquement [8].

- Rupture de fibre : elle apparaît soit en raison d'un usinage, soit à cause de la courbure de fibre excessive au niveau d'arêtes présentant de faibles rayons de courbures, soit en raison de sollicitations de service trop élevées.

- Porosité : elle apparaît en raison de l'inclusion d'air, de solvants ou d'autres agents de contamination pendant le mélange de la résine [9].

- Délaminage : voir paragraphe 1.1.3

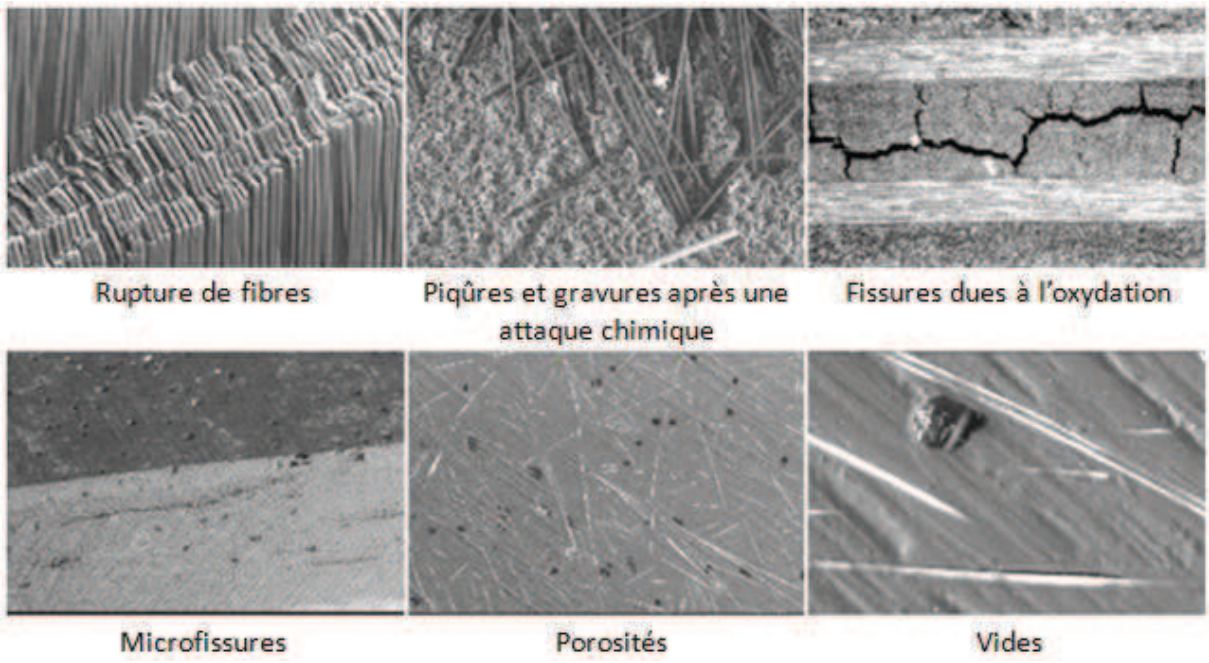


Figure 1.1: Exemple de défauts présents dans les composites [10]

D'autres endommagements apparaissent en cours d'utilisation de la structure à cause des sollicitations de service trop élevées ou de phénomènes de fatigue. Pour identifier la présence, la nature, l'emplacement, la taille, la morphologie des défauts, et évaluer leur criticité sur la performance en service d'une structure, il est essentiel d'avoir une bonne compréhension des types de défauts qui sont généralement trouvés dans les matériaux composites stratifiés (Figure 1.2) : un délaminage, une décohésion fibre-matrice, une rupture longitudinale de la matrice, une rupture transverse de la matrice et une rupture de fibre.

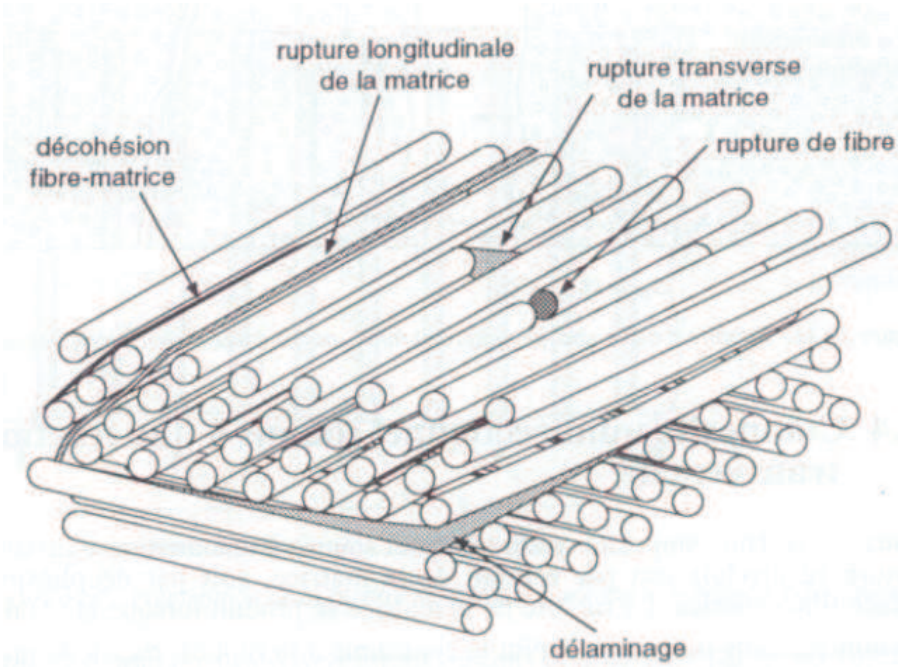


Figure 1.2: Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés [11].

1.1.3) Délaminage

Le délaminage est le mode de rupture le plus critique pour les matériaux composites : il s'agit d'une décohésion de deux plis successifs due à un cisaillement interlaminaire excessif dans l'épaisseur (longitudinalement). Dans les matériaux stratifiés, cela se traduit par une séparation des couches sans que cela soit forcément visible à la surface comme montré en Figure 1.3-a et Figure 1.3-b.

Ce type de défaut peut se produire lors de la fabrication, mais plus généralement survient en service, et peut avoir un impact très néfaste sur les propriétés mécaniques (élastiques et de rupture), en particulier en compression comme montré en Figure 1.3-c et Figure 1.3-d.

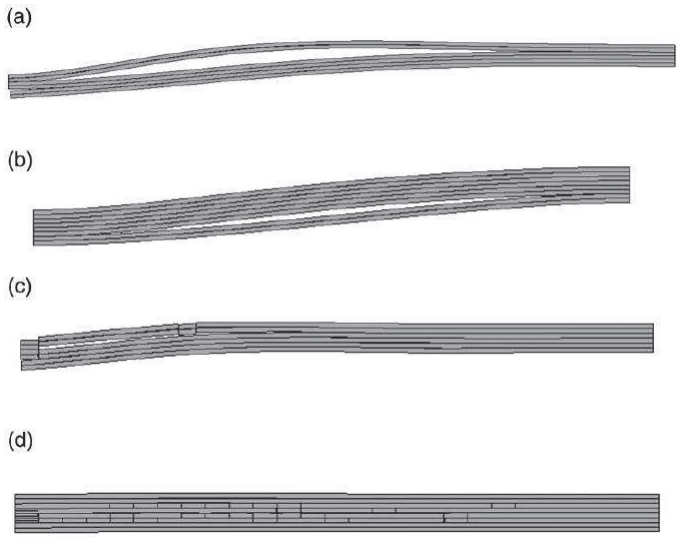


Figure 1.3: Délaminage (a et b),Délaminage et rupture (c et d) [12]

Les causes d'apparition du délaminage sont multiples dont les principales sont : l'oubli d'un morceau de film protecteur entre deux plis pré-imprégnés lors de la fabrication, la présence d'un produit polluant contaminant localement la résine et supprimant ses pouvoirs adhésifs, les concentrations de contraintes permanentes (variations géométriques, bords libres, épaisseur...) ou occasionnelles (chocs, impacts, dilatation thermique).

Les conséquences structurelles d'un délaminage sont alors les pertes de la résistance mécanique et de rigidité pouvant entraîner une rupture complète du matériau.

En raison de l'utilisation croissante des composites stratifiés dans l'aéronautique pour la réalisation de pièces structurelles, le délaminage devient de plus en plus une préoccupation dans la sécurité aérienne.

Comme le montre la figure 1.4, 50% de la structure des nouveaux avions est maintenant réalisée en composite, dont la grande majorité se trouve être du composite stratifié carbone/époxyde (utilisé pour la réalisation d'éléments structuraux). Il est donc nécessaire d'employer des moyens d'investigations avancés pour contrôler leur état de santé matière.

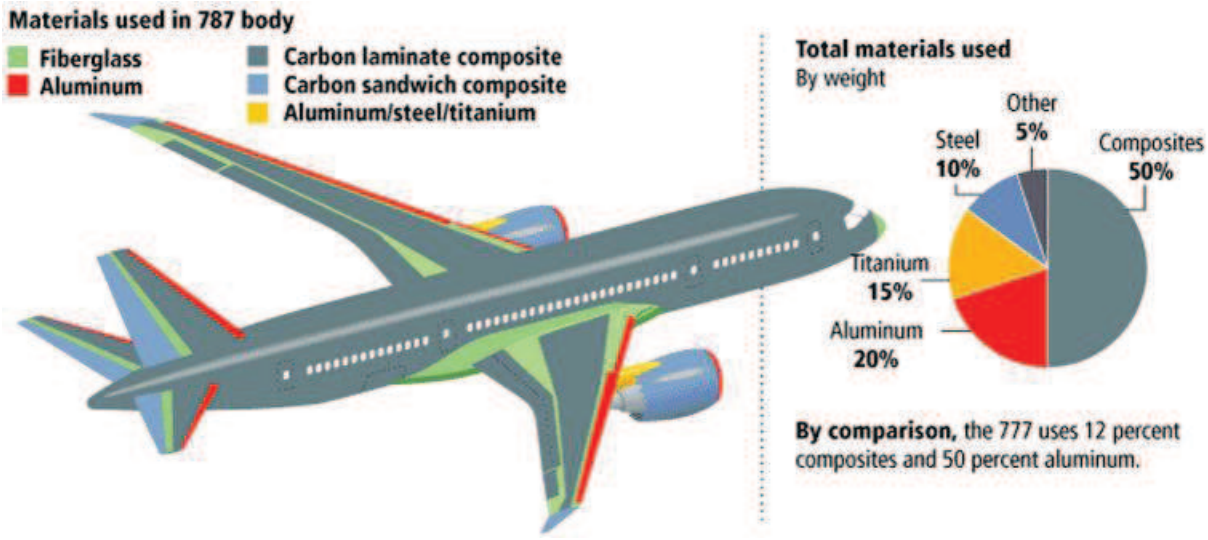


Figure 1.4 : Répartition en masse des matériaux du nouveau Boeing 787 [13]

Contrôler l'état d'intégrité de ces structures sans les dégrader est donc devenu fondamental. Cette évolution entraine par conséquent une modification et une amélioration des méthodes de contrôle usuelles et traditionnelles. Un état de l'art des différentes techniques de contrôle non destructif (CND) est donc présente dans la suite de cette étude afin d'isoler les méthodes répondant au mieux aux exigences de l'industrie aéronautique.

1.2) Méthodes traditionnelles de contrôle non destructif (CND)

Les méthodes de CND existent et ont évolué depuis le milieu du vingtième siècle. Actuellement, certaines méthodes traditionnelles paraissant désuètes tendent à être remplacées, tandis que d'autres techniques exploitant les dernières avancées technologiques font au contraire leur apparition.

1.2.1) Ressuage

Cette ancienne méthode révèle la présence de discontinuités ouvertes en surface (rayures, microfissures) [14]. Elle est applicable à tous les matériaux non poreux et met en évidence des discontinuités jusqu'à 1 µm d'ouverture. Cette méthode simple d'utilisation se décompose en trois étapes, tel que schématisé en Figure 1.5 :

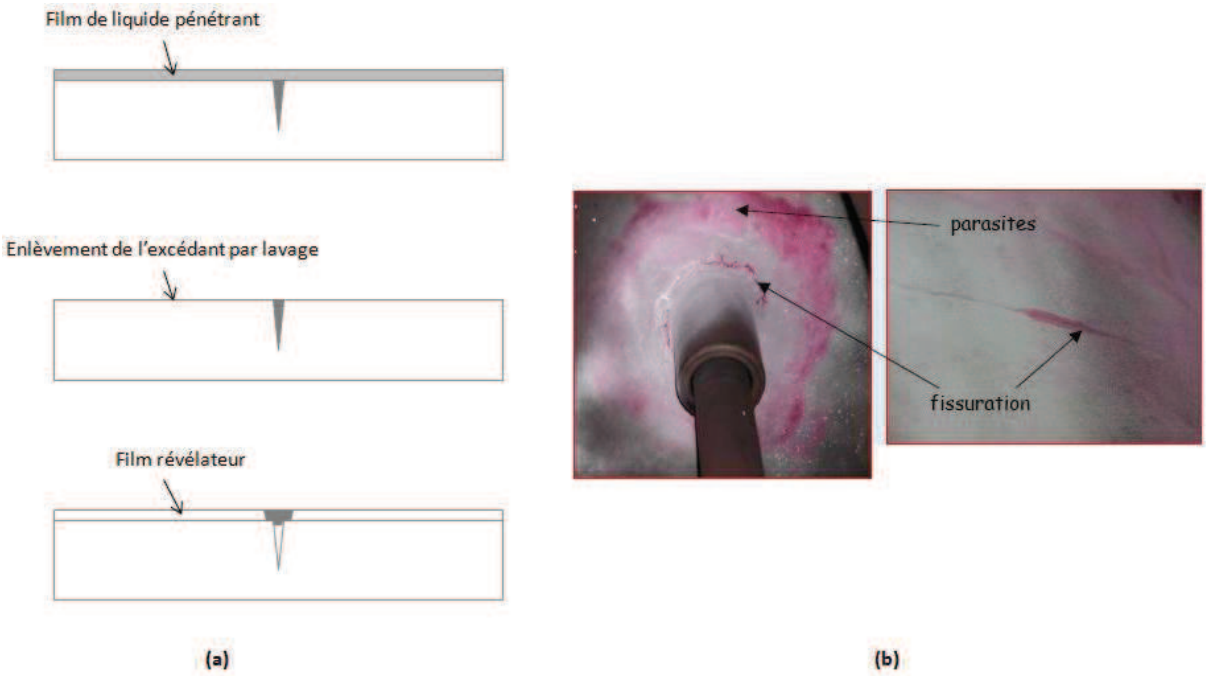


Figure 1.5 : Principe du ressuage
(a) Protocole expérimental de ressuage ; (b) Défaut mis en évidence par le ressuage

- Tout d'abord, un liquide dit « pénétrant » à faible tension superficielle et contenant des pigments visibles est appliqué à la surface du matériau au moyen d'un pinceau ou d'une bombe aérosol. Ce liquide pénètre par capillarité dans tous les interstices constitués par les défauts débouchants à la surface de la pièce.

- Après un certain temps d'attente, l'enlèvement de l'excédent est réalisé par lavage à l'eau ou par un solvant ou un chiffon.

- Puis, on applique un produit révélateur qui agit comme un buvard. Après quelque temps, le liquide retenu dans les défauts débouchants est absorbé par capillarité (d'où le terme de ressuage). L'apparition d'une tâche colorée révèle la présence d'un défaut comme le montre la Figure 1.5-b.

Cette méthode est peu coûteuse, sa sensibilité de détection de défauts débouchants est bonne. Toutefois, il est impossible de détecter des défauts en profondeur. De plus, il faut s'assurer que la surface de la pièce soit propre et bien dégraissée. Enfin, cette méthode est liée à l'utilisation de produits nocifs, inflammables ou volatiles peu respectueux de l'environnement. Enfin, ils sont souvent mal adaptés aux matériaux composites puisqu'ils peuvent parfois dégrader les matrices polymères.

1.2.2) Contrôle d’étanchéité

Pour détecter une fuite de gaz ou de liquide à travers la paroi d’une enceinte, plusieurs méthodes peuvent être utilisées en contrôle d’étanchéité. Les premières font appel à des gaz traceurs couplés à des instruments très sensibles. Les gaz traceurs utilisés sont en général l’hélium ou l’hydrogène [15] du fait de la toute petite taille de leurs molécules. A l’aide d’un système permettant de mesurer une différence de pression entre l’amont et l’aval, les fuites peuvent ainsi être mises en évidence avec gaz traceur ou sans gaz traceur (mise en bassin).

Une autre méthode de contrôle couple une mise en dépression (par pompe à vide) des éléments à contrôler à une détection acoustique des « bruits de fuite ». Cette turbulence est détectée grâce au positionnement de capteurs reliés à un système informatique [16].

Cette méthode est applicable à tout type de matériau, et est utilisée pour détecter des fuites dans des canalisations, des containers ou des réservoirs. Toutefois, cette technique n'est utilisable uniquement pour des fissures transversantes.

1.2.3) Magnétoscopie

Cet examen consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique jusqu'à sa saturation. Ce champ se trouve dévié s'il rencontre un obstacle sur son parcours. Si cet obstacle est proche de la surface, les lignes de force du champ peuvent sortir à l'extérieur de la pièce en créant à l'endroit du défaut une sorte de mini aimant sur les pôles duquel peut s'accumuler une poudre magnétique très fine préalablement déposée (utilisée à sec ou en suspension dans un liquide). La Figure 1.6 montre la détection de défauts débouchant par magnétoscopie [17].

Pour être révélés, les défauts doivent être perpendiculaires aux lignes magnétiques (ils sont indécelables par cette technique lorsqu'ils sont parallèles aux lignes de champ).

L’utilisation d’un courant continu pour l’aimantation autorise une profondeur de détection jusqu’à quelques millimètres (environ 5 mm) tandis que l’utilisation d’un courant alternatif donne des champs importants (surtout en surface) qui ne permettent donc de détecter que des défauts débouchant.

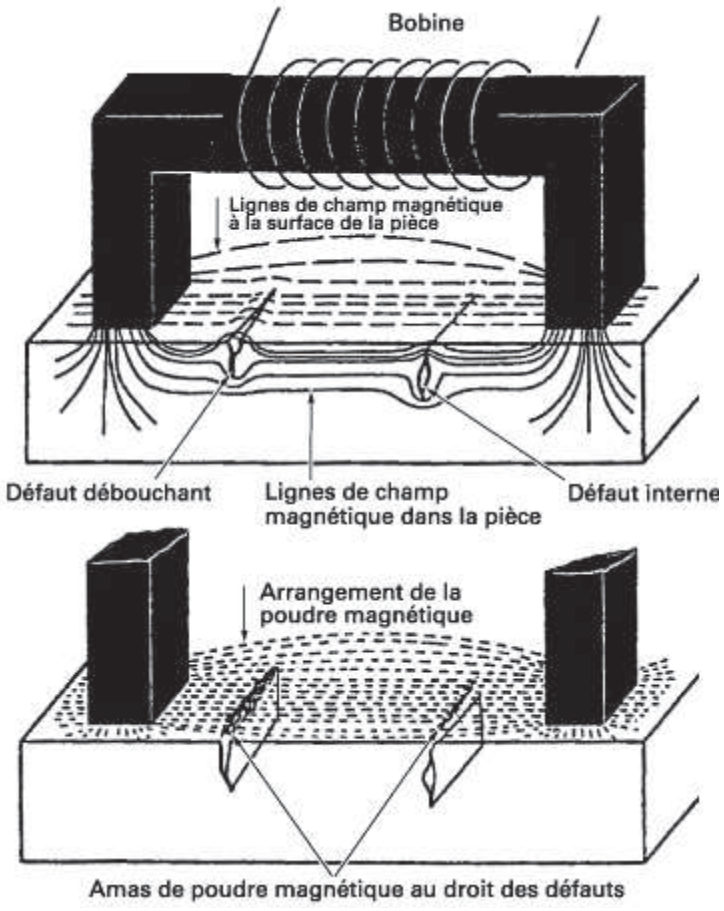


Figure 1.6 : Détection de défauts débouchant par magnétoscopie

Cette méthode simple et rapide permet de détecter facilement des défauts débouchant et subsurfaciques. De plus, elle possède une très bonne sensibilité de détection de défauts plans. Toutefois, la magnétoscopie ne permet pas de détecter des défauts vraiment en profondeur. De plus, la détection des défauts non linéaires est moyenne.

La magnétoscopie est une méthode applicable uniquement aux pièces ferromagnétiques pour lesquelles les pièces peuvent être aimantées par passage de champ ou par passage de courant.

1.2.4) Courants de Foucault

Cette méthode consiste à créer des courants induits dans un matériau conducteur en faisant varier un flux magnétique. Ces courants induits circulent localement dans le matériau et ont une distribution et une répartition qui dépendent du champ magnétique d'excitation, de la géométrie et des caractéristiques de conductivité électrique et de perméabilité magnétique de la pièce examinée. En présence d'une anomalie dans la pièce contrôlée, leurs déplacements sont perturbés (comme le montre la Figure 1.7), entraînant ainsi une variation de l'impédance apparente du capteur qui dépend de la nature de l'anomalie et de sa dimension volumique. C'est l'analyse de cette variation

d’impédance qui fournit les indications exploitables pour effectuer le contrôle. L'interprétation des signaux recueillis s’effectue par comparaison de ceux relevés dans le matériau contrôlé avec ceux d’un étalon, comportant des anomalies représentatives des phénomènes recherchés Cet examen consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique jusqu'à sa saturation. Ce champ se trouve dévié s'il rencontre un obstacle sur son parcours. Si cet obstacle est proche de la surface, les lignes de force du champ peuvent sortir à l'extérieur de la pièce en créant à l'endroit du défaut une sorte de mini aimant sur les pôles duquel peut s'accumuler une poudre magnétique très fine préalablement déposée (utilisée à sec ou en suspension dans un liquide). La Figure 1.6 montre la détection de défauts débouchant par magnétoscopie [17].

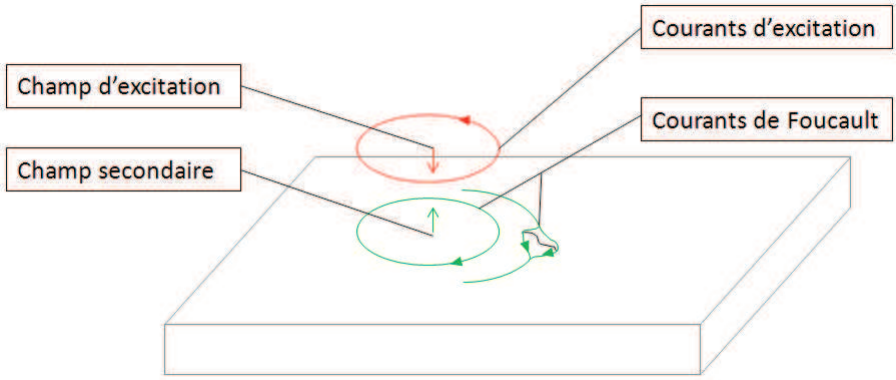


Figure 1.7: Détection de défauts par courants de Foucault

Il est important de signaler que les courants de Foucault sont concentrés majoritairement au voisinage de la surface du matériau. En effet, le champ électromagnétique décroît de façon exponentielle en fonction de la profondeur de la pièce [18]. Cette méthode permet donc de détecter des défauts surfaciques et sub-surfaciques sur des pièces à faible épaisseur, et ne peut pas être utilisée avec des matériaux non-conducteurs tels que les composites à matrice polymère.

1.2.5) Analyse vibratoire

Applicable à tous types de matériaux, l'analyse vibratoire [19] consiste à analyser les oscillations mécaniques d’un système autour d’une position de référence. Ces oscillations peuvent être créées par des sollicitations extérieures ou par le système lui-même.

Après avoir enregistré le signal, l’état mécanique du système est déterminé à partir des descripteurs utilisés durant la phase de traitement du signal.

Bien que cette méthode soit simple à mettre en œuvre et peu coûteuse, elle n’apporte pas d’information sur la localisation et la taille des défauts. L’utilisateur sait ainsi juste s’il doit réaliser ou non un examen plus approfondi de la pièce.

1.2.6) Emission acoustique

Cette méthode passive est utilisée pour suivre des propagations de défauts dans un matériau suite à une sollicitation par contrainte thermique, mécanique, chimique… Un train d'ondes élastiques est créé à chaque propagation du défaut, ce train se propageant ensuite dans tout le matériau. Ces ondes sont détectées par un capteur piézoélectrique puis amplifiées. Cette technique permet une évaluation globale de l'intégrité de la pièce (Figure 1.8). Il est aussi possible par triangulation de localiser le défaut dans la pièce [20].

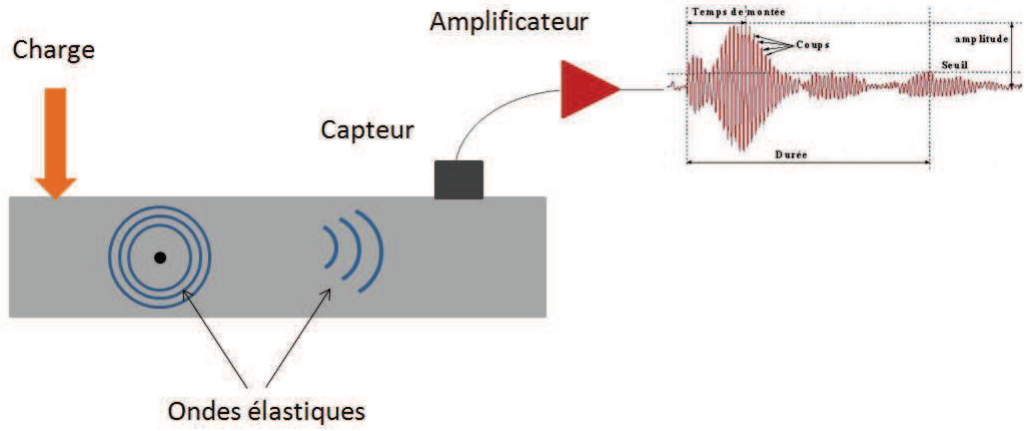


Figure 1.8 : Principe de la détection de la propagation de défauts par émission acoustique

1.2.7) Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques ayant des fréquences oscillatoires supérieures à 20kHz et pouvant aller jusqu'à plusieurs MHz. Celles-ci sont produites par effet piézoélectrique par des transducteurs, et introduites dans le matériau à inspecter via un fluide de couplage. L'onde ultrasonore est en partie réfléchie à chaque fois qu'elle rencontre un changement brutal de milieu (bords supérieur et inférieurs d'un plaque, défauts...). La réception du signal réfléchi peut être réalisée de deux manières : soit le transducteur émetteur sert aussi de récepteur, soit un autre palpeur convertit le signal mécanique réfléchi en un signal électrique. Dans ce dernier cas, on parlera de méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction) [21].

La fréquence d'utilisation des transducteurs, comprise entre 0.5 MHz et 10MHz, ne permet pas un bon couplage avec l'air. Le couplant peut en revanche être de l'eau, on parle alors d'essai en immersion [22] (la pièce à inspecter est alors complètement immergée dans un bassin) pour analyser une grande partie de la pièce (Figure 1.9), ou un gel pour des palpeurs en contact avec le matériau pour contrôler une zone bien précise.

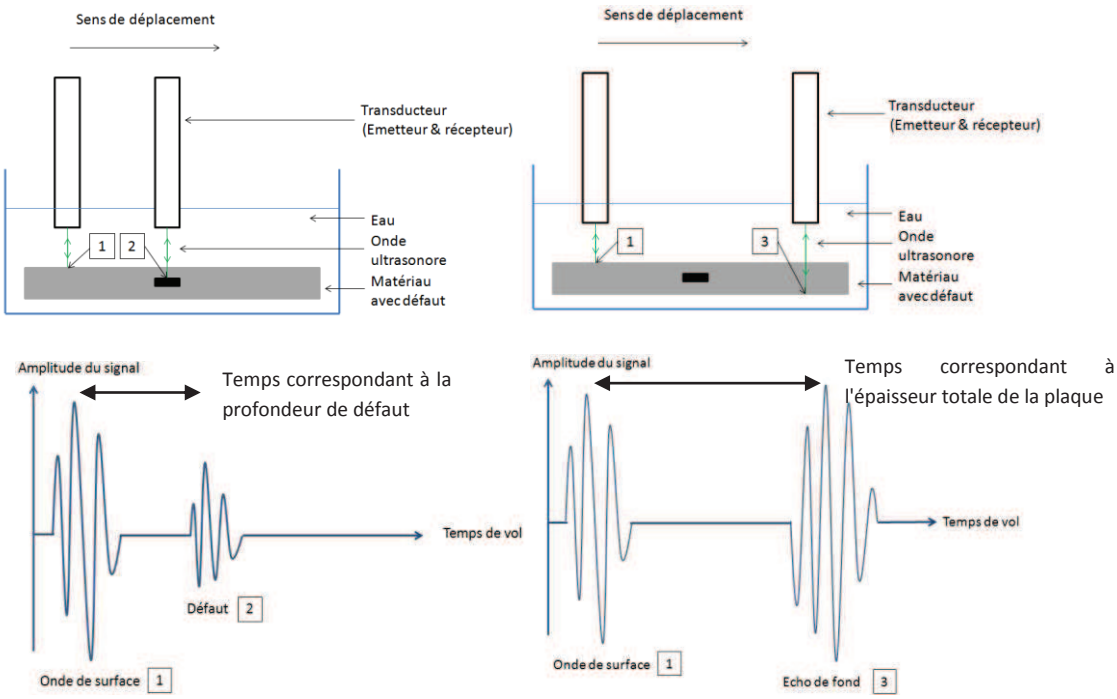


Figure 1.9 : Principe des ultrasons par immersion

Le temps entre l'écho de fond et l'écho de surface étant connu, il devient alors théoriquement possible de connaître la profondeur à laquelle est situé le défaut (en se basant sur le temps de vol entre l'écho du défaut et l'écho de surface).

Cette méthode est souvent utilisée dans l'industrie du fait de sa précision pour détecter des défauts de surface et enfouis. Cependant, il n'est pas possible d'analyser directement la structure entière : l'équipement devient en effet très cher quand les dimensions de la pièce augmentent. Celle-ci doit de plus être immergée, ce qui peut occasionner des problèmes pour certains matériaux. Enfin, les pièces testées doivent avoir une courbure faible et une épaisseur à peu près constante.

Afin de s'affranchir du fluide de couplage, une autre méthode est en cours de mise au point chez certains grands industriels du CND : les ultrasons laser.

Un faisceau laser (soit Nd-YAG (grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme) soit CO_2) pulsé (de quelques dizaines de nanosecondes à quelques femto secondes) impacte la surface du matériau à tester. La puissance optique absorbée par le matériau est convertie en chaleur et aboutit donc à une augmentation rapide de la température locale. Il en résulte une dilatation thermique rapide d'une zone locale ce qui conduit à la génération d'ultrasons dans le milieu. La puissance optique est maintenue suffisamment basse pour qu'une infime partie du matériau ne s'évapore pas et qu'il n'y ait pas de phénomène d'ablation.

La directivité des ondes longitudinales et de cisaillement générées par la source thermoélastique a été calculée théoriquement et vérifiée expérimentalement par un certain nombre de chercheurs. La

détection est alors réalisée par un interféromètre (Fabry-Pérot, Michelson). La fréquence des ultrasons observés varie entre 0,1 et 150 MHz [23]. Le principe des ultrasons laser est schématisé en Figure 1.10.

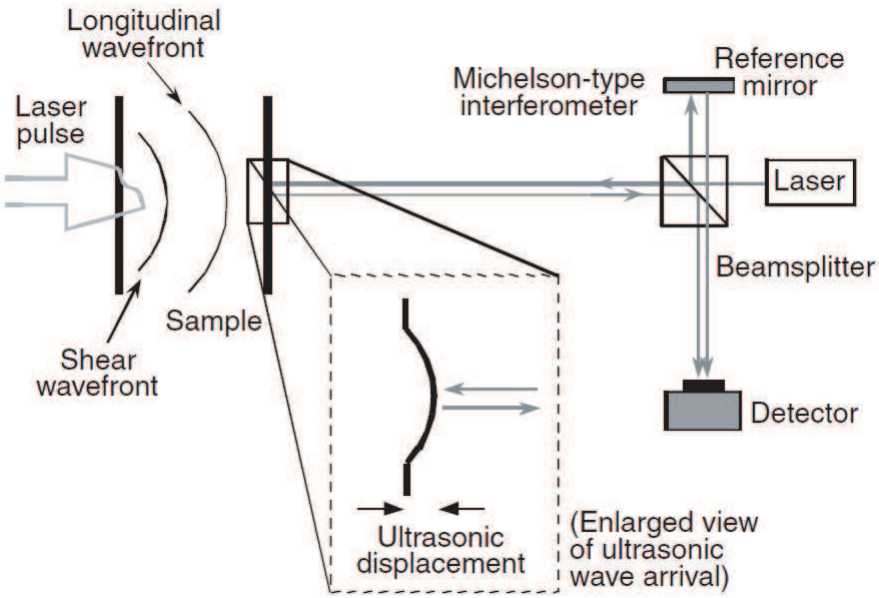


Figure 1.10: Principe de détectiondes défauts par ultrasons laser [24]

Cette méthode sans contact est utilisée pour des mesures d'épaisseur, pour l'inspection de soudures, pour détecter des défauts dans les composites (comme montré en Figure 1.11), pour mesurer la profondeur de fissures ou la taille de grain dans les métaux [25]. Toutefois, cette technique encore relativement onéreuse, est moins sensible que les autres méthodes par ultrasons (du fait que cette méthode utilise un récepteur optique et non plus piézoélectrique). De plus, le rendement de la génération d'ultrasons est fonction des propriétés d'absorption du matériau.

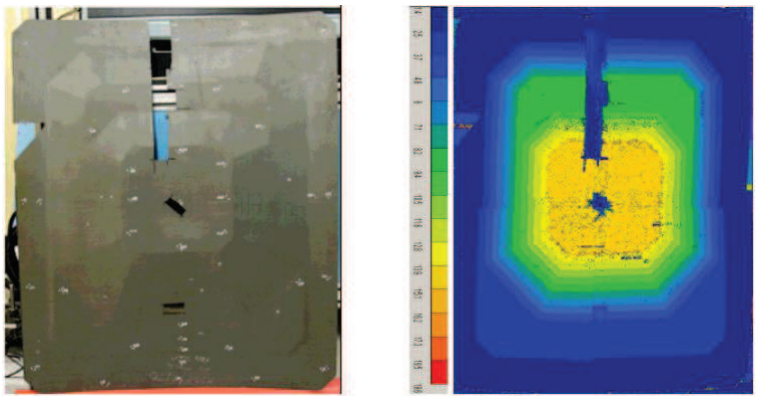


Figure 1.11 : Photographie et cartographie par ultrasons laser de l' épaisseur d'un panneau composite [26]

1.2.8) Radiographie

Le principe de la radiographie est relativement simple : des rayons X ou γ (respectivement dans la gamme de fréquence de 3.10^{16} Hz - 3.10^{19} Hz et de 3.10^{19} Hz et plus) sont projetés par une source radioactive sur la structure à analyser. Ces ondes électromagnétiques (de très courte longueur d'onde : entre 10^{-12} m et 10^{-8} m pour les rayons X et inférieur à 10^{-12}m pour les rayons γ) traversent en partie la structure, l'autre partie étant absorbée par le matériau. Un film photographique capte ensuite les rayons ressortants. Cette méthode est mise en valeur par la Figure 1.12. Un examen visuel de ce film photographie est enfin réalisé par l'utilisateur [27].

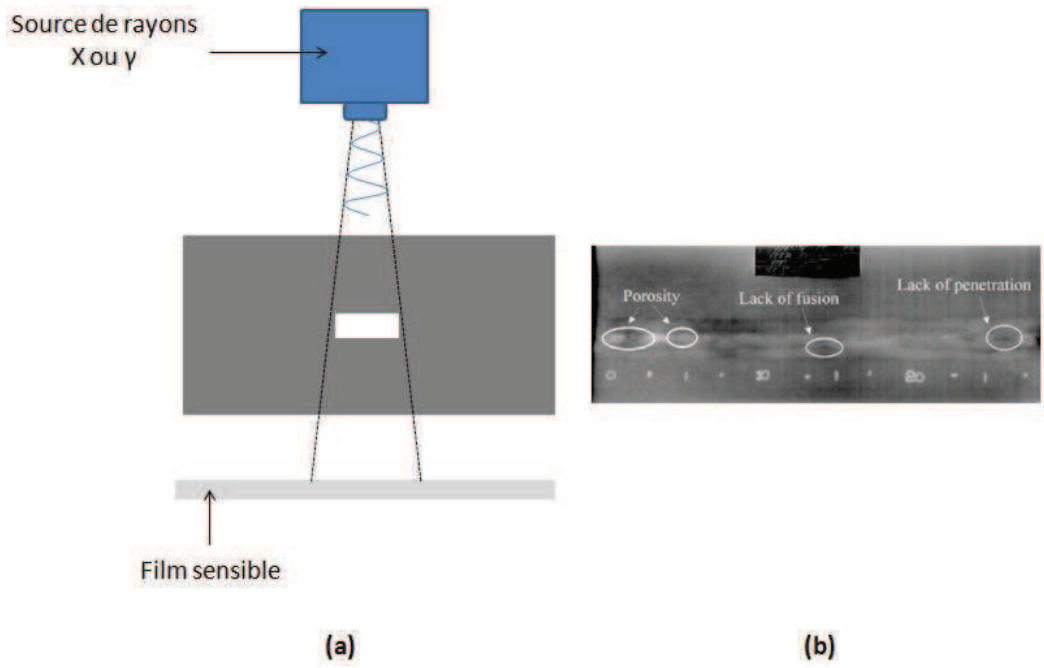


Figure 1.12 : Illustration du fonctionnement de la radiographie
(a) Principe de la radiographie ; (b) exemple d'image obtenue par radiographie [28]

La radiographie est une méthode très souvent utilisée pour l'inspection de soudures, pour détecter des défauts débouchants et internes. Cette méthode contrôle l'intégrité de tous types de matériaux (même à travers plusieurs centimètres d'acier) et de pièces à géométrie complexe.

Pour des raisons de sécurité, il est demandé d'utiliser cette méthode avec beaucoup de précaution. En effet la salle doit être entourée de plomb pour confiner les radiations. La taille de l'échantillon est aussi limitée.

1.2.9) Tomographie

Très utilisée dans le domaine médical, la tomographie est une technique d'imagerie qui permet de reconstruire le volume 3D d'un objet à partir d'une succession de coupes en 2D (réalisées grâce aux platines de rotation et de translation). Basée sur le principe de la radiographie (même source de rayonnement X ou γ), cette méthode permet de mesurer des densités ou des dimensions, de rechercher des anomalies à l'intérieur des objets (Figure 1.13) ou bien encore d'examiner en temps réel des matériaux soumis à des contraintes [29]. Le principe de la tomographie est représenté Figure 1.14.

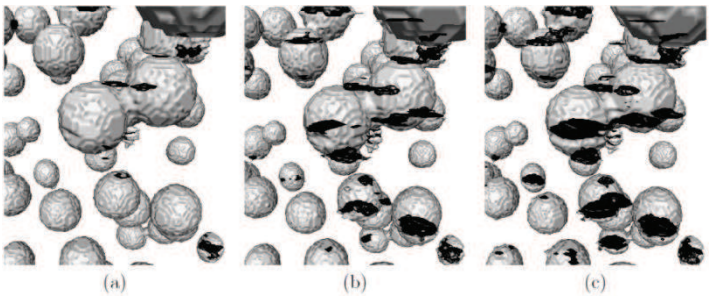


Figure 1.13: Exemple de visualisation tridimensionnelle de ruptures d'inclusions pour trois déformations
(a) $\varepsilon^{lg} = 0,06$, (b) $\varepsilon^{lg} = 0,08$, (c) $\varepsilon^{lg} = 0,09$ [30]

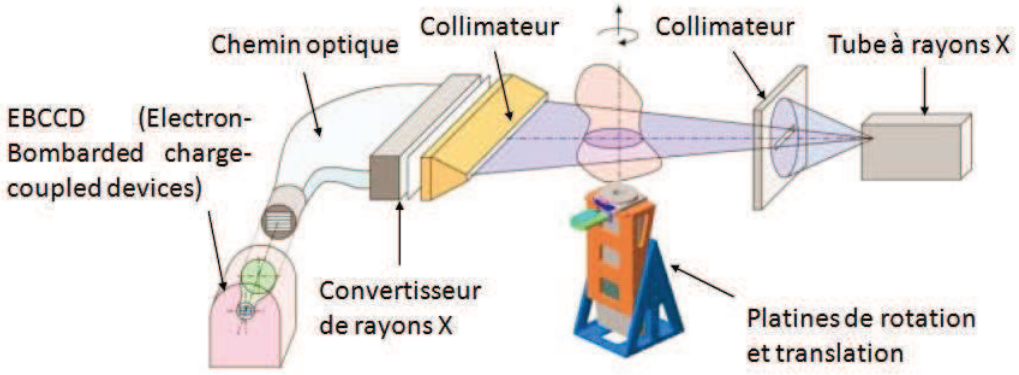


Figure 1.14: Principe de la tomographie [31]

Cette méthode nécessite un équipement lourd ce qui entraine un coût important d'installation et d'utilisation. La taille des pièces à inspecter est encore plus petite que la radiographie.

1.2.10) Contrôle visuel

Le contrôle visuel est la méthode la plus utilisée en CND. En effet des défauts grossiers de surface peuvent être directement relevés par l'opérateur. De plus, cet examen donne des informations sur la méthode de contrôle complémentaire à utiliser. Suivant le type de matériau et l'accessibilité de la zone à contrôler, une méthode sera préférée à une autre pour obtenir les meilleurs résultats possibles.

Il existe deux types de contrôle visuel permettant la détection de défauts surfaciques : direct et indirect. Le contrôle direct est réalisé à l'œil nu, le contrôle indirect à l'aide de petits équipements simples (comme les endoscopes) [32]. Les caméras CCD (Charge Coupled Device cf chapitre 2) permettent d'obtenir un contrôle plus rigoureux car enregistrable, et pouvant être couplé avec une autre méthode de CND [33]. Toutefois, on ne parlerait plus dans ce cas-là de contrôle visuel comme défini précédemment.

Les limitations de cette méthode sont la reproductibilité et donc les différentes perceptions humaines possibles. De plus, seuls les défauts de surface peuvent être visualisés.

1.2.11) Interférométrie holographique

L'holographie consiste à enregistrer (par interférométrie sur un support photosensible) l'onde lumineuse diffusée ou diffractée (par transmission ou par réflexion) par un objet convenablement éclairé (Figure 1.15), puis à restituer cette onde lumineuse à partir de l'enregistrement (appelé hologramme). Un laser est la plupart du temps utilisé comme source lumineuse car il possède les propriétés adéquates pour la création d'interférences lumineuses de bon contraste.

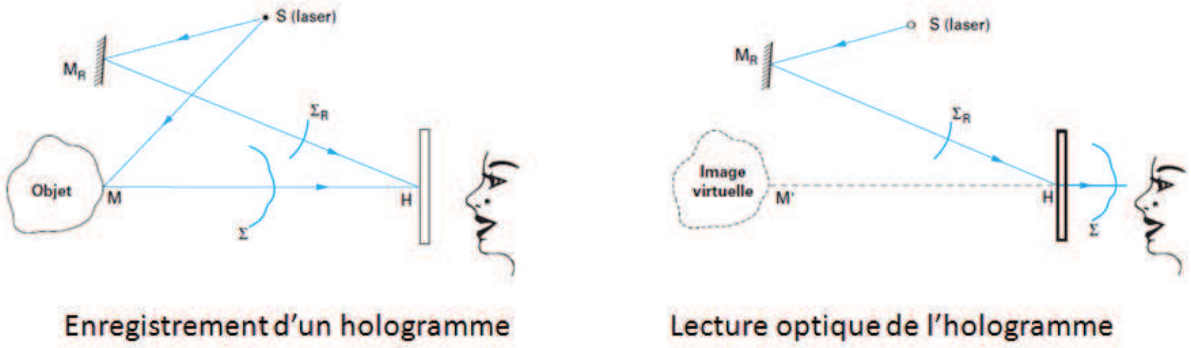


Figure 1.15 : Principe de l'holographie [34]

L'interférométrie holographique consiste à analyser un objet soumis à une contrainte mécanique, thermique… Une déformation inhomogène à la surface de la structure apparaît là où est situé le défaut. Lors de la restitution de l'image, les franges d'interférence possèdent alors un aspect particulier [35].

La visualisation directe et globale des défauts, tels que des décollements, des délaminages, des fissures ou des inhomogénéités sur des surfaces importantes (quelques mètres carrés) ainsi que la bonne résolution spatiale et la bonne sensibilité (ordre du micromètre) font que l'interférométrie holographique est incontournable dans le domaine du CND. Applicable à tout type de matériaux, cette méthode comporte toutefois un inconvénient majeur : l'utilisation de milieux photosensibles à haute résolution et faible sensibilité. Ceux-ci nécessitent des lasers ayant des impulsions d'énergie suffisante et demandent un temps de traitement prohibitif pour de nombreuses applications. Ces raisons expliquent les travaux entrepris pour développer l'holographie numérique : l'interférométrie de Speckle.

1.2.12) Interférométrie de Speckle

Pour pallier à l'inconvénient majeur de l'interférométrie holographique (l'utilisation de milieux photosensibles), l'interférométrie de Speckle utilise des milieux d'enregistrement adressables et effaçables électroniquement du type CCD pour calculer et visualiser le champ des déplacements d'un objet diffusant. Le principe de cette méthode est présenté en Figure 1.16.

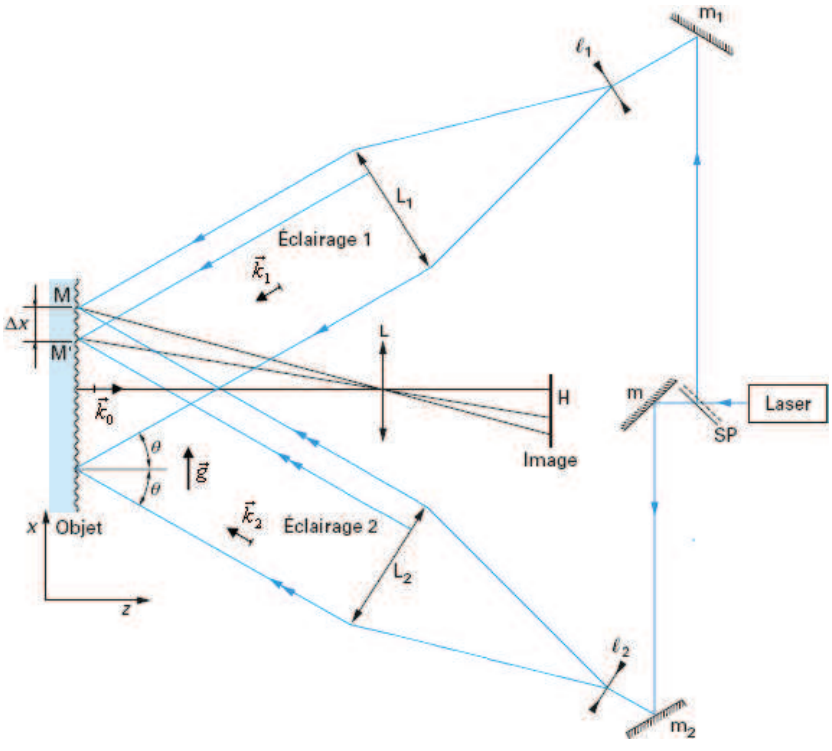


Figure 1.16 : Principe de l'interférométrie de Speckle [36]

Lorsqu'une surface micro-rugueuse est éclairée par un faisceau de lumière cohérente (en pratique, un faisceau laser), celle-ci va refléter la lumière dans toutes les directions selon le principe de Huygens-Fresnel. Les différents faisceaux réfléchis vont interférer entre eux, créant ainsi une figure d'interférence à ondes multiples. Celle-ci n'est alors plus, comme dans le cas de l'interférence d'un nombre fini et faible d'ondes (deux ou trois) un réseau de franges régulier mais au contraire un motif aléatoire d'intensité lumineuse. On parle alors de phénomène de « *granularité laser* » ou, plus couramment, de « *speckle* » selon la désignation anglo-saxonne.

Les méthodes les plus employées dans l'industrie sont la TV-holographie et la shearographie qui sont utilisées respectivement pour l'analyse vibratoire et le contrôle non destructif des pièces. La shearographie [37] est utilisée notamment pour contrôler les pièces de grande taille en matériaux composites. Sa résolution spatiale élevée (résolution spatiale inférieure au micron) et la possibilité de révéler les défauts d'un matériau quasiment en temps réel en font une méthode complémentaire au contrôle ultrasonore. La mise en évidence de la présence de défauts est représentée par la Figure 1.17.

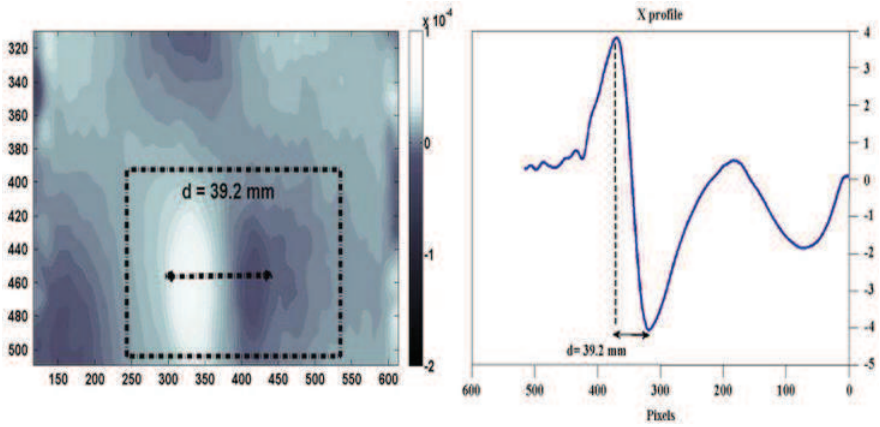


Figure 1.17: Détection et mesure de défauts par shearographie [38]

1.2.13) Thermographie

Les méthodes de CND par thermographie infrarouge (IR) utilisent, d'une part une caméra IR comme moyen de détection, d'autre part un système d'illumination (le plus souvent) permettant de transmettre un échauffement à la pièce à contrôler (Figure 1.18).

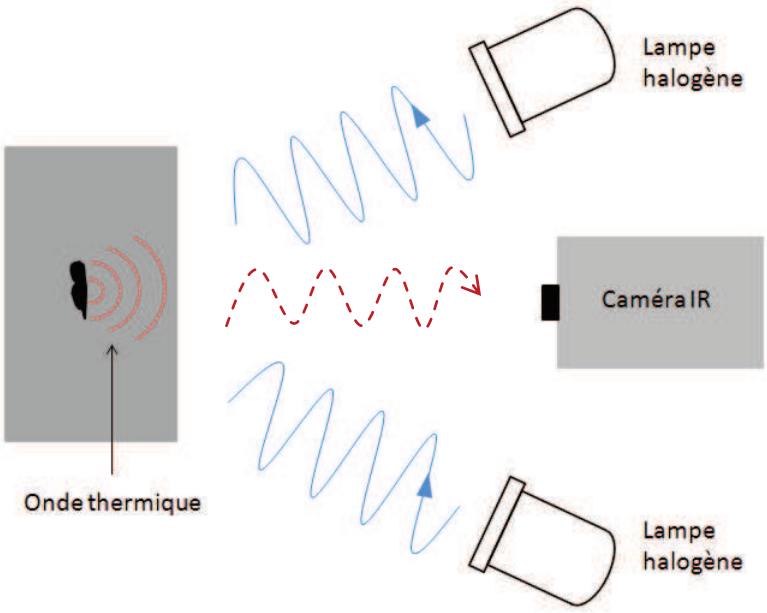


Figure 1.18 : Principe du CND par thermographie

On appelle cela la thermographie active, à différencier de la thermographie passive où l'analyse des gradients de température est faite sans source excitatrice. La présence de défauts débouchants en surface ou internes est mise en évidence par une modification de la température à la surface du matériau : le contraste thermique (Figure 1.19). Cette technique révèle aussi les propriétés thermophysiques des matériaux (diffusivité thermique et donc conductivité thermique) [39].

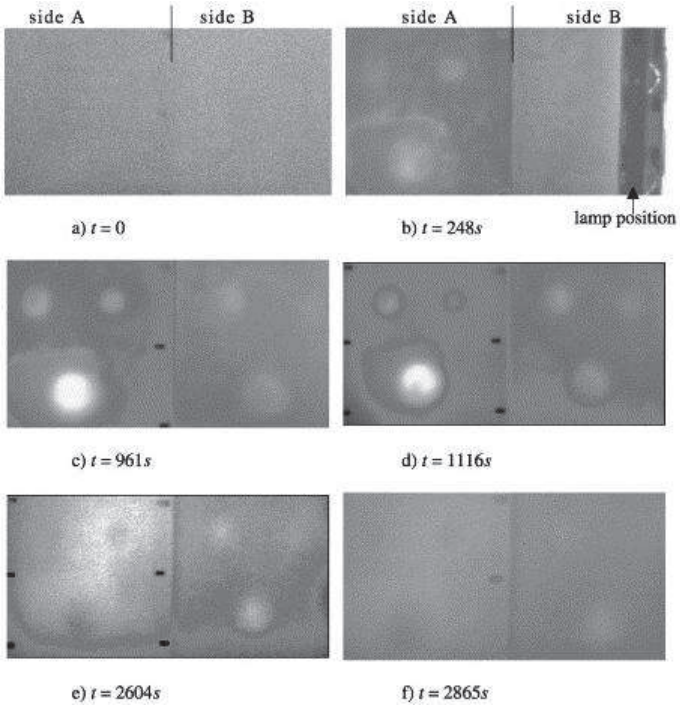


Figure 1.19 : Images thermographiques d'un échantillon de plâtre avec des défauts en plastique [40]

Actuellement, d'autres moyens sont utilisés pour créer un contraste thermique, comme l'excitation mécanique (par une sonotrode) [41] ou encore l'excitation induite (par des bobines à courants de Foucault) [42]. La première méthode est appelée thermosonique. Elle est applicable à tout type de matériaux, et est déjà utilisée dans l'industrie. Toutefois elle n'est pas encore très bien maîtrisée scientifiquement. La seconde technique n'est utilisable qu'avec les matériaux conducteurs.

