

**Université de Liège
Faculté des sciences appliquées**



**Développement de la thermographie infrarouge
comme méthode d'essais non destructifs pour pièces
aéronautiques en matériaux composites**

Nathalie Gerlach

Ingénieur civil en électromécanique

**Thèse présentée en vue de l'obtention
du grade de Docteur en Sciences Appliquées
Février 2009**



Remerciements

Mes sincères remerciements au Dr Pierre Servais pour son support technique, son enthousiasme permanent mais surtout, pour son amitié.

Je remercie également madame le Professeur Jacqueline Lecomte-Beckers de la faculté des sciences appliquées de l'Université de Liège ainsi que les membres de mon comité de thèse pour leurs conseils avisés, leurs encouragements et pour m'avoir guidée dans les démarches académiques nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

Toute ma reconnaissance au Dr Iberra-Castanedo pour sa gentillesse, son accueil chaleureux et pour toute l'aide qu'il m'a fournie lors des tests expérimentaux effectués à l'Université de Laval ainsi qu'au Professeur Maldague pour m'avoir accueillie dans son laboratoire.

J'exprime ma gratitude à monsieur Edouard David, directeur honoraire de la Haute Ecole Rennequin Sualem, pour m'avoir motivée à effectuer cette thèse.

Enfin, j'ai une pensée émue pour mes parents qui ont toujours cru en moi.

Pour mon fils Charles,

Table de matières

Résumé	I
Summary	II
Introduction	II
Objectifs de la recherche	III
<u>1^{ère} Partie</u> : Les matériaux composites, leurs défauts et leur détection	1
I Les défauts dans les matériaux composites	1
I.1 Les critères de rejet en aéronautique	2
II Les méthodes NDT classiques	3
II.1 Test par liquide pénétrant	3
II.2 Test par magnétoscopie	4
II.3 Test par courants de Foucault	5
II.4 Test par ultrasons	6
II.5 Test par radiologie	7
II.6 Comparaison des différentes méthodes classiques	8
III Les méthodes NDT émergentes applicables aux composites	9
III.1 La shearographie	9
III.2 Les micro-ondes	9
III.3 La thermographie	10
<u>2^{ème} Partie</u> : Mise en œuvre de la thermographie infrarouge	21
I Critères de choix d'une caméra infrarouge	21
I.1 Performances caractéristiques d'une caméra thermique	21
I.2 Choix de la sensibilité spectrale (MWIR/LWIR)	24
II Grandeurs influençant l'acquisition des images	24
II.1 Grandeurs d'influence liées au corps	25
II.2 Grandeurs d'influence liées à l'environnement	28
II.3 Grandeurs d'influence liées à la chauffe	30
II.4 Grandeurs d'influence liées à l'enregistrement	36
III Le traitement des images	37
III.1 Traitements des images communs aux trois techniques	37
III.2 Traitements des images spécifiques à la thermographie pulsée	42
IV Choix d'une méthode thermographique	46
<u>3^{ème} Partie</u> : Application de la thermographie dans le domaine des essais non destructifs	47
I Délaminations	47
I.1 Détermination de la profondeur d'un défaut	47
I.2 Détermination de la forme et de la taille d'un défaut	47
II Inclusions d'eau	51
II.1 Influence de la surface de contact modèle FEM	52
II.2 Influence de la hauteur de la colonne d'eau : modèle FEM	54

III	Détermination de la diffusivité thermique d'un matériau	55
III.1	Définition de la diffusivité thermique	55
III.2	Description de la méthode de Parker	55
<u>4ème Partie</u> : Résultats expérimentaux		58
I	Choix d'une caméra infrarouge	58
I.1	La MRTD	58
I.2	La NETD	62
I.3	Détermination de l'uniformité du détecteur de la caméra	63
I.4	Comparaison entre deux caméras infrarouges	66
II	Traitements des images	67
II.1	Correction d'un thermogramme pour prendre en compte la forme de l'objet observé	67
II.2	Diminution du bruit des images	69
III	Applications de la thermographie : délaminations	77
III.1	Description des calibres utilisés	77
III.2	Détection des défauts sur calibre	78
III.3	Détermination de la profondeur d'une délamination	85
III.4	Détermination de la forme d'un défaut	90
IV.	Applications de la thermographie : inclusions d'eau	94
IV.1	Résultats expérimentaux	94
IV.2	Comparaison avec les résultats du modèle éléments finis	95
V.	Détermination de la diffusivité thermique	95
V.1	Description du dispositif expérimental	95
V.2	Alignement du dispositif expérimental	96
V.3	Mesure de la diffusivité d'un morceau de pale	97
<u>5ème Partie</u> : Validation de la thermographie par un modèle théorique FEM		102
I	Modèle simplifié	102
II	Modèle éléments finis commercial	109
III	Comparaison entre les résultats expérimentaux et théoriques	111
<u>6ème Partie</u> : Comparaison avec d'autres méthodes NDT valides sur composite		113
I	Comparaison thermographie et phased array ultrasonic testing	113
I.1	Test sur calibre FBH	116
I.2	Test sur défauts d'impacts 116	
II	Comparaison entre la thermographie et la shearographie	117
II.1	Description du calibre	117
II.2	Comparaison entre résultats obtenus par thermographie et shearographie	118

<u>7ème Partie</u>	: Utilisation de la thermographie sur site	121
I	Entrée d'air F16	122
I.1	Introduction	122
I.2	Utilisation de la thermographie sur le calibre officiel Lockheed	123
I.3	Résultats de la thermographie sur l'entrée d'air du F16	129
II	White bird coating	130
III	Ventral fin inspection	132
III.1	Introduction	132
III.2	Description de la pièce	134
III.3	Utilisation de la thermographie	134
<u>8ème Partie</u>	: Utilisation de la thermographie sur des défauts d'impact créés dans des pales d'hélicoptère Agusta	140
I	Introduction	140
II	Description des échantillons de pales	140
III	Thermographie pulsée	141
III.1	Acquisition des images	141
III.2	Traitement des images	142
III.3	Exploitation des résultats	143
IV	Thermographie pulsée de phase	146
<u>Conclusions</u>		147
<u>Annexes</u>		152
<u>Bibliographie</u>		180

RESUME

Ce travail est destiné à évaluer la thermographie infrarouge comme méthode d'essais non destructifs pour des pièces aéronautiques en composite. La thermographie est une technique émergente encore peu utilisée en maintenance industrielle dans sa forme la plus complexe, la thermographie active.

Ce document propose d'étudier, comparer et quantifier les différentes possibilités d'exploitation de la thermographie en comparaison des techniques conventionnelles actuellement utilisées comme la radiographie ou les ultrasons.

Une analyse détaillée permet d'éclairer le lecteur sur les différents facteurs qui vont influencer sur le résultat d'un test par thermographie qu'ils soient liés au choix de la caméra, aux conditions d'acquisition des images ou aux traitements que ces images subissent.

Les potentialités de la thermographie active dans la détection des principaux défauts rencontrés lors de la maintenance des pièces aéronautiques en composite sont étudiées tant théoriquement qu'expérimentalement. Il s'agit principalement de détection et de caractérisation de délaminations et d'inclusions d'eau. La thermographie est également utilisée pour déterminer les propriétés thermiques d'un matériau.

SUMMARY

This work evaluates infrared thermography as a non destructive method for aeronautical composite parts.

Active thermography is an emerging method, not yet intensively used in the industrial maintenance field.

It is proposed to investigate, compare and quantify different possibilities to use thermography instead of radiology or ultrasonic testing.

A detailed analysis contributes to highlight the reader on different factors that influence thermography test results like camera, image acquisition conditions or image treatments.

Active thermography potentialities to detect most prominent types of defects met in aerospace composites maintenance are theoretically and experimentally studied.

This mainly includes detection and characterization of disbonds and water ingress. Thermography is also used to determine some thermal properties of the material.

The use of thermography as an easily applicable NDT method is illustrated by practical cases: F16 air inlet, ventral fin and white bird coating, and impacts on Agusta helicopter blades.

INTRODUCTION

Le rôle de l'inspection et de la maintenance dans l'industrie aéronautique a progressivement augmenté depuis les années 80 lorsqu'il est apparu clairement que les avions dépassaient la durée de vie prévue lors de leur conception et que la détection précoce et la réparation des défauts étaient critiques pour éviter des catastrophes.

A l'heure actuelle, les composites sont probablement les matériaux les plus utilisés en aéronautique. Les renforts de nature diverses (à base de carbone (CFRP), de verre (GFRP), de Kevlar, d'Aramide (AFRP)) sont incorporés à une matrice époxy pour former des plis qui combinés à d'autres façonnent différentes structures.

Ces nouveaux matériaux présentent des défauts spécifiques par rapport aux matériaux conventionnels métalliques (délamination, porosité, impacts...). De nouvelles techniques d'essais non destructifs doivent donc être développées pour répondre aux besoins de leur inspection. En effet, les cinq méthodes conventionnelles utilisées actuellement dans l'industrie sont peu adaptées à ce matériau. Le caractère non métallique des composites limite les techniques utilisables aux tests par ultrasons et aux radiographies. Cependant, ces deux méthodes sont très coûteuses soit au niveau temps, soit au niveau équipement. Elles sont également limitées à certains types de défauts.

Ce besoin a motivé de nombreuses recherches en laboratoire pour développer de nouvelles méthodes NDT. Parmi les champs de recherche, la thermographie infrarouge s'avère prometteuse car elle présente des caractéristiques essentielles. Elle fournit notamment une vue globale de la pièce là où les tests par ultrasons donnent un résultat local, elle ne nécessite aucun contact physique avec la pièce testée et permet de tester des pièces dont une seule face est accessible.

Actuellement, l'industrie utilise principalement des méthodes de thermographie passive dans la maintenance préventive d'équipements industriels. La thermographie active qui nécessite une source de stimulation externe pour induire une différence de température entre la scène observée (défaut) et l'objet est plus complexe et encore très peu utilisée en milieu industriel. Dans le domaine aéronautique, seuls les grands constructeurs comme Boeing ou Airbus commencent à introduire la thermographie active dans leurs procédures de maintenance, mais celle-ci reste cantonnée à des applications simples de détection qualitative de défauts (voir annexe 1).

Par contre, un certain nombre de chercheurs de par le monde effectuent des travaux en laboratoire pour investiguer les potentialités de la thermographie active. Les résultats de ces recherches sont extrêmement intéressants car ils mettent en évidence le potentiel de développement de la thermographie dans le domaine des essais non destructifs.

Malheureusement, ces travaux de laboratoire sont souvent menés sur des calibres créés artificiellement pour ces expériences et ne sont donc que peu représentatifs des difficultés rencontrées sur le terrain avec des pièces réelles. De plus, la spécialisation de chaque chercheur rend difficile une vue d'ensemble sur l'état de l'art en thermographie pour un acteur du milieu industriel.

Ces deux caractéristiques ralentissent l'adoption de la thermographie active par les entreprises.

La Défense belge, forte de son savoir faire dans les cinq méthodes NDT classiques et de la disponibilité de matériel volant (avions et hélicoptères)

a décidé d'initier une réflexion approfondie sur l'introduction de la thermographie dans ses procédures de maintenance.

Le résultat de ces travaux, que j'ai effectués en collaboration avec le Capitaine Pierre Servais¹, est l'objet de cette thèse.

Son but est précisément d'explorer les recherches en cours au sein des universités dans le domaine de la thermographie, d'en retirer les éléments pouvant être intégrés dans une démarche NDT industrielle, de proposer une procédure à suivre par un opérateur et d'en montrer l'efficacité par des applications pratiques sur site.

Ce travail tend également à fournir des indications aux opérateurs NDT afin d'optimiser la qualité et la reproductivité des mesures par thermographie.

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'objectif principal de la recherche est de :

Développer une méthode d'essais non destructifs utilisable pour le diagnostic primaire de défauts peu profonds lors de la maintenance sur site de matériaux composites aéronautiques.

Cette recherche synthétise les différents travaux actuellement menés en laboratoire et balise les conditions d'utilisation et les potentialités d'une nouvelle méthode NDT capable de renforcer l'arsenal des méthodes d'essais non destructifs actuels.

Pour réaliser ce travail, une série d'objectifs spécifiques ont été poursuivis :

1. Déterminer le type de défauts existant dans les matériaux composites.
2. Faire le relevé des méthodes d'essais non destructifs actuellement à disposition des opérateurs NDT et leurs conditions d'utilisation (potentialités, limitations) ainsi que des méthodes faisant l'objet de recherches mais non encore utilisées industriellement.
3. Revoir les principes fondamentaux de la thermographie infrarouge.
4. Fournir à l'opérateur NDT des guides dans le choix des conditions expérimentales : critères de choix des caméras infrarouges, paramètres influençant la mesure^{2,3}.
5. Proposer à l'opérateur des traitements d'image simples facilitant la recherche de défauts de faible contraste thermique (non uniformité de chauffe, géométrie de la pièce, diminution du bruit de l'image).
6. Montrer les potentialités de la thermographie dans le cas de divers défauts types des composites : détection et caractérisation de délaminations (dimension et profondeur), inclusions d'eau ainsi que son utilisation dans la caractérisation des propriétés thermiques des matériaux testés^{4,5}.
7. Valider les résultats obtenus par thermographie par des modèles éléments finis.
8. Comparer les résultats obtenus par thermographie par rapport à d'autres techniques NDT applicables sur composite : ultrasons et shearographie.
9. Montrer diverses applications de la thermographie pour la maintenance sur site : études de cas sur avions F16 et sur pales d'hélicoptère Agusta.

1^{ère} Partie : LES MATERIAUX COMPOSITES, LEURS DEFAUTS ET LEUR DETECTION

I LES DEFAUTS DANS LES MATERIAUX COMPOSITES⁶

Un bref historique permet de constater que les impératifs de légèreté alliée à la robustesse ont dirigé très tôt les constructeurs aéronautiques vers les solutions composites.

Les composites furent utilisés dès 1938 dans la fabrication de l'avion Morane 406 avec des panneaux sandwichs ayant une âme en bois contreplaqué et des revêtements en alliage léger.

L'expérience maintenant accumulée prouve que l'emploi des composites permet, à performances égales, des gains de masse variant de 10% à 50% sur le même composant en alliage métallique conventionnel, avec un coût inférieur de 10% à 20%.

Les composites en carbone/époxyde sont largement utilisés notamment dans la conception des caissons de voilure, du fuselage et des dérives. Ils doivent leur popularité à leur grande résistance à la rupture, à leur très bonne tenue en fatigue et à leur masse volumique faible^{7,8}.

Les nids d'abeille quant à eux constituent principalement l'âme des pièces à structure sandwich.

Les matériaux composites présentent des aspects spécifiques de la résistance des structures.

En effet, il faut appliquer aux pièces composites la technique dite du fail safe en aéronautique, qui consiste à prévoir le mode de rupture (délaminage par exemple) et à faire en sorte qu'il n'entraîne pas la ruine de la pièce entre deux inspections⁹.

De plus, les pièces composites sont réparables, au contraire des pièces métalliques conventionnelles.

Le contrôle non destructif contribue à détecter les types de discontinuités les plus couramment observées sur les composites aérospatiaux : la porosité qui réduit la capacité à supporter des charges compressives, l'inclusion d'eau qui dégrade les propriétés mécaniques de certaines résines ou qui peut engendrer du gel dans les pièces aggravant de plus en plus le dommage, les délaminations résultant d'un décollement entre plis, les dommages dus aux impacts durant le roulage ou causés par un oiseau ou la chute d'un outil lors de la maintenance, les inclusions qui réduisent la résistance en brisant des fibres autour du matériau d'insert¹⁰.

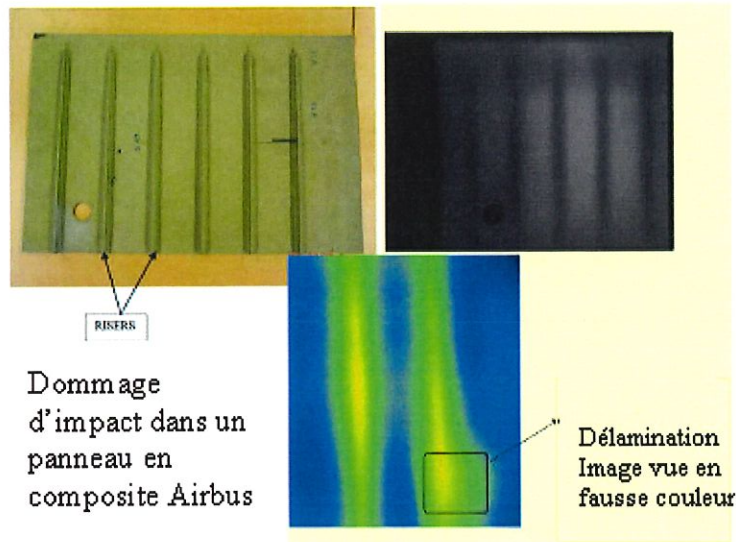


Figure 1: Dommages d'impact dans un panneau composite Airbus

Les matériaux composites peuvent également être affectés de défauts dus à la fabrication (vide créé par les composants volatiles de la résine, corps étrangers provenant des séparateurs, criques dans les plis, délaminations) ou par des défauts dus à leur utilisation (fracture de fibres, criques, délamination, inclusion d'eau, impacts...).



Figure 2: Pli et séparateur

I.1 Les critères de rejet en aéronautique"

Des procédures et des critères d'acceptation et de rejet pour les anomalies trouvées lors d'essais NDT sont essentiels dans la pratique quotidienne. Historiquement, ces critères sont souvent élaborés en se basant sur l'expérience acquise par le fabricant des pièces à tester. Ces critères de bonne pratique sont implémentés sous forme de codes et de standards et visent à limiter les risques de rupture d'un composant.

Les critères de rejet varient d'une pièce à l'autre en fonction non seulement du matériau utilisé mais également de la criticité de la rupture de la pièce pour la sécurité de l'utilisateur.

A titre d'exemple, les défauts de plus de 10 mm de diamètre constituent un critère de non acceptation pour des pièces aéronautiques en composite dont la maintenance est basée sur la philosophie fail safe.

Ces critères de rejet émis par le fabricant sont certes utiles à connaître lors du développement d'une méthode d'essais NDT, mais ils ne doivent pas entraver la démarche novatrice du concepteur.

En effet, dans le passé, les outils disponibles pour effectuer les essais se limitaient aux techniques conventionnelles d'essais non destructifs.

Les critères de bonne pratique ont donc été formulés en pensant aux capacités spécifiques et aux limitations de ces techniques. Cette démarche devient problématique lorsque des nouvelles méthodes d'essais non destructifs sont développées. En effet, baser les critères de rejet sur la pratique connue actuellement, c'est empêcher de tirer parti des avantages et des capacités de cette nouvelle méthode d'essais non destructifs.

II LES METHODES NDT CLASSIQUES^{12,13}

II.1 Test par liquide pénétrant^{14,15}

La recherche par pénétrant est une méthode d'inspection non destructive visant à détecter toutes sortes de fêlures, recouvrement de matière, porosité, défauts de fabrication (laminage, forgeage, moulage) ou toute autre discontinuité ayant une ouverture en surface.

Sur la pièce à inspecter est appliqué un liquide coloré qui pénètre alors lentement dans les discontinuités. Lorsque le temps de pénétration est écoulé, on nettoie la surface de la pièce pour enlever le liquide. On applique ensuite un révélateur qui fait remonter à la surface le liquide resté dans les discontinuités.

L'inspection par liquide pénétrant est, en principe, applicable avec tous les matériaux à condition qu'il ne s'agisse pas de surfaces extrêmement poreuses. Les finis de surface rugueux et certains revêtements protecteurs peuvent gêner ou empêcher l'utilisation de liquides pénétrants.

La méthode est seulement capable de détecter les défauts ouverts à la surface.

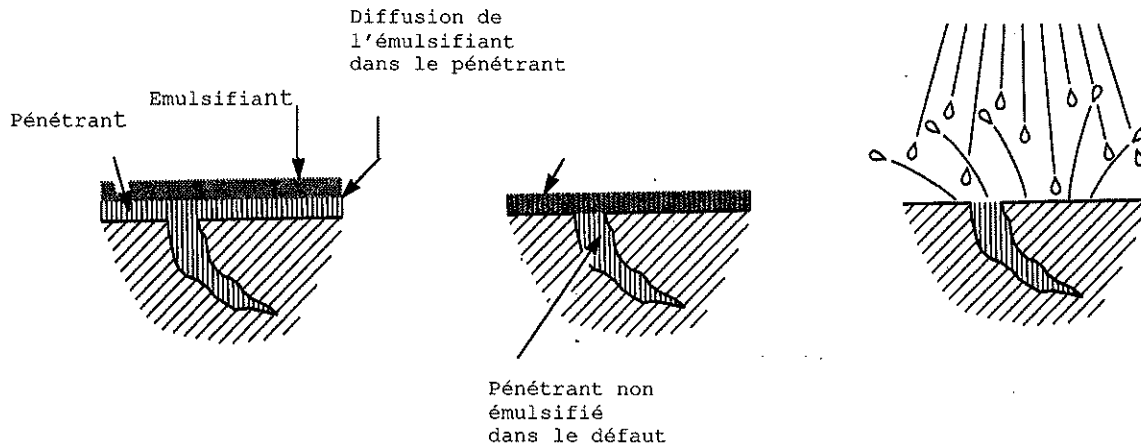


Figure 3: Principe du test par liquide pénétrant¹⁶

II.2 Test par magnétoscopie¹⁷

Cette méthode permet de détecter toutes les fissures ou discontinuités se trouvant en surface ou à proximité de la surface dans tous les matériaux ferromagnétiques.

Quand on applique un champ magnétique dans une pièce ferromagnétique dans laquelle se trouve une fissure, celle-ci crée une fuite de champ magnétique. Cette fuite peut être détectée en déposant des particules magnétiques qui s'accumuleront à l'endroit de la fuite magnétique et donc de la fissure. L'indication de la forme de la fissure, de sa grandeur et de sa direction dépendent essentiellement de la direction et de la force du champ magnétique, de la grandeur, forme et direction de la fissure, de la perméabilité de la pièce à tester et de l'état de surface de la pièce.

La magnétoscopie permet de détecter des défauts situés à la surface ou proche de la surface dans des matériaux ferromagnétiques. La méthode fournit d'excellentes indications si la pièce est libre de graisse, d'huile ou de boue. Les fines couches d'antirouille ou de revêtements chimiques de protection n'affectent pas la sensibilité de la méthode.

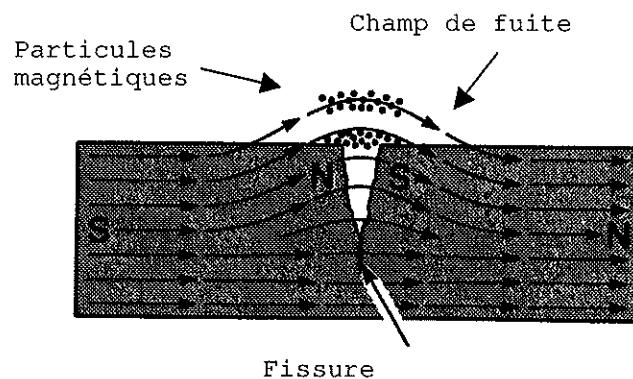


Figure 4: Principe du test par magnétoscopie¹⁶

II.3 Test par courants de Foucault¹⁸

Le test par courant de Foucault permet de détecter des discontinuités dans des matériaux métalliques.

Pour initier des courants de Foucault dans une pièce, un courant alternatif de fréquence adéquate (100 Hz - 100 kHz) est appliqué à un solénoïde. Si la pièce à tester entre en contact avec la sonde contenant le solénoïde ou en est très proche, le champ magnétique produit par le solénoïde entre dans la pièce et y génère des courants induits. Ces courants sont circulaires et parallèles à la surface de la pièce. Le champ magnétique produit par les courants de Foucault est en opposition avec le champ magnétique généré par la sonde.

Des variations d'amplitude des courants de Foucault affectent le champ magnétique produit. Une fois analysé, ce champ fournit des informations sur les modifications structurales de la pièce telles des fissures, des discontinuités, des changements d'épaisseurs ou des traitements thermiques des matériaux.

Le test par courants de Foucault peut être utilisé sur tout matériau conducteur de l'électricité. Les courants de Foucault peuvent être utilisés pour la détection des fissures sans qu'il ne soit nécessaire de retirer la couche de peinture. La longueur et la profondeur du défaut peuvent être estimées avec un degré raisonnable de précision.

La technique des courants de Foucault est très sensible pour les défauts de faibles dimensions mais ne permet la détection que de défauts proches de la surface.

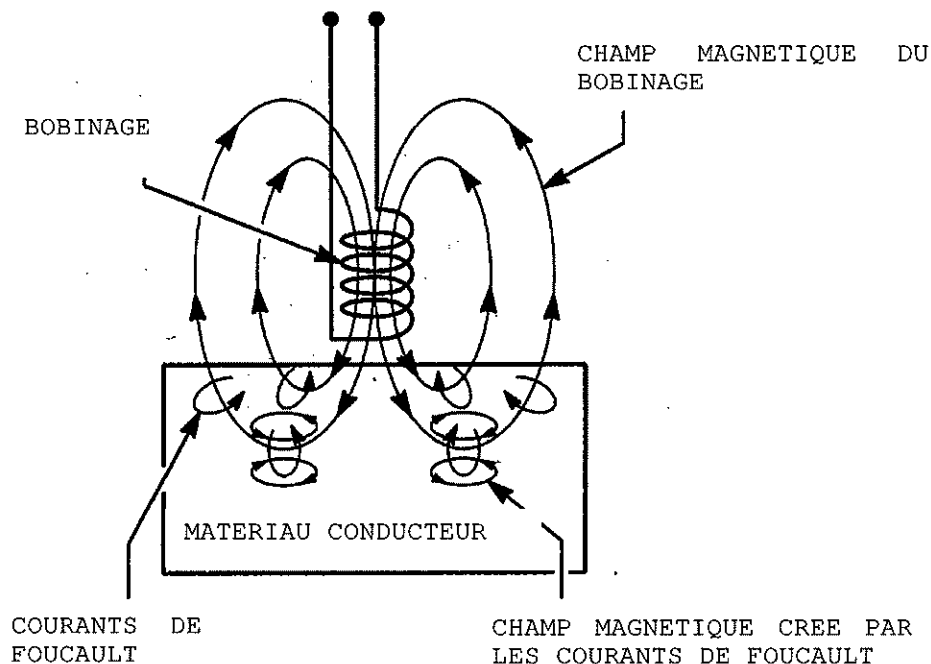


Figure 5 : Principe du test par courants de Foucault¹⁶

II.4 Test par ultrasons¹⁹

L'inspection par ultrasons utilise des ondes sonores de très haute fréquence (0,2-15MHz) pour détecter des défauts dans une pièce. Cette détection est réalisée en injectant les ondes haute fréquence dans la pièce et en observant la réponse renvoyée à l'aide d'un oscilloscope.

Les avantages de la méthode sont multiples. Il est par exemple possible d'inspecter une pièce dont l'accès est limité à une seule face. La réponse est rapide permettant une inspection automatique. La mesure de la position et de la taille d'un défaut est précise et la grande énergie de pénétration permet d'examiner des pièces extrêmement épaisses (5mm-5m).

Cependant la géométrie et la condition du matériau testé peuvent limiter l'application des tests par ultrasons: la taille, la complexité et l'orientation des défauts ainsi que la taille du grain du matériau, sa porosité ou les éventuelles inclusions. De plus, des problèmes de couplants et de rugosité de la surface peuvent limiter l'application des ultrasons.

Il ne faut pas non plus oublier qu'il s'agit d'une méthode d'inspection point à point. Son utilisation pour l'inspection de surfaces importantes peut s'avérer très longue.

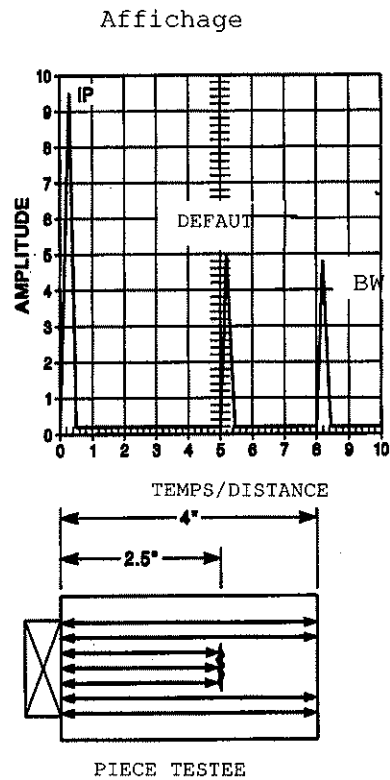


Figure 6 : Principe du test par ultrasons¹⁶

II.5 Test par radiologie²⁰

La méthode est basée sur le haut taux de pénétration d'ondes électromagnétiques de relativement faibles longueurs d'onde: les rayons X. Les différences d'absorption des rayons sont une indication de défauts. Le taux de pénétration est fonction des caractéristiques atomiques du matériau.

Les différences d'absorption sont enregistrées sur un film. Après développement, la radiographie est observée visuellement. Il est à noter qu'il existe également une version numérique de la radiologie, l'information y est digitalisée et l'utilisation d'un film n'est pas nécessaire. Cela réduit le coût des consommables utilisés en radiologie. L'inspection radiographique d'une structure est recommandée si la zone suspecte est cachée ou n'est pas facilement accessible.

L'inspection radiographique présente quelques limitations. Puisque les radiations voyagent en ligne droite à partir de la source, ils doivent intercepter le film sous un angle proche de l'angle droit. Cela empêche l'examen de pièces de géométrie complexe.

Les défauts de type délamination sont difficilement détectables car ils ne présentent pas de différences de densité de radiation suffisantes.

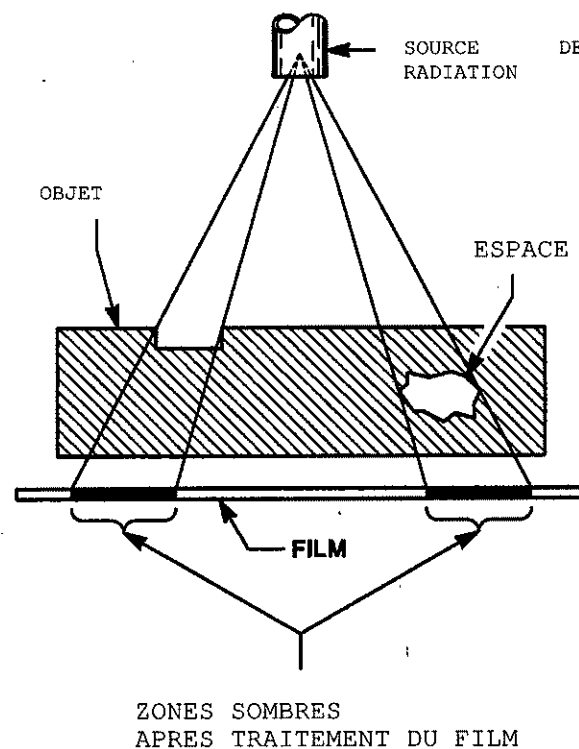


Figure 7: Principe de la radiographie¹⁶

II.6 Comparaison des différentes méthodes classiques et applicabilité aux matériaux composites.

	LIQUIDE PENETRANT (PT)	MAGNETOSCOPIE (MT)	COURANTS DE FOUCAULT (ET)	ULTRASONS (UT)	RADIOGRAPHIE (RT)
TYPE DE DISCONTINUITES DETECTABLES	Surface seulement	Surface et sous la surface (jusqu'à +/- 1mm)	Surface et sous la surface (jusqu'à +/- 2,5mm)	Surface et interne (jusqu'à +/- 5cm)	Surface et interne (jusqu'à +/- 7,5cm)
MATERIAUX	Tous	Ferromagnétiques	Conducteurs	Tous	Tous
POSSIBILITE DE CONTROLE SUR PEINTURE	Non	Oui (excepté les couches épaisses)	Oui	Oui (mais surface lisse)	Oui
RESULTATS	Différé (temps pour l'action de la capillarité).	Temps réel	Temps réel	Temps réel	Différé (développement du film).
INSPECTION DE TOUTES LES FACES DE LA PIECE	Non (seulement les pièces accessibles pour le liquide)	Oui (parties visibles)	Oui	Oui	Oui
EQUIPEMENTS FIXES	Bains	Banc magnétique et liquide (possibilité de magnétisation de la pièce entière)	Equipement de test et sondes	Equipement de test et sondes	Tube rayons X+ films+ développeuse.
EQUIPEMENTS PORTABLES	Sprays (+ lampe UV)	Magnétiseur manuel (yoke) + spray + lampe UV (magnétisation d'une partie de la pièce)	Equipement de test et sondes	Equipement de test et sondes	Tube rayons X + films

Tableau 1 : Comparaison des méthodes NDT classiques.

III LES METHODES NDT EMERGENTES APPLICABLES AUX COMPOSITES

III.1 La shearographie^{21,22}

La shearographie, que l'on nomme parfois holographie interférométrique, permet d'effectuer, en temps réel, des mesures optiques de haute précision (sans contact) de la déformation d'un objet sous l'effet d'une contrainte.

Elle s'appuie sur l'utilisation:

- d'un laser monochromatique.
- d'un support holographique qui permet l'enregistrement et la lecture de l'hologramme d'un objet dans une configuration de référence.
- d'une source de déformations basée sur des contraintes thermiques, pneumatiques, vibratoires, etc.

La sélection de la méthode de sollicitation dépend du type de défaut recherché et de sa profondeur.

Le résultat d'une mesure est présenté sous forme d'image qui comporte des franges d'interférence associées aux déformations de l'objet contraint.

La shearographie détermine la dérivée spatiale de la déformation observée par interférométrie holographique. Cela permet ainsi d'éliminer les déplacements d'ensemble de la pièce examinée ne correspondant pas à la présence d'un défaut.

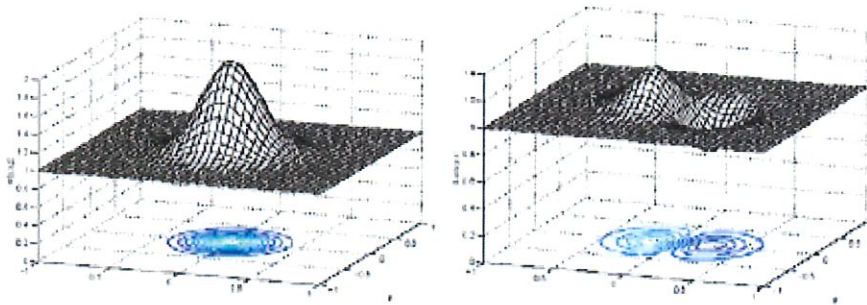


Figure 8 :Déformation

Dérivée de la déformation²¹

Cette technique non destructive offre de nombreux avantages. Il s'agit d'une mesure sans contact qui ne requiert pas de préparation de surface. Elle permet de détecter des déplacements de l'ordre de quelques nanomètres entre deux états d'un objet. De plus, elle propose une visualisation en temps réel de toute la surface d'une pièce. Enfin, elle ne nécessite aucun consommable (films, produits...).

Par contre, l'utilisation de lasers puissants impose des mesures de sécurité spécifiques. La pièce ou la structure doit être contrainte pour mettre les discontinuités en évidence et l'interprétation des résultats est quelque peu subjective. C'est la raison pour laquelle seul l'aspect qualitatif des résultats est habituellement utilisé.

III.2 Les micro-ondes^{21,23}

Les tests NDT par micro-ondes sont définis comme l'inspection et la caractérisation de matériaux et de structures en utilisant de l'énergie

électromagnétique à haute fréquence. La gamme de fréquences utilisées varie de quelques centaines de megahertz (MHz) à quelques centaines de gigahertz (GHz), ce qui correspond à des longueurs d'onde variant de 100cm à 1mm. Dans cette technique, l'échantillon est testé en mesurant les diverses propriétés (amplitude et phase) des ondes électromagnétiques réfléchies ou transmises par la pièce en test.

Pour effectuer des mesures correctes, il faut impérativement tenir compte des caractéristiques spécifiques suivantes:

1. Pour mesurer de faibles variations dans le signal réfléchi, les ondes incidentes et réfléchies doivent être facilement identifiables.
2. Les ondes sont polarisées, c-à-d que le vecteur du champ électrique est dirigé selon une direction spécifique en cas de polarisation linéaire. Cela favorise l'interaction avec une anomalie allongée dans cette direction.
3. La distribution angulaire du faisceau réfléchi par un défaut peut être exploitée.

Comme pour les ondes optiques ou ultrasoniques, le test par micro-ondes nécessite l'utilisation de sondes. Cependant, le grand avantage par rapport à ces techniques est qu'il n'est pas nécessaire que la sonde utilisée pour l'inspection soit en contact avec l'objet. Un autre aspect important de la technique est la disponibilité de nombreux capteurs. En utilisant une matrice de capteurs, de larges zones peuvent être scannées.

III.3 La thermographie^{24,25,26,27}

a) Principe général

Comme toute onde, le rayonnement électromagnétique est caractérisé entre autres par sa longueur d'onde et par la puissance qu'elle véhicule.

La figure 9 présente le spectre du rayonnement électromagnétique, la place de l'infrarouge et la bande spectrale couverte par la thermographie infrarouge.

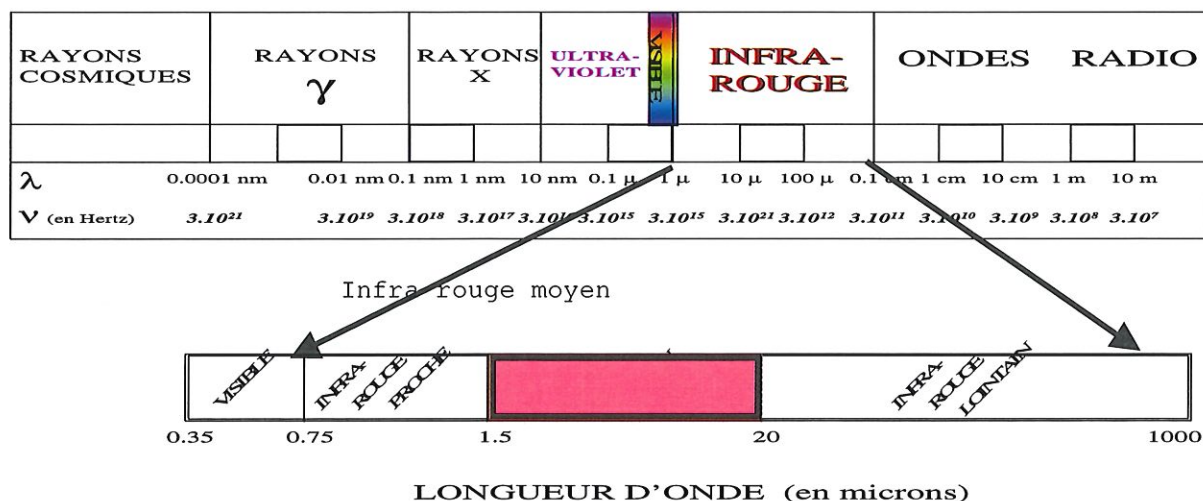


Figure 9 : Spectre du rayonnement électromagnétique²⁴.

Soit un matériau S. Ce matériau envoie dans tout l'espace et dans tout le spectre de longueurs d'onde, une énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Cette énergie, dite énergie rayonnante, provient du matériau mais peut être émise, réfléchi ou transmise par ce matériau. L'énergie E (en Joules) en provenance de S est ramenée à l'unité de temps (s), on obtient la puissance rayonnante Φ , également nommée flux énergétique partant de S.

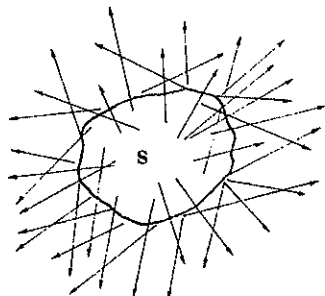


Figure 10 : Energie émise par le matériau S ²⁴

Ainsi, $\Phi = E/\text{temps}$ s'exprime en Watt, unité de puissance.

La luminance énergétique spectrique directionnelle est par définition²⁴, égale à

$$L_\lambda = \frac{d^5\phi}{dS \cos \theta d\Omega d\lambda} \text{ en } W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1} \text{ [Équation 1]}$$

C'est donc un élément de flux en provenance d'un élément de surface, dans une direction donnée, sous un angle solide, dans un élément de bande spectrale.

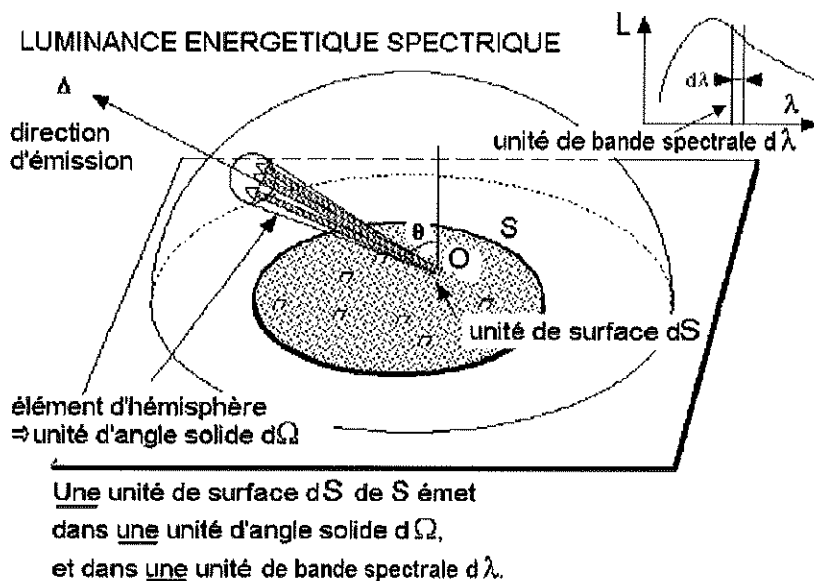


Figure 11 : Eléments intervenant dans la luminance énergétique spectrique²⁵

L'émetteur-récepteur parfait est le corps noir ou radiateur intégral. C'est un objet idéal qui absorbe l'intégralité des rayonnements incidents, quelles que soient leur longueur d'onde et leur direction, et qui émet un rayonnement répondant à la théorie développée par Max Planck en 1900. Les résultats des calculs de Planck conduisent à une luminance spectrique donnée par la loi de Planck :

$$L_{\lambda}^{\circ} = \frac{c_1 \lambda^{-5} 10^{-6}}{\pi \exp(c_2 / \lambda T) - 1} \quad \text{en } \text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}. \quad [\text{Équation 2}]$$

Dans cette formule, on a

$C_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^2$ 1^{ère} constante de rayonnement

$C_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2} \text{ K.m}$ 2^{ème} constante de rayonnement

$\lambda =$ longueur d'onde en m

$T =$ température en K

L'adjonction de ° en exposant signifie que la luminance concerne le corps noir.

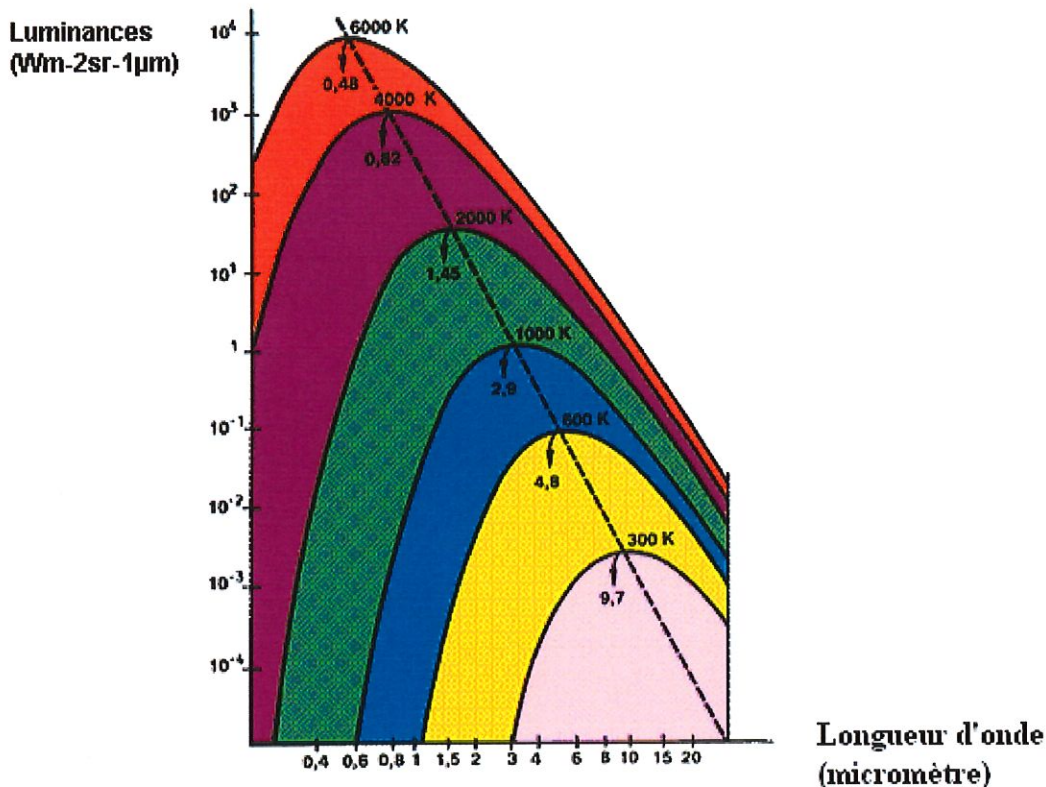


Figure 12 : Loi de Planck²⁴

Cette formule est valable lorsque l'émission s'effectue dans le vide ou dans un milieu peu dense d'indice de réfraction voisin de 1.

La température T déduite d'une mesure de la luminance L par un radiomètre est appelée température de luminance ou température corps noir ou température apparente, puisque dans le cas général, elle n'est pas égale à la température vraie de l'objet, sauf s'il est un corps noir.

Le spectre d'émission du corps noir est un spectre continu, qui ne présente pas d'absence brutale de rayonnement pour certaines longueurs d'onde. Pour

des températures inférieures à 2000°C, l'essentiel de l'énergie émise est située dans l'infrarouge. Ceci explique l'idée commune qui associe infrarouge et chaleur.

L'observation des courbes montre également que, à quelque longueur d'onde que ce soit, la luminance est une fonction monotone de la température : quand la température T croît, la luminance L_{λ}° croît. Ainsi un radiomètre fonctionnant à une longueur d'onde fixe mais quelconque fournit un signal de sortie fonction croissante de la température T du corps noir.

Un corps noir à la température T émet un rayonnement électromagnétique composé d'une infinité de rayonnements élémentaires de longueurs d'onde et de luminances dont la répartition est décrite par la loi de Planck.

Si λ_{\max} est la longueur d'onde correspondant au maximum de l'énergie émise par le corps noir, on peut montrer que cette longueur d'onde λ_{\max} donne la température. En effet, l'annulation de la dérivée de la loi de Planck par rapport à la longueur d'onde donne la longueur d'onde λ_{\max} pour laquelle l'émission est maximale :

$$\frac{dL_{\lambda}^{\circ}}{d\lambda} = 0 \text{ donne } T = 2898 / \lambda_{\max} \text{ (T en K)} \quad [\text{Équation 3}]$$

Cette équation est appelée loi de déplacement de Wien. Elle indique clairement que, quand la température croît, le maximum d'énergie émise se déplace vers les longueurs d'onde plus basses.

Cette constatation s'accompagne de commentaires immédiats qui relèvent de l'expérience quotidienne de chacun. L'échauffement d'une source considérée comme un corps noir, peut être tel que celle-ci devient rouge sombre, elle émet une faible partie du rayonnement dans le spectre visible. Sa température est alors aux environs de 510 à 520°C.

Passons à la limite et intégrons la luminance énergétique spectrique L_{λ}° sur tout le spectre électromagnétique. On obtient la luminance énergétique totale :

$$L^{\circ} = \int_0^{\infty} L_{\lambda}^{\circ} d\lambda = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad [\text{Équation 4}]$$

Où $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann.

La loi de Stefan-Boltzmann concerne l'exittance énergétique totale et non la luminance. L'exittance énergétique est le flux élémentaire émis par une surface dS, pour une longueur d'onde dλ et dans tout l'espace entourant dS. Comme l'émission du corps noir est isotrope, l'exittance R_{λ}° peut être reliée à la luminance énergétique spectrique par $R_{\lambda}^{\circ} = \pi L_{\lambda}^{\circ}$.

La loi de Stefan Boltzmann s'écrit donc pour un corps noir :

$$R(\lambda \text{ de } 0 \text{ à } \infty) = \sigma T^4 \text{ en } \text{Wm}^{-2} \quad [\text{Équation 5}]$$

L'objet réel :

Les objets réels se distinguent du corps noir idéal par le fait qu'ils émettent un flux toujours inférieur à celui du corps noir, quelles que soient la température et la longueur d'onde.

On décrit les propriétés radiatives des corps réels par quatre facteurs :

- l'émissivité
- le facteur de réflexion
- le facteur d'absorption
- le facteur de transmission.

L'émissivité d'un objet réel est un facteur de comparaison des émissions de cet objet réel et du corps noir placés dans les mêmes conditions et à la même température.

Cette émissivité varie de 0 à 1 en fonction du matériau et du fini de surface.

Plus la surface est rugueuse ou oxydée et plus l'émissivité a des chances d'être élevée : chacune des infractuosités de la surface représente un micro-corps quasi-noir.

Les formules permettant de calculer les radiations thermiques doivent être modifiées pour introduire l'émissivité.

Loi de Planck :

$$R_\lambda = \frac{\epsilon_\lambda C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad \text{en} \quad \text{Wm}^{-2} \quad [\text{Équation 6}]$$

Loi de Stefan Boltzmann :

$$R(\lambda \text{ de } 0 \text{ à } \infty) = \epsilon \sigma T^4 \quad \text{en} \quad \text{Wm}^{-2} \quad [\text{Équation 7}]$$

On voit donc que la radiation thermique des corps réels dépend tant de la température que de l'émissivité.

Dans une bande spectrale particulière on obtient $R(\text{de } \lambda_1 \text{ à } \lambda_2) = \epsilon \sigma T^n$ où n dépend de la longueur d'onde. Par exemple $n \approx 10$ dans la bande 3 à 5,5 μm et $n \approx 5$ dans la bande 7 à 13 μm .

A titre d'exemple, le tableau 2 fournit l'émissivité de quelques matériaux usuels.

Matériau	Emissivité
Acier inoxydable	0,2
Aluminium brillant	0,04
Aluminium fortement oxydé	0,83/0,94
Carbone graphite	0,7/0,9
Fer blanc non oxydé	0,05
Or	0,01/0,1
Platine	0,1/0,4
Titane oxydé	0,6/0,8
Sable	0,9
Béton	0,94
Fibre de verre	0,8/0,98
Verre epoxy	0,86
Plastique noir	0,95
Peinture mat	0,95

Tableau 2 : Emissivité de quelques matériaux usuels

b) *Thermographie pulsée²⁸*

La thermographie pulsée (PT) est une technique active dans laquelle une énergie thermique est délivrée au moyen d'équipements optiques (ex: lampes flash) à la surface du matériau à tester, où la lumière est transformée en chaleur.

Les ondes thermiques se propagent par conduction dans le spécimen jusqu'à ce qu'elles atteignent une discontinuité qui agit comme une résistance et qui réfléchit les ondes thermiques vers la surface.

La thermographie est particulièrement intéressante pour l'inspection des pièces en composite car après avoir soumis la surface du spécimen à un front thermique, la plupart des types de discontinuités situées sous la surface peuvent être détectées par une caméra infrarouge comme étant des régions présentant des distributions de température anormales.



Figure 13. Thermographie pulsée d'un revêtement d'avion impacté et montrant la position de la caméra IR et des lampes flash.

L'acquisition de données par thermographie pulsée est rapide et immédiate comme illustré figure 14. La surface du spécimen est soumise à un pulse de chaleur (quelques millisecondes) en utilisant une source de haute puissance. Lorsque le front thermique entre en contact avec la surface du spécimen, les ondes thermiques se propagent à travers celui-ci. Au cours du temps, la température de la surface diminue uniformément lorsque la pièce ne présente pas de défaut. Au contraire, les discontinuités situées sous la surface peuvent être représentées comme des résistances au flux de chaleur, ce qui produit des schémas de température anormaux à la surface, ceux-ci peuvent être enregistrés par un ordinateur via une caméra infrarouge.

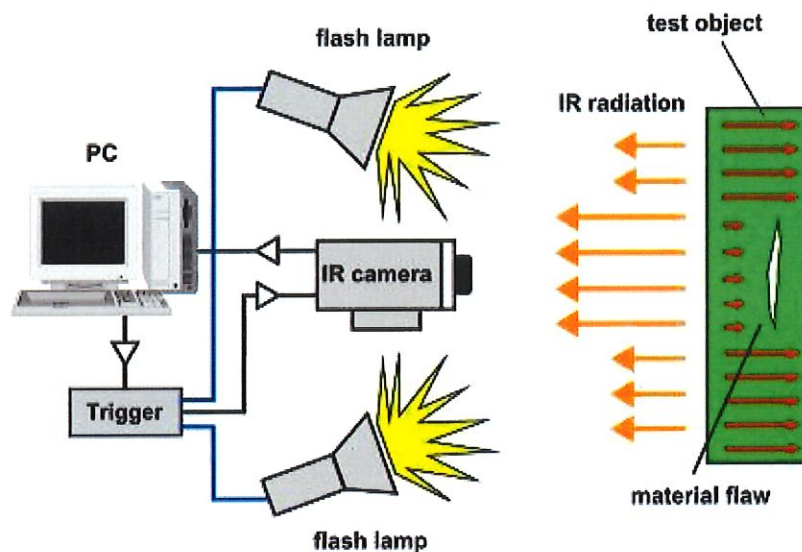


Figure 14. Principe de la thermographie pulsée²⁸.

Les données stockées dans une matrice 3D sont représentées figure 15 où x et y sont les coordonnées spatiales et t est le temps. La température d'un point de la surface diminue approximativement comme la racine carrée du temps conformément à la loi de Fourier sauf dans les zones affectées par un défaut où le taux de refroidissement est différent. La figure 15 représente aussi l'évolution du contraste thermique absolu (différence de température entre une zone libre de défaut notée S_a et une zone de défaut de la pièce composite chauffée).