La thermographie emploie des caméras IR (dont l'achat est encore de nos jours assez onéreux), mais toutes les autres caractéristiques de détection sont respectées. En particulier, le champ thermique complet de l'échantillon peut être obtenu, champ à partir duquel les défauts de surface et enfouis dans des matériaux (métalliques ou composites) de faible épaisseur peuvent être déduits au moyen de logiciels adaptés. La caractérisation des défauts reste toutefois parfois difficile.

1.2.14) Synthèse

Le tableau 1.3 montre certaines caractéristiques de méthodes de CND utilisées dans l'industrie. Ces caractéristiques ont été évaluées par les six critères suivants :

- Matériau : Cette méthode est-elle adaptée pour les matériaux métalliques et/ou les matériaux composites ?

- Géométrie : Est-il possible d'appliquer cette méthode directement sur la structure complète sans avoir besoin de désassembler la pièce ? La taille de l'échantillon doit-elle être limitée ou peut-elle être illimitée (en théorie) ? La pièce peut-elle avoir une géométrie complexe (avec par exemple un petit rayon de courbure) ?

- Type de détection : L'excitation et la détection peuvent-elles être positionnées aux côtés opposés de l'échantillon (test par « transmission »), ou au contraire du même côté (test par réflexion »)?

- Type de défaut détecté : Cette méthode est-elle adaptée pour détecter des défauts surfaciques, sub-surfaciques, situés en profondeur?

- L'impact de la méthode : Quel est le type de contact entre la pièce et l'équipement ? La méthode risque-t-elle de créer des dommages supplémentaires ? La méthode en elle-même ou l'équipement requis est-il/elle dangereux pour l'environnement ?

- Industrialisation : La méthode est-elle facile à mettre en place et/ou à automatiser ? Quel est le coût global de la méthode ?

Le Tableau 1.3 montre clairement que chaque méthode possède ses avantages et ses inconvénients.

Techniques	Ressuage	Contrôle d'étanchéité	Magnétoscopie	Courants de Foucault	Analyse vibratoire	Emission acoustique	Ultrasons	Radiographie	Tomographie	Contrôle visuel	Interférométrie holographique	Interférométrie de Speckle	Thermographie
Applicable aux structures métalliques	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	−−	−−	+++	+++	+++	+++
Applicable aux structures composites	+++	+++	−−−	−−−	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Structure testée directement	+++	+++	+++	+++	+++	+++	−−−	−−−	−−−	+++	++	++	+++
Taille de l'échantillon	+++ Illimité	+++ Illimité	+++ Illimité	+++ Illimité	+++ Illimité	+++ Illimité	− Limité	−−− Limité	−−− Limité	+++ Illimité	+++ Illimité	+++ Illimité	+++ Illimité
Echantillon à géométrie complexe	−−−	+++	−−−	−	+++	+	++	+++	+++	−	+	+	+
Test par transmission	−−−	−−−	−−−	−−−	−−−	+++	+++	+++	+++	−−−	−−−	−−−	+++
Test par réflexion	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	−−−	−−−	+++	+++	+++	+++
Champ de mesure	−−	++	++	++	−−−	−−−	++	++	++	+++	+++	+++	+++
Détection de défauts de surface	+++	+++	+	+	+	+	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Détection de défauts enfouis	−−−	−−−	+	++	+	+++	+++	+++	+++	−−−	+	+	+++
Type de contact	−−− Fluide	−−− Gaz/Fluide	−− Solide	+ Solide	−− Solide	− Fluide/Solide	+ Fluide/Air	+++ Air	+++ Air	+++ Air	+++ Air	+++ Air	+++ Air
Respect de l'intégrité de la structure	−	−	−	+++	−	+++	+	+	+	+++	+++	+++	++
Respect environnemental	−−−	+++	+++	+++	+++	+++	+	−−−	−−−	+++	+++	+++	+++
Implémentation de la méthode	+++	+++	+++	+++	+++	+++	−	−−−	−−−	+++	+	+	+
Degré de possibilité d'automatisation	−−−	−−−	−−−	−	−−−	−	+++	−−−	+	+++	++	++	+++
Prix d'un équipement standard	+++	+++	+++	++	+++	++	−−	−−−	−−−	+	+	+	−

Tableau 1.3 : Principales caractéristiques des méthodes traditionnelles de contrôle non destructif utilisées dans l'industrie

−−− : Très mauvaise adéquation avec la caractéristique considérée, voire impossible à réaliser

+++ : Très bonne adéquation avec la caractéristique considérée

Ce bref aperçu reflète l'intérêt d'utiliser des dispositifs de détection optiques, telles que les caméras IR, ce qui permet d'étendre les limites de détection des défauts. Pour cette raison, des dispositifs optiques ont été introduits dans la plupart des méthodes standards, conduisant à créer des méthodes couplées.

1.3) Méthodes CND couplées

Des méthodes couplées telles que les techniques électromagnétiques-acoustiques et magnéto-optiques sont aujourd'hui développés.

1.3.1) CND électromagnétique acoustique

Pour cette méthode, on parle de manière générale de palpeurs EMAT (Electro-Magnetic Acoustic Transducer). Ces capteurs sont sans contact mais doivent être placés très près de la surface à inspecter. Si l'on fait circuler un courant variable dans une bobine placée près de la surface de la pièce conductrice et ferromagnétique, il y a, par induction, circulation de courants de Foucault (Figure 1.20) [43].

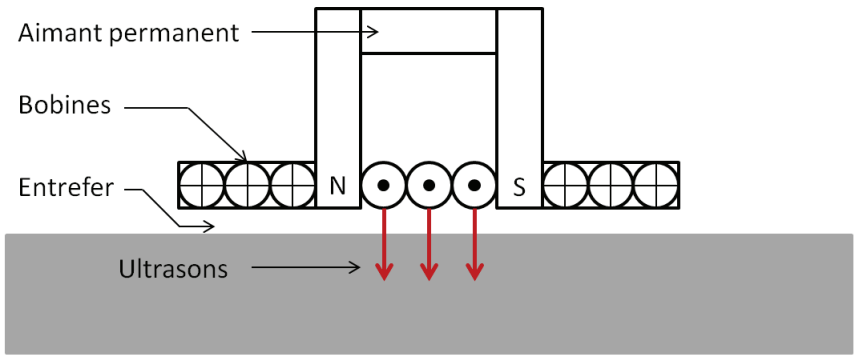


Figure 1.20: Principe des palpeurs EMAT

Si de plus on applique simultanément un champ magnétique connu, convenablement orienté par rapport aux courants de Foucault, il y a intéraction électromagnétique et création de forces de Lorentz. Le caractère alternatif du courant d'excitation a pour conséquence un changement de signe des forces de Lorentz. Si le choix des fréquences et de la géométrie de la bobine d'excitation est correctement réalisé, il est possible de générer des ondes acoustiques [44]. Celles-ci induisent un signal électrique dans le palpeur qui peut donc ensuite être utilisé en tant que récepteur [45].

Cette méthode sans contact peut être utilisée à haute température et peut créer différents types d'ondes comme des ondes de cisaillement, longitudinales, de Rayleigh, de Lamb, de plaque. Toutefois, les palpeurs EMAT ne fonctionnement qu'avec des matériaux conducteurs et ferromagnétiques, la force d'attraction entre le transducteur et la pièce étant de plus assez importante. Enfin, le signal de retour est très faible ce qui empêche une caractérisation correcte des défauts détectés.

1.3.2) CND Magnéto-optique

Cette technique est applicable à des pièces conductrices planes ou localement planes. En effet, elle doit permettre le contrôle rapide de surfaces étendues (telles que les ailes ou les fuselages d'avion) grâce à la production en temps réel d'images relatives à la présence de défauts. Le principe de base de cette technique repose sur la combinaison d'un excitateur induisant la circulation de courants de Foucault dans la pièce à contrôler, avec un dispositif d'imagerie du champ magnétique résultant à la surface de la pièce, qui exploite l'effet Faraday apparaissant dans un grenat magnéto-optique [46] (Figure 1.21).

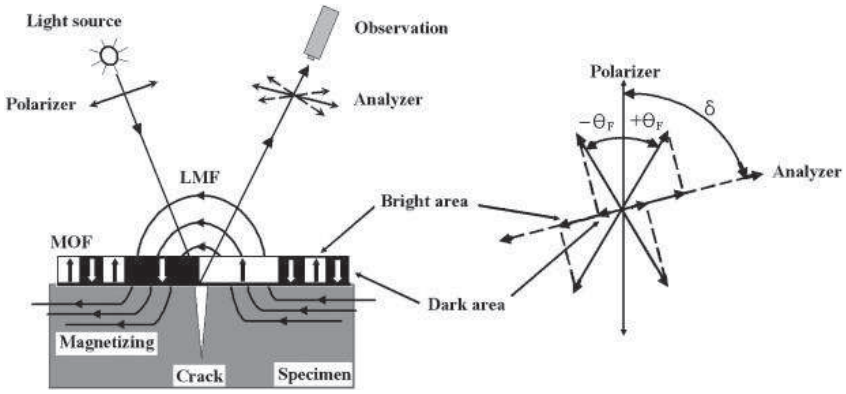


Figure 1.21: Principe de CND par magnéto-optique [47]

Grâce à cette méthode, l'utilisateur n'a par exemple plus à enlever la peinture recouvrant la pièce avant de la contrôler. De plus, la distribution du flux de fuite autour du défaut est retranscrite sur le capteur avec une résolution spatiale élevée. Toutefois, l'inspection de fissures situées sur une surface courbe n'est pas évidente.

Les méthodes couplées sont donc principalement appliquées pour l'instant à des matériaux conducteurs et ferromagnétiques.

1.4) Conclusion

Dans un environnement industriel, il est en général intéressant d'utiliser des méthodes de CND qui :

- N'imposent pas de limite sur la taille des échantillons à contrôler.
- Sont adaptables aux structures de faible épaisseur (coque) et fermées pour lesquelles les tests doivent être réalisés en réflexion.
- Sont applicables à tous types de matériaux.
- Permettent d'analyser des échantillons à géométrie complexe.
- Sont capables de détecter des défauts de surface et enfouis.
- Peuvent donner des résultats pour des échantillons entiers, c'est-à-dire sous forme de distributions de champ.
- Peuvent être facilement automatisés.
- Peuvent être réalisés in-situ (ainsi, la pièce n'a pas besoin d'être démontée).

Pour toutes les raisons développées ici, une caméra IR a été choisie comme moyen de détection. Comme vu au paragraphe 1.2.13, les vibrations mécaniques et les ondes optiques semblent être les sources d'excitations les plus prometteuses : ces deux méthodes ont donc finalement été sélectionnées, conservées et étudiées. Ainsi, une première méthode utilisée pour des tests par thermosonique a été améliorée pour cette étude. La seconde, connue sous le terme général de thermographie IR, a été modifiée afin d'utiliser un laser CO_2 et non une lampe halogène comme fait traditionnellement. De plus, cette source d'éclairage a été choisie car la longueur d'onde du laser CO_2 est en dehors du domaine de sensibilité de la caméra IR, ce qui permet de réaliser un contrôle durant la phase de chauffage. Enfin, le faisceau laser permet de chauffer des surfaces plus petites que celles

éclairée par des lampes halogènes, donc en principe d'augmenter la précision de la détection des défauts et de tester des pièces ayant un rayon de courbure important.

Chapitre 2

Rayonnement thermique et techniques de traitement d'images : théories et applications

Afin de placer la thermographie IR comme méthode de CND dans un contexte physique plus large, la première partie de ce chapitre est consacrée à des rappels sur la propagation des ondes lumineuses (d'après les ouvrages référencés en bibliographie [48], [49]). Cette partie permettra de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu.

Comme exposé dans le chapitre 1, la thermographie IR en CND permet d'obtenir le champ de luminances de la surface de la pièce inspectée. Les données enregistrées sont cependant brutes et ont souvent besoin d'être traitées afin de fournir des résultats exploitables. Plusieurs opérations mathématiques peuvent alors être appliquées aux films vidéos enregistrés. La seconde partie de ce chapitre est donc dédiée à un rappel des différentes techniques de traitement d'image actuellement utilisées en CND. Historiquement, les premiers traitements d'images étaient utilisés afin de compresser la taille des données. Mais la première vraie révolution dans le domaine fut l'implantation de la transformée de Fourier puis la détection de contours [50] au début des années 1980.Selon le phénomène étudié, certains traitements se révèlent être très bien adaptés et d'autres moins. Dans le domaine du CND, les principales méthodes utilisées sont : les techniques de contraste thermique [51] (en général, il s'agit seulement d'une différentielle de température), la reconstitution du signal thermographique [52], la détection synchrone [53]et l'analyse en composantes principales [54]. Récemment, le monde du CND s'est aussi penché sur l'analyse en composantes indépendantes [55] surtout pour les méthodes ultrasoniques. L'application de cette nouvelle technique à la thermographie IR est actuellement quasi-inexistante voire inexistante. Il est donc intéressant d'appliquer cet algorithme aux films thermographiques enregistrés afin d'évaluer sa pertinence par rapport aux autres techniques mentionnées.

2.1) Rappels théoriques sur les ondes lumineuses

Dans le cas de la conduction, la chaleur se propage par interaction directe entre particules voisines. Ainsi, dans les conducteurs comme les métaux, la conduction fait intervenir les électrons libres qui les rendent ainsi bons conducteurs de la chaleur. En revanche, pour les diélectriques appelés aussi isolants, la conduction se fait mal. Cet aspect aura des conséquences importantes sur les conditions expérimentales sachant que les matériaux composites à matrice organique sont des diélectriques.

Le rayonnement est en revanche un mode de propagation d'énergie par ondes électromagnétiques ne nécessitant pas la présence d'un support matériel. Sa propagation peut donc s'effectuer à distance dans le vide ainsi que dans les milieux matériels transparents ou semi-transparent.

2.1.1) Nature et définition du rayonnement thermique

Tous les corps en équilibre thermodynamique local émettent et absorbent continuellement du rayonnement thermique en diminuant ou en augmentant leur énergie interne. Les atomes, molécules ou électrons libres peuvent perdre une partie de leur énergie de manière spontanée ou par interaction mutuelle, par émission de rayonnement. Réciproquement, un corps peut absorber un rayonnement. En effet, lorsque ce dernier impacte la surface du corps, une partie du rayonnement est absorbée et augmente dans l'énergie des composants du corps en question.

La théorie de Maxwell permet de décrire la nature physique du rayonnement : l'énergie rayonnée par la matière se propage sous forme d'ondes électromagnétiques. D'après les travaux de Planck et Einstein, le rayonnement thermique peut aussi être représenté par des particules de masse nulle : les photons. Le phénomène de rayonnement thermique peut donc être représenté comme une onde électromagnétique ou par un flux de photons : il s'agit de la dualité onde corpuscule.

Les ondes électromagnétiques sont constituées d'un champ électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{H}$, et peuvent être décomposées en un spectre d'ondes élémentaires périodiques et monochromatiques caractérisées par :

- La fréquence, ν (s^{-1}, Hz)
- La longueur d'onde, λ (usuellement mesurée en µm pour les opticiens)
- Le nombre d'onde, σ (usuellement mesurée en cm^{-1} pour les spectroscopistes)

Ces quantités sont reliées entre elles par :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = c\,\sigma \tag{2.1}$$

avec c la vitesse de l'onde dans le milieu de propagation d'indice de réfraction $n_r = {}^{c_0}/_{c}$ et $c_0 = 2{,}998.10^8\ m.s^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide.

Chaque onde ou photon transporte la quantité d'énergie $E = h\,\nu$, où h est la constante de Planck de valeur $h = 6{,}626.10^{-34} J.s$. La fréquence υ est directement reliée à l'énergie transportée par l'onde. Elle reste donc invariante au cours de sa propagation et constitue la caractéristique du rayonnement.

La Figure 2.1 décrit les domaines du spectre électromagnétique : les ondes électromagnétiques d'origine thermique sont comprises entre 0,1 µm (ultra-violet) et 100 µm (infrarouge lointain).

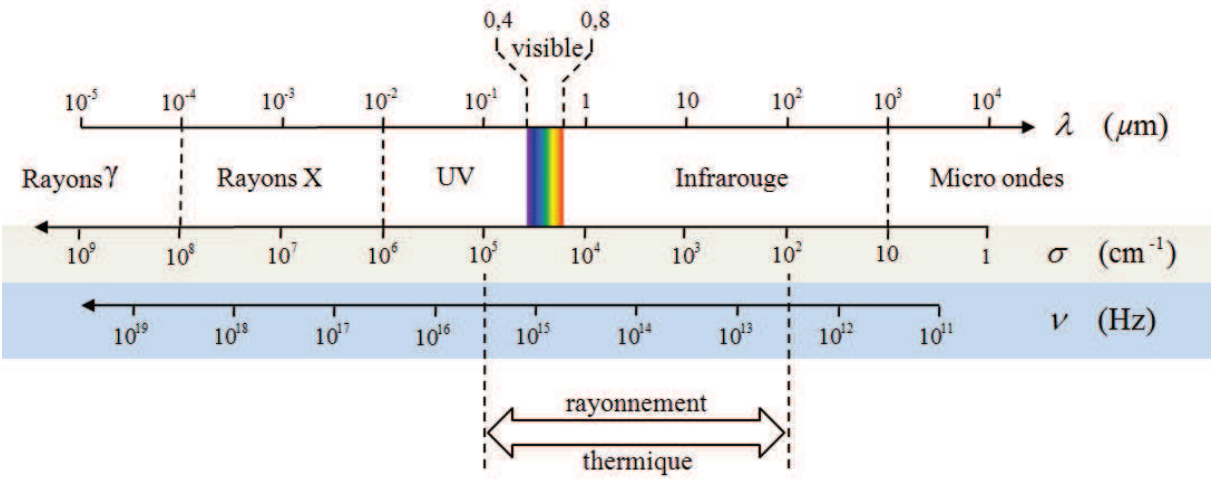


Figure 2.1 : Le spectre des ondes électromagnétiques

Le spectre IR est divisé lui même traditionnellement subdivisé en trois grandes régions :

- L'IR proche (0,75 à 1,5 µm): mis en évidence par les émulsions photographiques, par les détecteurs photoconducteurs et photovoltaïques.

- L' IR moyen(1,5 à 5 µm) : mesuré par les détecteurs thermiques s'échauffant sous l'action du rayonnement, les détecteurs quantiques, les photoconducteurs.

- L' IR lointain(5 à 14 µm) : seuls les détecteurs thermiques peuvent le mesurer.

2.1.2) Principes physiques de la thermographie

2.1.2.1) Transfert d'énergie par rayonnement

- Corps réel

Lorsqu'un corps réel (c'est-à-dire un corps qui n'est pas un corps opaque, ni un corps noir) reçoit un rayonnement incident $d\Phi^i$, une partie est réfléchie $d\Phi^r$, une autre absorbée sous forme de chaleur $d\Phi^a$ et une dernière transmise $d\Phi^T$ (Figure 2.2).

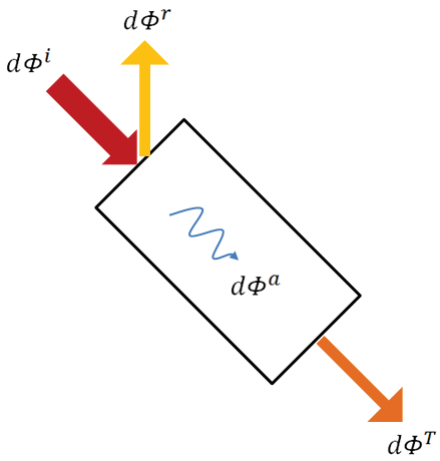


Figure 2.2 : Réception du rayonnement thermique par un corps commun

A l'équilibre thermodynamique, suivant le principe de conservation de l'énergie, le bilan est le suivant :

$$d\Phi^r + d\Phi^a + d\Phi^T = d\Phi^i \tag{2.2}$$

Ou encore :

$$\frac{d\Phi^r}{d\Phi^i} + \frac{d\Phi^a}{d\Phi^i} + \frac{d\Phi^T}{d\Phi^i} = 1 \tag{2.3}$$

Les facteurs de réflexion (réflectivité) et d'absorption (absorptivité) sont définis par les fractions des flux réfléchis et absorbés :

- Facteur de réflexion totale :

$$\rho(T) = \frac{d\Phi^r}{d\Phi^i} \tag{2.4}$$

- Facteur d'absorption totale :

$$\alpha(T) = \frac{d\Phi^a}{d\Phi^i} \tag{2.5}$$

- Facteur de transmission totale :

$$\tau(T) = \frac{d\Phi^T}{d\Phi^i} \tag{2.6}$$

Le bilan peut par conséquent être exprimé ainsi :

$$\rho(T) + \alpha(T) + \tau(T) = 1 \tag{2.7}$$

La loi du rayonnement de Kirchhoff n'est valable que pour les facteurs monochromatiques et la réflectivité intervenant dans cette loi est la réflectivité directionnelle hémisphérique spectrale.

Un composite stratifié se comportant comme un corps réel, les facteurs de réflexion, d'absorption et de transmission ne sont pas nuls.

- Corps opaque

Il s'agit de matériaux dont l'épaisseur est telle qu'aucune fraction du rayonnement incident n'est transmise. L'épaisseur dépend du matériau considéré, de la longueur d'onde mais aussi de l'état de surface. En première approximation, les stratifiés sont opaques.

- Corps noir

Un corps noir est un corps idéal qui absorbe tout le rayonnement incident, l'énergie réfléchie et transmise étant alors nulles. La conservation de l'énergie à l'équilibre thermique implique que le corps noir soit également un émetteur parfait sur tout le domaine spectral, c'est-à-dire qu'il émet plus que toute autre surface à même température. La puissance qu'il émet est indépendante de la direction d'émission et elle ne dépend que de sa température. Cela signifie que, pour une température et une longueur d'onde données, il rayonne une énergie maximale qu'aucun autre corps ne peut dépasser.

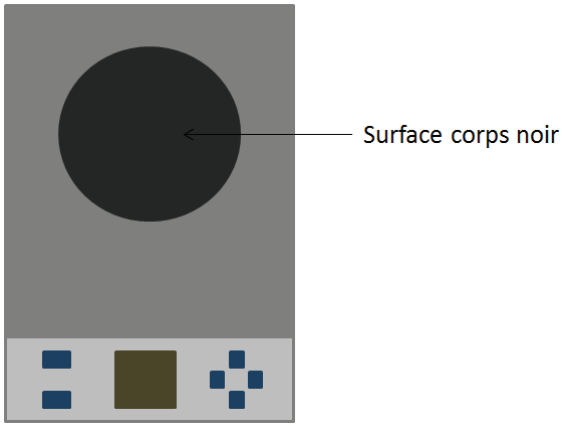


Figure 2.3 : Vue de face du corps noir de laboratoire

2.1.2.2) Lois fondamentales du rayonnement thermique

- Rayonnement total d'une source élémentaire dans l'espace

On considère une source de rayonnement constituée d'un petit élément de surface entourant un point O (Figure 2.4) . Cette source émet un flux énergétique dΦ dans tout l'espace hémisphérique qui l'entoure. Ce flux est intégré sur l'ensemble du domaine spectral contenu dans le rayonnement thermique de la source.

L'émittance totale, notée M (W.cm^{-2}), permet de comparer les puissances émises par des sources de surfaces différentes. Il s'agit du rapport entre le flux dΦ émis par dS dans toutes les directions et l'aire dS :

$$M = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}S} \tag{2.8}$$

Une surface quelconque n'émet pas la même quantité de rayonnement dans toutes les directions et l'émittance ne permet pas de décrire cette dépendance directionnelle. Un système de coordonnées

sphériques est utilisé pour définir la direction *Δ* suivant laquelle on cherche à caractériser le rayonnement de la source élémentaire d*S* (Figure 2.4).

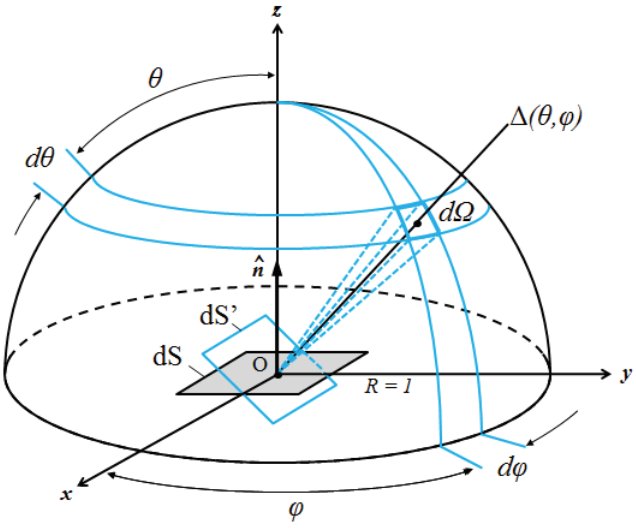


Figure 2.4 : Direction d'émission et angle solide pour l'hémisphère de rayon unité

La luminance totale *L* (W.cm^{-2}.sr^{-1}) est la puissance rayonnée par unité d'angle solide d*Ω* entourant la direction *Δ* et par unité de surface projetée perpendiculairement à cette direction : $\mathrm{d}S' = \mathrm{d}S\cos\theta$

$$L = \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}S\cos(\theta)\,\mathrm{d}\Omega} \tag{2.9}$$

Le corps émet dans tout le spectre de longueur d'onde. Centré sur une longueur d'onde, l'élément de bande spectrale d*λ* borne la luminance énergétique L_λ (W.cm^{-2}.sr^{-1}.µm^{-1}):

$$L_\lambda = \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}S\cos(\theta)\ \mathrm{d}\Omega\ \mathrm{d}\lambda} \tag{2.10}$$

- Propriétés du corps noir

La luminance spectrale d'un corps noir ne dépend que de sa température *T*. La loi de Planck décrit la répartition spectrale du rayonnement thermique du corps noir dont l'expression est donnée pour le vide :

$$L_\lambda^0 = \frac{2\,h\,c^2}{\lambda^5}\frac{1}{\exp\left(\frac{h\,c}{k_B\,\lambda\,T}\right)-1} \quad (2.11)$$

Avec : $c = 2{,}9980.10^{-8}$ (m.s^{-1}) la célérité de la lumière, déjà définie précédemment

$k_B = 1{,}3806.10^{-23}$ (J.K^{-1}) la constante de Boltzmann

La Figure 2.5 montre l'évolution de la luminance spectrale pour différentes températures en fonction de la longueur d'onde. Ce graphique représente les caractéristiques propres au rayonnement thermique. Plusieurs remarques en découlent :

- Plus la température augmente, plus la luminance croît.

- La fonction $L_\lambda(\lambda)$ admet un maximum pour une longueur d'onde λ_{max} .

- Cette valeur λ_{max} varie avec la température *T*. Lorsque celle-ci augmente, λ_{max} diminue.

La loi de déplacement de Wien permet de repérer cette valeur particulière, λ_{max} , en dérivant la loi de Planck par rapport à la longueur d'onde, il en résulte :

$$\lambda_{max}\ T = \frac{h\,c}{5\,k_B} = 2898 \quad (2.12)$$

Ou encore :

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2.13)$$

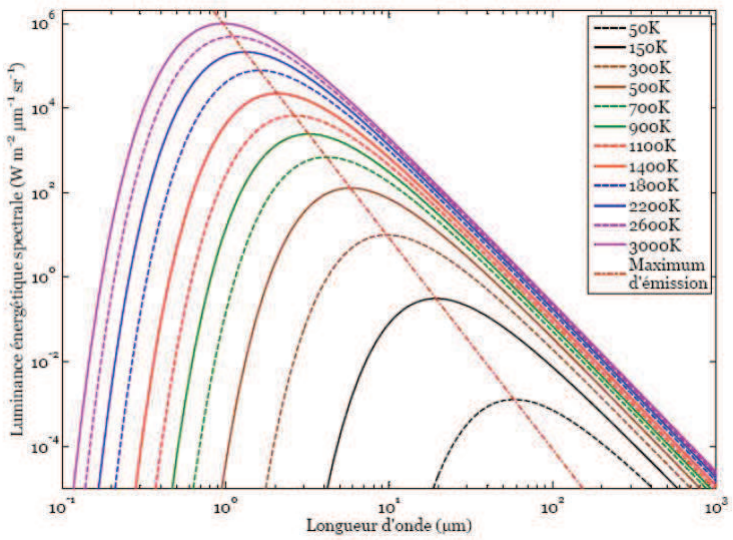


Figure 2.5: Courbes de Planck pour différentes températures

Les luminances totales et spectrales d'un corps noir sont indépendantes de la direction d'émission. En utilisant cette propriété, il est possible de relier l'émittance et la luminance de dS comme suit :

$$\mathrm{d}\Phi = \iint_{\frac{1}{2}\,espace} L^0 \,\mathrm{d}S\, cos\theta \,\mathrm{d}\Omega = L^0 \mathrm{d}S \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} cos\theta \sin\theta \,\mathrm{d}\theta \,\mathrm{d}\varphi = \pi\, L^0 \,\mathrm{d}S \qquad (2.14)$$

Soit,

$$M^0 = \pi\, L^0 \qquad (2.15)$$

Intégrer l'émittance spectrale du corps noir permet d'obtenir l'émittance totale à la température T à la surface du corps :

$$M = \int_0^\infty M^0(\lambda, T)\,\mathrm{d}\lambda = \sigma\, T^4 \qquad (2.16)$$

$\sigma = 5.6696.10^{-8}$ (W.m^{-2}.K^{-4}) étant la constance de Stefan-Boltzmann (Ici, σ n'est pas le nombre d'ondes).

- Emissivité

Un corps réel rayonne moins d'énergie qu'un corps noir à la même température. Une efficacité d'émission, appelée facteur d'émissivité ou efficacité monochromatique, est définie afin de traduire la capacité des matériaux à émettre de l'énergie. On peut définir ce facteur suivant un rayonnement émis total ou spectral ou directionnel. Les valeurs de l'émissivité varient entre 0 (réflecteur parfait : miroir et 1 (émetteur parfait : corps noir).

L'émissivité est le rapport entre la luminance spectrale d'un corps réel et la luminance spectrale d'un corps noir :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{L_\lambda}{L_\lambda^0} \tag{2.17}$$

avec L_λ la luminance spectrale directionnelle du corps étudié et L_λ^0 la luminance spectrale du corps noir à la même température.

Si l'émissivité varie en fonction de la nature du matériau, d'autres paramètres peuvent aussi influer la valeur de ce facteur :

- L'état de surface du matériau : généralement, l'émissivité croît avec la rugosité. Dans cette étude, on considèrera que cela n'affecte pas la mesure. La surface du composite n'est pas tout à fait lisse. On considère que la hauteur de chaque grain et l'espacement entre eux est suffisamment faible pour que les effets des multiples réflexions soient négligés.

- L'angle d'incidence de la caméra : la Figure 2.6 montre que l'émissivité des diélectriques varie peu avec la direction de mesure, mais commence à décroître lorsque l'angle d'incidence est supérieur à 60°.

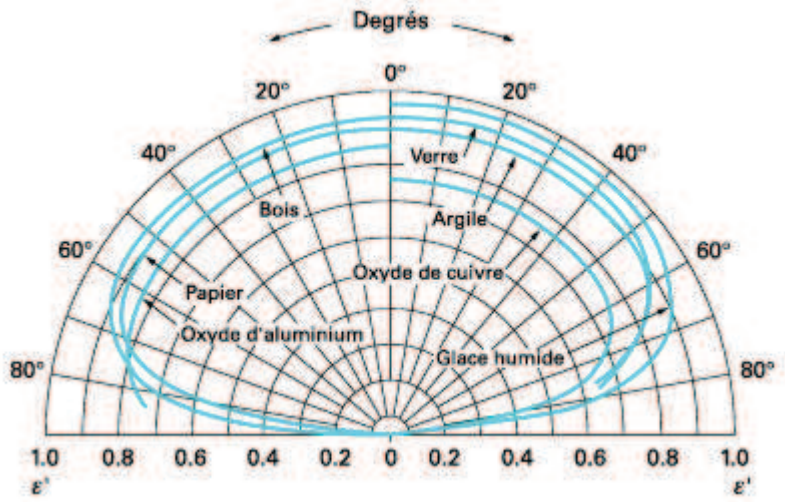


Figure 2.6 : Emissivité totale directionnelle de quelques diélectriques en fonction de la direction [56]

La caméra IR sera donc placée dans la zone où l'émissivité reste quasi constante.

- La longueur d'onde : pour les objets solides, l'émissivité spectrale varie peu avec la longueur d'onde. La bande spectrale de la caméra IR est comprise entre 1,5 et 5 µm.

- La température du matériau : les changements de température peuvent modifier l'état de surface des matériaux. La valeur de l'émissivité n'est cependant pas trop altérée. Dans les gammes de températures mises en jeu dans le cas de notre étude, il sera par conséquent considéré que l'émissivité ne dépend pas de la température.

L'émissivité des plaques testées a été mesurée au sein du laboratoire de recherche de l'INSA Strasbourg par Pr. SERIO. Une caméra FLIR SC325, couplée à un objectif pour microscopie, a été utilisée (Figure 2.7).



Figure 2.7 : Mesure de l'émissivité des échantillons (Caméra IR couplée avec un objectif pour microscopie)

La taille de la partie de l'échantillon observée est : $6 * 8\, mm^2$. En faisant varier la valeur de l'émissivité pour se rapprocher au plus de la valeur de la température de la pièce, l'émissivité trouvée est : $\varepsilon = 0{,}95$.

2.1.2.3) Principe de la mesure de température

La mesure de la température de surface d'un matériau est rendue possible grâce à la connaissance de l'émissivité de celui-ci. En théorie, les appareils de mesure IR sont supposés enregistrer la luminance spectrale de la surface. En réalité, ils mesurent aussi la luminance provenant de l'environnement et de l'atmosphère (Figure 2.8) :

$$L_{cam} = \tau_{atm} \left(\varepsilon\, L_{obj} + (1-\varepsilon)\, L_{env}\right) + (1-\tau_{atm})\, L_{atm} \qquad (2.18)$$

avec :

L_{cam}	la luminance perçue par la caméra IR	($W.cm^{-2}.sr^{-1}$)
L_{obj}	la luminance propre de l'objet	($W.cm^{-2}.sr^{-1}$)
L_{env}	la luminance de l'environnement	($W.cm^{-2}.sr^{-1}$)
L_{atm}	la luminance de l'atmosphère	($W.cm^{-2}.sr^{-1}$)

ε l'émissivité du matériau

τ_{atm} la transmission de l'atmosphère

Cette équation est simplifiée : elle ne prend pas en compte la réponse spectrale de la caméra IR.

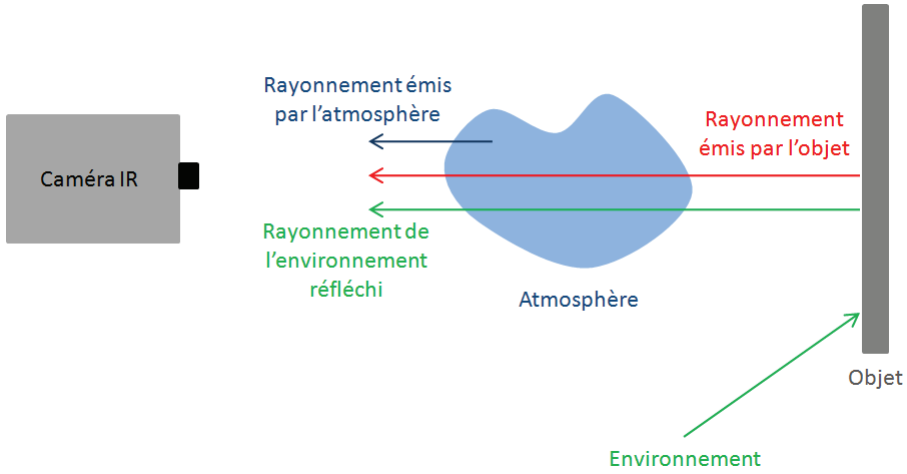


Figure 2.8 : Composition du rayonnement perçu par la caméra IR

Une hypothèse est alors généralement émise: l'environnement est assimilé à un émetteur parfait à température uniforme [57].

De plus, certains paramètres peuvent influer sur la mesure tels que :

- La variation d'émissivité : comme exposé précédemment, cette possible variation n'est pas prise en compte puisque supposée faible.

- Les conditions environnementales : elles n'influent pas sur la mesure si les expériences sont réalisées dans une pièce fermée à température constante et on fait une mesure différentielle.

- L'influence de l'atmosphère : elle peut se révéler non négligeable lorsque la distance entre la caméra IR et l'objet est grande. Bien que la transmission atmosphérique soit importante dans la gamme spectrale entre 1 et 5,5 µm (Figure 2.9), elle peut, à certaines longueurs d'ondes, prendre des valeurs très faibles.

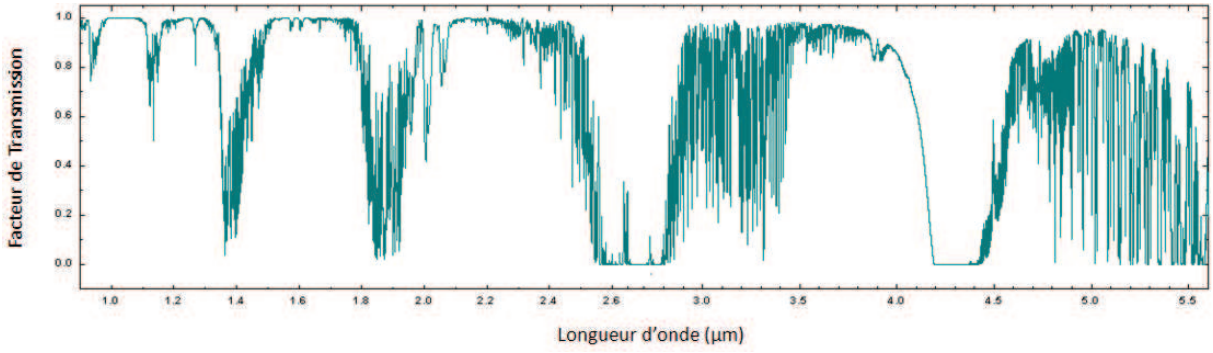


Figure 2.9 : Transmission atmosphérique dans l'infrarouge moyen [58]

La caméra IR sera placée au maximum entre 1 et 2 m de l'échantillon. La Figure 2.10 montre que le facteur moyen de transmission atmosphérique est compris entre 1 et 0,98.

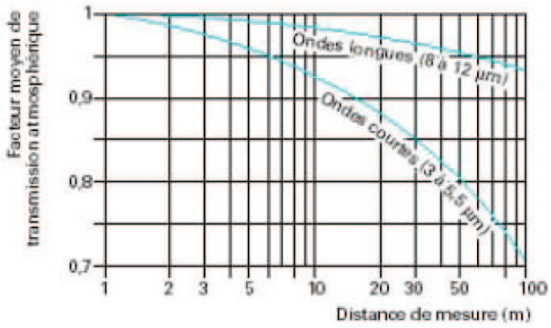


Figure 2.10 : Facteur moyen de transmission atmosphérique en fonction de la distance et de la fenêtre d'observation [59]

On considèrera pour cette étude que la distance entre la détection thermique et le matériau est suffisamment courte pour que le facteur de transmission puisse être considéré égal à 1.

2.1.2) Caméra infrarouge

Il existe deux types de caméras IR : les caméras thermiques non refroidies et les caméras thermiques quantiques refroidies. Le premier type utilise un capteur qui ne nécessite pas d'enceinte cryogénique. Un tel capteur est conçu pour travailler dans l'IR lointain.

Les caméras quantiques doivent être refroidies par à un système cryogénique par azote liquide qui abaisse la température du capteur à la valeur la plus basse possible. Ce refroidissement possède deux avantages :

- Le bruit électronique lié à l'agitation thermique des électrons reste alors inférieur au signal de la scène observée.

- Le capteur serait, sans système de refroidissement, ébloui à cause de sa propre émission infrarouge.

Les caméras thermiques utilisées dans le domaine militaire ou en thermographie utilisent aujourd'hui des matrices de détecteurs quantiques pour obtenir dans un temps donné la sensibilité nécessaire au discernement de très faibles écarts de température ou d'émissivité dans la scène observée tout en conservant une forte résolution spatiale et une cadence d'image très élevée. Les détecteurs appelés IRCCD (Infrared Charge Coupled Device) sont des structures complexes intégrant d'une part des éléments photosensibles, d'autres part les registres de lecture, de multiplexage de retard…(Figure 2.11). L'ensemble est situé dans le plan focal du système optique et est refroidi par le dispositif cryogénique.

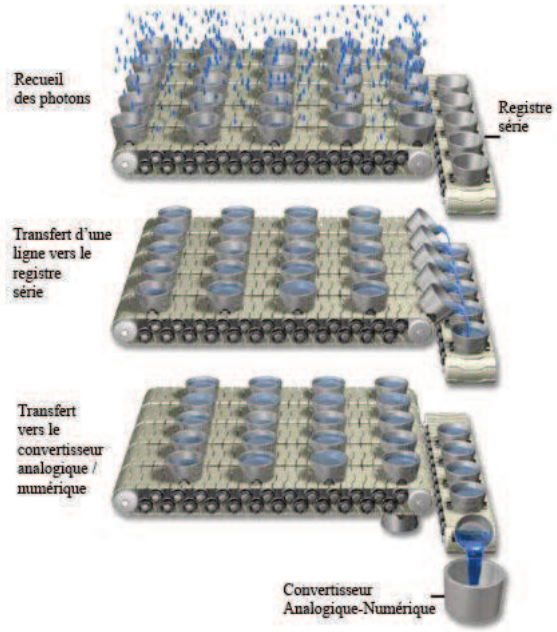


Figure 2.11 : Fonctionnement d'un CCD [60]

La caméra utilisée au sein du laboratoire est une caméra de type Orion de dernière génération équipée d'une roue à filtres détectant les IR de longueurs d'onde comprises entre 1,5 et 5 µm. La matrice du détecteur est refroidie à 77 K par un dispositif de réfrigération utilisant un moteur STIRLING pour la compression.

Les IRCCD peuvent être fabriqués selon plusieurs méthodes en fonction des matériaux employés. La caméra que nous avons utilisée possède une matrice de détecteurs faits d'antimoniure d'indium (InSb), ce matériau permettant une très bonne photo détection dans la bande spectrale de 2 à 5µm. La réponse des détecteurs est représentée à la Figure 2.12.

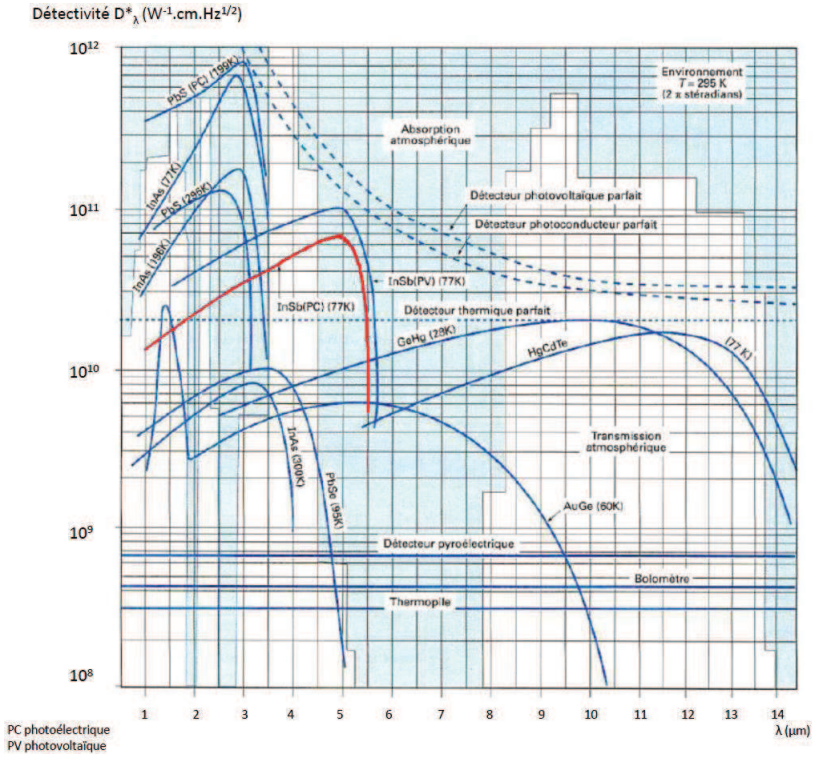


Figure 2.12 : Réponse des détecteurs [61]

La réponse des détecteurs InSb est surlignée en rouge. Ces détecteurs matriciels InSb refroidis permettent d'observer une scène à égalité de sensibilité à une vitesse beaucoup plus rapide ($320 * 240$ fois pour notre caméra) qu'avec un seul détecteur balayant la scène par un système de miroirs oscillants. Cette courbe de réponse des détecteurs InSb possède un maximum pour $\lambda = 5 \mu m$. La caméra IR est donc surtout sensible à 5 µm. De plus, sa sensibilité thermique est de 20 mK.

Cependant les caméras matricielles présentent un problème spécifique d'uniformité de réponse dans l'image thermique. On caractérise notamment cette non-uniformité par le « bruit spatial fixe ». Lors de la prise de vue sur une scène thermique de luminance uniforme, le signal est entaché d'un « bruit invariant » d'une image thermique à l'autre. Ce bruit traduit les non-uniformités des conversions flux

/ signal dues aux disparités des caractéristiques des détecteurs. Ce bruit est invariant pour un type de mesure et peut être corrigé. Comme le montre la Figure 2.13, le relevé des valeurs pour deux points de fonctionnement (par exemple deux temps de pause différents) sur un corps noir conduit à calculer deux matrices de gains et d'offsets qui permettent de corriger la non-uniformité spatiale (NUC, Correction de Non Uniformité).

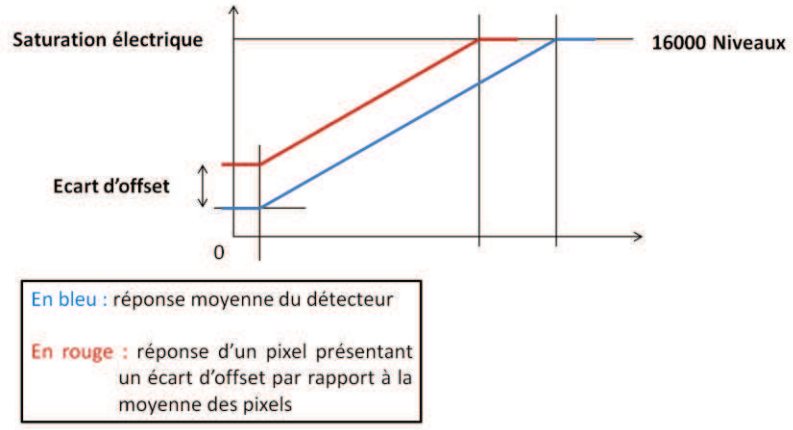


Figure 2.13 : Correction de la non-uniformité spatiale

L'éclairement à la surface du capteur CCD reste relativement le même durant l'expérience. Il est possible de régler le temps d'intégration : plus celui-ci est élevé, plus le signal de sortie est amélioré. Toutefois, cela limite la plage de température : les temps d'intégrations longs sont souvent utilisés pour les applications à faible niveau lumineux. Il faut alors réaliser un compromis entre la qualité du signal et l'intervalle de température. Dans cette étude, la valeur du temps d'intégration est de 1 ms.

Enfin, comme décrit précédemment, le système de détection utilisé durant les essais est une caméra IR. Les enregistrements effectués par son intermédiaire ont parfois besoin d'être post-traités pour mettre en évidence les phénomènes physiques mis en jeu. Une étude concernant différents traitements d'images a donc aussi été conduite afin de sélectionner ceux permettant de révéler l'information la plus pertinente possible.

2.2) Traitement d'image

Le traitement d'image est un domaine vaste faisant intervenir les mathématiques et l'informatique. Les objectifs principaux de cette discipline sont l'amélioration de la qualité de l'image numérique et l'extraction de l'information souhaitée. Dans ce travail, plusieurs méthodes ont été développées : une étude temporelle pixel par pixel puis une étude spatiale/temporelle. Pour certains cas, il a aussi fallu réaliser un recalage temporel des données afin de diminuer la taille du film enregistré.

Une image matricielle est une image numérique dont les données sont stockées dans une matrice de points appelés pixels, généralement rectangulaires auxquels on peut associer une couleur et une intensité. Dans la caméra Cédip Orion utilisée, les données sont stockées sur 14 bits. La représentation d'une image 14 bits affiche 16384 (2^{14}) niveaux grisés variant de 0 à 16383 où 0 représente le noir et 16383 le blanc.

Un film numérique est sauvegardé sous forme de matrice 3D dont chaque composante représente l'intensité lumineuse associée au pixel à un instant donné. Comme le montre la Figure 2.14, la valeur *x* représente le nombre de pixels que contient l'image sur l'horizontale, la valeur *y* le nombre de pixels sur la verticale et la valeur *z* le temps (c'est-à-dire que la troisième dimension de la matrice possède autant de plans que le film contient d'images). En enregistrant en matrice pleine, la fréquence maximale possible de la caméra Cédip Orion est de 330Hz. La taille des fichiers pouvant être conséquente suivant la durée de l'expérimentation, mais aussi pour limiter le temps de calcul numérique, la fréquence a été fixée à 200Hz. Sachant que chaque composante de la matrice est stockée sur deux octets et que chaque image sauvegardée contient $320 * 256$ pixels, la taille du fichier est alors d'environ $32{,}8\ Mo.s^{-1}$.

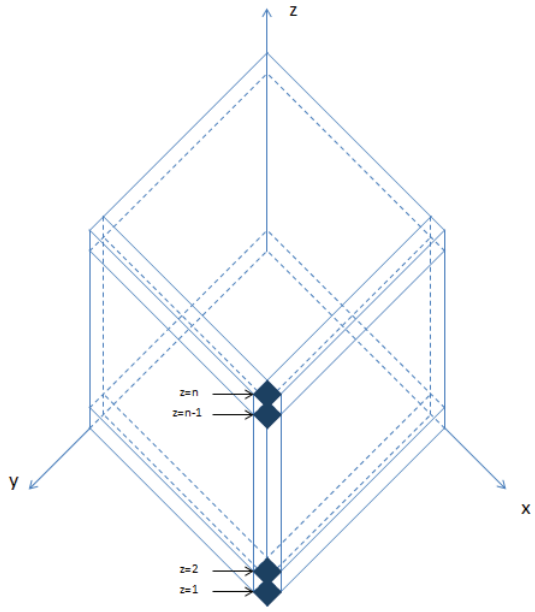


Figure 2.14 : Représentation matricielle 3D du film enregistré

Enfin, les différentes techniques de post-traitement qui ont été étudiées sont : l'étude du gradient de température, l'estimation des coefficients du polynôme au sens des moindres carrés, la transformée de Fourier, l'analyse en composantes principales et l'analyse en composantes indépendantes. Ces techniques sont présentées plus en détail ci-dessous.

2.2.1) Etude du gradient

Le calcul du gradient de température pour chaque pixel dépend de la fréquence d'acquisition de la caméra IR. Dans le cas du calcul du gradient, il a fallu ré-échantillonner le film. En effet, l'évolution de la température n'est pas assez significative pour obtenir des gradients représentatifs. Il a alors été décidé de ne considérer qu'une image sur huit (seulement pour ce traitement d'image) et donc de passer à une fréquence d'acquisition de 25 Hz comme le montre la Figure 2.15.

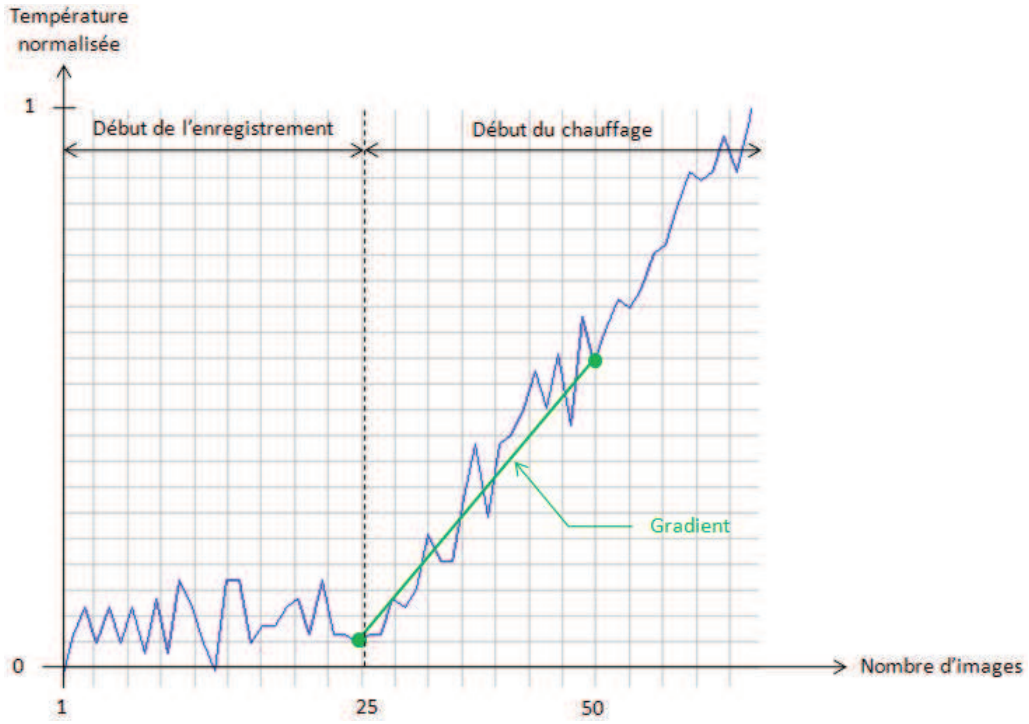


Figure 2.15 : Visualisation du gradient sur un essai dont la fréquence d'acquisition est de 200Hz

Le gradient permet de caractériser l'évolution instantanée de la courbe de réponse en température. L'étude s'est axée sur le gradient minimum afin d'observer les chutes rapides ou la plus faible augmentation de température et sur le gradient maximum pour caractériser l'augmentation rapide de la température à la surface du matériau. La Figure 2.16 montre les deux cas extrêmes relevés durant les essais : il ne s'agit pas de courbes expérimentales. Le gradient maximum sera toujours positif tandis que le gradient minimum pourra prendre des valeurs négatives.

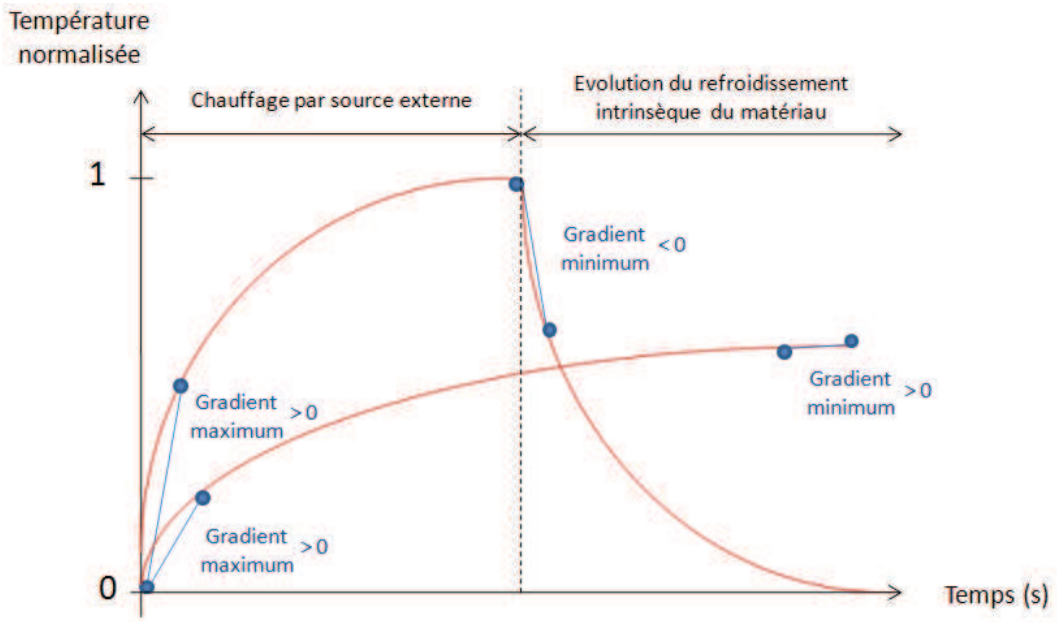


Figure 2.16 : Mise en évidence du gradient maximum et minimum pour la caractérisation de l'évolution instantanée de la température

De plus, afin de déterminer les zones présentant un changement rapide de comportement, les valeurs de ces deux gradients sont soustraits. Enfin, en guise de quatrième étude, les gradients minimum et maximum sont ajoutés de manière à mettre en évidence les différences de comportement entre le chauffage et le refroidissement.

Dans les figures des chapitres 3 et 4, les différents gradients seront disposés dans l'ordre :

- Gradient minimum
- Gradient maximum
- Gradient maximum - gradient minimum
- Gradient maximum + gradient minimum

2.2.2) Estimation des coefficients du polynôme au sens des moindres carrés

L'objectif de cette étude est de réaliser une approximation polynomiale de l'évolution temporelle globale de la température de chaque pixel en se rapprochant le plus de la courbe réelle de chaque pixel considéré (d'où l'utilisation du terme "approximation"). Pour cela, on utilise la méthode des moindres carrés. Par exemple, le pixel marqué en bleu sur la Figure 2.14 est situé à $x = 320$ pixels à l'horizontale et $y = 256$ pixels sur la verticale en considérant les *n* images.

Par cette méthode, on obtient un polynôme de degré p :

$$p(t) = a_p(t - t_0)^p + a_{p-1}(t - t_0)^{p-1} + \cdots + a_1(t - t_0) + a_0 \quad (2.19)$$

où t représente le temps (déterminé grâce à la fréquence d'acquisition de la caméra IR et à la position de l'image dans la séquence), t_0 le temps entre le début de l'enregistrement et le début du chauffage et a_i les coefficients à déterminer.

Dans l'équation (2.19) seul a_0 n'est pas dépendant de t_0. Ainsi, pour que tous les essais aient la même origine temporelle, il a été nécessaire pour certains essais de recaler celle-ci. Après le recalage de l'origine, le polynôme devient alors :

$$p(t) = a_p t^p + a_{p-1} t^{p-1} + \cdots + a_1 t + a_0 \quad (2.20)$$

pour lequel $\sum_{i=1}^{n}(p(t_i) - y_i)^2$ est un minimum et où y_i est la valeur de la courbe expérimentale à approximer.

En posant,

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \dots & x_1^p \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & x_n^p \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Le problème revient alors à trouver un vecteur minimisant la norme de $(X * A - Y)$.

La résolution du système crée donc un polynôme se rapprochant au plus de la courbe expérimentale.

L'évolution des températures de chauffage et de refroidissement d'une zone avec défaut étant différente de celle d'une zone saine, une cartographie des différents coefficients polynomiaux pourra donc être envisagée par la suite pour mettre en évidence les délaminages recherchés.

Dans ce travail, et après analyse des premiers résultats d'essais, seuls les six premiers coefficients polynomiaux ont été conservés. Il seront rangés par ordre croissant du degré polynomial dans les figures présentes aux chapitres 3 et 4.

2.2.3)Transformée de Fourier

La fréquence marque un changement d'intensité dans l'image visualisée : les basses fréquences représentent des régions homogènes, floues alors que les hautes fréquences marquent des contours des changements brusques d'intensité ou du bruit.

$$x(t) = \int X(f) e^{2i\pi ft}\, df \qquad (2.22)$$

L'objectif ici est de faire disparaître le bruit dans les images enregistrées. Le bruit et le signal vont donc être portés par des composantes fréquentielles. Comme la transformée de Fourier est bien adaptée pour représenter des signaux réguliers, celle-ci apparaît comme étant incontournable au vu des signaux enregistrés suite à l'excitation mécanique ou thermique.

Les valeurs des coefficients et des phases du fondamental et des 9 premières harmoniques sont présentes dans cet ordre dans le chapitre 3 et 4.

La transformée de Fourier est un outil précieux pour convertir le signal de l'espace température/temps en un espace phase/fréquence. Toutefois, elle n'est pas forcément le meilleur choix pour représenter des signaux transitoires. L'analyse en composantes principales permet de pallier à ce problème.

2.2.4)Analyse en composantes principales (PCA)

L'analyse PCA est une méthode assez ancienne, initialement développée par Pearson [62]. Cette méthode possède un large domaine d'applications telles que la reconnaissance faciale, la télédétection, la compression d'images. Dans le domaine du traitement d'images, elle est aussi appelée "Transformée de Karhunen-Loève" [63].

L'analyse PCA a été initialement inventée pour réduire le nombre de variables caractérisant un système. La taille des fichiers à analyser en est ainsi réduite. En effet, l'analyse PCA est un outil permettant d'extraire des données spatiales et temporelles à partir d'une matrice compacte.

Récemment, la technique PCA a été introduite dans le CND pour distinguer les ondes optiques des ondes thermiques, notamment pour la détection de fissures [64]. Dans ce travail, la détection du signal thermique a été améliorée qualitativement, et les effets optiques considérés comme des artefacts ont été réduits.

Une étude encore plus récente, appelée PCT (Principal Component Thermography) a démontré qu'il était possible de réaliser une caractérisation de la profondeur du défaut [65]. De plus, les données récupérées sont d'excellente qualité : les sources de bruit enlevées, le contraste entre une zone saine et une zone défectueuse est marqué.

Cette méthode effectue une comparaison des différentes composantes d'un signal, après projection dans un sous espace de représentation engendré par une nouvelle [66]. Cette base orthogonale peut être différemment déterminée grâce à la décomposition en valeurs singulières [67] de la matrice de

covariance des deux vecteurs partie réelle et partie imaginaire. On obtient une maximisation des projections orthogonales des points sur chacun des axes définis.

L'analyse en composantes principales consiste à approximer le nuage de points par un sous-espace vectoriel de petite dimension.

Cette méthode a été codée sous Matlab et la théorie est présente en annexe.

Les cinq premières composantes spatiales ont été conservées et sont mises en évidence dans les chapitres 3 et 4. Les autres composantes n'apportant pas de résultats satisfaisants : seuls des nuages de points apparaissaient.

2.2.5)Analyse en composantes indépendantes (ICA)

L'analyse en composantes indépendantes est basée sur des approximations statistiques. Elle est liée à l'analyse PCA et à l'analyse factorielle. Toutefois, l'ICA est une méthode beaucoup plus puissante et capable de trouver des facteurs sous-jacents ou des sources lorsque les méthodes classiques échouent complètement [68].

Les variables d'entrées sont censées être des mélanges linéaires de certaines variables latentes inconnues et le système de mélange est également inconnu. Les variables latentes sont supposées non gaussiennes, indépendantes et appelées composantes indépendantes des données observées [69]. Ces composantes indépendantes peuvent être trouvées par l'ICA.

Cette approche étant encore en cours de développement, le logiciel en accès libre FastICA, développé par Aapo Hyvärinen de l'Université de Helsinki, a été utilisé pour l'étude.

La théorie est présente en annexe.

Les neuf premières composantes ont été conservées pour les mêmes raisons que l'analyse en composantes principales.

2.3) Conclusion

Les rappels théoriques ont permis de mettre en évidence les phénomènes physiques mis en jeu. Les images thermographies enregistrées par la caméra IR sont données brutes qu'il faut traiter par différents traitements d'images afin de distinguer avec précision une zone saine d'une zone délaminée. Ceux-ci seront appliqués aux résultats obtenus par les deux prototypes réalisés.

Chapitre 3

Excitation d'un délaminage dans un composite par ultrasons observé par thermographie

Comme exposé dans le chapitre 1, la thermosonique est une méthode en cours de développement dans le milieu du CND. Contrairement à d'autres méthodes qui sont utilisées depuis plusieurs dizaines d'années et de plus en plus développées, la thermosonique est apparue au cours des dix dernières années [70] pour tenter d'améliorer certaines insuffisances liées aux autres méthodes d'analyse, comme la rapidité de la détection de défauts. Les résultats présentés dans cette étude permettent de mettre en évidence les avantages de cette technique afin de détecter avec précision un délaminage dans un composite carbone/époxyde aéronautique.

Pour les besoins de l'étude, des délaminages ont été créés grâce à une tour de chute [71]. La Figure 3.1 représente une tranche d'un échantillon d'épaisseur 13,76 mm. La plaque a été soumise à une tour de chute, les défauts apparaissent clairement.

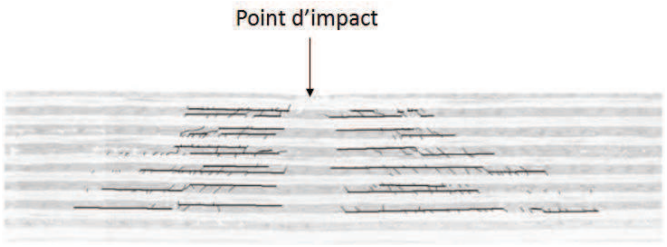
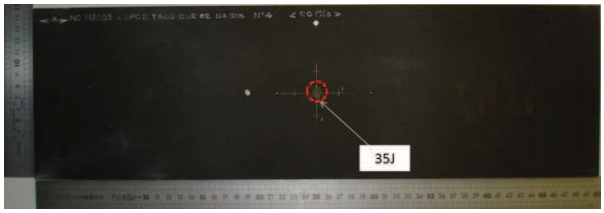


Figure 3.1 : Plaque ayant été soumise à une tour de chute [72]

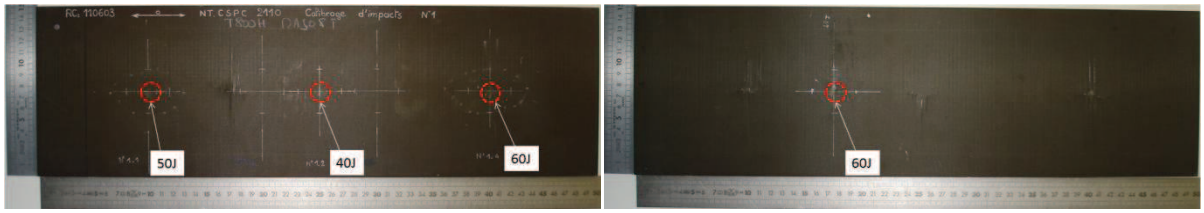
L'étude s'est limitée à analyser des plaques en carbone/époxyde de type aéronautique dont les dimensions sont $500 * 150 * 5\mathrm{mm}^3$ telles que montrées en Figure 3.2.

L'impact est considéré comme étant à basse vitesse/basse énergie. Plusieurs énergies d'impacts ont été utlisées : 35J, 40J, 50J, 60J. Dans la suite de ce texte, et afin de distinguer les différents essais, ceux-ci seront référencés suivant la puissance de l'impact. Par exemple, « Délaminage 35J » désignera le délaminage sur lequel un impact de 35J a été appliqué, etc.

Plaque de dimension $500 * 150 * 5\text{mm}^3$



Plaque de dimension $500 * 150 * 5\text{mm}^3$



Face avant Face arrière

Figure 3.2 : Plaques stratifiées impactées utilisées pour les essais thermosoniques

3.1) Description et mise en place des essais thermosoniques

3.1.1) Principe

Une excitation mécanique, dont la fréquence peut varier de 20 à 40kHz, crée un micromouvement de translation relative entre les deux faces du délaminage ce qui entraine un échauffement local. Des ondes thermiques se propagent ensuite dans le matériau jusqu'à atteindre la surface de la plaque [73]Dans les tests standards en thermosonique, cet instrument générateur d'ultrasons, la sonotrode (dont le fonctionnement est expliqué au paragraphe 3.1.2), est placée perpendiculairement à une des faces de l'échantillon pour y introduire des vibrations de flexion. L'évolution de l'échauffement au cours du temps est alors enregistrée par la caméra IR, soit en réflexion [74], soit en transmission [75]. En toute rigueur, les termes réflexion et transmission ne devraient pas être employés : plutôt utilisés en optique, ils représentent dans le contexte présent la position de la caméra IR par rapport à l'excitation comme le montre la Figure 3.3 (Réflexion : caméra et sonotrode placés du même côté de la plaque ; transmission : caméra et sonotrode positionnés de part et d'autre de la plaque).

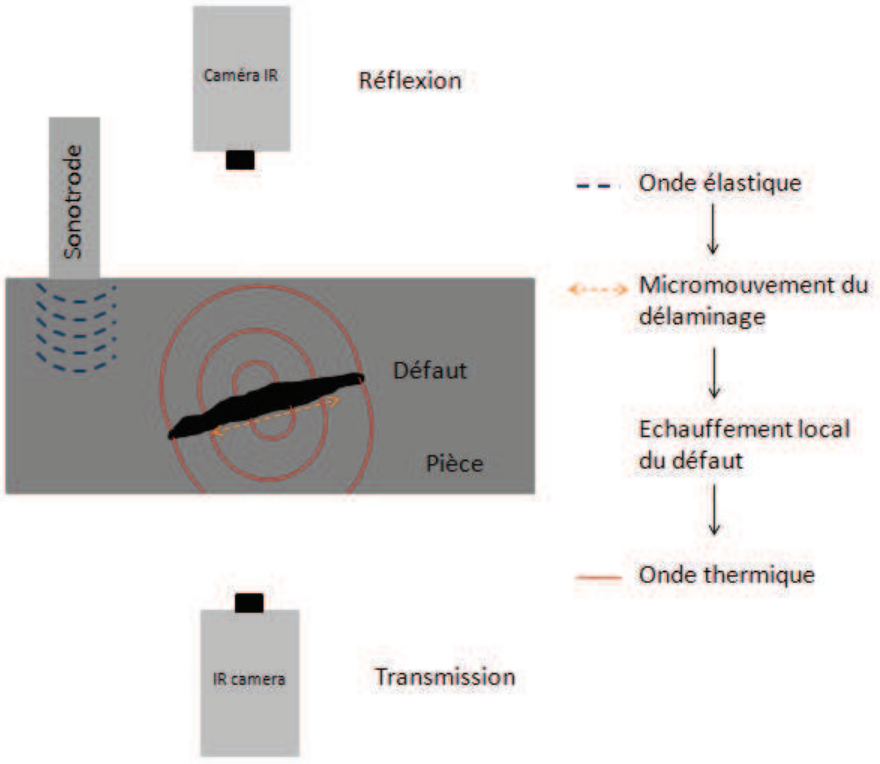


Figure 3.3 : Schéma de principe de la thermosonique

3.1.2) Matériel

La source d'excitation est une sonotrode Synaptec, une pièce métallique soumise à des ultrasons de fréquence 35kHz. Le générateur à ultrasons Nexus envoie un signal électrique aux capteurs piézoélectriques qui le convertissent en signal mécanique qui est ensuite amplifié par la sonotrode (Figure 3.4). L'amplitude des ultrasons est réglable grâce au générateur. Industriellement, cette sonotrode possède plusieurs domaines d'application, comme le soudage ou la découpe [76], les tests de fatigue gigacyclique [77] ou encore le CND.

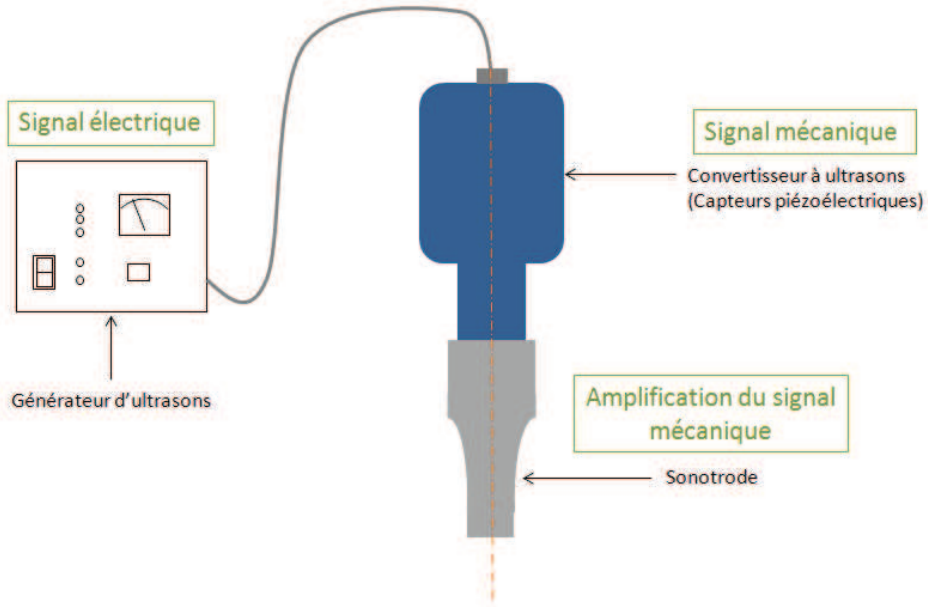


Figure 3.4 : Schéma de fonctionnement de l'excitation mécanique par sonotrode

3.1.3) Protocole expérimental

Dans l'industrie à l'heure actuelle, la sonotrode est utilisée manuellement. Cela implique que le positionnement de l'instrument par rapport au défaut n'est pas maîtrisé et que la pression exercée sur la pièce à inspecter n'est pas la même d'un essai à un autre voire, même durant un même essai. Il devient alors compliqué d'assurer une répétabilité des résultats. En effet, l'amplitude du signal mécanique transmis par la sonotrode à l'échantillon peut varier considérablement d'un essai à l'autre. De plus, pour ne pas endommager la structure, il est nécessaire d'ajouter un liant entre la sonotrode et la plaque : du scotch aluminium.

C'est pourquoi un serre-joint est appliqué entre la sonde métallique et l'échantillon de manière à maintenir une pression constante et identique lors des essais. Connaissant la distance entre la caméra IR et l'échantillon ainsi que la taille de la matrice CCD ($320 * 256$ pixels de taille 25 µm espacés de 5 µm), il est possible de déterminer les dimensions de la zone enregistrée par la caméra.

Cette donnée est fondamentale pour déterminer la taille du délaminage. Cette distance ne permet pas d'obtenir une vue complète de la plaque ($500 * 150 * 5\mathrm{mm}^3$) mais d'une partie seulement. L'étude aurait pu se limiter à une vue de la plaque entière mais il y aurait eu alors une précision moins bonne dans la détection des différents délaminages. Plusieurs essais ont permis de régler une distance convenable : il s'agissait de faire un compromis entre la précision de mesure et une bonne détection des contours des délaminages. La caméra est placée à 50 cm de l'échantillon pour tous les tests (Figure 3.5).

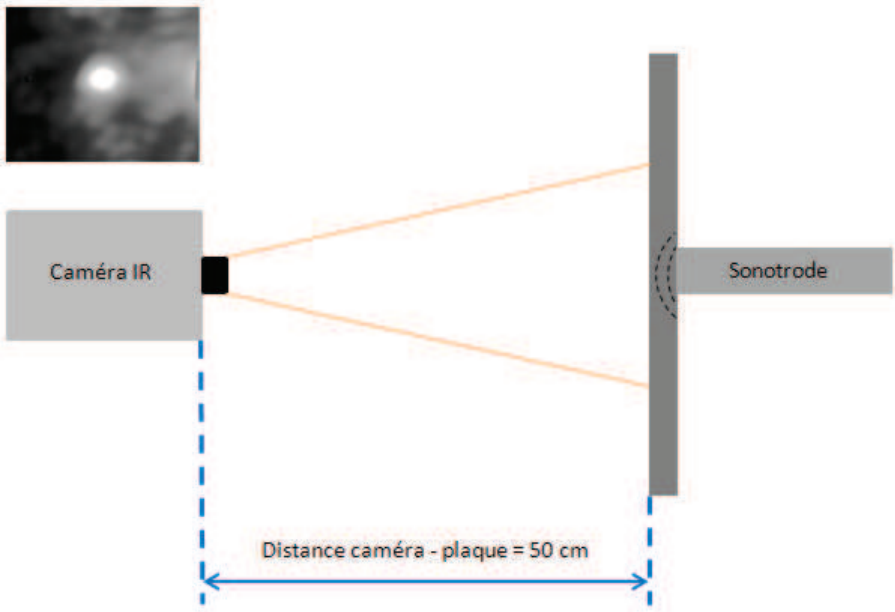


Figure 3.5 : Schéma de l'expérience thermosonique

Enfin, deux des quatre bords de l'échantillon sont en liaison encastrement avec le cadre support (Figure 3.6).



Figure 3.6 : Photo du support et de la plaque

Durant l'étude, plusieurs paramètres ont été considérés afin d'étudier leur influence sur l'évolution de la qualité de la détection :

- Distance sonotrode / délaminage.

- De temps d'impulsion des ultrasons.

- Amplitude des ultrasons.

Plusieurs essais ont été réalisés au préalable afin de pouvoir déterminer l'influence d'une amplitude élevée de signal, ainsi que du temps d'impulsion des ultrasons. Solliciter avec trop d'énergie (amplitude trop élevée) a conduit durant un essai à une expansion du délaminage initial jusqu'en surface comme le montre la Figure 3.7. Afin d'éviter d'endommager accidentellement les échantillons, il a finalement été décidé de ne travailler qu'avec des puissances ne dépassant pas les 45W, et un temps d'impulsion n'excédant pas les 5 secondes. La suite de ce travail va donc s'intéresser à étudier l'influence de cette puissance de 15W à 45W appliquée durant 0,5 à 5 secondes.

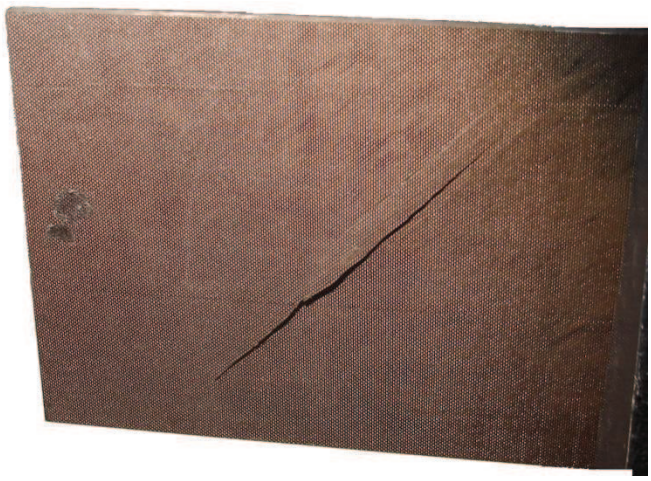


Figure 3.7 : Propagation du délaminage jusqu'en surface durant un essai avec une amplitude élevée de la sollicitation

Comme le montre la Figure 3.2, plusieurs impacts sont présents sur l'une des deux plaques. Au vu de la géométrie de la plaque et de la position des délaminages, les distances sonotrode / délaminage ne peuvent pas être les mêmes. Par exemple, il n'a pas été possible de réaliser l'étude du délaminage 50J pour la distance sonotrode / délaminage de 8 cm car la sonotrode était placée au niveau du délaminage 60J situé en face arrière. Tous les tests réalisés sont répertoriés dans le Tableau 3.1.

	Délaminage 35J	Délaminage 40J	Délaminage 50J	Délaminage 60J
Puissance (W)	15 – 30 – 45	15 – 30	15 – 30	15 – 30
Temps d'impulsion (s)	0,5 à 5	0,5 à 5	0,5 à 5	0,5 à 5
Distance sonotrode / délaminage (cm)	8 – 13 – 18	8 – 13	13 – 23	8 – 18

Tableau 3.1 : Conditions expérimentales pour tous les essais

Comme tous les tests pouvaient être réalisés sur la plaque composite « délaminage 35J », une campagne de qualification a été menée sur celle-ci. La Figure 3.8 met en évidence les différentes positions de la sonotrode par rapport au délaminage.

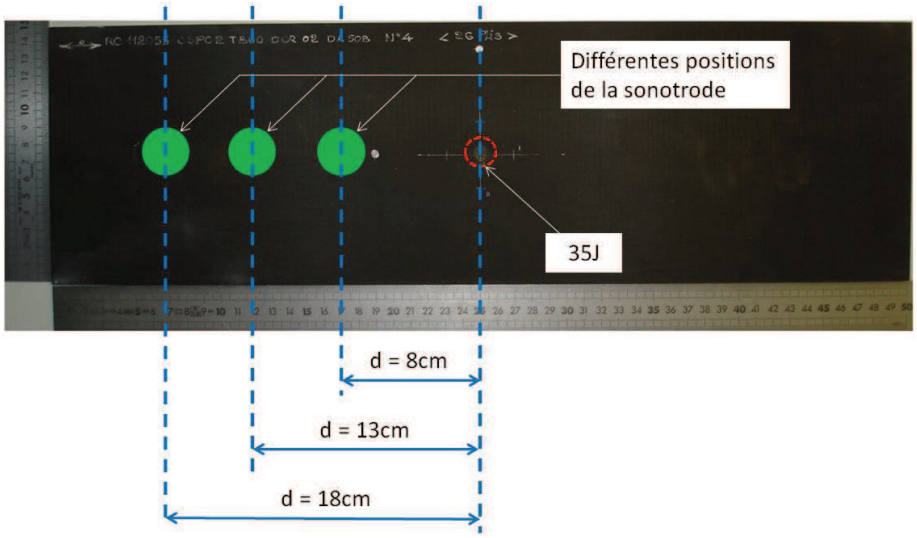


Figure 3.8 : Mise en évidence des différentes positions de la sonotrode pour les essais sur le délaminage 35J

3.2) Premiers résultats sur l'impact 35J

Les premiers résultats montrent qu'une élévation significative de température apparaît à certains endroits à la surface de l'échantillon. La caméra IR continue l'enregistrement quelques secondes après que les ultrasons aient été générés dans la plaque afin de voir aussi l'évolution de la température durant le refroidissement.

L'exemple présenté ci-dessous met en évidence l'apparition du délaminage : il s'agit d'un essai ayant un temps d'impulsion de cinq secondes, une puissance de 30 W et une distance sonotrode / délaminage de 8 cm.

Le tout premier traitement d'image à réaliser consiste à soustraire la première image du film à toutes les autres images afin de ne considérer que les phénomènes physiques apparaissant suite à l'excitation mécanique : les influences de l'extérieur sont par conséquent éliminées et en particulier en s'affranchissant des conditions initiales. On travaille ainsi avec des variations de températures ΔT plus pertinentes que les températures brutes.

3.2.1) Fin de la génération d'ultrasons : refroidissement

A la fin des ultrasons, la chaleur continue tout de même à se diffuser dans le matériau composite, ce qui a pour conséquence une qualité d'image moyenne (elle se floute rapidement). Distinguer précisément les contours du délaminage devient ainsi de plus en plus difficile (Figure 3.9).

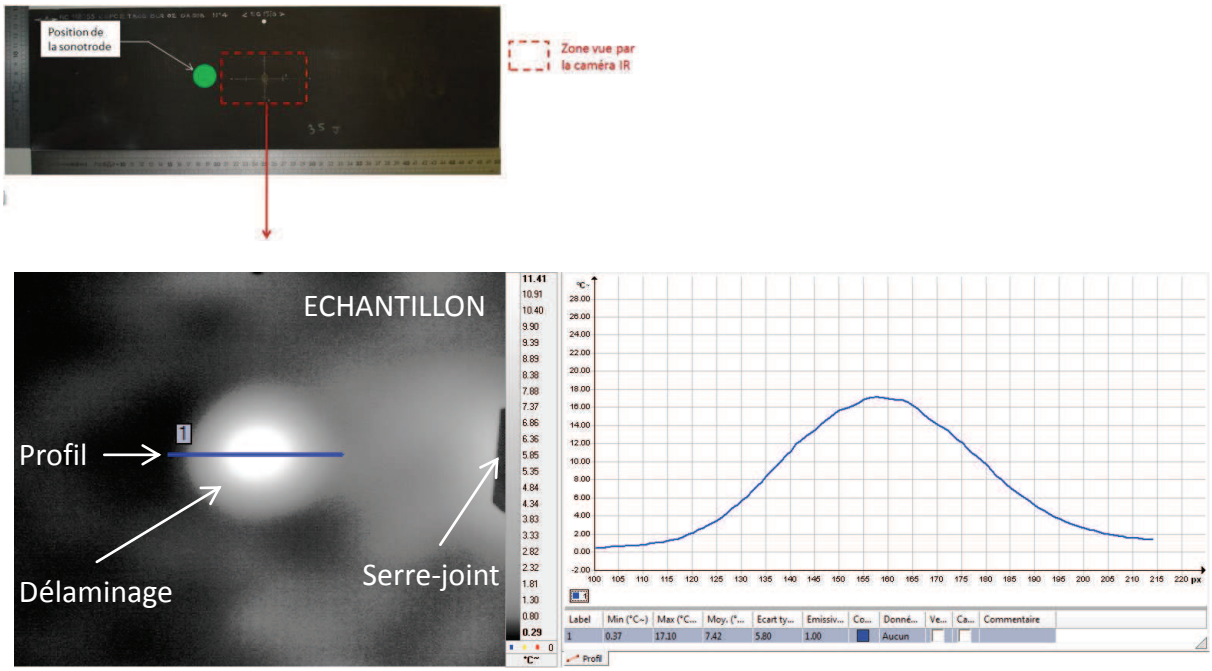


Figure 3.9 : Répartition de la température après un refroidissement de 10 secondes (délaminage 35J, P = 30W, Temps d'impulsion = 5s, Distance = 8cm)

3.2.2) Excitation mécanique : chauffage

La Figure 3.10 et la Figure 3.11 représentent le profil de température de la ligne de pixels sélectionnés au milieu et à la fin du temps de génération des ultrasons. On constate donc que la température augmente rapidement de manière significative dans la zone délaminée. En particulier, la valeur maximale du ΔT passe de $\Delta T = 16{,}91°C$ à $\Delta T = 26{,}94°C$ entre le milieu et la fin de l'essai, soit une différence de température de 10°C en 2,5s.

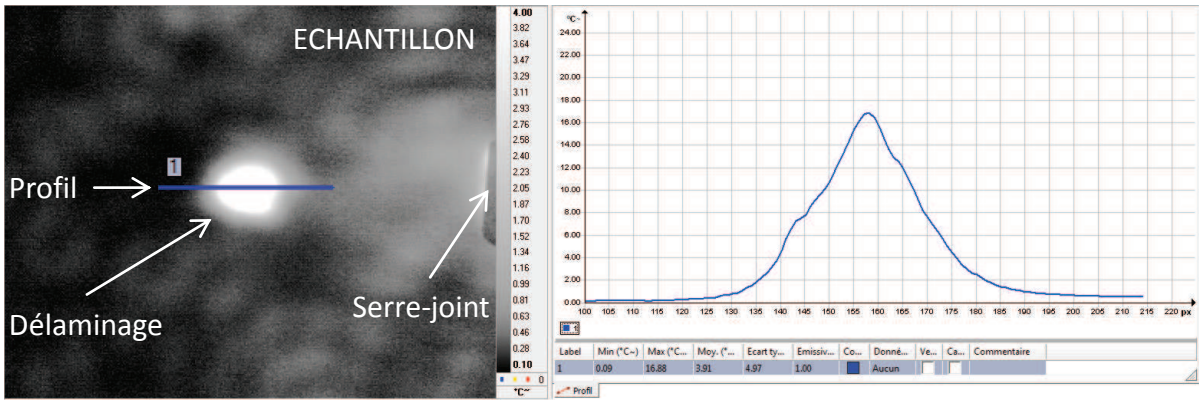


Figure 3.10 : Répartition de la température à t =2,5s (délaminage 35J, P = 30W, Temps d'impulsion = 5s, Distance = 8cm)

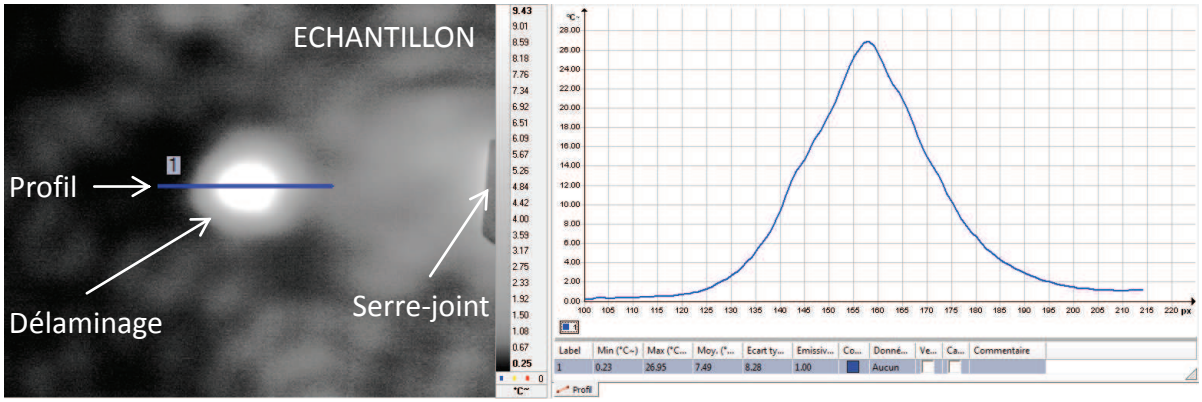


Figure 3.11 : Répartition de la température à t =5s (délaminage 35J, P = 30W, temps d'impulsion = 5s, distance = 8cm)

L'étude des courbes de l'évolution des températures le long du profil au cours du temps, Figure 3.12, montre que la température est la plus importante au niveau de la zone centrale, ce qui correspond à l'endroit où la plaque a été impactée. Les zones où l'augmentation de la température est plus faible (mais reste tout de même conséquente) correspondent aussi à la présence de délaminage dans le stratifié.

La température n'est pas constante lorsque le temps d'impulsion est nul. La plaque n'était donc pas complètement refroidie lors des essais mais cela n'influe pas sur la conclusion apportée.

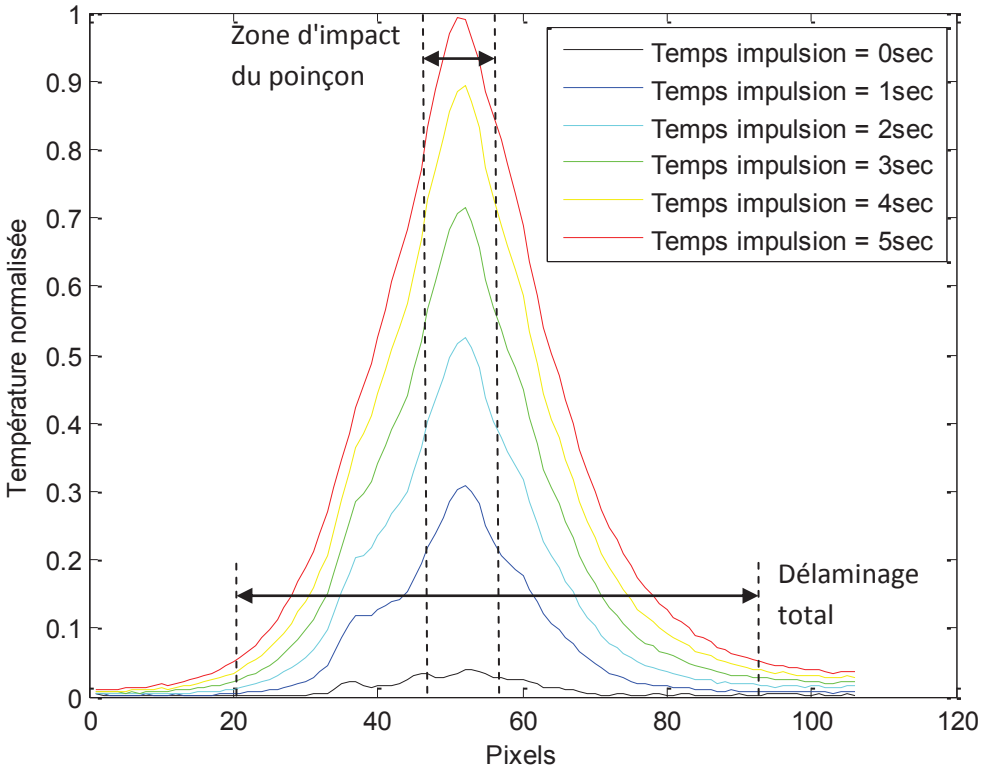


Figure 3.12 : Evolution de la température le long du profil à différents temps d'impulsion

La Figure 3.12 fait apparaître une première difficulté : comment savoir en effet si une faible augmentation de température au niveau d'un pixel est due à la présence d'un défaut situé à une profondeur importante, ou au contraire à la simple diffusion de la chaleur créée par un défaut contigu à cette zone ?

Par la suite, plusieurs traitements d'images seront appliqués afin de répondre à cette question.

3.2.3) Suivi de l'évolution de température au cours du temps

L'image thermographique montrée à la Figure 3.13 correspond au temps t = 5s, soit juste à la fin de la génération des ultrasons dans la plaque. En adaptant l'échelle des températures, l'image obtenue fait clairement apparaître une élévation anormale de la température en surface.

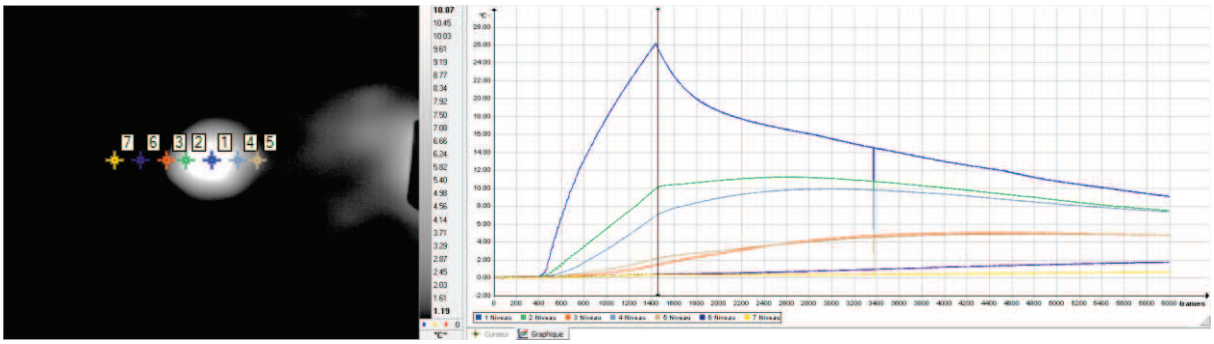


Figure 3.13 : Evolution de la température pour 7 emplacements distincts (délaminage 35J, P = 30W, temps d'impulsion = 5s, distance = 8cm)

Trois zones se distinguent sur la Figure 3.13 : une tache claire, correspondant aux températures les plus élevées, une zone grisée correspondant aux températures intermédiaires et une zone de fond de couleur sombre correspondant à la température ambiante.

On considère 7 pixels placés sur une même ligne horizontale comme le montre la Figure 3.13 :

- Pixel 1 : Pixel situé au centre de la zone claire, là où cette dernière est la plus importante
- Pixel 2 : Pixel situé à la jonction tache claire / zone grisée (à gauche du pixel 1)
- Pixel 3 : Pixel situé à la jonction zone grisée / zone sombre (à gauche du pixel 1)
- Pixel 4 : Pixel situé à la jonction tache claire / zone grisée (à droite du pixel 1)
- Pixel 5 : Pixel situé à la jonction zone grisée / zone sombre (à droite du pixel 1)
- Pixel 6 : Pixel situé sur la zone sombre (à gauche du pixel 1)
- Pixel 7 : Pixel situé sur la zone sombre (le plus à gauche du pixel 1)

Comme le montre la Figure 3.13, l'évolution de la température au cours du temps varie d'un pixel considéré à un autre. Le pixel 1 présente une courbe bien particulière ; la génération d'ultrasons engendre en effet une forte élévation de température sur ce pixel. Ensuite, la température chute rapidement dès l'arrêt de la sonotrode. Pour les pixels 2 et 4, l'évolution de la température est très similaire bien que la valeur du maximum atteint soit plus faible. Comme attendu, la température augmente en même temps que l'excitation mécanique est appliquée. Puis ces zones continuent de chauffer un peu même après l'arrêt des ultrasons. Cela est dû à la propagation de la source de chaleur située au niveau du pixel 1. En ce qui concerne les pixels 3 et 5, les remarques faites à propos des pixels 2 et 4 peuvent être de nouveau formulées. L'augmentation de la température est toutefois encore moins importante. La température des autres pixels (6 et 7) a un comportement similaire. De manière générale, on constate que plus la zone observée est située loin de la zone impactée, plus :

- La température maximale atteinte est faible.

- L'augmentation de température se poursuit après l'arrêt de la génération des ultrasons.

La zone sur laquelle est appliquée l'excitation mécanique présente elle aussi une élévation locale de température à la surface du matériau. Ce phénomène provient de la pression exercée par la sonotrode sur la plaque (par l'intermédiaire du serre-joint) et l'excitation ultrasonore. Cette zone est visible sur la Figure 3.13, à droite de l'image thermographique. Cette augmentation de température ne sera pas prise en compte dans l'étude car elle ne met pas en évidence la présence de défauts dans la plaque en composite.

La période de chauffage (temps durant lequel les ultrasons sont générés dans la plaque) est plus significative que la période de refroidissement, et donc plus intéressante à étudier. En effet durant la phase de refroidissement, la propagation de la chaleur dans le matériau entraîne l'apparition progressive d'un halo, et les contours effectifs du délaminage deviennent alors difficiles à identifier.

Cette étude préliminaire a donc permis de mettre en évidence l'augmentation anormale de la température à la surface du matériau au niveau de la zone endommagée. De plus, la température n'a pas la même évolution au cours du temps d'un pixel à l'autre selon que ce pixel soit situé à proximité ou non d'une zone délaminée. Il semble donc intéressant de déterminer le polynôme caractéristique de l'évolution temporelle de la température de chaque pixel par la méthode des moindres carrés puis d'étudier les coefficients de ce polynôme. Ce calcul sera réalisé dans le paragraphe concernant le traitement d'images.

3.3) C-scan

Le site de la Cofrend (Confédération Française pour les Essais Non Destructifs) montre que la méthode la plus utilisée dans le domaine du CND sont les ultrasons, puisqu'ils sont utilisés par environ 80% des entreprises. D'après le Tableau 3.1 du chapitre 1, il s'agit d'une méthode reconnue, robuste et pérenne applicable à tout type de matériau. Cette technique a donc été sélectionnée pour déterminer le contour du délaminage de notre plaque, les résultats ainsi obtenus servant de référence pour l'évaluation de la forme du défaut détecté par la thermosonique et l'excitation thermique.

3.3.1) Principe et protocole expérimental

Le paragraphe 1.2.7 sur les méthodes par ultrasons du chapitre 1 évoque la technique par ultrasons en immersion et imagerie C-scan. La Figure 1.9 du chapitre 1 montre le principe de cet essai.

Dans notre cas, les essais ont été réalisés au sein du laboratoire DRIVE (Département de Recherche en Ingénierie des Véhicules pour l'Environnement) de l'ISAT (Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports) à Nevers. La manipulation est schématisée sur la Figure 3.14-a.

Pour ces expérimentations, le capteur émetteur/récepteur utilisé est un transducteur de fréquence 4MHz (Figure 3.14-b). De plus, les difficultés de mise en œuvre souvent rencontrées en C-scan ne sont pas présentes dans ces essais : la pièce ne fait pas apparaître de rayon de courbure et son épaisseur reste constante.

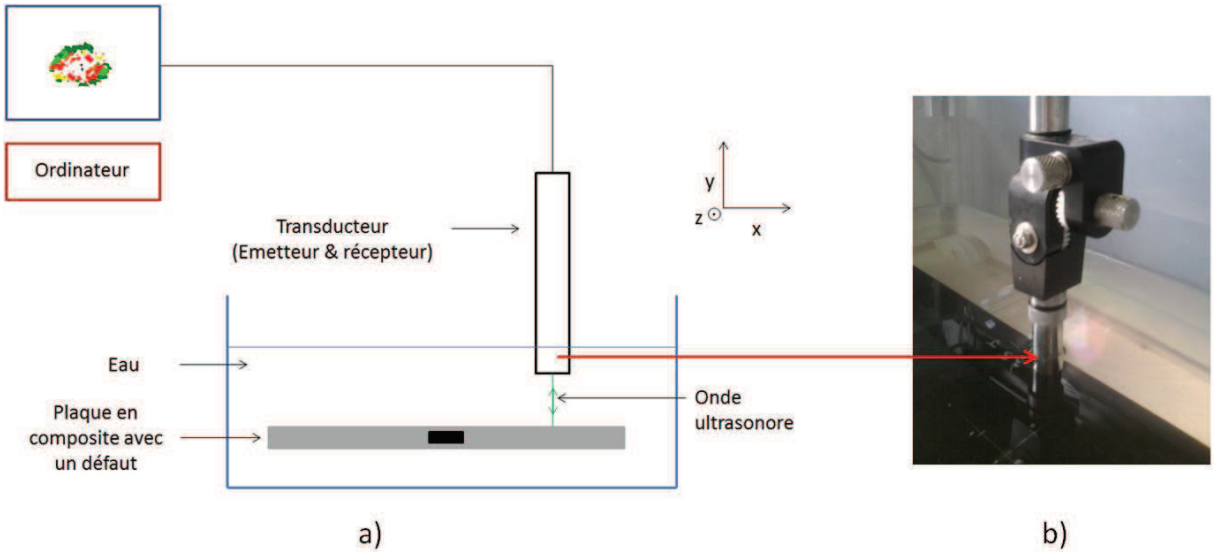


Figure 3.14 : Principe des essais par ultrasons en immersion réalisés à l'ISAT
a) Schéma de principe, b) Photo du transducteur utilisé

La position du transducteur est pilotée par trois axes motorisés (*x*, *y*, *z*) : après avoir réglé la position selon l'axe des y, le transducteur est positionné à un coin de la plaque, puis un programme permet de configurer le déplacement du capteur (Figure 3.15) afin d'effectuer un balayage complet de la surface à analyser.

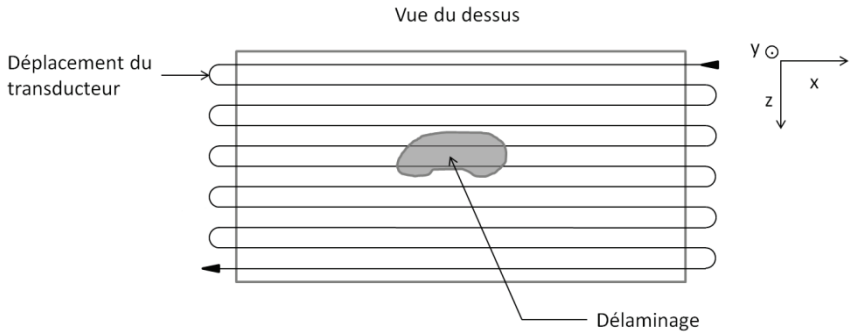


Figure 3.15 : Déplacement du transducteur lors d'un essai C-scan (Vus du dessus)

La Figure 3.16 représente le principe des ultrasons par immersion. Les premières ondes revenant au transducteur sont les ondes réfléchies par la face supérieure de l'échantillon. La partie des ondes incidentes qui n'ont pas été réfléchies par la surface de l'échantillon poursuivent leur parcours à travers l'épaisseur de la matière. Si les ultrasons ne rencontrent pas d'obstacles, ils traversent le matériau puis ressortent par la face inférieure de l'échantillon, une partie du flux étant cependant réfléchie au niveau de cette surface. Cette partie des ultrasons réfléchie remonte alors au transducteur : il s'agit de l'écho de fond correspondant au temps de référence et à la zone saine. Si l'onde de retour possède un temps de vol inférieur au temps de référence, il est alors possible de déterminer qu'il y a présence du délaminage. Plus le temps de vol est court et plus le délaminage est en surface. Cette méthode est donc la mieux adaptée pour connaître le contour du défaut.

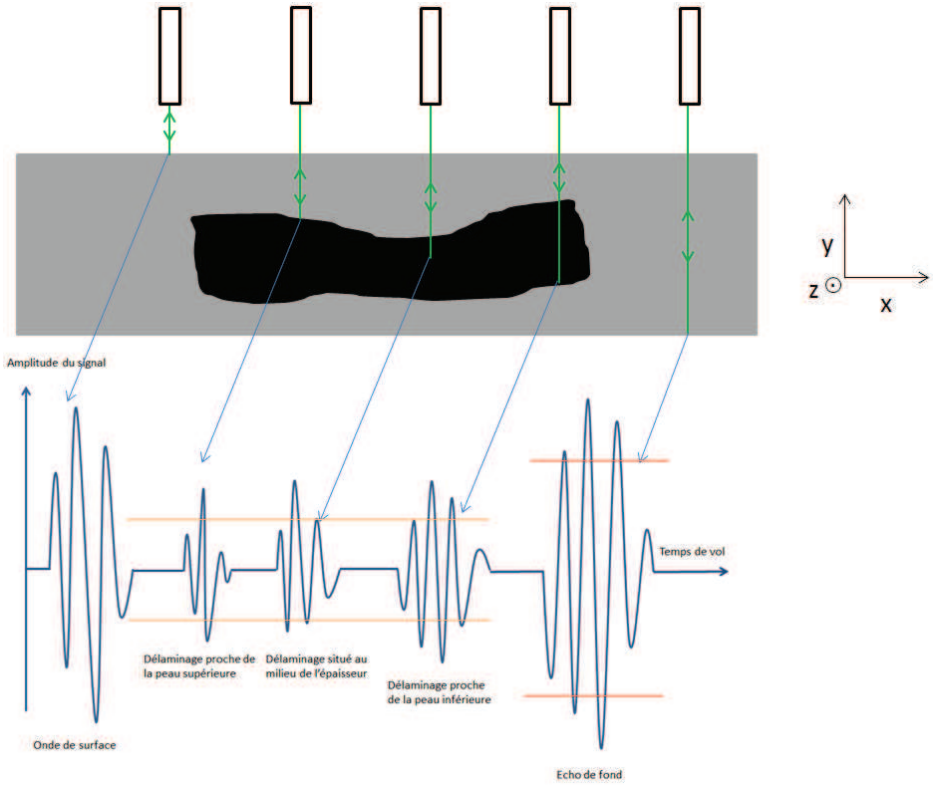


Figure 3.16 : Principe des ultrasons par immersion

3.3.2) Résultats

Le signal du transducteur est enregistré informatiquement. Un logiciel permet ensuite de tracer l'amplitude du signal retour en fonction du temps de vol de l'onde, sur un graphique appelé A-scan. Afin de pouvoir détecter les temps de vol des ondes réfléchies (correspondant aux transitions de milieux), des "portes" sont positionnées sur ces graphiques A-scans. Ces portes sont représentées sous forme de lignes horizontales, et sont placées manuellement par l'expérimentateur. Dans le

logiciel utilisé, elles sont au nombre de deux (Figure 3.17-a et Figure 3.17-b) : l'une pour la détection de la profondeur du défaut dans le matériau (Figure 3.17-c), l'autre pour la détection de l'écho de fond provenant de la surface inférieure du matériau (Figure 3.17-d). Elles sont réglables en :

- Temps de vol : la longueur de la porte permet de détecter des défauts soit très proches de la surface soit très en profondeur.