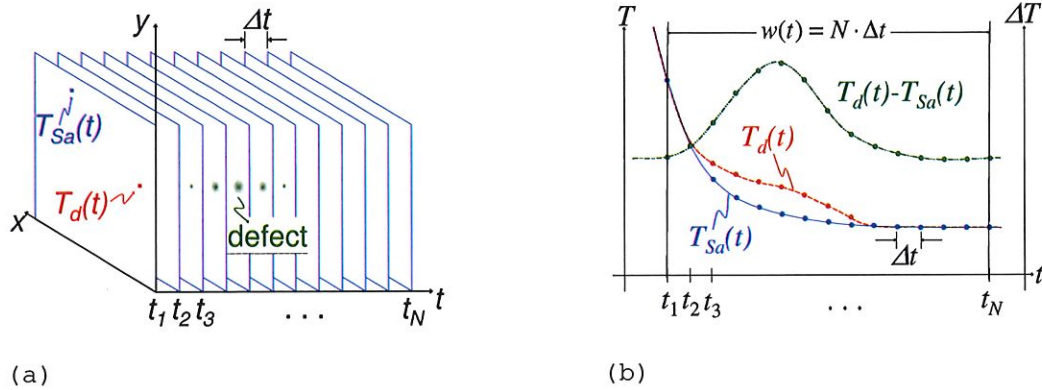


Figure 15 (a) données thermiques, (b) évolution de la température pour un pixel sain (-), un pixel défectueux(- -), et différence thermique entre elles (-.-.)²⁹.

Les premiers paramètres qui doivent être déterminés dans une expérience de thermographie pulsée sont la fréquence d'échantillonnage en images par seconde (fps) et le temps d'acquisition t_{acq} . Ces deux paramètres sont intimement reliés et sont limités par la capacité de stockage maximum du système IR : $N_{max} = fps \cdot t_{acq}$.

Une sélection appropriée de fps et t_{acq} dépend essentiellement des propriétés thermiques du spécimen. En général, des matériaux hautement conducteurs nécessitent un haut fps (pour éviter la perte d'information), mais des t_{acq} plus courts (car les variations thermiques s'arrêtent plus rapidement) que les matériaux faiblement conducteurs.

Durant le processus d'acquisition, le signal continu de température $T(t)$ est échantillonné avec un temps de résolution Δt , et tronqué par une fenêtre rectangulaire $w(t)$ représentée figure 15. La résolution maximale en temps correspond à $\Delta t = 1/fps$ et la taille maximale de la fenêtre est $w(t) = t_{acq}$. Le nombre total de thermogrammes enregistrés N résulte de la combinaison des deux paramètres d'acquisition: $N = w(t) / \Delta t$.

Théorie de la diffusion de la chaleur

La diffusion de la chaleur dans un solide est un problème complexe tridimensionnel qui peut être décrit par la loi de Fourier de la diffusion de la chaleur ou équation de la chaleur³⁰.

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad [\text{Équation 8}]$$

où $\alpha = k / \rho c_p$ [m²/s] est la diffusivité thermique du matériau inspecté, k [W/m.K] est sa conductivité thermique, ρ [kg/m³] sa masse volumique et c_p [J/kg.K] est la chaleur spécifique à pression constante.

La solution 1D de l'équation de Fourier pour la propagation par conduction d'un pulse de Dirac, c-à-d un pulse intense d'une durée si brève qu'aucun équipement de mesure n'est capable de le distinguer parmi d'autres pulses même plus courts, dans un solide isotrope semi-infini a la forme :

$$T(z,t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k\rho c_p \pi \cdot t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha \cdot t}\right) \quad [\text{Équation 9}]$$

où Q [J/m²] est l'énergie absorbée par la surface et T_0 [K] est la température initiale.

Un pulse de Dirac est composé de sinusoïdes de toutes fréquences et d'amplitudes identiques. Il n'est pas possible de reproduire une telle onde en pratique, un pulse de chaleur fourni par une source puissante a approximativement une forme carrée. Dans ce cas, le signal est composé d'ondes périodiques à plusieurs (mais pas toutes) fréquences. Plus le pulse

est court, plus large est la gamme de fréquences. A la surface ($z=0$ mm), l'équation 9 peut être réécrite comme suit:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi \cdot t}} \quad [\text{Équation 10}]$$

où $e = (k \rho c_p)^{1/2}$ est l'effusivité thermique, qui est une propriété thermique qui mesure la capacité d'un matériau à échanger de la chaleur avec son environnement.

Bien que l'équation 10 ne soit qu'une approximation du problème de diffusion 3D décrit par la loi de Fourier, beaucoup de techniques de traitement de thermographie pulsée sont basées sur cette simplification pour les analyses qualitatives et quantitatives.

c) thermographie pulsée de phase

Après avoir enregistré N images ou thermogrammes, nous obtenons une matrice 3D, les coordonnées x et y sont les positions horizontales et verticales du pixel observé et la coordonnée z correspond à l'évolution temporelle.

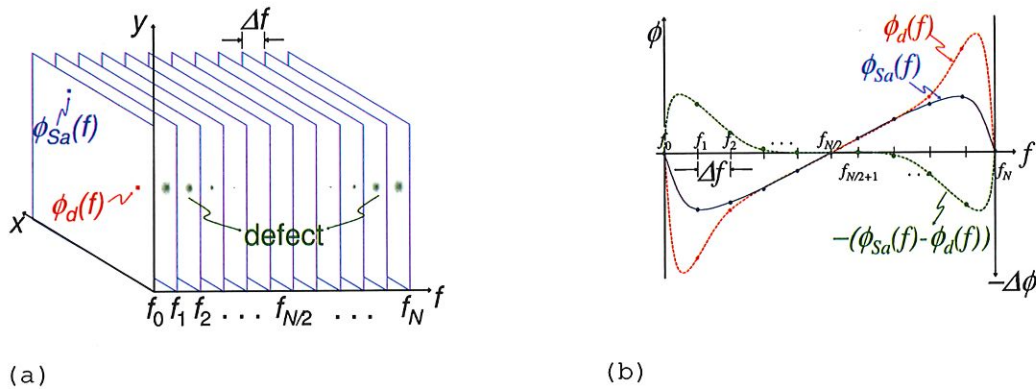


Figure 16 (a) Séquence d'images de phase après l'application d'une FFT, (b) profil de phase pour un pixel non affecté par un défaut (-), un pixel situé sur un défaut(- -), et différence de phase entre eux(-.-)²⁹.

Lorsque la température a été enregistrée, la séquence entière est traitée, au niveau du pixel, en utilisant une DFT unidimensionnelle (Discrete Fourier Transform).

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) \exp(-j2\pi k/N) = \text{Re}_n + j \text{Im}_n \quad [\text{Équation 11}]$$

où j est le nombre imaginaire, n est l'incrément en fréquence, Re et Im sont les parties réelles et imaginaires de la transformée. Afin de réduire le temps de calcul, il est préférable de substituer à la fonction DFT, l'algorithme de la transformée de Fourier rapide (FFT) dans les applications NDT. Avec les parties réelles et imaginaires de la transformée, la phase ϕ pour un pixel devient disponible grâce à $\phi = \tan^{-1}(\text{Im}_n/\text{Re}_n)$.

La procédure est répétée pour tous les pixels pour former une image de phase ou phasegramme comme le montre la figure 16.

Contrairement aux thermogrammes, les phasegrammes sont moins sensibles aux réflexions dues à l'environnement, aux variations d'émissivité, à la non uniformité de chauffe ou à la géométrie de la surface. La phase est donc très utile pour les applications NDT quantitatives.

d) Lock-in^{31, 32, 33}

La Lock-in thermographie est basée sur des ondes thermiques générées à l'intérieur du spécimen étudié. Dans le cas d'une stimulation sinusoïdale du spécimen, une onde hautement atténuée et dispersive existe dans le matériau (dans une région proche de la surface). L'intérêt est que ces ondes peuvent être générées et détectées à distance, par exemple en déposant périodiquement de la chaleur sur la surface du spécimen.

La température oscillante résultante dans le régime stationnaire est enregistrée via son émission infrarouge thermique. Un appareil expérimental permet d'observer l'amplitude et la phase de cette onde thermique dans une zone donnée du spécimen. Le terme lock-in fait référence à la nécessité de contrôler la dépendance de temps exacte entre le signal de sortie et le signal d'entrée de référence.

III.4. Comparaison théorique des différentes méthodes

Méthodes NDT	Principe	Applications	Avantages	Limitations
Thermographie infrarouge	Détecte des défauts sous la surface en mesurant des différences de température relevées sur la surface par des caméras IR	Détection et quantification de toutes zones ayant des propriétés thermiques différentes du matériau sain : délaminations, décollements, fissures, inclusions, vides, porosité, etc...	Inspection rapide, les résultats peuvent être interprétés facilement, pas de radiation dangereuse.	Le spécimen doit être chauffé, la capacité à détecter des défauts diminue lorsque l'épaisseur de l'échantillon augmente.
Ultrasons	Utilise des ondes hautes fréquences pour effectuer les mesures	Détecte les criques, les délaminations, les décollements et autres défauts	Sensible tant aux discontinuités de surface que sous la surface, l'inspection à partir d'une seule face de l'objet est possible, la profondeur de pénétration pour la détection d'un défaut est supérieure à beaucoup d'autres méthodes NDT, des résultats immédiats sont obtenus, des images détaillées montrant la profondeur de défaut et la localisation peuvent être obtenues après traitements numériques	Nécessite un couplant, difficulté d'inspecter les matériaux rugueux, de forme irrégulière. Contraste faible dû à l'atténuation importante dans les composites, spécialement dans les pièces épaisses.
Micro-ondes	Implique la transmission et la réflexion d'ondes électromagnétiques dans le matériau	Détection de décollements, de délaminations et de vides dans les composites stratifiés et détermination de la profondeur de ces défauts dans les composites CFRP.	Les tests se réalisent sans contact et à partir d'une seule face, grande sensibilité du test, les résultats sont obtenus rapidement, expertise non nécessaire, équipement non onéreux.	La profondeur de pénétration est limitée à quelques millimètres
Radiographie	Basé sur le changement d'atténuation des radiations électromagnétiques en présence des défauts lorsque la radiation passe à travers le matériau.	Estimation de la localisation des défauts et de la taille.	Haute résolution et sensibilité, directement relevant pour la détection de défaut.	Les mesures sont lentes, l'accès aux deux faces du matériau est nécessaire, radiations dangereuses, faible contraste pour les criques, équipement cher.
Shearographie	La lumière est utilisée pour détecter les défauts. En analysant la direction, l'amplitude et la phase de la lumière diffusée ou réfractée par la surface d'un objet opaque, les défauts peuvent être identifiés.	Détection de délaminations	Technique rapide, les matériaux testés ne doivent pas avoir des propriétés particulières	Nécessite des équipements lourds et onéreux. Moins sensible que les ultrasons.

Tableau 3 : Méthodes NDT applicables aux composites

2^{ème} Partie : MISE EN ŒUVRE DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

I. CRITERES DE CHOIX D'UNE CAMERA INFRAROUGE

I.1. Performances caractéristiques d'une caméra thermique

La caractérisation des caméras thermiques est relativement bien standardisée. Les caractéristiques qui décrivent les performances d'une caméra peuvent être divisées en sept groupes³⁴:

- a) Les caractéristiques subjectives de la qualité d'une image
- b) Les caractéristiques de réponse
- c) Les caractéristiques de bruit
- d) Les caractéristiques de résolution d'images
- e) Les caractéristiques géométriques
- f) Les caractéristiques de précision
- g) Les caractéristiques spectrales
- h) Les caractéristiques opérationnelles

Les caractéristiques subjectives de la qualité d'une image, les caractéristiques de réponse, les caractéristiques de bruit, les caractéristiques de résolution d'images et les caractéristiques géométriques donnent des informations générales sur les performances des caméras thermiques dans les applications de surveillance. Les caractéristiques de précision sont vitales pour évaluer une caméra pour des applications de mesure. Les caractéristiques opérationnelles donnent des informations sur divers aspects pratiques du travail avec la caméra testée (voir annexe 2).

Caractéristiques subjectives de la qualité de l'image	Caractéristiques de réponse et de bruit	Caractéristiques de résolution d'image
<i>Donne de l'information sur la capacité du système caméra thermique-observateur à détecter, reconnaître et identifier une cible sous différents scénarios.</i>	<i>Les caractéristiques de réponses donnent de l'information sur la réponse de la caméra thermique face à des cibles de taille variable et de température variable, les caractéristiques de bruit sur le bruit qui limite la sensibilité de la caméra à détecter des cibles de faible contraste.</i>	<i>La résolution de l'image apporte des informations sur la capacité de la caméra à percevoir des petits détails d'images hautement contrastées.</i>
MRTD (minimum resolvable temperature difference) MDTD (minimum detectable temperature difference)	SITF (signal transfer function) Dynamic range Niveau de saturation SRF (slit response function) ATF (aperiodic transfer function) NETD (noise equivalent temperature difference) FPN (fixed pattern noise) Non uniformité	IIFOV (instantaneous field of view) Nombre de pixels MTF (modulation transfer function) CTF (contrast transfer function) Limiting resolution EIFOV Résolution spatiale AWAR (area weighted resolution) Ground resolved distance
Caractéristiques de précision	Caractéristiques spectrales	Caractéristiques opérationnelles
<i>Donne de l'information sur la précision de la mesure en température par la caméra</i>	<i>Donne de l'information sur la réponse de la caméra en fonction de la longueur d'onde.</i>	<i>Donne de l'information sur la position de la cible observée ou de la position de l'œil humain pour une utilisation correcte de la caméra.</i>
Précision (erreur minimale) NETD (Noise Generated Error) Stabilité en température	Sensibilité spectrale	Focus range Eye distance Dioptre setting
Caractéristiques géométriques		
<i>Donne de l'information sur les relations géométriques entre la cible et son image.</i>		
Field of view Zoom Distortion Rotation de l'image Boresight alignment		

Tableau 4: Caractéristiques d'une caméra IR

Lors du choix d'une caméra, il ne faut pas sous-estimer le critère "facilité d'emploi" de celle-ci. Ce dernier dépend essentiellement du mode de refroidissement du détecteur de la caméra. En effet, en fonction de la technologie employée, le détecteur doit être plus ou moins refroidi pour réduire son bruit et augmenter sa détectivité.

Les besoins en cryogénie sont donc variables :

- Les détecteurs travaillent dans l'IR proche ou les détecteurs thermiques travaillent à température ambiante.
- Certains détecteurs 3-5 μm fonctionnent à température intermédiaire de 200 à 250K.
- La très grande majorité des détecteurs performants en 3-5 μm et 8-12 μm fonctionnent à 77K et sont refroidis par azote liquide.
- Certains détecteurs à longueur d'onde de coupure élevée ($\lambda < 12\mu\text{m}$) fonctionnent à très basse température (4 à 30K).

Aucune caméra thermique n'étant optimale en regard de l'ensemble des caractéristiques, il est donc fondamental, lorsqu'on désire acquérir un équipement, de bien définir son utilisation future. Malheureusement, les fabricants de caméra ne fournissent pas toujours l'ensemble des paramètres afin de faire un choix judicieux. Cependant, deux paramètres essentiels sont souvent disponibles ou facilement mesurables en laboratoire, la MRTD et la NETD.

Tous les systèmes de mesure destinés à tester des caméras thermiques génèrent des images de cibles standards pour la caméra thermique testée et peuvent être considérés comme des projecteurs de cibles. La qualité de la caméra thermique est déterminée sur la base des images des cibles standards à la sortie de la caméra dans le cas de caméras de surveillance ou des différences radiométriques entre l'image réelle et l'image attendue dans le cas de caméras de mesure.

Différents types de cibles sont utilisés en fonction de la caractéristique de la caméra à tester. Une cible de quatre fentes est utilisée pour la mesure de la MRTD (minimum resolvable temperature difference). Les fentes servent à la détermination des caractéristiques en résolution, notamment la résolution spatiale, et les croix pour les caractéristiques géométriques dont la distortion de l'image.

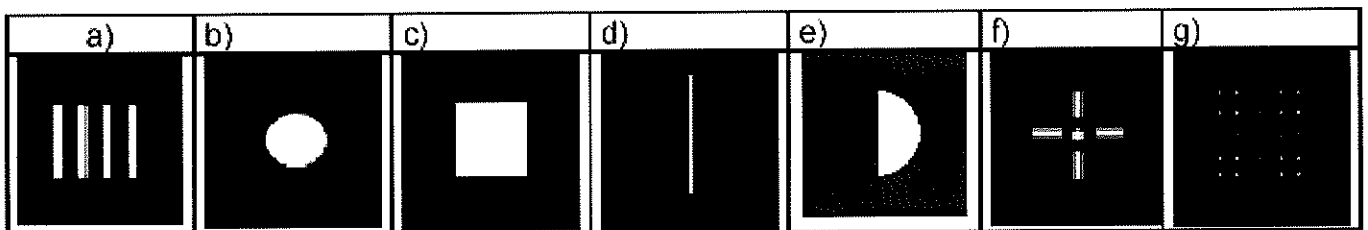


Figure 17: Différents types de cibles³⁵

La MRTD

La MRTD est une caractéristique subjective de la qualité d'une image, elle donne des informations sur la capacité de l'ensemble caméra thermique/observateur à détecter, reconnaître et identifier des cibles dans différents scénarios. Elle fournit une indication sur la capacité de la caméra à distinguer les détails.

Pour mesurer la MRTD, une cible comportant quatre fentes équidistantes et parallèles est placée devant un corps noir. La température au niveau des fentes correspond donc à celle du corps noir. La différence de température entre les fentes (un corps noir) et leurs conjugués (la cible) (voir fig. 17 a) augmente incrémentalement jusqu'à ce qu'un observateur puisse distinguer les quatre fentes.

La différence critique de température est la MRTD. Les mesures de MRTD se font tant pour des différences positives que négatives des températures. L'observateur a un temps illimité pour effectuer la mesure et est autorisé à optimiser sa distance par rapport à l'écran et à utiliser le zoom électronique de la caméra testée.

L'objectif du test est de fournir un graphique montrant les températures différentielles en fonction de la fréquence spatiale.

Les procédures de test pour l'obtention de la MRTD des systèmes thermiques sont exposées dans la norme internationale ASTM E1213-01³⁶.

La MRTD est considérée comme la caractéristique la plus importante des caméras de surveillance et permet de comparer un système avec un autre (des valeurs plus faibles de la MRTD indiquent une meilleure résolution).



Figure 18: Cibles pour mesure de la MRTD³⁷

Remarque : Les spécifications du corps noir sont importantes pour la mesure de la MRTD. De manière surprenante, les mesures de MRTD peuvent être réalisées avec une précision meilleure que l'incertitude totale du corps noir. Pour de faibles incréments, lorsque la température différentielle est proche de zéro et l'intervalle de temps entre les mesures faible, la précision de la mesure est déterminée par le bruit (stabilité court terme) et la linéarité du corps noir plutôt que par sa précision absolue.

Cela devient évident lorsque l'on se souvient que les mesures de MRTD sont réalisées en enregistrant le contraste minimum positif observable, le contraste minimum négatif et que l'on effectue une moyenne géométrique sur ces deux valeurs. Cela enlève les imprécisions sur la température de référence de la cible. De plus, les mesures de MRDT ne dépendent plus de la précision du corps noir mais de sa linéarité. Une erreur d'offset sur la température du corps noir est éliminée lors du moyennage sur les températures positive et négative. La seule erreur restante est la linéarité, c'est-à-dire la façon dont la pente de la courbe de calibration en température correspond à la température réelle.

La NETD

La NETD (noise equivalent temperature difference) fournit une mesure objective de la sensibilité thermique de la caméra. En effet, la NETD est définie comme la différence de température de corps noir entre une cible et son arrière plan nécessaire pour produire un rapport signal/bruit égal à 1. La NETD est liée à la MRTD car une augmentation de la NETD peut signifier une perte de rendu des détails de l'image prise par la caméra. Comme la NETD dépend de la température de l'objet filmé, il est important de travailler dans une salle blanche contrôlée en température et d'utiliser des corps noirs de température connue afin de comparer différentes caméras.

La valeur seule de la NETD n'est pas suffisante pour tirer des conclusions quant à la qualité d'un capteur. En effet, il est important de vérifier qu'il n'existe pas de variation de la NETD en fonction du pixel de l'image considéré.

Si une telle variation existe, il faut vérifier si cette variation suit une loi gaussienne autour de la valeur moyenne de la NETD de l'image entière. Si la distribution s'éloigne d'une répartition gaussienne, l'importance de la dissymétrie observée caractérise également la qualité de la caméra.

I.2. Choix de la sensibilité spectrale (MWIR / LWIR)

Les caméras infrarouges opèrent principalement dans deux fenêtres de haute transmission atmosphérique: LWIR (8-14 μm) et MWIR (3-5 μm).

La loi de Wien montre que les corps de haute température ont leur pic d'émission dans les courtes longueurs d'onde tandis que les objets émettant à température ambiante ont leur maximum d'émission pour de plus grandes longueurs d'onde.

C'est pourquoi, la bande MWIR est choisie pour inspecter des objets de haute température tandis que la bande LWIR sera préférée pour les objets dont la température est proche de la température ambiante.

D'autres critères sont importants lors de la sélection de la bande d'opération de la caméra : la distance d'opération, s'il s'agit d'une utilisation intérieure ou extérieure, la température et l'émissivité des objets inspectés.

Par exemple, les caméras munies d'un capteur LWIR sont choisies pour effectuer des mesures à l'extérieur car elles sont moins affectées par les radiations du soleil.

Les caméras LWIR sont souvent des systèmes non refroidis utilisant des microbolomètres mais il existe également des caméras LWIR refroidies munies de capteurs MCT (Mercure Cadmium Tellure).

Au contraire, la majorité des caméras MWIR nécessitent d'être refroidies soit par de l'azote liquide soit par un cycle de Stirling. Un refroidissement à 77K permet d'obtenir une résolution thermique excellente mais cela peut entacher la portabilité et l'autonomie de la caméra dans des applications en milieux non contrôlés (voir annexe 3).

II. GRANDEURS INFLUENCANT L'ACQUISITION DES IMAGES

Malheureusement, la caméra thermique ne perçoit pas uniquement le rayonnement émis par l'objet à inspecter. Elle capte également les rayonnements émis par les sources environnantes et partiellement réfléchis par l'objet.

De plus, les divers rayonnements doivent être transmis par l'atmosphère et sont donc atténués par la transmission atmosphérique. Les mesures sont également influencées par les rayonnements émis par l'atmosphère.

La caméra doit donc corriger le rayonnement capté afin de calculer avec précision la valeur de la température du corps. Cette correction tient compte d'une série de paramètres influant directement sur la mesure exacte de température. Ces paramètres sont appelés « Grandeurs d'influence »³⁸.

II.1. Grandeurs d'influence liées au corps

Émissivité

L'émissivité est le rapport entre le rayonnement thermique émis par une surface à une température donnée et celui émis par un corps noir dans les mêmes conditions (température, longueur d'onde et direction).

Les corps peuvent ainsi être classés en quatre grandes catégories en fonction de leur émissivité : les corps noirs (émetteur parfait) dont l'émissivité $\varepsilon(\lambda, TS) = \varepsilon = 1$, les corps gris pour lesquels $\varepsilon(\lambda, TS) = \varepsilon = \text{constant} < 1$, les corps blancs (réflecteurs parfaits) pour lesquels $\varepsilon(\lambda, TS) = \varepsilon = 0$ et les corps sélectifs pour lesquels $\varepsilon(\lambda, TS)$ varie avec la longueur d'onde.

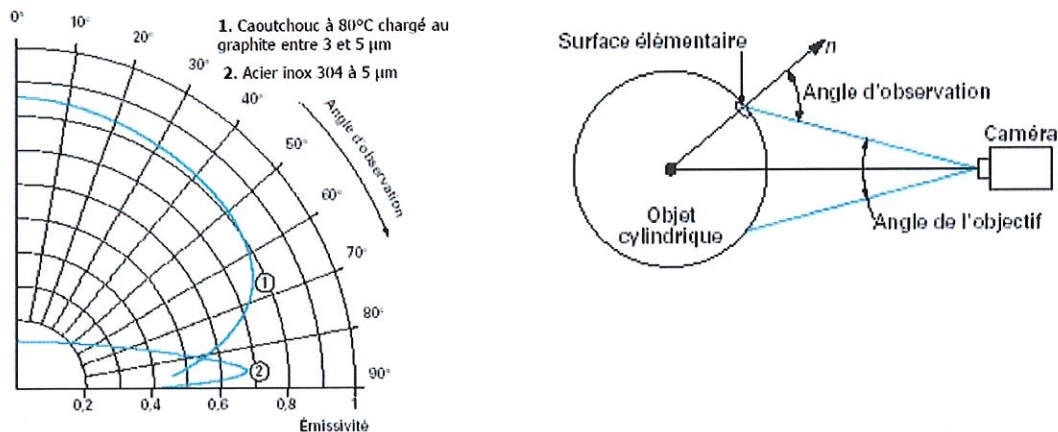
Il est donc fondamental pour l'expérimentateur qui désire connaître la température d'un corps de déterminer avec le plus de précision possible l'émissivité de l'objet observé.

Cette émissivité dépend principalement du matériau qui le constitue. D'une manière générale, plus la surface est rugueuse ou oxydée, plus l'émissivité du corps sera élevée.

Ceci explique également la variation de l'émissivité en fonction de la température. En effet, une modification de température s'accompagne souvent d'une modification de l'état de surface.

La variation de l'émissivité avec la longueur d'onde pourrait s'avérer gênante pour l'expérimentateur. Cependant en thermographie infrarouge classique, on considère souvent que les objets réels sur lesquels on réalise de l'image et de la mesure de T° sont des corps gris. Cette hypothèse tient compte du fait que les bandes spectrales ou fenêtres infrarouges utilisées par les caméras thermiques sont étroites par rapport au spectre électromagnétique de la lumière.

Enfin, il faut tenir compte de la direction d'émission. En effet, l'émission du rayonnement infrarouge varie avec l'angle d'observation d'une même surface d'un corps. Cette variation est cependant très faible tant que l'angle d'observation n'excède pas 50° par rapport à la normale. Par contre si on observe un corps de biais, sous un angle dépassant cette limite de 50° , dans la plupart des cas, l'émissivité chute fortement. Il existe également des matières pour lesquelles l'émissivité augmente avec l'angle d'observation. Cette limitation doit être prise en considération lors d'observation d'objets de géométrie complexe.



Facteur de réflexion

Lors de l'analyse des thermogrammes obtenus par thermographie, l'expérimentateur ne doit pas se laisser abuser par les phénomènes de réflexion de rayonnement en provenance de sources de chaleur environnantes. La quantité de rayonnement réfléchi dépend évidemment de la quantité d'énergie émise par les sources auxiliaires mais également du coefficient de réflexion de la surface de l'objet.

Or ce coefficient de réflexion r est intimement lié à l'émissivité du matériau puisque $r=1-\epsilon$.

Les objets de haute émissivité sont donc beaucoup plus aisés à analyser par thermographie car non seulement ils émettent plus de rayonnement significatif que ceux d'émissivité faible mais ils sont également moins perturbés par les phénomènes de réflexion qui pourraient empêcher toute analyse des images.

C'est la raison pour laquelle, lorsque l'émissivité d'un corps est trop faible, il est parfois utile de l'augmenter artificiellement en recouvrant par exemple l'objet d'une couche de peinture noire.

Forme du corps

La définition de la luminance énergétique spectrique directionnelle montre clairement que celle-ci dépend du cosinus de l'angle formé entre la normale à la surface observée et la direction d'observation.

L'émission de chaleur (autant que l'absorption) présente donc un maximum lorsque la normale à la surface est parallèle à la direction d'observation. Dès lors, le signal émis (ou absorbé) est plus faible lorsqu'il y a un angle entre la normale à la surface et la direction d'observation.

La réduction d'intensité, causée uniquement par les variations de la géométrie de la surface peut mener à des détections erronées de défauts sous la surface.

De plus, les points situés le plus loin de la source (ou du capteur) vont émettre (ou absorber) moins d'énergie en comparaison des points plus proches.

Dans la figure 20, on remarque clairement, qu'en plus de l'effet de l'angle entre la normale au point B et la direction du flux, B est situé plus loin de la source en comparaison du point A.

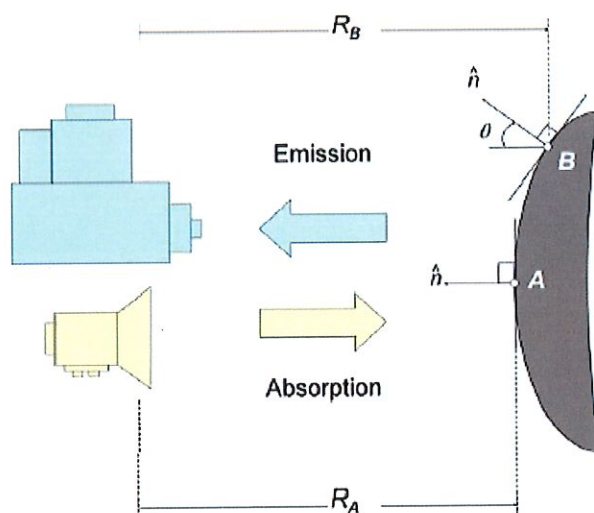


Figure 20: Influence de la géométrie sur d'une surface sur l'émission et l'absorption⁴⁰

Il en résulte que 2 surfaces de géométries différentes mais soumises à la même source de chaleur ne correspondent pas nécessairement à deux mesures thermographiques identiques. La figure 21 illustre ce phénomène. Il s'agit d'une surface plane en plâtre dont la normale forme un angle de 20° avec la direction de chauffe et d'observation et sur laquelle est fixée un demi-cylindre de même matière. L'ensemble de la surface est chauffé par la même source de chaleur.



Figure 21 : Thermogramme d'une plaque inclinée avec demi-cylindre

On distingue clairement la variation spatiale de la température indiquée par le thermogramme.

Il faut donc en conclure qu'il est difficile de détecter par thermographie la présence de défauts sous la surface d'un objet sans en connaître la forme. Si celle-ci est connue, il existe des techniques de correction qui seront abordées dans la partie 2 chapitre III.

II.2. Grandeurs d'influence liées à l'environnement

Température atmosphérique

L'atmosphère dans laquelle on réalise la thermographie émet des rayonnements infrarouges qui perturbent la mesure de la température d'un corps.

Pour la mesure de température absolue, les rayonnements émis par l'atmosphère doivent être déduits par le calculateur de la caméra thermique: ceux-ci dépendent de la température atmosphérique et du facteur moyen de transmission atmosphérique.

Ce calcul peut rapidement s'avérer complexe. Heureusement, il n'est pas nécessaire dans le cas où le but de la thermographie est la recherche de défauts. En effet, dans cette technique, il ne faut pas mesurer exactement les températures de surface mais seulement connaître les variations relatives de température entre deux points. La température extérieure n'influence donc pas le résultat de la mesure à condition qu'elle reste constante au cours du temps. Il est donc préférable de travailler dans une salle blanche régulée en température ou du moins dans un local de grande dimension peu influencé par le système de chauffe ou climatisé.

Température environnante

La température environnante est la température d'une source de chaleur parasite qui se reflète sur la surface à observer et qui peut mener à des conclusions erronées sur l'état de la pièce. La figure 22 illustre ce problème.

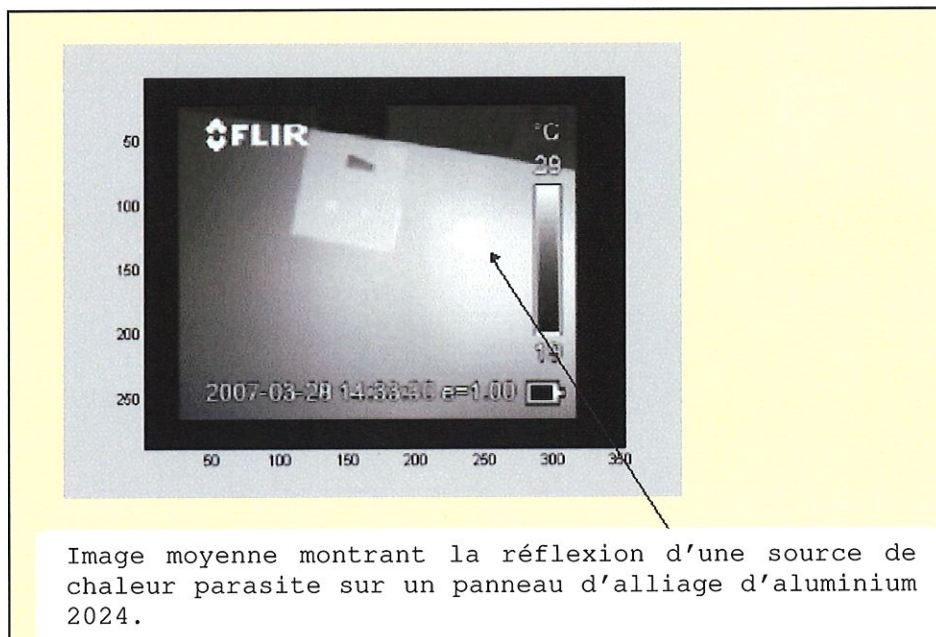


Figure 22: Réflexion d'une source de chaleur

Ce phénomène a d'autant plus de risque de se produire que l'objet à observer à une émissivité faible, donc un taux de réflexion élevé.

Il est pratique d'augmenter l'émissivité à une valeur proche de 1 en peignant en noir les surfaces du spécimen lorsqu'il est possible de le faire avant une inspection. Cette procédure contribue à non seulement diminuer les variations d'émissivité sur la surface mais également à éliminer les réflexions dues à l'environnement. Il est également possible

d'éliminer ces réflexions parasites par une technique de soustraction de 2 images consécutives.

Absorption par l'atmosphère

L'atmosphère située entre la scène thermique analysée et l'instrument de mesure est un milieu semi-transparent. Les molécules (CO₂ et H₂O) contenues dans l'atmosphère absorbent les rayonnements de certaines longueurs d'onde en provenance de la scène thermique située au-delà de cette tranche d'atmosphère.

La figure 23 représente le facteur spectral de transmission pour des épaisseurs d'atmosphère de 1km et 5km.

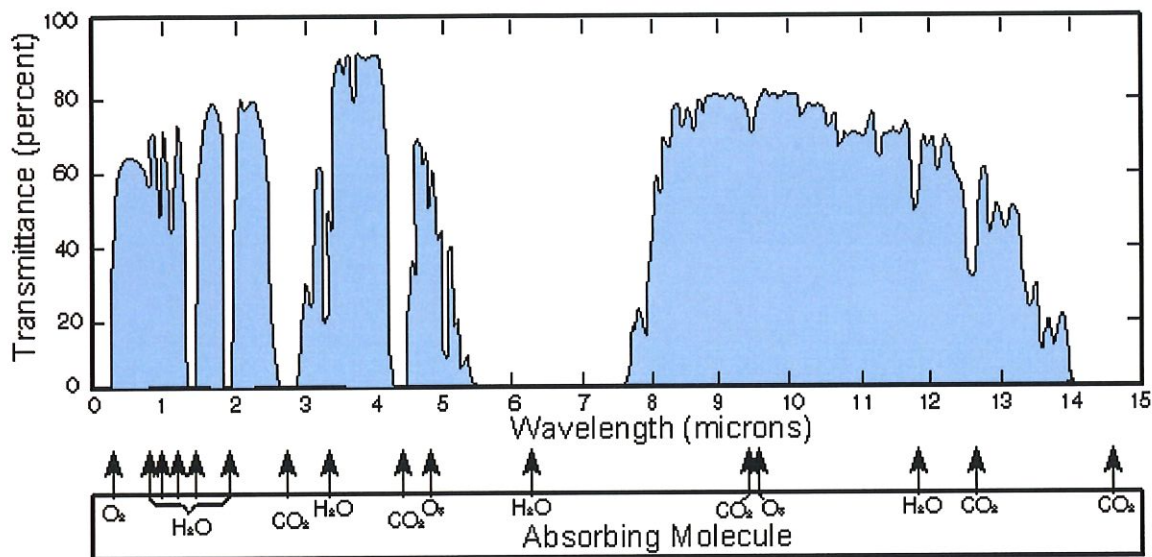


Figure 23: Fenêtre de transmission atmosphérique⁴¹

Il existe trois fenêtres de transmission atmosphérique :

- La première fenêtre ($0,3\mu\text{m} < \lambda < 2,5\mu\text{m}$) est une fenêtre multiple permettant la transmission d'une faible partie des UV, de toutes les radiations visibles et de l'IR proche. La première fenêtre est la zone de travail de l'oeil humain.
- La seconde fenêtre ($3\mu\text{m} < \lambda < 5\mu\text{m}$) est double à cause de la bande d'absorption CO₂ située juste au-dessus de $4\mu\text{m}$.
- La troisième fenêtre ($8\mu\text{m} < \lambda < 12\mu\text{m}$). On remarque sans peine que cette fenêtre est moins affectée par les éléments perturbateurs que sont par exemple le brouillard et les écrans de fumée, ce qui en fait la fenêtre préférentielle pour des applications militaires ou extérieures (détection d'objet à 300K).

La désignation de « fenêtres de transmission atmosphérique » ne doit pas faire oublier que, à l'intérieur de ces fenêtres, le facteur spectral de transmission ne prend pas nécessairement la valeur unité.

On remarque par exemple que ce facteur spectral de transmission n'est pas identique à toutes les longueurs d'onde. Il est donc utile comme le montre la figure 24 de choisir la plage de détection de la caméra en fonction de cette absorption atmosphérique surtout si les distances de mesures sont importantes.

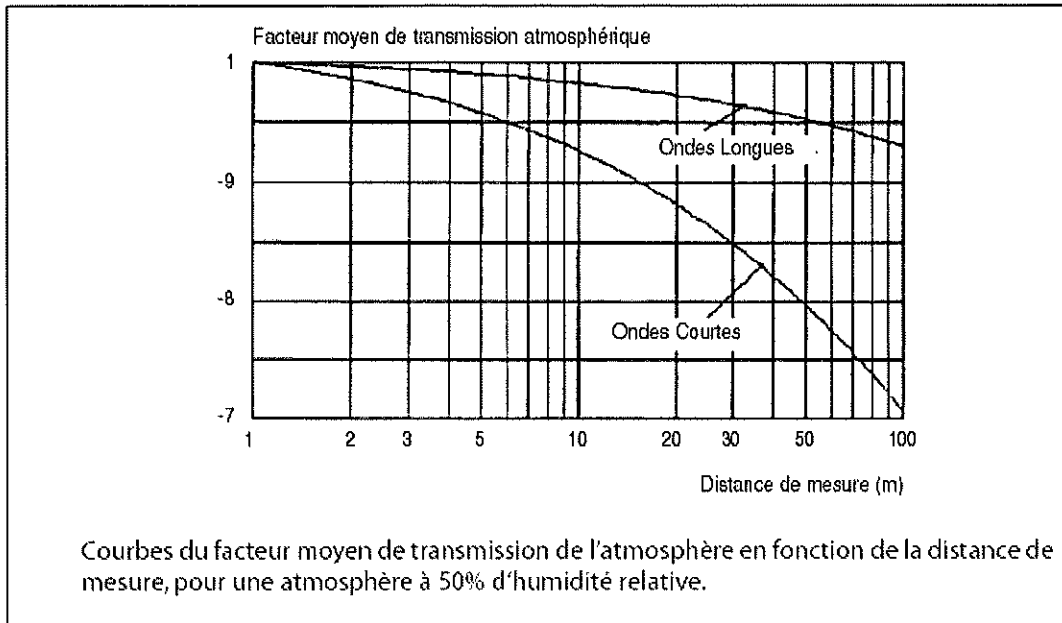


Figure 24: Facteur moyen de transmission atmosphérique³⁸

Il dépend également de l'épaisseur de l'atmosphère (distance de mesure), des concentrations des différents gaz et vapeurs (notamment l'humidité relative de l'air) et de la température de l'atmosphère.

Si, de plus, l'atmosphère contient des particules solides ou liquides en suspension, les rayonnements incidents sont diffusés dans toutes les directions.

II.3. Grandeurs d'influence liées à la chauffe

Influence du temps de chauffe

La solution 1D de l'équation de Fourier montre qu'à la surface d'un corps semi-infini soumis à un pulse de Dirac propagé par conduction, la température évolue comme l'inverse de la racine carrée du temps⁴².

Dans la pratique, il n'est pas possible de reproduire ce pulse théorique. Cependant, un pulse rectangulaire de durée très faible permet de s'approcher au mieux d'un pulse de Dirac.

Afin d'illustrer l'influence du temps de chauffe sur les résultats expérimentaux, un aérofrein en composite de F16 contenant une délamination a été soumis successivement à un pulse court s'apparentant à un pulse de Dirac et à un pulse long de 15s. La température mesurée au niveau d'une zone saine de l'aérofrein et celle relevée au droit de la délamination permettent de construire l'évolution au cours du temps du contraste ou différence entre ces deux températures.

La figure 25 illustre les courbes de température et de contraste lorsque l'aérofrein est soumis à un pulse de 0,015 s à haute puissance (6,3 KJ).

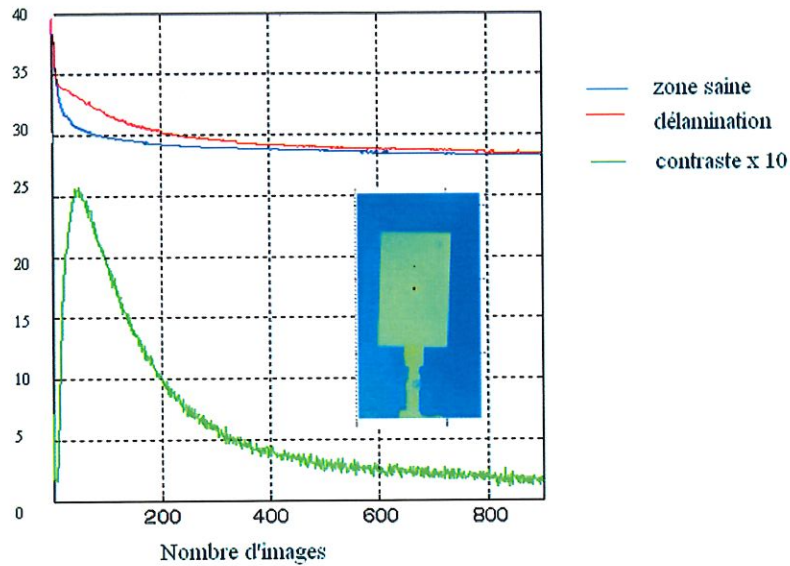


Figure 25: Evolution de la température de l'aérofrein (zone saine et zone de délamination) soumis à un pulse très court.

La température du matériau évolue effectivement au cours du temps de la façon prévue par l'équation de Fourier.

Par contre, lorsqu'un corps n'est plus soumis à un pulse court mais à un pulse long, le comportement du matériau diffère de celui prédit par la solution 1D de l'équation de Fourier pour un pulse Dirac.

La figure 26 illustre l'évolution de la température de surface pour le même aérofrein soumis à un pulse long (15s) à haute puissance (15 KJ).

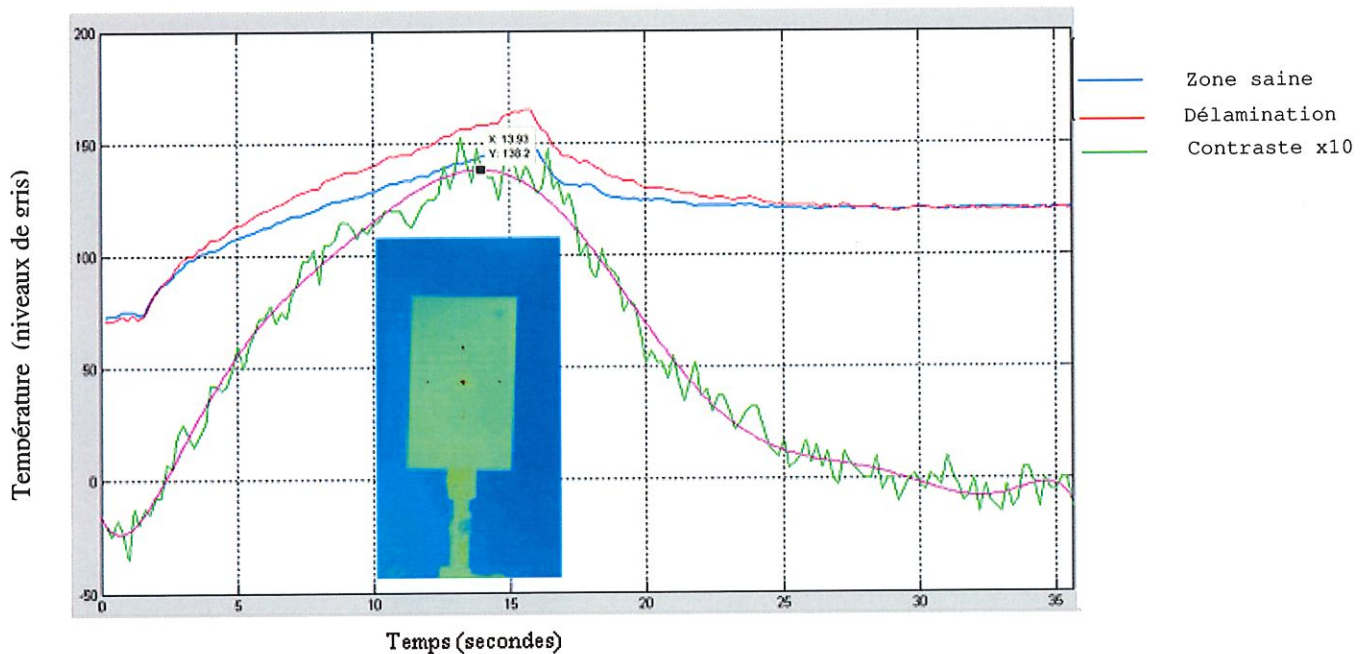


Figure 26: Evolution de la température de l'aérofrein (zone saine et au droit d'une délamination) soumis à un pulse long (15s) à haute puissance (15KJ).

On constate notamment que le contraste maximum apparaît avant la fin de la chauffe pour des défauts proches de la surface.

Influence de l'intensité de la chauffe

Un autre paramètre de la chauffe qui influence la détection des défauts est l'intensité du flux de chaleur délivré par la source.

Puisque le flux de chaleur n'est pas une grandeur directement mesurable, l'analyse se base sur l'augmentation de température qu'il provoque à la surface de la partie saine d'une pièce à tester.

Afin d'illustrer le propos, nous allons l'appliquer au calibre CFRP dont les caractéristiques géométriques sont reprises figure 27. Ce calibre comporte une série de « Flat bottom holes » ou trous à fond plat de profondeurs variables et ce pour deux diamètres différents : 5 et 10mm.

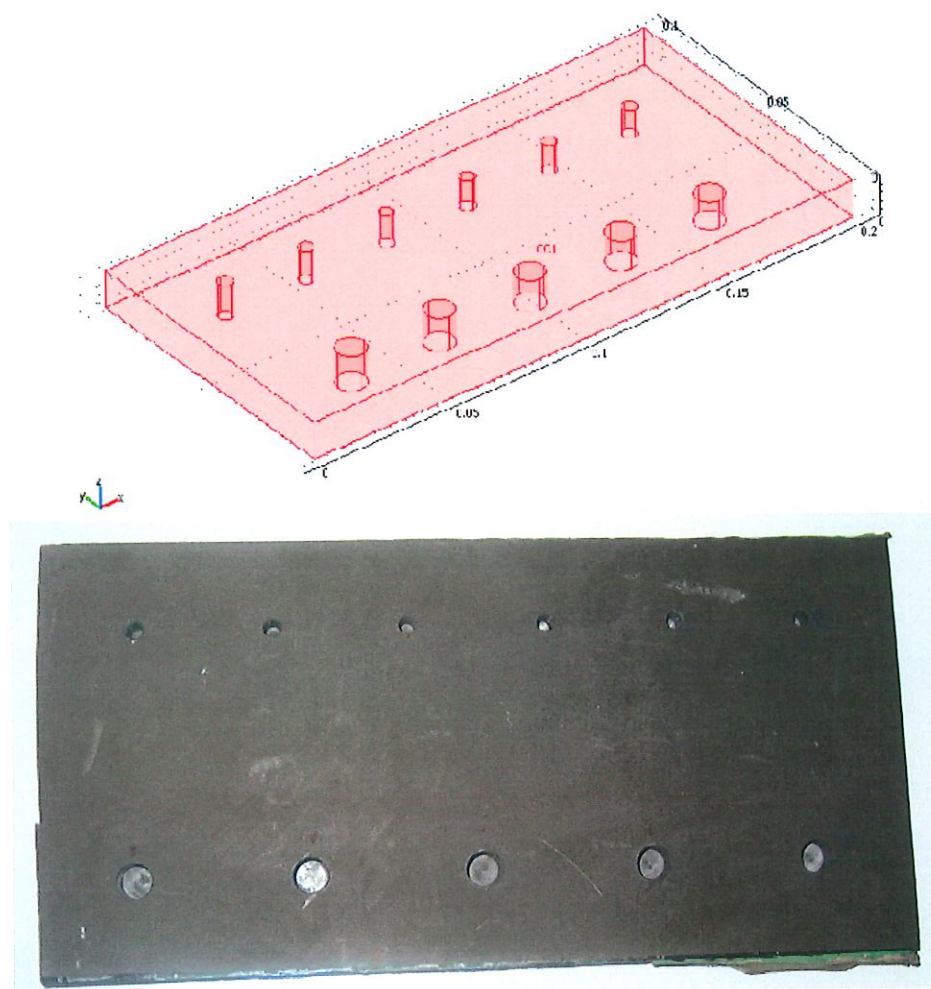


Figure 27: Calibre CFRP :
6 trous de $\varnothing 5\text{mm}$ (prof : 0,91mm, 1,51mm, 2,11mm, 2,36mm, 2,61mm, 3,11mm)
5 trous de $\varnothing 10\text{mm}$ (prof : 0,81mm, 1,31mm, 1,91mm, 2,51mm, 3,01mm)

Le graphique suivant montre l'évolution du contraste maximum obtenu au droit des défauts de différentes profondeurs pour des augmentations de température de surface croissantes.

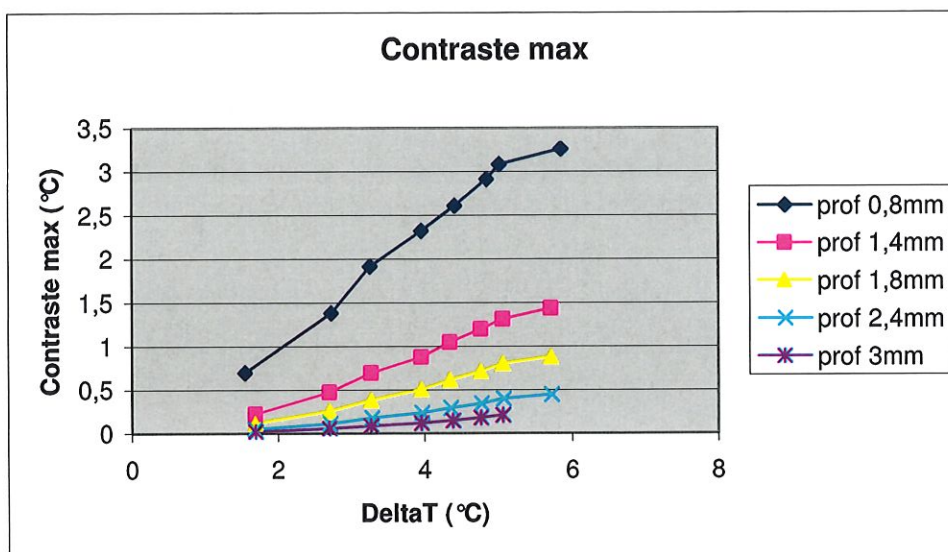


Figure 28: Evolution du contraste maximum en fonction du ΔT

On remarque que le contraste maximum entre le défaut et le composite à la surface de la pièce augmente lorsque la variation de température de surface croît, donc que l'intensité du flux de chaleur augmente. Il est évident que plus le contraste maximum est élevé, plus le défaut est facilement détectable.

Il existe cependant une limitation à l'augmentation de température admissible car il faut éviter une détérioration du revêtement du spécimen (peinture...).

Cette contrainte sur la température maximale de surface peut parfois être un frein à la détection de défauts profonds, l'intensité du flux thermique n'étant pas suffisant pour pénétrer l'épaisseur de la matière.

La figure 29 illustre la détection de défaut d'impact sur une plaque CFRP de 3,6mm de profondeur par thermographie infrarouge pulsée (pulse de 6,3 KJ pendant 0,015s) et par ultrasons (C-SCAN).

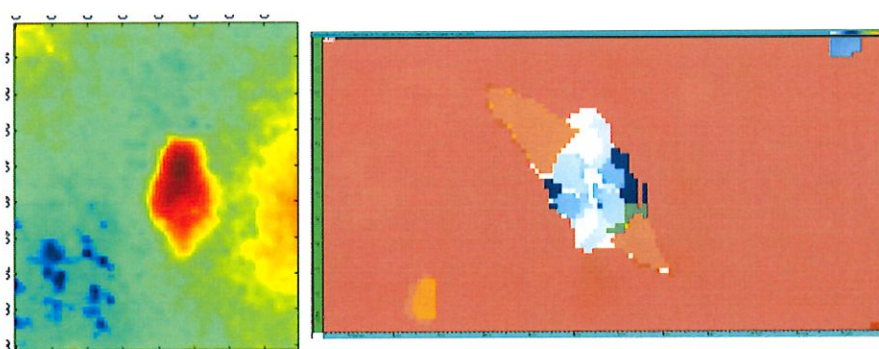


Figure 29: Défaut d'impact dans une plaque CFRP détecté par thermographie pulsée (gauche) et par C-SCAN (droite).

Le test par ultrasons montre la forme réelle du défaut et notamment la délamination des fibres inclinées à 45°, les plus profondes. Par contre,

l'image thermographique ne permet pas de détecter ce défaut trop profond pour l'énergie thermique disponible.

Influence de l'uniformité de chauffe

La méthode de chauffe idéale doit non seulement assurer une augmentation de température de la surface du spécimen à tester mais il faut également que cette augmentation soit uniforme sur l'ensemble de cette surface.

Il existe cependant des méthodes de traitement d'image qui permettent de compenser les hétérogénéités observées dans la température de surface du spécimen directement après la chauffe.