- Amplitude : l'amplitude du seuil correspond à la sensibilité de la détection.

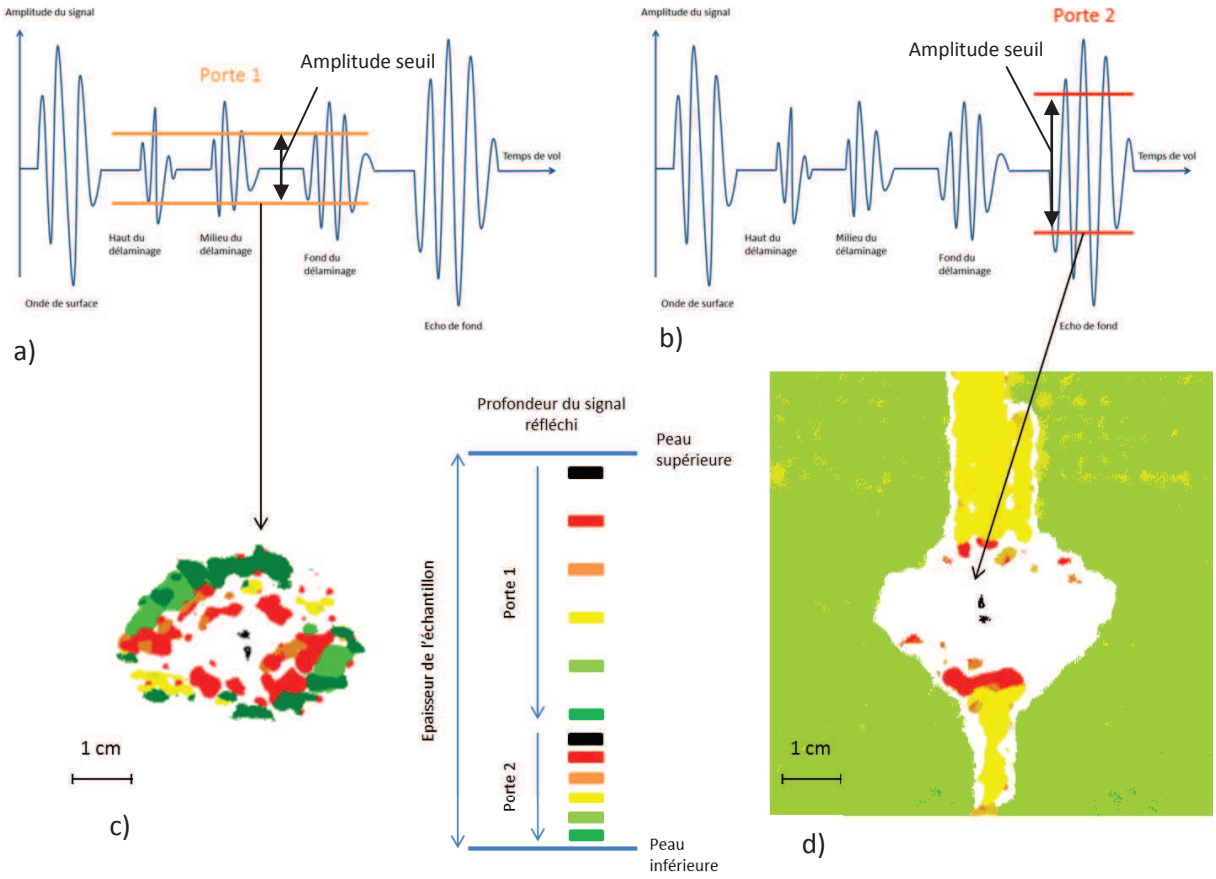


Figure 3.17 : Résultats images C-scan

L'imagerie, créée suite à l'acquisition des signaux sélectionnés par la porte 1, affiche des zones de différentes couleurs qui sont une image de la profondeur de l'écho de défaut (Porte 1) ou de l'écho de fond (Porte 2). Lorsque l'amplitude du signal de retour n'a pas dépassé l'amplitude seuil imposée par la porte, la zone est représentée par une zone blanche.

Les résultats obtenus pour la porte 2 ne sont pas des résultats « tout ou rien » comme prévu initialement. Les zones jaunes présentes en Figure 3.17-d représentent en fait une épaisseur de

plaque plus faible : lors de l'impact ayant créé le délaminage, ce dernier s'est en effet propagé jusqu'au bord opposé, arrachant une partie des fibres du pli inférieur. De plus, les zones rouges et noires sont dues à des imperfections lors de l'acquisition, et ne devraient donc pas apparaître. Toutefois, malgré ces artefacts, le contour du délaminage apparaît clairement ; la porte 2 ne sélectionne que les signaux de retour représentant l'écho de fond. Toutes les ondes dont le temps de vol est inférieur ne sont pas prises en compte, une zone blanche apparaît alors. Le contour de cette zone blanche correspond donc à l'aire du délaminage.

3.4) Comparaison C- scan et thermosonique

3.4.1) Délimitation du délaminage

Pour la suite de l'étude, on suppose que la longueur *l* de l'échantillon est très supérieure à son épaisseur *e* et que la taille *x* du délaminage est très supérieure au halo thermique *d* (Figure 3.18). Ceci implique donc que le contour de l'échauffement enregistré par la caméra IR est le même que celui du délaminage(tout au moins au début de l'échauffement). L'erreur ainsi commise, qui est malgré tout minime, n'a dans les faits pas pu être quantifiée.

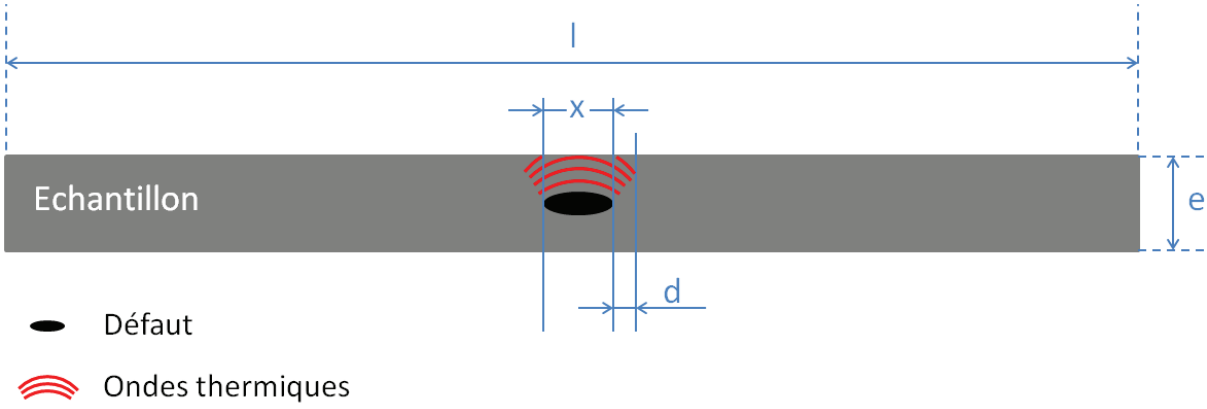
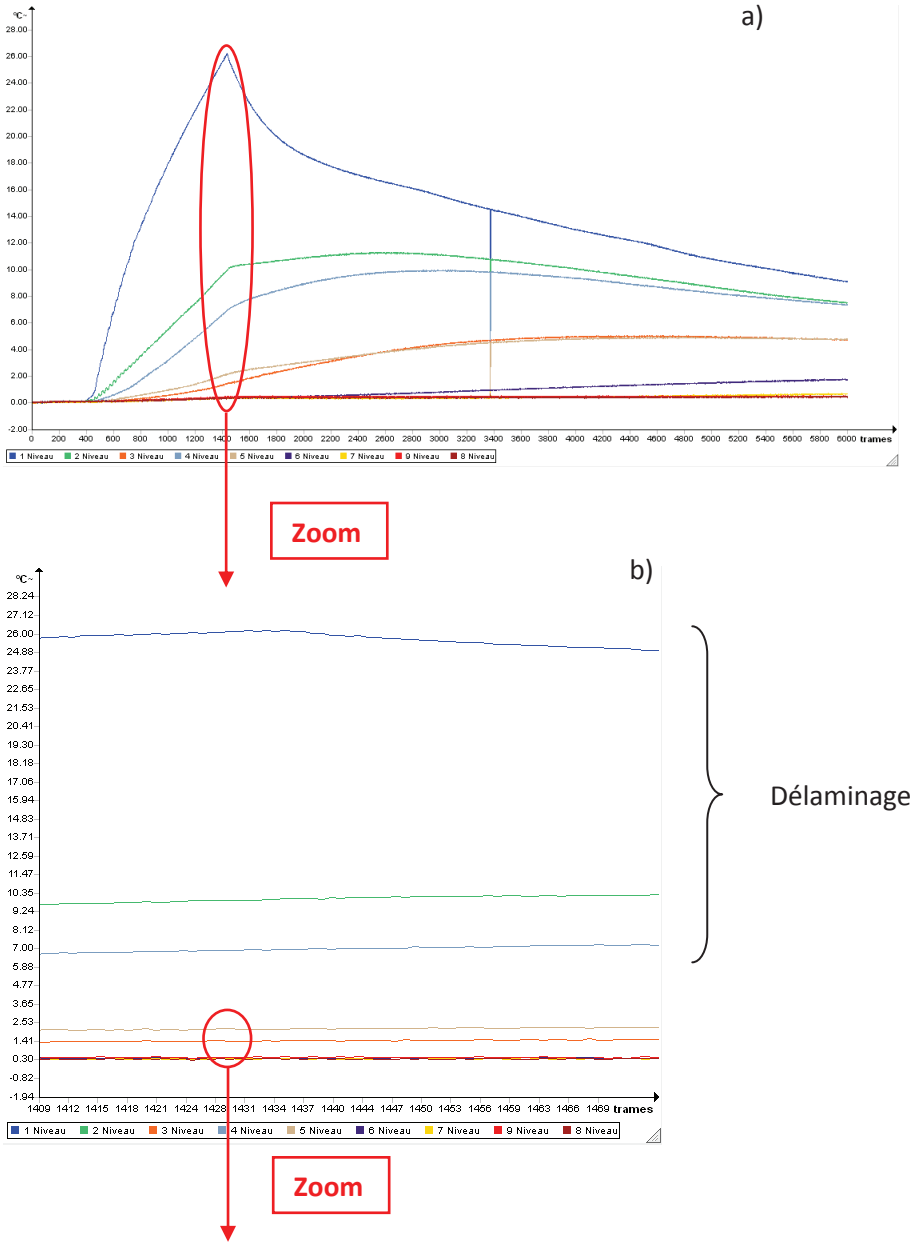


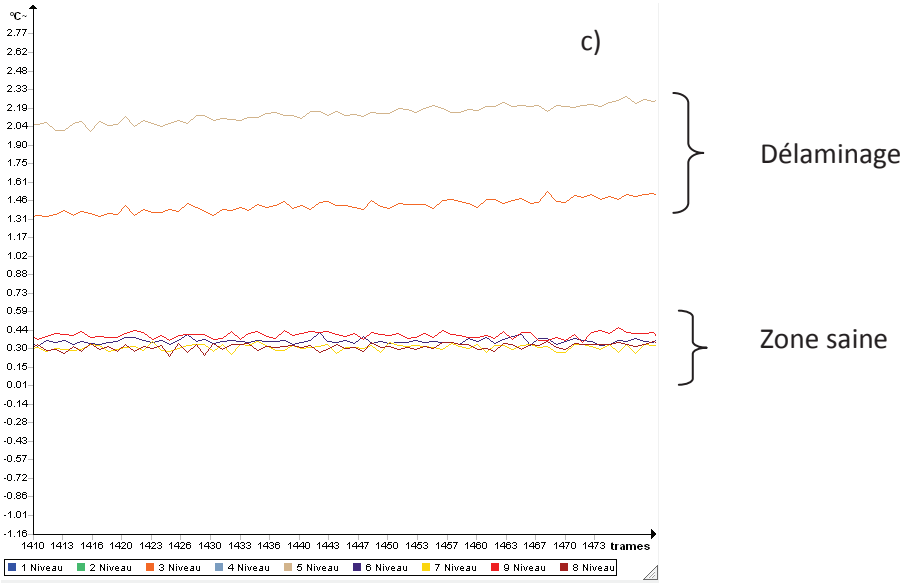
Figure 3.18 : Hypothèse simplificatrice de la détection du contour du délaminage

L'image obtenue grâce à la porte 2 sera utilisée pour cette étude : comme montré précédemment le contour du délaminage est en effet mieux mis en évidence qu'avec la porte 1. La surface représentée par un pixel étant connue, il est aisé de déterminer l'aire du défaut.

Toutefois, les températures de ces zones saines restent beaucoup plus faibles que les températures des zones défectueuses comme le montre la Figure 3.19. En étudiant les valeurs brutes de la température, le contour du délaminage devient visible, mais pour qu'il soit précis, il est nécessaire

d’étudier la température à la fin de la génération des ultrasons. En effet, la Figure 3.19 montre que la différence maximale de température entre la zone défectueuse et la zone saine est de l’ordre de1°C.





$$\Delta T_{\min}(délaminage) \simeq 1{,}3°C$$

$$\Delta T_{\max}(zone\ saine) \simeq 0{,}44°C$$

$$\Rightarrow T_{seuil} = \Delta T_{\min}(délaminage) = 1{,}3°C$$

Figure 3.19 : Sélection de la température de seuil (Différenciation zone saine / zone délaminée)

Après analyse de plusieurs essais de thermosonique et une comparaison rapide avec les essais en C-scan, les différences de températures observées dans la zone délaminée seraient liées aux différentes profondeurs du délaminage. Bien que la Figure 3.1 de ce chapitre validerait cette hypothèse, cela mériterait une étude plus approfondie qui n'a pu être réalisée dans le cadre de ce travail par manque de temps.

Sur cet exemple, le seuil est fixé à 1,3°C. Ainsi, pour pouvoir être analysées informatiquement, toutes les températures supérieures à ce seuil sont ramenées à une valeur fixe, tandis que les températures inférieures sont mises à zéro. De cette manière, le contour du délaminage apparaît comme dans le cas de la "porte 2" en C-scan. Ces deux résultats peuvent donc maintenant être directement comparés.

3.4.2) Evolution de la température de seuil (T_{seuil})

L'étude de plusieurs paramètres va permettre de déterminer les conditions d'essais optimum à appliquer par la suite à la détection des autres délaminages. Ces paramètres sont la distance de la sonotrode au centre du délaminage, le temps de génération d'ultrasons dans l'échantillon et la puissance des ultrasons.

D’après la Figure 3.20, la Figure 3.21 et la Figure 3.22, on remarque que, pour une puissance fixée, l’évolution de la température de seuil en fonction du temps d’impulsion reste à peu près linéaire, et ceci quelque soit la distance considérée.

Certaines valeurs n’ont cependant pas pu être prises en compte : une puissance importante des ultrasons couplée à un temps d’impulsion long et une courte distance a en effet entraîné une saturation des pixels de la caméra IR (chauffage de la zone trop important).

De plus, certaines autres valeurs n’ont pas été relevées (Figure 3.20, d = 18 cm) à cause d'un dysfonctionnement de l'excitation. Il s'agissait souvent d'un problème de liaison entre la sonotrode et le convertisseur à ultrasons.

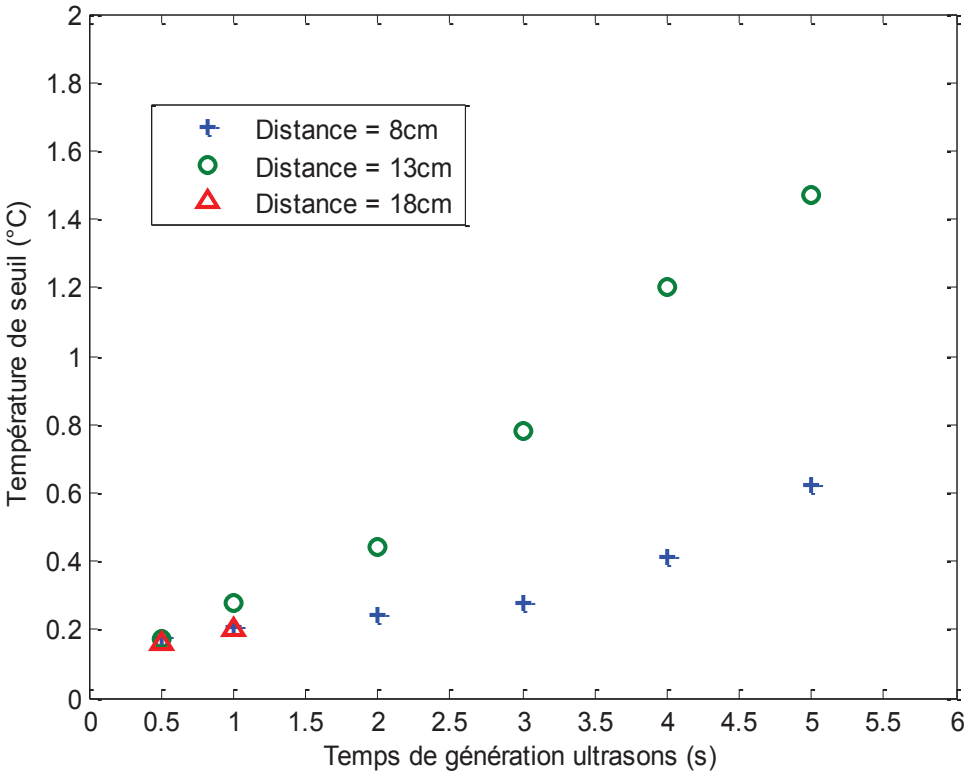


Figure 3.20 : Evolution de la température de seuil pour une puissance d'excitation de 15W

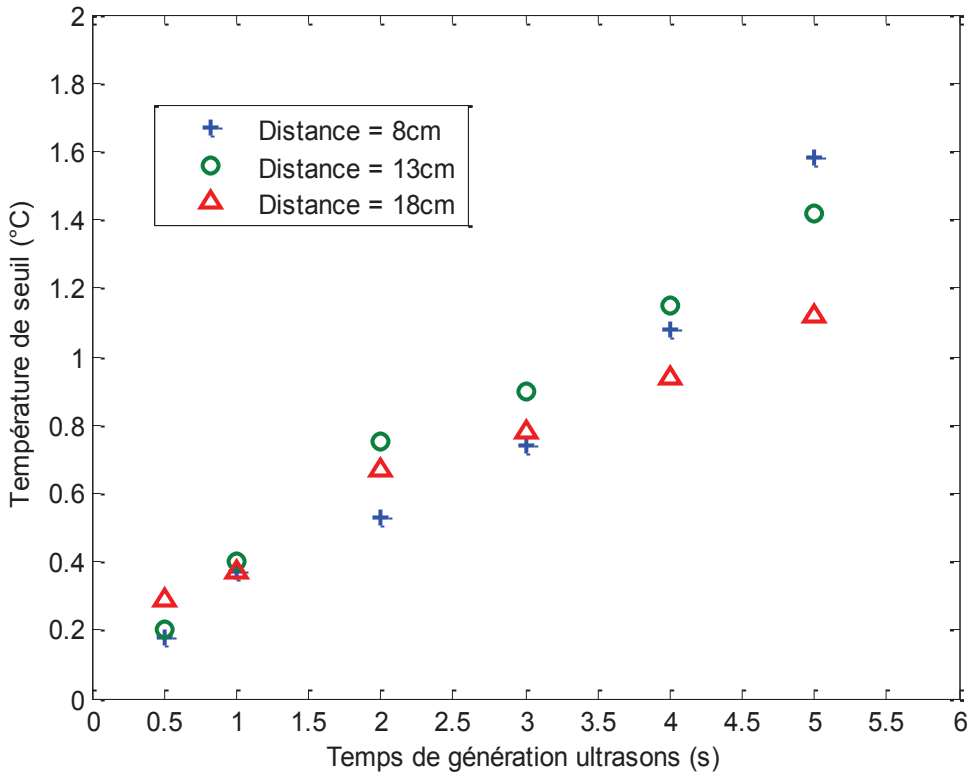


Figure 3.21 : Evolution de la température de seuil pour une puissance d'excitation de 30W

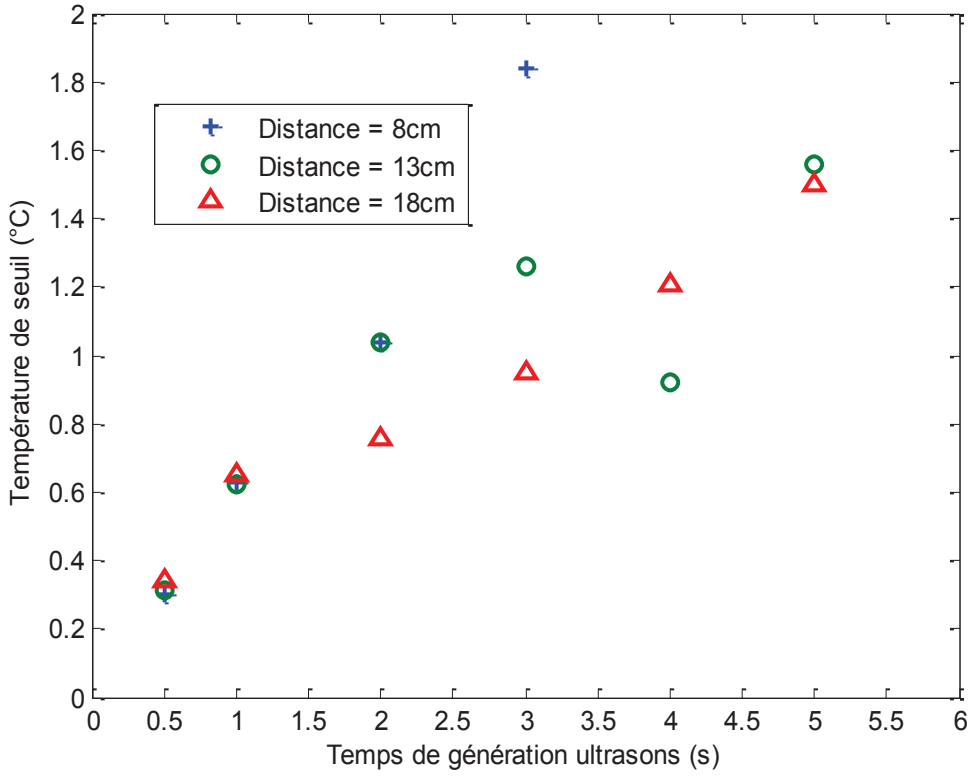


Figure 3.22 : Evolution de la température de seuil pour une puissance d'excitation de 45W

3.4.3) Ecart relatif sur la détection

L'aire du délaminage détecté par la méthode C-scan est de $1296{,}6\,mm^2$. Cette taille est ensuite comparée à la valeur calculée par la méthode thermosonique pour chaque condition expérimentale. Le calcul réalisé met en évidence l'erreur relative par rapport à la valeur de référence obtenue grâce au C-scan. Les différents points obtenus laissent à penser que l'évolution de l'écart relatif est bilinéaire.

La Figure 3.23, la Figure 3.24 et la Figure 3.25 montrent qu'utiliser une distance de 18 cm ne permet pas d'obtenir une détection correcte du délaminage (l'écart est alors supérieur à 50%).

Pour une puissance de 15W, les résultats ne sont pas probants pour la distance 8 cm et 18 cm. L'écart relatif est proche de 0 pour la distance 13 cm et un temps d'impulsion de 4 secondes. Au vu des autres résultats obtenus pour les puissances 30W et 45W, l'écart relatif pour la distance 8 cm aurait du, lui aussi, être proche de 0. Ce dysfonctionnement est expliqué à la fin de ce paragraphe.

Pour une puissance de 45W, une distance de 13 cm couplée à un long temps d'impulsion sera préférée à la distance de 8 cm. En effet, bien que l'écart relatif soit faible (l'écart est proche de 0%), il y a non seulement un risque de saturation des pixels (c'est d'ailleurs le cas pour les valeurs dont le temps d'impulsion est strictement supérieur à 3 secondes) mais aussi un risque de propagation du délaminage.

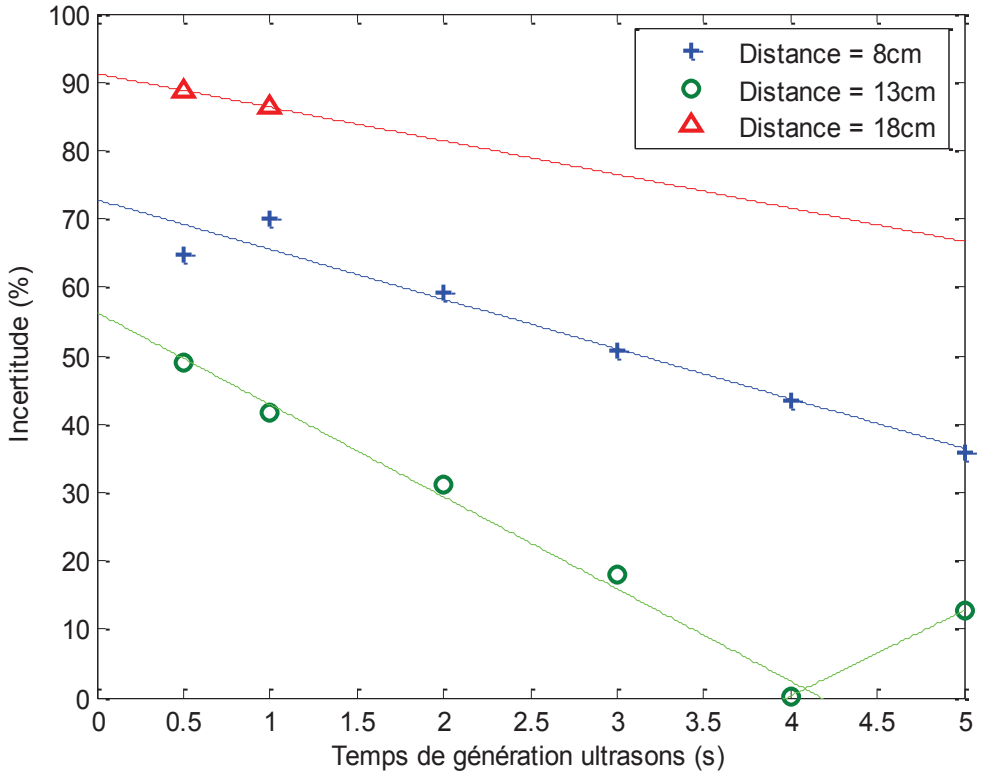


Figure 3.23 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 35J pour une puissance fixée à 15W

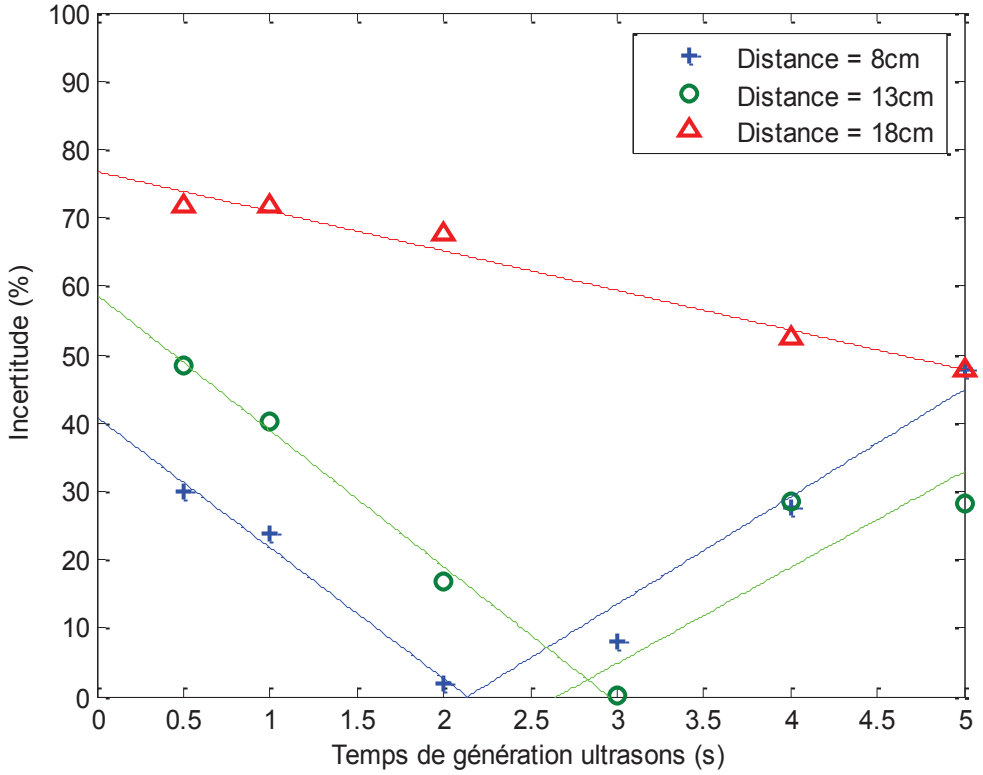


Figure 3.24 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 35J pour une puissance fixée à 30W

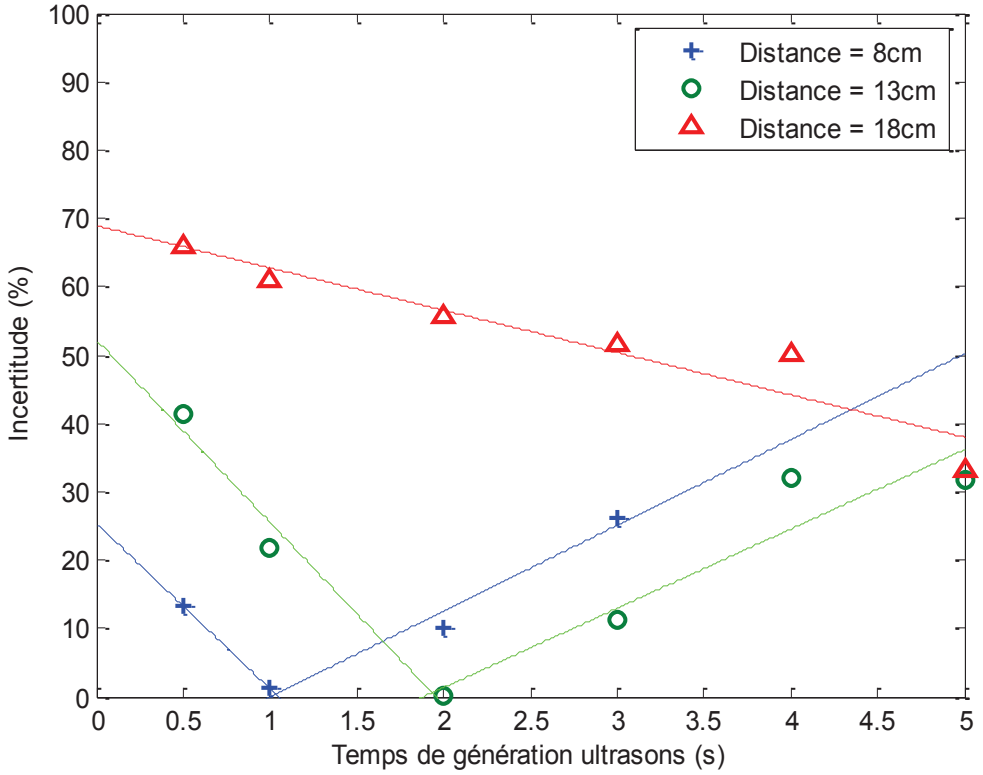


Figure 3.25 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 35J pour une puissance fixée à 45W

Une puissance de 30W sera donc préférée aux deux autres. Le temps de génération des ultrasons dans la plaque, tout comme leur puissance ou la position de la sonotrode, impacte la qualité des résultats. Il faut en effet tenir compte de la diffusion de la chaleur dans la plaque. La Figure 3.24 montre qu'une optimisation est possible : une position de la sonotrode à 8 cm avec un temps d'impulsion de 2 s, et une position de la sonotrode à 13 cm avec un temps d'impulsion de 3 s. L'écart relatif de mesure est respectivement de 1,93% et 0,03%. Il est à noter que ce calcul d'écart relatif est fait en prenant les essais en immersion comme référence, ces tests comportant eux aussi un écart relatif de mesure non déterminée.

	P=15W		P=30W		P=45W	
D=8cm	$e = -7{,}3t + 72{,}8$		$e_1 = -19{,}1t + 40{,}8$	$e_2 = 15{,}7t + 33{,}6$	$e_1 = -24{,}2t + 25{,}4$	$e_2 = 12{,}5t + 12{,}6$
D=13cm	$e_1 = -13{,}5t + 56{,}3$	$e_2 = 12{,}5t + 49{,}7$	$e_1 = -19{,}9t + 58{,}8$	$e_2 = 14t + 37{,}2$	$e_1 = 26{,}7t + 52{,}2$	$e_2 = 11{,}6t + 21{,}8$
D=18cm	$e = -4{,}9t + 91{,}2$		$e = -5{,}8t + 76{,}7$		$e = -6{,}2t + 68{,}9$	

Tableau 3.2 : Equations des droites représentant l'évolution de l'écart relatif

Les résultats du Tableau 3.2 montrent que les paramètres puissance, distance et temps influencent l'évolution de l'écart relatif. Existe-t-il alors une combinaison optimale de ces paramètres? La variation de l'écart relatif est approximativement la même pour une puissance de 30W et une distance de 8 cm, pour une puissance de 30W et une distance de 13 cm. En théorie, l'expérimentateur s'attendrait à ce que le coefficient directeur de l'écart relatif pour une distance plus faible soit plus important (en valeur absolue) que pour une distance plus grande. Ceci démontre bien que les conditions expérimentales sont difficilement reproductibles dans notre cas. Bien que certaines hypothèses peuvent être avancées comme la différence de pression de la sonotrode sur la plaque d'une expérience à une autre (même si le serre-joint devait pallier ce problème), il n'y a apparemment pas une maîtrise quantitative parfaite de tous les paramètres expérimentaux.

3.4.4) Détection des délaminages 40J, 50J et 60J

La position de la sonotrode liée à l'emplacement des délaminages a une influence sur le protocole expérimental : il a parfois fallu ne pas considérer certains essais (Ceci est du à la position des différents délaminages qui n'a pas permis de réaliser les tests à certaines distances). Au vu de la campagne de qualification de la plaque "délaminage 35J", les tests réalisés avec une position de la sonotrode proche du défaut donnent les meilleurs résultats. L'influence d'un autre facteur est à considérer : la création d'autres sources de chaleurs (la présence d'autres délaminages dans la plaque). Celles-ci peuvent modifier la mesure et donc son exactitude. La sonotrode doit être suffisamment éloignée des défauts non étudiés mais assez proche de celui considéré.

La Figure 3.26, la Figure 3.27 et la Figure 3.28 montrent que les courbes obtenues semblent pratiquement linéaires. Les équations de ces droites ont donc été calculées (Tableau 3.3).

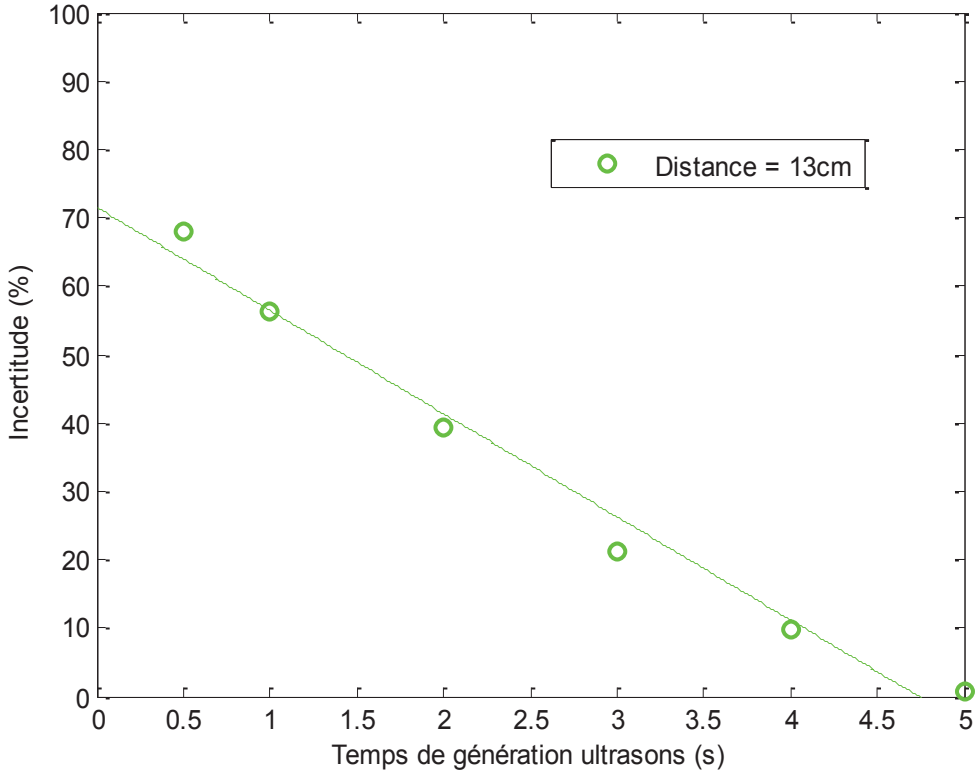


Figure 3.26 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 40J pour une puissance de 30W

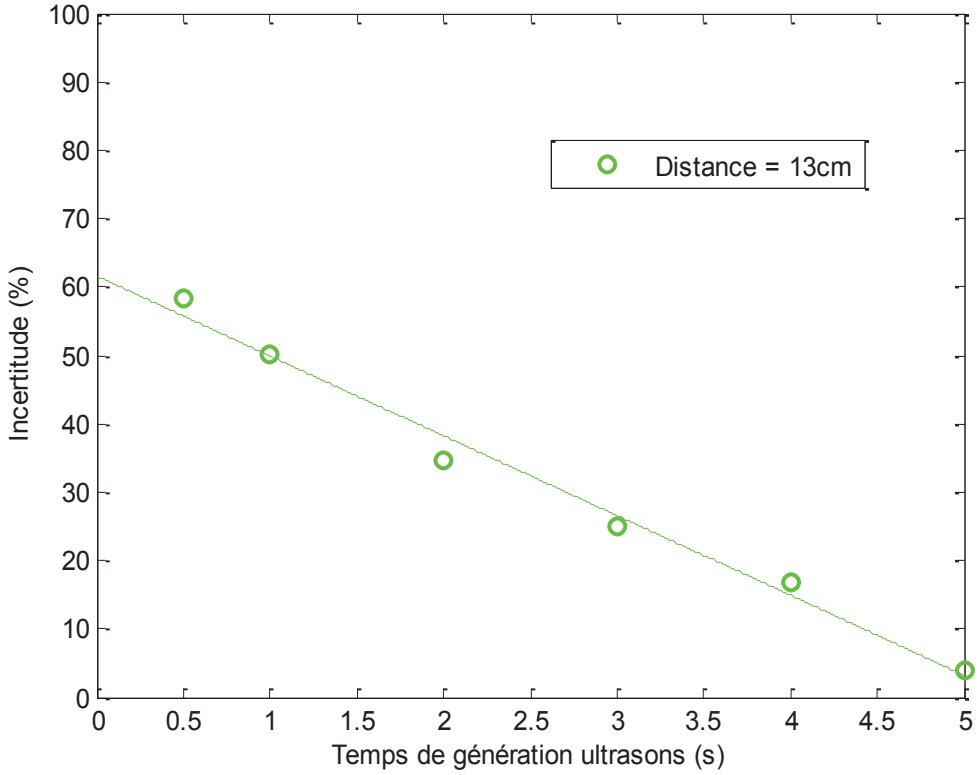


Figure 3.27 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 50J pour une puissance de 30W

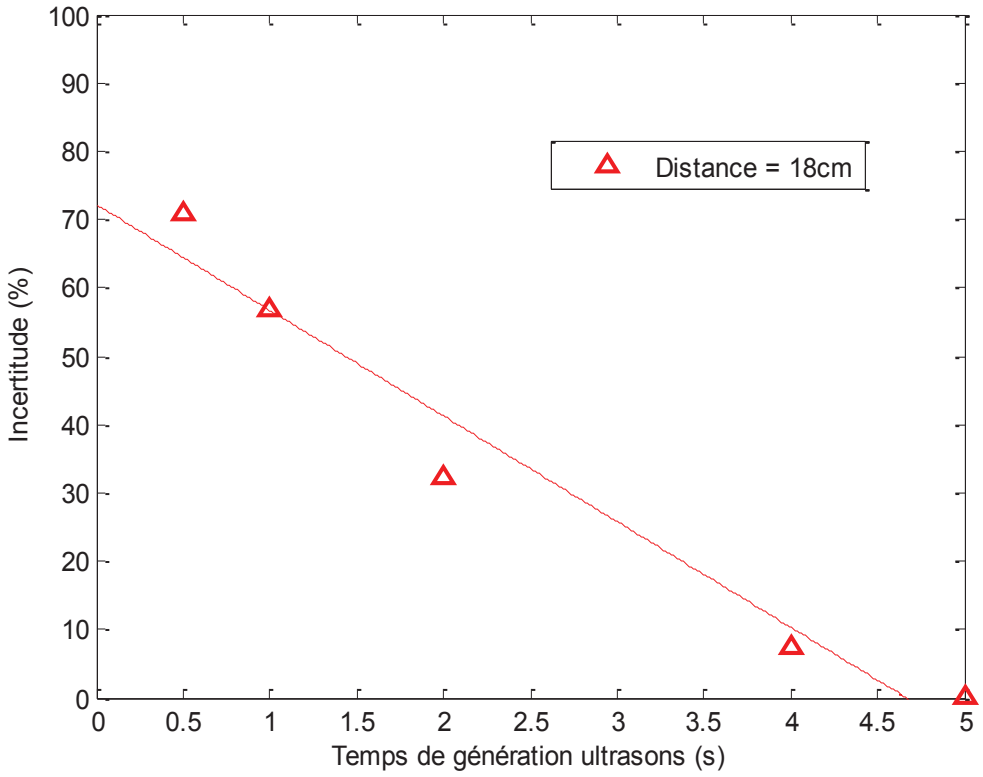


Figure 3.28 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 60J pour une puissance de 30W

Délaminage 40J	$e = -15{,}01t + 71.51$
Délaminage 50J	$e = -11{,}56t + 61{,}57$
Délaminage 60J	$e = -15{,}46t + 72{,}18$

Tableau 3.3 : Equations des droites de l'évolution de l'écart relatif pour les trois délaminages

D'après le Tableau 3.4, les résultats de l'analyse et le post-traitement des essais conservés sont probants : l'écart relatif de détection est inférieur à 4%.

Délaminage	Temps de génération d'ultrasons (s)	Distance (cm)	Ecart relatif (%)
40J	5	13	0,6274
50J	5	13	3,9221
60J	5	18	0,0494

Tableau 3.4 : Valeurs de l'écart relatif pour les trois délaminages

Toutefois, aucune conclusion ne peut être tirée quant à l'évolution de l'écart relatif suivant la taille du délaminage. Sachant qu'il n'a pas été possible d'établir une « loi » en fonction de la puissance, le temps et la distance, ajouter un autre paramètre ne semble pas pertinent.

A ce stade de la recherche, les seules conclusions possibles sont la confirmation de l'évolution linéaire (ou bi-linéaire) de l'écart relatif ainsi que la possibilité de détecter complètement les délaminages grâce à la thermosonique.

3.5) Analyse

Plusieurs questions apparaissent suite de cette étude, et des modifications pourraient à l'avenir être apportées au protocole expérimental :

- Tout d'abord, est ce que l'écart relatif de la détection du délaminage est liée à la taille du défaut, au temps de génération d'ultrasons, à la distance et à la puissance des ultrasons ? Il faudrait alors réaliser une campagne de calibration des défauts, varier l'épaisseur de la plaque, la position du délaminage dans cette épaisseur avec le même protocole expérimental que celui appliqué précédemment.

- Mieux contrôler la pression exercée par la sonotrode sur la plaque serait de plus intéressant : en effet, cela ajouterait un autre paramètre à l'étude. La quantité d'énergie introduite dans la plaque par les ultrasons dépend en effet fortement de ce paramètre.

Pour cela, il suffit de placer un ressort entre la sonotrode et le serre-joint (Figure 3.29) : l'effort appliqué est alors déterminé en connaissant l'allongement de compression du ressort et sa constante de rigidité.

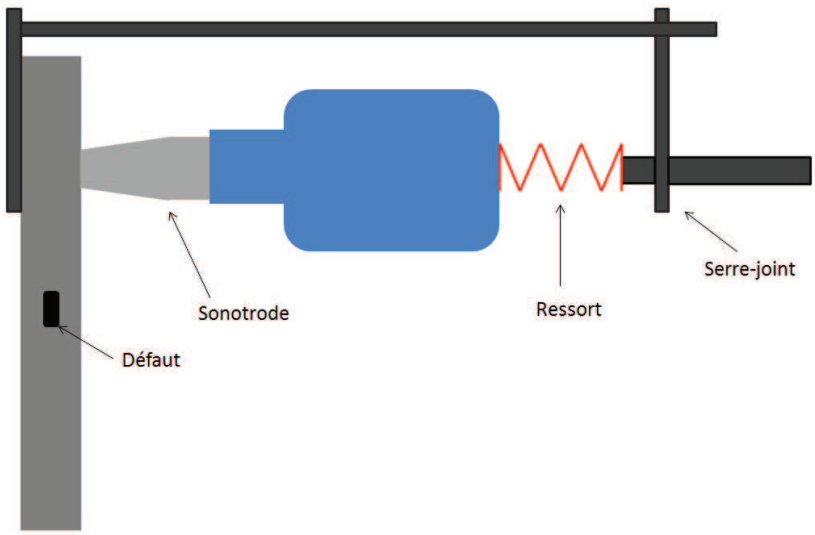


Figure 3.29 : Modification proposée du protocole expérimental

Dans le même ordre d'idée, il serait aussi intéressant de contrôler que toute la surface de la sonotrode soit bien en contact avec celle du matériau testé. La quantité d'énergie des ultrasons générée dans l'échantillon est liée à ce paramètre. Toutefois, la pression appliquée entre la sonotrode et la plaque est assez importante pour considérer que toute la surface de la sonotrode épouse la structure. Plusieurs couches d'aluminium sont appliquées afin de préserver l'intégrité de la structure (tel que décrit dans le paragraphe 3.1.3). L'expérimentation a permis d'établir qu'une partie de l'énergie serait dissipée sous forme de chaleur à l'interface sonotrode / aluminium. En effet, il a été nécessaire de changer toutes les dizaines de tests le liant sonotrode / plaque.

Enfin, l'expérimentateur se heurte à un souci majeur dans le domaine du CND : comment réussir à créer des délaminages calibrés dans une plaque stratifiée? En effet, actuellement, seule la tour de chute est utilisée. Une idée serait par exemple de percer une partie de l'échantillon pour créer un délaminage à la profondeur percée mais le perçage créerait aussi l'apparition d'autres défauts non souhaités (Figure 3.30).

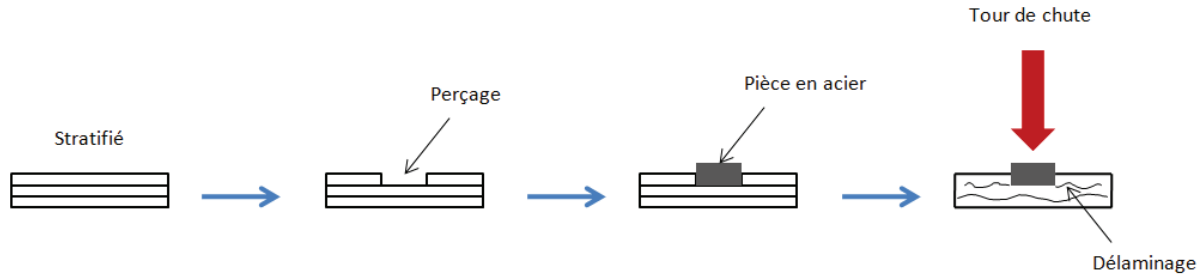


Figure 3.30 : Exemple de création d'un délaminage dans un stratifié

En conclusion, cette étude a montré qu'il était possible de détecter la forme du délaminage à partir d'un essai de thermosonique. Il s'agit toutefois d'une méthode "manuelle" qui nécessite de plus une certaine expérience dans l'analyse d'image thermographique. Pour tenter de s'affranchir de cet écueil, une mise en forme automatique de la détection ainsi que plusieurs types de traitements d'image vont être testés dans la section suivante.

3.6) Traitement d'images

3.6.1) Introduction

La théorie du traitement d'image a été exposée dans le chapitre 2 et a été appliqué à l'ensemble des films thermographiques. La technique du seuillage telle que décrite dans le paragraphe 3.4.1 a de nouveau été employé sur les images obtenues. La forme du délaminage, qui en découle, est ensuite comparée à celui détecté par les essais ultrasons C-scan qui vont de nouveau être utilisés comme référence. L'étude précédente a permis de mettre en évidence qu'il est possible de déterminer la

forme complète du délaminage. Toutefois, cette détection n'est possible que pour des conditions expérimentales particulières : la position de la sonotrode associée à telle puissance des ultrasons et à tel temps d'impulsion des ultrasons dans la plaque. La question est maintenant de savoir si les traitements d'images permettent de faire ressortir des informations jusqu'ici inconnues et si l'utilisateur peut s'affranchir des inconvénients liés aux conditions expérimentales. La démarche reste la même que celle précédemment utilisée, à savoir comparer les aires obtenues par le traitement d'images des essais thermosoniques à celles issues des essais C-scan.

La figure est un exemple des images C-scan obtenues :

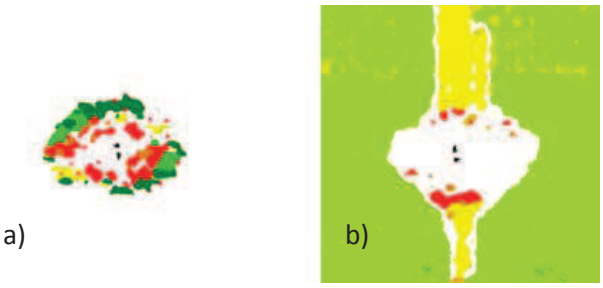


Figure 3.31 : Images obtenues par ultrasons C-scan
a) Image obtenue avec la porte 1, b) Image obtenue avec la porte 2

La Figure 3.32 est un exemple des images thermosoniques obtenues par les traitements d'images :

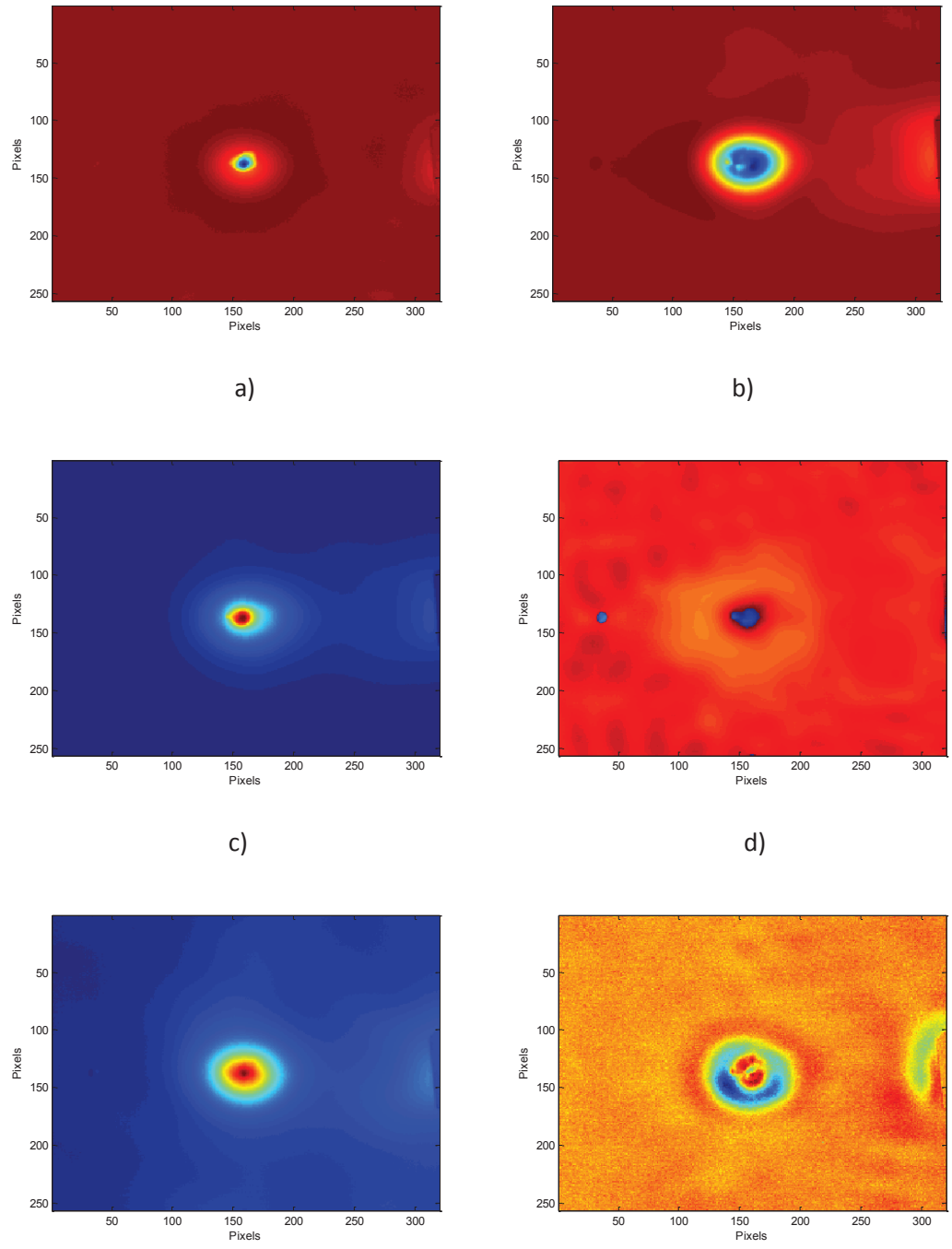


Figure 3.32 : Images post-traitées pour le délaminage 35J et l'essai P = 30W, d = 8cm, t = 5s
a) Gradient (Minimum) b) polynôme (Coefficient second degré) c) coefficient FFT (3ème harmonique) d) Phase FFT (3ème harmonique) e) PCA f) ICA

3.6.2) Analyse du post-traitement

L'analyse du post-traitement est représenté par l'algorithme en Figure 3.33. Celui-ci sera détaillé par la suite.

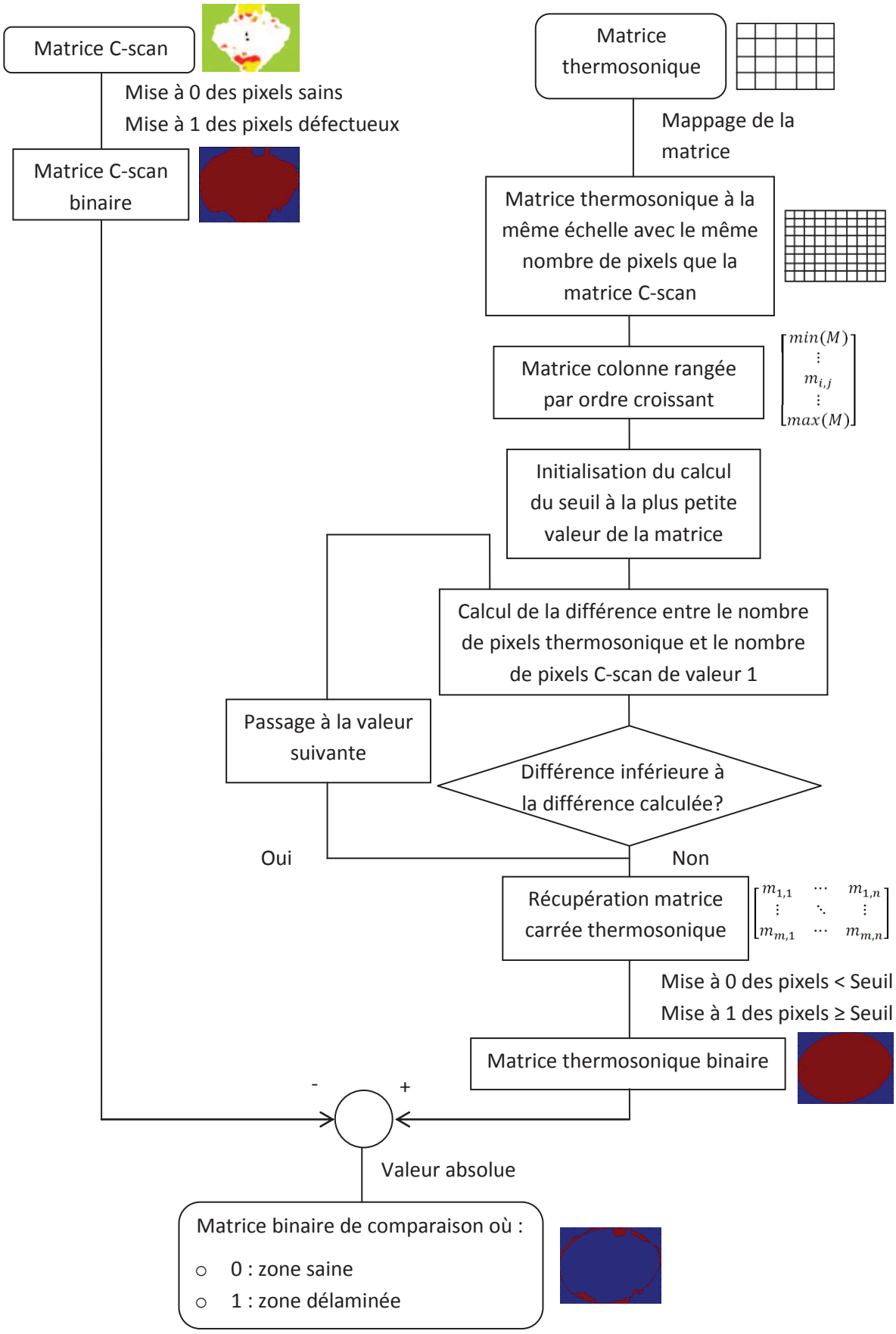


Figure 3.33 : Algorithme du post-traitement

3.6.2.1) Mappage de l'image post-traitée

Dans l'étude précédente, le calcul de l'aire du délaminage a été réalisée en multipliant la surface représentée par un pixel par le nombre de pixels concernés dans l'image. Cependant, dans le cas précédent, la taille d'un pixel varie entre les deux méthodes : $0{,}207 * 0{,}407\ \mathrm{mm}^2$ pour les essais C-scan et $0{,}583 * 0.583\ \mathrm{mm}^2$ pour la thermosonique (Figure 3.34). Ainsi, la taille du pixel enregistré par la caméra IR est plus importante que celle du C-scan. La matrice thermosonique a par conséquent été ré échantillonnée par interpolation cubique afin d'avoir la même taille de pixel que la matrice C-scan. Ce nouveau mappage sera utile par la suite lors de la comparaison de la détection du défaut.

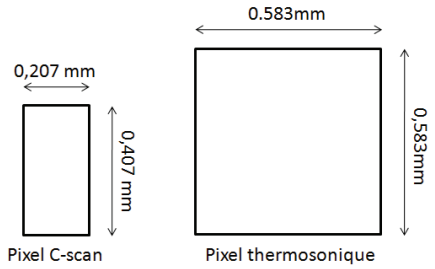


Figure 3.34 : Tailles des différents pixels pour le C-scan et la thermosonique

3.6.2.2) Détermination du seuil

La valeur du seuil utilisée dans l'étude précédente (paragraphe 3.4) a été trouvée manuellement. Comme décrit précédemment, l'algorithme recherché doit permettre de déterminer automatiquement ce seuil. Le critère retenu est de trouver une valeur de seuil permettant d'obtenir le nombre de pixels de l'image thermosonique approchant au mieux le nombre de pixels de la matrice C-scan (qui lui est connu).

Après avoir transformé la matrice thermosonique en ligne et classée par ordre croissant, l'initialisation du seuil est réalisée en prenant la valeur minimale du vecteur (Figure 3.35). A partir de cette première valeur, le nombre de pixels est calculée. Si celui-ci est supérieur à la quantité de pixels C-scan, alors le nombre supérieur au seuil actuel est sélectionner et le nombre de pixels de la matrice thermosonique est recalculé jusqu'à avoir ce dernier le plus proche de la référence (Figure 3.36).

$$\begin{bmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{m,1} & \cdots & m_{m,n} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} min(M) \\ \vdots \\ m_{i,j} \\ \vdots \\ max(M) \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \text{Initialisation} \\ \\ \leftarrow \text{Seuil} \\ \\ \end{matrix}$$

Figure 3.35 : Transformation de la matrice thermosonique post-traitée

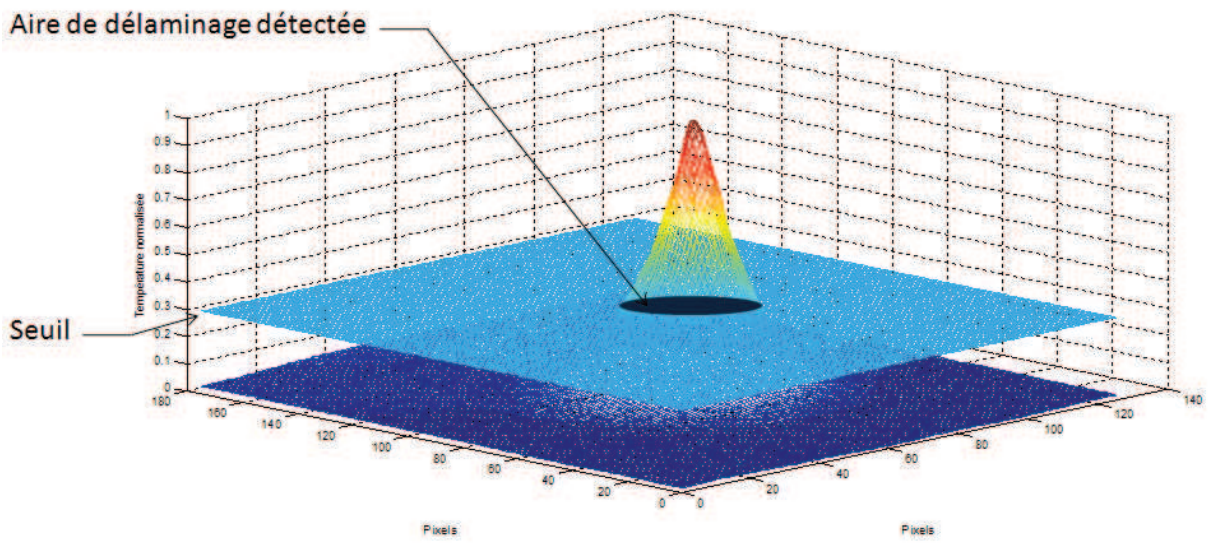


Figure 3.36 : Application du seuil à la matrice thermosonique

3.6.2.3) Comparaison des aires

Si le nombre de pixels trouvé est suffisamment proche de la référence (de l'ordre du pixel) pour considérer que l'aire détectée est la même (pour un pixel, l'aire est de $0{,}207 * 0{,}407 = 0.084\ \mathrm{mm}^2$), il est judicieux de se demander si la forme générale du délaminage obtenu est la même ou présente par exemple pour les ultrasons C-scan une allure plus allongée. C'est à ce moment que redessiner le mappage de la matrice thermosonique est primordial. En effet, les deux matrices sont ensuite soustraites l'une à l'autre (Figure 3.37). Les tailles de matrices doivent être les mêmes.

Pour les ultrasons C-scan, tous les pixels représentatifs du délaminage prennent le chiffre 1 comme valeur. Les zones saines sont, elles, remplacées par 0.

Pour la thermosonique, toutes les valeurs au dessus de la valeur du seuil sont mises à 1, les autres à 0.

La matrice "soustraction" obtenue est donc une matrice remplie de 0, de 1 et de -1. Ensuite, la valeur absolue de celle-ci permet de n'obtenir que des 0 et des 1. Les 1 représentent donc les pixels situés sur une zone défectueuse pour l'essai en ultrasons C-scan ou l'essai thermosonique. Le pourcentage de différence entre la référence C-scan et la thermosonique est ensuite calculé.

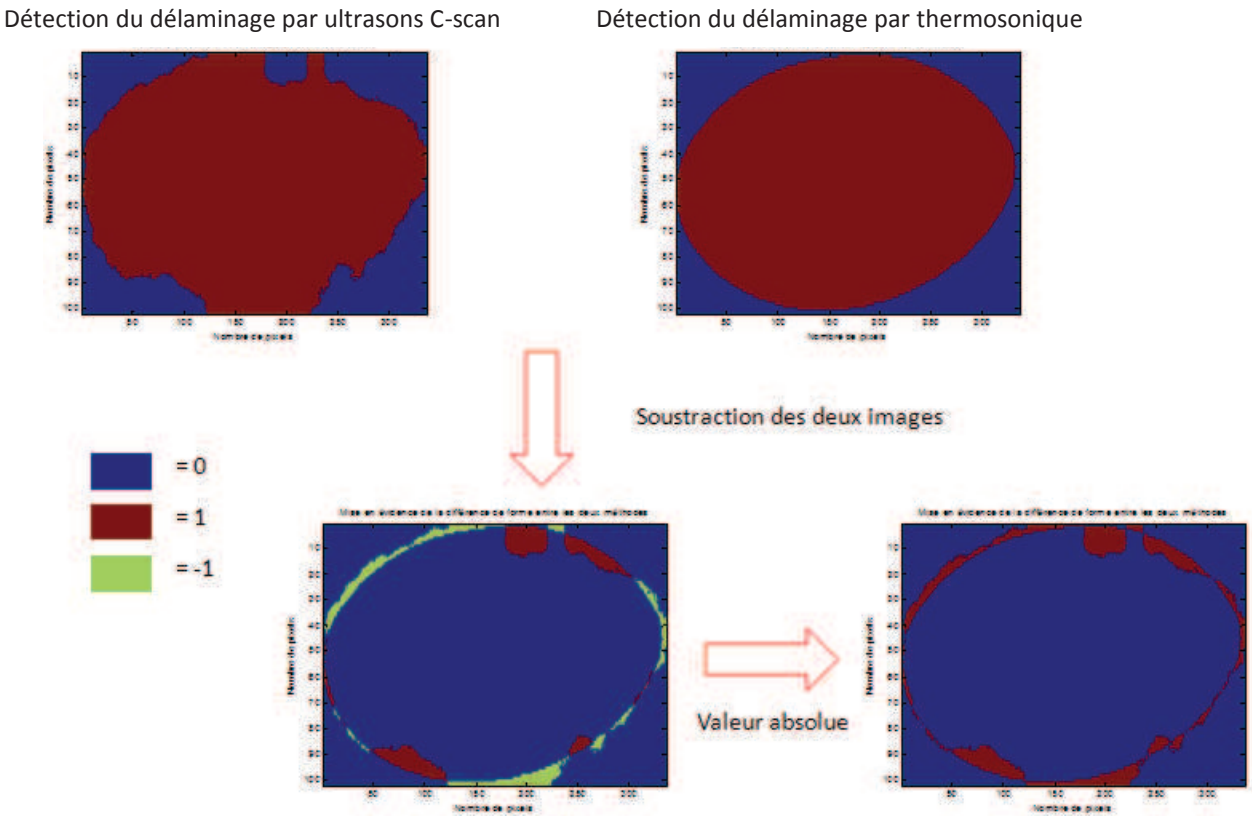


Figure 3.37 : Comparaison des aires de détection du délaminage (Exemple utilisé : plaque 60J)

Ce protocole d'analyse a été appliqué à tous les traitements d'image qui ont été testés (approximations polynomiales, gradient, FFT, PCA et ICA)

Les résultats obtenus sont nombreux. Aussi, dans un soucis de clarté, Il a été choisi de détailler dans le corps du texte les résultats obtenus pour le délaminage 35J, les résultats des autres essais étant donnés en annexe. Etant donné la nature commune de certains traitements d'images, plusieurs catégories ont été crées :

- Gradient - Estimation des coefficients du polynôme au sens des moindres carrés
- Coefficients de la transformée de Fourier - Phases de la transformée de Fourier
- Analyse en composantes principales (PCA) - Analyse en composantes indépendantes (ICA).

Les valeurs de pourcentage de différence de forme entre les essais par ultrasons C-scan et thermosoniques ont été classés en fonction de la puissance des ultrasons générés par la sonotrode et de la distance défaut / sonotrode. La moyenne et l'écart type des résultats permettent de mettre en évidence les traitements pertinents pour l'étude.

3.6.2.4) Moyenne et écart type en fonction de la puissance et de la distance

Les valeurs moyennes du pourcentage de différence sont représentées sous forme d'histogrammes rouges et les écarts types par des "barres d'erreurs" bleues. De manière générale, plus le pourcentage de différence est important, moins le traitement d'image convient à l'étude (et inversement). Toutefois, il est possible que le pourcentage soit assez important tout comme l'écart type. Dans ce cas, cela signifie qu'un (ou plusieurs) essai(s) peut être considéré.

- P = 15W et d = 8cm

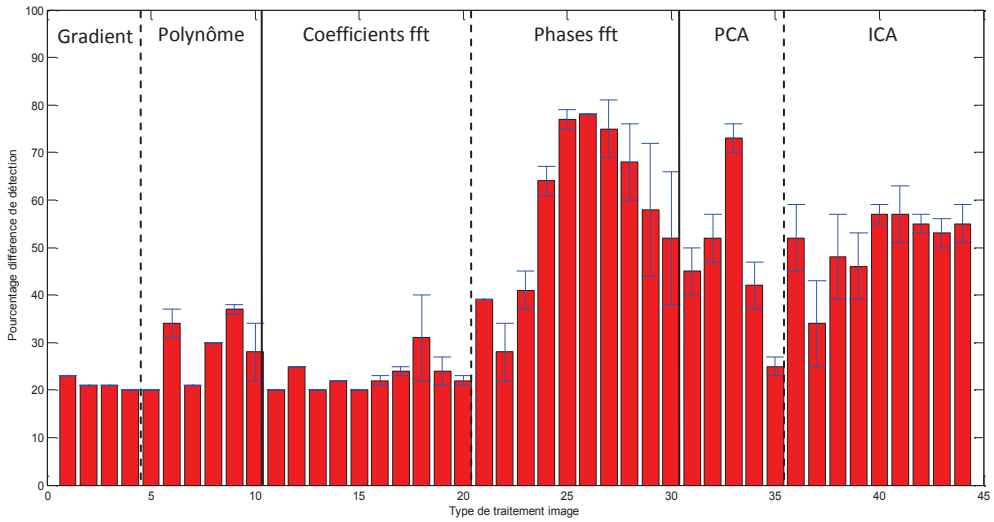


Figure 3.38 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type pour le délaminage 35J (P = 15W, d = 8cm)

Deux catégories apparaissent sur la Figure 3.38 : d'un côté le gradient, les polynômes et les coefficients de la transformée de Fourier, et de l'autre les phases de la transformée de Fourier, le PCA et l'ICA.

Dans la première catégorie, les moyennes restent tout de même convenables (plus de 20%) et l'écart type est faible. Ainsi, la variation du temps d'impulsion des ultrasons dans l'échantillon n'a pas eu d'effet sur la valeur de la moyenne du pourcentage. Le gradient minimum, maximum, la différence entre les deux ainsi que leur somme ne fluctuent pas l'une par rapport à l'autre. Le gradient de température est donc assez important. Les coefficients du polynôme montrent que les meilleurs résultats sont portés par la constante et le coefficient de second degré. Au niveau de la transformée de Fourier, l'amplitude du fondamental et des harmoniques obtenus sont suffisamment élevés pour faire la distinction entre les zones saines et les zones défectueuses. Le contour du délaminage est aussi bien déterminé que pour les traitements d'images par gradient ou polynômes. Dans cette partie, les phases ne donnent pas de résultats probants : la figure 18-a de ce chapitre montrait en

effet que les signaux provenant des zones saines ou fortement endommagées ne sont pas en avance ou en retard les uns par rapport aux autres ce qui peut expliquer ce résultat.

Dans la seconde catégorie, les valeurs sont trop élevées pour être considérées comme pertinentes pour l'étude. Toutefois, une image ressortie par le PCA obtient la même précision que les traitements de la première catégorie. Il faudra par la suite se concentrer sur cette image pour voir si celle-ci garde les mêmes propriétés de détection : le PCA pourrait être intéressant car il montre qu'il peut apporter la même qualité de détection que la première catégorie. De plus, la valeur de l'écart type reste faible, les valeurs restent pratiquement les mêmes selon le temps d'impulsion des ultrasons.

- P = 15W et d = 13cm

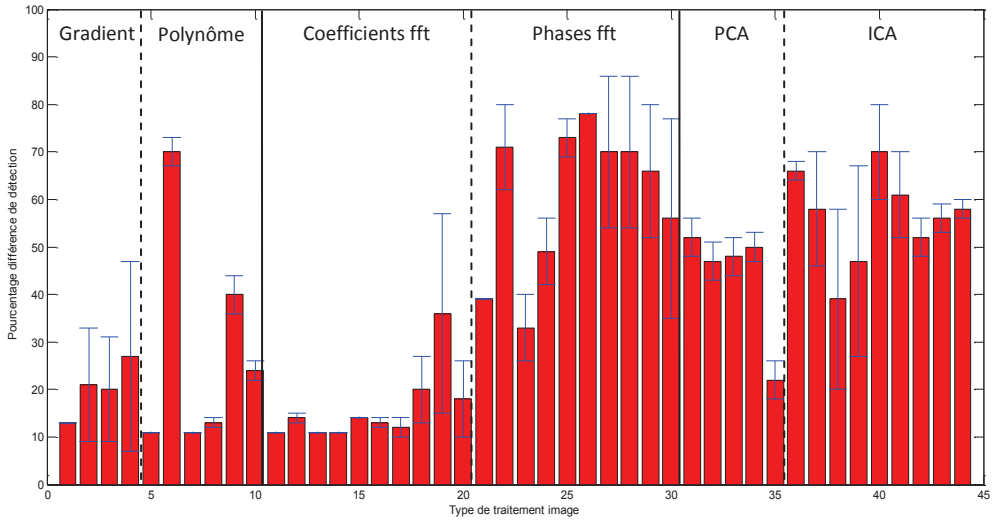


Figure 3.39 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 15W, d = 13cm)

La Figure 3.39 montre que les résultats sont sensiblement différents de l'étude précédente : la moyenne de la différence est globalement plus faible et l'écart type plus important. Ces moyennes confirment les valeurs obtenues lors de l'étude manuelle de la détection de l'aire du délaminage au paragraphe 4.3. En effet, l'écart relatif était le plus faible pour la distance 13 cm. Les hypothèses émises quant à la difficulté de maîtriser les conditions expérimentales expliqueraient cette variation entre les deux distances.

- P = 15W et d = 18cm

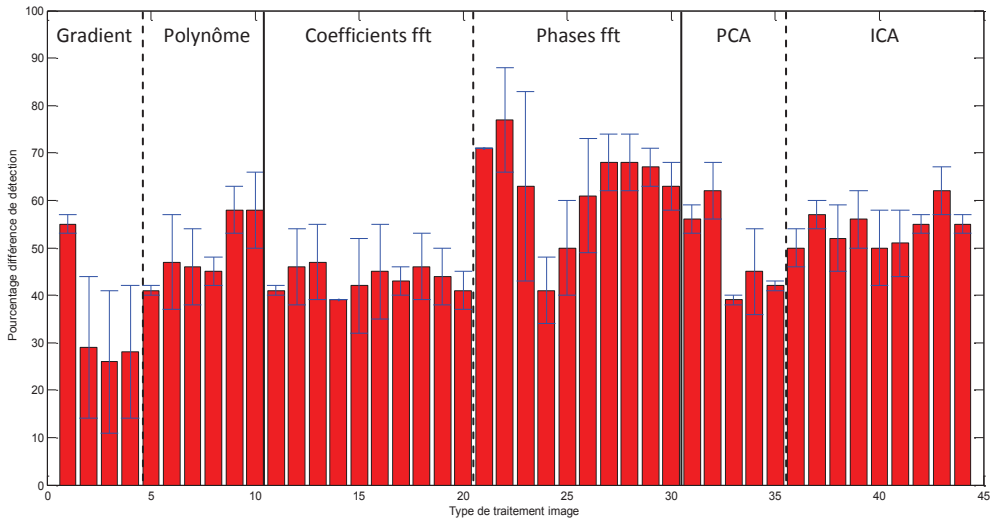


Figure 3.40 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 15W, d = 18cm)

La différence de forme entre les ultrasons C-scan et la thermosonique sont trop importants dans ce cas pour être considérés comme pertinents (Figure 3.40). En effet, la moyenne de cette différence dépasse les 25% dans tous les traitements d'images. Cependant, l'écart type montre qu'il est possible de s'approcher des 10% . Cela provient d'une condition d'expérimentation particulière : utiliser un temps d'impulsion important (5 secondes). Plus le temps d'impulsion augmente, plus l'énergie pénétrant dans la plaque est importante. Ainsi, bien que la sonotrode et le délaminage soient trop éloignés, il est possible d'obtenir une bonne détection.

- P = 30W et d = 8cm

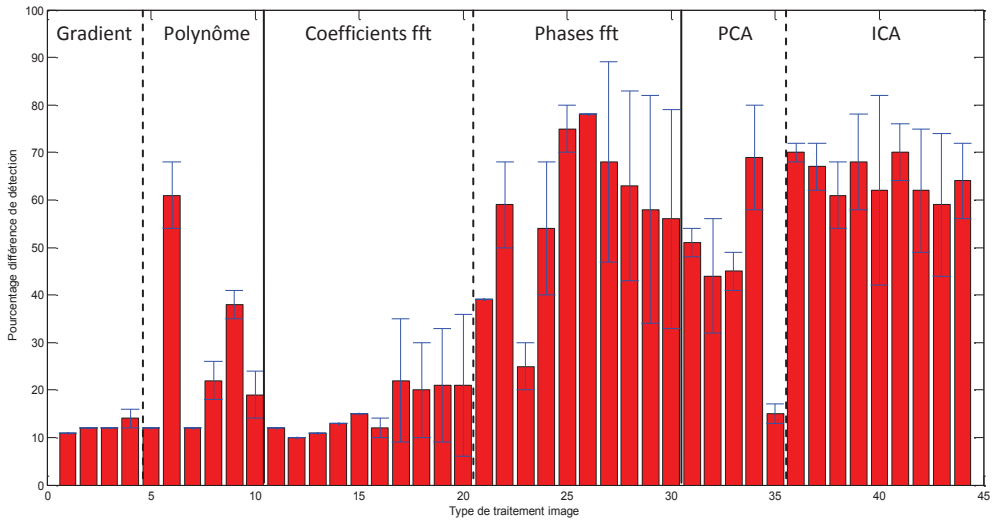


Figure 3.41 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 30W, d = 8cm)

Les résultats sont meilleurs que ceux obtenus pour les essais réalisés avec une puissance de 15W comme le montre la Figure 3.41. La moyenne de la différence est plus faible, et l'écart type est faible pour les traitements d'images intéressants. Ainsi, coupler une puissance de 30W avec une distance de 8cm permettrait de ne pas utiliser un temps d'impulsion des ultrasons trop important.

- P = 30W et d = 13cm

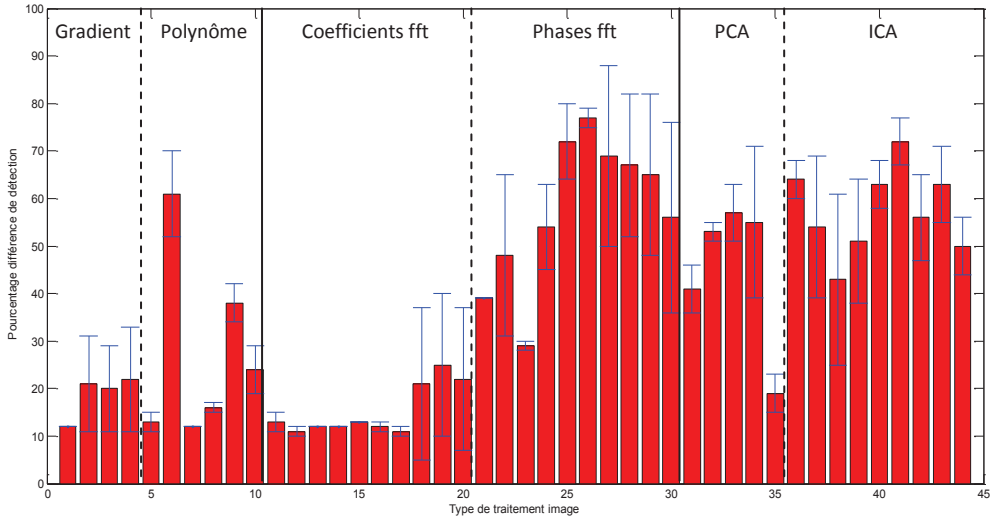


Figure 3.42 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 30W, d = 13cm)

Contrairement aux essais P = 15W et d = 13cm, la moyenne n'a pas baissé par rapport aux essais à une distance plus faible (Figure 3.42). L'écart type a augmenté, cela rejoint les conclusions faites précédemment : plus la sonotrode est éloignée du délaminage, plus il est nécessaire d'augmenter le temps d'impulsion des ultrasons dans la plaque afin d'obtenir un contour de délaminage correct.

- P = 30W et d = 18cm

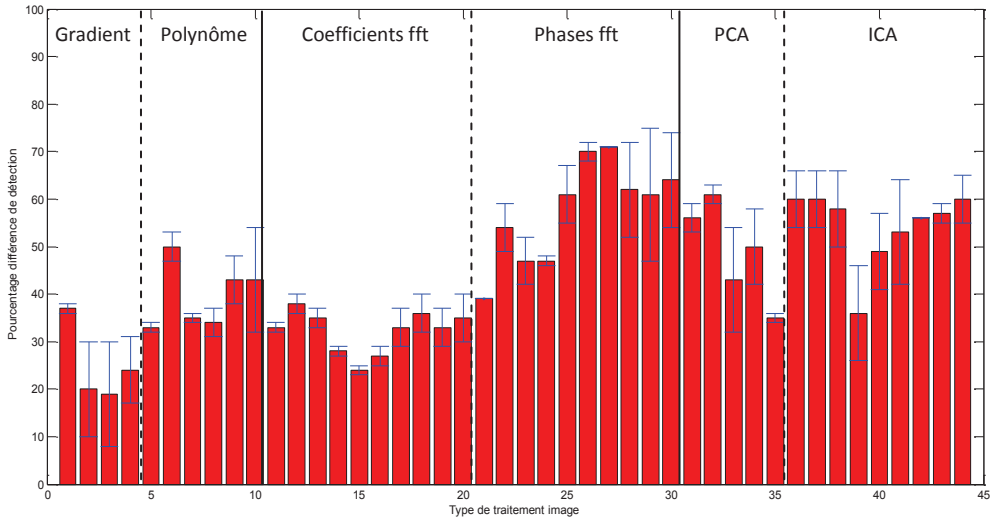


Figure 3.43 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 30W, d = 18cm)

La Figure 3.43 montre que la moyenne et l'écart type ont tous les deux augmenté. Cela confirme certaines hypothèses faites précédemment à savoir que la distance est un paramètre plus sensible que la puissance afin d'obtenir une forme de délaminage correcte.

- P = 45W et d = 8cm

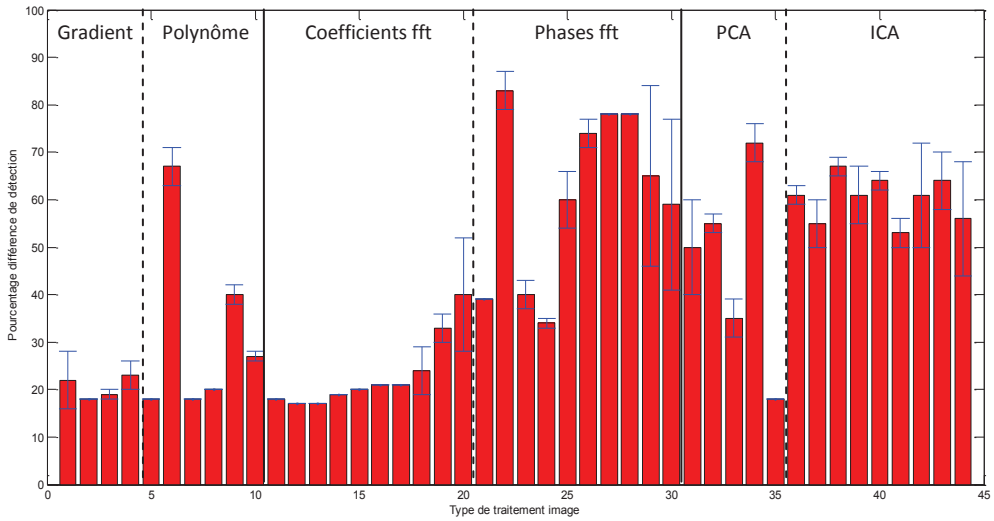


Figure 3.44 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 45W, d = 8cm)

Les constatations faites précédement sont confirmées lors de cet essai : la moyenne ne diminue pas même si la puissance des ultrasons augmente (Figure 3.44). Les autres résultats des expériences réalisées avec une puissance de 45W sont données en annexe car elles présentent la même allure que celles des essais précédents, les conclusions sont donc identiques. La propagation des ondes, et donc leur atténuation auraient une grand influence sur les résultats : la distance semble donc être le paramètre principal à prendre en considération. De plus, on peut supposer que la partie délaminée se comporterait de manière différente si l'écart entre la sonotrode et le défaut variaient. Ces hypothèses pourraient être vérifiées par une modélisation des différents essais par une modélisation par éléments finis, modélisation qui n'a pas été réalisée dans le présent travail par manque de temps.

Un bon résultat a été obtenu par certaines images de l'analyse PCA. Il s'est révélé être équivalent aux traitements d'images les plus efficaces (gradient, polynômes, amplitudes FFT) mais on s'attend à ce que ce soit l'image 1, la plus décorrélée, or il s'agit de l'image 5. Un critère n'a, par conséquent, pas pu être déterminé afin d'obtenir les images vraiment pertinentes.

Les résultats du traitement d'image de l'analyse ICA ne sont pas probants. La méthode fastICA pourrait être améliorée dans le cas de la thermosonique : la méthode se base sur la séparation de signaux. Mais il faut autant de récepteurs que d'émetteurs. Ici, les signaux semblent trop équivalents les uns aux autres pour les séparer.

3.7) Conclusion

La thermosonique a montré son efficacité notamment en terme de rapidité dans la détection de délaminages dans des plaques stratifiées. Il s'agit aussi d'une méthode facile à mettre en œuvre dont la précision du résultat pourrait concurrencer les méthodes traditionnelles comme les ultrasons.

Lors de l'étude de la différence de forme entre les ultrasons C-scan et la thermosonique, il est apparu que certains traitements d'images convenaient mieux que d'autres. Ceci est dû à l'allure des courbes de température. Le pourcentage de différence entre les deux méthodes serait dû à la propagation de chaleur dans le matériau lors de l'excitation mécanique.

3.8) Perspectives

Dans le domaine du CND, les expérimentateurs sont confrontés à des difficultés lorsqu'il s'agit de pièces à géométrie non plane, et en particulier présentant de faibles rayons de courbure (Figure 3.45).



Figure 3.45 : raidisseur en carbone/époxyde

La Figure 3.46 est une proposition de mise en place d'essais thermosoniques dans le cas de pièces à géométrie non plane. En connaissant la géométrie de la pièce, en positionnant correctement la caméra IR et en utilisant un logiciel de traitement de l'information, il sera possible de localiser le défaut (Figure).

Sinon, la stéréo corrélation est envisageable en utilisant :

- deux caméras IR.

- une caméra IR et un système de miroir.

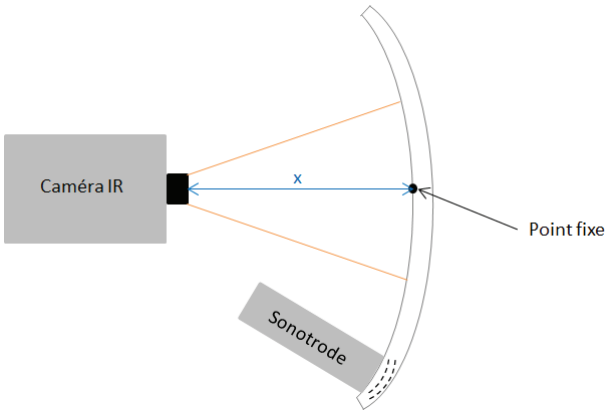


Figure 3.46 : Mise en place de la thermosonique pour des pièces à géométrie non plane

De plus, la thermosonique est une méthode avec contact, ce qui peut poser problème dans certains cas. Avec le même protocole de détection (caméra IR) mais en utilisant une excitation sans contact via un laser, est-il possible d'obtenir une précision de détection du défaut équivalente voire meilleure ? Cette thématique est traitée au chapitre suivant.

Chapitre 4

Excitation d'un délaminage dans un composite par une onde thermique observé par thermographie

Le principe de la thermographie IR, ainsi que ses avantages et ses inconvénients ont été présentés dans le chapitre 1. Cette méthode a été utilisée pour la première fois en 1968 par la compagnie suédoise AGA/Bofors afin de détecter des défauts dans les lignes électriques. Les méthodes de contrôle dans ce domaine ont cependant beaucoup évolué depuis.

Alors que resterait-il à apporter à cette méthode simple dont la plus grande avancée est l'évolution des caméras IR, la diminution du temps des calculs informatiques et l'utilisation des traitements d'images en perpétuelle évolution ?

D'un point de vue purement industriel, l'objectif principal est surtout de réussir à réaliser des essais sur tous types de pièces, rapides, précis et reproductibles. Il faut donc se demander sur quelle partie de la méthode se pencher : soit la détection, soit l'excitation, soit le protocole expérimental. Les trois facteurs ne sont pas forcément indépendants. La première, la détection ne fait appel qu'aux évolutions technologiques des caméras infrarouges qui ne sont pas le sujet de notre étude.

En revanche, il paraît intéressant de changer le type d'excitation et le protocole expérimental habituel. De manière générale, une lampe halogène est utilisée pour introduire un gradient thermique dans la pièce à tester. La gamme spectrale (ou une partie) de la source d'illumination peut cependant être confondue avec celle de la caméra IR.

A titre d'exemple, la caméra IR utilisée ici possède une gamme spectrale allant de 1 µm à 5,5 µm (comme le montre la réponse des détecteurs InSb à la figure 5 du chapitre 2) et une lampe halogène possède une large gamme spectrale couvrant tout l'IR proche et par conséquent cette bande spectrale. Lors d'un essai en réflexion, la caméra est alors éblouie et ne peut suivre l'évolution de la température de la pièce pendant qu'elle est chauffée. Traditionnellement, pour éviter ce phénomène, les expérimentateurs travaillent en transmission, c'est-à-dire que la source d'excitation et la détection sont situées de part et d'autre de la pièce à tester. Travailler en réflexion permet d'inspecter des volumes fermés tels que des containers.

L'objectif de cette étude est donc de trouver une source d'excitation n'émettant pas dans les longueurs d'ondes captées par la caméra IR afin de pouvoir réaliser des essais en réflexion, puis de l'adapter à notre protocole expérimental. Un chauffage plus localisé que les lampes halogènes permettrait d'augmenter si possible la précision de la détection.

4.1) Description et mise en place des essais thermographiques

4.1.1) Principe

Le principe général de la thermographie IR est expliqué dans le chapitre 1 (Figure 1.18).

Il existe plusieurs sources d'excitation n'émettant pas dans la gamme spectrale de la caméra IR. Le choix s'est finalement porté sur une excitation laser CO_2, source pratique pour éclairer une zone bien définie. Le laser CO_2 possède en effet une longueur d'onde de 10,6 µm (rigoureusement comprise entre 10,57µm et 10,63µm), alors que la caméra IR détecte les longueurs d'ondes comprises entre 1,5 et 5 µm. La bibliographie a montré que ce laser est actuellement utilisé pour réaliser des tests par ultrasons laser (la méthode est expliquée chapitre 1). Le diamètre d'un faisceau laser standard est de l'ordre du millimètre. Eclairer une pièce avec une zone aussi petite est contraignant car le temps d'inspection de l'intégrité de l'objet est alors long. Or, un des objectifs de l'étude est de limiter le temps de contrôle. De plus, le faisceau laser illumine l'objet avec une grande intensité, ce qui pourrait endommager la résine époxyde. Ainsi, augmenter le diamètre du faisceau laser grâce à une lentille permet de contourner ces deux difficultés.

4.1.2) Choix du matériel

La lentille choisie est une lentille ZnSe traitée : dans la littérature, elle est principalement utilisée pour des optiques en transmission. Cet élément en séléniure de zinc possède une transmission supérieure à 99,5% pour une longueur d'onde de 10,6µm. Il n'y a par conséquent pratiquement pas d'absorption du faisceau laser.

En faisant diverger le faisceau, la puissance de rayonnement fournie à la plaque par l'impact laser dépend de la distance entre la lentille et la pièce (Figure 4.1).

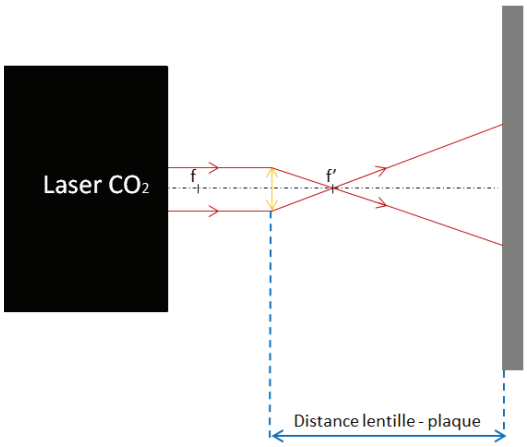


Figure 4.1 : Réalisation du faisceau divergent avec une lentille ZnSe

La zone ainsi éclairée reste tout de même trop petite pour permettre d'analyser la pièce dans sa totalité.

Le laser est modulé électriquement et la puissance est variable en élargissant plus ou moins les créneau de commande. Le rendement de ce type de laser est comprise entre $\eta = 10\%$ et $\eta = 20\%$ [78]. La puissance du laser utilisé est de 25W.

De plus, l'énergie radiative impactant l'échantillon doit être contrôlée à partir de la fréquence d'excitation et du temps pendant lequel le laser fonctionne de manière continue.

Enfin, un autre objectif de cette étude est de réussir à inspecter n'importe quelle taille de pièce et de manière automatique et reproductible. L'idée est donc ici de réaliser un quadrillage complet de la pièce à inspecter par balayage laser. Ce balayage peut être obtenu grâce à un système de deux miroirs orientés. Pour avoir la meilleure réflectivité possible dans l'IR, il faut prendre des miroirs en or : à 10,6 µm, la réflectivité est alors de l'ordre de 98% (Figure 4.2).

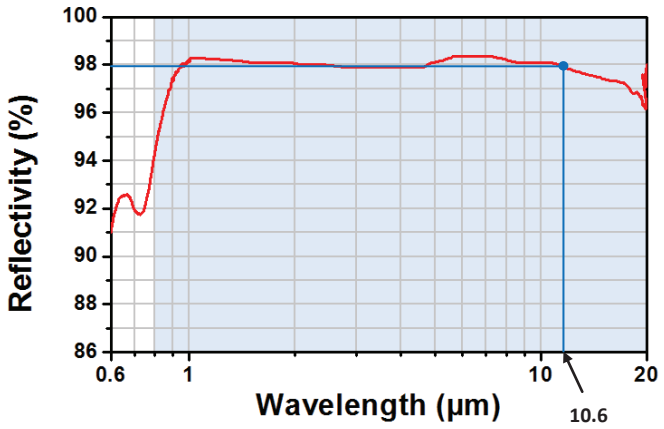


Figure 4.2 : Réflectivité d'un miroir en or [79]

Les moteurs pas à pas ont été choisis car programmables. La précision de rotation de l'arbre est de $\pm 0{,}05°$ et l'angle minimum de rotation est de 0,9°. Cette valeur de rotation est-elle compatible avec notre matériel d'essai ?

En effet, si l'angle est trop important, un espace « vide » (Figure 4.3) apparaît entre les taches laser successives, empêchant ainsi l'inspection complète de la pièce (certaines zones ne pouvant alors pas être illuminées durant le processus de balayage).

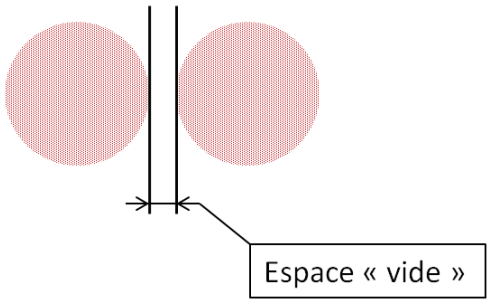


Figure 4.3 : Espace vide entre deux taches laser

Si à l'inverse l'angle est trop faible, les taches laser se superposent, entrainant donc une augmentation locale non souhaitée de l'énergie de rayonnement envoyée à la pièce (Figure 4.4).

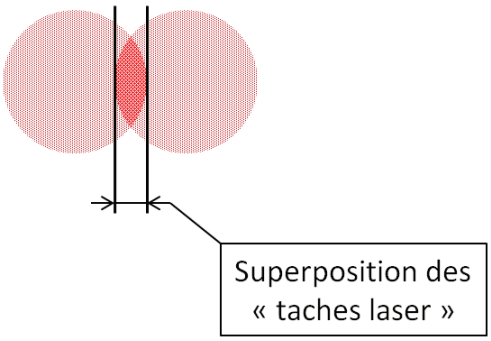


Figure 4.4 : Superposition de deux taches laser

La taille de la tache laser dépend de la distance lentille ZnSe / échantillon. Le banc expérimental (Figure 4.5) a donc été conçu de telle sorte que cette distance ait été optimisée afin qu'il n'y ait pas d'interstices ou de superposition des taches laser.

4.1.3) Trajet du faisceau laser et propriétés d'utilisation du faisceau

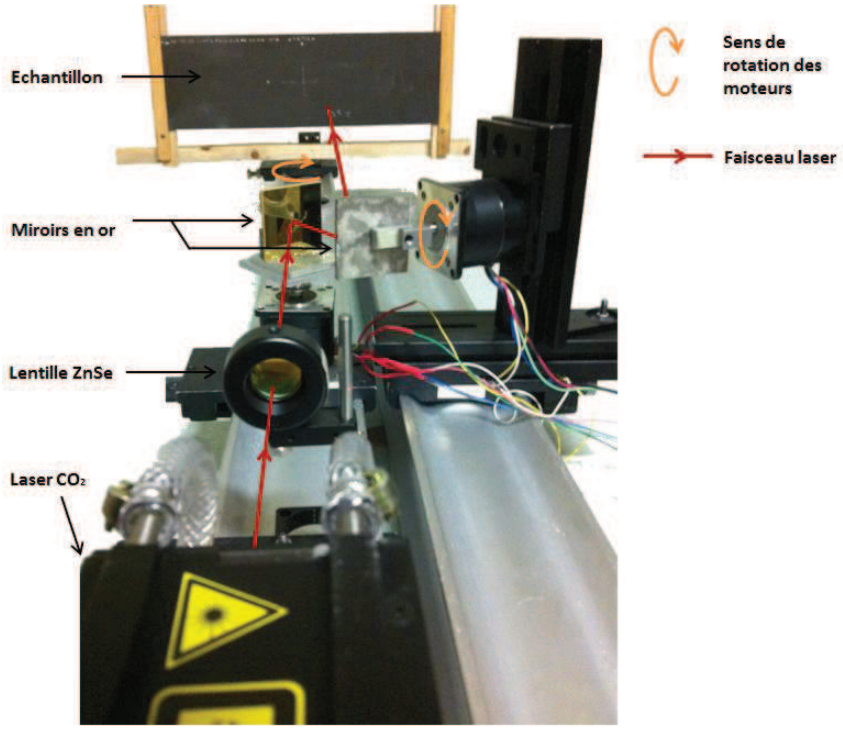


Figure 4.5 : Banc optique conçu pour les essais thermographiques

Afin de réaliser des expériences reproductibles et automatisées, le positionnement des axes des moteurs doit être parfaitement maîtrisé pour réaliser un quadrillage complet et de qualité de l'échantillon. La Figure 4.6 explicite le trajet suivi par le faisceau du laser CO_2. La première zone éclairée par le laser est située en bas à droite (ce choix étant purement arbitraire). Passé un temps d'attente (permettant de chauffer cette zone), le miroir tourne d'un angle permettant d'éclairer la zone contigüe par rapport à l'axe des *x*. L'action est répétée jusqu'à ce que le faisceau laser parvienne à l'autre extrémité de la plaque. Pendant toute cette phase, le second miroir reste immobile. Ensuite, celui-ci pivote pendant que l'autre reste en attente de manière à amener le faisceau laser sur la ligne supérieure. Le premier miroir réalise ensuite le trajet dans le sens inverse. Cette opération est répétée jusqu'à ce que l'inspection de toute la plaque soit terminée.

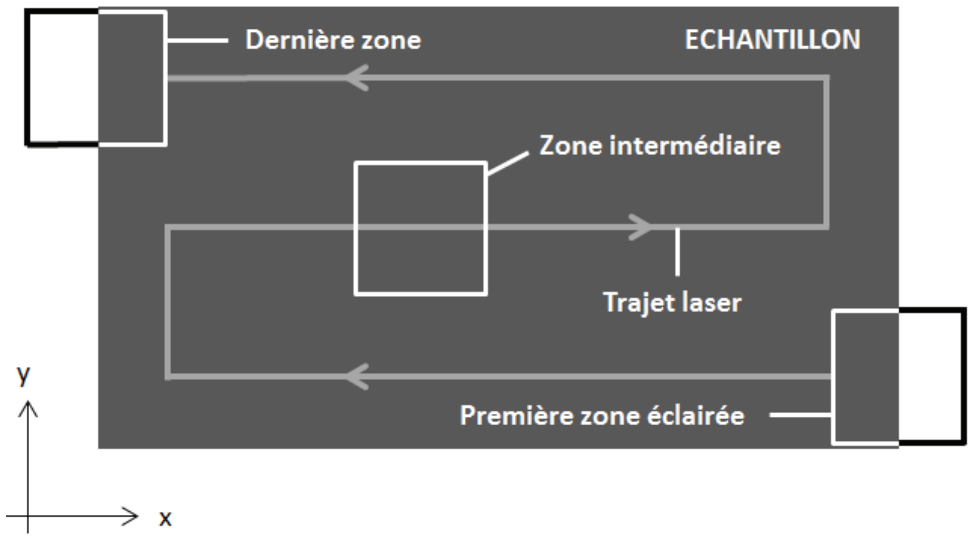


Figure 4.6 : Trajet du faisceau laser CO_2

L'idée générale est de créer une interface permettant d'automatiser le quadrillage. Lorsque les positions initiales sont fixées (la position des miroirs et donc de la tâche laser sur la plaque), il reste à déterminer le choix de l'angle de rotation, le temps d'attente, le nombre de pas suivant l'axe des *x* et le nombre de pas suivant l'axe des *y*.

Pour cela, trois cartes électroniques ont été entièrement conçues et réalisées (Figure 4.7), tout comme le code informatique contenant les commandes à envoyer aux moteurs et l'interface informatique. La première connexion USB/RS232 avec la carte programmable permet de charger ce code et de garder en mémoire le programme. Puis grâce à la seconde connexion USB/RS232, les commandes, entrées par l'intermédiaire de l'interface, y sont injectées. Les deux autres cartes servent de relai de commande et d'alimentation aux moteurs. Le pilotage des moteurs pas à pas est réalisé par l'intermédiaire du microprocesseur intégré (composant A 3979 SLP).

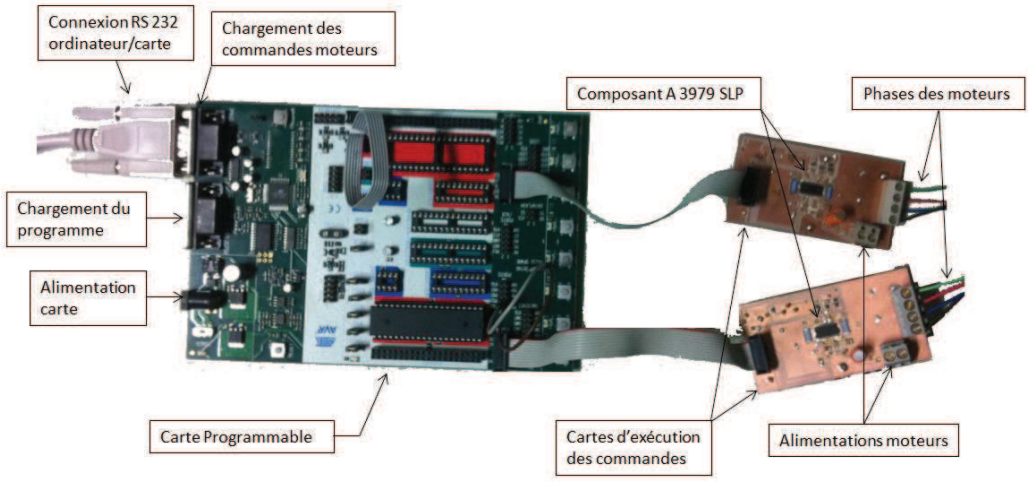


Figure 4.7 : Cartes des commandes des moteurs pas à pas

Il a aussi été envisagé de synchroniser le démarrage des moteurs pas à pas à la commande des impulsions laser. Mais lorsqu'un front montant est envoyé à la commande du laser, le matériel actuel ne permet pas de maîtriser le temps entre l'envoi du signal et la réalisation de la commande. Par conséquent, cette synchronisation n'a pas pu être réalisée.

Enfin, l'énergie impactant l'échantillon dépend de la taille de la tache laser. Celle-ci est conditionnée par le pas de l'angle de rotation des moteurs pas à pas. Le diamètre du faisceau a été déterminé expérimentalement et est de 37mm soit une surface d'impact de 1075,2 mm². La puissance surfacique de l'éclairage est donc de 23250 W/m².

Afin de déterminer les propriétés de l'excitation, une simulation simple sous COMSOL a été réalisée. Une des conditions est de limiter au maximum le temps de quadrillage de la plaque tout en ayant une différence de température entre une zone saine et une zone délaminée détectable par la caméra IR.

Un modèle à deux dimensions a été considéré : la plaque modélisée possède les mêmes caractéristiques physiques homogénéisées qu'un échantillon en carbone/époxyde.

La variation de la température obtenue ne sera donc pas vraiment représentative mais permettra de déterminer si l'écart de température est suffisamment important pour être observable par la caméra IR. Elle validera les conditions d'excitation : la position en profondeur du délaminage n'étant pas connue, le but de l'étude n'est pas de chercher à comparer une simulation avec l'expérimentation.

L'équation à 2 dimensions de la conduction de la chaleur est :

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \dot{q} \qquad (4.1)$$

où T est la température, ρ la densité, C_p la capacité calorifique, k la conductivité thermique et $\dot{q}$ la source de chaleur interne. La conductivité se décompose en deux variables différentes l'une par rapport à l'autre : k_x et k_y. Dans le cas de cette étude, il a été décidé de ne pas en tenir compte.

Les degrés de libertés sont au nombre de deux : T_x et T_y.