Ce phénomène peut s'observer lorsque, par exemple, la source lumineuse est ponctuelle, ce qui engendre une zone plus chaude sur la partie du spécimen située au droit de la source.

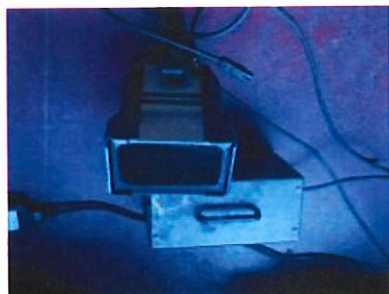
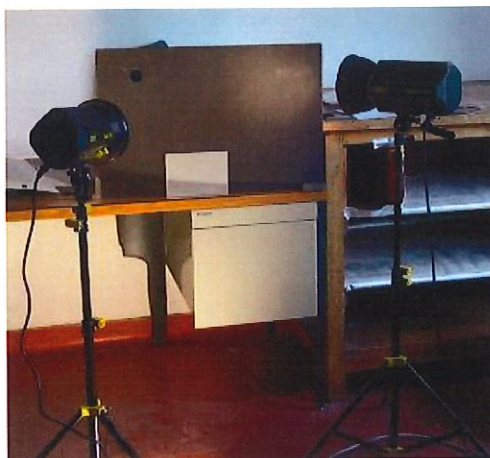


Figure 30: Méthodes de chauffe ponctuelle

La figure 31 est une image prise avec la caméra FLIR SC3000 traitée en fausses couleurs après lissage qui montre la température d'un spécimen après une chauffe avec une source de chaleur ponctuelle. On observe clairement une non uniformité de chauffe qui pourrait nuire à la détectabilité de défauts.

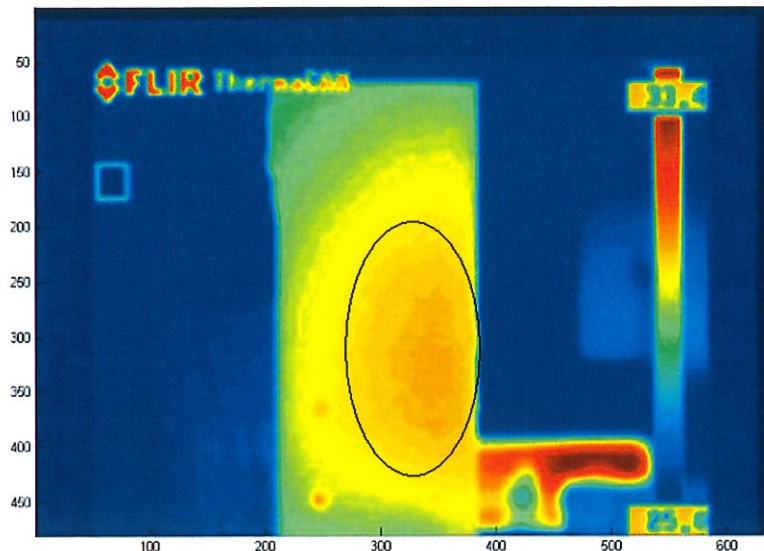


Figure 31: Non uniformité de chauffe

Cette dégradation d'image est non répétitive puisqu'elle dépend du positionnement de la lampe par rapport au spécimen. Dans ce cas, il est utile d'appliquer des techniques de traitement par référence temporelle.

Influence de l'emplacement relatif du chauffage et de la caméra: transmission ou réflexion

Un des avantages majeurs de la thermographie infrarouge est sa capacité à tester une pièce pour laquelle seule une des faces est accessible, ce qui n'est pas le cas par exemple des tests par rayons X.

Dans ce cas, l'expérimentateur choisira de travailler en mode réflexion, ce qui signifie qu'il place la caméra et le système de chauffe du même côté du matériau testé.

Si cette contrainte de non accessibilité n'existe pas, l'expérimentateur peut également choisir de placer la caméra et le système de chauffe de part et d'autre du matériau et travailler en transmission.

Les courbes de températures observées dans les deux cas sont différentes comme le montre la figure 32.

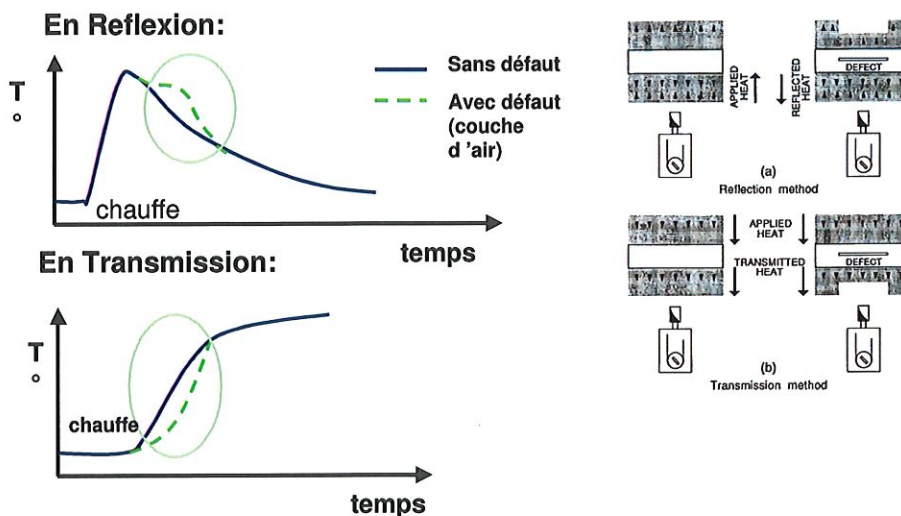


Figure 32: Courbe de température en réflexion et en transmission (à gauche)- dispositif expérimental en transmission et réflexion (à droite)

Travailler en réflexion ou en transmission n'est cependant pas sans conséquence sur le contraste de l'image. En effet, la figure 33 montre les images thermographiques obtenues lors d'un test par thermographie pulsée en transmission et en réflexion sur un wing tail en composite de F16. Dans les deux cas, la structure interne du panneau est facilement identifiable mais le test par réflexion fournit visiblement une image de contraste plus important que le test par transmission, toutes autres conditions expérimentales étant gardées identiques.

De plus, lorsqu'on travaille en transmission, il n'est pas possible d'obtenir des renseignements sur la profondeur d'un défaut. En effet, l'ensemble des fronts thermiques traversant le matériau arrivent en même temps sur la face arrière.

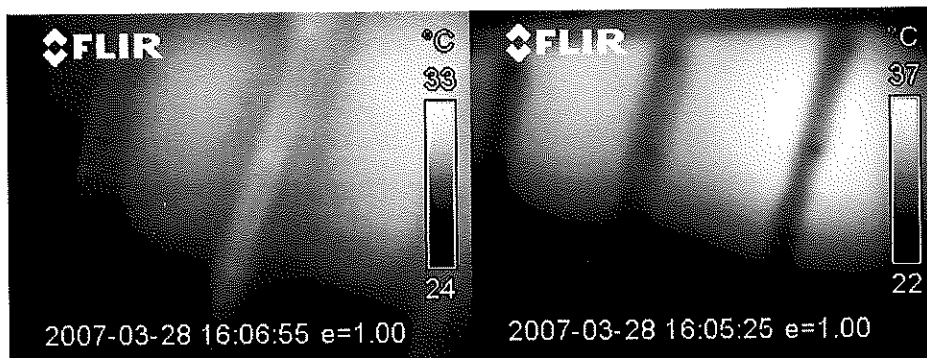


Figure 33: Test d'un wing tail F16 par thermographie pulsée en transmission (à gauche) , en réflexion (à droite).

II.4. Grandeurs d'influence liées à l'enregistrement

Influence de la durée d'acquisition (tacq) et de la fréquence d'acquisition (fs)

Lors de l'acquisition d'une séquence thermographique, l'opérateur doit fixer deux paramètres importants : la fréquence d'échantillonnage f_s et le temps d'acquisition t_{acq} . Ces deux paramètres sont interdépendants car ils sont limités par la capacité de stockage du système IR : $N_{max} = f_s \cdot t_{acq}$.

Pour faire une sélection adéquate de la fréquence d'échantillonnage, il faut tenir compte des propriétés thermiques du matériau testé. Les matériaux hautement conducteurs nécessitent une fréquence d'échantillonnage élevée afin d'éviter les pertes d'information mais s'accommodent d'un temps d'acquisition faible. En effet, les variations thermiques sont limitées dans le temps.

A l'inverse, les matériaux faiblement conducteurs demandent des temps d'acquisition plus longs mais des fréquences d'échantillonnage plus faibles.

D'autres facteurs comme le rapport de diffusivité thermique entre une zone de défaut et une zone saine et les limites liées aux équipements peuvent jouer un rôle dans le choix de f_s et t_{acq} .

En règle générale, l'acquisition de données devrait commencer avant que le flux de chaleur n'atteigne les défauts et se terminer lorsque le contraste thermique entre une zone saine et un défaut devient négligeable.

Une façon simple de procéder est de vérifier que la dernière image de la séquence (LRT) est approximativement à température ambiante.

Influence de la fenêtre de troncature w^{42}

Le choix de la fréquence d'échantillonnage f_s et du temps d'acquisition t_{acq} étant effectués par l'opérateur, la résolution temporelle maximale

correspondant à $\Delta t = 1/f_s$ et la taille de la fenêtre d'acquisition $w = t_{acq}$ en découlent.

Il en va de même du nombre de points qui vont être échantillonnés N puisque $w = N \cdot \Delta t$.

Le choix des paramètres dans le domaine temporel va également fixer les paramètres dans le domaine fréquentiel si l'expérimentateur désire travailler en thermographie pulsée de phase.

En effet, la résolution fréquentielle maximale entre deux images après traitement du signal temporel par transformée de Fourier peut être obtenue par

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{1}{w} \quad [\text{Équation 12}]$$

III. LE TRAITEMENT DES IMAGES

III.1. Traitements des images communs aux trois techniques thermographiques (pulsée, pulsée de phase et lock-in)

Le vignetage

Bien que le vignetage soit un phénomène qui affecte la qualité d'une image, sa correction n'est pas à proprement parlé un traitement d'images car le vignetage est avant tout un phénomène inhérent à la construction de la caméra.

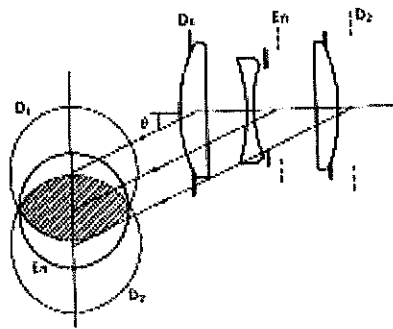
En effet, il s'agit d'un effet de bord qui produit un assombrissement sur l'extérieur du cercle image projeté par l'objectif. On peut observer un assombrissement progressif de la périphérie d'une image ainsi qu'une perte de contraste⁴³.

Trois phénomènes différents sont responsables de ce vignetage :

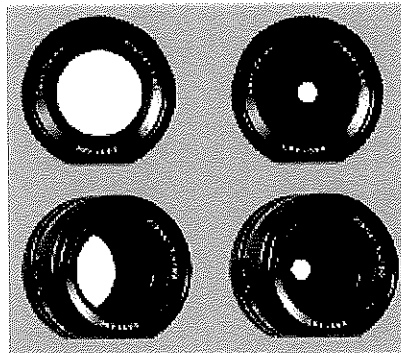
1. Le vignetage « naturel »
2. Le vignetage « optique »
3. Le vignetage « mécanique »

Le vignetage **naturel** découle de la loi qui décrit la diminution d'illumination du plan image sous un certain angle par rapport à l'axe optique (appelée *illumination falloff* en anglais). Il est inhérent à toutes les lentilles.

Le vignetage **optique** a ses origines dans la longueur physique d'un objectif. Les rayons incidents obliques sont interceptés. Les bords des lentilles délimitent une pupille d'entrée en forme d'œil de chat (*cat's eye*).



Effet cat's eye



Vignetage optique et effet cat's eye

Figure 34: Effet cat's eye⁴⁴

On peut observer ci-dessus en blanc les pupilles d'entrée des objectifs et l'effet "œil de chat" qui peut se produire.

Ce phénomène est particulièrement marqué pour les grands angles et les zooms. L'effet dépend de l'ouverture du diaphragme. Plus l'ouverture relative est grande (diaphragme fermé), moins l'effet est visible.

Le vignetage mécanique provient d'un élément physique autre que les lentilles, comme un défaut de l'objectif, un pare-soleil ou un filtre mal adapté, qui empêche certains rayons obliques d'atteindre la surface sensible. Ce vignetage est parfois utilisé délibérément pour obtenir un effet esthétique qui accentue le centre de l'image.

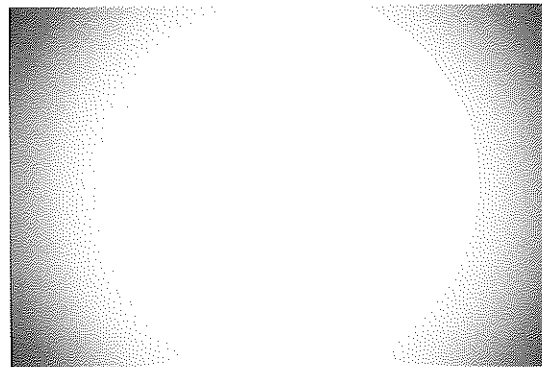


Figure 35: Vignetage d'une photo

La recherche de défauts en thermographie étant essentiellement basée sur la comparaison de l'évolution de la température entre les différentes zones de l'image, l'utilisation d'une caméra affectée par le vignetage pourrait fausser les résultats du test. De plus, la gravité du vignetage dépend de la température de l'objet.

Il est donc essentiel d'effectuer préalablement à toute mesure une compensation du vignetage par une correction du gain de chaque élément du capteur de la caméra.

Compensation en gain du vignetage optique :

Afin d'illustrer la procédure de compensation du vignetage, nous l'avons appliquée à une caméra Sophie Thales dont les caractéristiques sont

décrites en annexe 4. Le capteur de cette caméra est constitué de 288 lignes de 4 éléments et d'un système de balayage permettant l'acquisition d'une image. Le gain de chaque ligne peut être réglé individuellement. La caméra Thales ne fournit pas directement la valeur de la température de l'objet observé, l'image obtenue étant exprimée en niveaux de gris.

Afin de corriger le vignetage optique inhérent à la caméra, un corps noir uniforme en température est placé juste devant l'objectif en germanium en position focale.

Le niveau de gris des 288 lignes du capteur est mesuré. En l'absence de vignetage, ce niveau devrait donc être le même pour l'ensemble des lignes. Celui-ci n'étant pas uniforme, on en déduit qu'il y a bien phénomène de vignetage et un coefficient de correction en gain est appliqué afin de compenser l'anomalie.

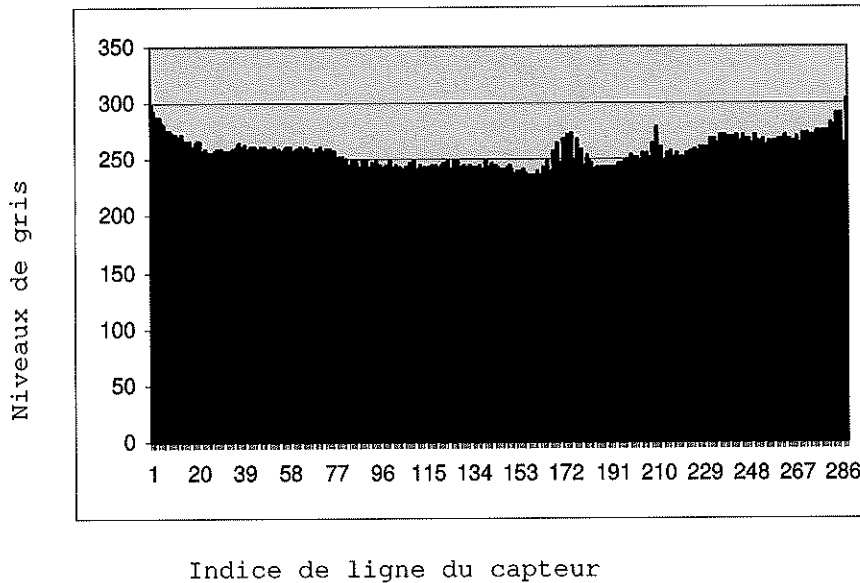


Figure 36: Niveau de gris des 288 lignes du capteur avant correction du vignetage

Correction des thermogrammes en fonction de la forme des objets observés²⁸

La théorie montre que la luminance énergétique spectrique directionnelle, qui par définition est égale à

$$L_{\lambda} = \frac{d^5 \phi}{dS \cdot \cos \theta \cdot d\Omega \cdot d\lambda} \text{ en } W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1} \quad [\text{Équation 13}]^{27}$$

dépend du cosinus de l'angle formé par la normale à la surface du spécimen et la direction d'observation.

Lorsque la surface à inspecter est inclinée ou lorsqu'elle n'est pas plane, chaque surface élémentaire du spécimen présente une inclinaison différente par rapport à la direction d'observation. Deux surfaces élémentaires de même température ne correspondent donc pas nécessairement à deux mesures thermographiques identiques. Il est donc impératif, préalablement à toute interprétation des thermogrammes, d'effectuer une correction afin de tenir compte des orientations différentes de chaque surface élémentaire observée.

Afin de simplifier le problème, les hypothèses suivantes sont considérées : projection orthogonale (projection plane), flux thermique perpendiculaire à l'axe du spécimen, faible influence de la distance entre le chauffage et le spécimen, émissivité de la surface élevée.

La géométrie de la pièce est supposée connue. La linéarité locale de la pièce est un paramètre important puisqu'il influence le choix des équations utilisées pour résoudre le problème.

En effet, l'analyse du thermogramme est effectuée ligne par ligne. La valeur de chaque pixel du thermogramme est corrigée en fonction de la géométrie locale de la pièce. Le pixel est considéré faisant partie d'un segment linéaire de la pièce si localement la surface de la pièce présente une inclinaison constante par rapport à la direction d'observation. Si ce n'est pas le cas, le pixel appartient à un segment non linéaire.

Segments linéaires :

Si un segment est linéaire, l'influence de la variation de la distance entre le spécimen et le chauffage est prépondérante sur l'orientation de la surface.

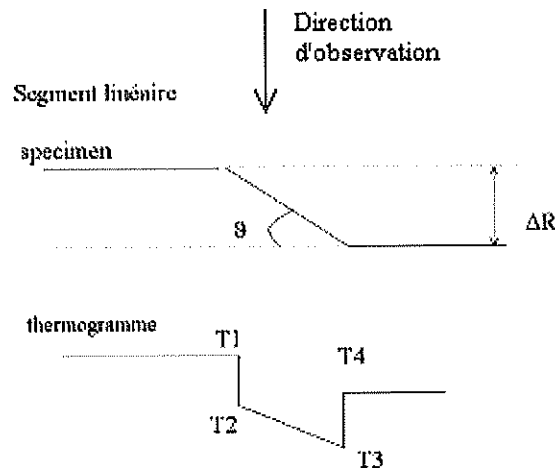


Figure 37: Mesure de la température par une caméra thermographique d'une surface plane inclinée par rapport à la direction d'observation (température réelle constante), configuration expérimentale et profil thermique correspondant²⁸.

Dans ce cas, si on pose que la température du spécimen avant la chauffe est uniforme et égale à T_i , on peut écrire :

$$T_2 - T_i = (T_1 - T_i) \cos \vartheta \quad [\text{Équation 14}]$$

$$T_3 - T_i = (T_4 - T_i) \cos \vartheta$$

qui permet d'obtenir :

$$T_2 - T_i = (T_1 - T_i) \cos \vartheta \quad [\text{Équation 15}]$$

$$T_3 - T_i = (T_4 - T_i) \cos \vartheta$$

où T2 et T3 sont les températures mesurées par thermographie de deux pixels de l'image de la plaque inclinée, tandis que T1 et T4 sont les températures qui seraient mesurées si la normale à la plaque était parallèle à la direction d'observation.

Segments non linéaires:

Dans ce cas, c'est la variation de l'orientation θ qui est prépondérante et non plus la distance entre le spécimen et le chauffage.

Connaissant T_i (la température initiale avant chauffage), il est possible de calculer la température thermographique qu'aurait un pixel si la normale à la surface était parallèle à la direction d'observation.

Pour les petits segments, nous faisons l'hypothèse que les variations de température sont seulement proportionnelles à l'orientation θ .

Dès lors,

$$T_{\max} - T_i = \frac{T - T_i}{\cos \vartheta} \quad [\text{Équation 16}]$$

où T est la température mesurée du pixel et Tmax est la température du pixel si la normale à la surface était parallèle à la direction d'observation.

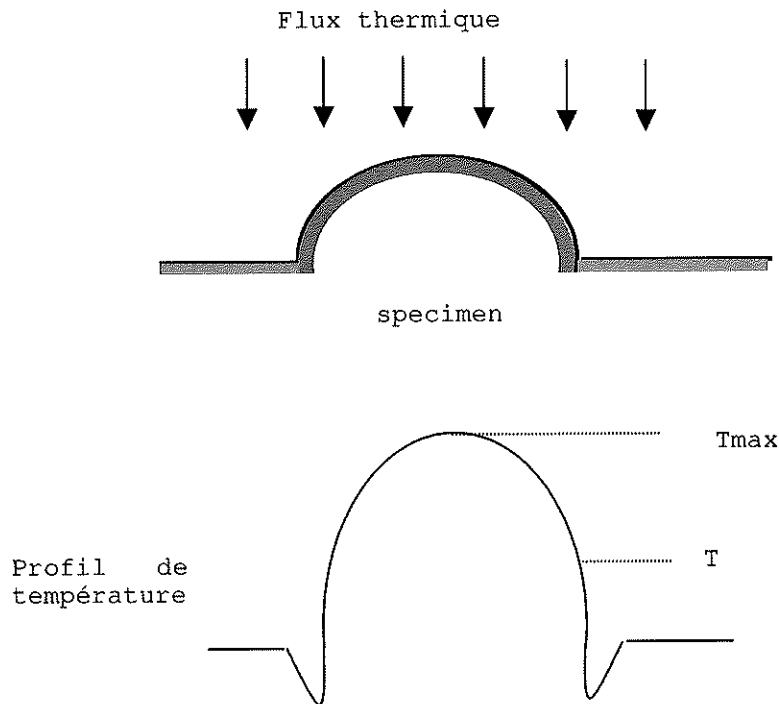


Figure 38: Profil de température sur un segment non linéaire²⁸

III.2. Traitements des images spécifiques à la thermographie pulsée

La non-uniformité de chauffe

La non uniformité de chauffe d'une surface est une source d'erreur inhérente à la thermographie active.

En effet, puisque le principe de détection d'un défaut est basé sur des différences de température entre zones, une non uniformité de chauffe peut produire de la confusion, principalement dans la quantification du défaut. Il est donc essentiel de réduire cette non uniformité par un traitement d'image approprié.

La méthode la plus simple consiste à soustraire de l'image à traiter une image de la même scène enregistrée plus tard dans la séquence lorsque le contraste entre une zone saine et une zone affectée par un défaut n'est plus visible. La non uniformité de chauffe étant présente dans les deux images, leur soustraction permet d'obtenir une image résultante débarrassée de ce défaut.

La figure 31 représente le thermogramme du calibre (décrit figure 27) 5 secondes après avoir été chauffé avec une source de chaleur ponctuelle. La non uniformité de chauffe y est fortement visible. La figure 39 représente le même thermogramme duquel est soustrait le thermogramme enregistré 11 secondes après la chauffe.

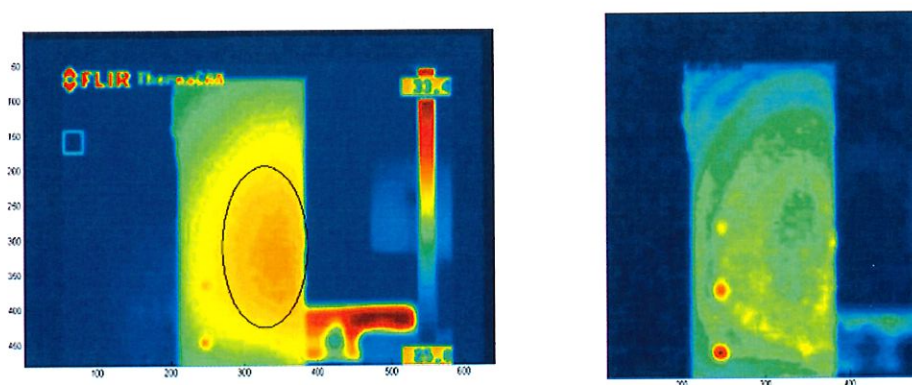


Figure 39: Thermogramme traité pour diminuer la non uniformité de chauffe - image non traitée (gauche) - image traitée par soustraction de thermogramme (à droite)

Cette nouvelle image permet une détection des défauts de faible diamètre qui étaient précédemment cachés par la non uniformité de chauffe.

La diminution du bruit^{45,28}

Les systèmes infrarouges présentent des signaux qui sont naturellement faibles. C'est pourquoi les différentes sources de bruit sont particulièrement gênantes. Les émissions parasites, les réflexions thermiques, l'arrivée désordonnée des photons contribuent à dégrader le signal.

Au niveau du détecteur infrarouge, on note essentiellement le bruit thermique (présent dans les conducteurs et dû aux mouvements des charges

dans un solide), le scintillement ou bruit 1/f (présent dans les semi-conducteurs), et le bruit d'impact (dû à l'arrivée discrète des photons dans la radiation incidente).

Il est intéressant de caractériser le contenu en bruit des images infrarouges en utilisant la notion de SNR (signal to noise ratio). Cela nécessite seulement d'enregistrer deux images consécutives A et B de la même scène.

Si ces deux images sont enregistrées dans les mêmes conditions, la seule différence entre elles est le bruit. Celui-ci peut donc être évalué par soustraction entre ces deux images $N = |A-B|$.

Le SNR étant défini par la formule suivante :

$$\text{SNR} = \frac{\text{puissance moyenne de l'image bruitée}}{\text{puissance moyenne du bruit}} \quad [\text{Équation 17}]$$

Il peut donc également s'écrire

$$\text{SNR} = \frac{\sum_i \sum_j [A(i, j)]^2}{1/2 [\text{déviati} \text{on s tan dard } \langle N(i, j) \rangle]^2 \cdot \text{Maxcol} \cdot \text{Maxrow}} \quad [\text{Équation 18}]$$

où $i=0, 1, \dots, \text{Maxrow}-1$ (Maxrow=nombre maximum de lignes dans l'image) et $j=0, 1, \dots, \text{Maxcol}-1$ (Maxcol=nombre maximum de colonnes dans l'image).

Dans cette formule, la déviation standard quantifie la variabilité du bruit associé à chaque pixel par rapport au bruit moyen de l'ensemble de l'image.

$$\text{déviati} \text{on s tan dard}(N) = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j [N(i, j) - \eta]^2}{\text{Maxcol} \cdot \text{Maxrow}}} \quad [\text{Équation 19}]$$

$$\text{où } \eta = \frac{\sum_i \sum_j N(i, j)}{\text{Maxcol} \cdot \text{Maxrow}}$$

Plusieurs techniques existent pour réduire les effets du bruit, des techniques basées sur l'accumulation d'images, d'autres sur l'application de filtres spatiaux.

Accumulation des images

Afin de pouvoir détecter des faibles défauts dont la signature thermique n'est pas largement supérieure au bruit de l'image, il est utile d'effectuer le moyennage d'un grand nombre d'images. Ce procédé augmente la qualité de l'image tout en préservant les limites des contours contenus dans cette image. Ceci n'est pas le cas dans les techniques de filtrage spatial décrites ci-après.

Filtres spatiaux²⁸

Le traitement d'images par application de filtres spatiaux est un traitement modifiant la valeur des pixels de l'image.

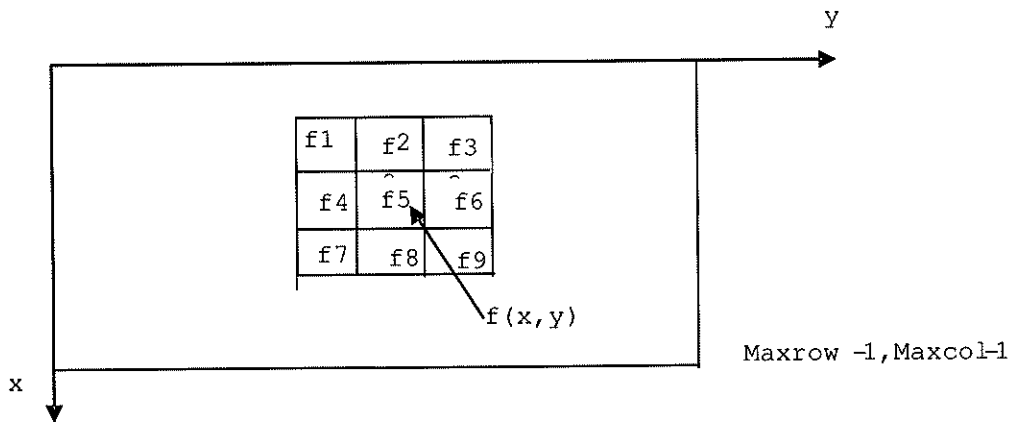


Figure 40: Principe général d'un filtrage spatial, un ensemble de 3x3 pixels voisins centré sur le pixel traité est montré.

En effet, la valeur de chaque pixel de l'image $f(x,y)$ non situés aux bords de l'image (ceux-ci restant à leur valeur d'origine) (voir figure 40) est remplacée par une valeur $f'(x,y)$ calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$f'(x, y) = a_{scale} (a_1 f_1 + a_2 f_2 + \dots + a_n f_n)$$

où f_1, f_2, \dots, f_n sont les valeurs des pixels entourant le pixel traité et le facteur a_{scale} est un facteur d'échelle nécessaire pour garder l'image traitée dans le même ordre de valeur que l'image originale.

Le choix du nombre de pixels n intervenant dans le filtre et des coefficients multiplicateurs a_1, \dots, a_n modifie l'effet obtenu par l'application du filtre.

Par exemple, dans le cas d'un filtre passe bas, $f'(x,y)$ est obtenue en remplaçant a_1, a_2, \dots, a_n par 1 et en posant $a_{scale} = 1/n$. L'effet obtenu est l'atténuation des composants haute fréquence de l'image, souvent affectés par le bruit. En effet, les composants haute fréquence d'une image sont des zones dont la valeur change rapidement.

Une autre méthode de lissage consiste à développer une approche statistique et à utiliser une fenêtre gaussienne glissante^{28,46}.

Pour simplifier l'explication de la méthode, on peut dire que le procédé consiste à réaliser de manière numérique un effet similaire à celui créé par une lentille défocalisée. L'effet du lissage par gaussienne est donc de rendre l'image plus floue, de façon similaire à ce que fait une filtre par moyennage présenté ci-avant. Le degré de lissage est déterminé par l'écart-type de la gaussienne.

La valeur de chaque pixel est remplacée par la moyenne pondérée des pixels voisins, la fonction de pondération étant une courbe gaussienne centrée sur le pixel à traiter et dont les caractéristiques sont définies essentiellement par l'écart-type de la gaussienne.

L'utilisation d'une telle fonction de pondération permet, à l'inverse de ce qui se faisait dans le cas d'un filtrage par moyennage, de donner un poids différent à chaque pixel dans la fonction de filtrage, celui-ci décroissant de manière monotone à partir du pic de la gaussienne. Les pixels centraux ont donc un poids supérieurs aux autres pixels. Grâce à cela, le filtrage par gaussienne préserve mieux les contours des objets dans l'image qu'un filtrage par moyennage.

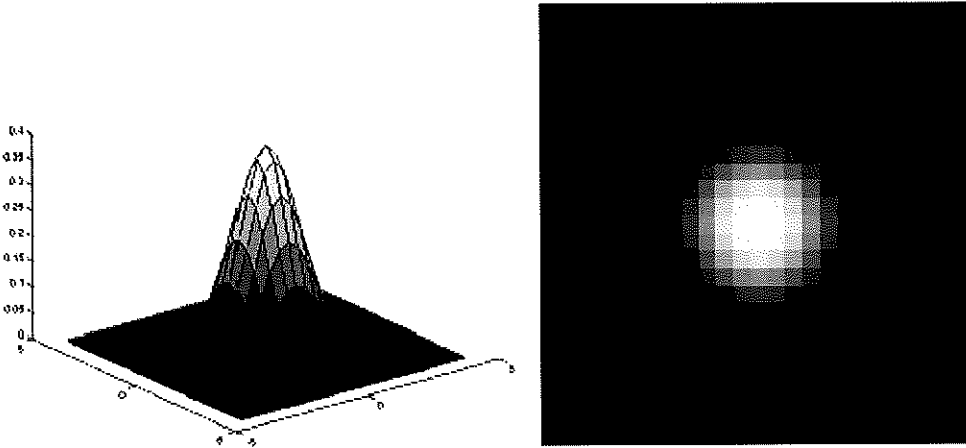


Figure 41 : à gauche : Gaussienne servant à la pondération à droite : Poids relatif de chaque pixel dans le calcul de la valeur corrigée du pixel central⁴⁷

La valeur de l'écart-type est à choisir au mieux par l'opérateur pour optimiser le résultat obtenu.

Il existe une relation simple et intuitive entre la valeur de l'écart-type choisi et le filtrage obtenu. Un grand écart-type diminuera plus efficacement le bruit de l'image mais rendra celle-ci plus floue.

Une des justifications quant à l'usage d'une gaussienne dans la fonction de filtrage est sa réponse fréquentielle. Comme la plupart des filtres de lissage basés sur un produit de convolution, le filtrage gaussien agit comme un filtre passe-bas. Cela signifie qu'elle enlève les composantes haute fréquence spatiale de l'image.

Un des principaux avantages du filtrage gaussien est que celui-ci est séparable. C'est-à-dire qu'il est permis de réaliser d'abord la convolution de l'image avec un filtre horizontal unidimensionnel puis ensuite de faire la convolution du résultat de la première convolution avec un filtre vertical unidimensionnel. Ceci permet de réduire le nombre d'opérations nécessaires par pixel.

Pour simplifier la formulation du problème, nous nous contenterons d'exprimer les opérations réalisées dans le cas unidimensionnel.

Soit \vec{v} le signal brut délivré par le système (vecteur des valeurs à lisser), le vecteur lissé \vec{S} sera donnée par :

$$\vec{S} = \vec{f} * \vec{v}$$

où

\vec{f} est un échantillonnage de la fonction

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right] \quad [\text{Équation 20}]$$

IV. CHOIX D'UNE METHODE THERMOGRAPHIQUE

La littérature⁴⁸ ainsi que le résultat de nos tests expérimentaux (voir partie 4) permettent de construire un tableau comparatif pouvant orienter l'expérimentateur dans le choix d'une méthode thermographique.

	Thermographie pulsée	Thermographie pulsée de phase	Lock-in
Source de chaleur	Pulse thermique	Pulse thermique	Ondes thermiques périodiques
Régime	Transitoire	Transitoire	Permanent
Avantages	Acquisition des données rapide	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recherche de la profondeur des défauts immédiate via l'équation de la longueur de diffusion. 2. Une seule expérience fournit une série d'ondes thermiques à plusieurs fréquences. 3. Non affecté par la non uniformité de chauffe. 	Faible impact de la non uniformité de chauffe, des réflexions environnementales, des variations d'émissivité et de la non planéité des surfaces
Désavantages	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recherche complexe de la profondeur des défauts. 2. Affecté par les variations d'émissivité . 3. Affecté par la géométrie de la surface. 4. Affecté par les réflexions de l'environnement. 5. Affecté par la non uniformité de chauffe. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Affecté par les variations d'émissivité . 2. Affecté par la géométrie de la surface. 3. Affecté par les réflexions de l'environnement. 	

Tableau 5: Caractéristiques des différentes méthodes thermographiques.

3^{ème} partie : APPLICATION DE LA THERMOGRAPHIE DANS LE DOMAINE DES ESSAIS NON DESTRUCTIFS

Les principaux défauts affectant les composites aérospatiaux (voir partie 1,I) sont essentiellement des délaminations présentes dès la fabrication dans les matériaux ou apparaissant au cours de la durée de vie de la pièce suite par exemple à un impact. Le composite peut également être le siège d'inclusions d'eau pouvant s'avérer dangereuses lors de l'utilisation de la pièce en altitude.

Ce chapitre vise à montrer l'apport de la thermographie dans la détection et la caractérisation de ces défauts (profondeur et dimensionnement) ainsi que son aide lors de la caractérisation du matériau testé, notamment lors de la détermination de sa diffusivité thermique.

I. DELAMINATIONS

I.1. Détermination de la profondeur d'un défaut

Le chapitre décrivant la thermographie infrarouge (1^{ère} partie, III.3) explique qu'il est aisé de détecter des délaminations soit par thermographie pulsée (contraste thermique) soit par thermographie pulsée de phase (contraste de phase). Cependant, lors d'un test non destructif, il est essentiel de fournir un rapport complet contenant non seulement l'ensemble des défauts détectés mais également leur confrontation face aux critères de rejet. Il s'agit de déterminer la surface projetée du défaut ainsi que sa profondeur.

La détermination de la profondeur du défaut n'est pas réalisable par les techniques d'essais non destructifs traditionnelles si ce n'est par la méthode par ultrasons et encore cette dernière n'est pas envisageable sur certains matériaux composites, essentiellement les structures en nid d'abeille, certains GFRP ...

Le problème inverse consiste donc à déterminer la profondeur d'un défaut grâce à l'analyse d'une séquence infrarouge.

Par thermographie pulsée

Comme indiqué à la figure 15, la courbe de contraste issue des données IR brutes montre deux paramètres importants qui peuvent être mesurés lors d'un test par thermographie pulsée: le premier paramètre est le temps d'occurrence du maximum de contraste (cela signifie le meilleur moment d'observation pour le défaut trouvé), appelé $t_{C_{max}}$ et l'amplitude de ce contraste maximum appelé C_{max} . La littérature⁹⁹ fournit une équation qui lors de sa résolution analytique relie le temps de contraste maximum, le contraste maximum et la profondeur du défaut sous la surface chauffée:

$$Z_{def} = A \sqrt{t_{C_{max}}} (C_{max})^n \quad [\text{Équation 21}]$$

L'équation 21 est plus souvent utilisée sous forme logarithmique. En effet, elle se simplifie alors en une équation linéaire dont la visualisation graphique est plus parlante. Les paramètres A et n peuvent être évalués à partir des résultats expérimentaux obtenus lors d'un test identique effectué sur un calibre représentatif de la pièce et muni de défauts de profondeurs connues en utilisant une fonction de régression linéaire simple :

$$\log\left(\frac{Z_{\text{def}}}{\sqrt{t_{\text{Cmax}}}}\right) = B + n \log(C_{\text{max}}) \quad [\text{Équation 22}]$$

avec $B = \log(A)$.

Les paramètres intervenant dans cette équation dépendant de la structure de la pièce et de son matériau constitutif, leur connaissance grâce au calibre permet à l'opérateur de calculer la profondeur de n'importe quel défaut dans une pièce identique par la mesure du t_{Cmax} et du C_{max} .

Par thermographie pulsée de phase

Une autre façon de déterminer la profondeur d'un défaut est d'effectuer une transformée de Fourier sur les données IR et d'utiliser l'information de phase⁴⁹. Le contraste absolu en phase $\Delta\phi$ peut être défini de manière similaire au contraste absolu en température ΔT . Le contraste de phase $\Delta\phi(i, j)$ est la différence entre la phase qui existerait au niveau d'un pixel (i, j) pour une fréquence de modulation donnée si le matériau à cet endroit n'était pas affecté de défaut (ϕ_{sa}) et la valeur réelle de cette phase (ϕ_{d}). Ce contraste de phase dépend des propriétés thermiques du matériau, de la structure interne de l'échantillon, de la fréquence de modulation et du coefficient de transfert de chaleur. Pratiquement, la détermination de ϕ_{sa} est approximée en utilisant la phase d'un pixel voisin situé hors du défaut. Le contraste de phase est fonction de la fréquence de modulation. Il existe une fréquence en dessous de laquelle il n'y a pas de contraste de phase observable. Cette fréquence est dite fréquence aveugle f_b et elle est donc la fréquence limite à laquelle un défaut est détecté dans la séquence de phase.

Sachant que la longueur de diffusion thermique est donnée par

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi f}} \quad [\text{Équation 23}]$$

où f est la fréquence de modulation et α le coefficient de diffusivité thermique donnée par:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad [\text{Équation 24}]$$

(k = conductivité thermique $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$, ρ = densité en kg/m^3 et c_p = chaleur spécifique en $\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$), on constate que la longueur de diffusion thermique est inversement proportionnelle à la fréquence de modulation. Cela indique que les fréquences de modulation élevées restreignent l'analyse aux régions proches de la surface alors que les ondes thermiques basses fréquences se propagent plus profondément dans la matière.

Dès lors, les défauts les plus profonds sont détectés aux basses fréquences tandis que les défauts de surface sont visibles aux hautes fréquences.

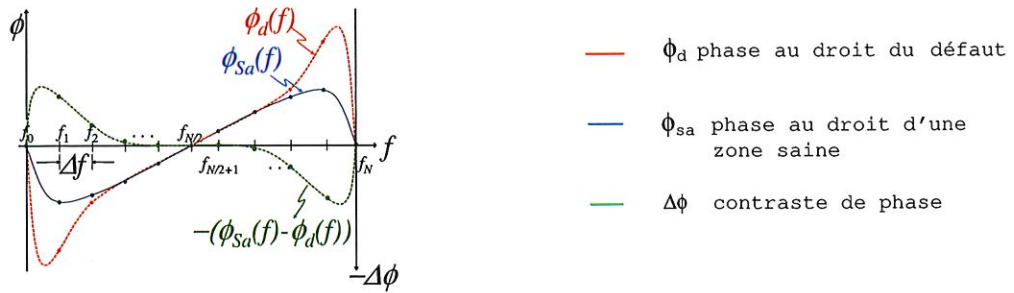


Figure 41: Phasegramme issu d'une séquence thermographique montrant la fréquence aveugle.

En traçant l'évolution de la phase pour chaque défaut détecté et en déterminant sa fréquence aveugle, nous pouvons déterminer la longueur de diffusion thermique correspondant à cette fréquence aveugle.

Or la longueur de diffusion thermique à la fréquence aveugle est proportionnelle à la profondeur du défaut comme l'indique l'équation 25.

Certains auteurs indiquent d'ailleurs un coefficient de proportionnalité C_1 proche de 2.

$$z = C_1 \cdot \mu = C_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f_b}} \quad [\text{Équation 25}]$$

I.2. Détermination de la forme et de la taille d'un défaut

Lorsque la maintenance d'une pièce suit la philosophie fail-safe, cela signifie que la structure de la pièce est conçue de telle manière que des délaminations qui apparaîtraient notamment à cause de la fatigue peuvent être tolérées.

Cependant il faut faire un suivi de l'évolution du défaut de telle manière à s'assurer que celui-ci reste dans des dimensions acceptables et qu'il n'atteigne pas la grandeur critique définie par le fabricant (critère de réjection).

La thermographie ne pourra être utilisée comme méthode d'essais non destructifs que si elle permet non seulement de détecter la présence d'une délamination mais également d'évaluer avec une précision suffisante la forme et la taille de ce défaut.

Lorsque le défaut est de forme circulaire, de nombreux logiciels permettent d'estimer très rapidement la surface du défaut à partir d'une image thermographique. Cependant, ces logiciels sont peu adaptés dès que la forme du défaut est quelconque. Il est dès lors nécessaire de développer un algorithme permettant une bonne estimation de la surface des défauts observés par thermographie.

Cet algorithme comporte les étapes suivantes²⁸:

Etape 1 : Détermination de l'image de la séquence présentant le contraste maximum.

Le calcul exact du contraste thermique nécessiterait de connaître l'évolution de la température au niveau de chaque pixel de l'image si la pièce testée n'était pas affectée de défaut.

Au niveau d'un défaut cette température ne peut être mesurée. Elle peut cependant être estimée en effectuant la moyenne de la température de quatre ou six pixels voisins situés dans une zone saine et qui entoure le défaut.

Etape 2 : Recherche du pixel représentant le centre du défaut.

Théoriquement, c'est le point du défaut le plus éloigné des zones saines et dont la température est la plus élevée. C'est le pixel présentant le plus grand contraste par rapport à la valeur de la température du pixel s'il n'y avait pas de délamination.

Etape 3 : Calcul du gradient de l'image

Chaque pixel de l'image voit sa valeur remplacée par celle obtenue en appliquant un gradient de Roberts.

Cela signifie que la valeur de chaque pixel se déduit de la valeur des pixels voisins sur l'image primitive.

$$G(i, j) = \sqrt{((f(i, j) - f(i+1, j+1)))^2 + ((f(i+1, j) - f(i, j+1)))^2} \quad [\text{Équation 26}]$$

Etape 4 : recherche de la limite du défaut

Afin d'obtenir les limites du défaut, une méthode consiste à tracer un faisceau de segments dont l'origine est le centre du défaut.

Il faut ensuite rechercher le maximum du gradient le long de chaque segment. Le pixel correspondant au maximum du gradient est la limite du défaut dans cette direction.

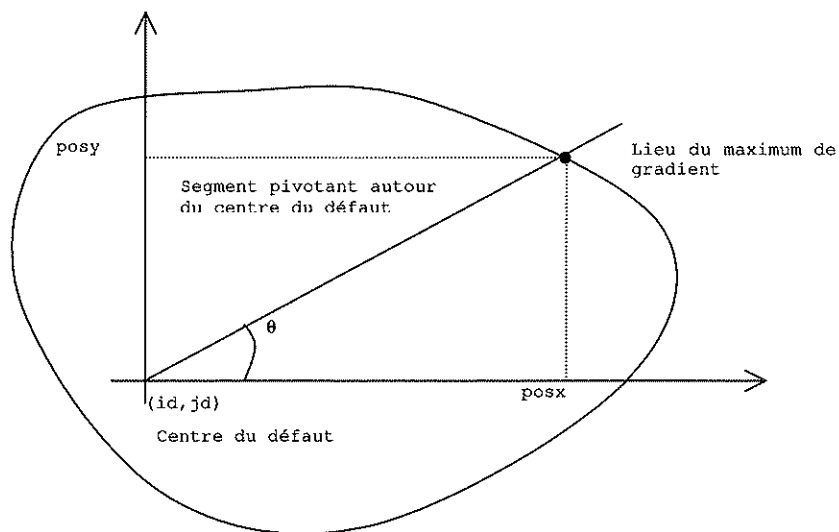


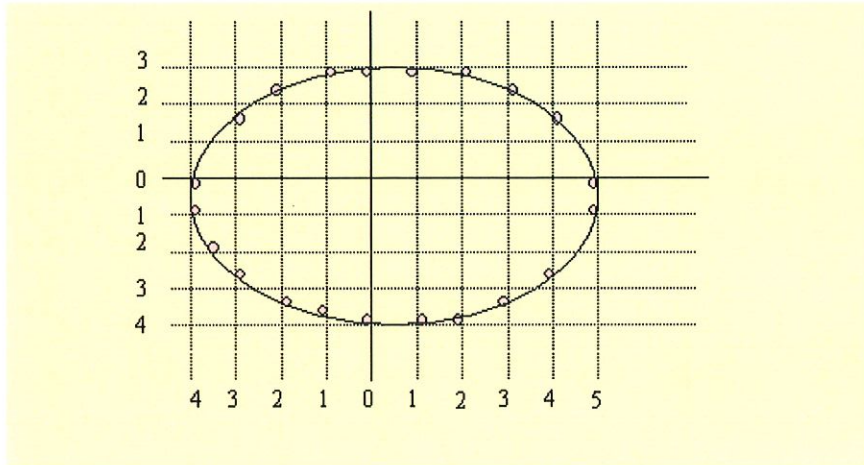
Figure 42: Recherche du gradient maximum

Il n'est évidemment pas possible d'effectuer ce calcul pour l'ensemble des directions (infinité).
 Il faut se contenter d'effectuer le travail dans quelques directions uniformément réparties.

Leur nombre est déterminé en recherchant la limite du défaut dans 4 directions orthogonales.

Le maximum de la taille du défaut dans ces quatre directions (en nombre de pixels) multiplié par quatre est un nombre de positions angulaires suffisant pour déterminer une forme approchée du défaut.

Exemple pour un défaut elliptique :



Taille du défaut dans les 4 directions orthogonales :
 $P_0=5$
 $P_{90}=3$
 $P_{180}=4$
 $P_{270}=4$

Calcul du nombre de positions angulaires nécessaires.
 $P_1=\max(P_0, P_{90}, P_{180}, P_{270})$
 $P=4P_1=20$ positions angulaires

Figure 43: Recherche du nombre de positions angulaires nécessaire pour un défaut elliptique

II. INCLUSIONS D'EAU

L'ingestion d'eau est un problème crucial qui existe régulièrement dans les structures collées et en particulier lorsqu'il s'agit de pièces mobiles aéronautiques en composite. En effet, l'eau, qui en altitude se solidifie, se dilate au risque d'endommager les structures ou pire, de devenir un balourd indésirable.

Pourtant ces dégâts devraient pouvoir être évités par une inspection préalable par thermographie.

Cependant, pour apprécier l'efficacité de la thermographie comme outil de détection de l'eau, il faut confronter ses résultats avec ceux obtenus par un modèle mathématique basé sur une analyse éléments finis.

Le problème étudié est un panneau en composite contenant du nid d'abeille en Nomex dont certaines cellules (7) sont accessibles pour permettre l'introduction d'eau dans la structure.

La photo suivante montre la plaque utilisée ainsi que l'indication de quelques inclusions d'eau préexistantes. Ces dernières ont été induites lors d'un test de cette plaque par ultrasons sous jet d'eau.

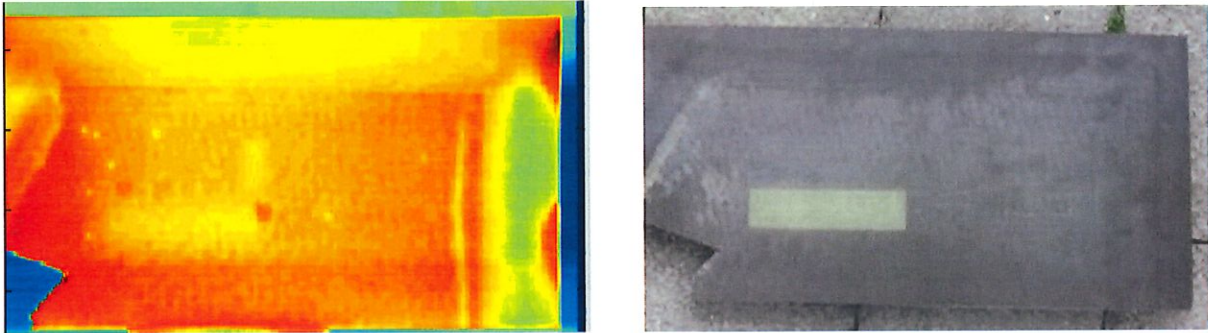


Figure 44: Plaque en nid d'abeille avec inclusions d'eau

L'évaluation de la thermographie comme méthode de détection d'inclusion d'eau comprend les étapes suivantes:

- Détermination théorique de la corrélation entre l'évolution du contraste thermique et l'étendue de la paroi en contact avec l'eau.
- Détermination théorique de l'évolution de ce contraste en fonction du taux de remplissage des cellules du nid d'abeille.
- Vérification expérimentale des résultats obtenus théoriquement (voir partie 4).

II.1. Influence de la surface de contact modèle FEM

Afin de mettre en évidence le gradient thermique causé par la présence d'une faible quantité d'eau dans un nid d'abeille, nous avons simulé par un modèle éléments finis le comportement d'une plaque de composite CFRP d'une épaisseur d'un millimètre. Celle-ci est mise en contact avec une colonne d'eau à 20°C, de 1,5cm de hauteur, de section variable et est soumise pendant deux secondes à un flux thermique de 1000 Watt/m².

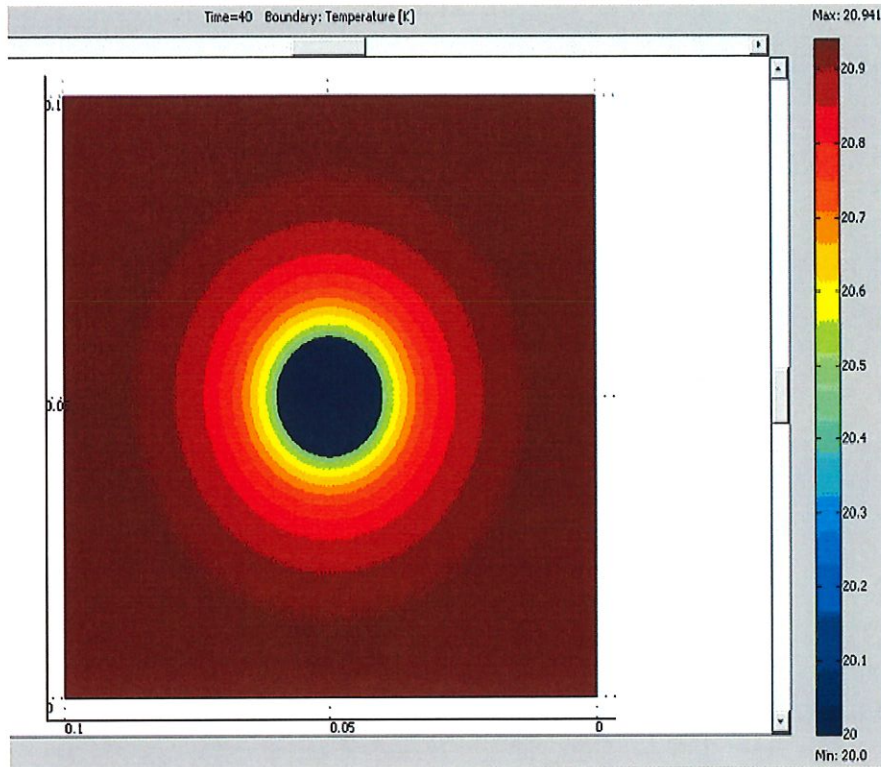


Figure 45: Analyse éléments finis d'une couche de CFRP en contact avec de l'eau sous un flux thermique de 1000 watt/m² pendant 2 secondes.

Il apparaît un gradient thermique dont l'amplitude dépend de l'étendue de la surface en contact avec la colonne d'eau. Nous allons analyser successivement l'influence d'une colonne d'eau de 1,5cm de haut dont le rayon varie de 0.5 à 2 cm.