Ce dernier terme n'est pas à confondre avec la source excitatrice extérieure q_0. Durant l'expérience thermographique, il n'y a pas de chaleur interne à l'intérieur de la plaque, ainsi $\dot{q} = 0$.

La détermination des conditions initiales vient des conditions expérimentales. Dans le cas de l'étude, un flux thermique est imposé à une des surfaces de la plaque. Ainsi, les équations aux limites sont :

- Pour la surface éclairée :

$$t \in [0, t_{laser}],\ k\left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}\right).(n_1, n_2) = -q_0 + h_{conv}(T - T_{amb}) + \sigma\varepsilon(T^4 - T_{amb}^4) \qquad (4.2)$$

$$t \in [t_{laser}, T], k\left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}\right).(n_1, n_2) = h_{conv}(T - T_{amb}) + \sigma\varepsilon(T^4 - T_{amb}^4) \quad (4.3)$$

avec t_{laser} le temps pendant lequel le laser illumine l'échantillon et *T* la période.

- Pour les autres surfaces :

$$t \in [0, T], k\left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}\right).(n_1, n_2) = h_{conv}(T - T_{amb}) + \sigma\varepsilon(T^4 - T_{amb}^4) \quad (4.4)$$

où (n_1, n_2) représente le vecteur normal à la surface de la plaque.

A t = 0, la température est la même dans toute la plaque : $T(x, y, t = 0) = T_{amb} = 293{,}15\ K$

L'exemple pris ici est un rectangle de 15 cm de longueur et de 5 mm de largeur où un espace "vide", représentant le défaut a été inséré. Celui-ci a pour dimensions 1 cm de longueur, 2 mm de hauteur et positionné au centre de l'échantillon.

Les propriétés physiques de l'échantillon ont été répertoriées dans divers articles. Le Tableau 4.1 résume les valeurs utilisées :

Conductivité thermique $(W * m^{-1} * K^{-1})$	Masse volumique $(kg * m^{-3})$	Capacité thermique massique $(J * kg^{-1} * K^{-1})$
2,2	1550	800

Tableau 4.1 : Propriétés physiques de la plaque en carbone/époxyde

ε, l'émissivité des surfaces et h_{conv}, le coefficient de convection thermique sont issus des tables et répertoriées dans le Tableau 4.2 :

Emissivité des surfaces (sans dimension)	Coefficient de convection thermique $(W * m^{-2} * K^{-1})$
0,95	5

Tableau 4.2 : Conditions aux limites du modèle

Il faut ensuite adapter ce modèle aux conditions d'expérimentation.

Le temps d'exposition est le temps pendant lequel les miroirs en or restent immobiles et donc le temps d'illumination d'une zone par le laser. L'élévation de température est liée à ce facteur, tout comme la différence de température entre une zone saine et une zone délaminée.

Un autre facteur à prendre en compte est le temps de l'étude : il ne faut pas que le temps d'exposition soit trop long afin d'optimiser une analyse rapide de l'intégrité du matériau.

De plus, éclairer la plaque trop longtemps génère un surplus d'énergie radiative impactant l'échantillon. Ceci risque d'endommager la surface du matériau, mais aussi de perturber l'évolution de la température de la zone contigüe.

Les conditions des essais sont :

- Le temps d'arrêt des miroirs est de 2 ou de 3 secondes.

- La fréquence d'excitation est de 1Hz ou 5Hz.

- Le temps où le laser fonctionnerait sur une période *T* est de $t_{laser} = 0{,}5T$ ou $t_{laser} = 0{,}75T$.

Deux points ont été placés sur la surface de la plaque : l'un au-dessus d'une zone saine (pt1), l'autre au droit de la zone défectueuse (pt2) (considérée ici comme étant un vide) comme le montre la Figure 4.8-a.

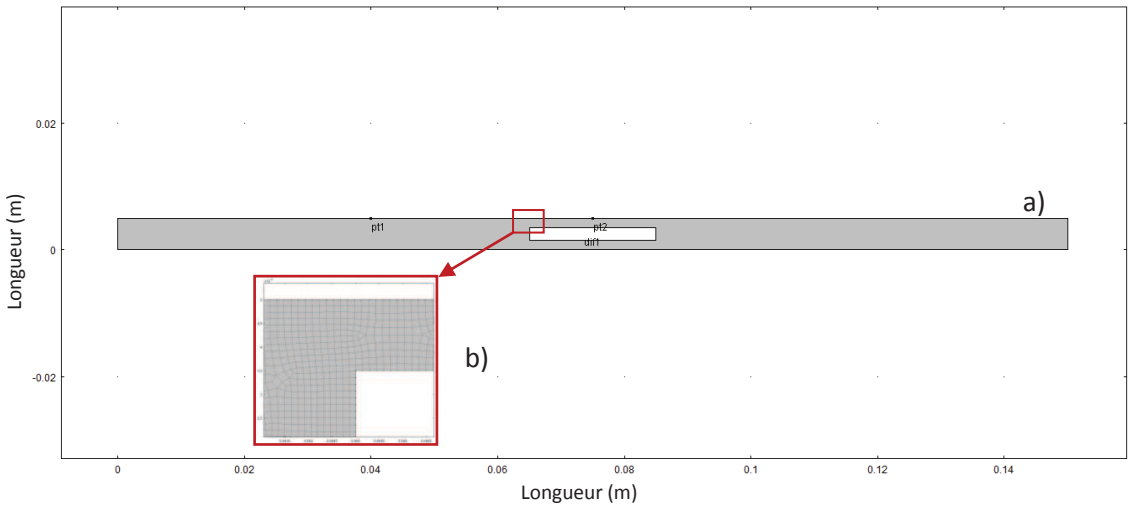


Figure 4.8 : Modèle utilisé pour la simulation sous COMSOL
a)Plaque homogène avec défaut
b) Zoom d'une partie de plaque pour la mise en valeur du maillage

Le maillage utilisé est de type quadrangulaire à quatre nœuds comme le montre la Figure 4.8-b.

La Figure 4.9 est obtenue pour un temps d'arrêt des miroirs de 2 s, une fréquence d'excitation de 1 Hz et un t_{laser} de 0,5T. La différence de température entre les deux points est visible : à la fin de l'excitation laser, elle est de l'ordre de 2 K. A la fin de l'expérience, elle avoisine les 6 K.

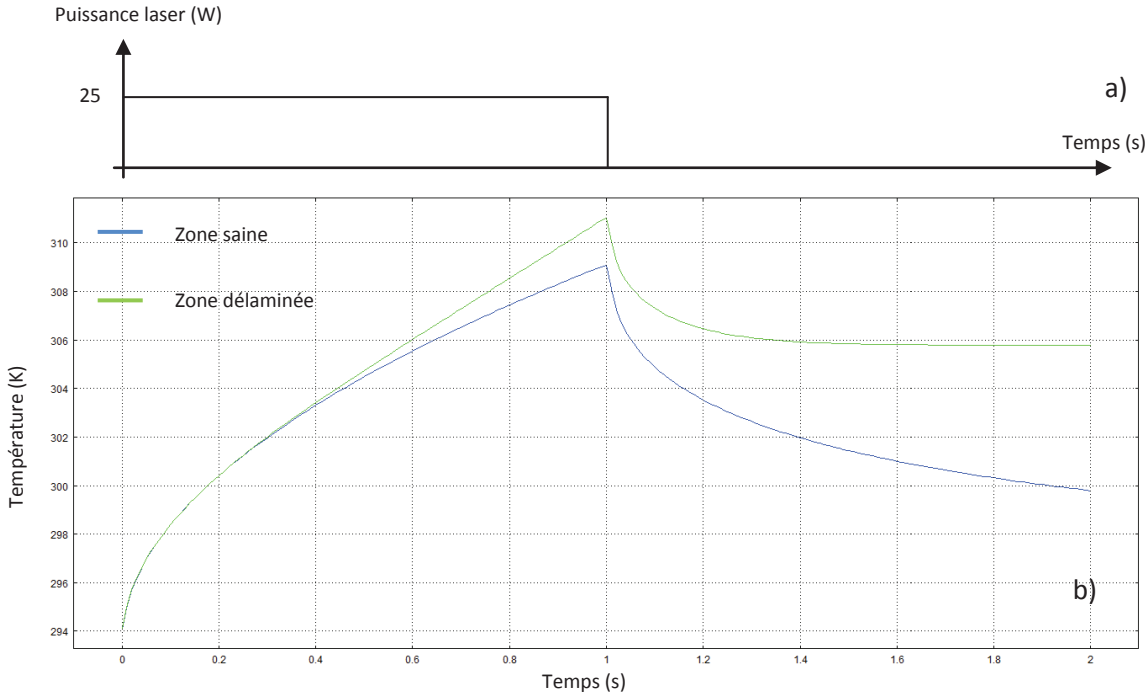


Figure 4.9 : Courbes de température entre une zone saine et une zone défectueuse (temps d'arrêt des miroirs = 2 s, fréquence d'excitation = 1Hz et t_{laser} = 0.5T)
a) Commande de l'excitation laser, b) Courbes de température

La Figure 4.10 est la simulation pour un temps d'arrêt des miroirs de 3 s, une fréquence d'excitation de 5Hz et un t_{laser} de 0,75T. La différence de température augmente à chaque pulse laser et à la fin de l'expérience, elle est de l'ordre de 11 K.

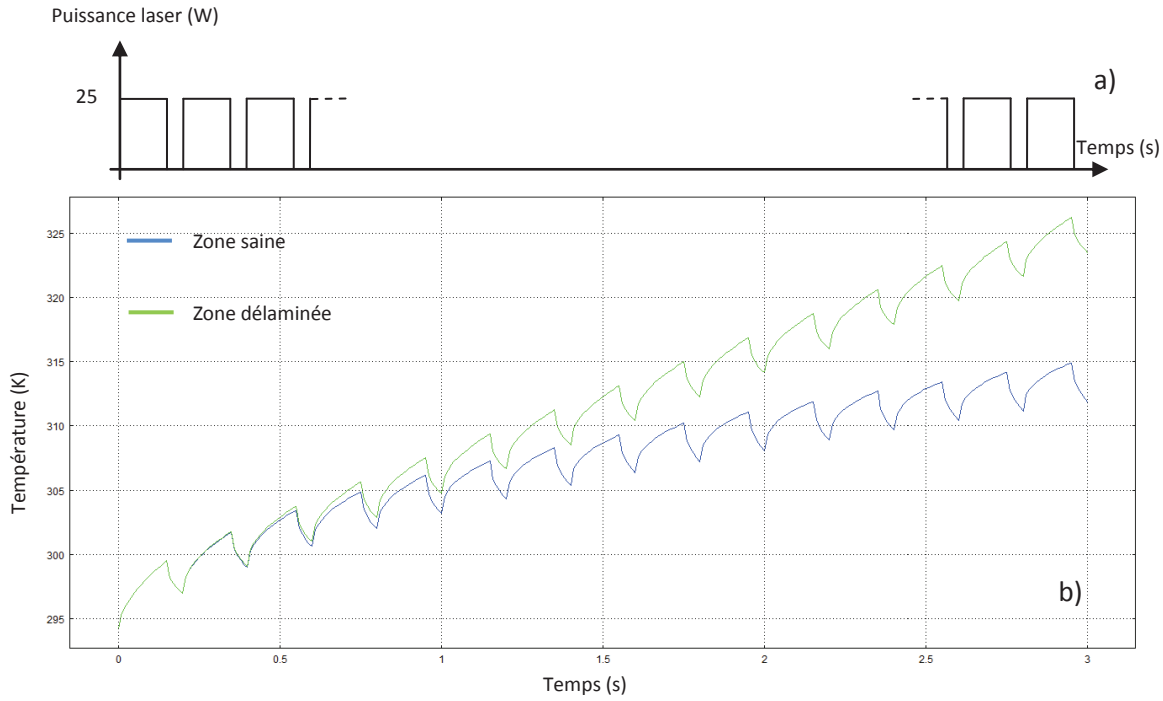


Figure 4.10 : Courbes de température entre une zone saine et une zone défectueuse (temps d'arrêt des miroirs = 3 s, fréquence d'excitation = 5Hz et t_{laser} = 0.75T)
a) Commande de l'excitation laser, b) Courbes de température

Dans ces deux simulations, la différence de température est suffisamment importante pour que la caméra IR puisse la détecter sans problème. Les simulations avec les autres valeurs des paramètres (résultats non présentés dans ce document) ayant conduit aux mêmes conclusions, ces conditions d'essai seront donc utilisées par la suite des expérimentations.

4.1.4) Propriétés de l'enregistrement

La durée de l'enregistrement vidéo est liée au temps d'exposition de chaque zone ainsi qu'à la taille de la zone totale à inspecter. Le paragraphe précédent a montré qu'un temps d'éclairage compris entre 2 et 3 secondes permet d'obtenir une élévation de température suffisante pour être détectée sans problème par la caméra IR, mais pas assez importante non plus pour endommager la résine époxyde.

Comme décrit dans le chapitre 3, la position de la caméra influe sur la taille des pixels des images enregistrées. Du fait de l'angle θ formé entre la caméra et le laser, la distance entre l'échantillon et la caméra ne doit pas être trop courte : le faisceau laser pourrait impacter la caméra IR et donc n'illuminera plus l'échantillon.

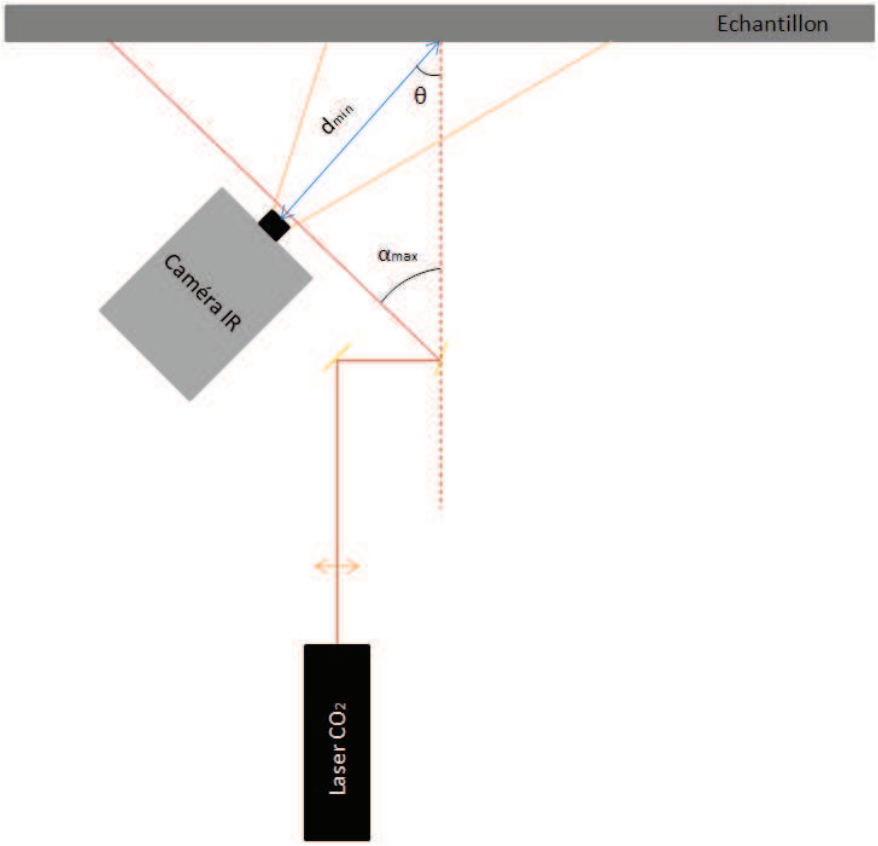


Figure 4.11 : Distance minimale de la caméra IR à l'échantillon

Dans la configuration présentée en Figure 4.11, la position de la caméra, l'angle entre la perpendiculaire à l'échantillon et le faisceau laser dévié α_{max} et l'angle θ entre cette même perpendiculaire et l'axe de la caméra IR ont été intentionnellement exagérés. En effet, avec un angle θ aussi important, la mise au point de l'image ne serait pas acceptable. En pratique la distance de la caméra à l'échantillon a donc été augmentée afin de minimiser θ. Afin d'assurer l'intégrité de la caméra et une bonne précision de la détection, la configuration expérimentale retenue imposait 1200 mm entre l'échantillon et la caméra IR et $\theta \simeq 20°$.

La taille de la zone à analyser a pour longueur 235 mm et pour largeur 150 mm.

Sachant que le diamètre de la zone éclairée est de 37 mm, il y aura donc sept positions de miroirs suivant l'axe des *x* et quatre suivant l'axe des *y*. Lors des essais, il s'est avéré que selon l'axe des *x* , le nombre de rotations du moteur est bon mais pas suivant l'axe des *y*. Ce problème est expliqué au paragraphe 4.2.2.

La durée d'un enregistrement est par conséquent :

$$t = temps\ d'exposition * nombre\ de\ pas\ moteur\ \vec{x} * nombre\ de\ pas\ moteur\ \vec{y} + t_{initial} + t_{final} \quad (4.5)$$

Le temps maximal d'exposition utilisé est de 3 secondes. Ainsi le temps maximal d'un essai est de 84 secondes. Sachant que l'enregistrement doit commencer avant que l'excitation ne débute (en prenant 5 secondes par exemple ($t_{initial}$)) et terminer après que celle-ci soit achevée (en prenant aussi 5 secondes par exemple (t_{final})), le temps maximal d'une expérience par excitation thermique est de 104 secondes soit environ 2 minutes si l'on ajoute le temps initial et le temps final.

Ensuite, l'analyse de ce quadrillage permet de déterminer la position du défaut dans la plaque.

Lorsque le défaut a été localisé, les miroirs sont repositionnés afin d'éclairer au mieux la zone défectueuse. La distance lentille / échantillon est alors augmentée afin d'irradier une aire plus importante. L'objectif est ici d'illuminer l'ensemble du défaut en un seul essai. Ce changement de distance permet aussi d'allonger le temps pendant lequel le laser fonctionne sans abîmer la surface du matériau.

4.2) Repérage de la position du délaminage

4.2.1) Protocole expérimental

Le banc optique a été présenté à la figure 5. Du fait de l'aspect directionnel de ce banc (le laser, la lentille, le système moteurs/miroir et la plaque sont positionnés sur le même axe optique), la caméra IR est décalée d'un angle solide θ. Connaître cet angle est fondamental : il faut rajouter ce paramètre en plus de la distance caméra/plaque (cf chapitre 3) afin de déterminer la taille de l'image enregistrée et donc la position du délaminage.

Les différents types d'essais qui ont été réalisés sont résumés dans le Tableau 4.3.

	Délaminage 35J - 40J - 50J - 60J
Fréquence (Hz)	1 – 5
Période de lasage (s)	0,5T – 0,75T
Temps d'exposition (s)	2 – 3

Tableau 4.3 : Conditions expérimentales pour tous les essais

Tout comme pour les essais thermosoniques, l'influence de la température initiale est éliminée en soustrayant la première image aux autres images du film thermographique. La Figure 4.12 met bien en évidence que la première zone éclairée apparaît en bas à droite de l'échantillon.

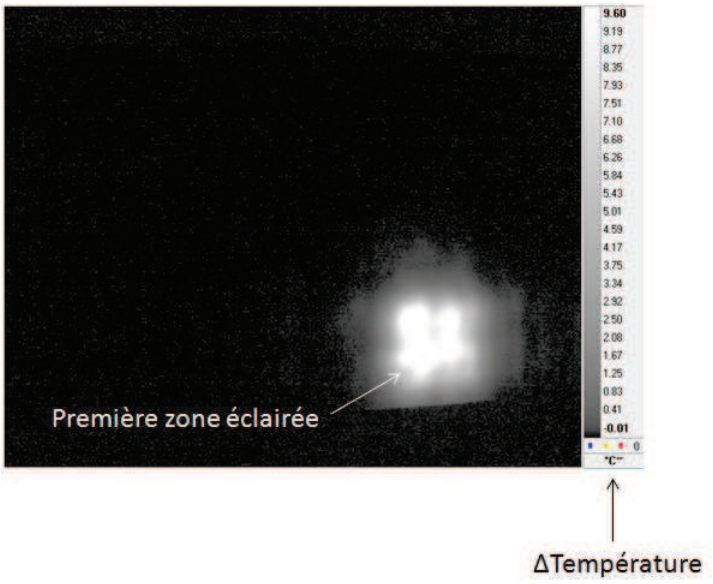


Figure 4.12 : Premières images thermographiques

4.2.2) Problème de décalage selon l'axe des *y*

Comme le montre la Figure 4.13 et contrairement à ce qui avait été conçu, un décalage sur l' axe des *y* apparaît. L'axe des *x* n'est en revanche pas affecté par ce problème. Dans le paragraphe 4.1.2, le choix du type de moteurs a été justifié, et ce décalage n'est par conséquent pas propre à la nature du moteur : il s'agit donc d'un dysfonctionnement de ce dernier, les consignes de rotations étant numériques et non analogiques. L'inspection complète de l'échantillon n'a par conséquent pas pu être réalisée en une seule fois. Il a fallu réaliser un second passage en modifiant la position initiale de l'échantillon.

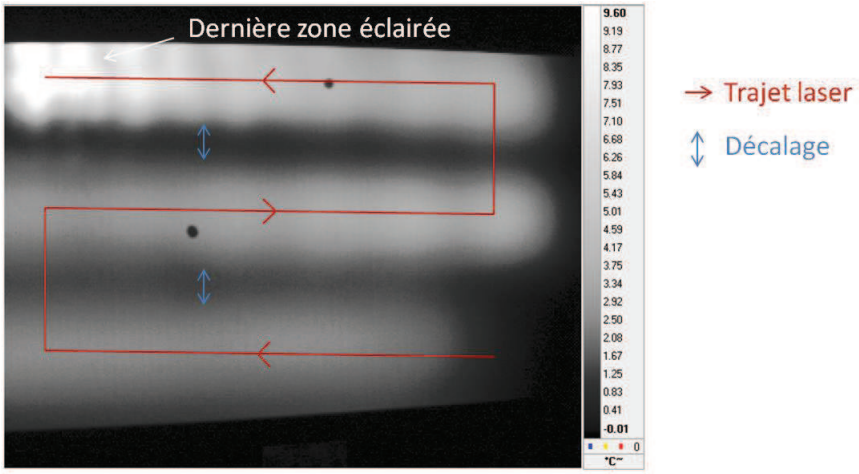


Figure 4.13 : Mise en évidence du décalage suivant l'axe des *y* et de la dernière zone éclairée

4.2.3) Problème de déformation de la cavité du laser CO_2

La cavité laser est constituée de deux miroirs réfléchissants plans ou sphériques, qui sont placés en regard sur l'axe optique de la cavité [80]. Pour déterminer les configurations du champ électromagnétique qui peuvent s'établir en régime permanent dans la cavité, une solution des équations de Maxwell est déterminée en prenant en compte les conditions aux limites imposées par des miroirs. Les champs électriques $\vec{E}$et $\vec{B}$étant tous deux perpendiculaires à l'axe optique, les modes de résonance ainsi obtenus sont appelés "transverses électromagnétiques" et sont désignés par l'acronyme de "modes TEM". Après une durée d'utilisation conséquente, la position de ces miroirs peut très légèrement se modifier. Ceci affecte alors la forme du faisceau laser et la gaussienne d'origine se déforme en quatre gaussiennes de moindre amplitude (Mode TEM_{11}) . Le laser CO_2 utilisé pour ces tests présentait ce défaut (Figure 4.14), ce qui n'a pas permis d'illuminer chaque zone inspectée de manière parfaitement homogène.

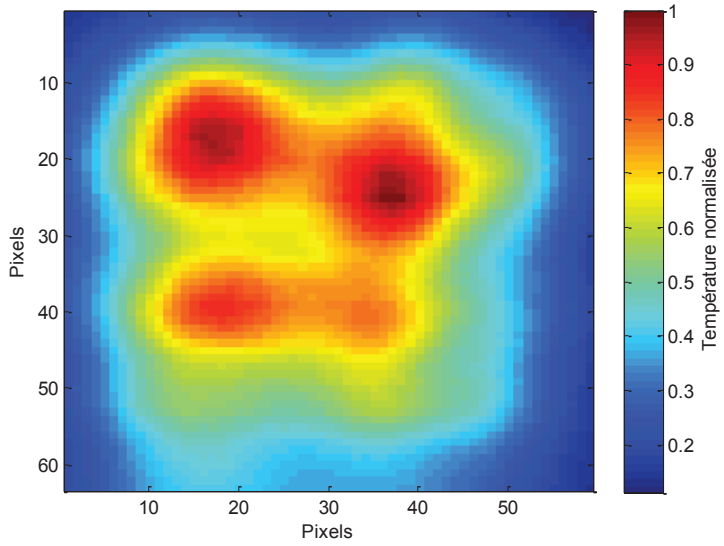


Figure 4.14 : Conséquence de la déformation de la cavité du laser CO_2

4.2.4) Etude de l'évolution de la température

4.2.4.1) Prise en compte de la déformation de la cavité laser

Les problèmes de déformation de la cavité du laser CO_2 ont orienté le post-traitement des enregistrements. La puissance d'impact n'est pas la même selon la zone chauffée: les quatre gaussiennes n'ont en effet pas la même amplitude. En considérant la fin de l'illumination d'une zone, la température maximale de chaque pixel est comparée à celle du même pixel situé à la même position sur la zone éclairée précédemment.

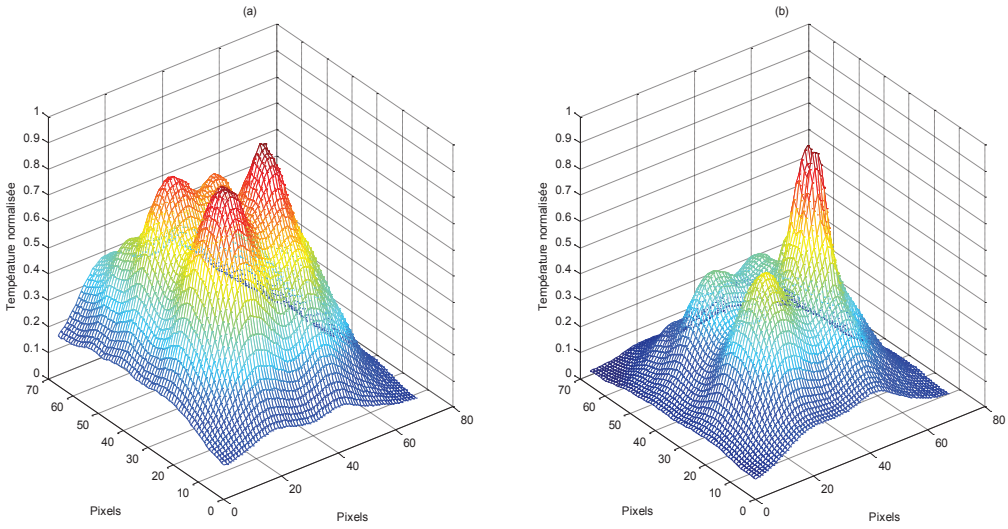


Figure 4.15 : Représentation de la température sur deux zones différentes
a) zone saine, b) zone défectueuse

Ainsi, si la différence de température entre ces deux pas d'illumination est pratiquement nulle, la zone représentée par le pixel peut être considérée comme saine. A l'inverse, en présence d'un défaut, la différence de température varie rapidement (Figure 4.15).

Pour mettre en évidence l'évolution de la température, l'étude de la variation la plus grande a été choisie pour chaque essai. Ce maximum représente une petite aire du délaminage et donc la position d'une partie du défaut dans la plaque.

4.2.4.2) Recalage temporel

Afin d'observer rapidement la différence de température entre deux zones différentes de la plaque, une étude préliminaire a été réalisée. Celle-ci consiste en un recalage temporel des signaux acquis par la caméra IR.

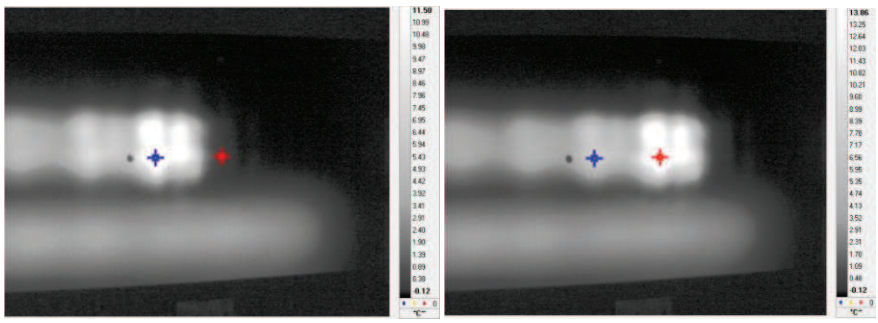


Figure 4.16 : Images thermographiques à deux temps différents

L'observation à l'instant *t* du quadrillage, représenté sur la Figure 4.16, a été choisie afin de mettre en évidence dans la suite du paragraphe les différences d'évolution de la température entre une zone saine (représentée par le pixel bleu) et une zone défectueuse (représentée par le pixel rouge).

Sur la Figure 4.17 et la Figure 4.18, on voit apparaître une différence de température entre les deux pixels. Entre chaque pulse laser, cette différence augmente.

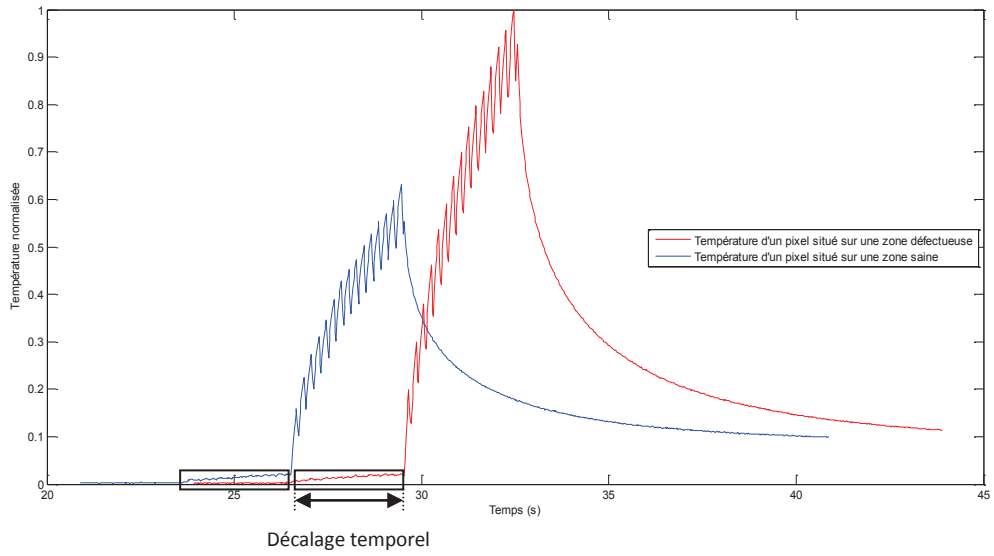


Figure 4.17 : Evolution de la température pour les deux pixels considérés

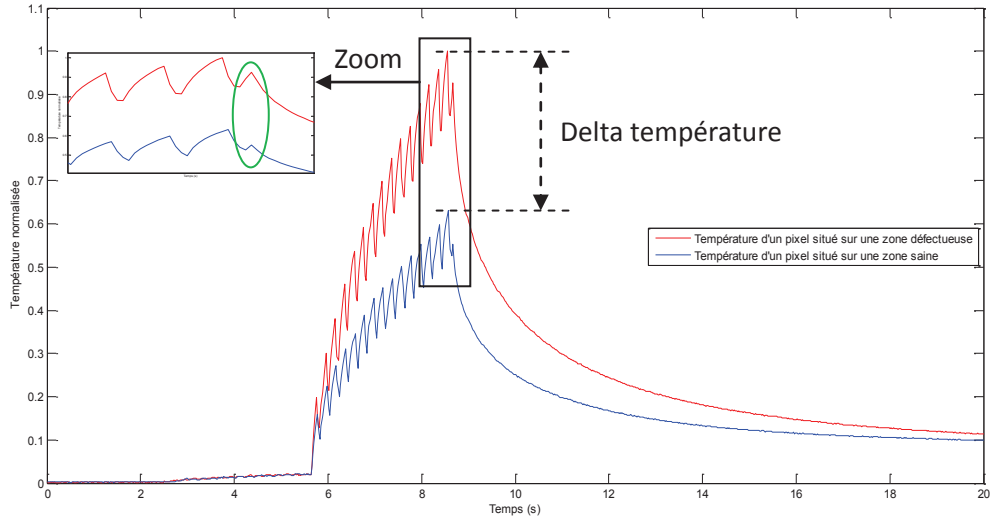


Figure 4.18 : Evolution de la température pour les deux pixels considérés avec recalage temporel

De plus, on observe que la différence de température entre zones saine et délaminée est plus importante lors de la phase de chauffage que lors de la phase de refroidissement. Il a donc été

décidé d'utiliser la phase où le laser illumine la pièce dans la suite de l'étude. Cette constatation justifie aussi le fait d'utiliser un laser dont le faisceau n'est pas directement visible par la caméra IR.

Réaliser un recalage temporel permet donc de réduire la taille du film enregistré et donc d'augmenter la rapidité des calculs lors du post-traitement.

L'ellipse verte du zoom de la Figure 4.18 met en évidence le décalage entre le moment où l'axe moteur tourne d'un pas et les pulses laser. Ceci n'a pas d'influence sur la suite des résultats : cet écart est le même entre chaque zone. Les raisons mécaniques de ce décalage sont données au paragraphe 4.1.3.

4.2.4.3) Influence de la diffusion de la chaleur sur les mesures réalisées

Les deux rectangles de la Figure 4.17 mettent en valeur une augmentation de la température sur les pixels étudiés. Cette faible augmentation apparaît alors que la zone n'est pas encore illuminée. Cette faible hausse de température provient de la diffusion de la chaleur des zones contigües à celle considérée à l'instant *t*. La Figure 4.19 est obtenue grâce au recalage temporel des deux courbes de la Figure 4.17 , et représente un agrandissement du rectangle décrit précédemment. Il apparaît que l'élévation de température du pixel situé sur une zone saine et celle du pixel situé sur une zone défectueuse sont confondues. La diffusion de la chaleur des zones proches de la zone étudiée n'est donc pas à prendre en considération dans la suite de l'étude.

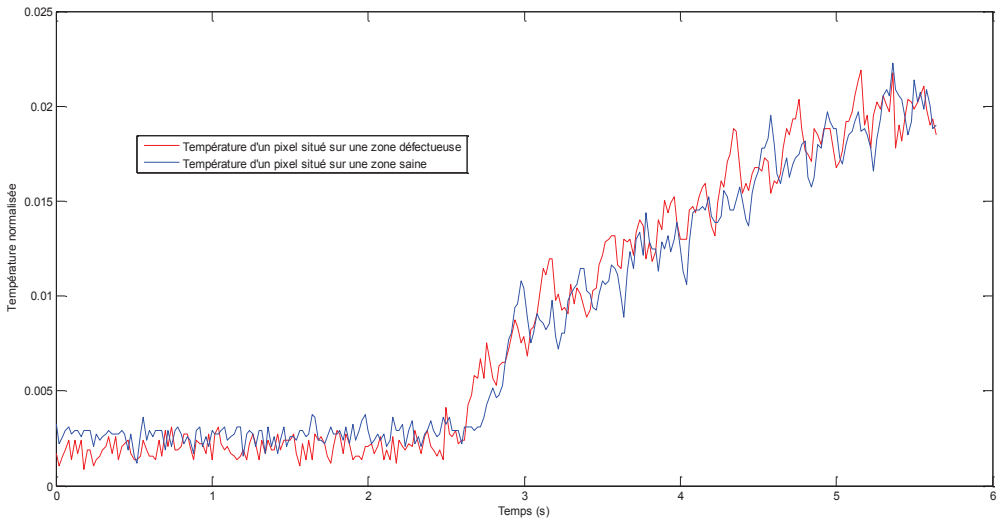


Figure 4.19 : Augmentation de la température due à la diffusion de la chaleur

4.2.4.4) Influence de la quantité d'énergie sollicitant l'échantillon

Etant donné le mode TEM_{11} du faisceau laser impactant la structure, l'énergie reçue par la plaque n'est pas identique en tout point de la zone étudiée. Même si le faisceau du laser avait été en mode TEM_{00}, les conséquences auraient été les mêmes.

En revanche, il est possible de connaître l'énergie globale impactant la plaque puisque cette dernière ne dépend que des conditions expérimentales : la puissance du laser utilisé P_{laser}, le temps d'exposition t_{expo}, et le temps où le laser fonctionne sur une période (temps de lasage) t_{laser}.

$$E = P_{laser} * t_{expo} * t_{laser} \tag{4.6}$$

La puissance du laser est imposée : $P_{laser} = 25W$. Le temps d'exposition varie quant à lui entre 2 et 3 secondes et $t_{laser} = 0{,}5T$ ou $0{,}75T$.

Dans cette étude, l'énergie déposée prend donc les valeurs de 25J, 37,5J et 56,25J. Comme exposé précédemment, cette dernière n'est pas répartie de manière uniforme sur toute la zone testée, il s'agit de l'énergie globale appliquée à la zone éclairée. Cela conditionne nécessairement l'analyse des signaux enregistrés par la caméra IR. Toutefois, cette énergie globale doit être suffisamment importante pour observer une différence de température entre une zone saine et une zone défectueuse.

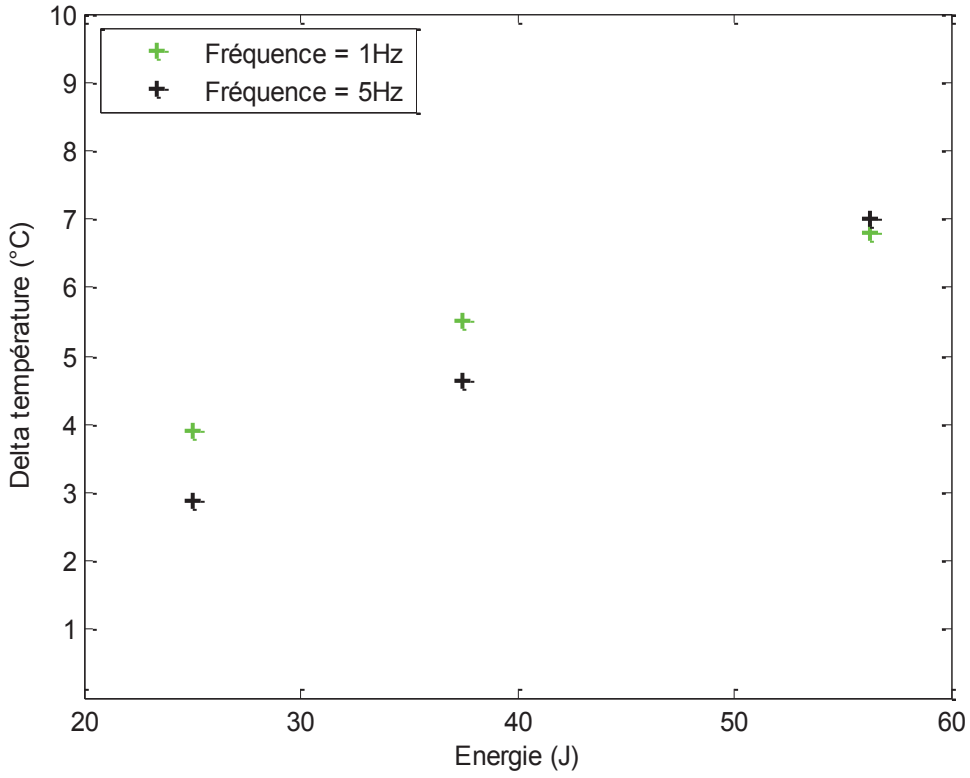


Figure 4.20 : Evolution du delta de température pour le délaminage 35J

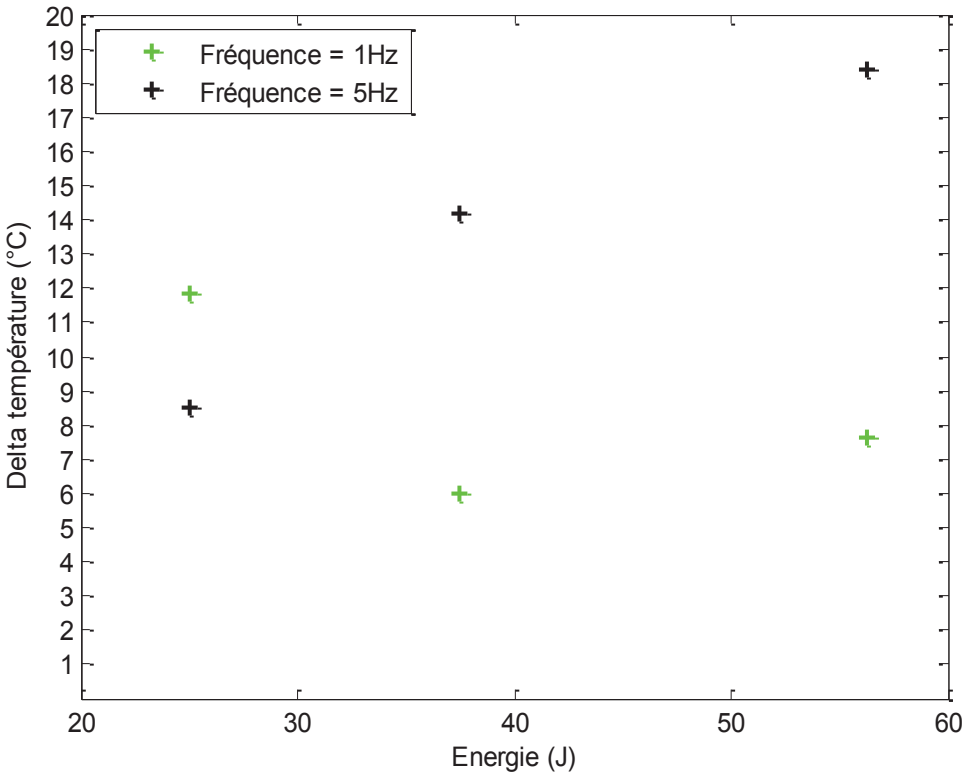


Figure 4.21 : Evolution du delta de température pour le délaminage 40J

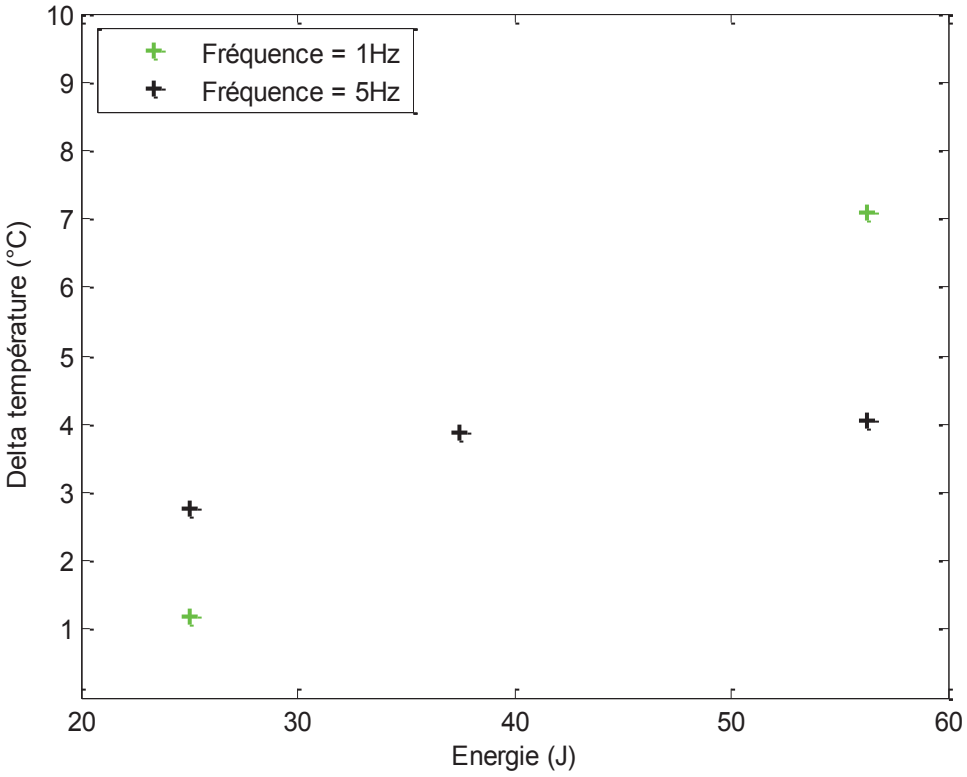


Figure 4.22 : Evolution du delta de température pour le délaminage 50J

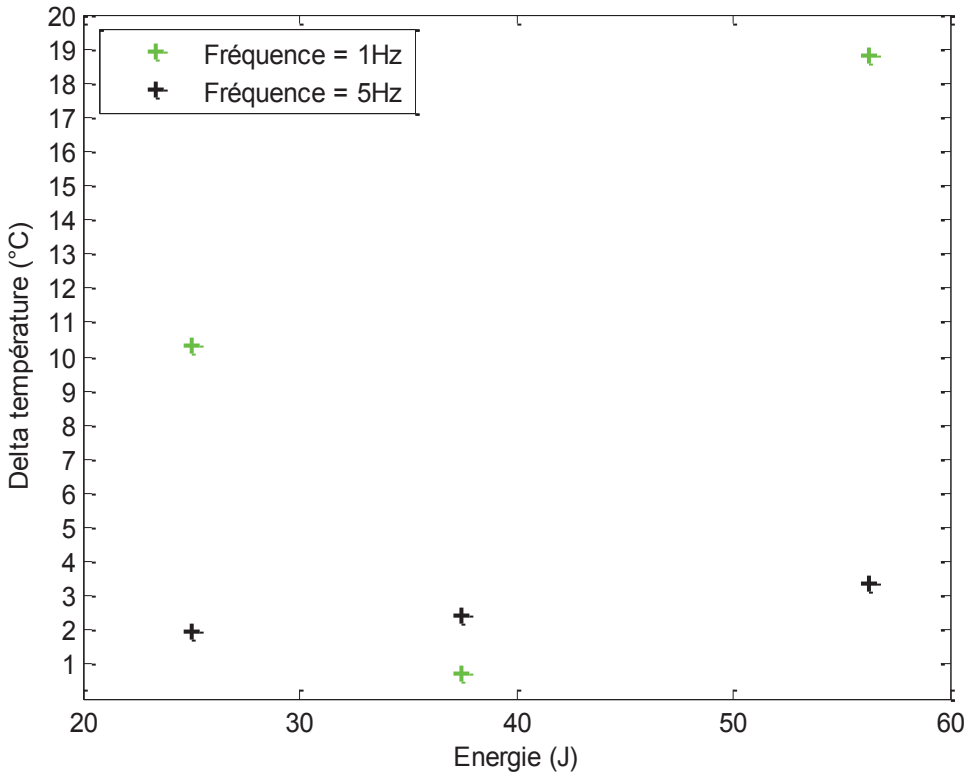


Figure 4.23 : Evolution du delta de température pour le délaminage 60J

Les Figure 4.20 à Figure 4.23 montrent que la température entre un pixel situé sur une zone saine et un pixel situé sur une zone délaminée augmente de manière significative. L'étude de la température maximale permet donc de détecter un défaut sur l'échantillon. Sa position exacte sur la face de la plaque est ensuite déterminée grâce à la connaissance de la position des pixels concernés.

De plus, les Figure 4.20 à Figure 4.23 mettent en évidence que le delta de température entre zone saine et zone délaminée a tendance à augmenter avec l'énergie appliquée à l'échantillon. Cette observation est valable pour tous les délaminages. Toutefois, il n'est pas possible de conclure quant à l'influence de la fréquence de lasage sur l'évolution de la différence de température. En effet, le delta ne varie pas de la même manière d'un défaut à un autre.

De plus, l'amplitude du delta de température varie énormément en fonction du délaminage. L'origine de ce phénomène serait lié aux caractéristiques des gaussiennes du faisceau laser : celles-ci n'ont en effet pas la même amplitude comme déjà discuté à la section 4.2.3. L'énergie déposée peut donc être différente d'un délaminage à l'autre.

La méthodologie décrite précédemment permet de mettre en évidence la présence d'un défaut dans un stratifié. La position du délaminage est déterminée avec précision mais la taille de celui-ci en revanche manque de précision. Il est alors nécessaire d'affiner l'étude localement. Pour cela, les miroirs sont alors reprogrammés pour que le faisceau laser pointe sur la zone défectueuse et la

lentille éloignée afin que le faisceau laser puisse illuminer l'ensemble de la surface sous laquelle le délaminage est supposé être.

4.3) Détermination de la taille du défaut

4.3.1) Protocole expérimental

4.3.1.1) Méthode Flash

Dans cette étude, et afin de s'affranchir de l'angle θ, la caméra IR a été placée en transmission, les axes focaux de la caméra IR et du laser étant ainsi confondus. En éliminant ce paramètre, il devient plus simple de déterminer la taille du délaminage.

Les temps d'émission radiative sont rallongés par rapport à la première partie de l'étude. En effet, pour laisser le temps aux ondes thermiques de se propager dans toute l'épaisseur du matériau, il est nécessaire de diminuer la fréquence d'excitation. Pour des pièces dont l'épaisseur est de l'ordre du millimètre, plusieurs secondes d'éclairage sont nécessaires du fait de la faible valeur de la diffusivité des composites carbone/époxyde (en comparaison des matériaux conducteurs). Après plusieurs essais et réglages du temps d'excitation radiative, la fréquence d'excitation utilisée est finalement imposée à $f = 0{,}033Hz$. Ceci correspond à l'ordre de grandeur des fréquences fréquemment utilisées en excitation thermique [81].

Les temps d'illumination T_{laser} utilisés dans cette étude sont de 5 s et 10 s (Figure 4.24).

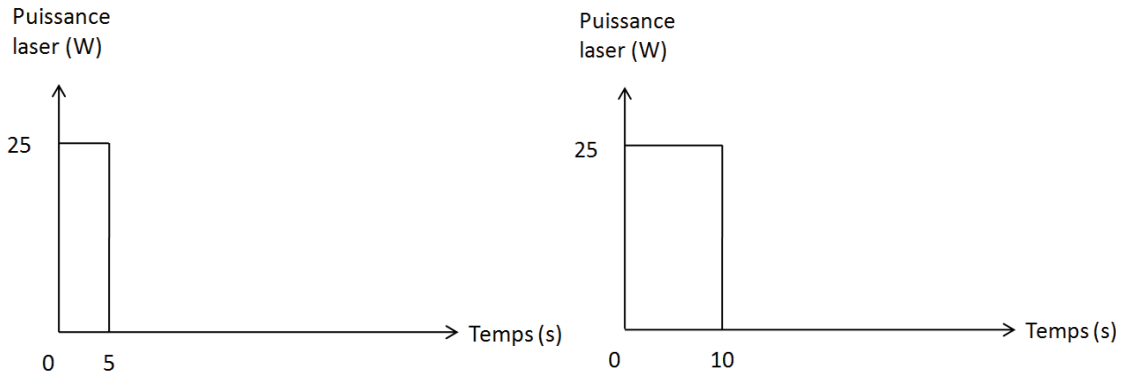


Figure 4.24 : Commande de l'excitation laser (Méthode Flash)

La distance lentille / plaque a donc été accrue afin d'augmenter le diamètre de la tache laser. L'énergie radiative est donc mieux répartie en surface, et le temps d'illumination peut alors être plus important sans risquer d'endommager la matrice époxyde.

Lors des essais en transmission, la position de la caméra IR est la même que lors des essais thermosoniques : la distance échantillon / caméra est alors imposée à 50 cm (Figure 4.25). Ainsi, les précisions de la détection pourront être comparées.

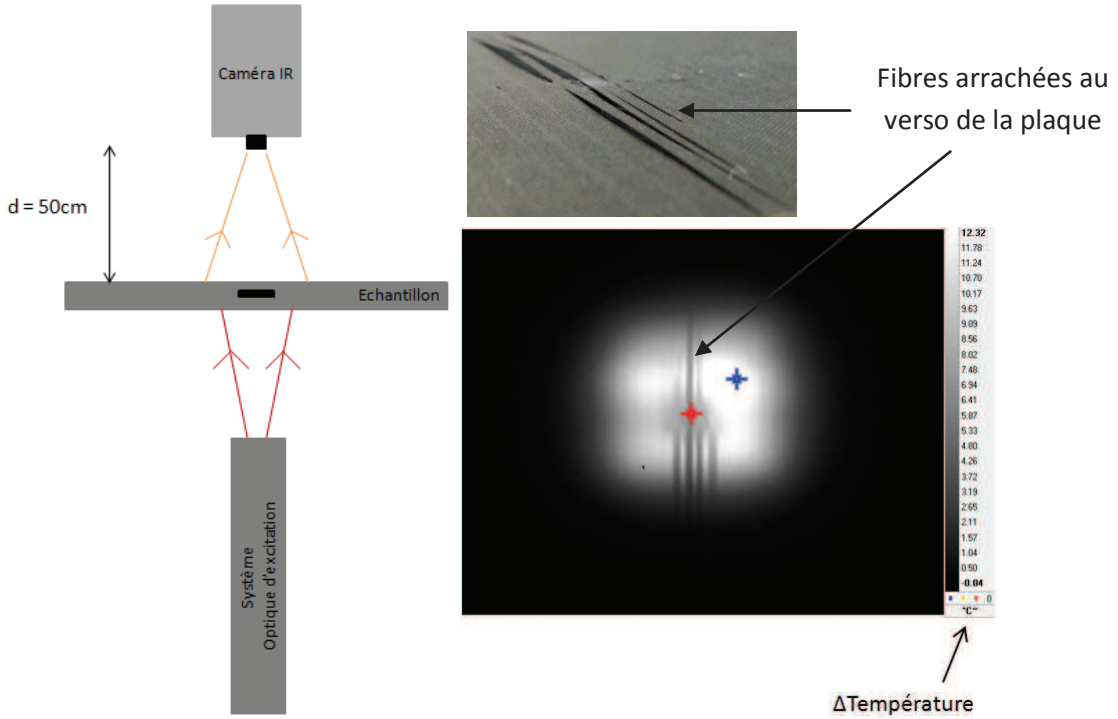


Figure 4.25 : Schéma de l'essai thermographique par transmission et image thermographique à l'instant t d'un essai en transmission

Ces essais en transmission sont plus résolus que les essais en réflexion comme le montre la figure 25 où le pixel rouge représente une zone délaminée et le pixel bleu une zone saine. En effet, on observe sans aucun traitement du signal, que des gradients de température sont assez différents entre les zones saine et délaminée (Figure 4.26).