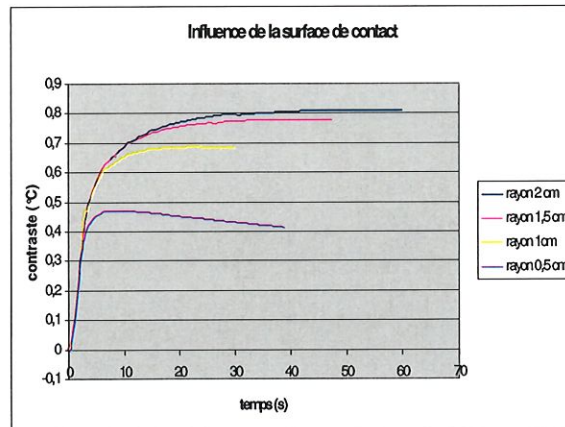


Figure 46: Gradient thermique sur une plaque CFRP d'1 mm d'épaisseur en contact d'une colonne d'eau de 1,5 cm de hauteur de différentes sections et soumise à un flux thermique de 1000 Watt/m² pendant 2 secondes.

Les résultats obtenus par le modèle éléments finis indiquent une nette corrélation entre la surface d'eau en contact avec la plaque et le contraste maximum obtenu. Ce contraste augmente lorsque le rayon de la colonne d'eau s'accroît.

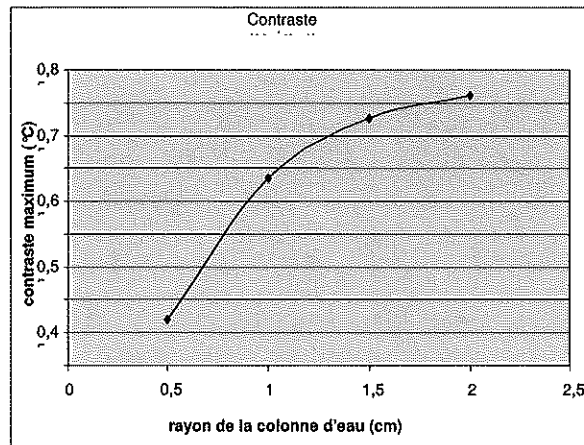


Figure 47: Contraste maximum existant sur une plaque d'1 mm d'épaisseur en contact avec une colonne d'eau de 1,5 cm de haut et de différents rayons , soumise à un flux thermique de 1000 watts/m².

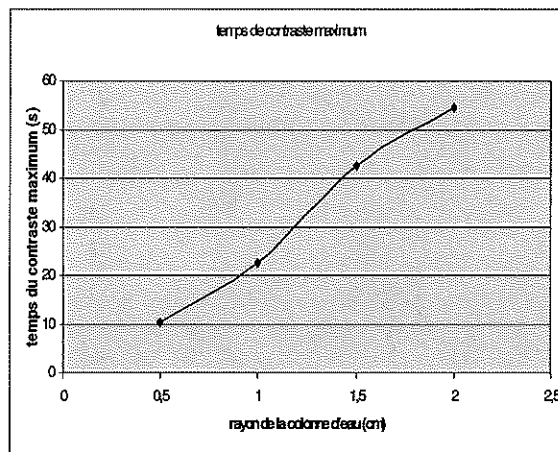


Figure 48: Moment de l'apparition du contraste maximum sur une plaque CFRP d'un millimètre d'épaisseur en contact avec une colonne d'eau de 1,5 cm de hauteur et de différentes sections soumise à un flux thermique de 1000 Watts/m².

Ces graphiques indiquent clairement que non seulement la valeur du contraste maximum augmente avec le rayon de la colonne d'eau en contact avec la plaque mais aussi que l'instant où se manifeste ce contraste maximum est croissant avec le rayon.

Afin de démontrer son efficacité, la thermographie devra confirmer les résultats obtenus par le modèle éléments finis (voir Partie 4).

II.2. Influence de la hauteur de la colonne d'eau: Modèle FEM

La hauteur de la colonne d'eau joue également un rôle majeur sur le contraste observé.

Nous allons réitérer l'analyse par éléments finis précédente en fixant cette fois la surface de contact de la colonne d'eau à 0,785 mm², soit un rayon de 0,5 cm et en faisant varier la hauteur de cette colonne d'eau de 0,75 cm à 3cm.

Nous simulons toujours l'application d'un flux thermique de 1000 watts/m² pendant 2 secondes.

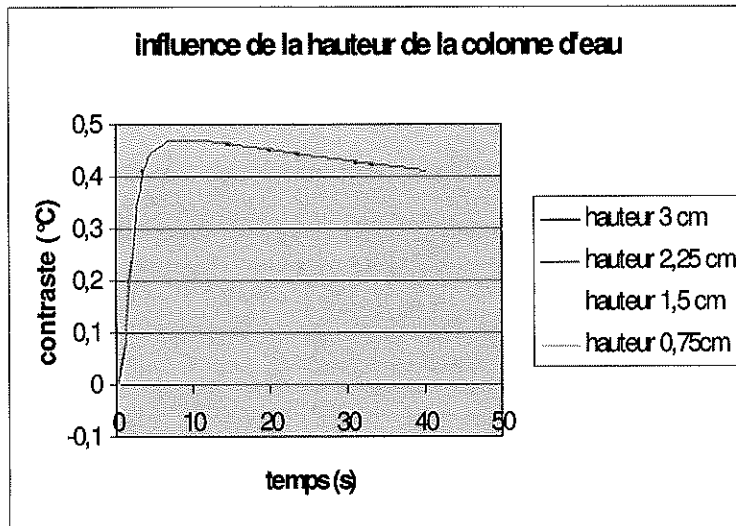


Figure 49: Contraste thermique calculé entre le centre de la colonne d'eau et une partie saine du composite

Nous constatons que le paramètre hauteur de colonne d'eau n'a que très peu d'influence sur l'évolution du contraste entre la zone en contact avec l'eau et une partie plus éloignée du composite. Une colonne de 0,75 cm est tout aussi détectable qu'une colonne de 3cm. Il ne sera donc pas possible de déterminer la hauteur de la colonne d'eau par des méthodes thermographiques mais uniquement son étendue surfacique.

III. DETERMINATION DE LA DIFFUSIVITE THERMIQUE D'UN MATERIAU⁵⁵

III.1. Définition de la diffusivité thermique

La diffusivité thermique a [m^2/s] est une propriété thermophysique relevante dans le cas d'une chauffe transitoire d'une surface et qui caractérise l'ensemble des matériaux (solides, liquides, poudres et gaz). La diffusivité thermique mesure la vitesse à laquelle la chaleur est diffusée à l'intérieur du matériau.

III.2. Description de la méthode de Parker^{56,57}

La méthode flash a été développée par Parker en 1961. Pour calculer le coefficient de diffusivité thermique d'un matériau, il faut mesurer l'évolution de la température sur la face arrière d'un échantillon lorsqu'une source de chaleur très brève excite sa face avant. Le pulse de chaleur est fourni par un laser pulsé de haute puissance et la température est mesurée par un détecteur infrarouge.

A condition que les échantillons utilisés soient minces en comparaison de leur diamètre, le flux de chaleur peut être considéré comme étant unidimensionnel.

Cette approximation simplifie le traitement mathématique.

La figure 50 montre une courbe de température typique.

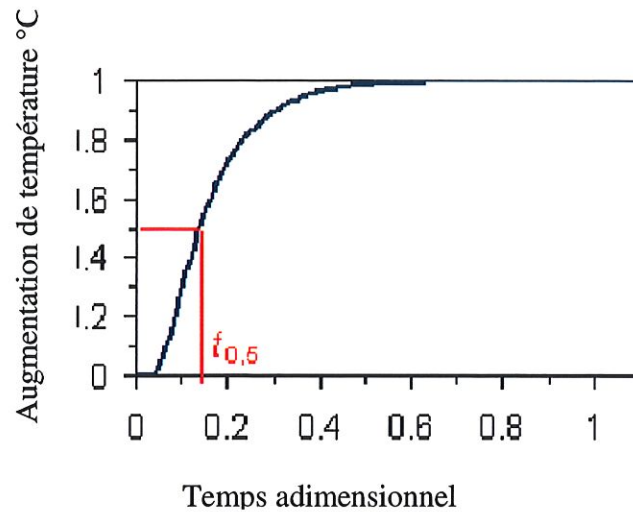


Figure 50: Courbe de température typique après un test de Parker

Après le pulse thermique, la température augmente et atteint normalement un maximum dans le cas de matériaux faiblement conducteurs de la chaleur puis diminue par la suite. Par contre, si on étudie des matériaux ayant des bonnes caractéristiques en conduction, la diminution après le maximum est bien plus lente et peut être négligée. L'impression d'un maximum très distinct est due aux pertes de chaleur dans l'échantillon.

Pour l'analyse de telles courbes, Parker utilise le temps où la moitié de l'augmentation de température maximale a lieu ($t_{1/2}$). Lorsque l'épaisseur $e(m)$ de l'échantillon est connue, le coefficient de diffusivité thermique $a(m^2/s)$ peut être calculé à l'aide de l'équation 27.

$$a = \frac{0.139 e^2}{t_{1/2}} \quad [\text{Équation 27}]$$

Il est possible d'améliorer la méthode de Parker en utilisant d'autres points que le point de demi maximum. Cela conduit à la méthode des temps partiels dans laquelle $t_{1/3}$ et $t_{5/6}$ sont les temps où respectivement 1/3 et 5/6 du maximum de température est atteint. Il est dès lors possible d'utiliser une des trois équations 28 qui aboutissent toutes trois à la même valeur de la diffusivité a .

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{e^2}{t_{5/6}} \left[0.818 - 1.708 \left(\frac{t_{1/3}}{t_{5/6}} \right) + 0.885 \left(\frac{t_{1/3}}{t_{5/6}} \right)^2 \right] \\
 a &= \frac{e^2}{t_{5/6}} \left[0.954 - 1.581 \left(\frac{t_{1/2}}{t_{5/6}} \right) + 0.558 \left(\frac{t_{1/2}}{t_{5/6}} \right)^2 \right] \quad [\text{Équation 28}] \\
 a &= \frac{e^2}{t_{5/6}} \left[1.131 - 1.222 \left(\frac{t_{2/3}}{t_{5/6}} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Pour que ces équations soient applicables, il faut s'assurer que le pulse thermique est suffisamment court. Un critère pour qualifier ce pulse est donné par le nombre de Fourier (tc^*). Ce nombre indique si le pulse

appliqué peut être considéré comme étant un pulse de Dirac. En effet d'après le créateur de la méthode, t_c^* est défini par:

$$t_c^* = \frac{a t_c}{e^2} = \frac{2 a t_w}{e^2} \quad [\text{Équation 29}]$$

où a est le coefficient de diffusivité thermique (m^2/s), e est l'épaisseur de l'échantillon (m), t_c est le centre du pulse et t_w est la largeur du pulse.

Il doit être inférieur à 0,002 pour que le pulse soit assimilé à un pulse de Dirac. Dès lors :

$$t_w < \frac{0.001}{a} e^2 \quad [\text{Équation 30}]$$

Lorsque cette condition est remplie, le coefficient de diffusivité thermique peut être calculé par une des équations 27 ou 28 sans aucun facteur de correction.

4^{ème} partie : RESULTATS EXPERIMENTAUX

I. CHOIX D'UNE CAMERA INFRAROUGE

I.1. La MRTD

Dispositif expérimental

Afin de tester la MRTD de différentes caméras, il est nécessaire d'utiliser des cibles standards⁵⁸.

La cible utilisée est un dispositif rotatif qui est constitué de 12 mires contenant chacune quatre fentes équidistantes placées devant un corps noir. L'espacement entre les fentes varie d'une mire à l'autre. La connaissance de la distance entre la caméra et la cible ainsi que la distance centre à centre séparant deux fentes permet de calculer la fréquence spatiale liée à cette mire.

En effet, si l'on parle en dimension angulaire, la période spatiale est la dimension angulaire sous laquelle la caméra voit l'objet (ici l'intervalle entre deux fentes), la fréquence spatiale est le nombre de fois où cette période spatiale est vue par la caméra dans l'angle d'observation horizontal de la caméra. Dans le cas de fentes, la fréquence spatiale est calculée par la formule^{59,60} :

$$F = \frac{10^{-3}D}{s} \left[\frac{\text{cycle}}{\text{mrad}} \right] \quad [\text{Équation 31}]$$

où F est la fréquence spatiale

D est la distance entre la cible et la caméra (m)

s est la distance centre à centre séparant 2 fentes en m ($D \gg s$).

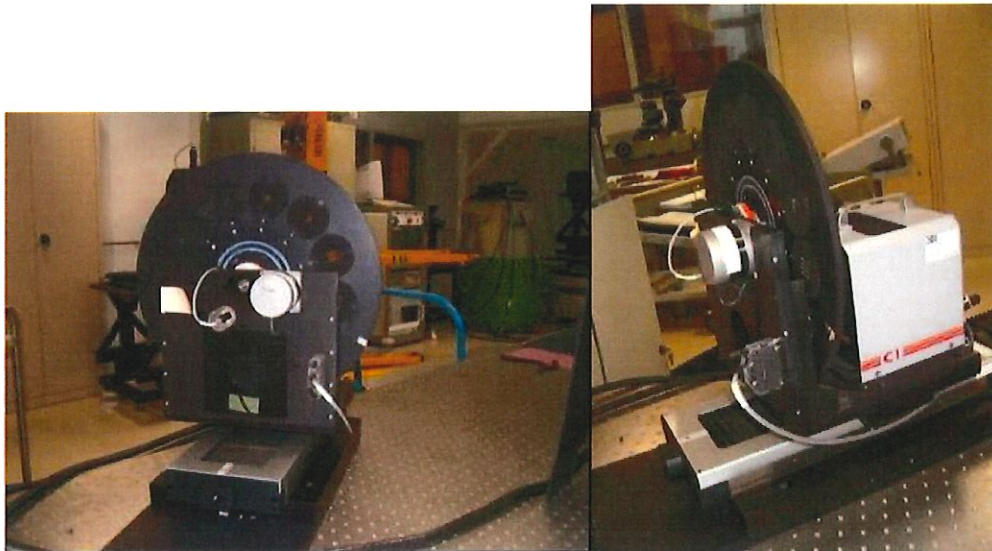


Figure 51: Cible rotative

Les mesures de contraste thermique entre le corps noir placé derrière les fentes et la cible elle-même sont effectuées dans une salle blanche régulée en température. La température du corps noir est réglable au centième de degré près. La MRTD est la plus petite différence de température observable entre la cible et le corps noir placé derrière (partie II, chapitre 1).



Figure 52: Salle blanche

Comparaison entre les caractéristiques subjectives de la qualité d'image de deux caméras : FLIR SC3000 et Thales SOPHIE

Nous disposons de deux caméras thermiques dont nous désirons comparer les performances et plus particulièrement la MRTD.

Il s'agit d'une caméra de surveillance militaire: caméra Thales utilisant un capteur FPA (Focal Plane Array) HgCdTe LWIR refroidie par un refroidisseur à cycle Stirling miniature et d'une caméra civile FLIR SC3000 (QWIP).

Les caractéristiques des caméras étant fortement dépendantes des capteurs qui les équipent, nous les décrivons brièvement en annexe 3.



Figure 53 : Caméra Sophie Thales



Figure 54 : Caméra FLIR SC3000

a) MRTD de la caméra Sophie Thales

La MRTD+ est mesurée lorsque le corps noir est plus chaud que la cible, la MRTD- dans la situation inverse. La meanMRTD est la valeur moyenne des valeurs absolues de la MRTD+ et de la MRTD-.

Cible	Fr. spatiale	MRTD+	MRTD-	MeanMRTD
1	0,5	0,11	-0,07	0,092
2	0,98	0,2	-0,14	0,172
3	1,47	0,4	-0,33	0,366

Tableau 6 : MRTD en fonction de la fréquence spatiale

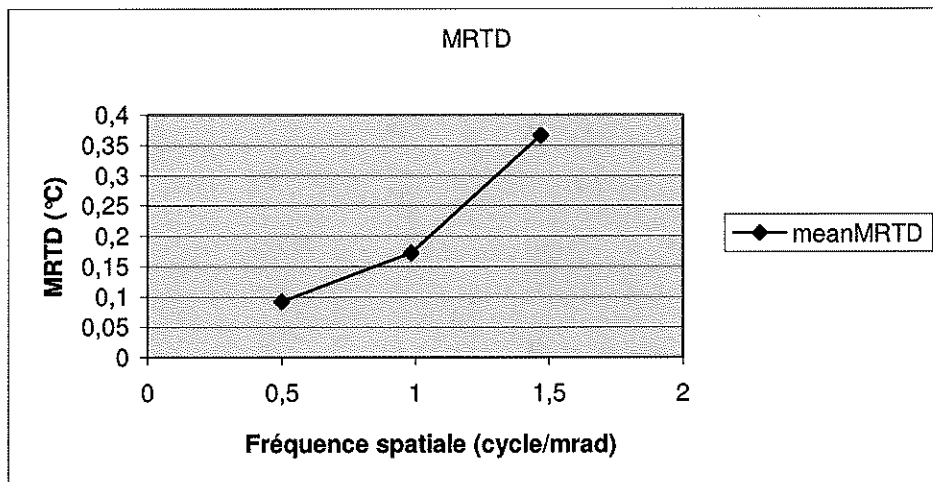


Figure 55: Graphique de la MRTD en fonction de la fréquence spatiale

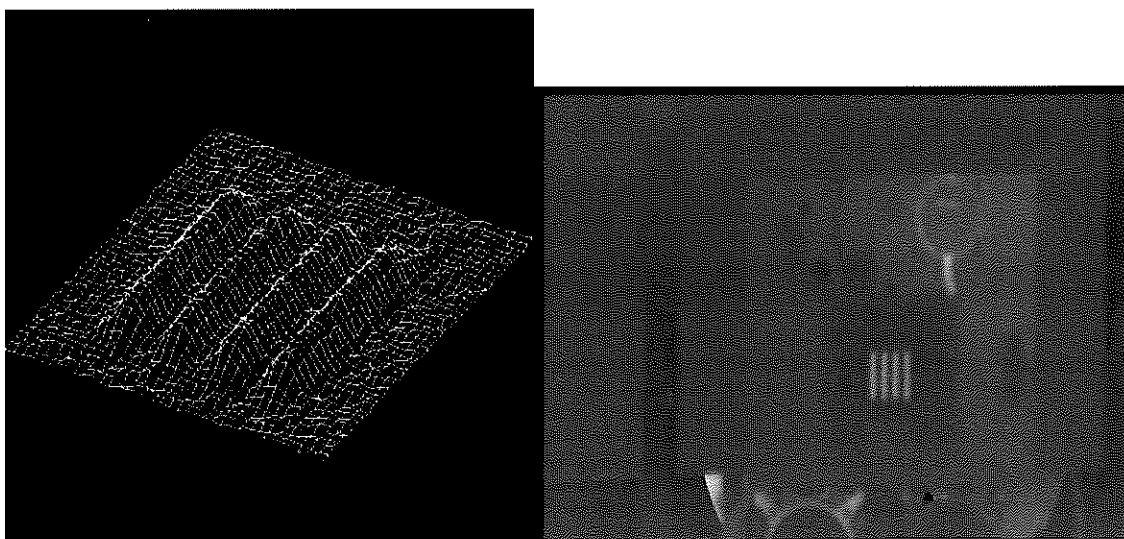


Figure 56: Visualisation de la température différentielle limite

b) MRTD de la Caméra FLIR SC3000

Cible	Fr.Spatiale	MRTD+	MRTD-	meanMRTD
1	0,25	0,07	-0,1	0,086
2	0,49	0,08	-0,5	0,357

Tableau 7: MRTD en fonction de la fréquence spatiale

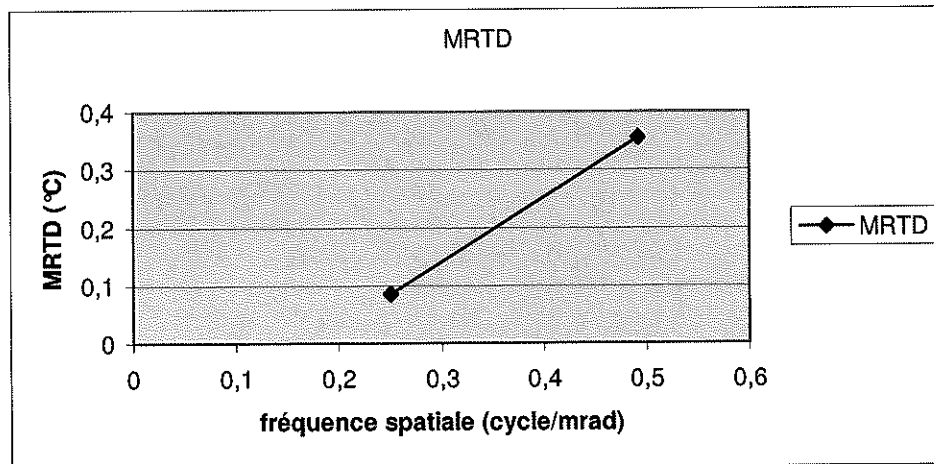


Figure 57: Graphique de la MRTD en fonction de la fréquence spatiale

c) Conclusion

Nous constatons que la MRTD de la caméra Sophie est significativement inférieure à celle mesurée pour la caméra civile FLIR. Cette constatation était prévisible puisqu'il est essentiel pour une caméra militaire de distinguer des images de faible contraste alors que l'attention pour une caméra civile est principalement axée sur la précision de lecture.

Nous constatons également que la résolution de la caméra civile est limitée. Les mesures de MRTD ne peuvent être réalisées qu'avec des cibles de fréquence spatiale faible (séparation entre barres de la cible importante). Cette caractéristique de la caméra FLIR a malheureusement limité le nombre de mesures disponibles et donc les points de comparaison entre les deux caméras.

I.2. La NETD

Dispositif expérimental

Comme la NETD dépend de la température de l'objet filmé, il est important de travailler dans une salle blanche contrôlée en température et d'utiliser des corps noirs de température connue afin de comparer différentes caméras. En effet, pour un corps noir, l'interaction avec l'environnement est très faible (radiation, convection avec l'air...) à cause de sa haute émissivité. Dans ces conditions, les paramètres caractérisant la caméra infrarouge peuvent être considérés comme intrinsèques.

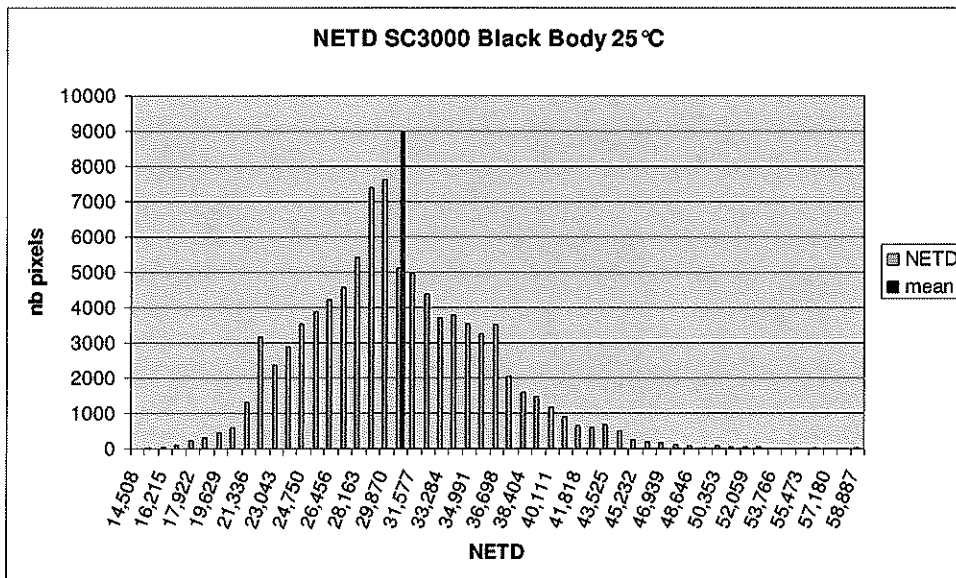
Nous utiliserons les corps noirs fournis avec le thermal Imager bench de Thalès, ces corps noirs ont une précision de 0,01°C.

Comparaison entre deux caméras

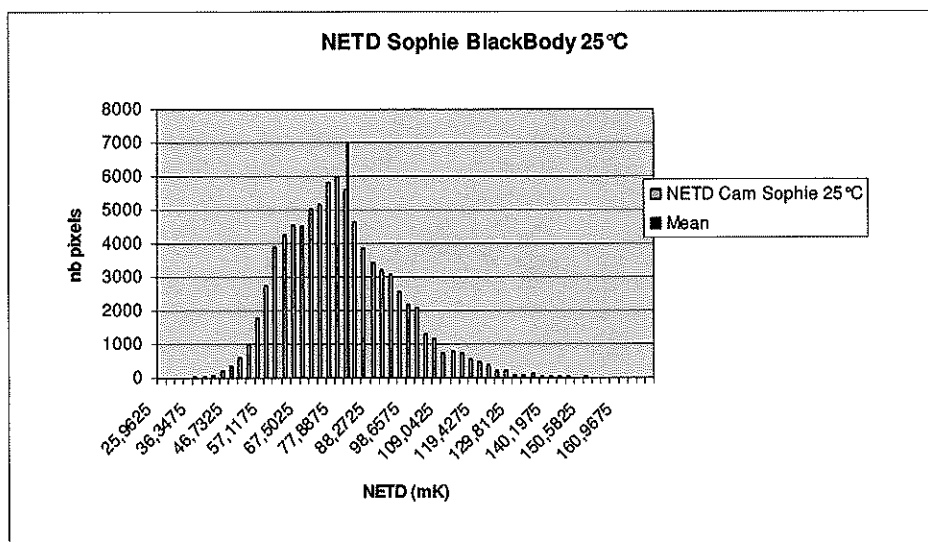
La NETD est une mesure de la résolution thermique d'une caméra, ce paramètre est la valeur moyenne de la déviation dans le temps de la température de tous les pixels déduite de l'analyse d'une séquence thermique d'un corps noir.

La figure 58 compare la distribution spatiale de la déviation temporelle standard de chaque pixel pour la caméra FLIR SC3000 et pour la caméra Thalès pour un corps noir à 25°C.

Dans ces conditions, la NETD moyenne trouvée est proche de 30,6 mK pour la SC3000 et de 78,9 mK pour la caméra Sophie de Thalès.



a: NETD SC3000 BB25°C



b :NETD Sophie BB25

Figure 58: a. Histogramme de la déviation standard calculé à partir de 40 images d'un corps noir à 25°C délivrées par la caméra SC3000 à une fréquence de 10 Hz. La NETD moyenne est proche de 30,6 mK.

b. Histogramme de la déviation standard calculé à partir de 40 images d'un corps noir à 25°C délivrées par la caméra Sophie à une fréquence de 25 Hz. La NETD moyenne est proche de 78,92 mK.

La distribution de la NETD autour de la valeur moyenne est clairement non symétrique.

Pour la SC3000, la NETD de chaque pixel varie de 14,5 mK à 58,88mK, 85% des pixels affichant une NETD inférieure à la valeur centrale de cet intervalle (36,66mK).

Pour la caméra Sophie, la NETD de chaque pixel varie de 33,64 mK à 160,96 mK, 86% des pixels ont une NETD inférieure à la valeur centrale de cet intervalle (97,3mK).

I.3. Détermination de l'uniformité du détecteur de la caméra

Puisqu'il existe une grande variabilité dans les valeurs de la NETD des pixels de l'image, il est intéressant de vérifier si cette variabilité est associée à la position du pixel dans l'image.

Le calcul de la NETD moyenne est effectué respectivement sur l'ensemble de l'image puis sur des fenêtres représentant 50% puis 25% de cette surface.

Thales :

Fenêtre	Mean NETD (mK)
100%	78,92
50%	75,14
25%	72,94

SC3000

Fenêtre	Mean NETD (mK)
100%	30,62
50%	30,47
25%	30,41

Tableau 8 : NETD moyenne en fonction de la fenêtre d'analyse.

Les résultats montrent que la NETD moyenne est quasiment indépendante de la fenêtre utilisée pour la caméra FLIR SC3000. Pour la caméra Sophie Thalès, la NETD varie légèrement lorsque l'on diminue la taille de la fenêtre, ce qui tend à montrer que le capteur de cette caméra est plus précis au centre de l'image qu'à la périphérie. S'il était important de mesurer de faibles variations de température, il serait préférable, avec cette caméra, de placer l'objet observé au centre de l'image.

Pour la caméra FLIR SC3000, il apparaît que la dissymétrie n'est pas fortement influencée par la taille de la fenêtre choisie.

Pour toutes les tailles de fenêtre, il y a autant de pixels qui ont une NETD inférieure à la NETD correspondant au maximum de la distribution (29,87 mK) que de pixels dont la NETD est supérieure à celle de la NETD du maximum de la distribution.

Cependant, les NETD inférieures à la NETD du maximum de la distribution varient de 14,5 mK à 29,87 mK (soit une variabilité de 15,37 mK) alors que les NETD supérieures au maximum varient de 29,87 mK à 54,62 mK (soit une variabilité de 24,75 mK).

La même observation est valable pour la caméra Sophie, il existe autant de pixels de part et d'autre de la valeur du maximum de la distribution (77,88 mK). De plus, la dissymétrie est encore observable, les NETD inférieures au maximum de la distribution s'étendent de 25,96 mK à 77,88 mK (soit une variabilité de 51,96mK) tandis que les NETD supérieures s'étendent de 77,88 mK à 160,98 mK (soit 83,1mK).

Considérons la distribution cumulative de la NETD des pixels individuels (l'intégrale de la distribution).

L'axe des y représente le pourcentage de pixels dont la NETD est inférieure ou égale à la NETD donnée par l'axe des x.

Dans le cas de la caméra SC3000, nous remarquons que le pourcentage de pixels dont la NETD est inférieure à la NETD moyenne n'est pas significativement modifié lorsque la taille de la fenêtre diminue.

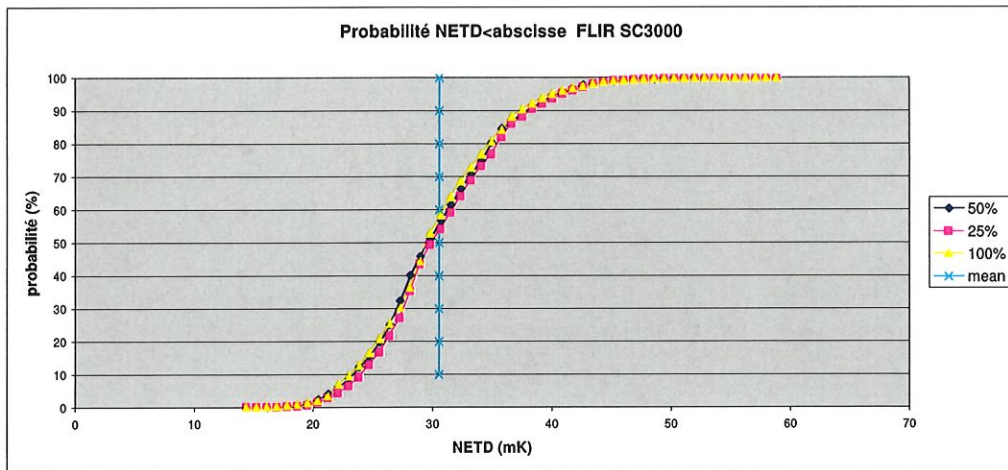


Figure 59: Distribution cumulative de la NETD - caméra SC3000

Appelons ce pourcentage PNEDTmean. Ce paramètre est la probabilité qu'un pixel donné ait une NETD \leq meanNETD.

Nous pouvons prendre ce nombre comme une caractéristique de la qualité de l'image. Il est clair que la qualité de l'image n'est pas améliorée par la diminution de la fenêtre.

La même analyse sur les résultats de la caméra Sophie est représentée sur la figure 60 :

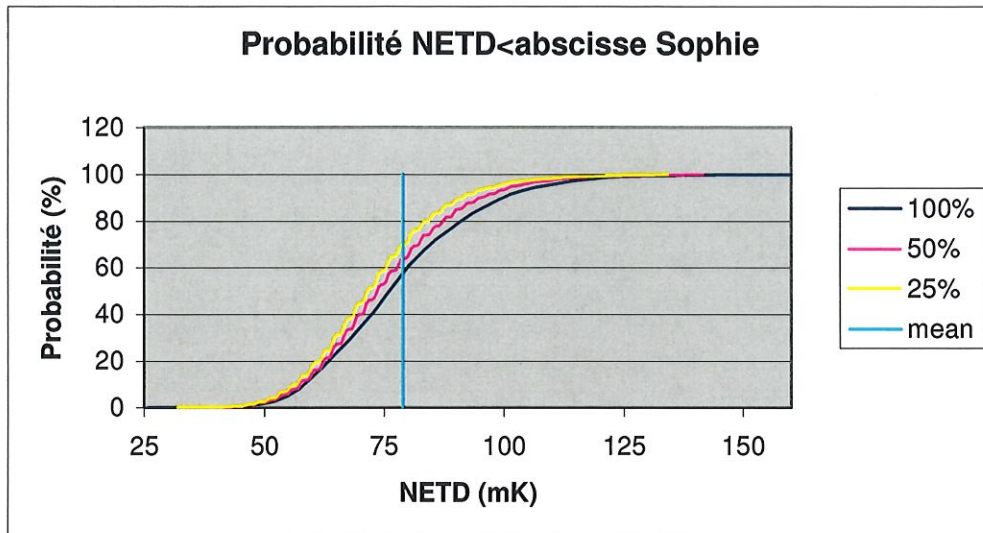


Figure 60: distribution cumulative de la NETD-caméra Sophie

On observe, conformément à la tendance déjà observée pour la NETD moyenne, qu'il existe une différence légère entre le pourcentage PNEDTmean pour les différents fenêtrages. La fenêtre concentrée au centre du capteur présente une qualité supérieure par rapport aux fenêtrages plus larges.

En conclusion, le capteur de la caméra FLIR SC3000 présente une NETD moyenne inférieure à celle de la caméra Sophie. Cette constatation indique que le capteur de la caméra FLIR est plus apte à discerner de très faibles différences thermiques que celui de la caméra Sophie.

Cependant, les valeurs moyennes de la NETD restent dans le même ordre de grandeur.

Les capteurs présentent tous deux une asymétrie significative. Dans les deux cas, soixante pourcents des pixels ont une NETD inférieure à la NETD moyenne. Comme cette probabilité peut être considérée comme un indice de la qualité du capteur, cela indique que les deux capteurs présentent selon ce critère une qualité équivalente.

Si la qualité du capteur de la SC3000 est uniforme, celle de la caméra Thales n'est pas identique en tous points du capteur. Le centre du capteur présente un NETD légèrement inférieure à celle de la périphérie et la PNEDTmean augmente lorsque la taille de la fenêtre diminue.

L'analyse de la NETD indique donc que le capteur de la caméra SC3000 a des caractéristiques légèrement meilleures que celui de la caméra Sophie (valeur moyenne de la NETD et uniformité sur le capteur).

Cependant, la valeur de la NETD de la caméra Sophie reste inférieure à 0,08K. Elle est donc capable de discerner des défauts dont la signature thermique est supérieure à cette valeur. A condition d'effectuer une chauffe suffisante, des défauts profonds (profondeur 3mm) sont aisément détectables avec la caméra militaire Sophie. Une NETD plus importante que celle de la SC3000 ne constitue donc pas un obstacle à l'utilisation de cette caméra pour effectuer des tests non destructifs.

I.4. Comparaison entre deux caméras infrarouges : Tableau récapitulatif

	Caractéristiques subjectives de la qualité de l'image:	Caractéristiques de réponse et de bruit	Caractéristiques de précision	Caractéristiques géométriques
SC3000		X	X	X
SOPHIE-THALES	X			

Tableau 9 : Comparaison entre deux caméras infrarouges

II. TRAITEMENT DES IMAGES

II.1. Correction d'un thermogramme pour prendre en compte la forme de l'objet observé.

Toute image thermographique demande une interprétation de la part de l'expérimentateur. Pour aboutir à des conclusions valides à partir de ses observations, celui-ci doit bien connaître la géométrie de la pièce analysée qui est une grandeur d'influence non négligeable de la mesure.

En effet, toute mesure thermographique n'est optimale que si la surface observée a sa normale parallèle à la direction d'observation et de chauffe. Dans tous les autres cas, il faut, sur base de la géométrie, corriger le thermogramme avant de l'interpréter.

Description du calibre

Afin d'illustrer la méthode corrective décrite à la partie 2, celle-ci est appliquée aux thermogrammes obtenus après la chauffe d'un calibre en plâtre. Le plâtre a été choisi comme matériau car ses propriétés thermiques se rapprochent de celle d'un composite CFRP.

La surface est peinte en noir afin d'augmenter son émissivité et réduire les phénomènes de réflexion.

Le calibre est illustré à la figure 61. Il est formé d'une plaque plane carrée en plâtre de 30cm de côté et inclinée de 20° par rapport à la direction d'observation et d'un demi cylindre de rayon 5 cm dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction d'observation.

Les parties des thermogrammes mesurées au niveau du plan incliné sont traitées grâce aux équations relatives aux segments linéaires, les zones du thermogramme correspondant au demi-cylindre sont traitées en appliquant les équations relatives aux segments courbes. Ces équations ont été explicitées dans la partie 2.

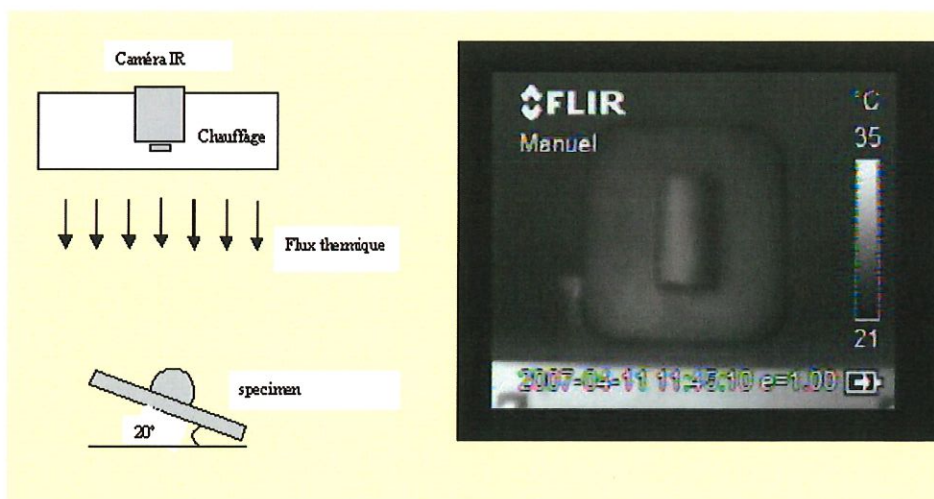


Figure 61: Calibre en plâtre plan incliné et demi-cylindre

Correction apportée aux parties planes inclinées du calibre.

Les équations 16 expriment que la correction à apporter dans le cas de segments linéaires inclinés est basée sur l'effet de l'augmentation de distance par rapport à la caméra engendrée par cette inclinaison.

La figure 62 illustre un profil horizontal de température indiquée au niveau d'une partie plane du calibre ainsi que la correction apportée en appliquant les équations 16.

Logiquement, on constate une diminution de la température indiquée proportionnelle à l'éloignement par rapport à la caméra ainsi qu'une température corrigée quasiment constante sur l'ensemble du segment.

Ceci démontre l'efficacité de la méthode correctrice.

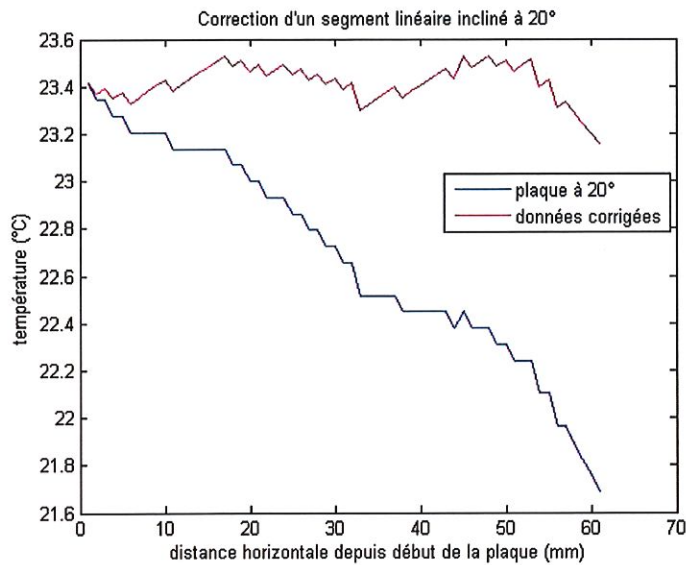


Figure 62: Profil de température dans une coupe horizontale au niveau de la plaque inclinée et correction de la température en tenant compte de l'inclinaison de la plaque

Correction apportée aux parties courbes du calibre.

Les équations correctives 17 s'appliquent quant à elles sur les parties courbes du calibre. Elles font l'hypothèse que l'orientation de la surface est le facteur prépondérant dans la diminution de la température indiquée.

La figure 63 montre une coupe des températures au niveau du cylindre ainsi que les températures corrigées avec les équations 17.

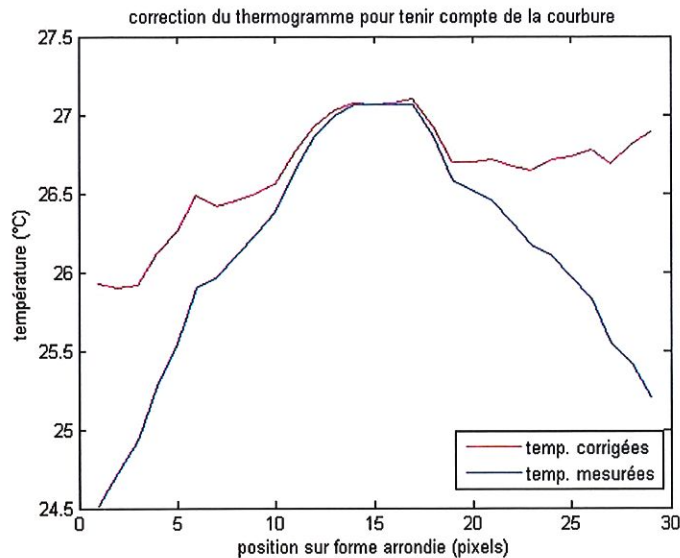


Figure 63: Correction du thermogramme pour tenir compte de la courbure

La correction obtenue ne permet pas de retrouver une courbe de température constante mais représente quand même une nette amélioration par rapport aux mesures brutes. Les variations de température encore observables sont sans doute dues au fait que, outre la courbure de la surface, l'éloignement par rapport à la source et à la caméra influence la mesure, ce qui n'a pas été pris en compte.

II.2. Diminution du bruit des images

Description du calibre utilisé pour quantifier l'efficacité des traitements d'image visant à la diminution du bruit

Le calibre utilisé pour illustrer les procédés permettant de réduire le bruit des images est le calibre CFRP à trous borgnes décrit figure 27, appelé ci-après calibre Flat Bottom Holes FBH.

Accumulation des images

Afin d'augmenter le rapport signal/bruit d'une image, il est conseillé à la partie 2 III.2 d'effectuer le moyennage de plusieurs images.

Afin d'illustrer cette pratique, la figure 64 montre le profil de la température à hauteur du défaut 2 (figure 27, calibre Airbus 84 plis CFRP-profondeur : 1,31mm-diamètre 10mm) pour une image brute et pour l'accumulation de 100 images (séquence thermique de 4 secondes à 25 Hz).

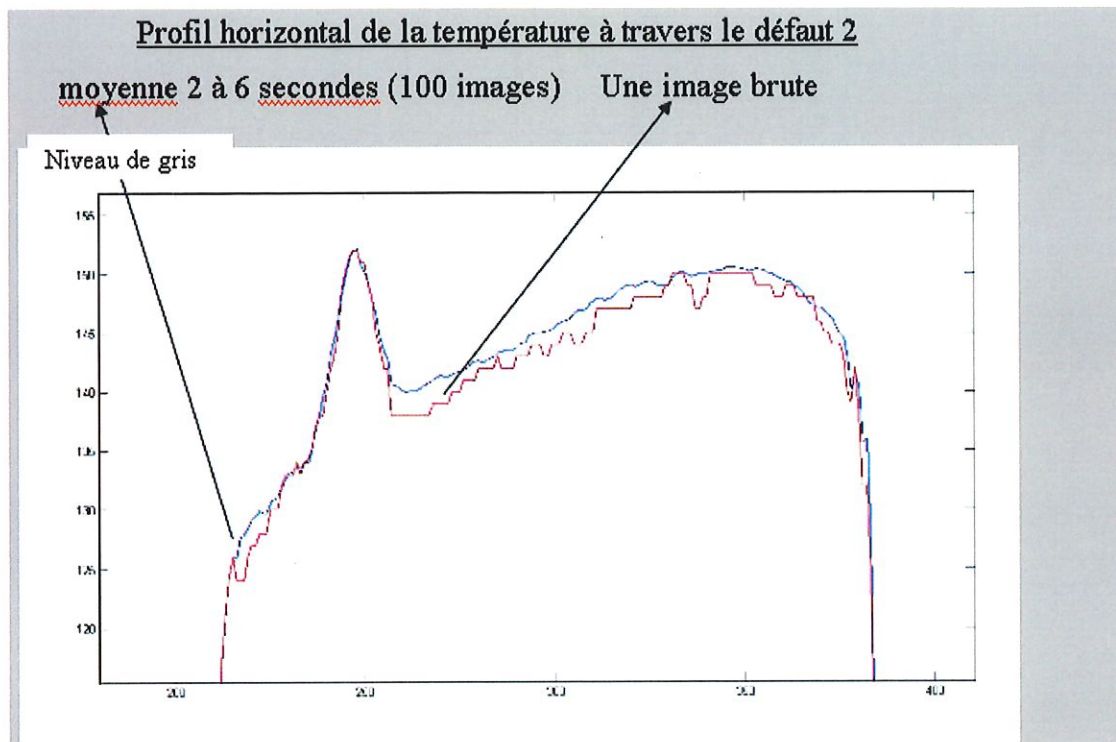


Figure 64: Profil horizontal de la température au niveau du défaut 2

La figure 65 montre le profil de température d'une coupe verticale passant par le centre des défauts de diamètre 10mm. L'accumulation de 280 images permet de détecter le défaut 4, qui dans l'image brute est confondu avec le bruit de l'image.

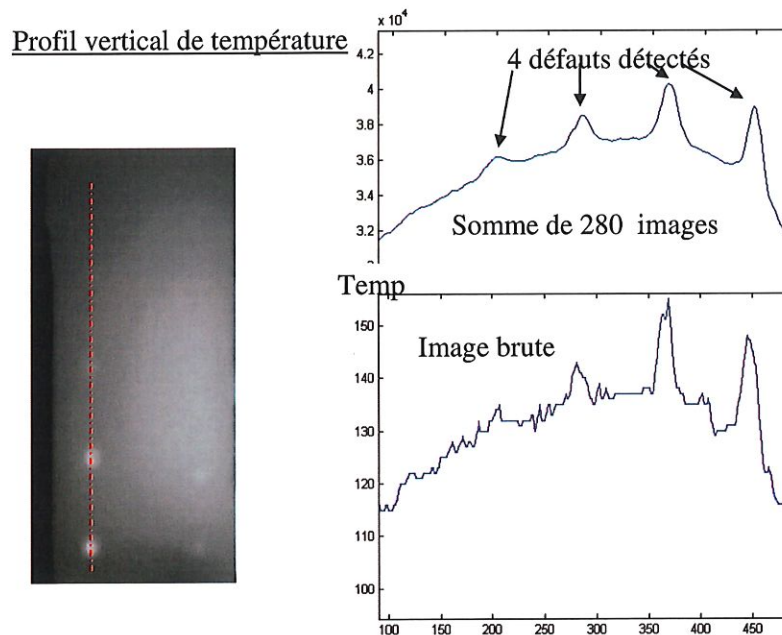


Figure 65: Profil vertical de température d'une image brute et d'une accumulation de 280 images

Afin de quantifier la diminution relative du bruit d'une image obtenue par accumulation, il faut calculer la NETD moyenne de l'image ainsi obtenue. Pour obtenir une valeur rigoureuse du bruit d'une image, il est important d'utiliser une scène statique. C'est pourquoi, la comparaison porte sur les

images brutes et cumulées obtenues d'un corps noir dont la température reste fixe à 0.01K près.

Le tableau 10 représente la NETD moyenne de l'image d'un corps noir à 25°C obtenue par la caméra FLIR SC3000 sans accumulation d'images et pour 2,4 et 16 accumulations (1-2-4-16 images).

	NETD moyenne
Une image brute	30,5 mK
2 accumulations	23,5 mK
4 accumulations	15,95 mK
16 accumulations	13,43 mK

Tableau 10: NETD moyenne de l'image d'un corps noir à 25°C

Une amélioration d'un facteur approchant 2,25 est obtenue en accumulant 16 images.

La figure 66 montre que la forme de la distribution est également affectée par cette opération.

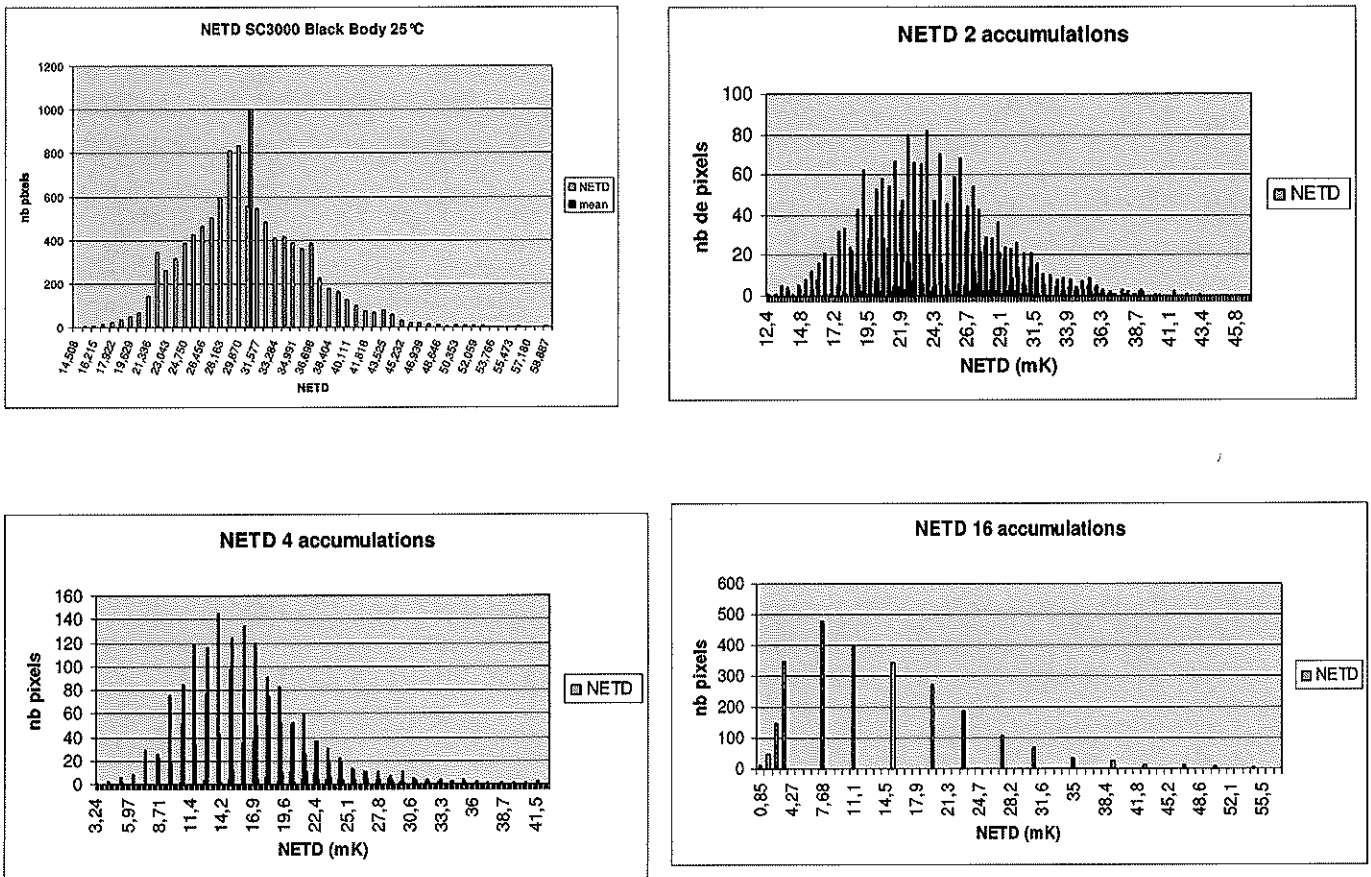


Figure 66: Distribution de la NETD

Cependant, l'amélioration relative de la NETD entre l'accumulation de 4 images et l'accumulation de 16 images n'est pas hautement significative. Par contre, le fait de cumuler 16 images d'une séquence thermique diminue la résolution temporelle et fait perdre certaines informations comme, par exemple, le temps auquel le contraste maximum apparaît.

Application de filtres spatiaux.

a) Filtre passe-bas :

Un filtre passe-bas atténue les composantes haute fréquence d'une image, les plus affectées par le bruit.

Il remplace la valeur de chaque pixel par une moyenne pondérée de la valeur des pixels environnants, le nombre de pixels pris en compte influençant l'amélioration obtenue.

Exemple : application d'une fonction $f(x,y)=(f_1+\dots+f_9)/9$

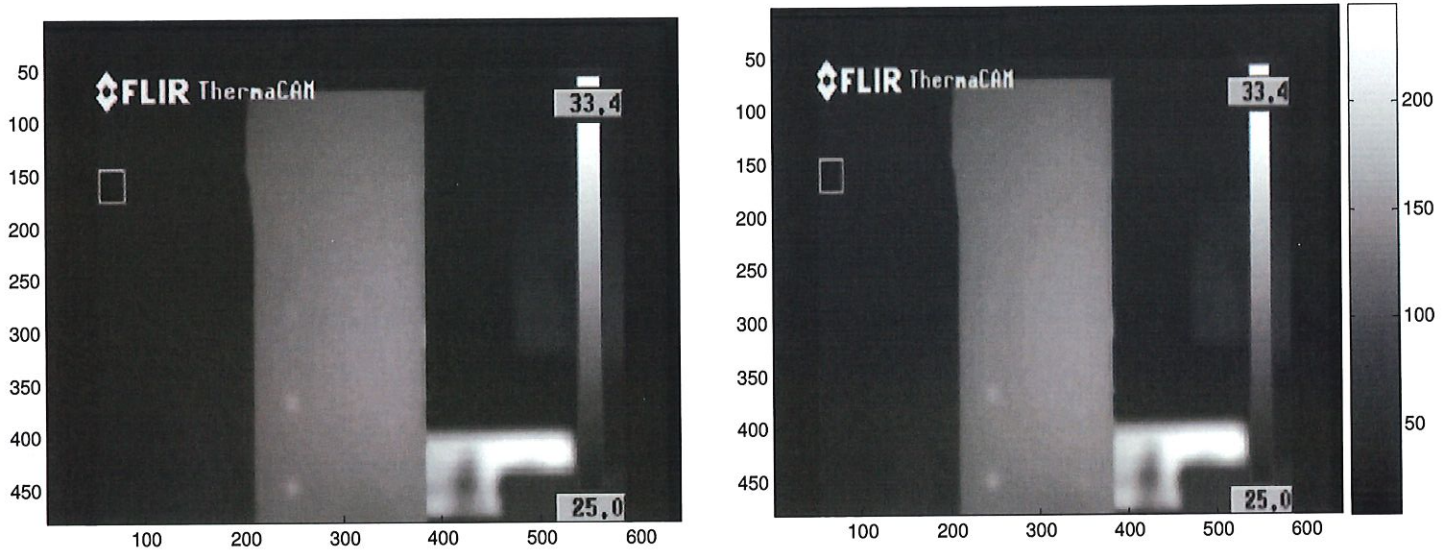


Figure 67:

Image brute

SNR image brute : 41,5dB

Image filtrée

SNR image filtrée : 44,8dB

Coupe verticale au droit des défauts :

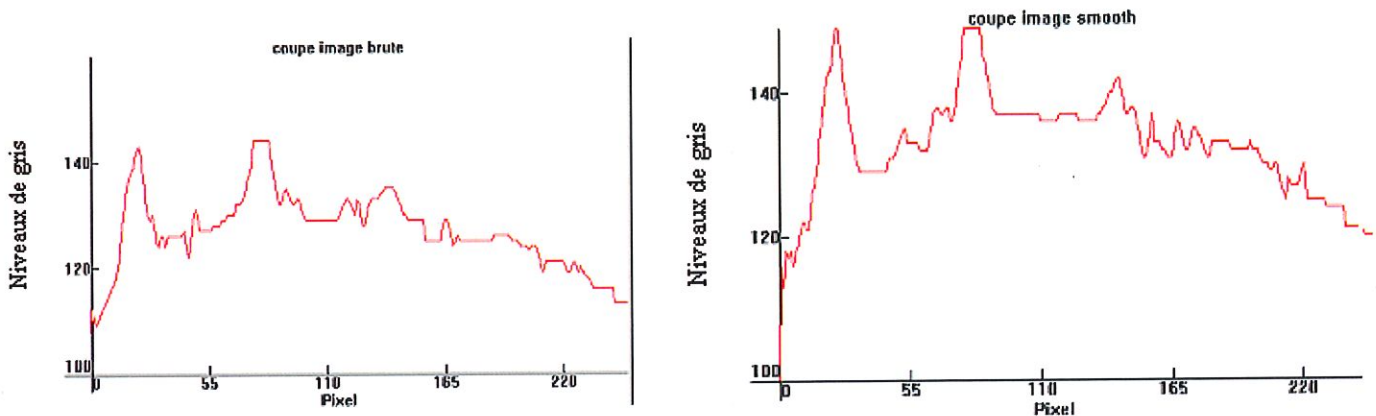


Figure 68: Coupe verticale au droit des défauts

L'amélioration obtenue est faible, le SNR n'étant amélioré que de quelques unités.

Il est intéressant de vérifier si une amélioration plus importante pourrait être obtenue en faisant intervenir plus de pixels dans la moyenne pondérée du calcul de la valeur corrigée d'un pixel.

Exemple : $f = (f_1 + \dots + f_{15}) / 15$

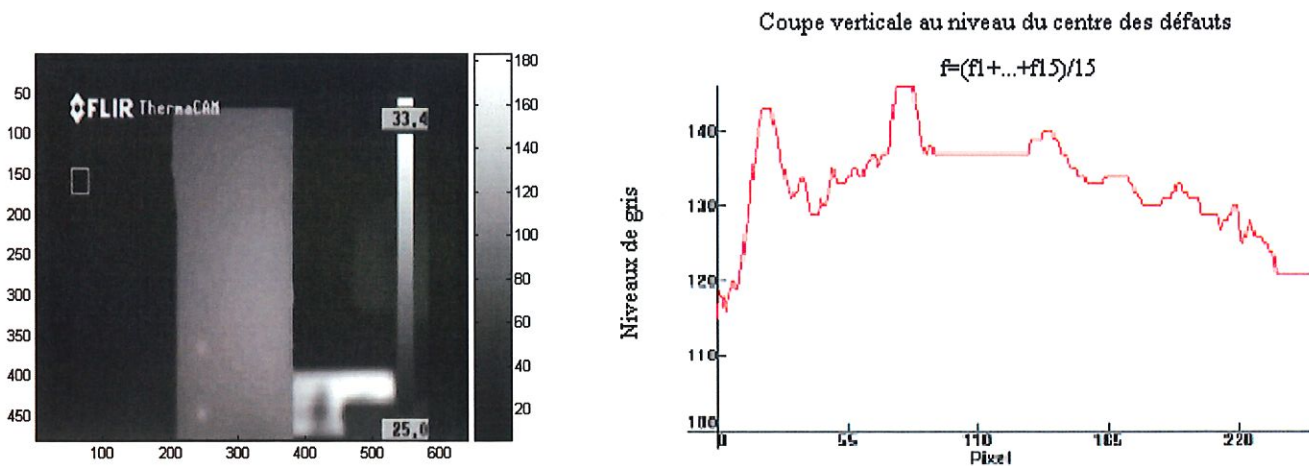


Figure 69: Image obtenue après l'utilisation d'un filtre passe-bas utilisant 15 pixels voisins : SNR 45,42 dB

Certes, le SNR a légèrement augmenté mais il est encore malaisé de différencier les signatures thermiques des plus petits défauts du bruit. De plus, une moyenne sur un nombre important de pixels fait perdre de la résolution spatiale. Les défauts de faible diamètre risquent de ne plus pouvoir être observables même si leur signature thermique était importante.

b) filtre statistique

Une méthode de filtrage alternative consiste à réaliser un lissage statistique (voir partie 2).

Appliquons ce lissage statistique en utilisant une gaussienne de largeur 2 :

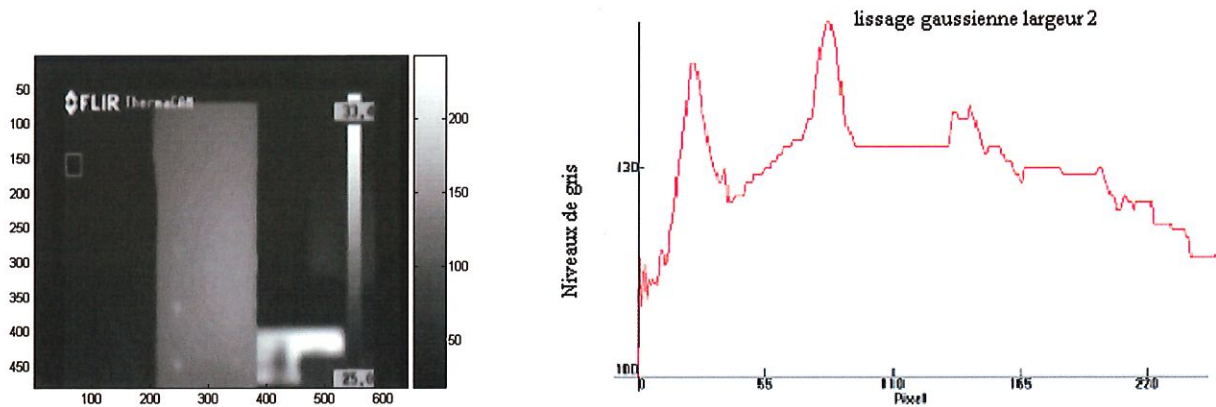


Figure 70: Lissage statistique, largeur gaussienne 2

Le SNR obtenu par cette opération est de 47,87dB.

Si l'on utilise une autre largeur pour la fonction gaussienne, par exemple 5, on obtient une image où certes le bruit a fortement diminué (SNR=51,25 dB) mais où la résolution spatiale est trop fortement amoindrie.

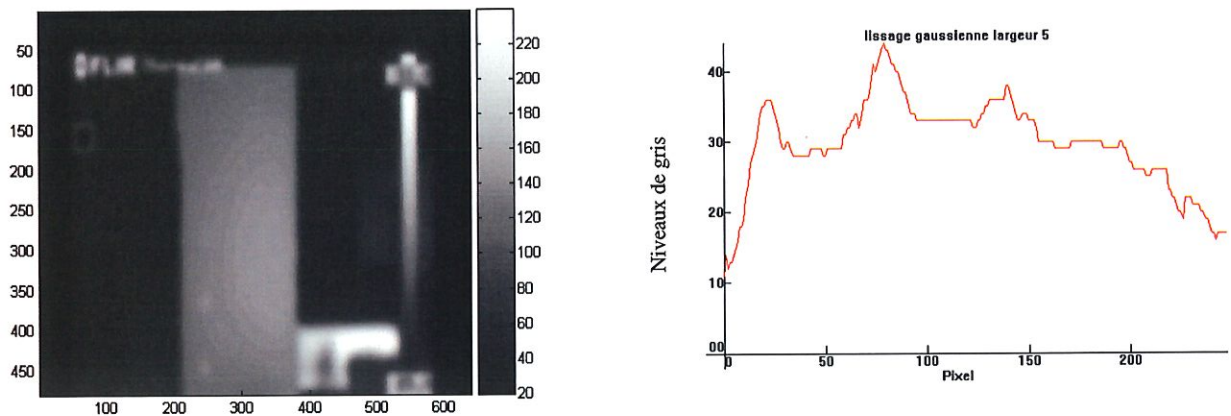


Figure 71: Image lissée, largeur gaussienne 5

Il faut donc choisir le meilleur compromis possible entre l'augmentation de SNR et la conservation d'une résolution spatiale acceptable.

c) Conclusion

Une méthode de lissage ne peut fournir des résultats intéressants sur la diminution du bruit que si ceux-ci ne s'accompagnent pas d'une diminution trop importante de la résolution spatiale.

Même en choisissant de manière adéquate les paramètres de lissage, il n'est pas évident de mettre en lumière des défauts dont la signature thermique est faible (défaut profondeur 1.91 ,2.51 et 3.01mm).

Afin d'optimiser la mise en valeur des défauts, il faut, conformément aux résultats obtenus dans l'analyse sur l'effet de l'accumulation des images sur le bruit, non seulement utiliser le procédé du lissage mais également celui de l'accumulation d'images.

Afin de ne pas nuire à la résolution temporelle, utilisons l'accumulation de 4 images jumelée au lissage statistique :

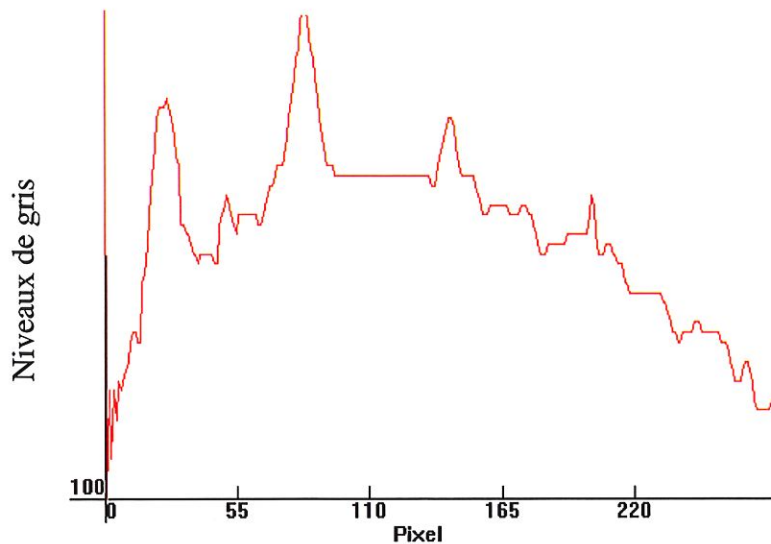


Figure 72: Coupe verticale au travers du centre des défauts après lissage statistique et 4 accumulations d'image.

La coupe verticale passant par le centre des défauts de diamètre 10mm nous fournit enfin une signature thermique évidente pour les quatre plus gros défauts et une suspicion pour le dernier défaut.

Les filtres présentés dans ce chapitre sont des méthodes de première ligne permettant déjà d'obtenir des résultats appréciables sur la qualité des images. Cependant, s'il était nécessaire d'améliorer encore la visibilité des défauts, il existe d'autres techniques de traitement d'images plus performantes (ex : DAC, 1^{ère} dérivée, 2^{ème} dérivée...). Leur mise en œuvre est cependant légèrement plus complexe.

d) Organigramme récapitulatif

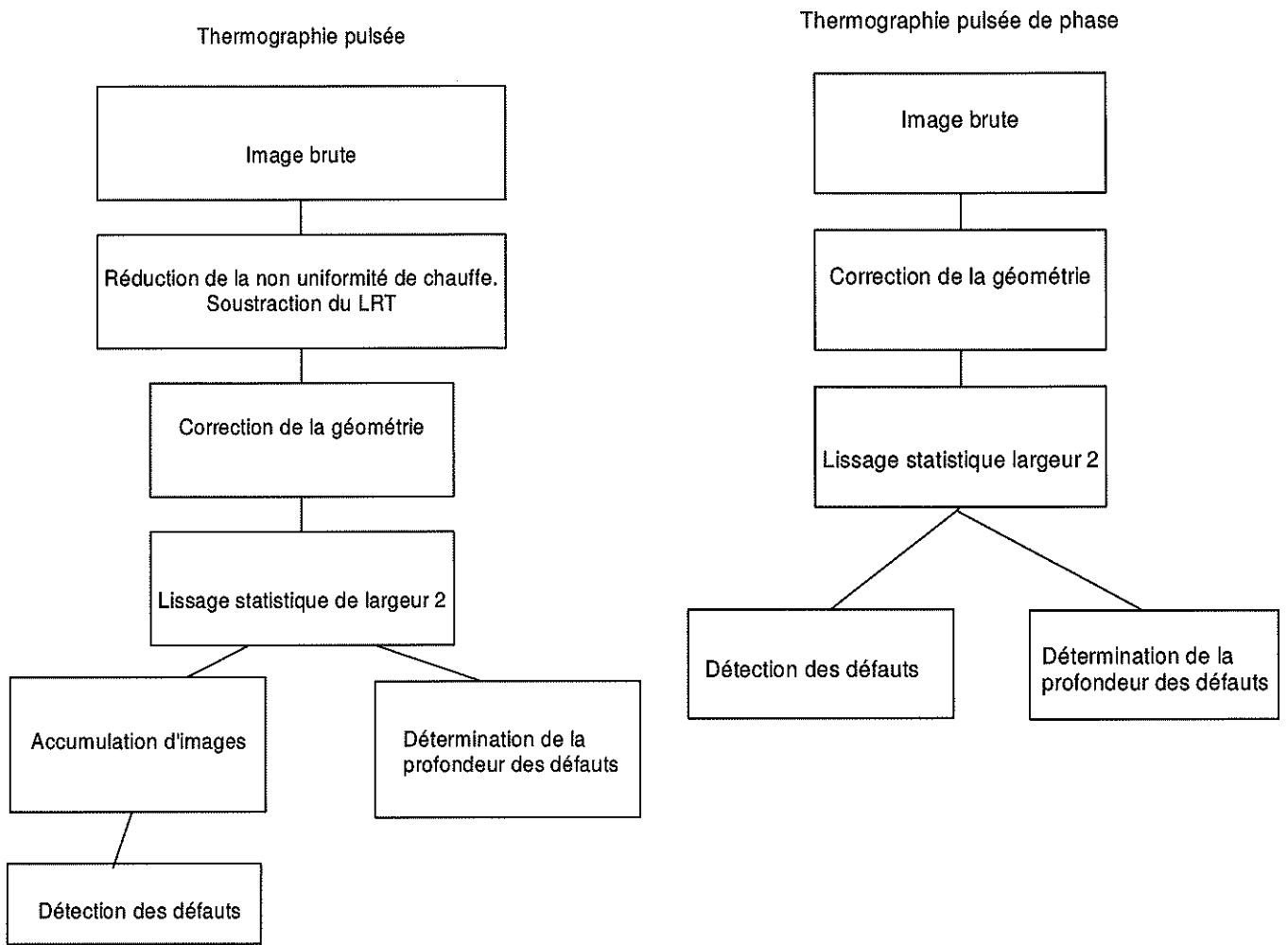


Figure 73: Organigramme récapitulatif

III. APPLICATIONS DE LA THERMOGRAPHIE : DELAMINATIONS

III.1. Description des calibres utilisés.

Afin de montrer l'efficacité de la thermographie dans la détection et la quantification de délaminations, deux calibres différents vont être utilisés.

Calibre 1 :

Le premier calibre est celui décrit figure 27. Pour rappel, il s'agit d'une structure CFRP monolithique de 84 plis d'orientations différentes (0°-45°-90°). L'épaisseur de l'échantillon est de 11,1 mm et 11 trous borgnes simulent les défauts de délamination. Il faut noter que ces trous borgnes n'ont pas exactement le même comportement que des délaminations puisque, dans leur cas, il existe de la matière après l'épaisseur d'air induite par le défaut. Cependant, ces trous borgnes restent une bonne simulation de délamination facilement réalisable sur un échantillon existant. Ils sont disposés en deux rangées : cinq défauts de 10mm de diamètre et six défauts de 5mm de diamètre.

Tableau 11: Profondeur de chaque FBH en mm sous la surface.

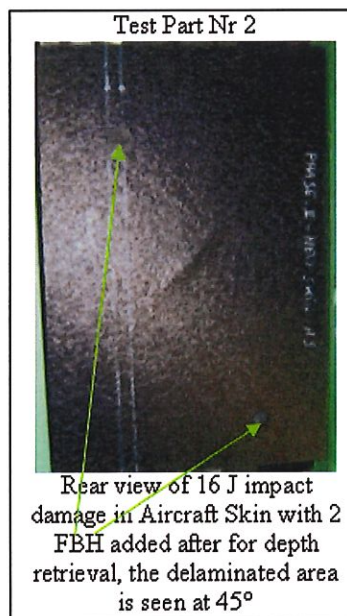
Profondeur en mm	Défaut 6 (seulement 5mm)	Défaut 5	Défaut 4	Défaut 3	Défaut 2	Défaut 1
Diamètre 10 mm	-	3,01	2,51	1,91	1,31	0,81
Diamètre 5 mm	3,11	2,61	2,36	2,11	1,51	0,91

Calibre Nr 1



Vue arrière d'une pièce CFRP monolithique d'A380 -84 plis d'orientations différentes et 11 FBH

Calibre Nr 2



Vue arrière d'un dommage d'impact de 16 J sur un panneau d'avion avec 2 FBH ajoutés pour évaluation de la profondeur.

Figure 74: Echantillons en composite

Calibre 2:

Panneau de revêtement d'avion en composite graphite epoxy, épaisseur totale de 3,4 mm et constitué de 24 plis. Le défaut d'impact est réalisé avec un impacteur en laboratoire avec les paramètres indiqués tableau 12.

Tableau 12: Paramètres pour le test d'impact calibré.

ENERGIE D'IMPACT	16 JOULES
PROFONDEUR DE LA CAVITE DU COTE IMPACTE	0,35 mm
AIRE DE LA ZONE DELAMINEE	695 mm ²
DIMENSIONS EXTERNES DE LA PLAQUE	150 x 100 x 3,4 mm
MASSE DE L'IMPACTEUR	2 kg

III.2. Détection des défauts sur calibre

Afin d'illustrer les potentialités de la thermographie pour la détection de délaminations, le calibre n°1 FBH a été testé par thermographie pulsée et par thermographie pulsée de phase.

Par thermographie pulsée

900 images ont été enregistrées dans la séquence IR après un pulse thermique de 0,015s émis par deux lampes flash. La fréquence d'acquisition est de 22,55 Hz, ce qui donne une durée d'enregistrement de 40 secondes.

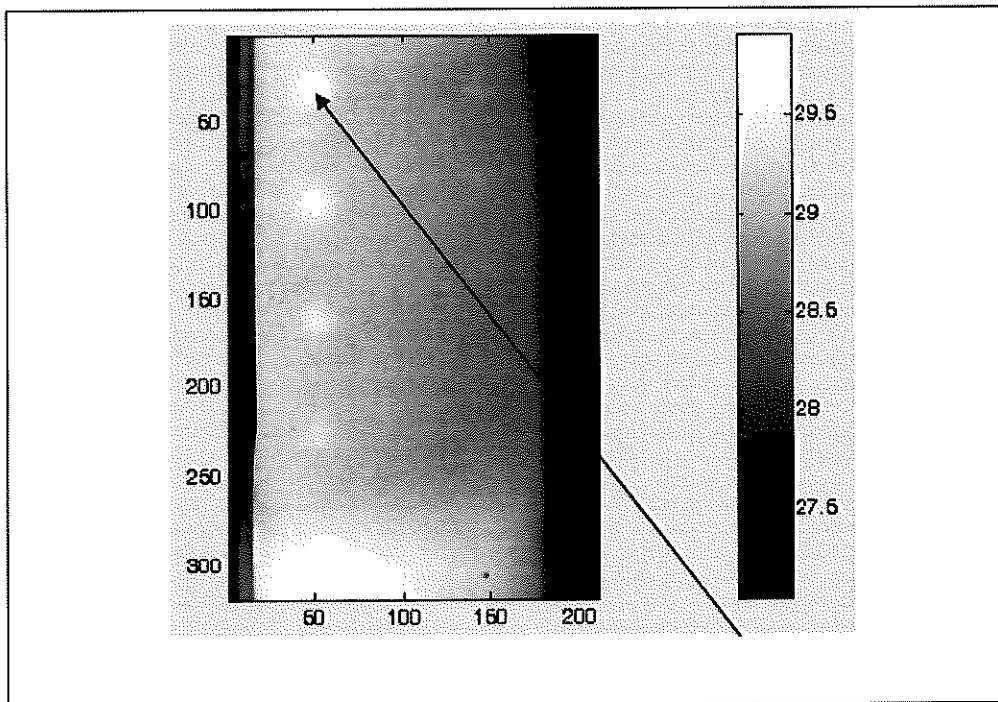


Figure 75: Meilleure image IR après le pulse thermique montrant la série des défauts de diamètre 10mm.

La figure 76 montre l'évolution de la température pour le défaut N°1. Dans le diagramme de gauche, l'axe des abscisses est exprimé en échelle logarithmique afin de faciliter la détection du maximum de la courbe de contraste.

La température de la zone saine est obtenue en effectuant la moyenne de 4 points situés au nord, au sud, à l'est et à l'ouest du centre du défaut. Ce choix permet de calculer le contraste de température et évite le problème classique de la non uniformité de chauffe de la surface due par exemple à une différence de puissance entre les deux lampes flash ou à une faible différence de distance entre les lampes flash et l'échantillon.

Le temps du contraste maximum et l'amplitude de ce contraste sont facilement déterminables pour ce défaut superficiel en observant les données IR dans le domaine temporel.

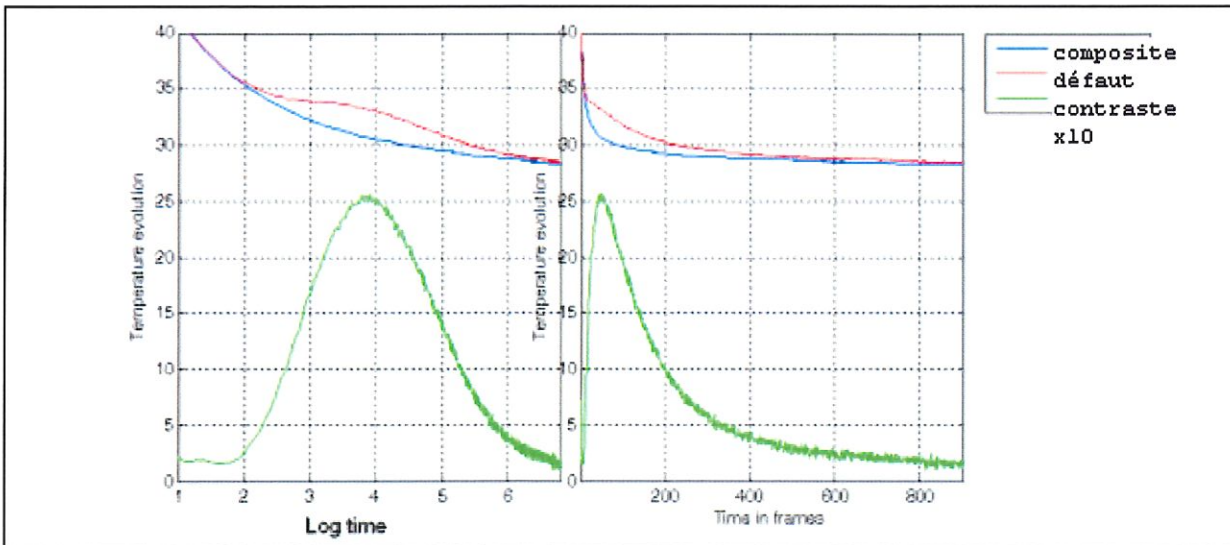


Figure 76: Evolution du contraste thermique pour le défaut le moins profond.

Par thermographie pulsée de phase (PPT)

Si on applique une transformée de Fourier à chaque pixel de la séquence thermique, nous pouvons générer deux types d'images: des images d'amplitude et des images de phase. Les tests sur calibre 1 FBH illustrent bien la différence d'arrière-plan entre une image d'amplitude et de phase.

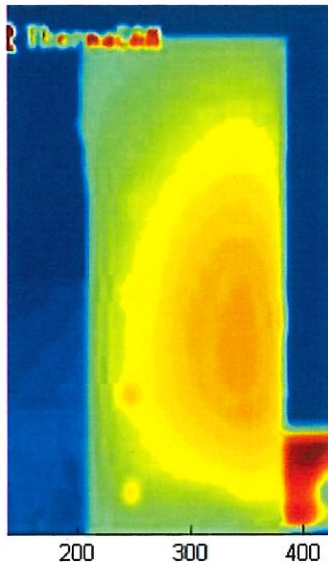


Figure 77: Image d'amplitude

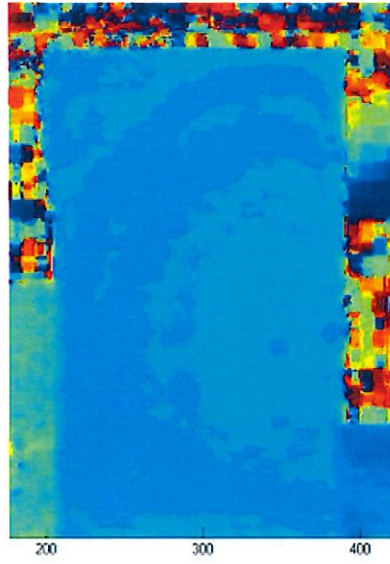


Figure 78: Image de phase, basse fréquence

La thermographie pulsée de phase permet de détecter des défauts relativement profonds jusqu'à des distances de l'ordre de 3mm par rapport à la surface. Cette profondeur de détection est liée à la capacité du pulse thermique à pénétrer dans la matière. Cette profondeur de pénétration est déterminée par la longueur de diffusion thermique $\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$

avec $\omega = 2\pi.f$, f est la fréquence de modulation et α étant la diffusivité thermique du matériau.

La valeur classique de la diffusivité thermique pour un CFRP est de $\alpha = 0.42 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$.

Donc les composantes du pulse thermique correspondant aux fréquences de modulation basses sont plus capables de pénétrer suffisamment dans la matière pour permettre la détection de défauts profonds.

Pour obtenir une image correspondant à une fréquence très faible (et donc à une pénétration profonde), il faudra faire une acquisition suffisamment longue car la fréquence de modulation la plus basse du signal (f_1) est donnée par :

$$f_1 = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{f_{\text{sampling}}}{N} \quad [\text{Équation 32}]$$

où N est le nombre d'images contenues dans la séquence et f_{sampling} la fréquence d'échantillonnage.

La fréquence d'échantillonnage est classiquement 25 Hz pour des imageurs thermiques (signal vidéo PAL) et le nombre N d'images acquises est fonction de la durée de la séquence vidéo, 10 secondes donneront donc par exemple $N=250$ images et une première fréquence à 0,10 Hz ; ce qui aboutira à une valeur de $\mu = 1,2\text{mm}$. Si la fréquence diminue encore en augmentant la durée d'acquisition, on peut encore accroître la profondeur de détection. Pour une durée de 100 secondes, nous obtenons donc une fréquence de 0,01Hz et une valeur de $\mu = 3,7 \text{ mm}$.

La figure 79 montre de plus que le bruit contenu dans l'image augmente dans les images prélevées à des fréquences de modulation élevées :

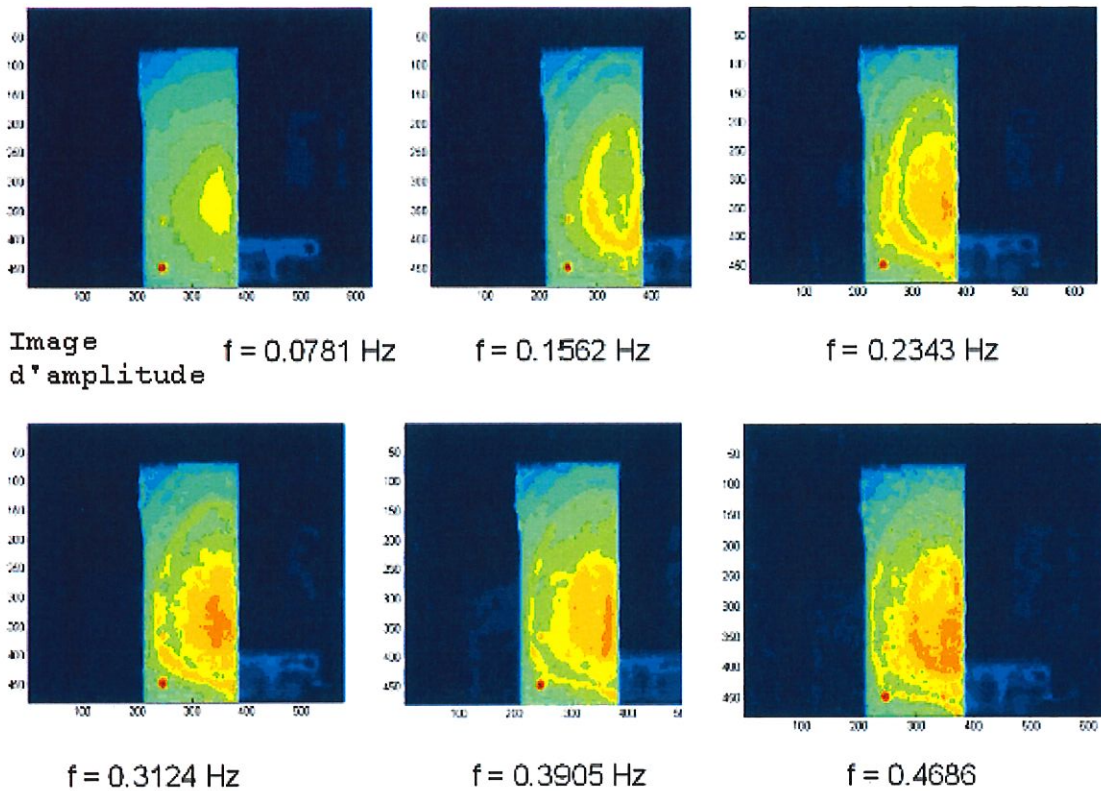


Figure 79: 6 premières images en PPT amplitude, N=13 secondes, lampe halogène

Chaque fréquence de modulation étant liée à une profondeur de pénétration limite, les images successives à des fréquences de modulation croissantes nous fournissent des vues correspondant à des couches successives dans le matériau, en commençant par les couches les plus profondes.

Une représentation 3D permet de mieux visualiser les défauts, l'image 80 montre les deux premières profondeurs pour les défauts de 10mm et de 5 mm de diamètre :

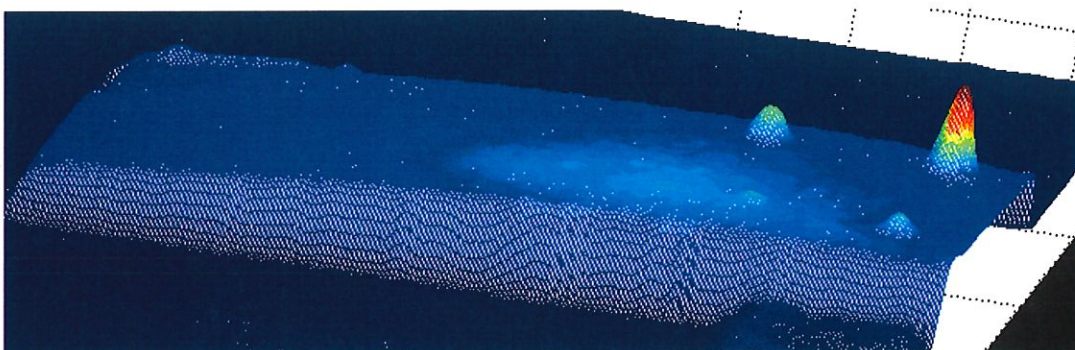


Figure 80: Vue 3D des défauts peu profonds de diamètres 10 et 5 mm sur calibre CFRP

Si l'on réalise un profil de température sur les 5 défauts de 10 mm présents dans le calibre, on peut remarquer que l'analyse dans le domaine fréquentiel permet de « voir » des défauts non détectés en thermographie

pulsée. Le profil (réalisé en amplitude) démontre que le traitement du signal PPT permet de déceler des défauts plus profondément, comme la théorie le prévoit.

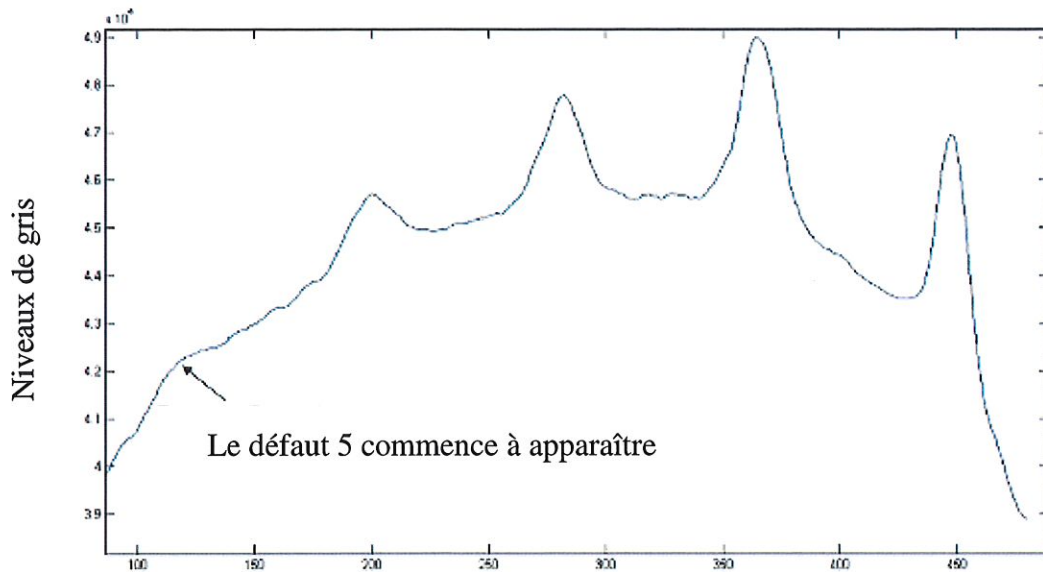


Figure 81: Le défaut le plus profond (3 mm) commence à « sortir » sur le bruit de fond

En jouant ainsi sur les fréquences, on peut finalement isoler par tranche la pièce inspectée, ce qu'on pourrait appeler un tomothermographie, à l'instar de la tomographie. Ainsi les fréquences basses correspondent toujours à la visibilité maximale des défauts profonds, la figure 82 met très bien en évidence les défauts 5 et 4 (profondeur de 3 et 2,5 mm respectivement).

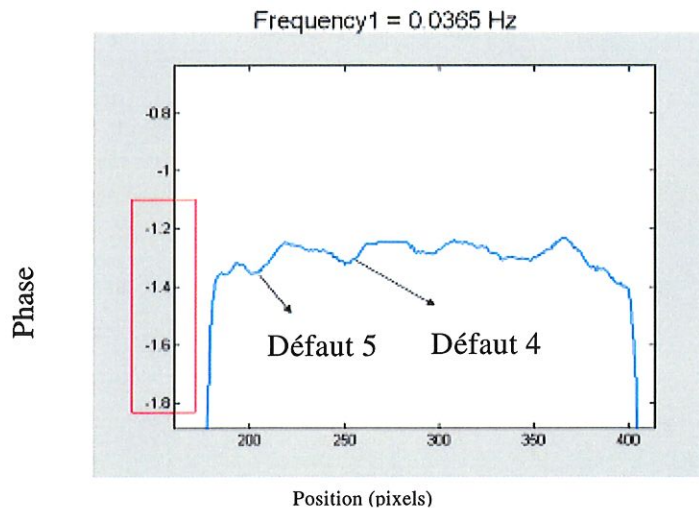


Figure 82: Profil de phase à très basse fréquence

Une durée plus longue de chauffe et d'acquisition permet directement d'accéder aux défauts les plus profonds dans un composite CFRP (jusqu'à 3 mm au moins). La coupe suivante issue d'une image d'amplitude correspond à une fréquence de 0.01 Hz (durée de 100 secondes).

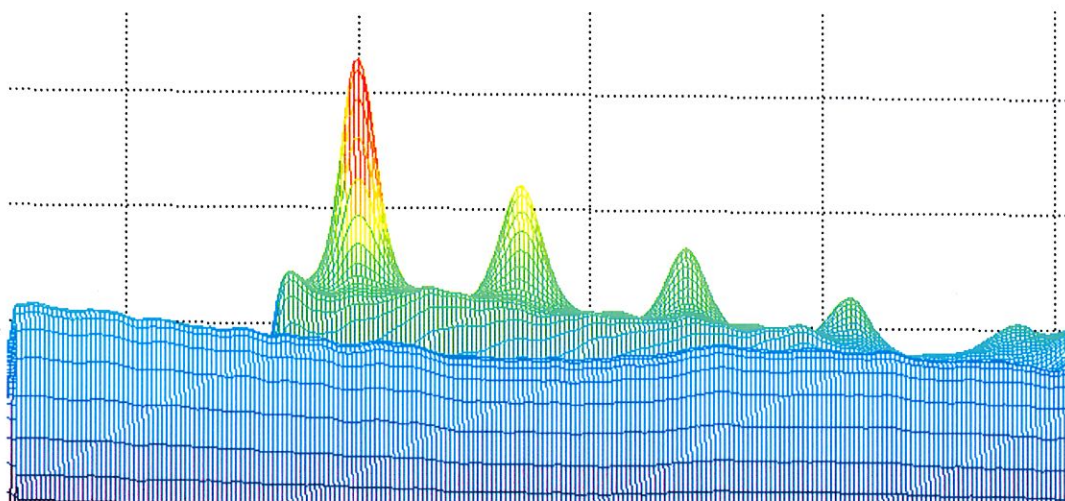


Figure 83: Vue en profil des 5 défauts de 10 mm, image d'amplitude à $f = 0.01$ Hz

Répétabilité de la détection.

La détection des délaminations sur un thermogramme est un processus dont l'efficacité peut varier d'un observateur à l'autre en fonction de différents paramètres tels que, par exemple, l'expérience, la formation, l'acuité visuelle, la concentration.

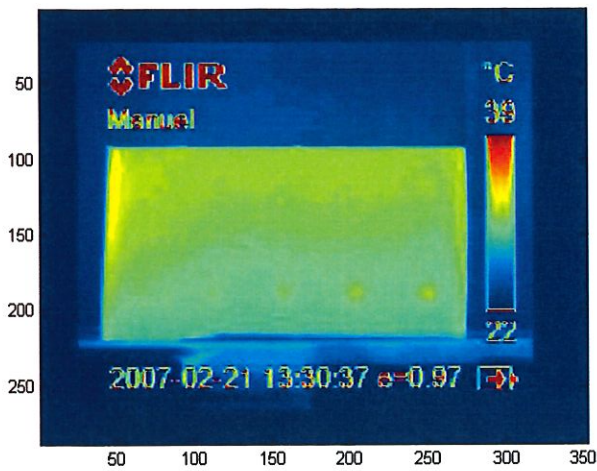
Il en va de même de la plupart des techniques d'essais non destructifs. La radiographie demande par exemple une interprétation éclairée de l'expérimentateur.

Afin de tester la variabilité de la détection des défauts en fonction de l'observateur, différents thermogrammes ont été soumis à une assemblée de 100 étudiants en sciences de l'ingénieur.

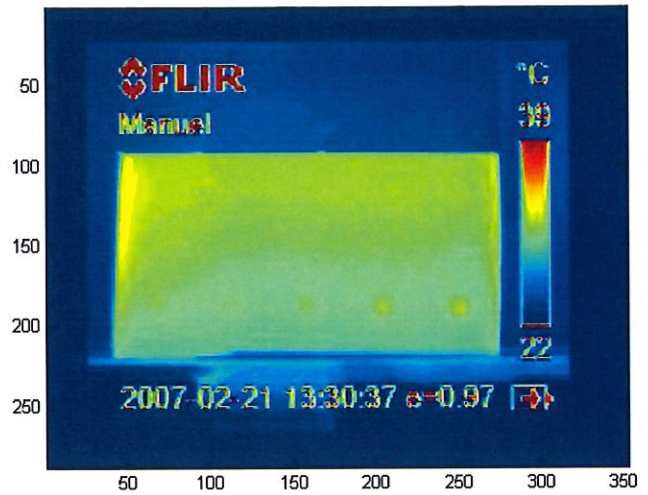
Différents distracteurs, des images thermographiques obtenues lors d'expériences sur d'autres calibres, ont été intercalés entre les thermogrammes significatifs afin que la succession de thermogrammes ne facilite pas la détection des défauts.

Les quatre images significatives soumises aux étudiants sont issues d'une séquence obtenue par thermographie pulsée sur le calibre n°1, le calibre FBH.

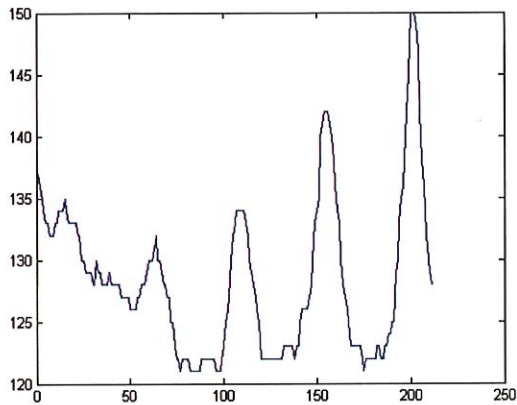
Il s'agit de l'image non traitée obtenue au moment précis du contraste maximum, d'une image obtenue par moyennage temporel sur quatre images entourant celle de contraste maximum et de deux profils de température sur l'image brute et sur l'image traitée par moyennage (voir figure 84).



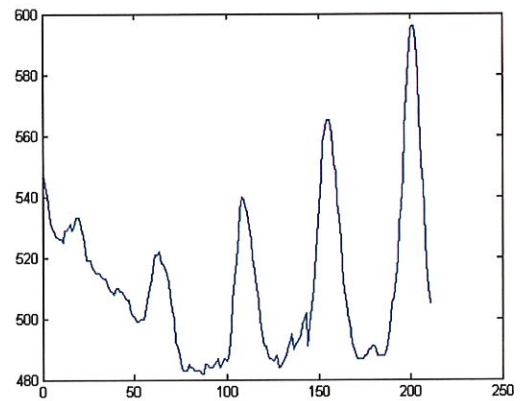
A. image brute au meilleur contraste



B. somme de 4 images au meilleur contraste



C. profil en niveau de gris sur une image brute



D. profil en niveau de gris sur une somme de 4 images

Figure 84: Images soumises aux observateurs

Le tableau 12 et la figure 85 indiquent le pourcentage d'observateurs capables de détecter au moins un nombre donné de défauts.

	1 défaut	2 défauts	3 défauts	4 défauts	5 défauts
image brute	100	100	98	86	5
somme de 4 images	100	100	99	91	8
profil sur image brute	100	100	100	100	67
profil sur somme d'images	100	100	100	100	79

Tableau 13: Pourcentage d'observateurs capables de détecter les défauts

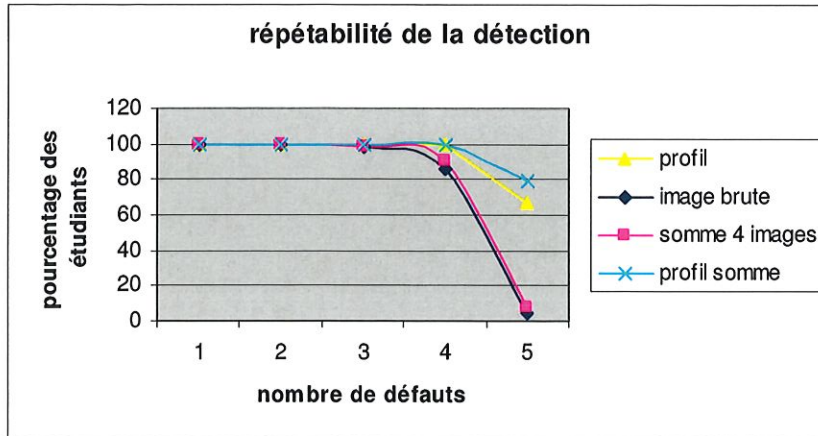


Figure 85: Pourcentage d'étudiants capables de détecter au moins un nombre de défauts

L'expérience montre clairement que très peu d'observateurs sont capables de détecter le défaut le plus profond sur une image brute ou même sur une image moyennée. Cependant, les profils facilitent beaucoup la détectabilité du défaut le plus faiblement contrasté.

L'ensemble des observateurs détectent les trois défauts les moins profonds quelque soit la forme de l'image proposée.

Cette expérience tend à montrer que la variabilité de détection inhérente à l'interface humaine est faible si l'image est fortement contrastée.

Par contre, dès que le contraste de l'image est faible, la probabilité de détection sur une image thermographique dépend fortement de l'observateur.

III.3. Détermination de la profondeur d'une délamination^{61,49}

Calibre FBH

a) Thermographie pulsée

Les thermogrammes obtenus par l'expérience de thermographie pulsée fournissent, pour les 5 défauts de 10mm de diamètre, le temps où le contraste maximum intervient ainsi que la valeur de ce contraste. Le résultat est donné dans le tableau 14.

Ces données indiquent que le premier défaut détecté, celui qui est le moins profond, affiche un contraste de plus de 2,5°C à 2,13 secondes après le pulse tandis que le défaut le plus profond a son contraste maximum après 12 secondes, celui-ci est d'ailleurs très faible.

Z Def 1 0.8 mm	Z Def 2 1.3 mm	Z Def 3 2 mm	Z Def 4 2.5 mm	Z Def 5 3 mm
2.13 s	3.60 s	6.31 s	9.15 s	12.44 s
2.54 C	1.02 C	0.468 C	0.330 C	0.212 C

Tableau 14. Temps d'occurrence du contraste maximum et contraste maximum en fonction de la profondeur du défaut.

Ces données sont placées sur un diagramme $\log[Z_{def} / (t_{cmax})^{1/2}]$ en fonction de $\log(C_{max})$ afin de déterminer l'équation de la droite passant au mieux par les points.

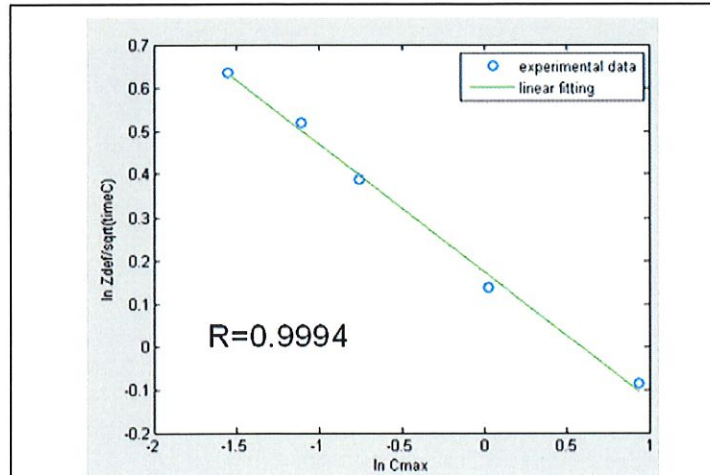


Figure 86: Evolution de la température et du contraste pour le défaut 1 en échelle logarithmique

Le fitting linéaire permet de déterminer les coefficients intervenant dans l'équation 35 :

$$\log\left(\frac{Z_{def}}{\sqrt{t_{C_{max}}}}\right) = B + n \log(C_{max}) \quad [\text{Équation 33}]$$

B= 1.1891 et n=-0,2962.

Ces paramètres permettent de déterminer la différence entre les profondeurs calculées par l'équation 35 sur base du contraste observé et les valeurs réelles relevées sur le calibre.

Tableau 15. Valeurs calculées de la profondeur pour les 5 défauts de 10mm de diamètre, profondeurs réelles et erreur en mm.

Zfit =				
0.7853	1.3380	2.0211	2.4573	2.9893
Zdef =				
0.8000	1.3000	2.0000	2.5000	3.0000
Error_in_mm =				
-0.0147	0.0380	0.0211	-0.0427	-0.0107

L'erreur maximale en utilisant le contraste en température est de 42 microns et ce pour un défaut de 2,5 mm de profondeur.

b) Thermographie pulsée de phase

Une transformée de Fourier rapide (FFT) du signal temporel fournit des images dans le domaine fréquentiel pour des fréquences comprises entre 0,025 Hz et 11,25Hz. La figure 87 montre 6 images de phase entre 0.025 Hz et 0,6 Hz (quelques images intermédiaires n'ont pas été reproduites).

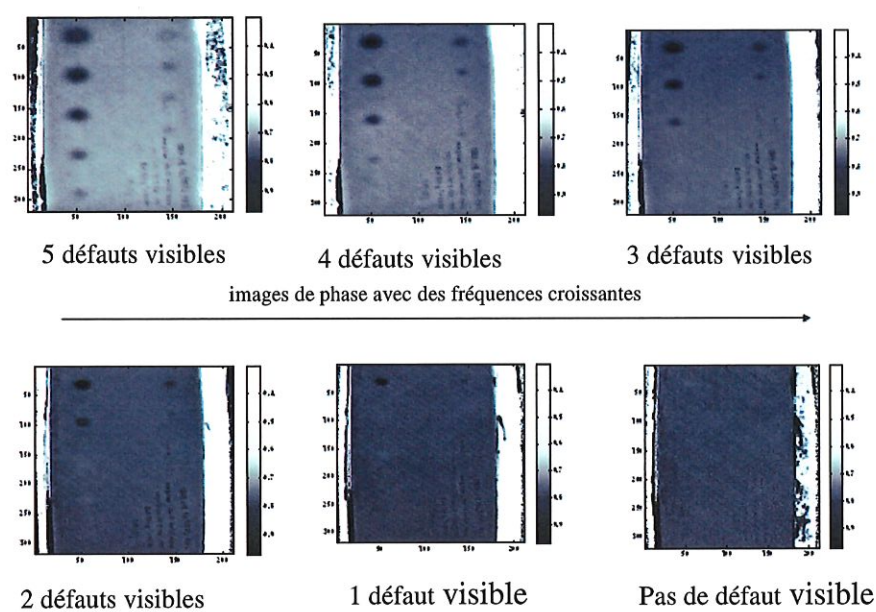


Figure 87. 6 images de phase entre 0,025 Hz et 0,6 Hz pour les défauts de 10mm de diamètre.

L'observation de ces images confirme le lien direct entre la fréquence et la détectabilité de chaque défaut, ce qui facilite la détermination de la profondeur en utilisant la fréquence aveugle.

La première étape consiste à déterminer la fréquence aveugle pour chaque défaut. La figure 88 montre comment déterminer cette fréquence limite où le défaut devient indétectable dans l'image de phase.

Par exemple, pour le défaut le moins profond, la fréquence aveugle est de $f_b=0,6\text{Hz}$. La longueur de diffusion associée est de 0,472 mm (voir équation 25).

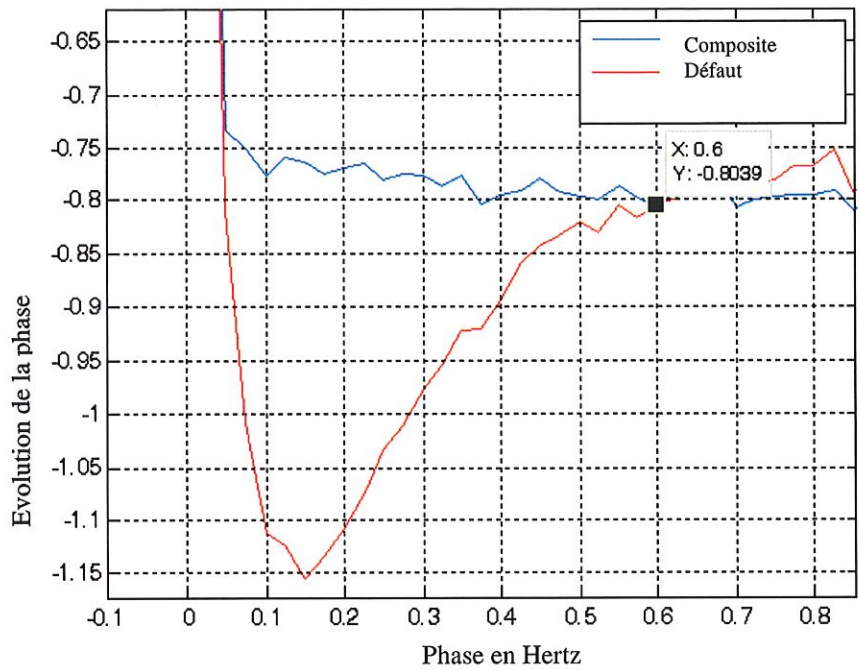


Figure 88: Evolution de la phase dans le domaine fréquentiel pour le défaut de 0,8 m de profondeur.