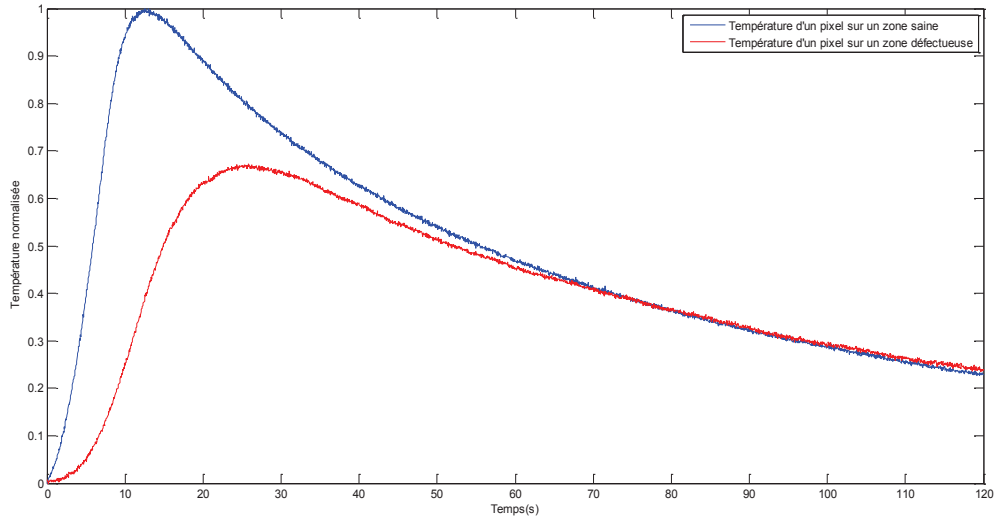


Figure 4.26 : Evolution temporelle de la température pour une zone saine et une zone défectueuse $t_{laser} = 10s$

Les techniques de traitements d'images utilisés dans le chapitre 3 ont de nouveau été appliquées dans ce chapitre afin de comparer la pertinence de ces calculs avec ces essais en excitation thermique. Seules deux expériences ont été réalisées ici, les résultats étant présentés sous la même forme que pour la thermosonique. Les deux expériences ont été séparées, il n'y a donc pas d'écart type sur la Figure 4.27 et la Figure 4.28 présentées ci-dessous.

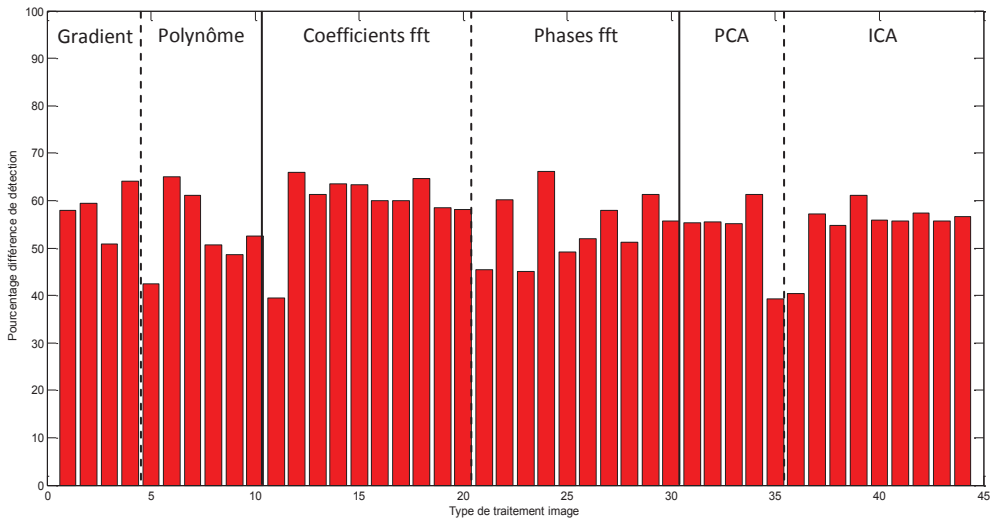


Figure 4.27 : Histogramme de la différence de détection du délaminage 35J ($t_{laser} = 5s$)

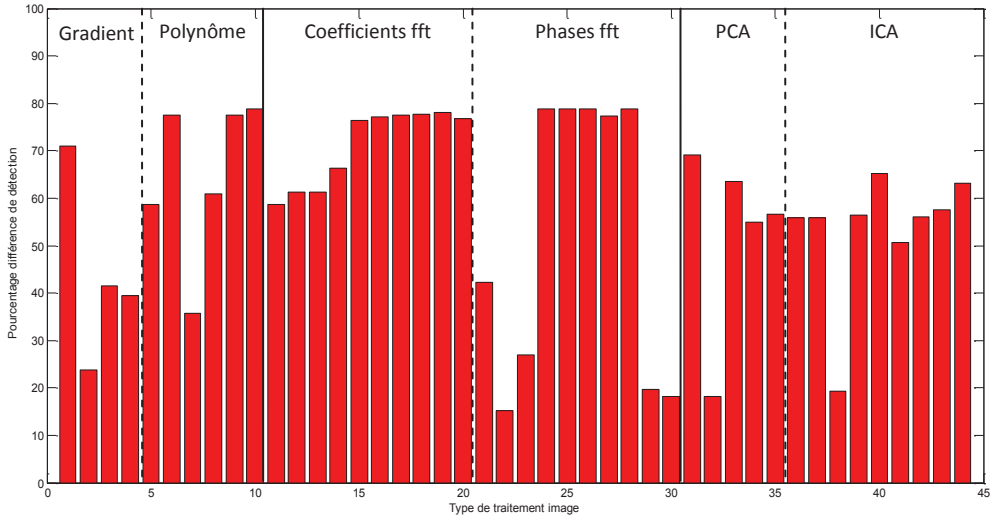


Figure 4.28 : Histogramme de la différence de détection du délaminage 35J ($t_{laser} = 10s$)

Les résultats obtenus par ces méthodes ne sont pas probants, ils n'ont pas le même impact que les valeurs acquises avec la thermosonique. De plus, que t_{laser} soit égal à 5 s ou 10 s n'apporte pas non plus d'éléments concluants. La courbe de réponse en température n'est pas la même entre les deux méthodes. En thermosonique, l'augmentation de température des zones saines est faible contrairement à l'excitation thermique où la réponse en température est similaire à celle des zones défectueuses. Les traitements d'images portants sur l'amplitude ou l'approximation des coefficients polynomiaux des courbes sont donc inefficaces.

Certaines valeurs de la phase de la transformée de Fourier sont similaires aux meilleurs résultats obtenus lors du post-traitement des essais thermosoniques. La Figure 4.26 montre que le maximum de température n'est pas atteint au même moment entre une zone saine et une zone délaminée. Les phases du fondamental et/ou des harmoniques seront donc différentes en fonction de chaque signal enregistré. La distinction entre les deux zones est par conséquent possible.

Pour l'essai $t_{laser} = 5s$, aucun des résultats n'est satisfaisant (Figure 4.27). A l'inverse, deux valeurs ressortent, l'une pour le PCA et l'autre pour l'ICA, lors du test à $t_{laser} = 10s$. Ces deux traitements d'images s'avèrent donc efficaces pour une condition d'expérimentation particulière. Cependant, il ne semple pas possible de déterminer le numéro d'image "intéressant" (Les commentaires à ce sujet sont présents dans le paragraphe 3.6.2.4).

4.3.1.2) Sollicitation périodique

Pour ces nouveaux essais, les conditions expérimentales sont les mêmes que précédemment. La seule différence provient du fait que la plaque est sollicitée de manière périodique par le faisceau

laser. Ainsi, la plaque est impactée par le laser pendant 5 s (ou 10 s) puis l'excitation cesse, la plaque alors refroidit pendant 25 s (ou 20 s) (Figure 4.29). La même opération ensuite est répétée quatre fois de suite afin d'observer l'influence du changement des conditions initiales lors du chauffage ou du refroidissement.

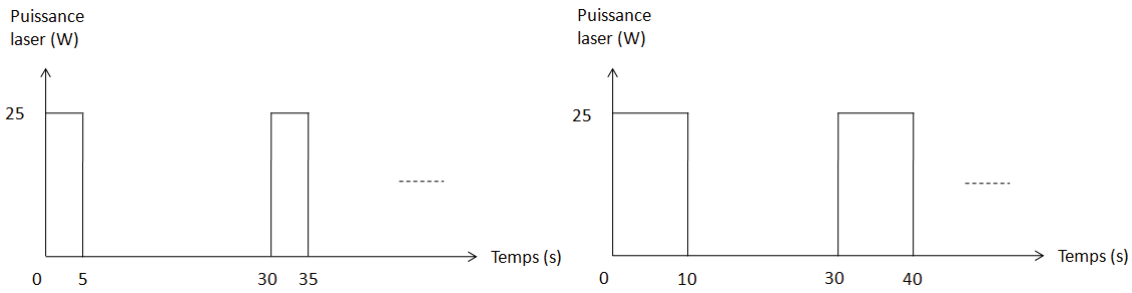


Figure 4.29 : Commande de l'excitation laser (Flux périodique)

Sur la Figure 4.30, le pixel rouge représente une zone délaminée et le pixel bleu une zone saine. Les différences de température entre les deux zones augmentent à chaque pulse laser.

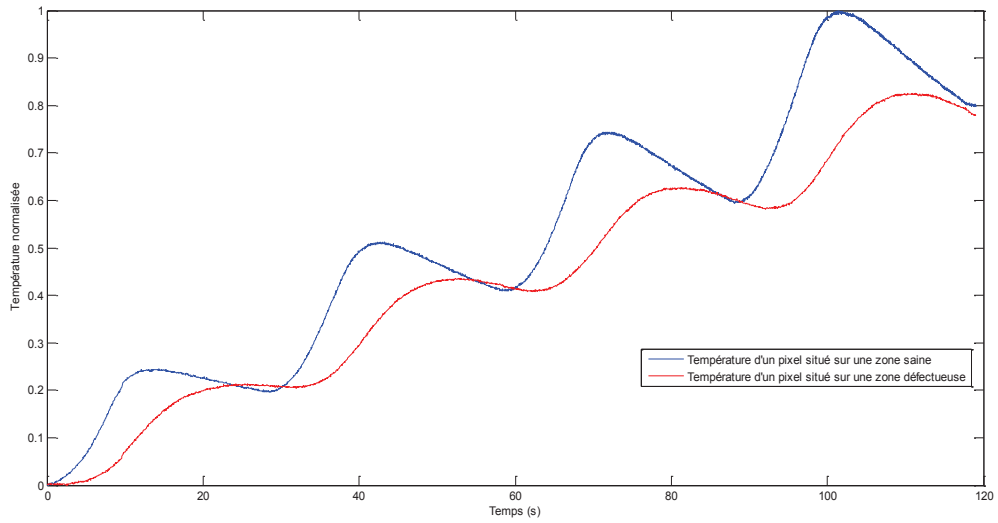


Figure 4.30: Evolution temporelle de la température sur une zone saine et une zone défectueuse lors d'un essai en transmission sous sollicitation périodique ($t_{laser} = 10s$).

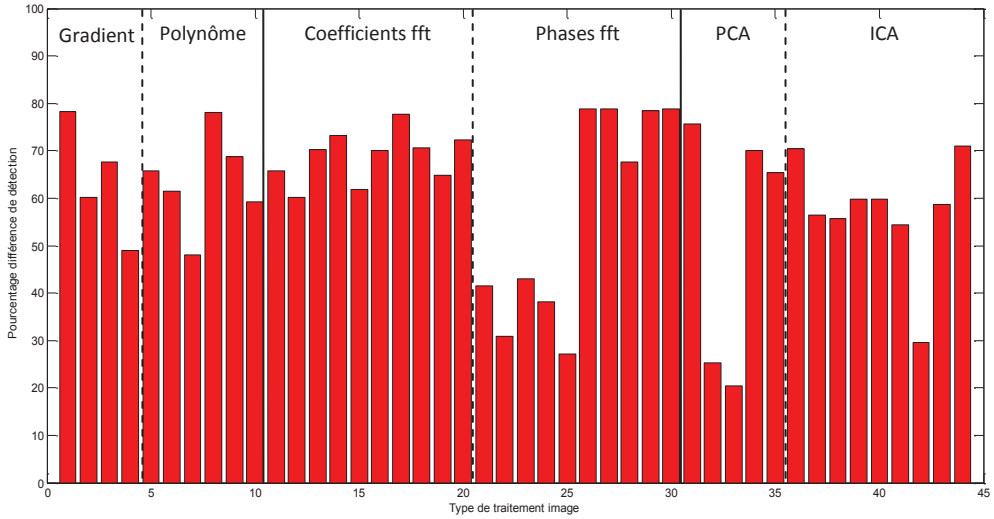


Figure 4.31 : Histogramme de la différence de détection du délaminage 35J ($t = 0{,}16T$)

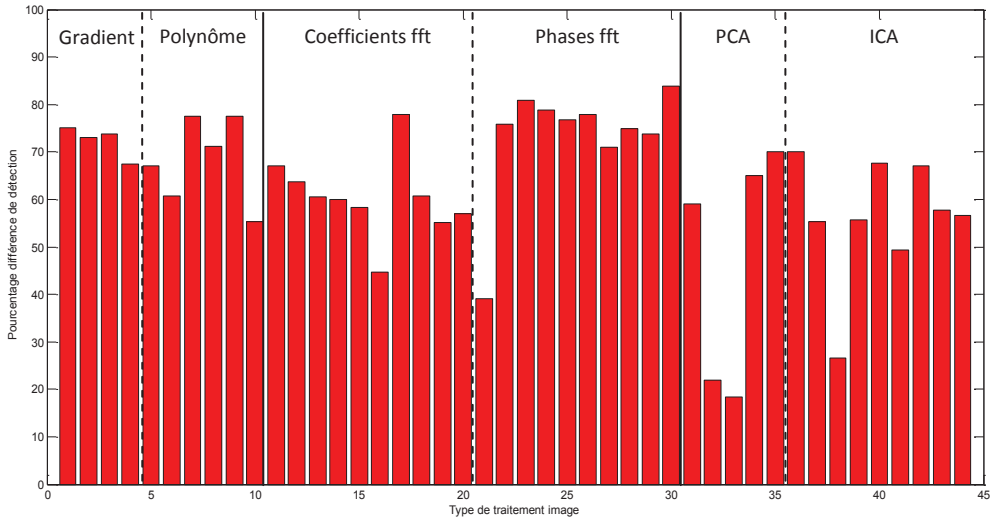


Figure 4.32 : Histogramme de la différence de détection du délaminage 35J ($t_{laser} = 0{,}33T$)

Les résultats obtenus sont peu concluants (Figure 4.31 et Figure 4.32) et n'apportent pas d'amélioration quant à la détection complète du délaminage. En effet, la différence de détection entre les deux techniques est supérieure à 50%. Ceci est dû au fait que les courbes de réponse en température sont trop similaires : le phénomène est périodique.

Dans le cas de l'étude, l'étude du gradient, les coefficients du polynôme caractéristique et la transformée de Fourier sont donc inutiles. Contrairement à l'étude précédente, les valeurs des phases de la transformée de Fourier ne sont pas pertinentes. La périodicité de l'excitation expliquerait ce changement.

Les traitements PCA et ICA ont de nouveau encore cette fois-ci permis d'obtenir des résultats plus probants que les autres traitements d'images pour certaines de leurs composantes. Cela confirme que ces traitements semblent efficaces pour l'excitation thermique en utilisant une excitation flash ou périodique.

L'allure des courbes de réponse en température est bien particulière. Les traitements d'images ont montré que les différences de températures entre une zone saine et une zone délaminée sont trop faibles pour pouvoir déterminer avec précision le contour du délaminage. De plus, il paraît intéressant de se pencher sur la différence de phase entre les courbes. Dans la suite de cette étude, cette méthode est appliquée aux essais pour lesquels les traitements d'image ont été appliqués (méthode Flash et sollicitation périodique).

4.3.3) Principe de la "pseudo-détection" synchrone

4.3.3.1) Amplitude

Le terme de "pseudo-détection" synchrone est employé car le signal de référence considéré ne sera pas l'excitation elle-même (comme dans le cas de la détection synchrone) mais la courbe de réponse en température provenant d'une zone saine. Il ne s'agit donc pas d'une détection synchrone classique.

La Figure 4.33 est un grossissement de la Figure 4.30 et notamment les quarante premières secondes de l'expérience afin de mettre en évidence la valeur de température maximale sur une zone saine lors du chauffage (*Ts_c_max*) et sur une zone défectueuse (*Td_c_max*). La différence d'amplitude entre les températures est noté A_c.

Sur la Figure 4.33, *Ts_c_max* est supérieure à *Td_c_max* et par conséquent $A_c > 0$. Ceci semble logique du fait que les ondes thermiques sont atténuées lorsqu'elles rencontrent un défaut. L'idée a donc été de trouver la température maximale de chaque pixel sur chaque période puis de les soustraire au maximum général des températures ainsi obtenues.

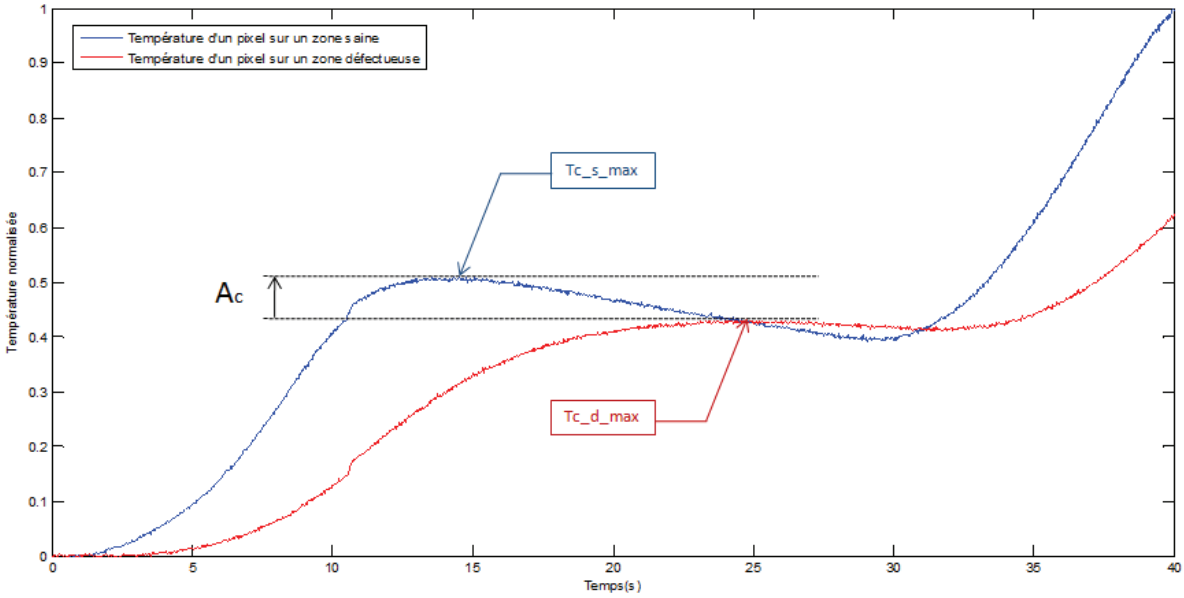


Figure 4.33 : Zoom de la figure 27, étude de l'amplitude

Comme le montre la Figure 4.34, seule la tache laser est mise en évidence par cette technique ainsi que certaines fibres arrachées.

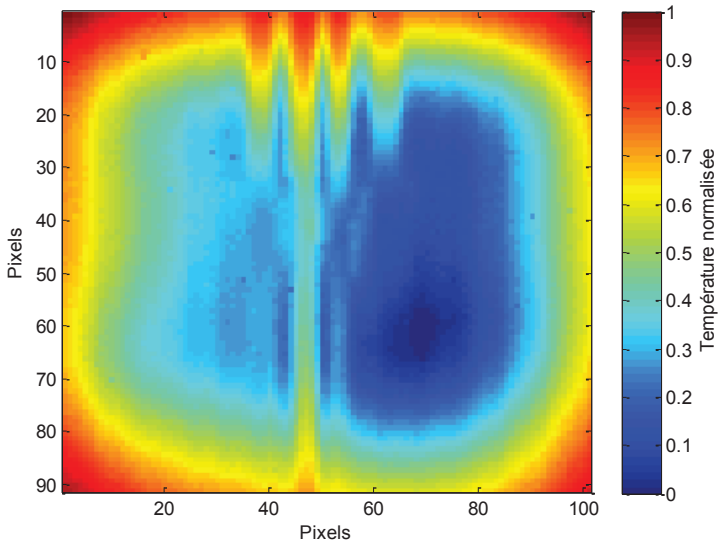


Figure 4.34 : Cartographie des résultats de l'étude de l'amplitude

Ceci est encore dû au mode TEM_{11} du faisceau laser : les quatre gaussiennes n'ont pas la même amplitude, les températures maximales ne sont donc pas comparables, les résultats obtenus ne sont pas utilisables à la détection du délaminage.

4.3.3.2) Phase

L'étude de la phase entre une zone saine et une zone délaminée peut s'effectuer soit lors du chauffage soit lors du refroidissement. Les résultats seront donc comparés dans les deux cas.

- Refroidissement

La Figure 4.35 représente la même expérience que celle présentée lors de l'étude de l'amplitude du paragraphe précédent. Dans le cas présent, on étudie la différence de phase Φ_r entre des ondes thermiques issues des zones saine et défectueuse. Lors du refroidissement, les températures minimales sur chaque période sont sélectionnées puis une cartographie des déphasages moyens (sur les quatre périodes) est réalisée afin de la comparer à la référence C-scan.

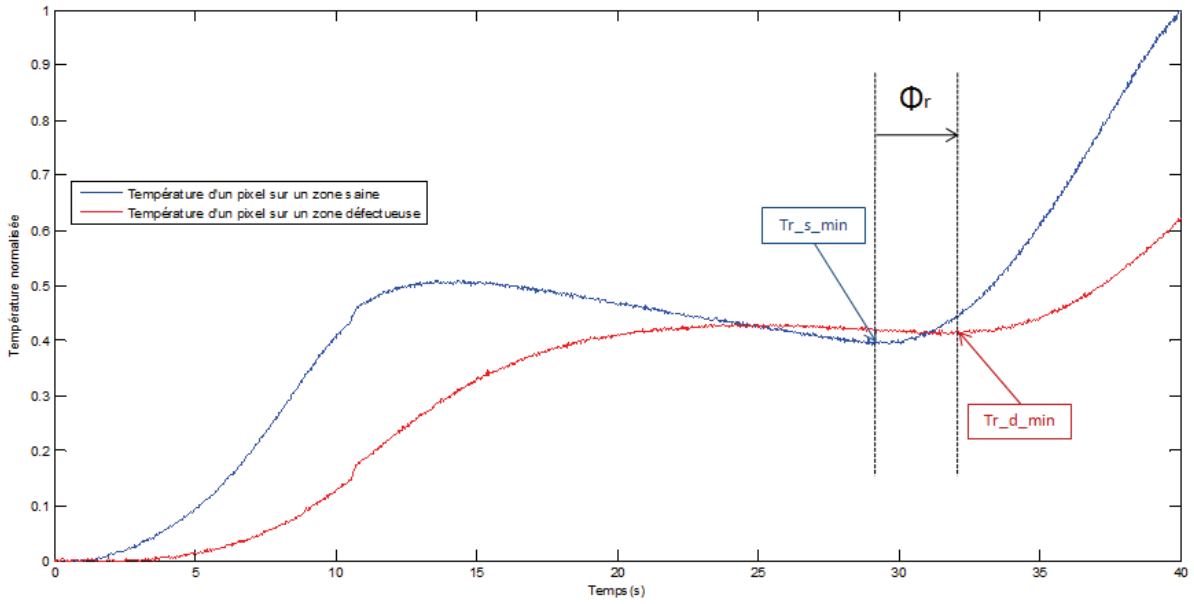


Figure 4.35 : Zoom de la Figure 4.30, étude de la phase lors du refroidissement

- Chauffage

La Figure 4.30 est de nouveau considérée, mais l'étude porte cette fois-ci sur la différence de phase Φ_c lors du chauffage : les températures maximales de chaque pixel est sélectionnée pour chaque période (Figure 4.36), puis, comme pour l'étude sur le refroidissement, une cartographie de Φ_c est réalisée.

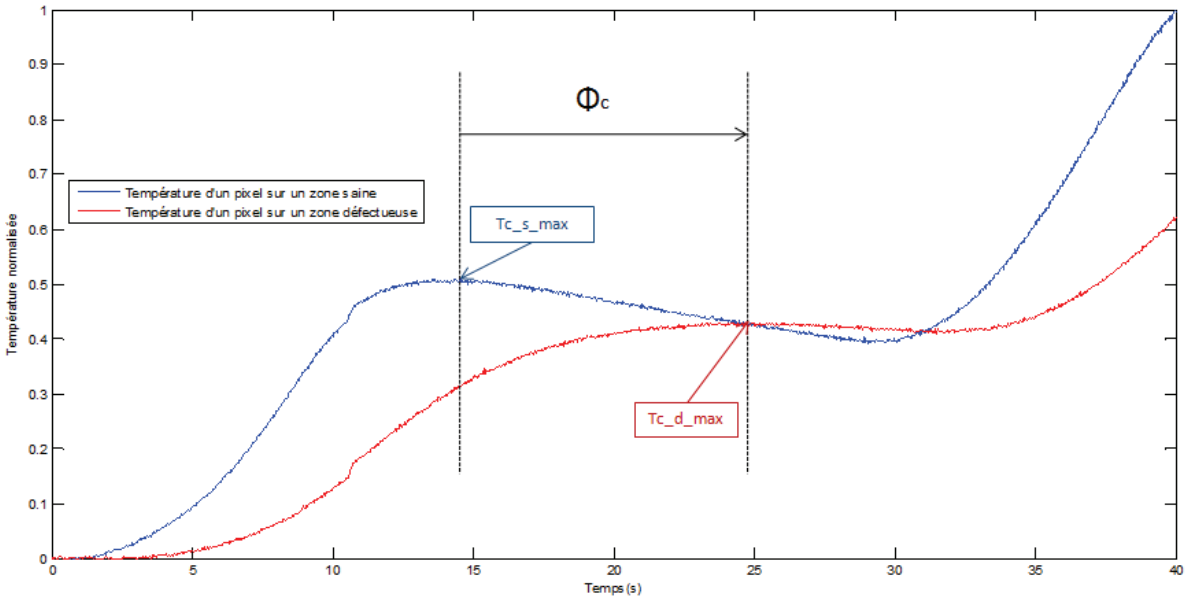


Figure 4.36 : Zoom de la Figure 4.30, étude de la phase lors du chauffage

- Comparaison avec la référence

Les cartographies de déphasages sont alors comparées à la cartographie des temps de vols réalisée lors des essais ultrasons C-scan. L'algorithme de comparaison est le même que celui appliqué dans le chapitre 3 comme le montre la Figure 4.37.

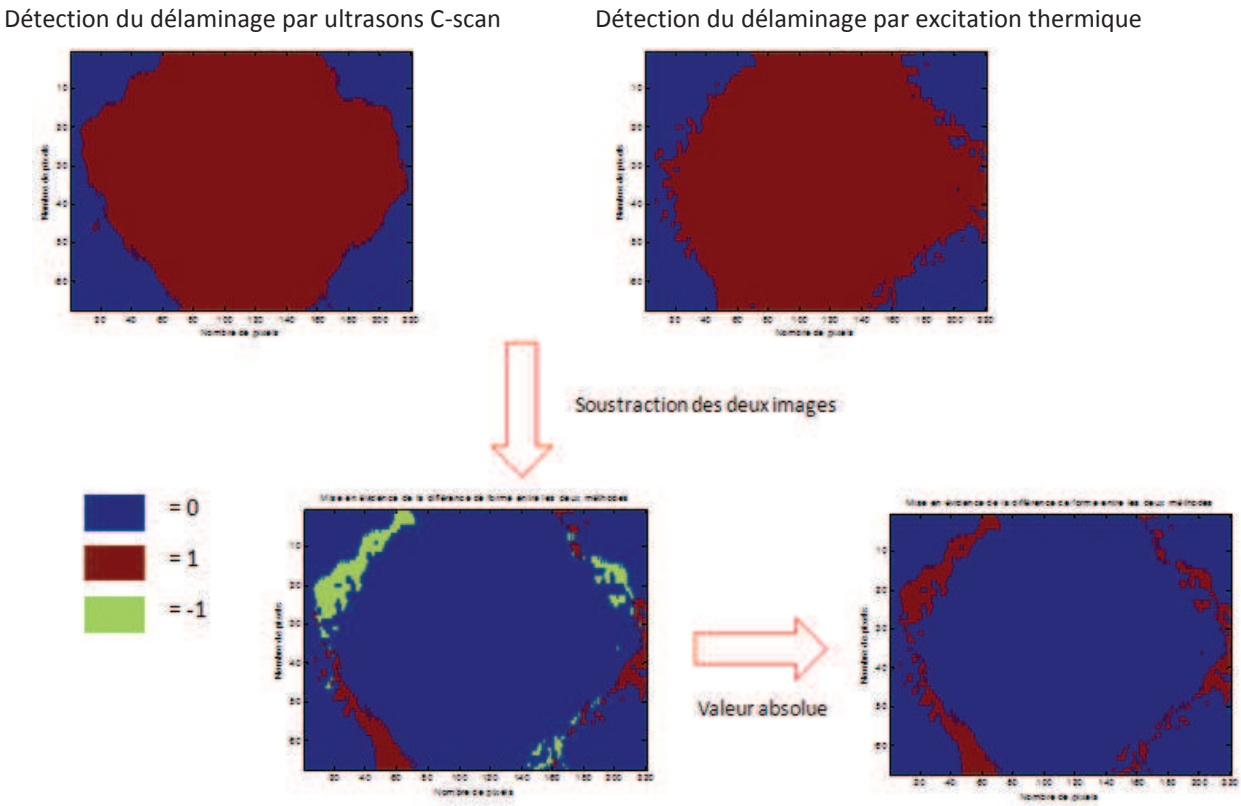


Figure 4.37 : Comparaison des aires de détection du délaminage pour un essai de l'excitation thermique en transmission (Exemple utilisé : plaque 35J)

Le Tableau 4.4 et le Tableau 4.5 montrent que l'étude du déphasage du chauffage Φ_c donne de meilleurs résultats que l'étude du déphasage du refroidissement Φ_r. Ceci est vraisemblablement dû au phénomène de diffusion de chaleur dans l'échantillon qui floute progressivement les images obtenues.

f = 0.03Hz	Phase-Refroidissement 1	Phase-Refroidissement 2	Phase-Refroidissement 3	Phase-Refroidissement 4
t_{laser} = 10s	28,24 %	30,85 %	26,24 %	30,19 %
t_{laser} = 5s	34,09 %	28,92 %	25,61 %	24,87 %

Tableau 4.4 : Pourcentage de différence de forme entre les deux méthodes lors du "refroidissement"

f = 0.03Hz	Phase-Chauffage 1	Phase-Chauffage 2	Phase-Chauffage 3	Phase-Chauffage 4
t_{laser} = 10s	12,48 %	13,98 %	14,64 %	16,02 %
t_{laser} = 5s	16,07 %	16,06 %	15,51 %	14,68 %

Tableau 4.5 : Pourcentage de différence de forme entre les deux méthodes lors du "chauffage"

Le Tableau 4.5 tend à prouver que l'expérience à $t_{laser} = 10s$ apparaît la meilleure solution bien que la différence avec l'expérience à $t_{laser} = 5s$ soit faible. De plus, le pourcentage de différence de forme augmente lors du temps de radiation plus important contrairement au temps de radiation plus faible qui diminue légèrement. Les conditions expérimentales ne sont pas les mêmes d'une période à l'autre : les températures lors de l'essai à $t_{laser} = 5s$ tendraient à être plus homogènes que celles de l'essai à $t_{laser} = 10s$ avant l'impulsion laser. Toutefois, la diminution du pourcentage n'est que d'environ 1,5%, il est difficile de considérer cette baisse comme étant influente contrairement à l'accroissement qui est d'environ 4,5%.

Le changement de conditions expérimentales à chaque période, (les températures initiales sont de plus en plus élevées), ne permettent pas de diminuer le pourcentage de forme entre les deux méthodes.

L'étude de la première période lors du chauffage apparaît comme étant la plus prometteuse. Les résultats sont similaires à ceux obtenus dans le chapitre 3 en thermosonique. De plus, la température maximale calculée est perturbée par le bruit, il existe donc une petite incertitude quant à la détermination de la phase Φ. Ceci influe donc sur le pourcentage de la différence de forme entre l'excitation thermique et la référence qui pourrait alors diminuer.

4.4) Conclusion

L'excitation thermique a montré son efficacité quant à la détection de défauts dans un échantillon plat. Cette méthode a pu être automatisée et les résultats obtenus sont reproductibles. Positionner la caméra en réflexion est un avantage indéniable pour l'inspection de pièce dans un contexte industriel.

Les traitements d'images apportent des éléments de réponses intéressants quant à leur efficacité suivant le type d'excitation et la manière de l'utiliser. Le phénomène de diffusion de chaleur est similaire à la thermosonique. On a aussi un pourcentage de différence entre l'excitation thermique et les ultrasons C-scan.

4.5) Perspectives

Il serait intéressant d'automatiser toute cette étude : la démarche serait après l'inspection d'une plaque qu'un programme exécute l'étude et détermine la position du pixel avec le delta de température maximal. Le nombre de pas exécutés par les deux moteurs étant connus, il est ensuite aisé de replacer automatiquement les miroirs afin d'éclairer la zone suspecte. Cette amélioration du système d'automatisation du prototype est en vue de l'utilisation industrielle mais non fondamentale pour notre étude.

Comme dans le chapitre 3, la détection de la position du défaut dans la courbe d'un raidisseur est possible, il suffit d'orienter le faisceau et/ou le support de l'échantillon.

L'excitation thermique est sans contact, ce qui présente un grand avantage dans un contexte industriel particulièrement pour les pièces de grandes dimensions. La précision de la détection du délaminage est la même que pour la thermosonique. Ces deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients qui seront comparés dans la conclusion.

Conclusions et perspectives

- Comparaisons entre la thermosonique et l'excitation thermique

Dans ce travail, nous avons développé deux prototypes afin de détecter des délaminages dans les composites aéronautiques. Dans un premier temps, il a fallu sélectionner parmi toutes les méthodes de CND celles qui étaient susceptibles de convenir au cahier des charges fixé pour ensuite s'interroger sur la manière d'améliorer la technique choisie. Ainsi, deux bancs d'essais ont été réalisés : un pour la thermosonique, l'autre pour l'excitation thermique. Une fois le film IR enregistré, il est intéressant d'utiliser des traitements d'images afin d'améliorer la qualité des images IR mais aussi pour extraire l'information désirée.

Le premier montage présente deux inconvénients de taille : il s'agit d'une méthode dont l'excitation mécanique est en contact avec le matériau et le délaminage peut se propager si la puissance et le temps des ultrasons générés dans le stratifié sont trop importantes. Toutefois, cette méthode s'est avérée prometteuse dans la détection de délaminages. Les études temporelles se sont révélées probantes, tant l'étude instantanée que l'étude globale de l'évolution de la température à la surface du matériau. Le traitement d'image de l'analyse en composantes indépendantes n'a pas apporté les résultats escomptés. N'étant pas encore utilisée dans le domaine du CND, le code nécessite surement des modifications pour l'appliquer à notre cas. L'analyse en composantes principales a donné un résultat intéressant : l'image la plus décorrélée fournit une information aussi percutante que l'étude temporelle.

L'excitation thermique est une technique nécessitant des précautions du fait de l'utilisation d'un laser CO_2. Comme la longueur d'onde du laser est de 10,6 µm, le trajet du faisceau est invisible à l'œil nu. Ainsi, configurer le chemin optique prend assez de temps dans le cadre d'un laboratoire : le laser, la lentille ZnSe, les miroirs doivent être parfaitement alignés. Par contre, une fois le réglage réalisé, les tests sont reproductibles et la position du délaminage est repérée rapidement. Le traitement d'image appliqué aux essais thermosonique n'a pas le même impact, il s'est avéré inefficace. L'étude de l'amplitude en transmission n'a pas non plus permis d'obtenir des résultats satisfaisants. Toutefois, l'étude de la phase s'est avérée efficace dans la détermination du contour du délaminage.

Les chapitres 3 et 4 montrent que la thermosonique et l'excitation thermique présentent des avantages et des inconvénients l'une par rapport à l'autre. Mais le point commun entre les deux méthodes est la précision de la détection. En effet, l'erreur de la détection de la forme du délaminage est équivalente : la valeur minimale de la différence pour la thermosonique est de **9,85%** et **12,48%** pour l'excitation thermique.

La comparaison entre les deux techniques ne se basera pas sur le type de détection mais s'appuiera sur l'excitation. La physique n'étant pas la même, des différences apparaissent notamment sur le type de matériau à analyser, le protocole expérimental, la sécurité mais aussi l'aspect financier.

- Type de matériaux

L' étude menée dans les deux chapitres précédents a montré que les deux méthodes sont applicables aux matériaux composites avec la même précision de détection. Comme il s'agit de structures stratifiées, il serait intéressant de se demander si la thermosonique et l'excitation thermique le sont aussi pour des matériaux homogènes. Les deux techniques permettent de détecter tous types de défauts dans tous types de matériaux [82] : les métaux, les polymères, les céramiques.

Dans les métaux, où l'effet de viscoélasticité est négligeable, l'énergie mécanique est convertie en source de chaleur là où sont situés les défauts. Pour les fissures, il y a dissipation de chaleur du fait de la zone élasto-plastique autour de la pointe de la fissure [83].

- Protocole expérimental

La principale différence entre les deux méthodes réside dans le protocole expérimental. La mise en place du banc d'essai de la thermosonique est simple et rapide à implanter en comparaison de celui réalisé pour l'excitation thermique IR. En effet ce dernier a nécessité un réglage optique minutieux. L'alignement laser / lentille ZnSe / Miroirs / plaque doit être optimal afin de pouvoir maîtriser correctement le quadrillage de la zone à inspecter. Toutefois, ce réglage effectué, les essais réalisés par la suite sont reproductibles et sans contact avec le matériau.

Comme affirmé précédemment, les essais thermosoniques sont rapides et faciles à mettre en œuvre. Les résultats obtenus le sont eux aussi. Toutefois, le chapitre 3 a montré non seulement qu'il s'agit d'une méthode avec contact, mais aussi que la répétabilité de cette méthode laisse à désirer. Plusieurs pistes ont été avancées comme l'utilisation d'un ressort dans le banc d'essai afin de maîtriser la pression exercée par la sonotrode sur le matériau. Le liant entre la plaque et la sonotrode utilisé dans cette étude sont des couches de scotch aluminium. La quantité d'énergie mécanique réellement injectée dans la plaque est difficilement quantifiable puisqu'une partie est dissipée sous forme de chaleur au niveau du contact scotch / sonotrode. Ceci est le principal défaut de cette méthode. Toutefois une modélisation par éléments finis permettrait de palier en partie ce problème.

La possibilité de détérioration du matériau est aussi un des inconvénients de la thermosonique. En effet, utiliser une puissance des ultrasons trop importante peut entrainer une propagation du délaminage jusqu'en surface (comme le montre la figure 6 du chapitre 3).

Ensuite la zone d'inspection dépend de la précision de la détection souhaitée. En effet, plus la caméra est proche de la plaque, et plus la précision s'améliore. Pour l'étude thermosonique, la distance caméra / plaque est de 0,50 m alors que pour l'excitation thermique elle est de 1,2 m. Dans cette étude, la taille des pixels est donc plus petite pour la première méthode.

Par la suite, il est important de se demander quelle serait la taille de pièce à inspecter. La thermosonique est plus précise que l'excitation thermique pour des pièces de petites dimensions. Pour des matériaux à grandes dimensions, l'excitation thermique possède un avantage conséquent.

En effet, le système d'automatisation des miroirs permet de quadriller une zone importante à savoir plusieurs mètres de longueur et de largeur s'il le faut. Des pièces de grande taille peuvent donc ainsi être inspectées en une seule fois.

- Sécurité

Le laser CO_2 est considéré comme étant un laser de classe 4 : il peut produire des réflexions diffuses dangereuses. De plus il peut provoquer des dommages sur la peau, notamment des brûlures. Une protection oculaire s'avère donc nécessaire durant son utilisation bien qu'il ne présente pas de danger pour la rétine mais peut abîmer la cornée.

La thermosonique ne nécessite pas de mise en place de systèmes de sécurité particuliers. Elle ne présente pas de danger particulier.

- Aspect financier

Dans le domaine du CND, plusieurs critères justifient le prix d'une installation comme la précision de la détection, le temps d'inspection, la taille de la pièce.

Dans le domaine aéronautique, la taille des structures stratifiées varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. En gardant la même précision de détection, le prix de l'équipement augmente donc avec la taille du composite à inspecter.

Pour la tomographie, le coût d'un équipement est très élevé mais la précision de l'inspection est la plus précise possible. Toutefois, la taille de l'élément à analyser est petite avec un temps d'inspection important et des mesures de sécurité drastiques. Cette méthode ne peut donc convenir dans le cadre de notre étude.

Les ultrasons sont majoritairement utilisés dans ce domaine industriel. Le contrôle peut être manuel et donc à faible coût mais s'il doit être automatisé, les méthodes par immersion sont généralement mises en application. L'équipement varie de plusieurs dizaines de milliers d'euros à plusieurs millions. Cette augmentation est liée à l'augmentation de la taille de la structure à analyser (de quelques centimètres à plusieurs mètres).

Les méthodes développées dans le cadre de notre étude ne subiraient pas d'élévation de coût aussi important : le système d'automatisation de l'excitation thermique par miroirs mobiles est déjà mis en place. Si le champ de la caméra IR ne couvre pas toute la structure, il suffit d'automatiser son déplacement. Pour la thermosonique, un banc d'automatisation (déplacement de la sonotrode lié au déplacement de la caméra IR) permettrait d'analyser des pièces de grandes dimensions.

Ensuite, le coût dépend aussi de la précision demandée : plus la caméra IR est éloignée de la pièce, plus la précision de la détection diminue mais plus le temps de l'essai décroît lui aussi. Il s'agit donc de réaliser un compromis entre le temps d'inspection et la précision recherchée.

En considérant chaque élément du banc d'essai, une estimation du prix de chaque méthode a été réalisée. Il s'avère que l'ordre de prix est le même. Les deux méthodes utilisent en effet la même détection : la caméra IR Cedip Orion. Les différences de température sont assez importantes pour envisager la possibilité d'utiliser une caméra IR possédant une sensibilité thermique supérieure à 20mK : le prix d'une caméra IR dépend fortement de la valeur de cette sensibilité. En prenant une caméra ayant une sensibilité de 50mK, un laser CO_2 refroidi par air et les différents composants du banc d'essais thermographique, le prix global est de 20000 €. Pour la thermosonique, le coût global de l'installation (Caméra IR, sonotrode + générateur + convertisseur, autres composants du banc) est de 16000 €.

Une comparaison avec les autres méthodes semble difficile du fait que les deux méthodes, la thermosonique et l'excitation thermique, devraient être mises en situation pour l'analyse de pièces de grandes dimensions. Pour des pièces de petites dimensions, l'ordre de prix est à peu près équivalent (un système par immersion pour des éléments de petite taille est de 40000 €). Toutefois, il est raisonnable de penser que le prix d'un équipement thermosonique ou thermographique serait moindre que celui des infrastructures mises en place actuellement présentant des inconvénients divers.

Le tableau ci dessous résume les avantages et inconvénients des deux méthodes :

	Excitation Acoustique	**Excitation Thermique**
Temps de calcul	Equivalent	
Problèmes de sécurité	Non	Précautions (Laser)
Aspect financier	Equivalent	
Nature des matériaux	Equivalente	
Reproductibilité	Moyenne	Bonne
Mise en œuvre	Avec contact	Sans contact
Précision de la détection	Equivalente	
Temps de mesure	Quelques secondes	Quelques minutes
Possibilité de détérioration du matériau	Oui	Non

Tableau conclusion : Récapitulatif des avantages et inconvénients des deux méthodes

- Développement prévu

Les perspectives portent sur l'application des deux méthodes étudiées à des pièces de plus grandes dimensions, impliquant donc une étude de faisabilité à l'échelle industrielle. Des tests sur des pièces à géométrie complexe (comme des petites courbures) permettront d'étendre les possibilités d'inspection de la thermosonique et de l'excitation thermique. Il serait aussi intéressant de réaliser des essais sur d'autres types de délaminages et sur des composites stratifiés dont l'orientation des fibres est différente.

Afin d'obtenir une cartographie 3D du délaminage, des essais par tomographie ont été envisagés mais dans le cadre de la thèse n'ont pas pu être réalisés. Des futurs essais par cette méthode seront donc mis en place. Une modélisation de la thermosonique et de l'excitation thermique pourra donc ensuite être réalisée.

De plus, certains aspects de ces deux méthodes peuvent être améliorés :

- Pour la thermosonique, il serait intéressant d'utiliser un dispositif de contrôle de la pression de la sonotrode sur la plaque. Le chapitre 3 a montré que l'énergie transmise au matériau peut se dissiper sous forme de chaleur à l'interface matériau / excitation mécanique. Le couplant entre la sonotrode et le composite stratifié étant du scotch aluminium, il faudrait trouver un autre moyen d'assurer la transmission complète de cette énergie mécanique à la pièce. De plus, une modélisation des expériences par éléments finis permettrait de mieux maîtriser l'excitation mécanique ainsi que de mieux interpréter les images thermographiques. En effet, en analysant l'évolution des courbes de température par la simulation et par l'expérience, il sera possible de remonter à la profondeur du défaut dans le matériau.

- Pour l'excitation thermique, le banc d'essai peut être amélioré. Par exemple, un repositionnement automatique des miroirs suite à la détection de présence d'un défaut diminuerait le temps de l'inspection de l'intégrité de la pièce. Des essais avec un nouveau laser CO_2 seront utiles pour plusieurs raisons. Il sera tout d'abord plus simple d'analyser les signaux enregistrés par la caméra IR si l'excitation n'est qu'une seule gaussienne plutôt que quatre à amplitudes différentes. Ensuite, la modélisation sera plus simple à mettre en place. En effet, une comparaison entre les données obtenues numériquement et expérimentalement pourra augmenter la pertinence de l'évaluation de la forme et de la profondeur du délaminage dans le composite stratifié.

Bibliographie

[1] V. Deutsch, *History of NDT-instrumentation*, Proceedings of the 15th world conference on non-destructive testing, Rome, Italie, Octobre 2000.

[2] E. Banville, J. Verilhac, *La lente émergence de « matériaux nouveaux » les composites*, Les restructurations de l'industrie française, 31 : 132-145, 1985.

[3] GAO report to Congressional Requesters, Aviation Savety, Status of FAA's actions to oversee the safety composite airplanes, Septembre 2011.

[4] E. Valot, Cours matériaux, Université Paris Ouest Nanterre La Défense.

[5] P.P Nanekar, B.K Shah, *Characterization of material properties by ultrasonics*, National Seminar on Non-Destructive Evaluation, India, 2003.

[6] W.D Bascom, J.B Romans, *Microvoids in Glass-Resin Composites. Their Origin and Effect on Composite Strength*, Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, *7* (3) : 172-178, 1968.

[7] T.G. Reynolds, H.L. McManus, *Accelerated tests of environmental degradation in composite materials*, Composites Structure: Theory and practice, 513 - 525, 2000.

[8] J-C. Grandidier, L. Olivier, M. Gigliotti, M-C. Lafarie, D. Quy Vu, *Modélisation de la thermo-oxydation des composites CarboneEpoxy - Etude de l'initiation de l'endommagement*, 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, Août 2009.

[9] B.Madsen, H.Lilholt, *Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibrecomposites - an evaluation of the influence of porosity*, Composites Science and Technology, 63 (9) : 1265-1272, Juillet 2003.

[10] http://www.merl-ltd.co.uk/2003_materials/composites06.shtml

[11] J.-M Berthelot, *Matériaux composites – Comportement mécanique et analyse des structures*, Editions TEC & DOC, 3ème édition, page 236, 1999.

[12] S. Mohammadi, S. Forouzan-sepehr,A. Asadollahi, *Contact based delamination and fracture analysis of composites*, Thin-Walled Structures, 40 : 595–609, 2002.

[13] http://bintang.site11.com/Boeing_787/Boeing787_files/Specifications.html.

[14] J.Dumont-Fillon, *Contrôle Non Destructif (CND)*,Techniques de l'ingénieur, dossier R1400, Janvier 1996.

[15] Y.Gamot, *Méthodologie Hélium*, journées COFREND, Toulouse, 2008.

[16] O.Hunaidi, W.Chu, A.Wang, W.Guan, *Detecting leaks in plastic pipes*, AWWA, 92(2) : 82-94, Février 2000.

[17] Site internet de la COFREND

[18] J. Dumont-Fillon, "Contrôle non destructif (CND)", Techniques de l'ingénieur, dossier R1400, Janvier 1996.

[19] Jérôme Antoni, Menad Sidahmed, « Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires », Spécial congrès Surveillance 5, Acoustique & Techniques n° 38, 2004.

[20] M.Riethmuller, *L'émission acoustique; applications aux équipements industriels*, Toulouse, COFREND 2008.

[21] A. Hecht, *Time of Flight Diffraction Technique (TOFD) - An Ultrasonic Testing Method for all Applications?,* NDTnet , 2(09), 1997.

[22] A. Gheorghe, V. Simona, A. Veronica, O. Elena Amza, M.Dobre, *Research on ultrasonic non-destructive examination in water immersion of a composite material*, Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Finite Differences – Finite Elements – Finite Volumes – Boundery Elements, Bucarest, Romanie, Avril 2010.

[23] V.V. Kozhushko, P. Hess, *Laser-induced focused ultrasound for nondestructive testing and evaluation* , Journal of applied physics, 103(12), 2008.

[24] D.W. Blogget, K. C.Baldwin, *Laser-Based Ultrasonics : Applications PPL*, Johns Hopkins APL Technical Digest, 26(1) : 36 - 45, 2005.

[25] D. Lévesque, S.E. Kruger,G. Lamouche, R. Kolarik II, G. Jeskey, M. Choquet, J.-P. Monchalin, *Thickness and grain size monitoring in seamless tube-making process using laserultrasonics***,** , NDT & E International, 39(8) : 622 - 626, 2006.

[26] H.Voillaume, B.Campagne, *Les ultrasons laser appliqués aux matériaux composites aéronautiques*, Journées COFREND, Toulouse, 2008.

[27] R. J. Ditchburn, S. K. Burke and C. M. Scala, *NDT of welds: state of the art*, NDT&E International, 29(2) : 11 - 17, 1996.

[28] J. L. B. C. Veiga, A. A. de Carvalho, I. C. Da Silva, J. M. A. Rebello, *The use of artificial neural network in the classification of pulse-echo and TOFD Ultra-Sonic signals*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 27(4) : 394 - 398 , 2005.

[29] A. A. Malcolm, T. Liu, *Case Studies in the Use of Computed Tomography for Non-Destructive Testing - Failure Analysis and Performance Evaluation*, Singapore International NDT Conference & Exhibition , Novembre 2011.

[30] V. Carmona, *Etude de l'endommagement de matériaux composites par tomographie X et émission acoustique*, Thèse de Doctorat en génie des matériaux, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, juillet 2009.

[31] http://www.xraytomography.altervista.org/Indt.htm.

[32] E. Rayer, F. Daubigney, M. Peyrot, *L'utilisation de la vidéoendoscopie en remplacement de la radiographie pour les contrôles non destructifs*, journées Cofrend Toulouse, 2008.

[33] Projet CODECI CEA.

[34] P.Smigielski, *Holographie optique Interférométrie holographique*, Techniques de l'ingénieur, dossier R6330, Mars 2001.

[35] R. Ambu, F. Aymerich, F. Ginesu, P. Priolo, *Assessment of NDT interferometric techniques for impactdamage detection in composite laminates*, Composites Science and Technology 66 : 199–205, 2006.

[36] J.Petit, *Comportement élasto-plastique et localisation des déformations – Etude multi-échelle par ESPI et émission acoustique*, Thèse de Doctorat en mécanique des matériaux, Université de Technologie de Troyes, Novembre 2010.

[37] R. Pezzoni, *Laser-Shearography for Nondestructive Testing of Large Area Composite Helicopter Structures*, 15th World Conference on Nondestructive Testing, Rome, Italie, Octobre 2000.

[38] G. De Angelis, M. Meo, D.P. Almond, S.G. Pickering, S.L. Angioni, *A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization*, NDT & E International, 45(1) : 91 - 96, 2012.

[39] X. Maldague, *Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing*, John Wiley and Sons, New York, 2001.

[40] G. M. Carlomagno, C. Meola, *Comparison between thermographic techniques for frescoesNDT*, NDT & E International, 35(8) : 559 - 565, 2002.

[41] J. Renshaw, S . D. Holland, D. J. Barnard, *Viscous material-filled synthetic defects for vibrothermography* , NDT&E International, 42 : 753 - 756, 2009.

[42] G. Zenzinger, J. Bamberg, W. Satzger and V. Carl, *Thermographic Crack Detection by Eddy Current Excitation*, Nondestructive Testing and Evaluation, 22(2) : 101 - 111, 2007.