Un calcul similaire peut être réalisé pour chaque défaut pour déterminer la longueur de diffusion thermique.

Le graphique 89 permet de visualiser la longueur de diffusion thermique (en mm) associée à chaque profondeur de défaut (en mm). Ce graphique indique que le rapport entre la profondeur du défaut et la longueur de diffusion est très proche de 2 comme l'affirme la littérature⁶¹ (une valeur de 1mm pour μ correspond à une profondeur de 2 mm sous la surface chauffée).

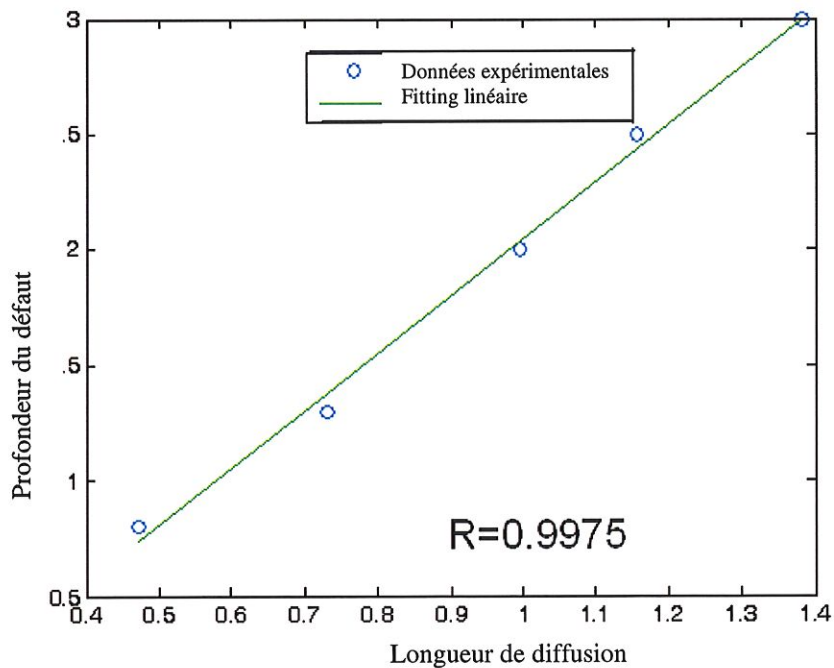


Figure 89: Profondeur de chaque défaut en fonction de la longueur de diffusivité thermique en mm et fitting linéaire.

Un calcul d'erreur montre que l'erreur maximale est de 0,083mm, ce qui est un très bon résultat comparé aux méthodes NDT classiques.

Calibre défaut d'impact

a) Thermographie pulsée

Le calibre n°2 contenant un défaut d'impact a été soumis à un pulse thermique de 15 secondes émis par un projecteur halogène de 1000W situé à 25 cm de lui.

Afin d'améliorer la visualisation du défaut, un moyennage temporel a été appliqué et la courbe de contraste de température analysée.

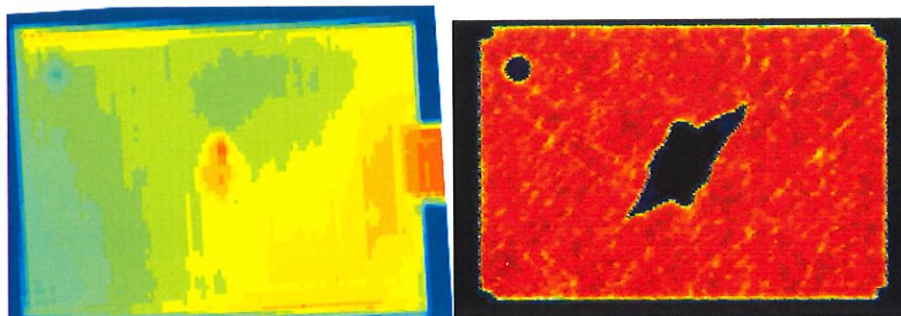


Figure 90. Gauche : thermographie pulsée de la plaque, droite: C-SCAN ultrasons.

Le contraste maximum apparaît 12 secondes après le commencement de la chauffe (donc 3 secondes avant la fin de la chauffe). La position du contraste maximum montre clairement que seuls les premiers plis de la plaque sont visualisés, on ne peut détecter que le dommage proche de la surface.

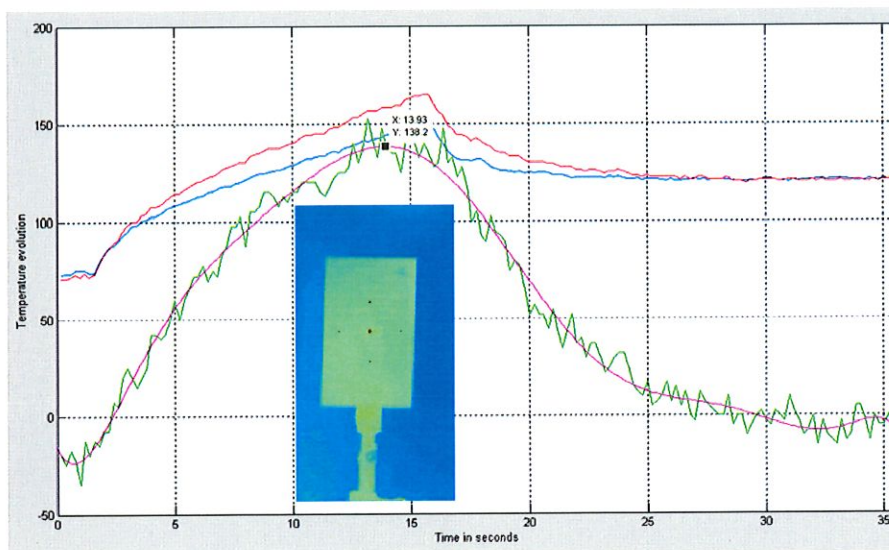


Figure 91. Courbe de contraste en température pour une chauffe de 15 secondes.

L'image obtenue par ultrasons (C-SCAN) montre clairement la forme exacte du défaut. Celle-ci n'est que partiellement retrouvée par le test par thermographie, l'efficacité de celle-ci étant limitée aux plis supérieurs de la pièce.

Cette expérience met en lumière une des limitations la plus importante de la thermographie pulsée, son incapacité à détecter des défauts dont la profondeur excède quelques millimètres, cette profondeur limite étant liée à l'intensité de la chauffe.

b) Thermographie pulsée de phase

Le même calibre d'impact a été testé en utilisant cette fois un pulse court (15msec) délivré par deux flash (15 msec) afin de produire une matrice 3D dans le domaine temporel transformable dans le domaine fréquence par une transformée de Fourier.

Ceci permet de réaliser une « tomographie » du dommage d'impact en représentant les différentes images de phase.

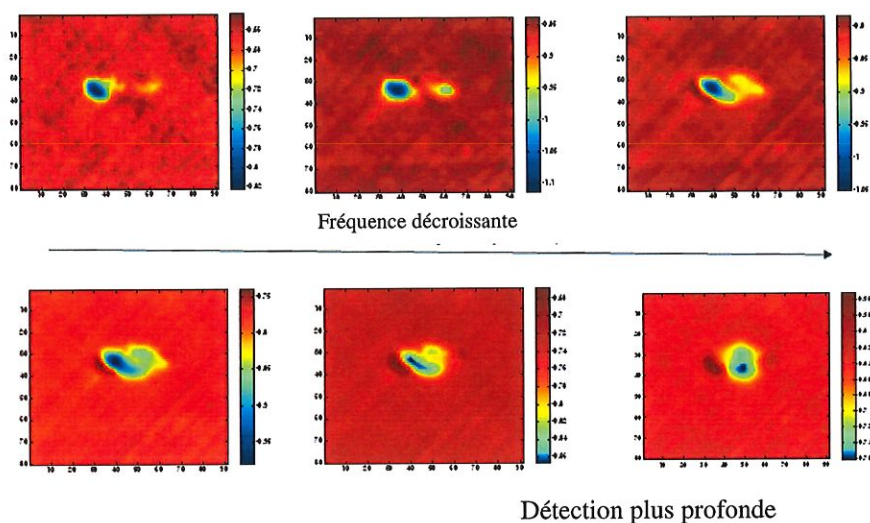


Figure 92: Images de phase obtenues par thermographie pulsée sur un défaut d'impact.

L'observation de ces images montre la forme typique en papillon d'un impact sur une plaque en composite, en commençant par les deux impacts proches de la surface qui se rejoignent pour former une délamination plus verticale (défaut le plus profond avec l'image de phase de fréquence la plus faible).

Malheureusement, l'ensemble du défaut et plus particulièrement la délamination la plus profonde orientée à 45° ne peut pas être détectée avec ce pulse court, l'épaisseur de la pièce étant trop importante (plus de 3,6mm CFRP), une puissance thermique supérieure serait nécessaire pour pénétrer l'ensemble de la pièce.

III.4. Détermination de la forme d'un défaut

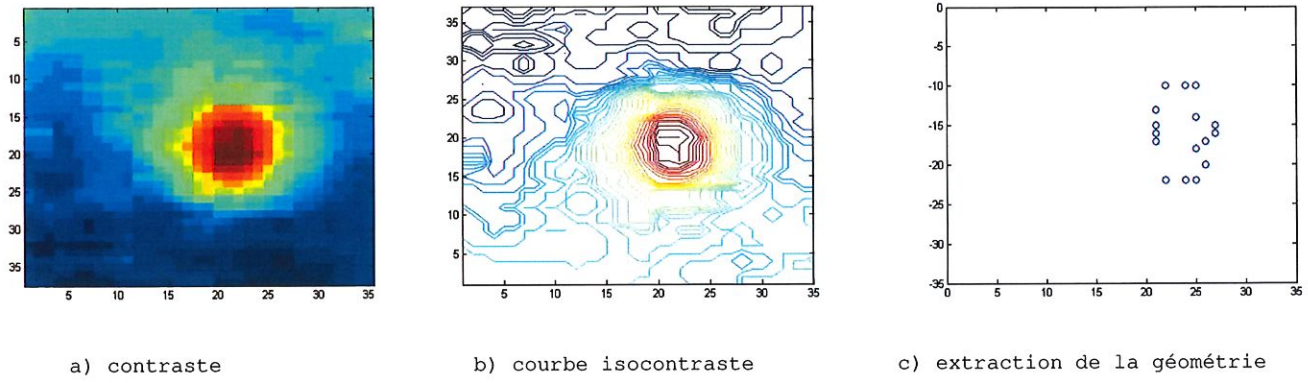
Application aux défauts FBH

Il existe de nombreux logiciels permettant d'évaluer la forme et la taille d'un défaut lorsque celui-ci est symétrique. Par contre, cette quantification devient plus complexe lorsque l'image du défaut est quelconque. Pourtant, estimer la taille d'un défaut est une étape essentielle d'un processus d'essais non destructifs.

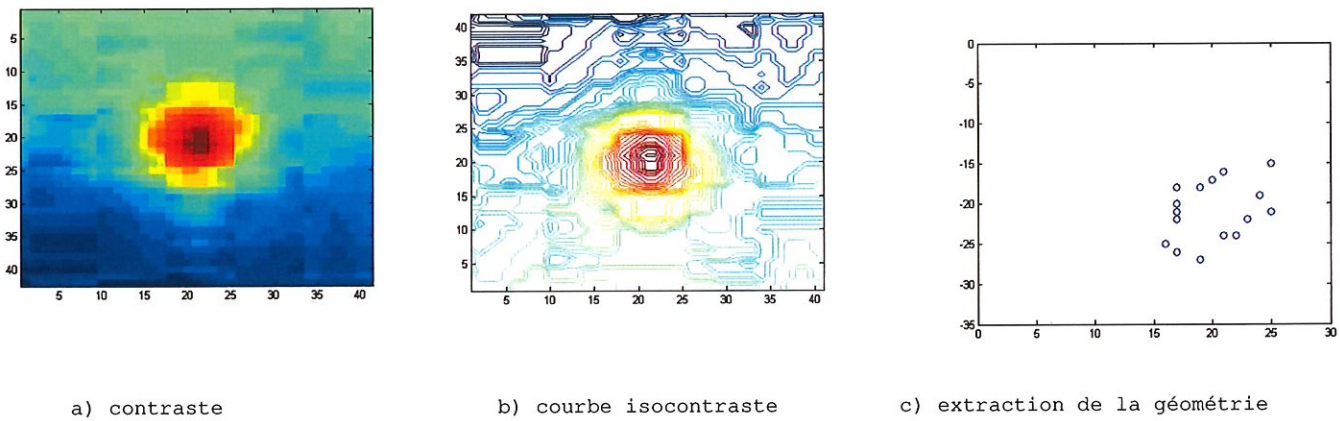
Afin de montrer l'efficacité de la méthode du gradient maximum développée partie 3,I,2, nous l'avons appliquée au calibre à trous borgnes décrit figure 27. Nous avons d'abord mis en évidence les défauts en calculant l'image de contraste. Celle-ci est obtenue en soustrayant de chaque pixel la valeur moyenne de quatre pixels l'entourant et ne faisant manifestement

pas partie du défaut. L'image de contraste permet déjà d'évaluer visuellement la taille d'un défaut, surtout lorsque les courbes d'iso-contraste sont affichées. Intuitivement, le défaut apparaît avec la première courbe d'iso-contraste fermée. L'opérateur peut dès lors estimer le nombre de pixels faisant partie de ce défaut. L'extraction géométrique par la méthode du gradient permet de semi-automatiser cette mesure.

Défaut 1, diamètre 10mm, profondeur 0,81mm



Défaut 2, diamètre 10mm, profondeur 1,31mm



Défaut 3, diamètre 10mm, profondeur 1,91mm

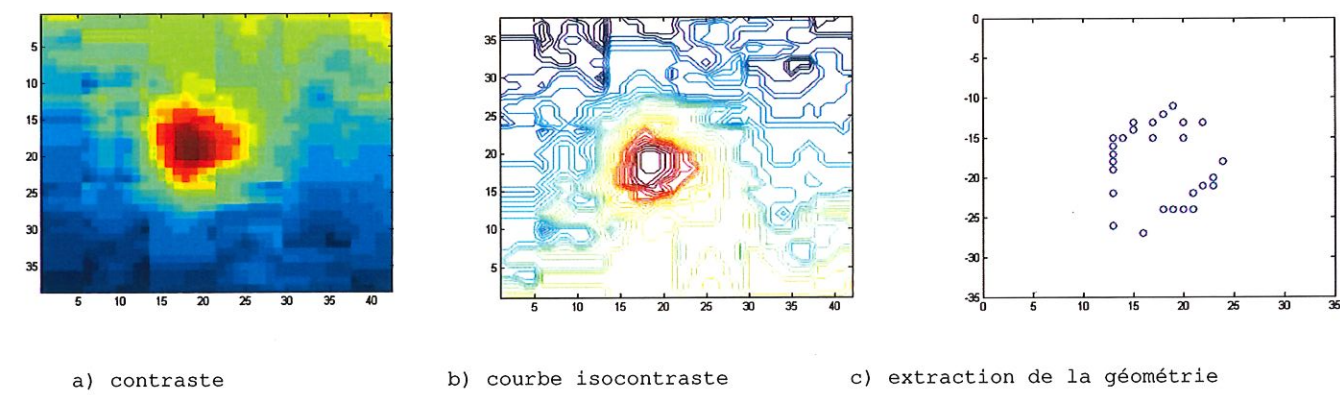


Figure 93: Estimation de la forme et de la taille d'un défaut

Défaut 1	75mm ²
Défaut 2	79 mm ²
Défaut 3	82mm ²

Tableau 16: Surface estimée des défauts

Limitations

Les défauts mesurés sont en réalité des défauts cylindriques de 10mm de diamètre. En analysant la figure 93, nous remarquons que la géométrie du défaut n'est qu'approximativement rendue par la méthode. Cependant, la différence géométrique observée est déjà présente dans l'image du contraste, du fait de sa méthode de calcul. Heureusement, la surface mesurée reste dans l'ordre de grandeur de l'aire réelle du défaut (78,5mm). Il faut également noter que l'extraction des défauts plus profonds s'est avérée peu concluante car le contraste existant est faible et les arrondis de calculs prennent une importance exagérée.

Remarque

Les manuels de maintenance des pièces aéronautiques indiquent souvent une limitation pour les délaminations acceptables basée sur la plus grande dimension du défaut et non sur sa surface réelle. Dans ce cas, il est possible pour l'opérateur d'appliquer des procédures de détection plus simples que celle du gradient en utilisant les fonctionnalités existantes de son logiciel de calcul. L'opérateur Canny permet, par exemple, d'obtenir des images indiquant les limites des défauts en se basant sur les discontinuités d'intensité dans l'image après traitement.

Il s'agit d'une procédure multi-étagée au cours de laquelle les images sont d'abord lissées grâce à une convolution gaussienne.

Une dérivée première 2D est ensuite appliquée aux images lissées afin de mettre en lumière les zones de l'image où la valeur de cette dérivée est la plus élevée.

L'opérateur Canny recherche la courbe de niveau maximum dans l'image d'amplitude du gradient. La valeur de tous les pixels de l'image ne se trouvant pas sur cette courbe de niveau maximal est remplacée par zéro. Le résultat est une image constituée de fines lignes représentant les limites du défaut.

Cette procédure dessine une courbe contrôlée par deux valeurs de seuil : T1 et T2 avec T1>T2.

Le pistage peut seulement commencer en un pixel de valeur supérieure à T1. La recherche continue dans toutes les directions issues de ce point afin de trouver le pixel adjacent de valeur maximale pour compléter la courbe de niveau. Cette procédure continue de proche en proche jusqu'au moment où aucun pixel voisin ne dépasse plus la valeur T2.

L'effet de l'opérateur Canny est donc déterminé par trois paramètres : la largeur de la gaussienne utilisée dans la phase de lissage et les valeurs de seuil supérieure et inférieure utilisées lors du pistage. L'augmentation de la largeur de la gaussienne réduit la sensibilité du détecteur au bruit, le prix à payer étant la perte de quelques fins détails de l'image. L'erreur de localisation de la limite augmente aussi légèrement quand la largeur de la gaussienne augmente.

Habituellement, le seuil supérieur doit être fixé relativement haut et le seuil inférieur relativement bas. En effet, régler le seuil inférieur trop haut provoque la rupture de la continuité des limites du défaut dans le cas d'images trop bruitées.

Le réglage du seuil supérieur trop bas augmente le nombre de fragments de limites parasites.

L'image obtenue après traitement indique les limites du défaut et peut être superposée à l'image originale pour une interprétation plus aisée du résultat par l'opérateur NDT.

Les figures suivantes montrent l'utilisation de cette procédure dans la recherche de défauts d'impact sur une plaque en composite FLAX. Il s'agit d'un composite à base de fibres de lin constituant de certains gilets pare balles. Ces résultats sont issus d'une étude menée par la Défense afin d'évaluer l'intégrité des gilets lorsqu'ils sont soumis à des déflagrations de mines interpersonnelles⁶².



Figure 94: Impact d'une mine anti-personnelle placée en position centrale.

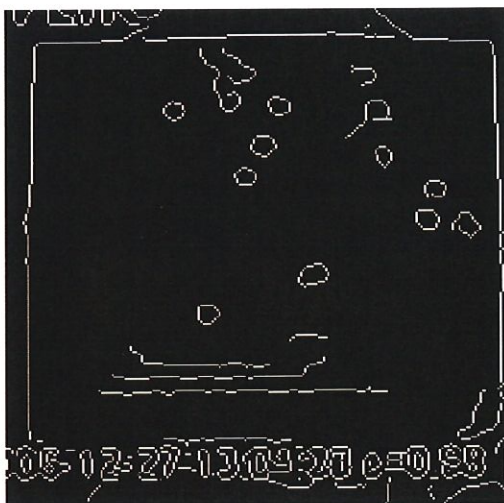


Figure 95: Détection de limites par l'opérateur Canny
Sigma = 1.1

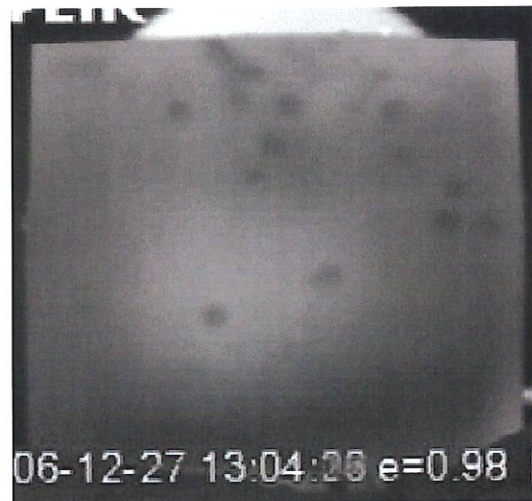


Figure 96: Moyenne séquence de 30s.
Chauffage rotatif de 2000W

IV. APPLICATIONS DE LA THERMOGRAPHIE : INCLUSIONS D'EAU

IV.1. Résultats expérimentaux

Afin de vérifier le comportement thermique d'une inclusion d'eau prédit par un modèle éléments finis dans la partie 3.II., des tests sont effectués sur la plaque calibre décrite figure 44.

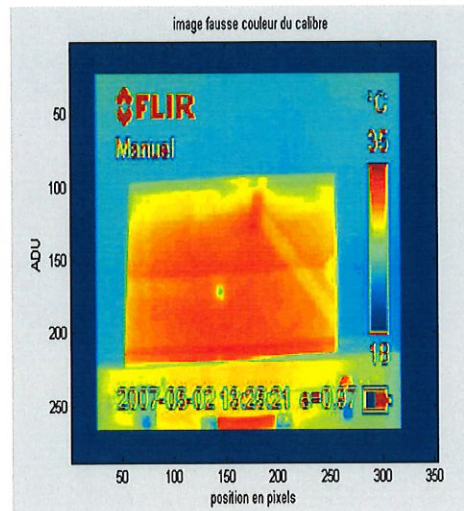


Figure 97: Thermogramme obtenu lors de l'introduction d'eau dans sept cellules remplissant la totalité du volume de la cellule, après une chauffe de 20 secondes par un set de 2 x 6 lampes halogènes placées à 50 cm de panneau.

Le test par thermographie pulsée permet de vérifier l'effet de la surface d'eau en contact avec la peau sur le contraste maximum observé et sur le moment de son apparition.

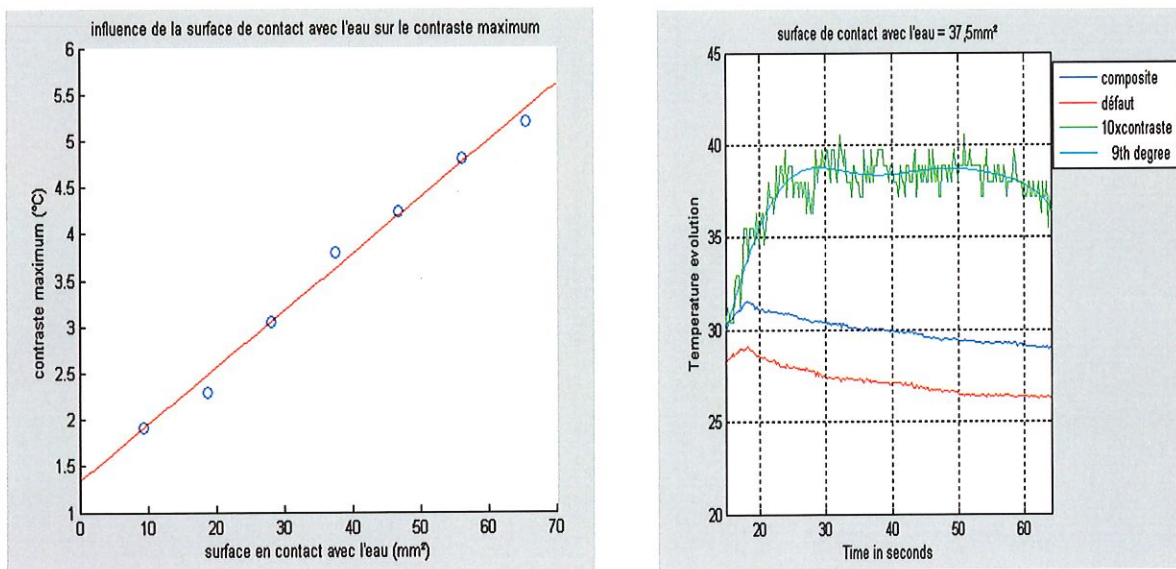


Figure 98 gauche: influence de la surface de contact sur le contraste maximum.

droite: influence de la surface de contact sur le temps d'apparition du contraste maximum.

IV.2. Comparaison avec les résultats du modèle éléments finis.

Conformément aux conclusions tirées dans l'analyse théorique du problème des inclusions d'eau, le test expérimental confirme que le contraste maximum augmente quasi linéairement avec la surface de la colonne d'eau en contact avec la paroi de la plaque en nid d'abeille. Cependant, il n'a pas été possible de conclure sur l'évolution du moment auquel ce moment maximum apparaît à cause de la forme ambiguë de la courbe du contraste en fonction du temps.

V. DETERMINATION DE LA DIFFUSIVITE THERMIQUE⁶³

V.1. Description du dispositif expérimental

Tous les équipements utilisés sont listés dans le tableau 17. Avant de commencer l'expérience, il est nécessaire d'effectuer une calibration d'alignement⁵⁶. Pour cette calibration, le laser et l'échantillon sont remplacés par une résistance avec une source électrique DC. Tous les autres composants restent les mêmes.

Tableau 17: liste des équipements utilisés dans la méthode flash

Type d'équipement	Fabricant	Modèle	Utilisation
Diode laser et unité de contrôle	Apollo Instruments, Inc.	S30-808-6	Excitation de l'échantillon
Photo-diode et amplificateur	Thorlabs	DET 110 PDA 200	Génération du signal trigger
Support d'échantillon et résistance avec source DC	Fait maison	PW10S 10W 25R	Source de chaleur
Lentilles infrarouge	Janos Technology	A1407-103	Focalisation de la radiation IR
Détecteur infrarouge avec preamplificateur et source de puissance	Judson	J10D-M204-RO1M-60 PA7-50	Conversion de la radiation IR en tension
Oscilloscope	Tektronix	TDS 3034B	Affichage des signaux

V.2. Alignement du dispositif expérimental

La figure 99 montre une photographie du set-up d'alignement.

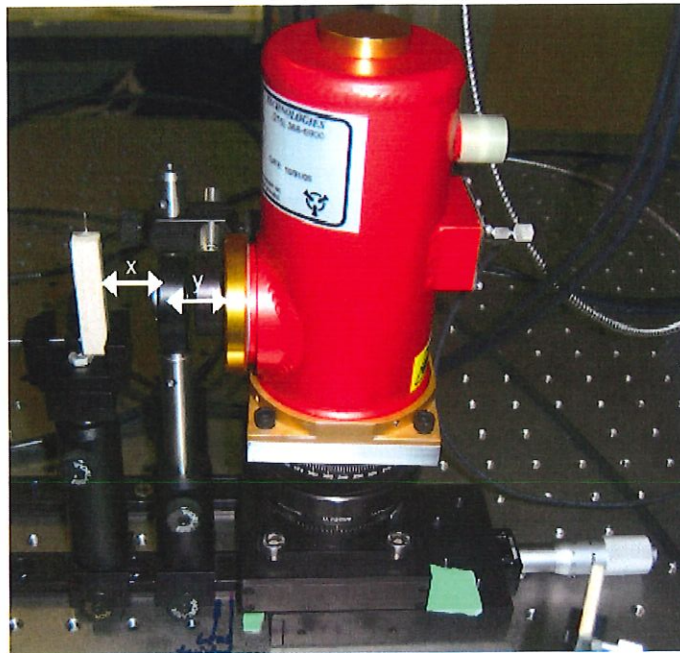


Figure 99: Set up d'alignement pour la méthode flash

Avant l'alignement, la lentille et la résistance sont montées sur une monture mobile placée sur une grille fabriquée par THORLABS; le détecteur est quant à lui déplaçable selon les directions x, y, z . Notez que la résistance est placée sur le support de l'échantillon et est située exactement à la même place et que la lentille doit être parallèle à la fenêtre d'entrée du détecteur.

La distance entre la résistance et le milieu de la lentille, notée x , est de 2,5cm; la distance entre la lentille et le bord du détecteur, notée y , est de 2cm.

D'abord, une tension continue de 6V est appliquée à la résistance pour obtenir une source constante de chaleur par effet Joule. Après avoir atteint une température constante, la distance focale entre la lentille et l'échantillon est ajustée. Le point focal pour cette lentille est fourni par le fabricant (25mm). Ensuite, l'ensemble lentille et échantillon sont déplacés en direction du détecteur pendant que l'amplitude du signal émis par le détecteur est affichée à l'écran de l'oscilloscope. Un maximum de l'amplitude indique la position optimale où les deux composants seront finalement fixés sur la grille. Un ajustement fin dans la direction x, y et z sera obtenu à l'aide des vis de réglage situés sur la plaque support du détecteur.

Un ajustement minutieux du système est nécessaire parce qu'il affecte directement la qualité de la mesure

V.3. Mesure de la diffusivité d'un morceau de pale.

L'échantillon de pale d'hélicoptère est montré à la figure 100. La diffusivité thermique a , a été mesurée à plusieurs endroits. On présente les résultats pour trois zones représentatives marquées comme "A", "D" et "E" dans la photo.

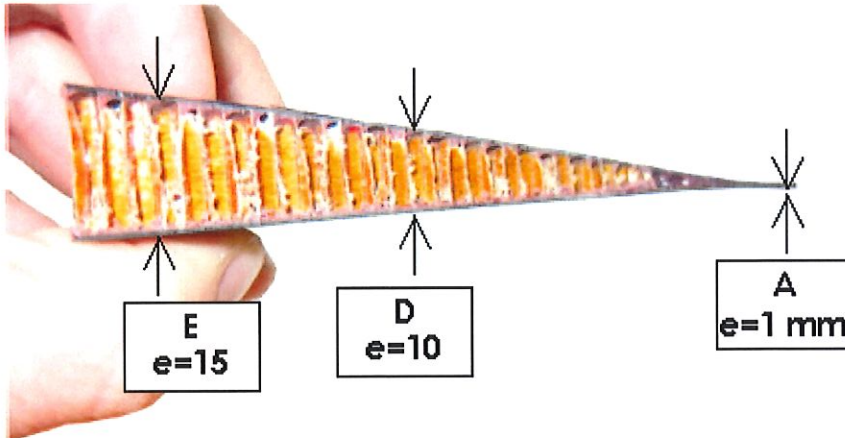


Figure 100: Morceau de pale testé montrant les régions où la diffusivité thermique a été estimée

Une vue d'ensemble du set up pour la méthode par lampe flash est montrée à la figure 101.

Au contraire du set up d'alignement, une diode laser haute puissance (1) est utilisée pour créer une onde thermique dans l'échantillon (2) monté sur un support. Une photo-diode (3) crée le signal trigger permettant d'estimer le début du pulse en détectant le pulse laser réfléchi par l'échantillon (3).

Cette technique est utilisée car le trigger interne proposé par le laser est trop bruité et donc inexploitable. La distance z mesurée de la sortie du collimateur à l'échantillon égale 17,5cm pour un échantillon de 2cm de côté.

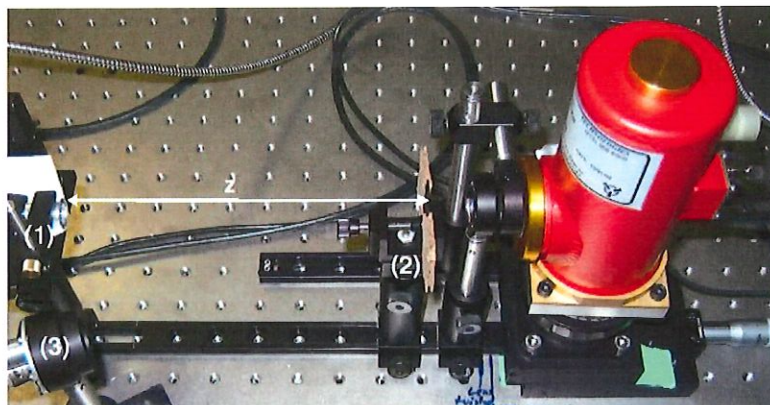


Figure 101: Set up expérimental pour la méthode flash

a) Conduite de l'expérience

L'échantillon est inséré dans la monture parallèlement à la lentille. Il faut faire très attention qu'aucune radiation laser n'atteigne directement le détecteur car cela l'endommagerait. Afin de s'en assurer, le laser est équipé d'un faisceau pilote du même diamètre que le faisceau laser normal mais beaucoup moins puissant que ce dernier.

La distance doit être ajustée quand un autre échantillon est utilisé pour s'assurer que l'ensemble de l'échantillon est uniformément irradié.

Après cela, la puissance et la largeur du pulse (t_w) sont ajustés au niveau du panneau de réglage du laser. Le pulse est ensuite appliqué, l'évolution de la température est mesurée avec le détecteur et le signal amplifié est affiché sur l'oscilloscope.

La calibration de l'amplificateur principal est dépendant de l'échantillon, de la puissance du laser et de la longueur du pulse. L'ajustement sur l'oscilloscope doit conduire à une courbe qui utilise le plus de place sur l'écran, mais qui reste entièrement visible pour déterminer le maximum. Le signal de la photo-diode est utilisé pour le trigger et, si nécessaire, un mode moyennage peut être choisi pour lisser la courbe dans le cas où celle-ci serait trop bruitée. Pour éviter les erreurs dans les calculs, la température doit avoir rejoint la température ambiante de la pièce (signal horizontal sur l'oscilloscope) avant d'envoyer le pulse suivant.

On mesure ensuite le maximum de température et le temps de son apparition. En accord avec ces valeurs, $t_{1/2}$, $t_{1/3}$, $t_{2/3}$, $t_{5/6}$ sont déterminés. Ils correspondent aux temps d'apparition de la 1/2, du 1/3, du 2/3 et du 5/6 de la température maximale.

b) Résultats

1) Nombre de Fourier minimum correspondant au barycentre du pulse.

Tableau des résultats

Pour s'assurer qu'une longueur de pulse correcte est utilisée pendant l'expérience, la table 18 indique la largeur maximum autorisée de ce pulse en accord avec l'équation 30. La table 18 indique également les paramètres utilisés pour calculer ce nombre, la diffusivité thermique utilisée dans ce calcul étant issue de la littérature⁵⁶.

Matériau	Epaisseur (m)	Diffusivité thermique a (m^2/s)	t_w maximum(s)
CFRP	1 E-3	4.00 E-07	2,5 E-03
CFRP	10 E-3	4.00 E-07	0.25
CFRP	15 E-3	4.00 E-07	0.5625

Tableau 18: Paramètres utilisés dans le calcul de la largeur maximale du pulse.

2) Diffusivité thermique

La figure 102 montre la procédure suivie pour effectuer les mesures de diffusivité thermique.

La relation utilisée pour le calcul de la diffusivité est celle des "partial times" décrites aux équations 28. Les valeurs de diffusivité reportées ici correspondent à la moyenne des trois résultats obtenus par ces équations.

Les graphiques présentés dans cette figure correspondent à l'endroit marqué comme "A" dans la figure 100.

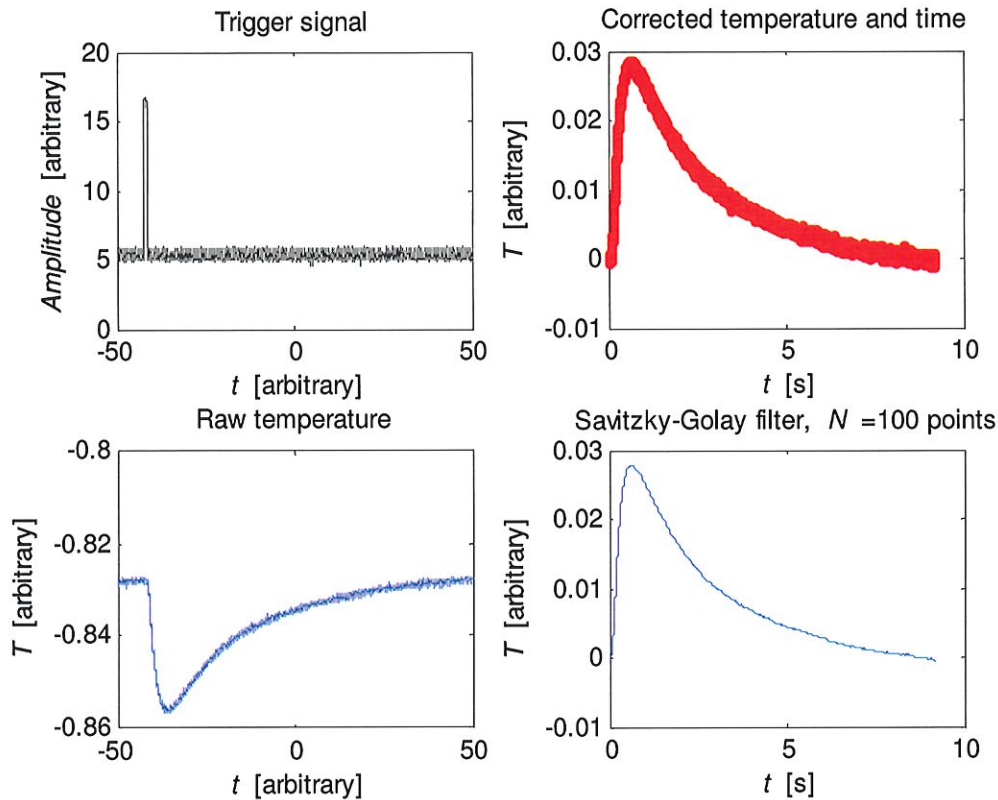


Figure 102: Procédure de mesure de diffusivité thermique pour la pale à l'endroit marquée comme "A" (faible épaisseur) : le signal et le trigger (à gauche) sont mesurés avec un oscilloscope. Ces deux graphiques sont utilisés pour corriger le signal (en haut à droite) puis le signal est filtré (en bas à droite) avec un filtre (Savitzky-Golay) permettant de récupérer les temps requis pour le calcul de la diffusivité.

La figure 103 présente les résultats pour la pale dans la partie la plus mince de l'échantillon ($e=1$ mm). La valeur de diffusivité calculée par la méthode partial times ($a=5.5$ m²/s) est proche des valeurs reportées dans la littérature pour les fibres de carbone ($a=4.2$ m²/s en moyenne). Ce résultat semble approprié étant donné qu'à cet endroit ("A"), il n'y a presque pas de Nomex entre les couches de carbone.

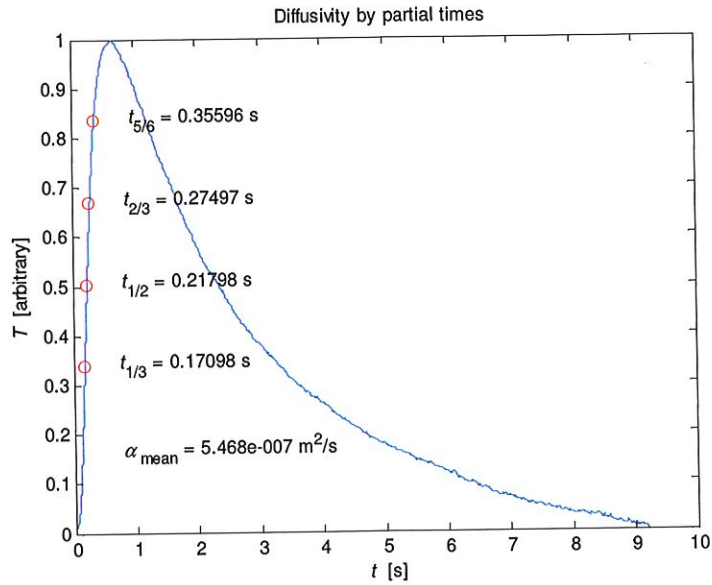


Figure 103. Mesure de diffusivité thermique pour la pale à l'endroit marquée comme "A" (faible épaisseur, 1 mm). Les différents temps utilisés pour calculer α avec les équations de partial times sont montrés dans le graphique.

Des procédures similaires ont été appliquées pour calculer la diffusivité à d'autres endroits de l'échantillon. La figure 104 montre les résultats pour une plus grande épaisseur de l'échantillon ($e=10$ mm), et la figure 105 pour la partie la plus épaisse (15 mm). La diffusivité augmente pour des plus grandes épaisseurs et le signal est de plus en plus bruité car il y a de plus en plus du Nomex et de l'air au fur et à mesure qu'on augmente l'épaisseur.

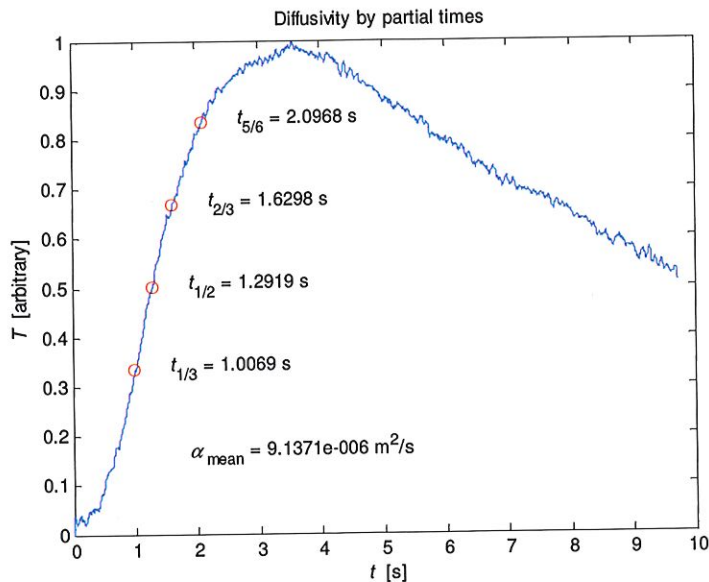


Figure 104: Mesure de diffusivité thermique pour la pale à l'endroit marqué comme "D" (épaisseur moyenne, 10 mm).

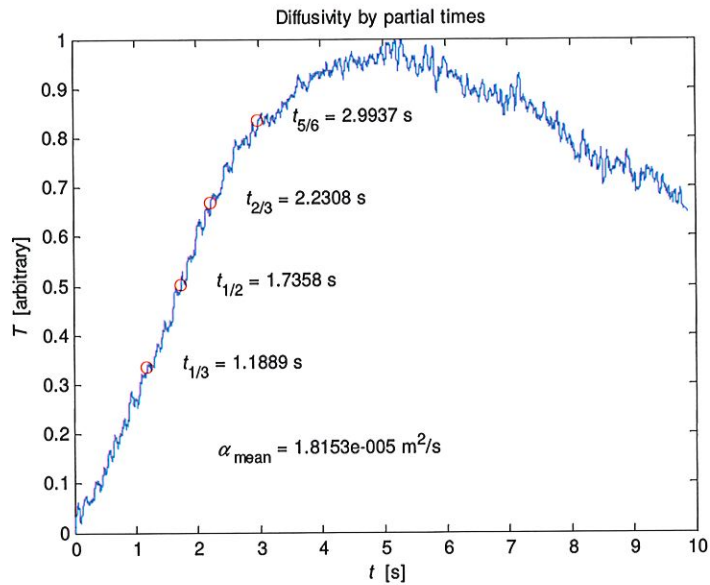


Figure 105: Mesure de diffusivité thermique pour la pale à l'endroit marqué comme "E" (épaisseur moyenne, 15 mm).

c) Discussion

L'applicabilité de la méthode est principalement limitée par les performances du laser qui n'est pas capable de fournir des pulses plus courts que 1ms avec une forme adéquate. Si le nombre de Fourier doit être plus petit que cela, l'expérience ne peut pas être menée de manière précise. Une limitation supplémentaire réside dans le fait que le délai entre deux pulses ne peut pas dépasser 5s. Pour certains échantillons, ce laps de temps n'est pas suffisant pour qu'ils retournent à la température ambiante. De plus, le signal affiché à l'oscilloscope a tendance à être très bruité.

Cela rend difficile l'obtention de valeurs exactes pour $t_{1/2}$.

Plusieurs possibilités existent pour diminuer partiellement le bruit. L'une est d'acquérir plus de pulses dans le mode moyennage de l'oscilloscope et de stopper l'enregistrement pour lire les valeurs.

Une autre façon est d'obtenir la meilleure combinaison entre l'amplification de l'amplificateur principal et la sensibilité de l'oscilloscope.

Un désavantage du réglage de l'oscilloscope est la limitation de l'offset qui peut être ajouté ou retiré du signal pour l'adapter à l'écran. Cette limitation est plus stricte quand la sensibilité augmente, donc un compromis doit être trouvé.

De plus, la détectabilité maximum du détecteur et la maximum de radiation de l'échantillon en accord avec les lois de Planck ne coïncident pas. Cela provoque la diminution du signal et demande une amplification plus importante.

Pire encore, le détecteur peut introduire du bruit supplémentaire dans le système.

5^{ème} partie : VALIDATION DE LA THERMOGRAPHIE PAR UN MODELE THEORIQUE FEM

Le but ultime du développement d'une technique d'essais non destructifs par thermographie est de pouvoir non seulement détecter des défauts dans une structure mais également de prédire leur taille et leur profondeur dans le matériau.

La profondeur du défaut observé expérimentalement n'est pas une grandeur directement mesurable sur le thermogramme. Cependant différents paramètres relevés sur le thermogramme permettent de calculer cette profondeur. En thermographie pulsée, il s'agit du contraste maximum observé et du moment où ce contraste maximum apparaît, en thermographie pulsée de phase, de la fréquence aveugle.

Afin de garantir une précision acceptable lors de ce calcul, il est essentiel de disposer de données fiables.

La validité des données obtenues par thermographie peut être estimée en les comparant avec l'évolution de température théorique du matériau calculée par des modèles éléments finis prenant en compte les conditions de l'expérience, la géométrie de la pièce et les propriétés thermiques du matériau.

La modélisation éléments finis du comportement thermique de défauts axisymétriques est relativement aisée. Un algorithme simple permet de prendre en compte la conduction et la radiation au sein du matériau²⁸.

Pour des géométries de défauts plus complexes, il existe sur le marché nombre de logiciels de simulation thermique dont le logiciel éléments finis FEMLAB que nous avons utilisé afin de comparer ses résultats à ceux du modèle simplifié.

I. MODELE SIMPLIFIE²⁸

En thermographie active, afin d'établir un lien entre les isothermes anormales enregistrées sur la pièce inspectée suite à l'application d'une stimulation thermique externe et la présence de défauts sous la surface, il est nécessaire d'étudier la propagation du front thermique dans le matériau.

Dans le cas complexe d'une pièce en composite, par nature anisotropique, il est nécessaire d'utiliser une méthode multidimensionnelle comme les éléments finis afin de calculer l'évolution temporelle de la température suite à un chauffage soudain de la surface du spécimen.

Cette méthode éléments finis est basée sur l'équation de Fourier généralisée :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad [\text{Équation 34}]$$

où k est la conductivité thermique, ρ la densité (kg/m^3) et c la chaleur spécifique ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$).

Dans un premier temps, la pièce est représentée par un maillage de volumes élémentaires. Un nœud est associé à chacun de ces volumes et est représentatif du comportement thermique du volume auquel il y est associé. La température d'un nœud est la moyenne de la température du matériau constituant le volume élémentaire correspondant.

Afin de créer ce maillage, il est pratique d'utiliser un système de coordonnées cylindriques. En effet, le temps de calcul est fortement réduit en comparaison du temps nécessaire en coordonnées cartésiennes. Il suffit de calculer les résultats pour une tranche et de profiter de la symétrie cylindrique de la configuration.

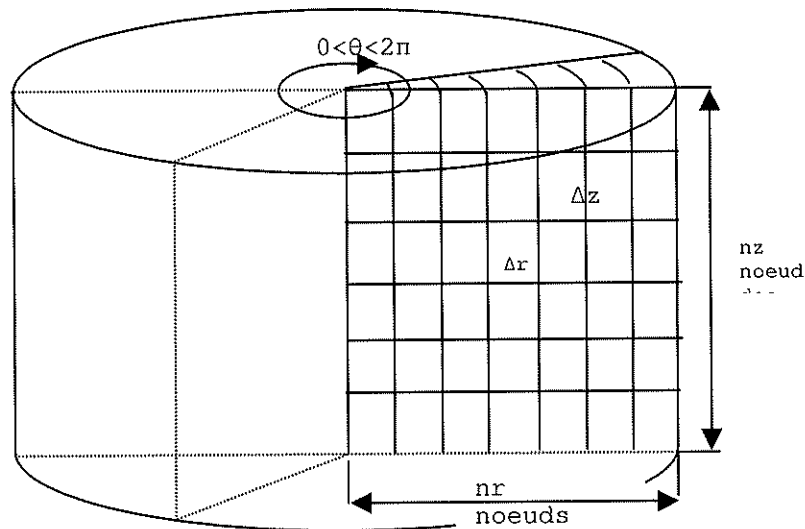
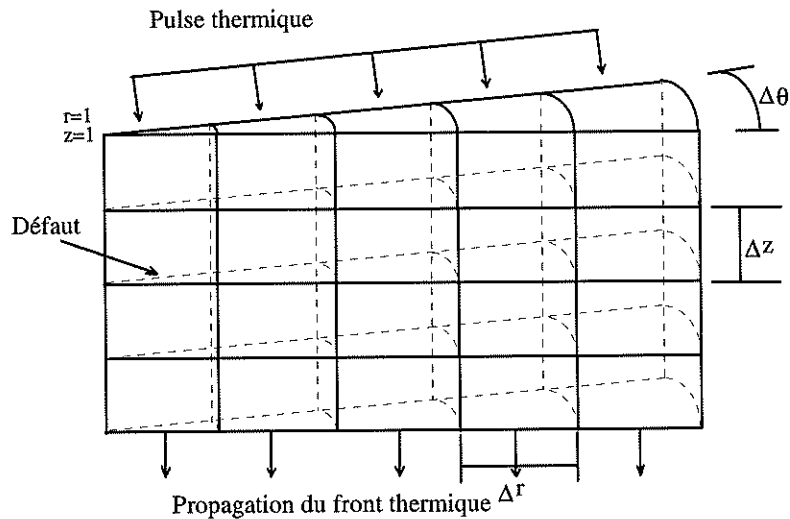


Figure 106: Coordonnées cylindriques

Chaque volume élémentaire est une boîte de dimension radiale Δr et d'épaisseur axiale Δz . Il y a donc nz nœuds en profondeur et nr nœuds radialement.

Le principe du modèle est de calculer la température pour chaque nœud en prenant en compte les propriétés thermiques du matériau et les échanges thermiques entre les nœuds et le monde extérieur.

Comme nous voulons modéliser le comportement transitoire du matériau après l'application d'une perturbation thermique, le temps est une variable importante.

L'échelle de temps est aussi divisée en petits incréments Δt et à chaque itération du programme, la température de tous les nœuds est recalculée.

Afin de simplifier le modèle, la capacité thermique entre les nœuds est ignorée face à la résistance, celle-ci étant prépondérante.

Le modèle prend en compte la conservation de l'énergie, la loi de Fourier en conduction et les échanges thermiques externes.

A un instant t :

Taux de création d'énergie=0

$$-\left(\sum \frac{\Delta E_{OUT}}{\Delta t} - \sum \frac{\Delta E_{IN}}{\Delta t}\right) = \frac{\Delta E_s}{\Delta t} \quad [\text{Équation 35}]$$

où E_{OUT} et E_{IN} représentent l'énergie transférée vers et hors d'un nœud particulier et ΔE_s correspond à l'énergie stockée dans le volume élémentaire entourant le nœud.

Le signe - signifie que le flux échangé est positif pour un gradient de température négatif.

Nous devons tenir compte des transferts axiaux et radiaux.

Pour un nœud (r, z) :

$$-(\Delta q_r + \Delta q_z) = \frac{\Delta E_s}{\Delta t} = \frac{\rho \Delta V c \Delta T}{\Delta t} \quad [\text{Équation 36}]$$

et donc

$$T_{\text{après}} = T_{\text{actuel}} - \frac{(\Delta q_r + \Delta q_z) \Delta t}{\rho \Delta V c} \quad [\text{Équation 37}]$$

où ρ est la densité, c la chaleur spécifique à un nœud (r, z) et ΔV correspond au volume élémentaire à travers lequel l'échange thermique a lieu :

$$\Delta V = \Delta z (S_{\text{traversé}, z}) \quad [\text{Équation 38}]$$

où $S_{\text{traversé}, z}$ est la surface traversée par le flux thermique de z à (z+Δz)

$$S_{\text{traversé}, z} = \pi [r^2 - (r - \Delta r)^2] \quad [\text{Équation 39}]$$

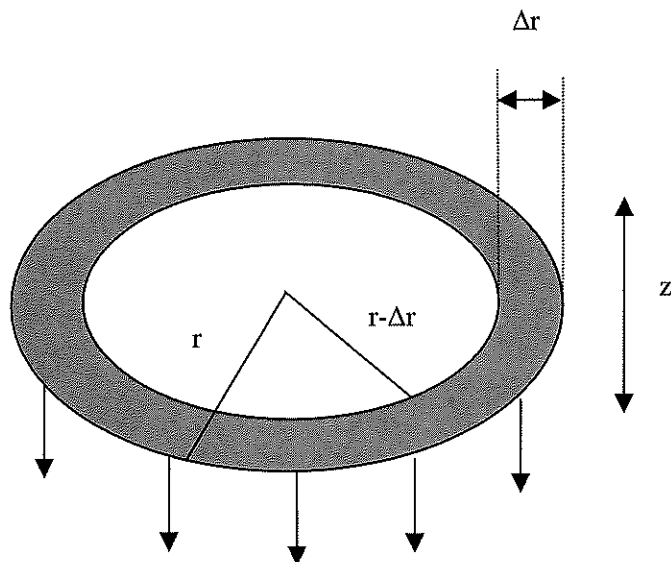


Figure 107: Surface traversée par le flux axial

Les valeurs des flux Δq_r et Δq_z sont obtenues par la loi de Fourier :

$$\Delta q_r = q_{r,out} - q_{r,in} \quad [\text{Équation 40}]$$

$$\Delta q_r = \frac{k_r S_{traversé,r}}{\Delta r} (T_{actuel\ en\ r} - T_{actuel\ en\ r+\Delta r}) \quad [\text{Équation 41}]$$

où T_{actuel} en r et T_{actuel} en $r+\Delta r$ sont les températures au temps présent aux nœuds adjacents r et $r+\Delta r$, k_r est la conductivité thermique radiale, $S_{traversé,r}$ est la surface traversée par le front thermique de r à $r+\Delta r$:

$$S_{traversé,r} = 2\pi r \Delta z \quad [\text{Équation 42}]$$

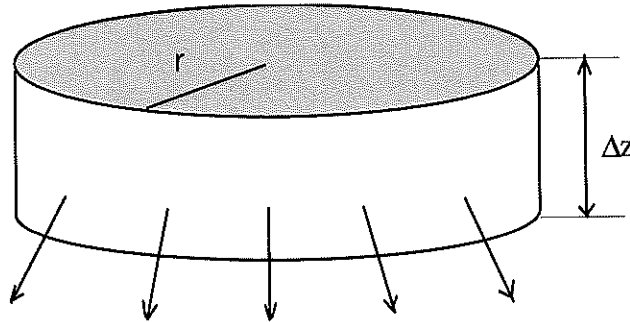


Figure 108: Surface traversée par le flux radial

De même :

$$\Delta q_z = \frac{k_z S_{traversé,z}}{\Delta z} (T_{actuel\ en\ z} - T_{actuel\ en\ z+\Delta z}) \quad [\text{Équation 43}]$$

où T_{actuel} en z et T_{actuel} en $z+\Delta z$ sont les températures actuelles pour deux nœuds adjacents z et $z+\Delta z$ (direction axiale), k_z est la conductivité thermique axiale, $S_{traversé,z}$ est la surface traversée par le front thermique de z à $z+\Delta z$.

Toutes ces équations doivent être résolues pour chaque nœud dans toutes les directions d'échange thermique.

Pour une portion de solide, dans le système de coordonnées cylindriques, il existe quatre directions pour un nœud situé en (r, z) : $(r-\Delta r, z)$, $(r, z-\Delta z)$, $(r+\Delta r, z)$ et $(r, z+\Delta z)$. Les deux autres directions sont prises en compte par la géométrie cylindrique : la distribution de température est la même pour toutes les portions.

Lors de la stimulation thermique initiale, une quantité d'énergie P (en Watts/cm²) est déposée sur la surface ($z=0$) pendant un certain nombre d'intervalles de temps ($0 < t < \text{durée de la stimulation thermique initiale}$). Le front thermique se propage alors par diffusion dans l'ensemble du maillage.

L'augmentation de température sur la surface ($z=0$) correspondant à cette stimulation est donnée par :

$$\Delta T_p = \frac{P \Delta t}{\rho c S_{\text{traversée},z} \Delta z} \quad [\text{Équation 44}]$$

Les pertes par radiation et convection sont prises en compte uniquement sur la face externe de l'échantillon ($z=0$). La face opposée ($z=nz$) est supposée parfaitement isolée thermiquement (soit la pièce est infiniment épaisse, soit la durée d'observation est courte).

Les pertes radiatives sont données par la loi de Stefan-Boltzmann pour un nœud situé en $z=0$:

$$\Delta q_{\text{rad}} = F_{\text{rad}} (T_s^4 - T_a^4) \quad [\text{Équation 45}]$$

où T_s est la température (en K) d'un nœud situé à la surface ($z=0$), T_a la température ambiante et F_{rad} un facteur empirique qui dépend de la géométrie.

Les pertes convectives sont données par la loi de refroidissement de Newton :

$$\Delta q_{\text{con}} = F_{\text{con}} (T_s - T_a) \quad [\text{Équation 46}]$$

F_{con} est un facteur empirique qui dépend de la géométrie.

Ces pertes contribuent à réduire la température de surface pour un nœud en ($r, z=0$).

$$T_{\text{actuel avec pertes}} = T_{\text{actuel sans perte}} - \frac{(\Delta q_{\text{rad}} + \Delta q_{\text{con}}) \Delta t}{\rho c \Delta V} \quad [\text{Équation 47}]$$

Afin d'estimer la capacité de ce modèle simplifié à représenter la réalité, il est appliqué au calibre CFRP dont les caractéristiques géométriques sont exposées figure 27.

Ce calibre est testé expérimentalement et est soumis pendant 2 secondes à un flux de chaleur incident de $0,35 \text{ W/cm}^2$ sur sa surface supérieure. Les deux paramètres habituels sont mesurés: le contraste maximum et le temps où ce contraste maximum apparaît.

Le comportement du calibre est ensuite simulé par le modèle théorique afin de vérifier la bonne concordance entre les valeurs mesurées expérimentalement et les prédictions théoriques. Cependant, puisque le flux de chaleur effectivement appliqué expérimentalement sur la pièce n'est pas directement mesurable, le flux de chaleur incident utilisé dans le modèle théorique est choisi afin d'induire dans le calibre une augmentation de température égale à celle observée expérimentalement ($\Delta T = \text{flux de chaleur incident} \cdot dt / \rho c dz$).

Le maillage réalisé comporte 40 nœuds dans la direction radiale et 56 nœuds dans la direction axiale, le pas radial étant de $0,1 \text{ cm}$ et le pas axial de $0,02 \text{ cm}$.

Le nombre d'itérations choisi est de 400, ce qui représente une durée de 30s (computing time).

Les facteurs empiriques sont conformes à la théorie de Cielo⁵² :

$$f_{\text{rad}} = 5.67e^{-12};$$

$$f_{\text{con}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W cm}^{-2}$$

Les paramètres thermiques du CFRP utilisés dans le modèle sont issus de la littérature scientifique:

Densité : 2000 kg/m^3 , chaleur spécifique : 1000 J/kgC , conductivité radiale : $0,05 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, conductivité axiale : $0,01 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$.

Il faut noter que, selon les sources utilisées, les conductivités peuvent varier légèrement.

Le résultat chiffré de ces calculs se trouve en annexe 5 pour l'ensemble des défauts présents sur le calibre et est résumé par les graphiques suivants, chaque graphique représentant un défaut de profondeur donnée.

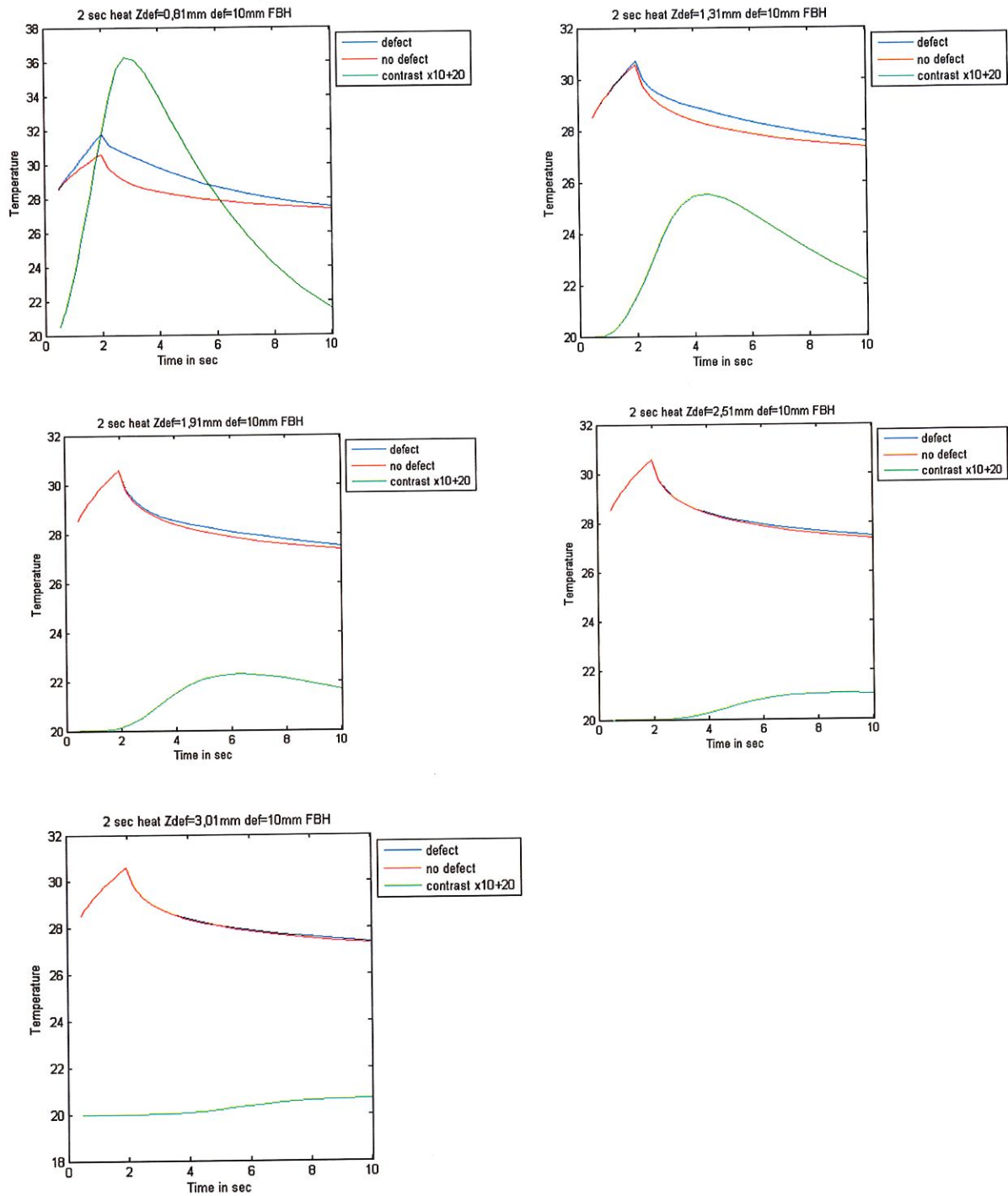


Figure 109: Résultats du modèle théorique

Ces résultats mettent en évidence quelques faits importants :

- La diffusion latérale du front thermique autour du défaut est importante (spécialement au temps correspondant au contraste maximum). Cet effet réduit la visibilité du défaut. C'est pourquoi les dimensions du défaut doivent être relevées dès son apparition;
- Les contrastes de température sont plus faibles à la surface qu'à l'interface avec le défaut lui-même; Ceci réduit également la visibilité du défaut.
- La température à la surface au dessus du défaut n'est pas constante et atteint un maximum à un temps spécifique qui dépend de la profondeur du défaut. Cela signifie qu'il existe un temps optimum d'observation.

Il est utile de déduire la relation existant entre la valeur de la profondeur du défaut et le contraste maximum calculé. De même le temps auquel apparaît ce contraste maximum en fonction de la profondeur du défaut est important. En effet, si nous pouvons démontrer la bonne adéquation entre les résultats du modèle théorique et la réalité, nous pourrons lors de l'observation d'un contraste maximum et du temps de son occurrence, par référence aux résultats théoriques, en déduire la profondeur du défaut.

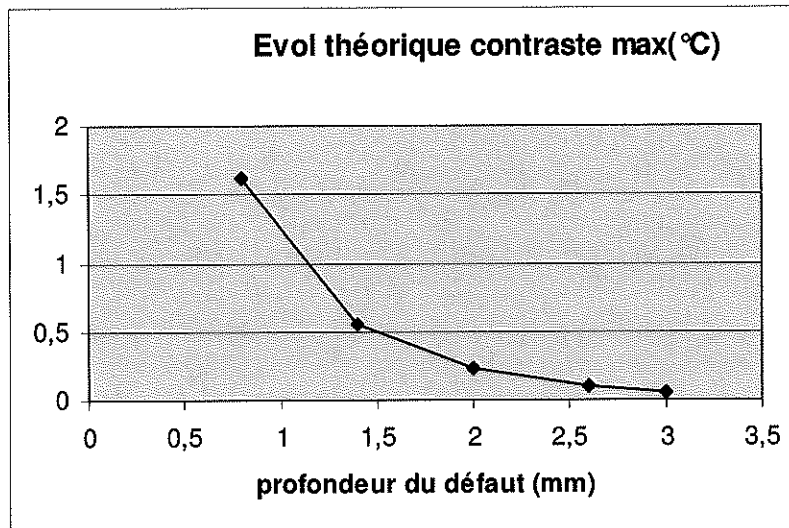


Figure 110: Contraste maximum en fonction de la profondeur du défaut

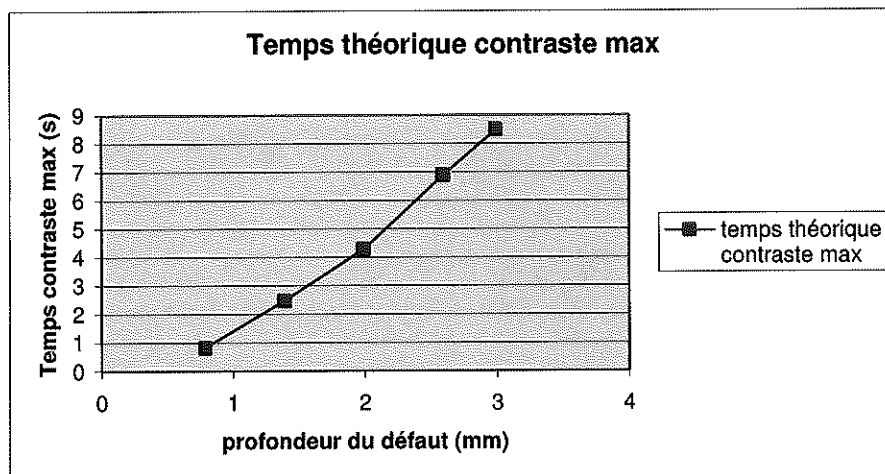


Figure 111: Temps d'apparition du contraste maximum en fonction de la profondeur du défaut

II. MODELE ELEMENTS FINIS COMMERCIAL

Un modèle éléments finis commercial est appliqué au même calibre FBH afin de comparer ses résultats avec ceux du modèle simplifié. Ce modèle de simulation commercial utilise un nombre de degrés de liberté plus important (19232 ici, pour un temps de calcul de 164 secondes).

Le maillage utilisé dans le modèle FEMLAB est représenté sur la figure suivante :

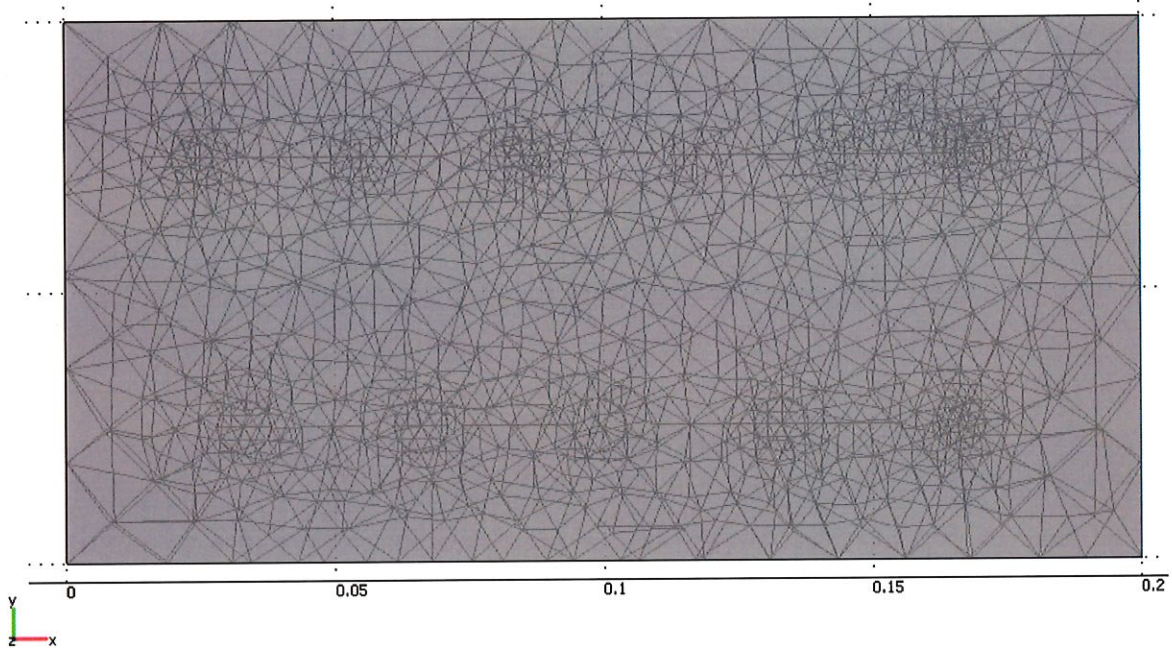


Figure 112: Maillage utilisé dans le modèle FEMLAB

Les conditions aux limites expriment que la pièce est parfaitement isolée thermiquement sur les faces autres que la face supérieure, ce qui implique dans la réalité que les dimensions de la plaque sont grandes par rapport au temps d'observation. La face supérieure reçoit un flux de chaleur engendrant, d'après le modèle, une augmentation de température égale à celle observée expérimentalement.

Le modèle prend uniquement en considération les pertes par convection et néglige les pertes radiatives. Ceci n'influence pas de manière significative les résultats car le modèle théorique simplifié nous apprend que les pertes radiatives sont dix fois inférieures aux pertes par convection.

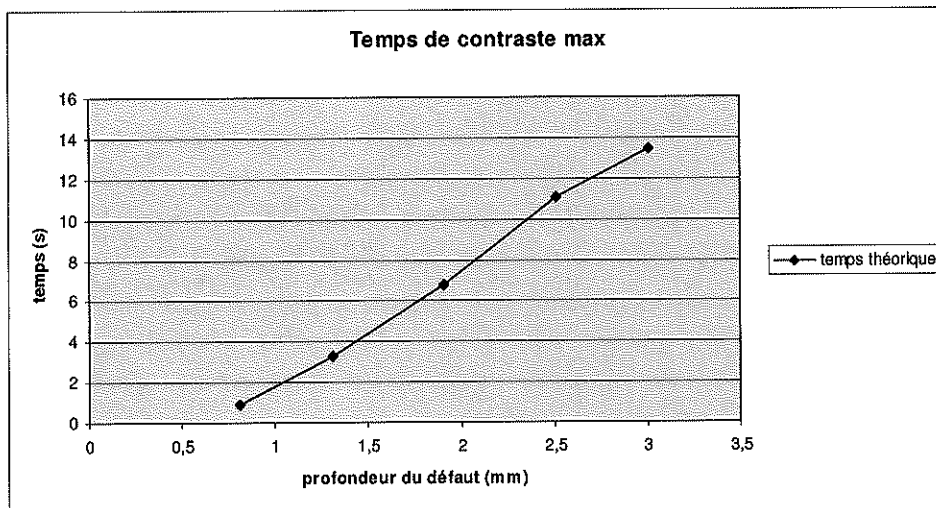
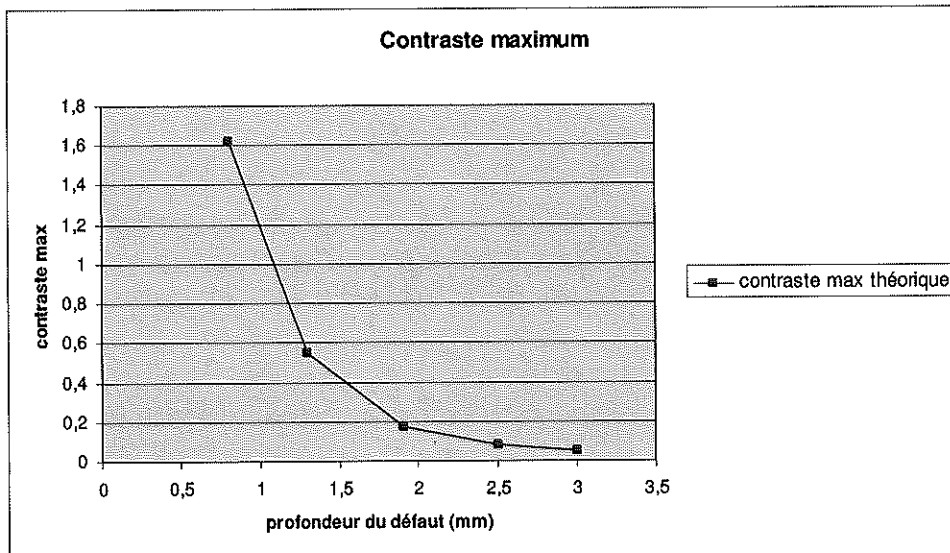


Figure 113: Contraste maximum et temps d'occurrence théorique

On remarque immédiatement que le modèle théorique éléments finis prédit le contraste maximum pour des temps significativement supérieurs à ceux calculés par le modèle théorique simplifié. Par contre, le contraste maximum prédit par les deux modèles correspond presque parfaitement.

III. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET THEORIQUES

Les résultats théoriques obtenus avec le modèle simplifié doivent être maintenant comparés avec l'évolution de température observée durant le test par thermographie pulsée sur le calibre CFRP.

La pièce est chauffée de la même façon que celle prise en compte dans le modèle théorique (quelques degrés au-dessus de la température ambiante).

En fait, il est plus facile de contrôler l'augmentation de la température de surface que de déterminer la puissance (en Watts) absorbée par la surface chauffée.

Différents paramètres sont comparés entre le modèle théorique et la réalité :

- la valeur du Cmax en fonction de la profondeur du défaut
- le temps où ce contraste atteint sa valeur maximum en fonction de la profondeur du défaut.

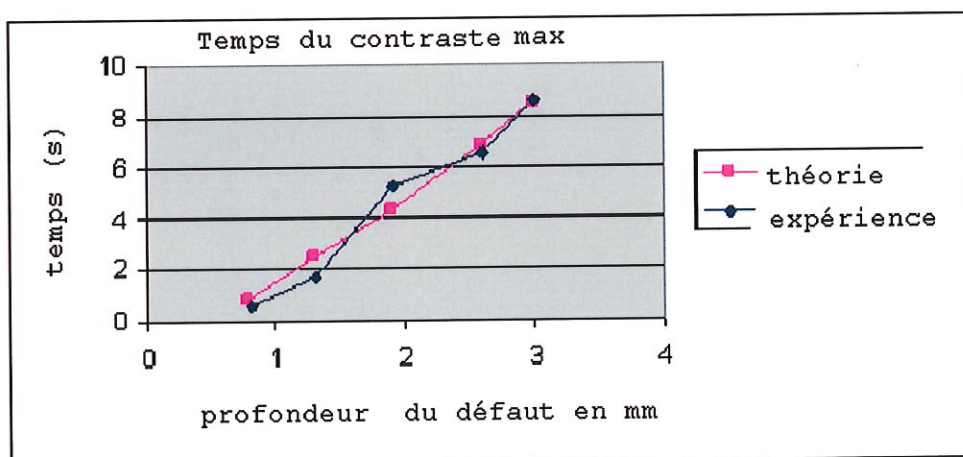
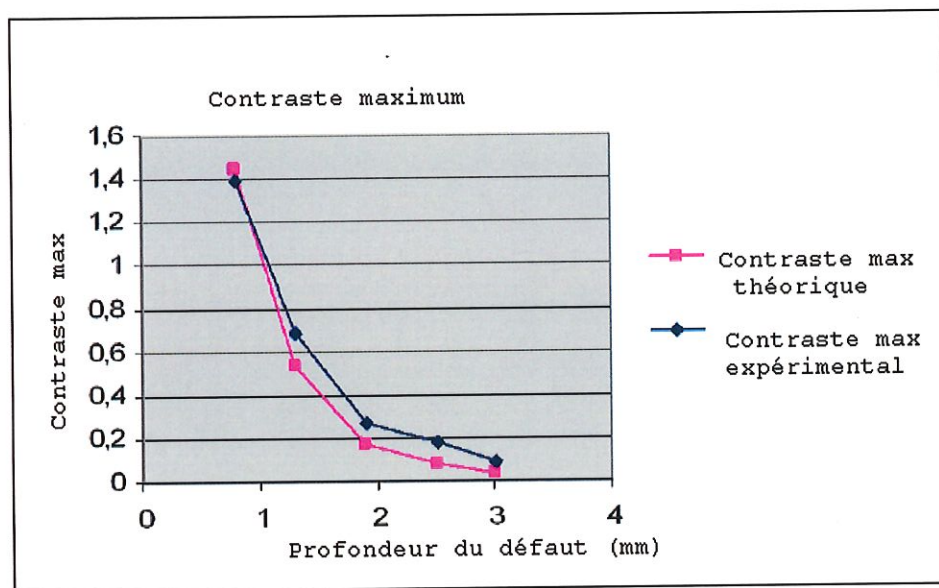


Figure 114: Comparaison entre les résultats théoriques par modèle simplifié et les résultats expérimentaux

On remarque une bonne correspondance entre les résultats théoriques du modèle simplifié et les valeurs expérimentales. Il y a cependant une légère

différence entre le modèle et l'expérience, il est donc intéressant d'utiliser le modèle 3D FEMLAB.

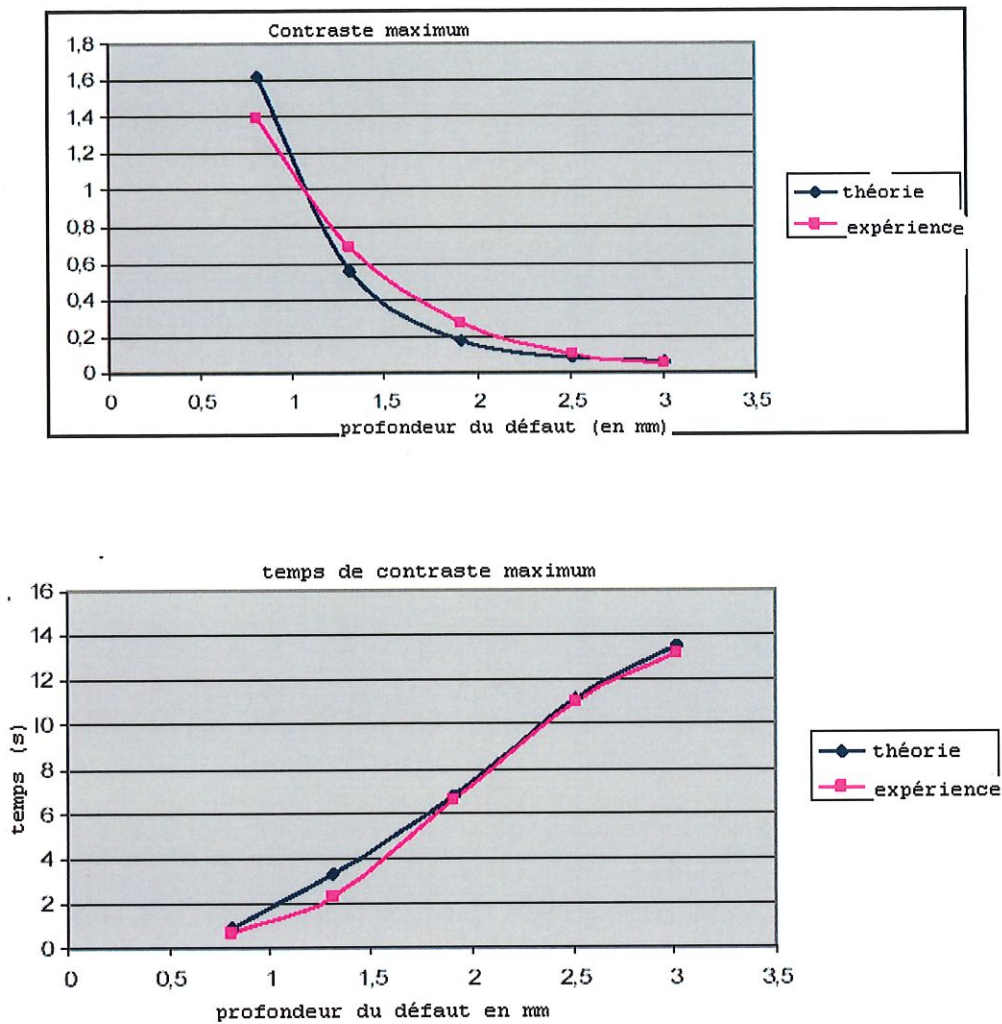


Figure 115: Comparaison entre les résultats théoriques par FEMLAB et les résultats expérimentaux

Nous voyons aisément qu'il existe une bonne correspondance entre le modèle FEMLAB et les valeurs expérimentales. Nous pouvons conclure que les deux modèles (cylindrique ou 3D) sont bons pour une géométrie simple comme notre plaque homogène CFRP.

En regardant les deux paramètres (Cmax et Tmax), nous avons une bonne information relevante pour déterminer la profondeur du défaut.

La réalité est néanmoins plus complexe (surface courbe, chauffe non homogène, défauts non axisymétrique), et dans ce cas, il vaut probablement mieux utiliser le modèle 3D.

6^{ème} partie : COMPARAISON AVEC D'AUTRES METHODES NDT VALIDES SUR COMPOSITE.

I. COMPARAISON THERMOGRAPHIE ET PHASED ARRAY ULTRASONIC TESTING.

Le contrôle par ultrasons est une méthode couramment utilisée pour vérifier l'intégrité d'une pièce sans la dégrader. Elle présente néanmoins des inconvénients majeurs par rapport à la thermographie. En effet, il s'agit d'une méthode dite au contact puisque le transducteur doit être placé directement au contact de la pièce. Il s'agit d'une méthode non globale, c'est-à-dire demandant une analyse point à point donc longue de la pièce. De plus, l'analyse des pièces en composite peut s'avérer problématique si elles sont composées de nid d'abeille.

Malgré ces désagréments, le test par ultrasons est un des tests les plus populaires dans l'industrie et il est utile de jauger la thermographie à l'aune de cette technologie.

Deux calibres de natures différentes (FBH et défauts d'impact) ont été testés par thermographie et par ultrasons grâce à appareil portable Phased Array Omniscan MX utilisant un transducteur à 5MHz.

La technologie Phased Array est une évolution récente dans les tests par ultrasons en NDT mais elle est déjà largement utilisée dans le milieu médical. Il s'agit d'une technologie multi-éléments (figure 116), ceux-ci étant disposés soit linéairement, soit dans une matrice 2D ou encore annulairement^{73, 74, 75}.

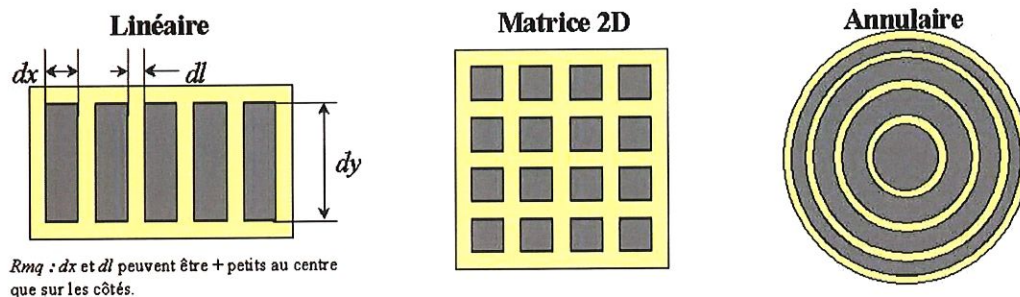


Figure 116: Disposition des éléments dans un capteur Phased Array

Cet arrangement permet la modification électronique des caractéristiques du faisceau ultrasonore afin de réaliser par exemple sa focalisation électronique, sa déflexion ou un balayage électronique.

Balayage électronique :

Les éléments de la barrette sont activés par sous-ensembles (ouvertures de 16 éléments par exemple). Lors d'un balayage électronique du faisceau, le sous-ensemble actif est décalé après chaque émission-réception (figure 117).

Ce balayage permet l'obtention d'images B-scan sans déplacer le transducteur avec une résolution latérale plus fine et mieux contrôlée qu'avec le balayage mécanique.

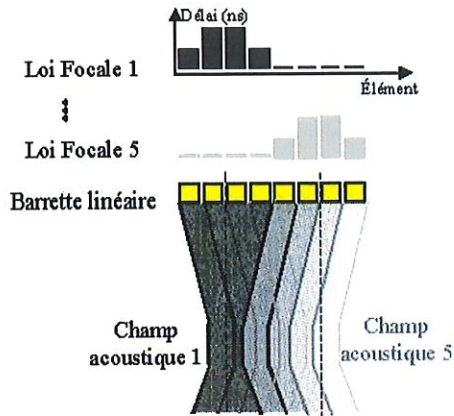


Figure 117: Balayage linéaire⁷⁵

Focalisation électronique :

Afin de réaliser une focalisation électronique du faisceau, on retarde l'émission des signaux du centre par rapport à ceux des bords provoquant la courbure du front d'onde.

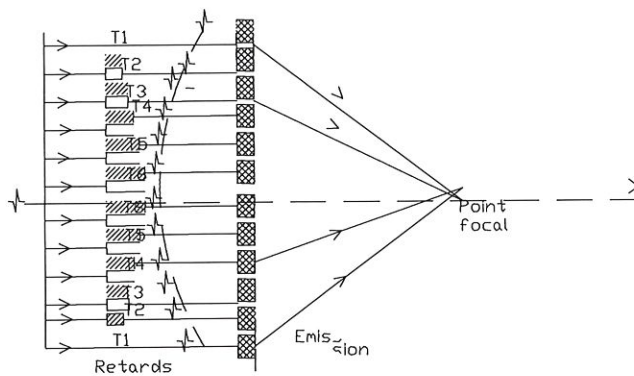


Figure 118: Focalisation électronique⁷⁵

Déflexion électronique :

La déflexion électronique du faisceau est basée sur le retard d'émission des signaux d'une extrémité par rapport à ceux de l'autre extrémité, ce qui engendre le changement d'orientation du front d'onde.

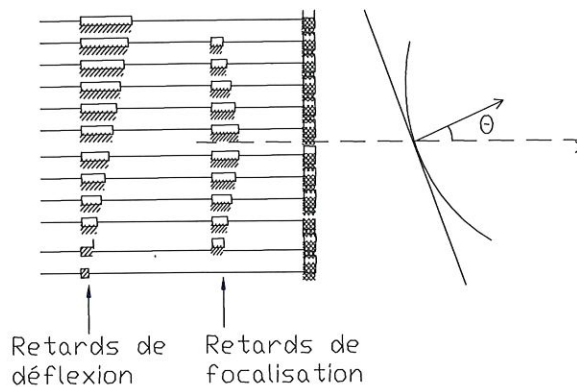


Figure 119: Balayage sectoriel⁷⁵

Les retards sont calculés par le système en fonction de la distance de focalisation ou de l'angle de déflexion souhaité.

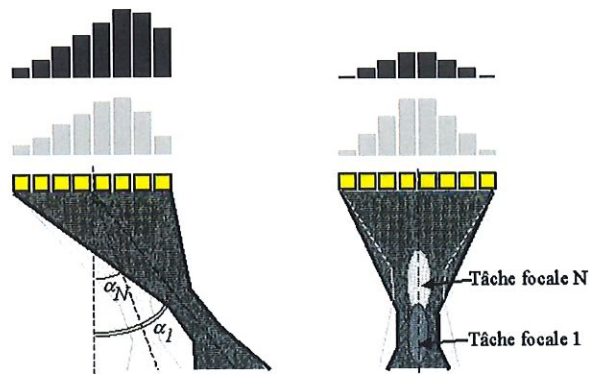


Figure 120: Balayage sectoriel (gauche) focalisation électronique (droite)⁷⁵

Grâce à la focalisation électronique et au balayage sectoriel, l'inspection des pièces de forme complexe est facilitée.

Cet appareil permet une représentation efficace des mesures notamment sous la forme d'une échographie de type C-SCAN.

Le C-SCAN représente selon les deux axes d'inspection, l'amplitude maximale du signal reçu, selon une échelle de niveaux de gris ou de couleurs. Le balayage est codé en abscisse, l'incrément en ordonnée. Cette vue est assimilable à une vue aérienne en transparence de la pièce dans la mesure où l'information temporelle, donc la profondeur n'apparaît plus. Cependant, l'information temporelle se retrouve facilement dans les représentations plus classiques de type A-SCAN.

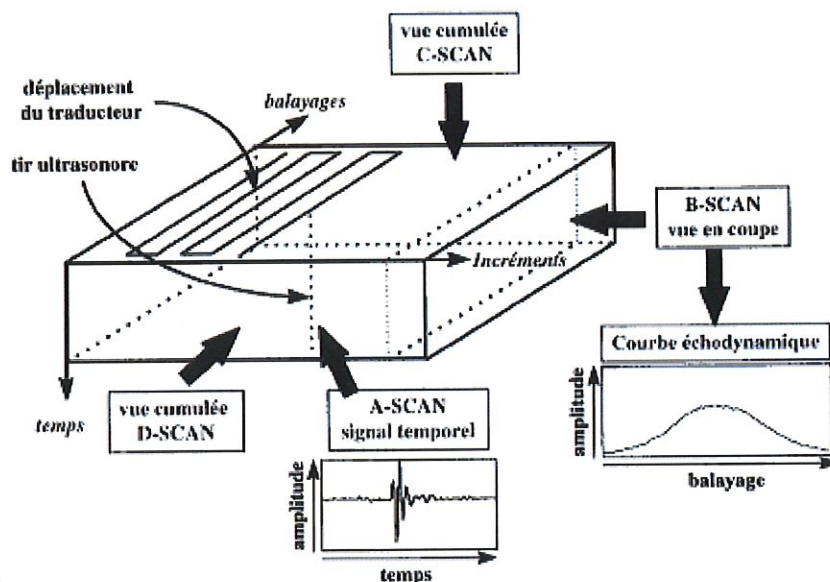


Figure 121: Description des différents types de représentations des données ultrasonores⁷⁵

I.1. Test sur calibre FBH

Le calibre testé pour représenter des défauts de délamination est le calibre FBH décrit figure 27.

Le test par ultrasons fournit les données représentées figure 122.

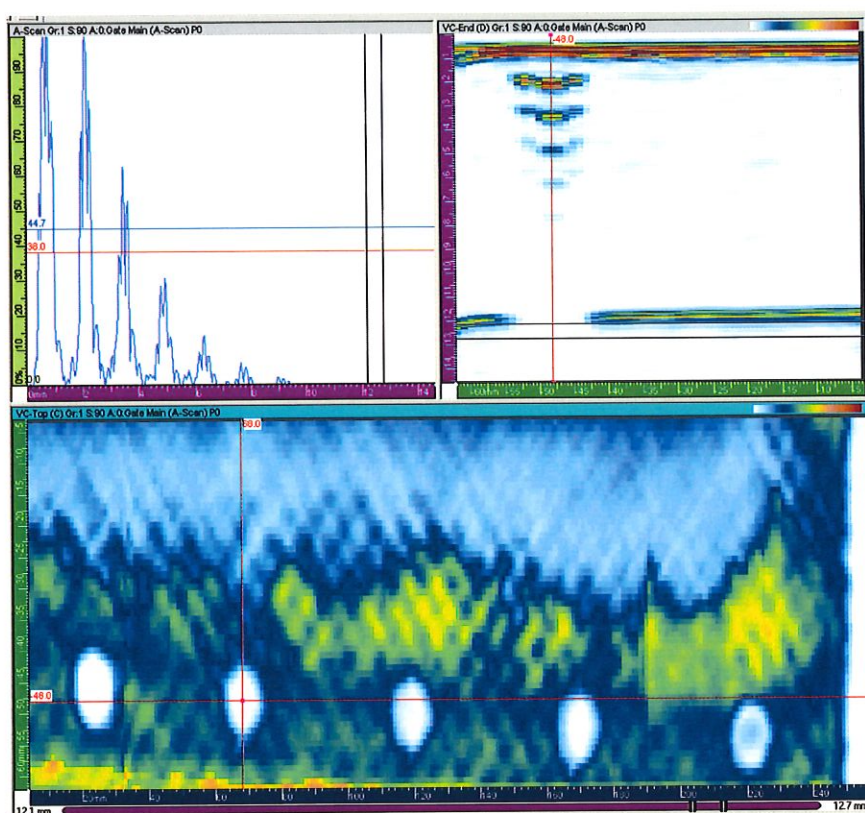


Figure 122: Supérieur gauche: A-SCAN pour le défaut 2, supérieur droit B-SCAN, en bas C-SCAN pour 5 défauts de 10mm de diamètre.

Comme le montre l'image C-SCAN de la figure 122, tous les défauts sont facilement détectables et la précision de leur dimensionnement dépend du déplacement de transducteur multi-éléments 5 MHz.

La profondeur peut être déterminée en utilisant la position horizontale sur le A-SCAN du pic représentatif du défaut. La précision sur la profondeur est de l'ordre de 1mm, ce qui est classique pour les UT.

La force du test par ultrasons sur cet échantillon plan et non poreux par rapport aux tests par thermographie est sa capacité de détection de l'ensemble des défauts quelque soit la profondeur de ces derniers dans l'échantillon. Cependant, la précision de mesure sur la profondeur est inférieure à celle que l'on a obtenue par thermographie. En effet, la thermographie pulsée présente une erreur maximale de 42 microns, tandis que la thermographie pulsée de phase permet une mesure avec une erreur maximale de 83 microns.

I.2. Test sur défauts d'impacts

Le calibre d'impact est celui décrit figure 74.

Ce long défaut est facilement détectable par C-SCAN (voir figure 123 droite).

La profondeur des différentes zones du défaut est facilement estimée par comparaison avec deux trous borgnes réalisés à 3mm de profondeur (bas de l'image) et 1 mm de profondeur (haut de l'image).

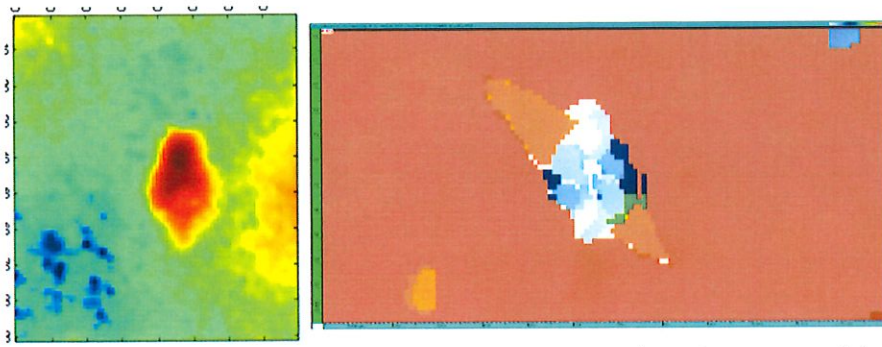


Figure 123. gauche : image de phase obtenue après thermographie pulsée.
droite: C-SCAN.

En comparant l'image obtenue par thermographie pulsée et par C-SCAN, nous remarquons que seules les délaminations situées à une profondeur inférieure à 2,5mm sont détectables par thermographie et que les défauts dans les fibres inclinées à 45° dans la zone arrière sont uniquement détectés par le test par ultrasons.

Ces deux expériences mettent en lumière la supériorité du test par ultrasons sur la thermographie quant à sa capacité de détection des défauts en profondeur.

Cela ne doit cependant pas faire oublier les limitations inhérentes à ce type de test et qui n'affectent pas les tests par thermographies : lenteur, nécessité de contact et restriction sur la forme ou la texture de la pièce.

II. COMPARAISON ENTRE LA THERMOGRAPHIE ET LA SHEAROGRAPHIE

Tout comme la thermographie, la shearographie est une technique d'essais non destructifs émergente qui présente des caractéristiques similaires. En effet, elle fournit une image globale de la pièce à tester et ne nécessite aucun contact physique avec celle-ci.

Cette méthode NDT prometteuse fait d'ailleurs l'objet de recherche de la part de plusieurs laboratoires dont celui de l'école militaire formant les officiers allemands.

Une collaboration étroite entre l>Wehrwissenschaftliches Institut für Werk-, Explosiv- und Betriebsstoffe et la défense belge a permis de mener une étude comparative entre la thermographie et la shearographie⁶⁴.

Afin de tester les potentialités et les limitations de chaque méthode dans le domaine des essais non destructifs de panneaux en composite, un calibre en nid d'abeille présentant divers types de défauts a été soumis à une inspection par thermographie pulsée en Belgique et à une inspection shearographique en Allemagne.

II.1. Description du calibre

Le calibre est un panneau en nid d'abeille de 50x50 cm dont les peaux en CFRP ont 1mm d'épaisseur et l'âme en Nomex une épaisseur de 16mm.

Des implants circulaires ont été placés lors de la conception du panneau tant dans le nid d'abeille que dans l'adhésif pour simuler des défauts par délamination.

Ces défauts sont de diamètre variable (5,10,20,30,40 et 50mm de diamètre) et sont dans certains cas remplis de mousse en polyamide ou de téflon.

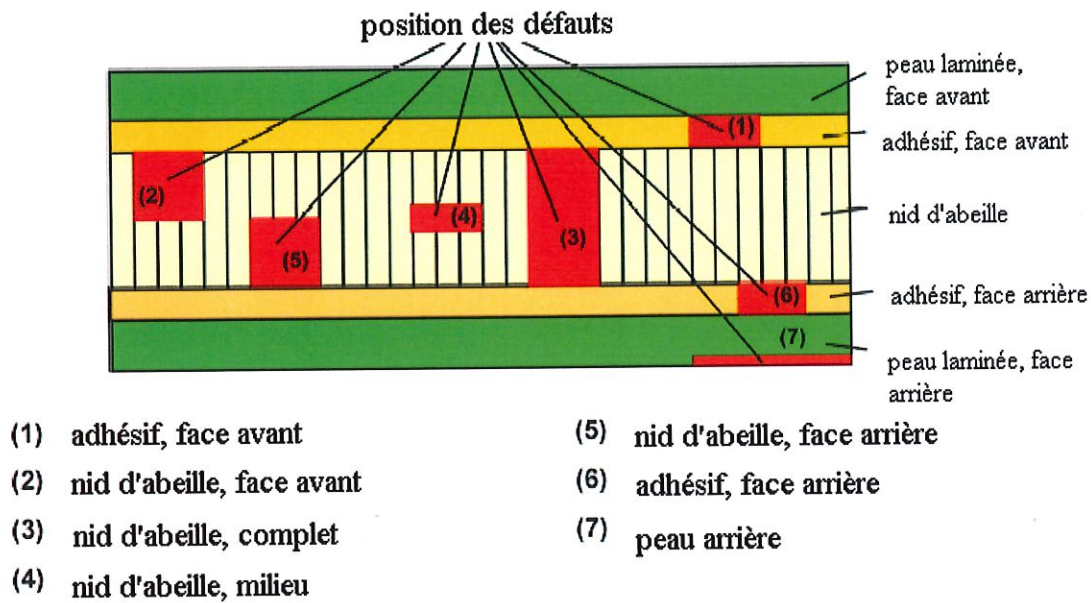


Figure 124: Défauts artificiels dans un panneau sandwich

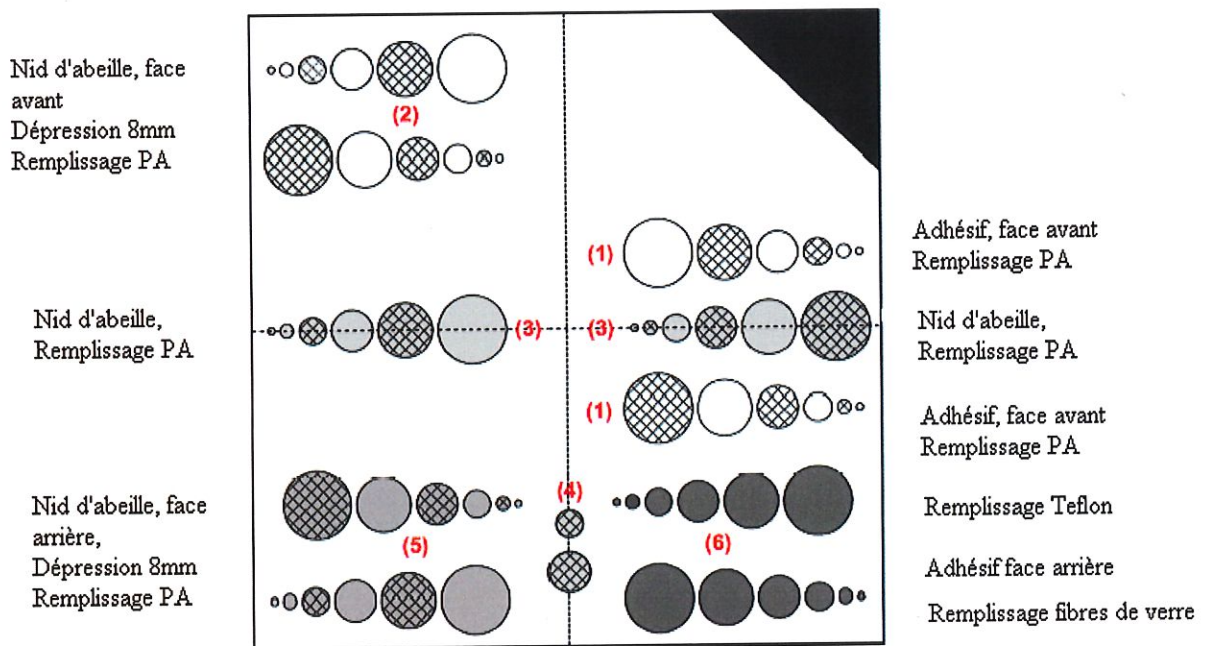


Figure 125: Cartographie des défauts dans le composite en nid d'abeille

II.2. Comparaison entre résultats obtenus par thermographie et shearographie.

a) Essai par thermographie

Le test par thermographie pulsée a été réalisé dans la configuration expérimentale suivante :

Caméra FLIR SC3000 équipée d'un détecteur QWIP 320x240 pixels

Fréquence d'acquisition : 25 Hz

Excitation : 2 lampes flash de 1,5 KJ chacune.

Les résultats obtenus sont présentés figure 126.

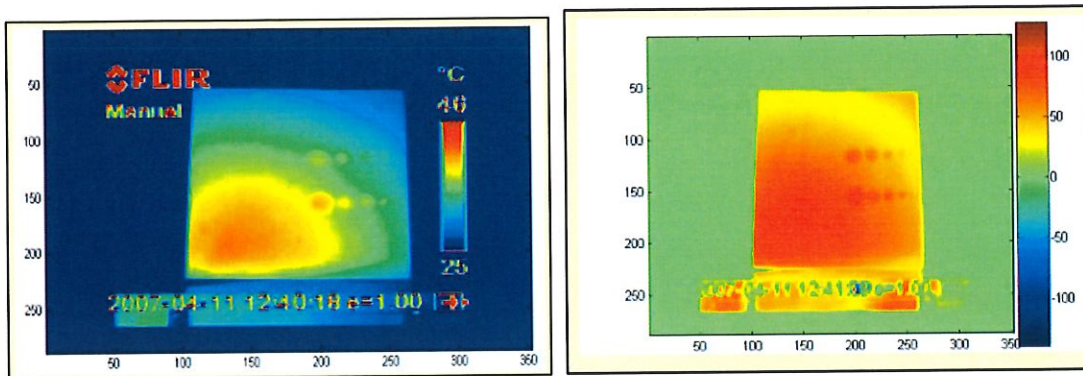


Figure 126: Image brute au meilleur contraste (à gauche), dérivée première (à droite)

Les différents traitements d'image appliqués n'ont pas permis d'améliorer la visibilité des défauts. Il s'en suit que pratiquement seuls les défauts situés dans l'adhésif face avant sont facilement détectables.

b) Essai par shearographie

Le test par shearographie a été réalisé dans les laboratoires de l'armée de l'air allemande dans la configuration expérimentale suivante :

Système Q800 de Dantec Dynamics
Caméra CCD, résolution de 1392x1040 pixels
Software d'acquisition et d'analyse Istra
Laser 769 nm (2 x 50mW)
Excitation : 2 lampes halogène de 0,5 kW

Les résultats obtenus sont présentés figure 127.

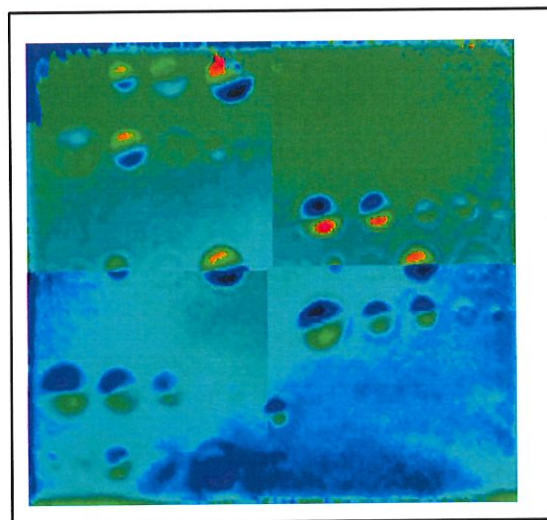


Figure 127: Résultat du test par shearographie sur le panneau en nid d'abeille⁵⁷

Les défauts de diamètre important (30, 40, 50 mm) situés près de la face avant apparaissent de manière évidente. Par contre, la détection de défauts d'inserts dans le nid d'abeille est plus problématique. Seules de faibles

indications trahissent les défauts dans la partie arrière du nid d'abeille et les défauts dans l'adhésif arrière ne sont pas détectables.

c) Comparaison entre la thermographie et la shearographie

La figure 128 compare les résultats obtenus par les deux méthodes, les indications rouges indiquant les défauts détectés :

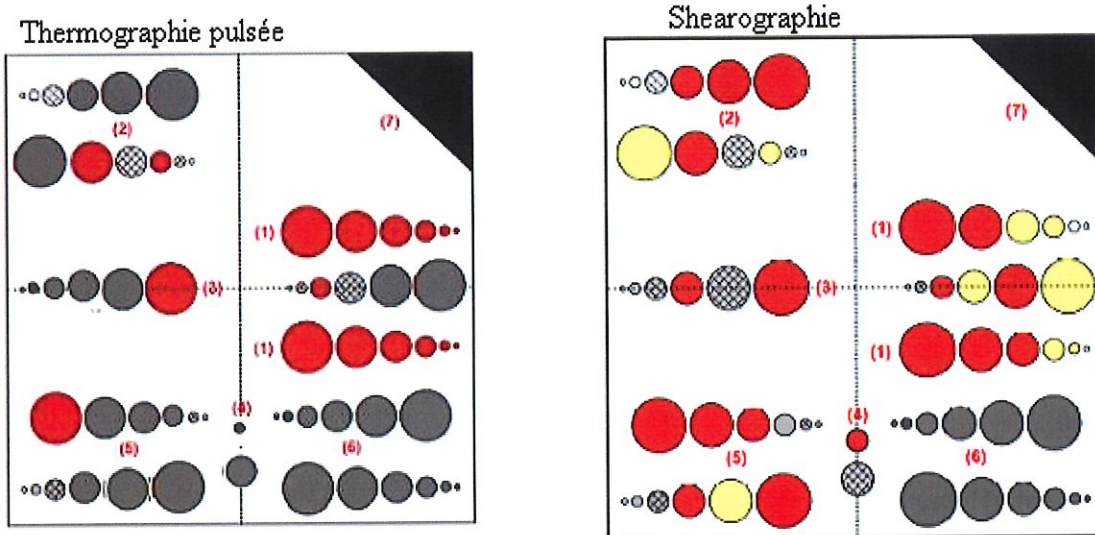


Figure 128: Résultats comparés de la thermographie pulsée et de la shearographie

La figure 128 montre que les deux méthodes NDT présentent des résultats fort similaires. Les deux techniques sont toutes deux peu adaptées pour détecter des défauts situés à l'intérieur même du nid d'abeille.