[43] M. Wanin, *Evaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 1)*, Techniques de l'ingénieur, Dossier M4131, Mars 2002.

[44] R.B Thompson, *Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers*, Physical Acoustics, 19 : 157 - 200, 1990.

[45] R.Ribichini, F.Cegla, P.B Nagy, P.Cawley, *Experimental and numerical evaluation of electromagnetic acoustic transducer performance on steel materials*, NDT&E International 45 : 32-38, 2012.

[46] J-M. Decitre, *Modélisation électromagnétique et réalisation d'un dispositif d'imagerie magnéto-optique quantitatif pour la caractérisation des endommagements des structures aéronautiques en alliage léger*, Thèse de Doctorat en Electronique, Electrotechnique, Automatique, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Juillet 2003.

[47] J. Lee, R. Wang, T. Shoji, S. Hong, *Non-destructive testing in the high- temperature regime by using a magneto-optical film*, NDT&E International, 41(6) : 420 - 426, 2008.

[48] Michael F.Modest, *Radiative Heat Transfer, Second Edition*, Academic Press, 2003.

[49] Sacadura, *Initiation aux transferts thermiques*, Tech & Doc Lavoisier, 4ème tirage édition, 1993.

[50] D. Marr, E. Hildreth, *Theory of EdgeDetection*, Proc. R. Soc. London, B 207, 187-217, 1980.

[51] X. P. V. Maldague, *Theory and Practice of InfraredTechnology for NonDestructiveTesting*, John Wiley-Interscience, 2001.

[52] S. M. Shepard, *Advances in Pulsed Thermography*, Thermosense XXIII, 4360 : 511 - 515, 2001.

[53] T. Sakagami, S. Kubo, *Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations*, Journal of Infrared Physics & Technology, 43 : 211 - 218, 2002.

[54] N. Rajic, *Principal component thermography for flaw contrast enhancement andflaw depth characterisation in composite structures*, Composite Structures, 58 : 521-528, 2002.

[55] A. Salazar, A. Serrano, R. Llinares, L. Vergara, J. Igual, *ICA mixture modeling for the classification of materials in impact-echotesting,* 8th International Conference, Paraty, Brésil, 2009.

[56] S. Mattéi, 2005, *Rayonnement thermique des matériaux opaques,* Techniques de l'Ingénieur, Dossier BE8210, 2005.

[57] T. Hamrelius, *Accurate temperature measurement in thermography.Anoverview of relevant features, parameters and definitions*, Thermosense XIII, 146 (7) : 448-457, 1991.

[58] http://www.gemini.edu/?q=node/10789.

[59] O. Carpentier, *Auscultation de sites miniers par méthodes thermiques. Suivi des réactions de combustion*, Thèse de doctorat en sciences pour l'ingénieur, Université d'Artois, 2006.

[60] http://www.microscopyu.com/articles/digitalimaging/ccdintro.html.

[61] D.Pajani, L.Audaire, *Thermographie - Technologies et applications*, Techniques de l'ingénieur, Dossier R2741, Mars 2013.

[62] K.Pearson, *On lines and planes of closest fit to systems of points in space*, The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 2 : 559 - 572, 1901.

[63] A. Brun Buisson, V.Lattuati, D.Lemoine, *Présegmentation d'images couleur par la transformée de Karhunen-Loève*, 14ème colloque GRETSI, Juan-Les-Pins, Septembre 1993.

[64] S.Hermosilla, P.Y Joubert, D. Placko, F.Lepoutre, P.Piriou, *Enhancement of open-cracks detectionusing a principal component analysis/wavelet technique in photo-thermal non-destructive testing*, Proceedings of QIRT'02 Conference, Dubrovnik, Croatie, 2002.

[65] N.Rajic*, Principal component thermography for flawcontrastenhancement and flaw depth characterisation in composite structures*, Composite structures, 58 : 521 - 528, 2002.

[66] K.V Mardia, J.T Kent, J.M Bibbyn, *Multivariateanalysis*, Academic press, 1979.

[67] A.Borck, *Numerical methods for least squares problems*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1996.

[68] C.Jutten, R.Gribonval, *L'analyse en composantes indépendantes : un outil puissant pour le traitement de l'information*, 19ème colloque GRETSI, Septembre 2003.

[69] A.Hyvärinen, E.Oja, *Independant component analysis : algorithms and applications*, Neural Networks, 13(4-5) : 411 - 430, 2000.

[70] V. Vavilov, *Thermal non-destructive testing : short history, state of the art and trends*, 10th European conference and exhibition on non-destructive testing, Tomsk, Russie, 2010.

[71] C. Bouvet, *Impact damages on composite laminate*, Comptes Rendus des JNC, Poitiers, 2011.

[72] T. J. Barden, D. P. Almond, S. G. Pickering, M. Morbidini, P. Cawley, *Detection of impact damage in CFRP composites by thermosonics*, NDT & E International, 22(2 - 3) : 71 - 82, 2007.

[73] P. Menner, C. Spiessberger, A. Gleiter, G. Busse, *Aerospace application of lockin thermography with optical, ultrasonic and inductive excitation*, AIP Conference, Kingston (Rhode Island), Etats-Unis, Juillet 2009.

[74] M.Morbidini, P.Cawley, *The reliable implementation of thermosonics NDT*, 17th world conference on non-destructive testing, Shanghai, Chine, Octobre 2008.

[75] LD. Favrao, X. Han, Z.Ouyang, G. Sun, RL.Thomas, *Sonic IR imaging of cracks and delamination*, Analytical Sciences, 17 : 451-453, 2001.

[76] site internet de Synaptec.

[77] C.Bathias, P.C Paris, *Gigacyclique fatigue in mechanical practice*, Marcel Dekker, New York, 2005.

[78] I. Gutu, C.Petre, I. Ivanov, I.N Mihailescu, *Optical resonator for high-power transverse flow CO_2 lasers*, Optics & laser technology, 35(2) : 105 - 113, 2003.

[79] Site Thorlabs

[80] Jean-Pierre PRENEL*, Physique du laser*, Techniques de l'ingénieur, Dossier AF3270, Janvier 1990.

[81] M. Susa, *Numerical modeling of pulse thermography experiments for defect characterisation purposes*, Thèse de Doctorat en génie électrique, Université des sciences et de génie de Laval, Québec, 2009.

[82] A. Mendioroz, A. Castelo, R. Celorrio, A. Salazar, *Characterization of vertical buried defects using lock-in vibrothermography : Direct Problem*, Measurement Science and Technology, 24(6), 2013.

[83] A.P Bovsunovsky, *The mechanisms of energy dissipation in the non-propagating fatigue cracks in metallic materials*, Engineering Fracture Mechanics, 71 : 2271 - 2281, 2004.

Table des figures

Figure 1.1: Exemple de défauts présents dans les composites [10] 7
Figure 1.2: Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés [11] 8
Figure 1.3: Délaminage (a et b),Délaminage et rupture (c et d) [12] 9
Figure 1.4 : Répartition en masse des matériaux du nouveau Boeing 787 [13] 10
Figure 1.5 : Principe du ressuage 11
Figure 1.6 : Détection de défauts débouchant par magnétoscopie 13
Figure 1.7: Détection de défauts par courants de Foucault 14
Figure 1.8 : Principe de la détection de la propagation de défauts par émission acoustique 15
Figure 1.9 : Principe des ultrasons par immersion 16
Figure 1.10: Principe de détectiondes défauts par ultrasons laser [24] 17
Figure 1.11 : Photographie et cartographie par ultrasons laser de l' épaisseur d'un panneau composite [26] 17
Figure 1.12 : Illustration du fonctionnement de la radiographie 18
Figure 1.13: Exemple de visualisation tridimensionnelle de ruptures d'inclusions pour trois déformations 19
Figure 1.14: Principe de la tomographie [31] 19
Figure 1.15 : Principe de l'holographie [34] 20
Figure 1.16 : Principe de l'interférométrie de Speckle [36] 21
Figure 1.17: Détection et mesure de défauts par shearographie [38] 22
Figure 1.18 : Principe du CND par thermographie 23
Figure 1.19 : Images thermographiques d'un échantillon de plâtre avec des défauts en plastique [40] 24
Figure 1.20: Principe des palpeurs EMAT 27
Figure 1.21: Principe de CND par magnéto-optique [47] 28
Figure 2.1 : Le spectre des ondes électromagnétiques 33
Figure 2.2 : Réception du rayonnement thermique par un corps commun 34
Figure 2.3 : Vue de face du corps noir de laboratoire 36
Figure 2.4 : Direction d'émission et angle solide pour l'hémisphère de rayon unité 37
Figure 2.5: Courbes de Planck pour différentes températures 39
Figure 2.6 : Emissivité totale directionnelle de quelques diélectriques en fonction de la direction [56] 41
Figure 2.7 : Mesure de l'émissivité des échantillons (Caméra IR couplée avec un objectif pour microscopie) 42
Figure 2.8 : Composition du rayonnement perçu par la caméra IR 43
Figure 2.9 : Transmission atmosphérique dans l'infrarouge moyen [58] 44
Figure 2.10 : Facteur moyen de transmission atmosphérique en fonction de la distance et de la fenêtre d'observation [59] 44
Figure 2.11 : Fonctionnement d'un CCD [60] 45
Figure 2.12 : Réponse des détecteurs [61] 46
Figure 2.13 : Correction de la non-uniformité spatiale 47

Figure 2.14 : Représentation matricielle 3D du film enregistré 48
Figure 2.15 : Visualisation du gradient sur un essai dont la fréquence d'acquisition est de 200Hz 49
Figure 2.16 : Mise en évidence du gradient maximum et minimum pour la caractérisation de l'évolution instantanée de la température 50
Figure 3.1 : Plaque ayant été soumise à une tour de chute [72] 55
Figure 3.2 : Plaques stratifiées impactées utilisées pour les essais thermosoniques 56
Figure 3.3 : Schéma de principe de la thermosonique 57
Figure 3.4 : Schéma de fonctionnement de l'excitation mécanique par sonotrode 58
Figure 3.5 : Schéma de l'expérience thermosonique 59
Figure 3.6 : Photo du support et de la plaque 59
Figure 3.7 : Propagation du délaminage jusqu'en surface durant un essai avec une amplitude élevée de la sollicitation 60
Figure 3.8 : Mise en évidence des différentes positions de la sonotrode pour les essais sur le délaminage 35J 61
Figure 3.9 : Répartition de la température après un refroidissement de 10 secondes (délaminage 35J, P = 30W, Temps d'impulsion = 5s, Distance = 8cm) 62
Figure 3.10 : Répartition de la température à t =2,5s (délaminage 35J, P = 30W, Temps d'impulsion = 5s, Distance = 8cm) 63
Figure 3.11 : Répartition de la température à t =5s (délaminage 35J, P = 30W, temps d'impulsion = 5s, distance = 8cm) 63
Figure 3.12 : Evolution de la température le long du profil à différents temps d'impulsion 64
Figure 3.13 : Evolution de la température pour 7 emplacements distincts (délaminage 35J, P = 30W, temps d'impulsion = 5s, distance = 8cm) 65
Figure 3.14 : Principe des essais par ultrasons en immersion réalisés à l'ISAT 67
Figure 3.15 : Déplacement du transducteur lors d'un essai C-scan (Vus du dessus) 67
Figure 3.16 : Principe des ultrasons par immersion 68
Figure 3.17 : Résultats images C-scan 69
Figure 3.18 : Hypothèse simplificatrice de la détection du contour du délaminage 70
Figure 3.19 : Sélection de la température de seuil (Différenciation zone saine / zone délaminée) 72
Figure 3.20 : Evolution de la température de seuil pour une puissance d'excitation de 15W 73
Figure 3.21 : Evolution de la température de seuil pour une puissance d'excitation de 30W 74
Figure 3.22 : Evolution de la température de seuil pour une puissance d'excitation de 45W 74
Figure 3.23 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 35J pour une puissance fixée à 15W 75
Figure 3.24 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 35J pour une puissance fixée à 30W 76
Figure 3.25 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 35J pour une puissance fixée à 45W 76
Figure 3.26 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 40J pour une puissance de 30W 78
Figure 3.27 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 50J pour une puissance de 30W 78
Figure 3.28 : Evolution de l'écart relatif pour le délaminage 60J pour une puissance de 30W 79
Figure 3.29 : Modification proposée du protocole expérimental 80
Figure 3.30 : Exemple de création d'un délaminage dans un stratifié 81
Figure 3.31 : Images obtenues par ultrasons C-scan 82
Figure 3.32 : Images post-traitées pour le délaminage 35J et l'essai P = 30W, d = 8cm, t = 5s 83
Figure 3.33 : Algorithme du post-traitement 85
Figure 3.34 : Tailles des différents pixels pour le C-scan et la thermosonique 86
Figure 3.35 : Transformation de la matrice thermosonique post-traitée 86

Figure 3.36 : Application du seuil à la matrice thermosonique 87
Figure 3.37 : Comparaison des aires de détection du délaminage (Exemple utilisé : plaque 60J) 88
Figure 3.38 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type pour le délaminage 35J (P = 15W, d = 8cm) 89
Figure 3.39 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 15W, d = 13cm) 90
Figure 3.40 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 15W, d = 18cm) 91
Figure 3.41 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 30W, d = 8cm) 92
Figure 3.42 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 30W, d = 13cm) 92
Figure 3.43 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 30W, d = 18cm) 93
Figure 3.44 : Histogramme de la moyenne et de l'écart type du délaminage 35J (P = 45W, d = 8cm) 94
Figure 3.45 : raidisseur en carbone/époxyde 95
Figure 3.46 : Mise en place de la thermosonique pour des pièces à géométrie non plane 96
Figure 4.1 : Réalisation du faisceau divergent avec une lentille ZnSe 98
Figure 4.2 : Réflectivité d'un miroir en or [79] 99
Figure 4.3 : Espace vide entre deux taches laser 100
Figure 4.4 : Superposition de deux taches laser 100
Figure 4.5 : Banc optique conçu pour les essais thermographiques 101
Figure 4.6 : Trajet du faisceau laser CO_2 102
Figure 4.7 : Cartes des commandes des moteurs pas à pas 102
Figure 4.8 : Modèle utilisé pour la simulation sous COMSOL 105
Figure 4.9 : Courbes de température entre une zone saine et une zone défectueuse (temps d'arrêt des miroirs = 2 s, fréquence d'excitation = 1Hz et t_{laser} = 0.5T) 106
Figure 4.10 : Courbes de température entre une zone saine et une zone défectueuse (temps d'arrêt des miroirs = 3 s, fréquence d'excitation = 5Hz et t_{laser} = 0.75T) 107
Figure 4.11 : Distance minimale de la caméra IR à l'échantillon 108
Figure 4.12 : Premières images thermographiques 110
Figure 4.13 : Mise en évidence du décalage suivant l'axe des *y* et de la dernière zone éclairée 110
Figure 4.14 : Conséquence de la déformation de la cavité du laser CO_2 111
Figure 4.15 : Représentation de la température sur deux zones différentes 112
Figure 4.16 : Images thermographiques à deux temps différents 112
Figure 4.17 : Evolution de la température pour les deux pixels considérés 113
Figure 4.18 : Evolution de la température pour les deux pixels considérés avec recalage temporel. 113
Figure 4.19 : Augmentation de la température due à la diffusion de la chaleur 114
Figure 4.20 : Evolution du delta de température pour le délaminage 35J 115
Figure 4.21 : Evolution du delta de température pour le délaminage 40J 116
Figure 4.22 : Evolution du delta de température pour le délaminage 50J 116
Figure 4.23 : Evolution du delta de température pour le délaminage 60J 117
Figure 4.24 : Commande de l'excitation laser (Méthode Flash) 118
Figure 4.25 : Schéma de l'essai thermographique par transmission et image thermographique à l'instant t d'un essai en transmission 119

Figure 4.26 : Evolution temporelle de la température pour une zone saine et une zone défectueuse $tlaser = 10s$ 120
Figure 4.27 : Histogramme de la différence de détection du délaminage 35J ($tlaser = 5s$)..... 120
Figure 4.28 : Histogramme de la différence de détection du délaminage 35J ($tlaser = 10s$)..... 121
Figure 4.29 : Commande de l'excitation laser (Flux périodique)..... 122
Figure 4.30: Evolution temporelle de la température sur une zone saine et une zone défectueuse lors d'un essai en transmission sous sollicitation périodique ($tlaser = 10s$). 122
Figure 4.31 : Histogramme de la différence de détection du délaminage 35J ($t = 0{,}16T$) 123
Figure 4.32 : Histogramme de la différence de détection du délaminage 35J ($tlaser = 0{,}33T$)..... 123
Figure 4.33 : Zoom de la figure 27, étude de l'amplitude 125
Figure 4.34 : Cartographie des résultats de l'étude de l'amplitude 125
Figure 4.35 : Zoom de la Figure 4.30, étude de la phase lors du refroidissement..... 126
Figure 4.36 : Zoom de la Figure 4.30, étude de la phase lors du chauffage..... 127
Figure 4.37 : Comparaison des aires de détection du délaminage pour un essai de l'excitation thermique en transmission (Exemple utilisé : plaque 35J) 128

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Propriétés mécaniques de différentes fibres [4] 4
Tableau 1.2 : Propriétés physiques de l'UD en fibres de carbone 5
Tableau 1.3 : Principales caractéristiques des méthodes traditionnelles de contrôle non destructif utilisées dans l'industrie 26
Tableau 3.1 : Conditions expérimentales pour tous les essais 61
Tableau 3.2 : Equations des droites représentant l'évolution de l'écart relatif 77
Tableau 3.3 : Equations des droites de l'évolution de l'écart relatif pour les trois délaminages 79
Tableau 3.4 : Valeurs de l'écart relatif pour les trois délaminages 79
Tableau 4.1 : Propriétés physiques de la plaque en carbone/époxyde 104
Tableau 4.2 : Conditions aux limites du modèle 104
Tableau 4.3 : Conditions expérimentales pour tous les essais 109
Tableau 4.4 : Pourcentage de différence de forme entre les deux méthodes lors du "refroidissement" 128
Tableau 4.5 : Pourcentage de différence de forme entre les deux méthodes lors du "chauffage" ... 128

Annexes

Chapitre 2

- Analyse en composantes principales

Soit la fonction $x(t,w)$dont t est le temps et w le vecteur de variables. Supposons que $x(t_i,w_j)$est une fonction finie et que $t = t_1,\dots,t_N$ et $w = w_1,\dots,w_n$.

Les données recueillies pour un temps donné sont désignées par :

$$\boldsymbol{x}_i = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(t_i,\boldsymbol{w}_1) \\ \vdots \\ \boldsymbol{x}(t_i,\boldsymbol{w}_n) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n, i = 1,\dots,N$$

Comme décrit précédemment, il faut chercher un ensemble de vecteurs orthogonaux $\boldsymbol{u}_j \in \mathbb{R}^n, j = 1,\dots,N$ telsque $\boldsymbol{x}_i = \sum_{j=1}^{n} \gamma_{ji}\boldsymbol{u}_j, i = 1,\dots,N$à savoir

$$\underbrace{[\boldsymbol{x}_1 \dots \boldsymbol{x}_N]}_{\boldsymbol{X}} = \underbrace{[\boldsymbol{u}_1 \dots \boldsymbol{u}_N]}_{\boldsymbol{U}} \overbrace{\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \cdots & \gamma_{NN} \end{pmatrix}}^{\Gamma}, \boldsymbol{U} * \boldsymbol{U} = \boldsymbol{I}_N \quad (\dots)$$

De plus, il est nécessaire que les éléments tronqués $\widehat{\boldsymbol{x}}_i = \sum_{j=1}^{k} \gamma_{ji}\boldsymbol{u}_j, i = 1,\dots,N$approximent les éléments de $\{\boldsymbol{x}_i\}$ de façon optimale :

$$\underbrace{[\widehat{\boldsymbol{x}}_1 \dots \widehat{\boldsymbol{x}}_N]}_{\widehat{\boldsymbol{X}}} = \underbrace{[\boldsymbol{u}_1 \dots \boldsymbol{u}_N]}_{\boldsymbol{U}_k} \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{k1} & \cdots & \gamma_{kN} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n*N}, k < N$$

Il est souvent nécessaire de minimiser la norme$||\boldsymbol{X} - \widehat{\boldsymbol{X}}||_2$. Cette dernière équation est connue sous le nom de « décomposition orthogonale propre » de la famille$\{\boldsymbol{x}_i\}$. Le problème est précisément celui résolu par les résultats de Schmidt-Mirsky-Eckard-Young. Etant donné **X**, soit $\boldsymbol{X} = U\sum\boldsymbol{V}^*$sa décomposition en valeurs singulières.

Les colonnes de $\boldsymbol{U}$sont les fonctions propres voulues et les coefficients sont donnés par$\Gamma = \sum\boldsymbol{V}^*$.

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{X}\boldsymbol{V}\sum^{-1}$$

- Analyse en composantes indépendantes

Avant d'appliquer l'algorithme Fast ICA, le vecteur de données $\boldsymbol{X}$doit être centré et pondéré.

L'algorithme itératif trouve la direction du vecteur de pondération $\boldsymbol{W}$ maximisant la non-gaussianité de la projection $\boldsymbol{W}^T\boldsymbol{X}$des données$\boldsymbol{X}$.

Soit $g$la fonction dérivée de$f$, une fonction non quadratique. Hyvärinen affirme que les bonnes valeurs de $f$sont :

$$f(u) = \log\cosh(u),\ g(u) = \tanh(u) \text{ et } g^{'}(u) = 1 - \tanh^2(u)$$

$$f(u) = -e^{-u^2/2},\ g(u) = ue^{-u^2/2} \text{ et } g'(u) = (1-u^2)e^{-u^2/2}$$

La première équation est équation polyvalente tandis que la seconde est très robuste.

L'algorithme FastICA se présente ainsi :

a)$\boldsymbol{W}^+ \leftarrow E\{\boldsymbol{X}g(\boldsymbol{W}^T\boldsymbol{X})\} - E\{\boldsymbol{X}g'(\boldsymbol{W}^T\boldsymbol{X})\}\boldsymbol{W}$

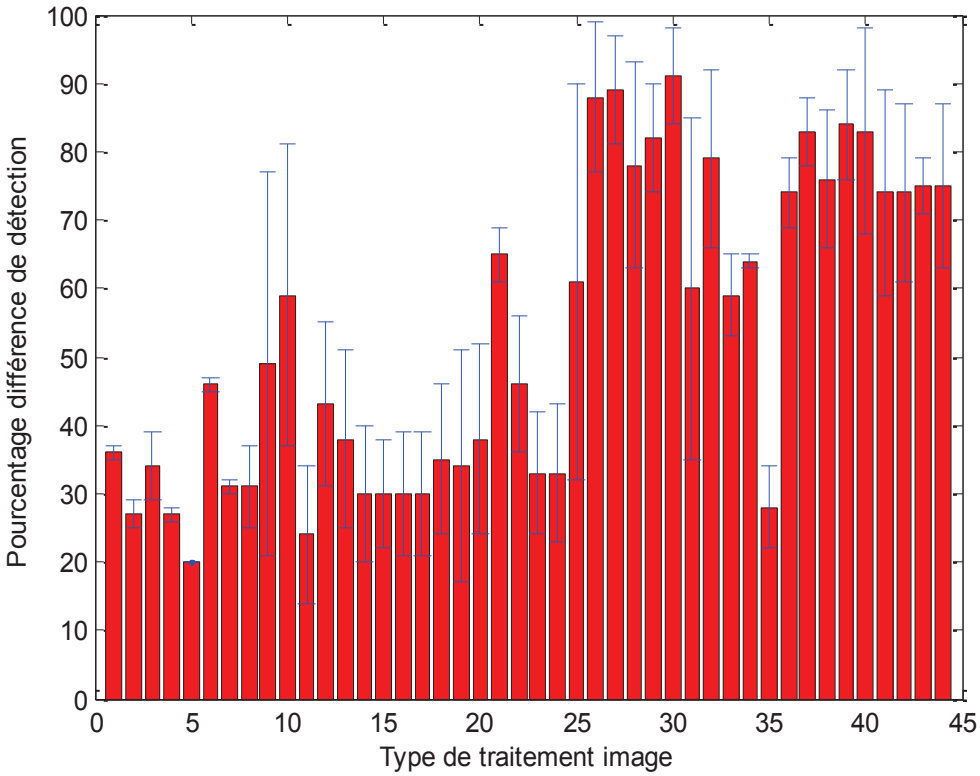
b)$\boldsymbol{W} \leftarrow \boldsymbol{W}^+/||\boldsymbol{W}^+||$

c)S'il n'y a pas convergence, retour à l'étape a)

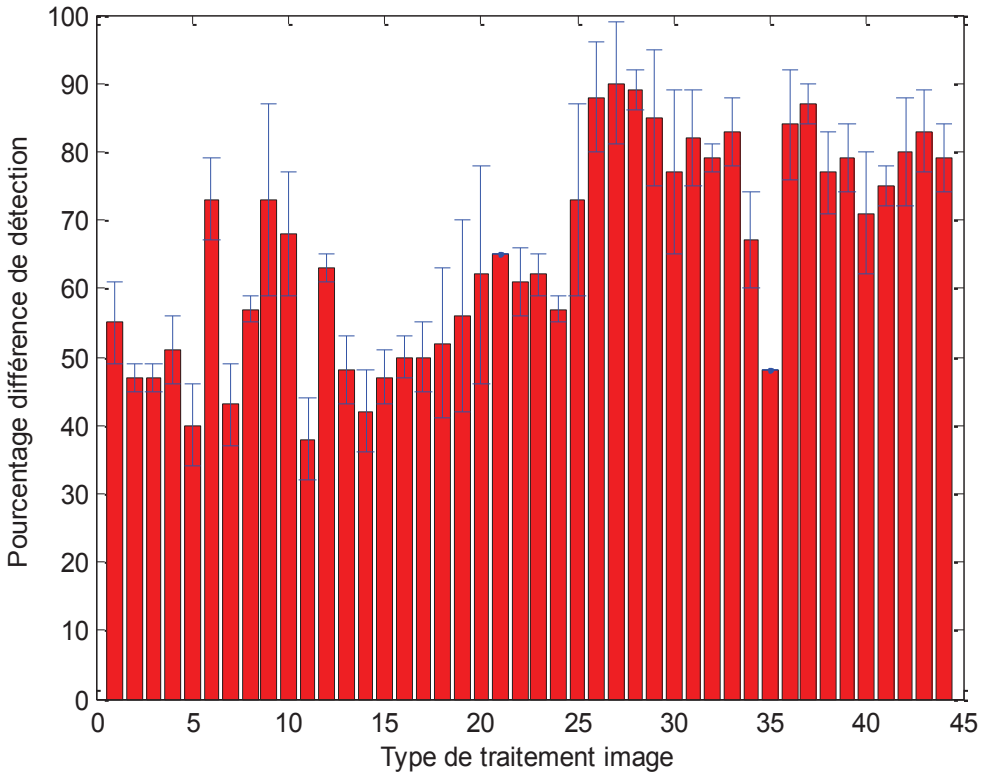
Chapitre 3

Délaminage 40 J

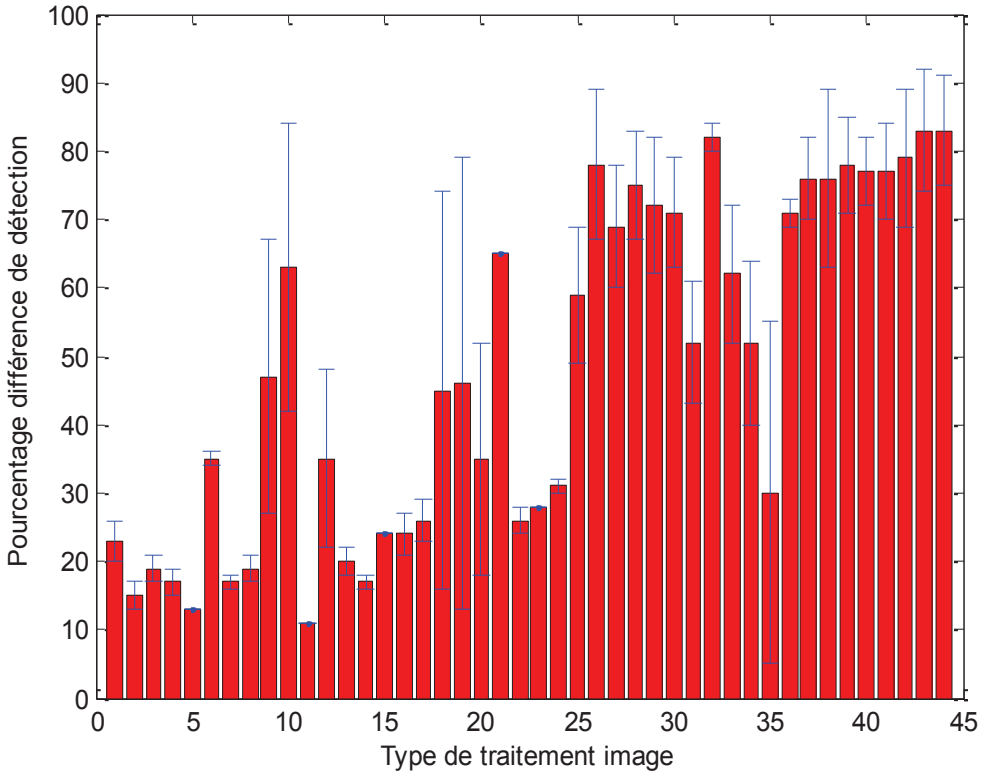
- P = 15W et d = 8cm



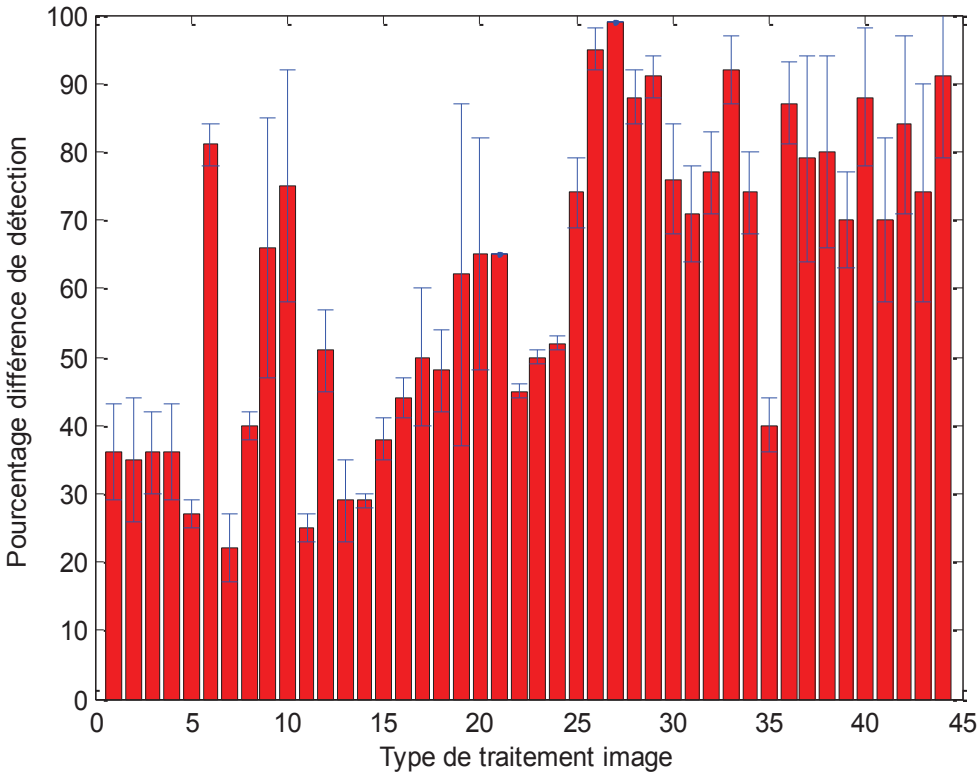
- P = 15W et d = 13cm



- P = 30W et d = 8cm

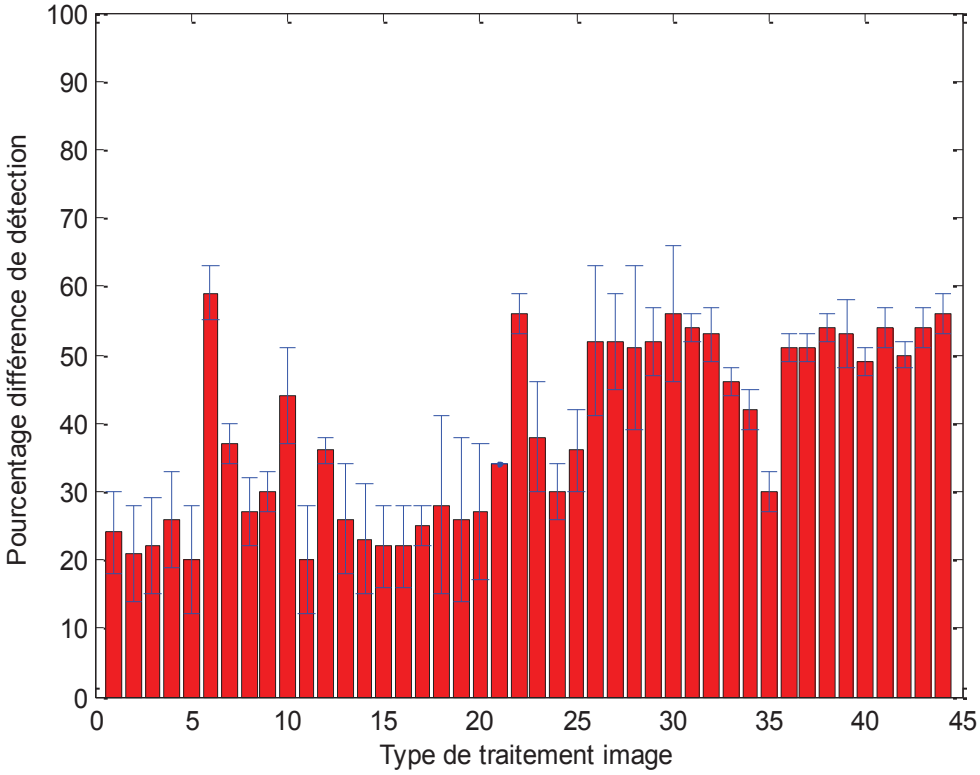


- P = 30W et d = 13cm

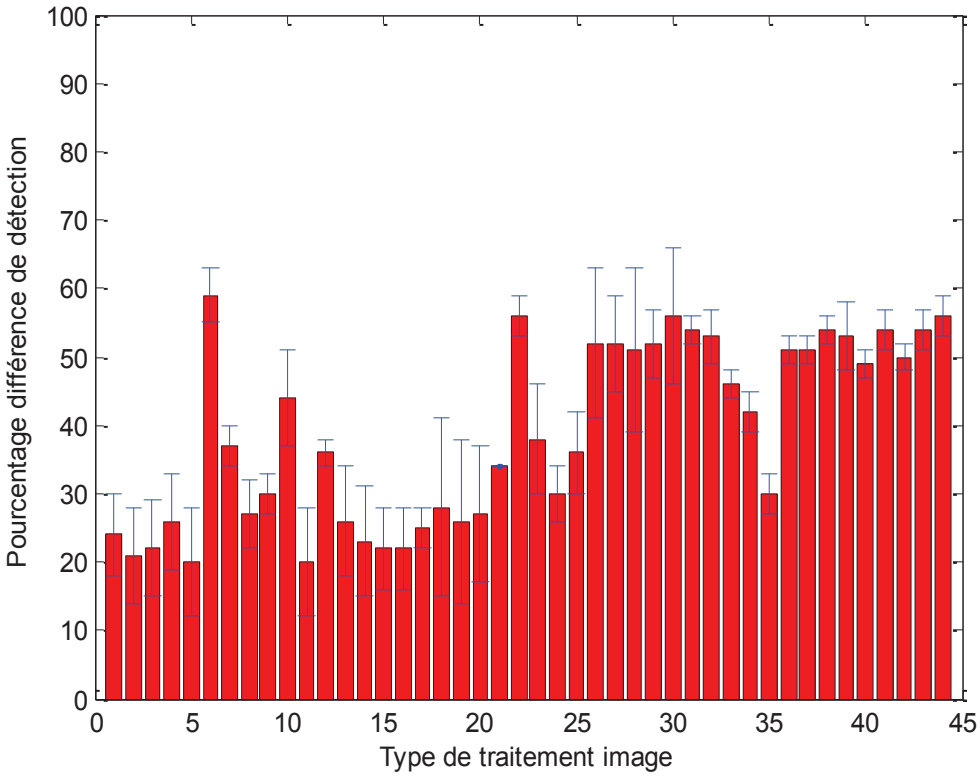


Délaminage 50 J

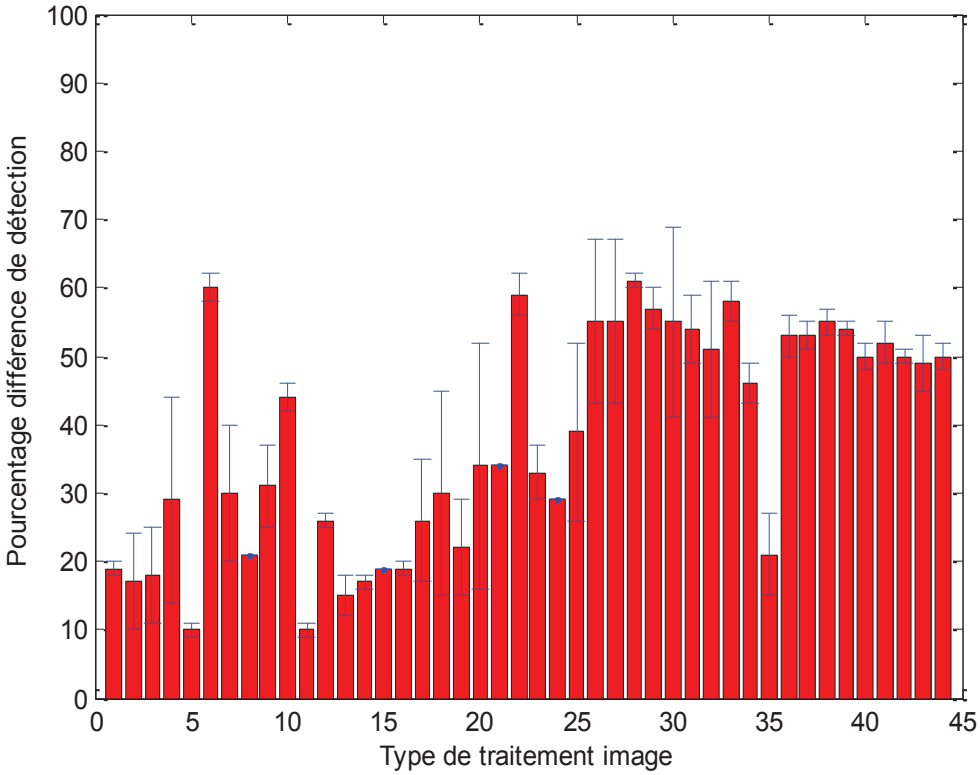
- P = 15W et d = 13cm



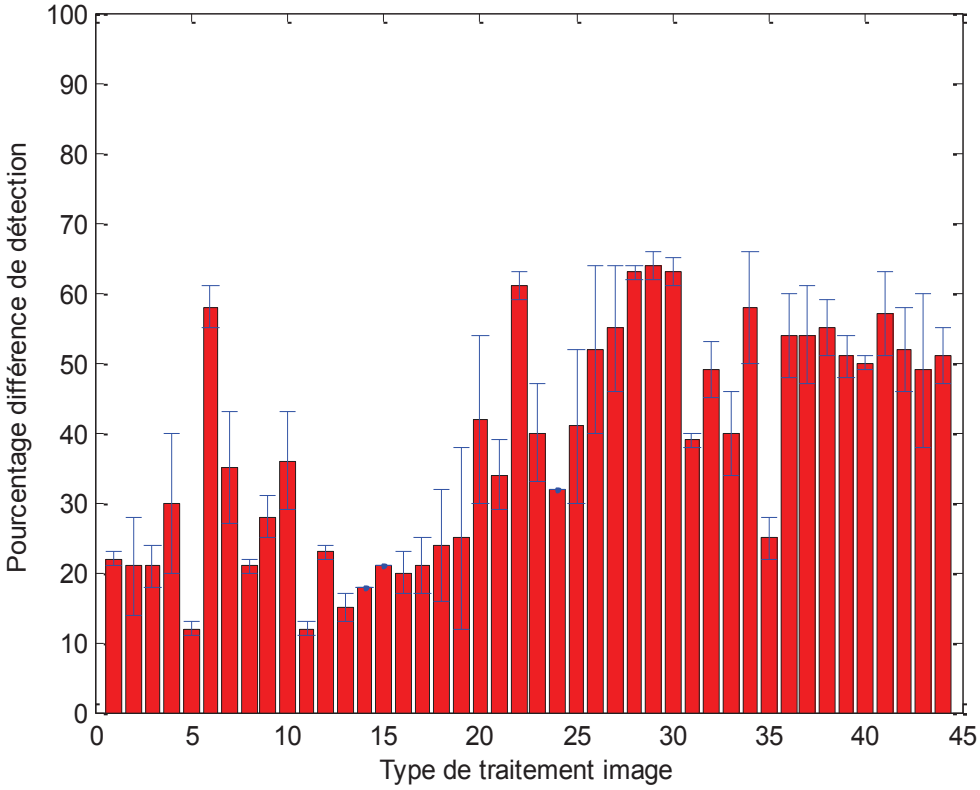
- P = 15W et d = 23cm



- P = 30W et d = 13cm

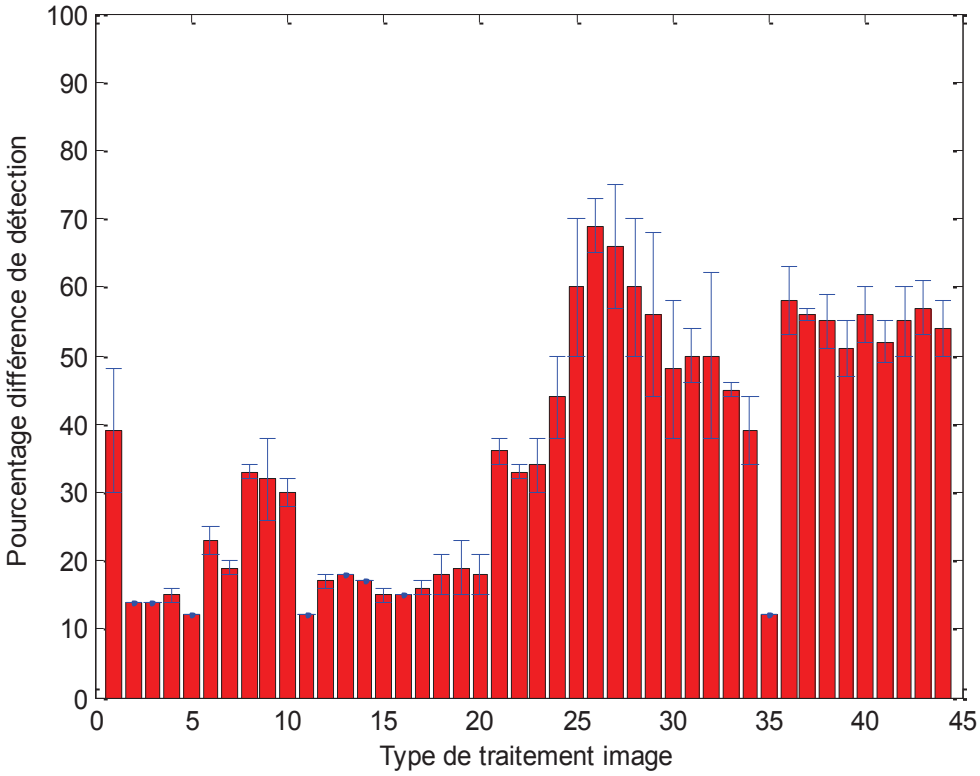


- P = 30W et d = 23cm

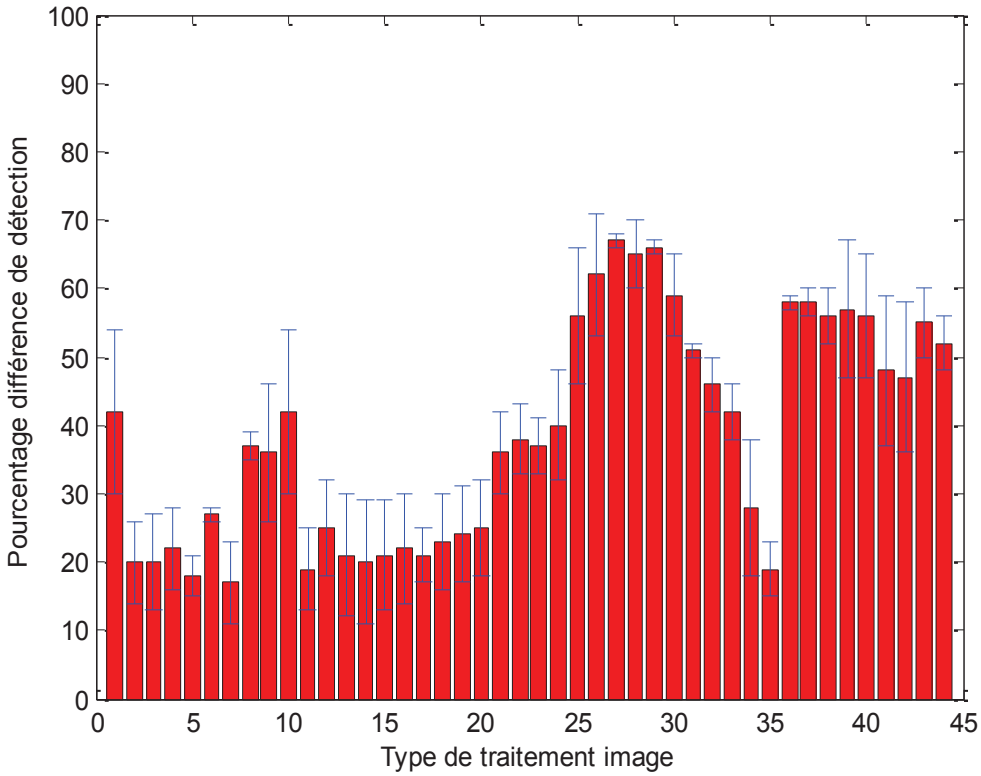


Délaminage 60J

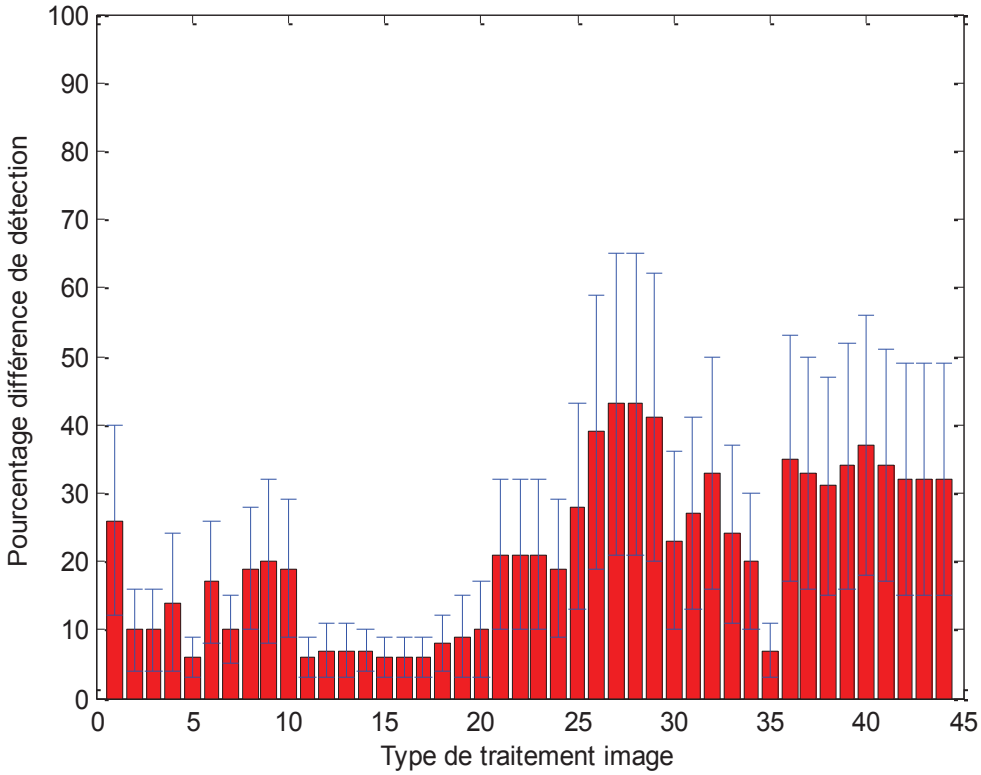
- P = 15W et d = 8cm



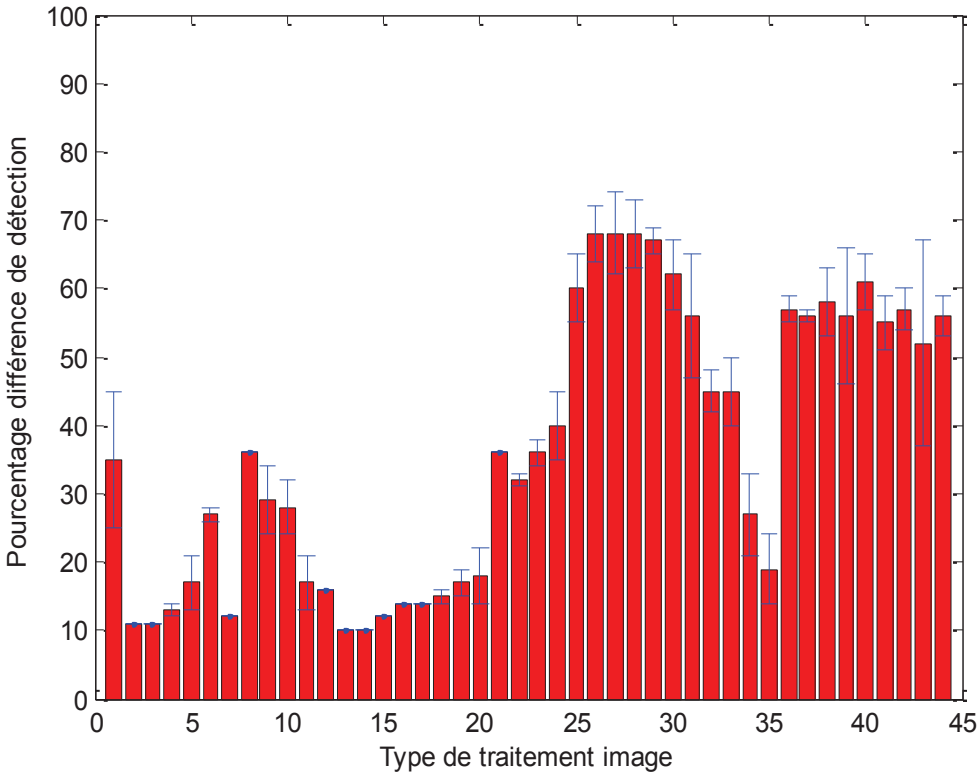
- P = 15W et d = 18cm



- P = 30W et d = 8cm



- P = 30W et d = 18cm



Résumé

Afin de pouvoir détecter un défaut dans un composite, plusieurs méthodes de contrôle non destructif ont été développées. Le but de ce travail est de localiser un délaminage dans un stratifié carbone / époxyde en utilisant deux méthodes : la thermosonique et la thermographie. La première méthode consiste en une excitation par ultrasons et une détection par caméra IR. Pour la seconde technique, le matériau est irradié par une onde thermique et la détection est aussi réalisée par une caméra IR. Afin de comparer les résultats obtenus, des tests par immersion ultrasons C-scan ont été réalisés sur les échantillons. Cette méthode permet d'obtenir une cartographie du délaminage présent dans le stratifié.

Un algorithme de comparaison entre la détection du délaminage faite par les ultrasons C-scan et les deux méthodes a permis de révéler les différences de forme du défaut détecté. Différents traitements d'images ont été appliqués aux images IR obtenues : des analyses temporelles et des analyses spatiales/temporelles. L'étude de l'évolution instantanée ainsi que l'évolution globale de la température se sont révélées prometteuses pour la thermosonique. L'image la plus décorrélée obtenus par l'analyse en composante principales donne un résultat tout aussi satisfaisant pour cette méthode. Pour la méthode sans contact, la thermographie, l'étude de la phase a permis de révéler la forme du délaminage avec la même précision que la thermosonique.

Une comparaison de ces deux méthodes a été réalisée afin de mettre en évidence leurs avantages et leurs inconvénients.

Mots clés : Contrôle non destructif, thermosonique, thermographie, stratifié carbone / époxyde, traitement d'image, délaminage

Abstract

To detect a defect in a composite, several methods of non destructive testing have been developped. The aim of this work is to find a delamination in polymer matrix laminates thanks to two methods : thermosonics and thermography. The first method consists of an ultrasonic excitation and a detection by an IR camera. For the second technique, the plate is irradiated with a thermal wave and the detection is also performed by an IR camera. To compare the results, ultrasonic immersion tests were performed on the samples. This method provides a map of the delamination in the laminate.

An algorithm for comparing the detection of delamination made by the ultrasonic C-scan and both methods revealed differences in the shape of the detected defect. Several image processing have been applied to the IR images recorded : temporal analysis and spatial / temporal analysis. The study of the instant evolution and the global evolution of the temperature are promissing for thermosonics. The most uncorrelated image obtained by principal component analysis gives is satisfactory for this method. For thermography, the non contact method, the phase study revealed the shape of delamination with the same precision as thermosonics.

A comparison between the two methods was realised to highlight their advantages and their drawbacks.

Keyswords : Non destructive testing, thermosonics, thermography, carbon/epoxy laminate, image processing, delamination