Elles sont par contre performantes pour la détection de défauts situés près de la face avant du spécimen.

Cependant, la thermographie pulsée montre de meilleurs résultats lorsque le défaut, situé dans l'adhésif face avant, est de faible diamètre tandis que la shearographie est à privilégier pour tenter de détecter des défauts dans l'adhésif de la face arrière.

7^{ème} partie : UTILISATION DE LA THERMOGRAPHIE SUR SITE

L'armée belge possède une flotte de 72 F16 dont la surveillance par essais non destructifs est effectuée par des techniciens en accord avec les technical orders écrits par l'USAF/Lockheed Martin.



Figure 129: F16 de l'armée belge

La plupart du temps, les pièces métalliques de l'avion sont inspectées par des méthodes classiques : eddy current, ultrasons ou magnétoscopie, mais pour les pièces en composite, seuls les ultrasons, la radiographie ou le tap test sont mis en œuvre.

De plus, pour les pièces en nid d'abeille, les tests par ultrasons ne sont pas réalisables à cause de la présence d'air. Le tap test, quant à lui, reste une méthode très subjective et peu précise.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les principes exposés dans les chapitres précédents et montrer comment la thermographie peut être utilisée pour détecter et quantifier des défauts sur des pièces réelles. Les tests sont effectués dans le hangar avion de l'armée de l'air sur la base de Kleine-Brogel dans des conditions environnantes identiques à celles existant lors des tests NDT classiques.

I. ENTREE D'AIR F16

I.1. Introduction



Figure 130: Inspection de l'entrée d'air d'un F16

Un des problèmes les plus complexes est l'inspection NDT de l'entrée d'air: un revêtement caoutchouteux est collé à l'intérieur de l'entrée d'air, la courbure et l'accès difficile rendent presque impossible le recours aux méthodes classiques d'essais non destructifs. Un test complet par ultrasons est effectué pendant les inspections D-level, celui-ci dure 2 jours complets avec un opérateur NDT couché dans l'entrée d'air! La courbure latérale génère également beaucoup de bruit parce que la méthode nécessite un contact mécanique (utilisant un couplant) entre le capteur et le caoutchouc.

Le défaut supposé est un décollement entre le caoutchouc et l'alliage d'aluminium qui se trouve derrière celui-ci. Le critère de rejet est basé sur un défaut d'un quart de pouce (6,25mm). Le constructeur Lockheed fournit un calibre (appelé aussi standard de référence) avec deux défauts connus qui sont des trous borgnes (Flat Bottom Holes) réalisés dans la plaque d'AL 2024-T81 collée derrière le caoutchouc. Ces défauts ont respectivement un diamètre d'un demi pouce et d'un quart de pouce (voir figure 131).

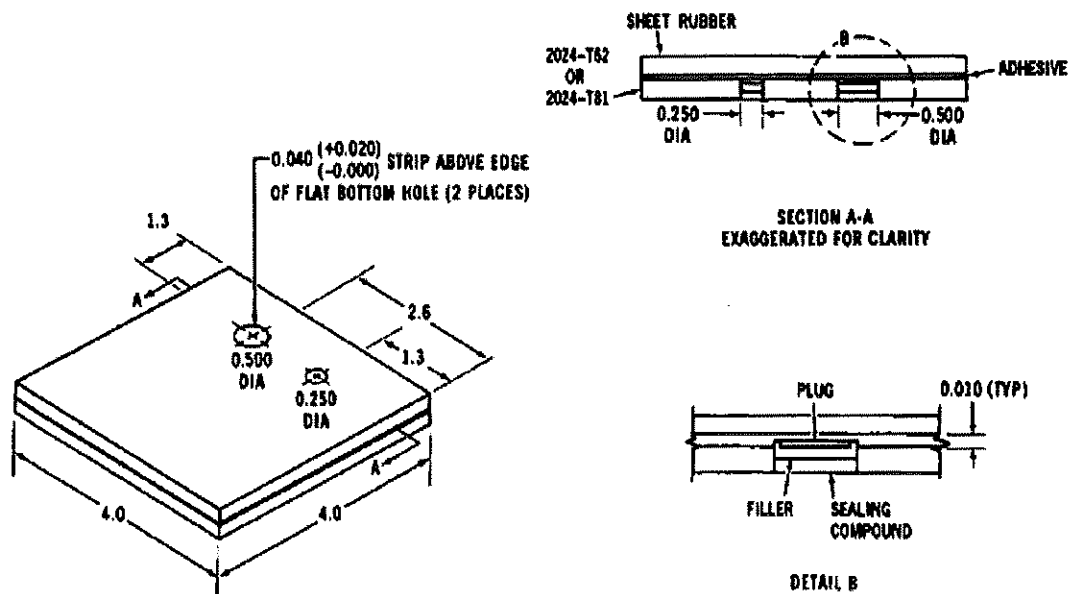


Figure 131: Standard de référence officiel de Lockheed avec deux FBH de 6,25mm et 12,5mm de diamètre.

Comme d'habitude, la technique IR (distance du chauffage, durée, position de la caméra IR pour une résolution spatiale suffisante) doit d'abord être vérifiée sur la référence officielle avant d'effectuer des mesures sur avion.

I.2. Utilisation de la thermographie sur le calibre officiel Lockheed

Comme spécifié dans les chapitres précédents, une inspection thermographique comprend trois étapes principales, il faut d'abord effectuer la mesure proprement dite tout en choisissant les conditions de chauffe et les paramètres d'acquisition adéquats, ensuite les images doivent être traitées en accord avec la méthode thermographique retenue (pulsée, pulsée de phase ou éventuellement lock-in) et finalement les images obtenues doivent être analysées pour détecter les défauts éventuels, estimer leur profondeur et leur dimension.

a) Conditions expérimentales

Les paramètres suivants ont été utilisés:

Chauffage pulsé	Lampe halogène portable	IR camera	Flir B4 Indigo
Distance de la pièce	10 cm en face du caoutchouc	Images par seconde	25 Hz video signal
Durée de la chauffe	Au moins 10 secondes	Augmentation de température	6°C pour le calibre

Tableau 19: Paramètres du test par thermographie

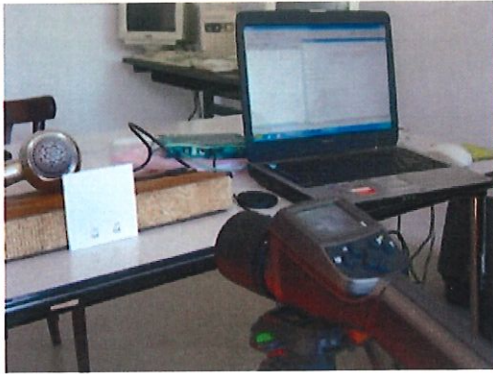


Figure 132: Setup IR pour le standard de référence LM.

b) Thermographie pulsée

Traitement d'images

Le but ultime étant la mesure dans une entrée d'air d'accès difficile, le choix du système de chauffe s'est porté sur une lampe halogène portable de dimension réduite. La pièce a été chauffée durant 10 secondes afin d'obtenir une augmentation de température de surface de l'ordre de 4°C. L'image de meilleur contraste est obtenue 15 secondes après la fin de la chauffe.

L'image de contraste maximum (figure 133) permet déjà de détecter les deux défauts présents sur le calibre mais le profil de température effectué au niveau des deux défauts montre également que l'image est relativement bruitée.

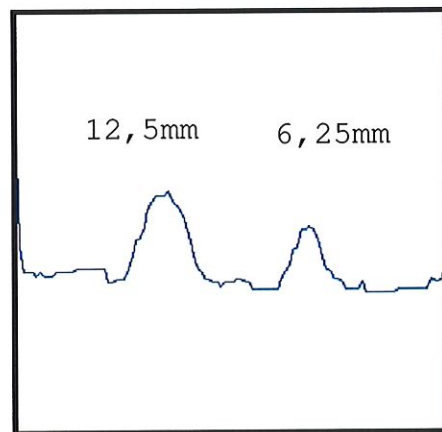
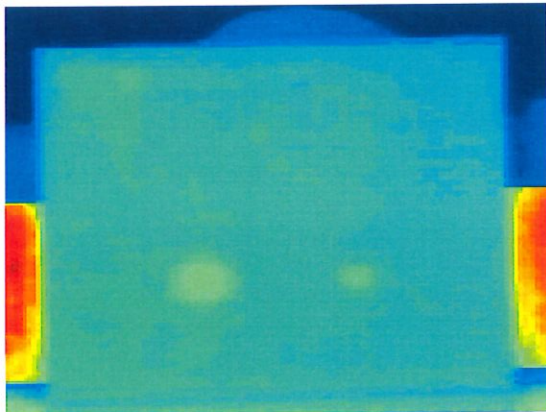


Figure 133: Standard de Référence de LM avec des défauts FBH de 12,5mm et 6,25mm de diamètre. Image de meilleur contraste et profil de température au niveau des défauts

L'opérateur Canny permet d'isoler automatiquement les défauts sur une image qui est superposable aux images IR.

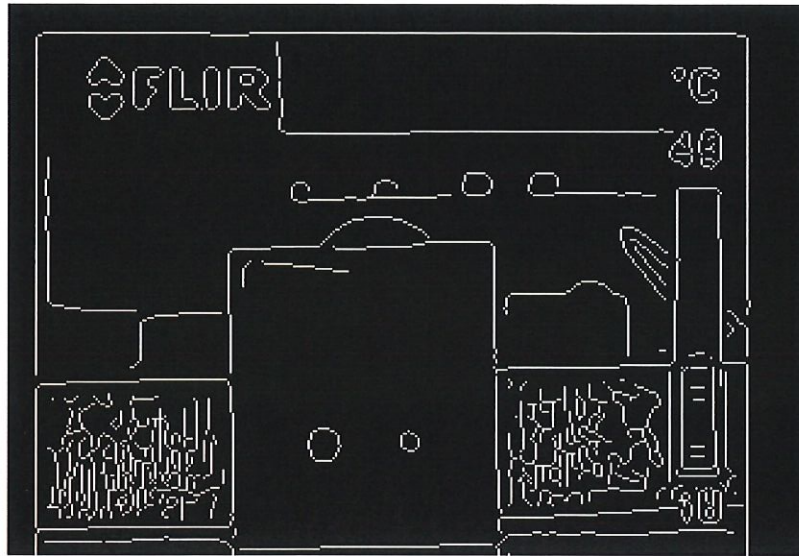


Figure 134: Standard de Référence de LM avec des défauts FBH de 12,5mm et 6,25mm de diamètre sur une image traitée par un filtre Canny.

Un moyennage temporel permet de diminuer le bruit de l'image (ici, moyenne de 400 images ou 16 secondes):

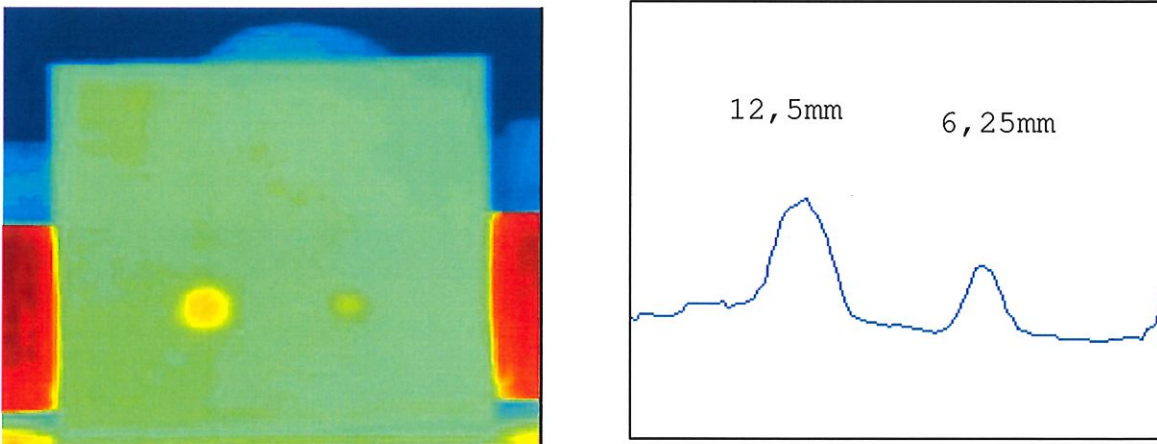


Figure 135: Standard de Référence de LM avec des défauts FBH de 12,5mm et 6,25mm de diamètre détectés sur une accumulation de 400 images (à gauche) et profil de température (à droite).

Ce traitement très simple permet d'améliorer la détectabilité des défauts mais ne peut être utilisé si le but est de déterminer la profondeur du défaut. Dans ce cas, il est préférable d'effectuer un lissage de l'image.

La figure 136 montre le résultat obtenu après l'application d'un lissage statistique avec une gaussienne de dimension 2.

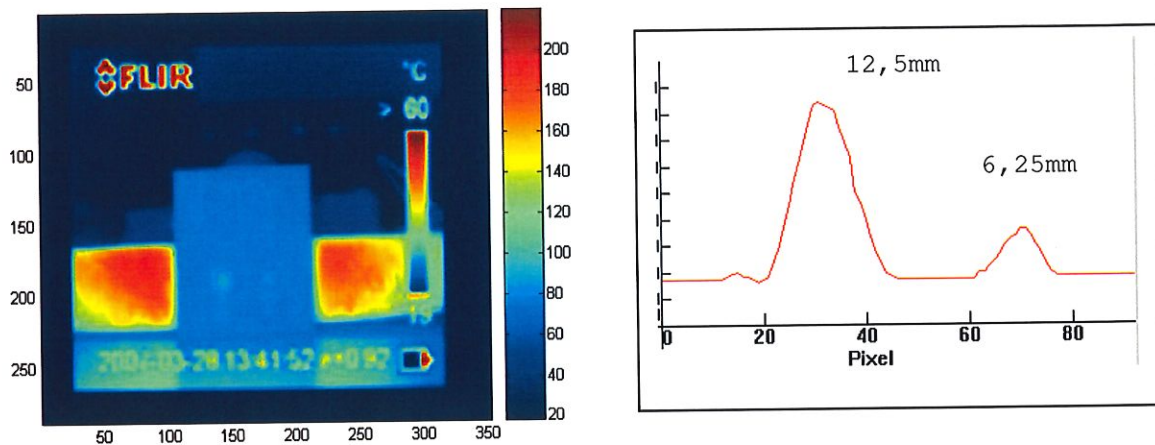


Figure 136: Standard de Référence de LM avec des défauts FBH de 12,5mm et 6,25mm de diamètre détectés sur une image lissée par une gaussienne de variance 2 (à gauche) et profil de température (à droite).

On constate que le bruit de l'image a diminué par rapport à celui d'une image brute au détriment de la netteté de l'image. Ceci montre bien la nécessité de limiter la largeur de la gaussienne à 2 au maximum pour limiter le flou de l'image.

Détermination de la taille des défauts

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la taille d'un défaut. Une première estimation peut être obtenue en observant les courbes d'iso-contours. Ces courbes relient les pixels présentant les mêmes valeurs de température.

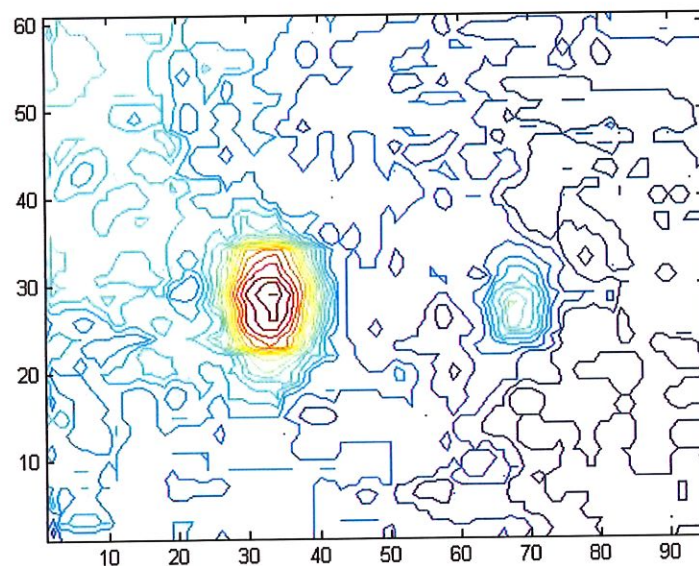


Figure 137: Standard de Référence de LM avec des défauts FBH de 12,5mm et 6,25mm de diamètre détectés sur des courbes d'iso-contours obtenus sur une image lissée

Cette image d'iso-contours donne une première indication quant au diamètre des défauts. Le défaut de gauche s'étend approximativement sur une quinzaine de pixels, ce qui correspond à un diamètre de 12,6mm tandis que celui de droite occupe une dizaine de pixels, soit 8,3mm.

Cette estimation peut être affinée grâce à la méthode du gradient maximum développée dans la partie 4. Pour rappel, cette méthode recherche le maximum du gradient de l'image dans quelques directions issues du centre du défaut.

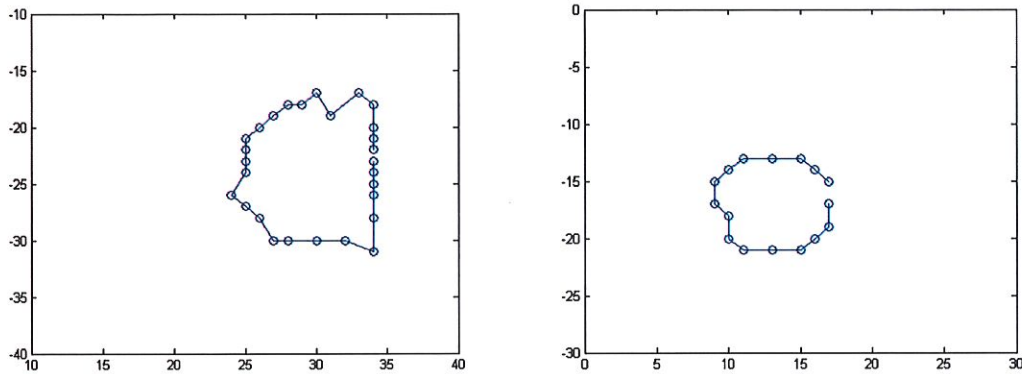


Figure 138: Défaut de 12,5mm de diamètre (à gauche) et défaut de 6,25mm (à droite) obtenus par la méthode du gradient .

Ces images permettent de déterminer avec plus de précision les diamètres des deux défauts, soit 14 pixels pour celui de gauche (11,7mm) et 8 pixels pour celui de droite (6,68mm). Ces dimensions sont très proches des dimensions réelles.

La résolution spatiale pour le dimensionnement a été calculée autour de 0,8mm, meilleure que pour les tests par ultrasons (autour de 1mm).

Pour une évaluation rapide mais encore représentative (en fonction du critère de rejet) du défaut, il est aussi intéressant d'utiliser la méthode de comparaison classique en regardant uniquement la meilleure image IR. La référence de dimension connue étant ici un calibre carré (exactement quatre pouces), nous pouvons également vérifier l'orientation verticale (déterminer le facteur y/x pour une vue IR non perpendiculaire).

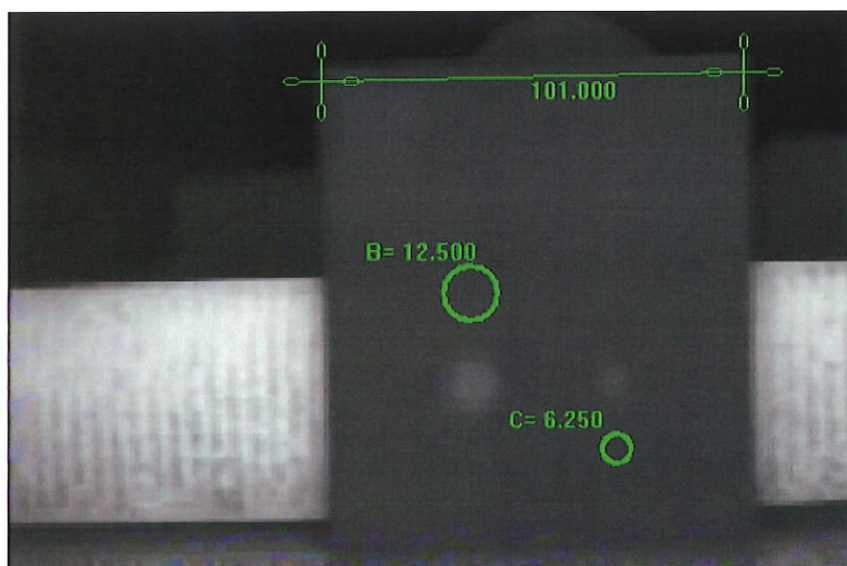


Figure 139: Evaluation sur l'écran des indications en utilisant des jauges circulaires pour comparaison.

L'image IR traitée ci-dessus a été réalisée avec le software iViewPC© déjà utilisé pour les examens endoscopiques sur les avions militaires.

c) Thermographie pulsée de phase

La méthode de détermination de la profondeur d'un défaut basée sur la thermographie pulsée nécessite l'utilisation d'un calibre représentatif de la pièce à tester dans lequel au moins deux défauts de profondeurs différentes connues ont été réalisés. Cette technique n'est donc pas exploitable pour la détermination de la profondeur des deux défauts présents dans notre calibre Lockheed. C'est pourquoi, il est nécessaire d'utiliser la thermographie pulsée de phase qui requiert uniquement la connaissance de la diffusivité thermique du matériau constitutif de la pièce testée.

Traitement des images

Avant d'appliquer une transformée de Fourier aux images brutes, il est recommandé d'effectuer un lissage statistique à l'aide d'une gaussienne d'ordre 2, exactement comme dans le cas de la thermographie pulsée (voir figure 136).

Une transformée de Fourier appliquée aux images lissées permet d'obtenir les images de phase dans le domaine fréquentiel.

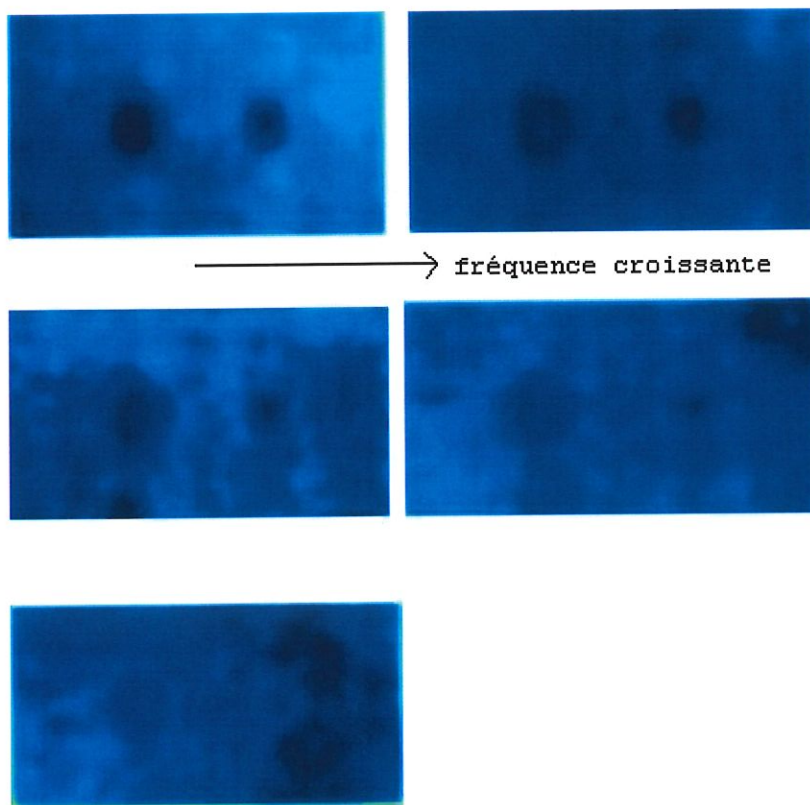


Figure 140: Images de phase du calibre Lockheed pour des fréquences croissantes

Détermination de la profondeur des défauts

L'analyse des images de phase obtenues après transformée de Fourier permet de déterminer la fréquence aveugle, c'est-à-dire la fréquence pour laquelle le contraste de phase entre une partie saine et un défaut n'est plus significatif.

Ici, dès la cinquième image de la séquence, les deux défauts ne sont plus détectables, ce qui correspond à une fréquence aveugle de 0,0625 Hz. Il est à noter que les défauts sont situés à la même profondeur puisque la fréquence aveugle est la même dans les deux cas.

Pour pouvoir calculer la longueur de diffusion thermique associée, il est nécessaire de connaître le coefficient de diffusivité thermique du caoutchouc. Celui-ci varie en fonction de la constitution chimique exacte du matériau. Celle-ci ne nous étant pas fournie par le fabricant, nous avons cherché dans la littérature une grandeur moyenne de la diffusivité thermique pour les caoutchoucs, soit $\alpha = 1,35 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_b}} = \sqrt{\frac{1,35 \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot 0,0625}} = 0,829 \text{ mm}$$

Si on adopte un coefficient de proportionnalité égal à 2 entre la longueur de diffusion et la profondeur d'un défaut, nous estimons que les deux défauts sont situés à une profondeur de 1,658mm sous la surface du caoutchouc. L'ordre de grandeur de la profondeur trouvée est cohérente avec les plans de la pièce fournis par le fabricant, malgré l'incertitude sur la valeur de la diffusivité thermique utilisée.

I.3. Résultats de la thermographie sur l'entrée d'air du F16

Après avoir vérifié et déterminé les meilleurs paramètres pour la thermographie pulsée, cette technique NDT peut maintenant être appliquée à l'intérieur de l'entrée d'air d'un F16.



Figure 141: L'entrée d'air inspectée du F16 avec la position du défaut sur le revêtement en caoutchouc.

Le revêtement en caoutchouc a été chauffé en utilisant un système de chauffe optique local placé à 10 cm (l'augmentation locale de température n'excède pas 6°C). La caméra portable IR a été placée à l'intérieur (côté droit) pour trouver tout défaut causé par un décollement du caoutchouc de la plaque en alliage d'aluminium.

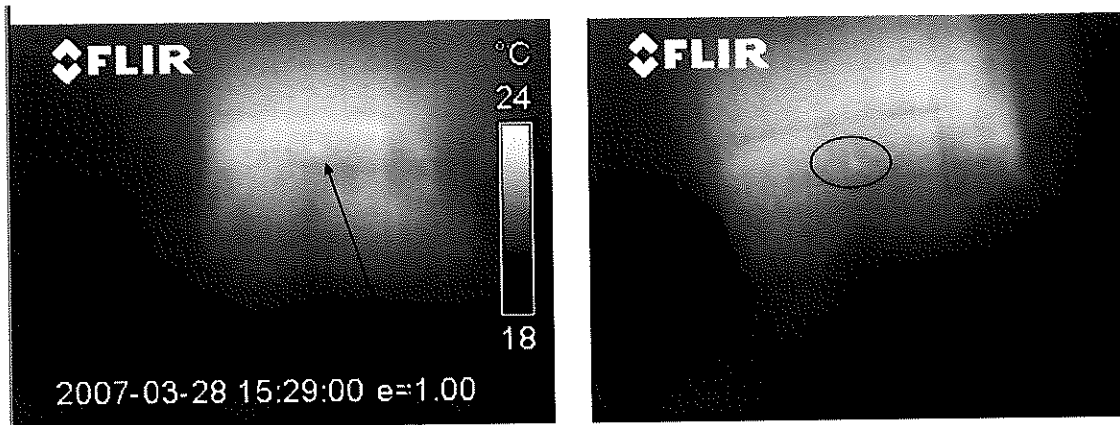


Figure 142: Thermographie réelle à l'intérieur de l'entrée d'air du F16 chauffée localement avec la position de l'indication trouvée.

En regardant l'échelle de température, nous contrôlons directement que le pulse de chaleur reste en dessous d'une valeur de 6°C pour éviter tout risque de surchauffe (même si le caoutchouc peut supporter une température bien plus importante et un stress mécanique causé par une aspiration de 150m³/s). Ci-dessus, l'image de gauche fut prise avec l'échelle de température visible, celle de droite fut prise 10 secondes avant sans échelle. Nous voyons directement que la diffusion latérale de chaleur a déjà commencé (avec l'image IR de gauche).

Comme souvent en NDT, une connaissance de la géométrie inspectée doit permettre une bonne évaluation du signal: les petites dépressions à la gauche de l'indication sont des points sombres venant d'une rangée de rivets à travers le revêtement de caoutchouc. Le dimensionnement peut également être réalisé (lorsque nous avons placé une référence visible dans l'image IR comme un IQI bien connu en RT). La meilleure estimation du défaut est de moins de 4mm de diamètre. Cela signifie du point de vue essais non destructifs que l'indication est acceptable au regard du critère de rejet de 6,25mm (un diamètre d'un quart de pouce).

II. WHITE BIRD COATING

La partie inférieure de l'aile du F16 est recouverte d'un revêtement très épais appelé white bird coating. Les propriétés physico-chimiques de ce revêtement sont telles qu'il est opaque aux ondes ultrasonores. Il est donc totalement exclu d'inspecter la structure située en-dessous de ce revêtement par la méthode classique des ultrasons utilisée sur le reste de la structure de l'avion. Cette situation est particulièrement problématique car ce revêtement recouvre des lignes de rivets susceptibles d'être détériorés ou manquants.



Figure 143: Revêtement white bird recouvrant la partie inférieure de l'aile du F16.

Puisque aucune des méthodes d'essais non destructifs conventionnelles n'est applicable à cette problématique, la thermographie serait un apport essentiel dans l'arsenal à disposition du personnel de maintenance.

Dans un premier temps, une première expérience utilisant un système de chauffe optique (lampe halogène) sur une large zone d'inspection a été tentée (voir figure 144).



Figure 144: Test thermographique avec un système de chauffe optique.

Malheureusement, il s'avère que la conductivité thermique du revêtement est telle que la vitesse de refroidissement ne permet pas un enregistrement efficace de cette phase.

Idéalement, il faut donc que la chauffe et l'enregistrement se déroulent simultanément. Cette configuration est réalisable grâce à un système de chauffe à air pulsé portable mais cela limite la zone d'inspection (voir figure 145).



Figure 145: Image thermographique de dessous de l'aile du F16 avec un système de chauffe à air pulsé.

Cette image thermographique permet de visualiser clairement les rangées de rivets qui étaient invisibles par ultrasons. La thermographie permettrait donc de détecter des rivets manquants.

III. VENTRAL FIN INSPECTION

III.1. Introduction

Une autre pièce en composite importante à inspecter est le ventral fin qui se situe à l'arrière du F16.

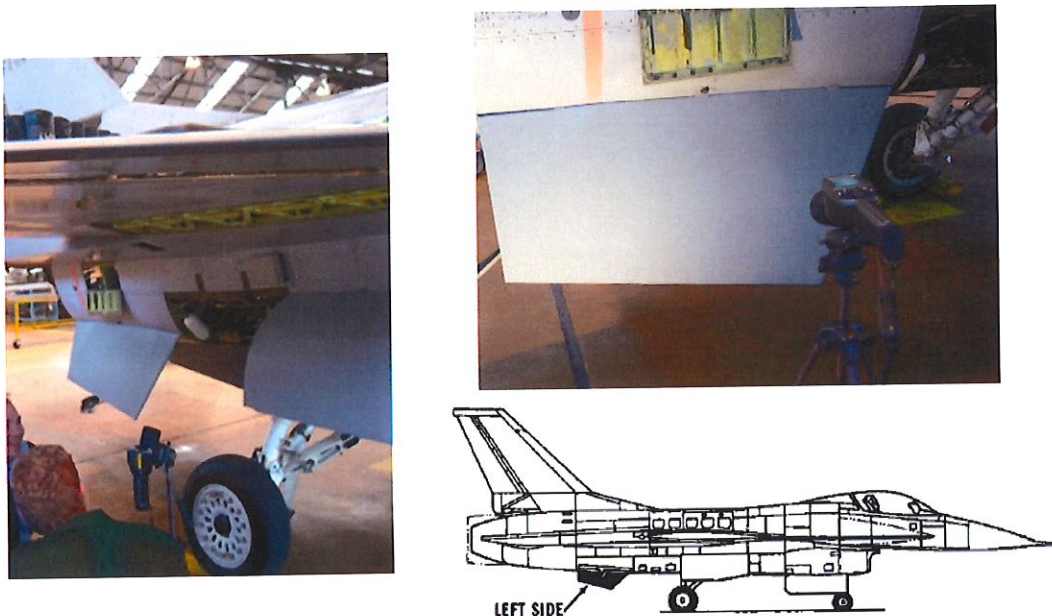


Figure 146: Situation du ventral fin gauche du F16

Actuellement, le ventral fin est inspecté par différentes méthodes classiques décrites dans le technical order de l'USAF. Il est cependant impossible d'inspecter certaines zones du ventral fin.

Le test par ultrasons présente une haute résolution pour la partie supérieure du ventral fin (Figure 147). L'inspection n'est pas réalisée par

une équipe locale de la base aérienne mais nécessite un opérateur niveau 2 expérimenté.

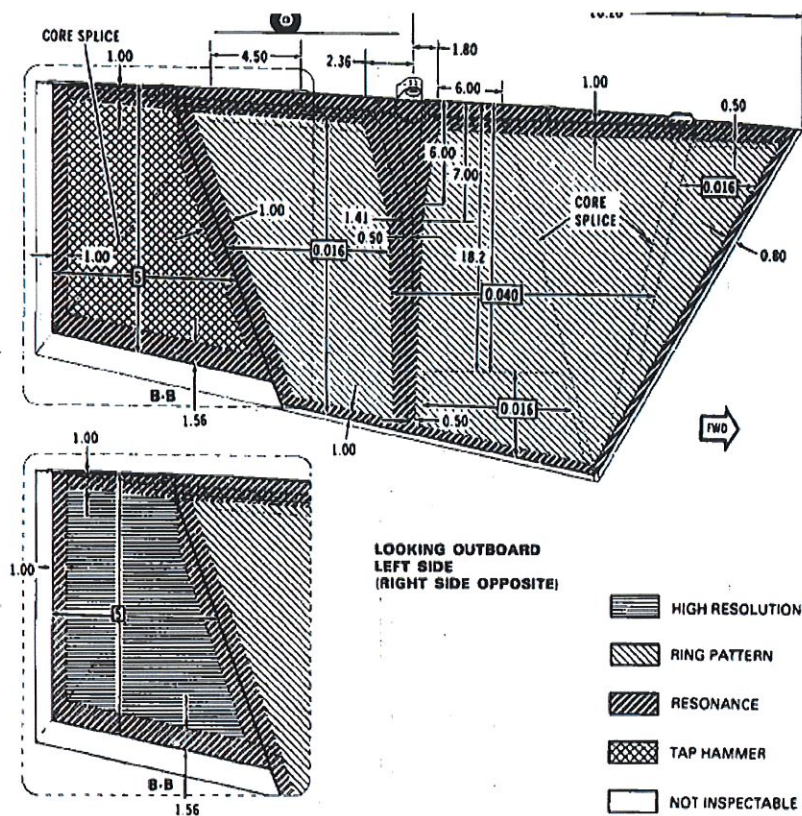


Figure 147: Schéma du ventral fin avec les informations NDT , source TO 1F-16A-36, fig 3-14⁷⁰

Une première prise de vue IR après une chauffe de 10 secondes permet de visualiser directement les différents composants du ventral fin testé.

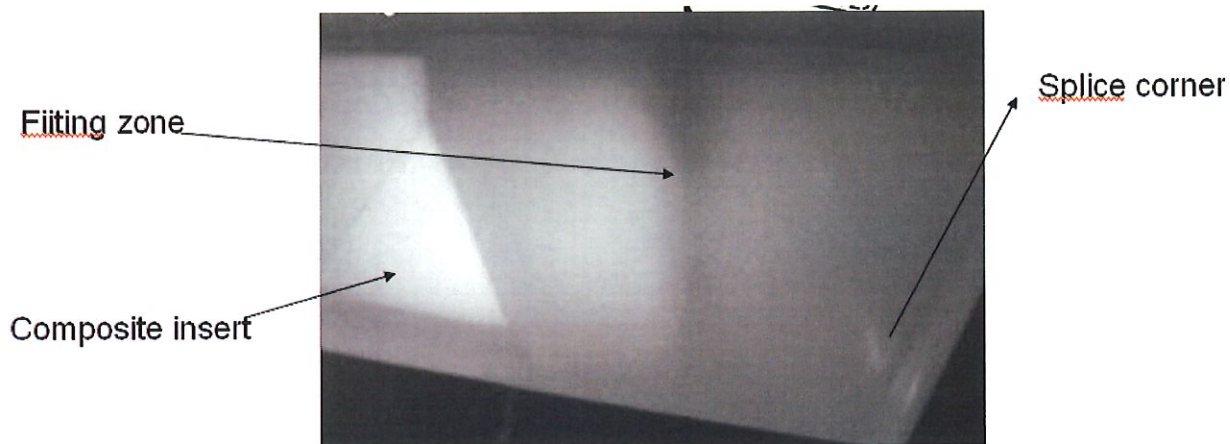


Figure 148: Première prise de vue IR du ventral fin montrant les inserts et les attaches métalliques.

Cette image fournit une cartographie globale similaire au résultat d'une radiographie (qui verra plus de détails internes mais qui ne permet pas de détecter les décollements et les délaminations).

III.2. Description de la pièce

Un assemblage ventral fin est situé de chaque côté du fuselage arrière sous le compartiment moteur. Chaque fin prolonge l'empennage vertical augmentant la stabilité directionnelle. Le fin est un assemblage collé consistant en un centre en nid d'abeille en aluminium, un panneau avant en aluminium 2024-T81, une résine epoxy préimprégnée pour le panneau arrière, une attache en aluminium usiné 2124-T851 et une résine epoxy /fibre de verre pour la fermeture arrière.

III.3. Utilisation de la thermographie

a) Conditions expérimentales

Un premier ventral fin démonté fut examiné à la section composite avec un chauffage global représenté figure 149. Afin de pouvoir évaluer la taille des éventuels défauts trouvés sur ce ventral fin, le calibre Lockheed décrit section I a été fixé sur la pièce à tester.



Figure 149: Inspection d'un ventral fin avec calibre et un chauffage global utilisé dans l'atelier composite.

Une première vérification IR donne une bonne visibilité des défauts FBH contenus dans le calibre Lockheed mais un étrange carré chaud apparaît aussi à sa droite.



Figure 150: Ventral fin démonté montrant une indication carrée à la droite de l'image IR.

Pour pouvoir évaluer cette indication, la courbe de contraste doit être étudiée minutieusement (voir figure 151). Celle-ci montre clairement que cette courbe n'a pas un comportement classique pour un défaut réel et sa disparition soudaine à un temps de 40s est facilement corrélée avec une réflexion d'une source chaude (lampe halogène carrée) qui se trouvait non loin du ventral fin. Donc, cet étrange carré chaud est une fausse alarme.

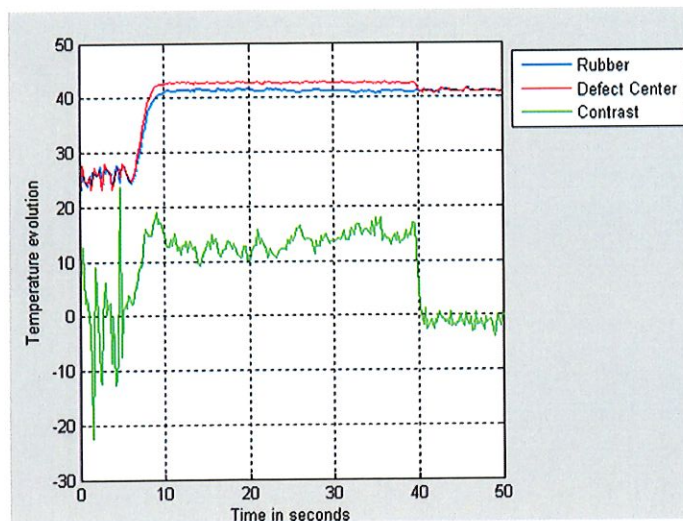


Figure 151: Courbe de contraste entre une indication chaude montrant une disparition soudaine à $t=40s$.

Cette expérience malheureuse met en lumière l'importance de l'environnement lors d'un test thermographique surtout si l'émissivité de la pièce à tester est faible, comme c'est le cas de l'Al 2024 constituant la face avant du panneau. Malheureusement, en situation de test sur site, l'opérateur n'a pas toujours d'emprise sur l'environnement et, dès lors, il faut être attentif à ne pas conclure trop rapidement sur la présence éventuelle de défauts.

b) Thermographie pulsée

En inspectant le reste du ventral fin, 3 indications relevantes furent trouvées près du milieu géométrique de la pièce. La figure IR suivante montre le calibre collé et 3 zones chaudes présentant un contraste de température positif.



Figure 152: Image IR brute montrant le calibre (à gauche) et trois défauts presque alignés (à droite).

L'analyse de la courbe de contraste de température après le pulse thermique montre un comportement classique pour un décollement entre la peau extérieure en aluminium et les cellules du nid d'abeille : une montée rapide du contraste (dans les sept secondes après la chauffe) et une plus longue diminution de ce contraste (plus de 15 secondes). Ces défauts sont pratiquement impossibles à détecter avec la radiographie à cause de l'orientation de la poche d'air ou par ultrasons à cause de la présence du nid d'abeille sous la peau en Al2024.

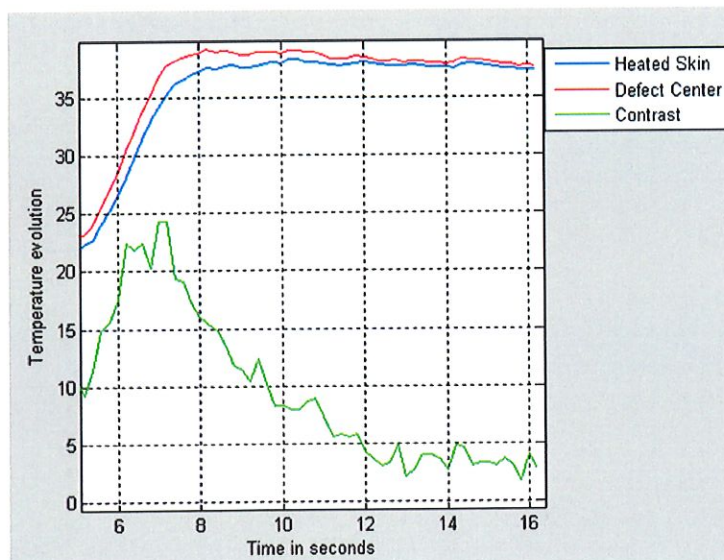


Figure 153: Evolution du contraste pour un défaut d'un pouce montrant un comportement classique pour un décollement.

Traitement d'image

La visibilité de ces défauts est augmentée en utilisant des techniques de moyennage dans le temps et des représentations en fausses couleurs ou des vues en maillage 3D. Un profil vertical est aussi représenté.

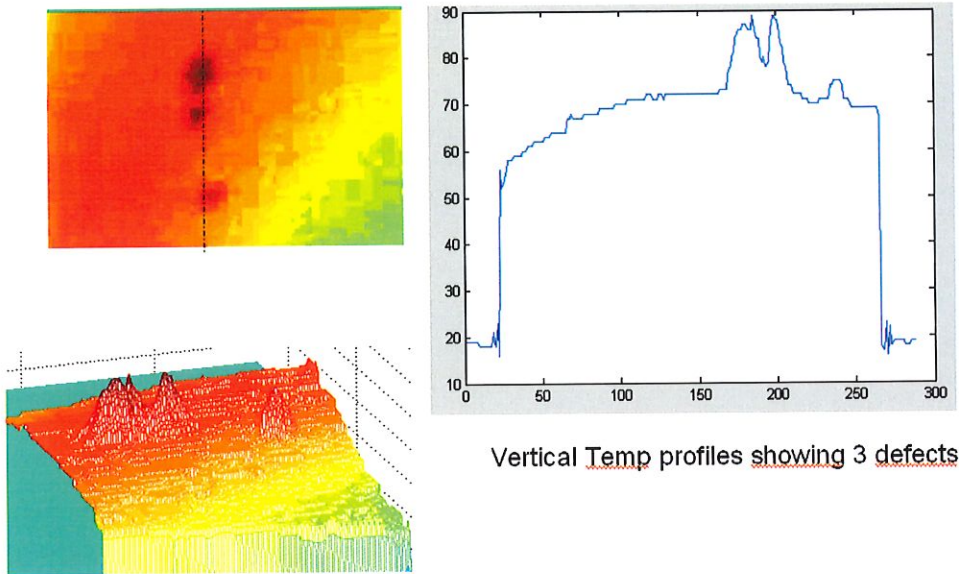


Figure 154: Traitement du signal: moyennage temporelle/vue fausse couleur+ profil de température et vue 3D montrant les trois défauts.

Dans la mesure où l'information temporelle doit être conservée, par exemple pour la détermination de la profondeur, un lissage statistique par gaussienne de variance 2 permet également de diminuer le bruit de l'image.

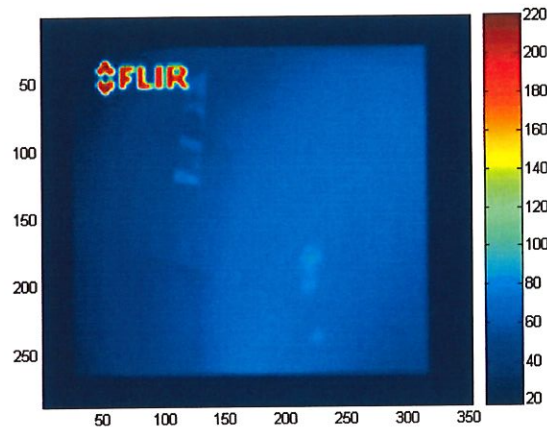


Figure 155: Image lissée par Gaussienne de variance 2.

Détermination de la taille des défauts

Finalement, la taille des défauts peut être déterminée. Dans un premier temps, cette taille peut être estimée en utilisant des jauges de comparaison circulaires. La figure 156 montre le résultat sur l'écran (un grand défaut d'un diamètre d'un pouce et deux autres décollement d'un demi pouce), utilisant le calibre carré parfait comme comparaison de mesure.

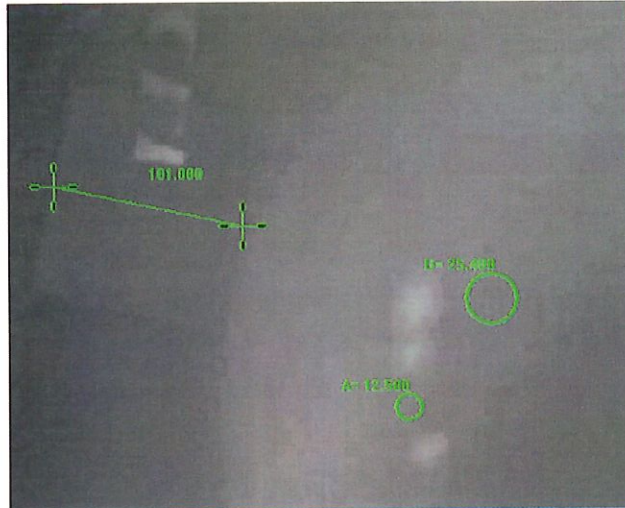
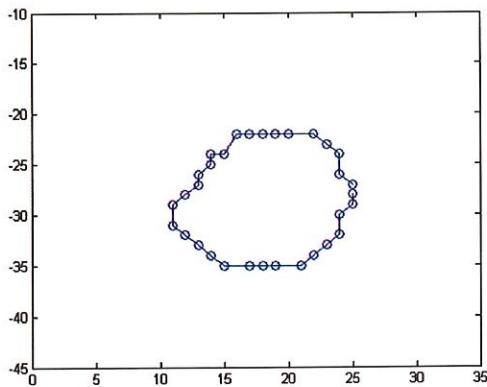
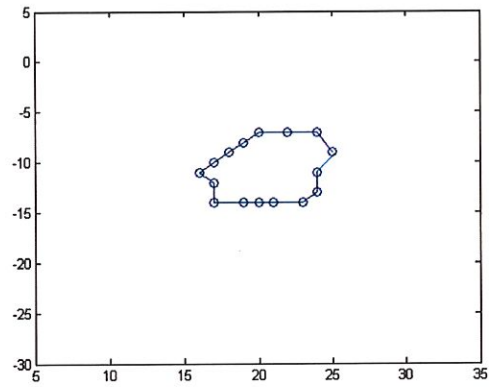


Figure 156: Dimensionnement des défauts avec calibre

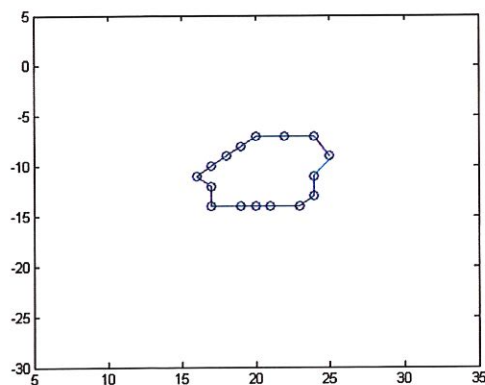
Afin d'obtenir un dimensionnement plus précis, la technique du maximum du gradient décrite dans la partie 4 a été appliquée. Elle permet d'obtenir les limites des trois défauts.



a) Défaut supérieur



b) Défaut intermédiaire



c) Défaut bas

Figure 157: Contours des défauts du ventral fin obtenus par la méthode du maximum du gradient.

Ces images permettent de déterminer que la dimension maximale du défaut supérieur est de 14 pixels, celle du défaut intermédiaire et du défaut bas sont chacune de 9 pixels. La présence du calibre Lockheed dans l'image IR permet de convertir ces dimensions en mm soit respectivement 19mm pour le défaut supérieur et 12 mm pour les défauts intermédiaires et moyens.

c) Thermographie pulsée de phase

Ne disposant pas de calibre représentatif du ventral fin dans lequel des défauts de profondeurs connues seraient créés, la détermination de la profondeur des trois défauts localisés dans le ventral fin nécessite l'utilisation de la thermographie pulsée de phase.

Après application d'une transformée de Fourier, la première étape consiste à déterminer la fréquence aveugle, soit la fréquence à laquelle le contraste de phase n'est plus détectable.

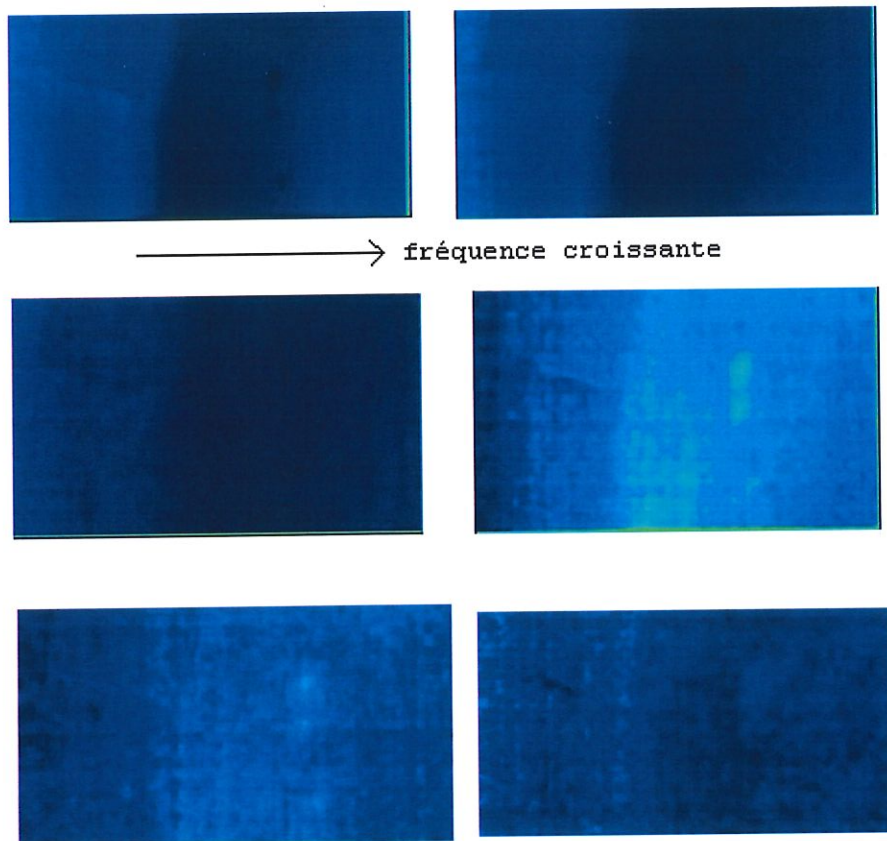


Figure 158: Images de phase obtenues après transformée de Fourier

Comme l'indique la figure 158, le contraste n'est plus visible dès la sixième image, ce qui correspond à une fréquence aveugle de 2,5 Hz. La littérature fournit une valeur de la diffusivité thermique de l'aluminium Al 2024 α égale à $8,3 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$. Ces valeurs permettent de calculer la longueur de diffusion :

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_b}} = \sqrt{\frac{8,3 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 2,5}} = 3,25 \text{mm}$$

Si l'on considère un coefficient de proportionnalité égal à 2 entre la longueur de diffusion thermique et la profondeur du défaut, cette profondeur peut être estimée à 6,5mm.

8^{ème} partie : UTILISATION DE LA THERMOGRAPHIE SUR DES DEFAUTS D'IMPACT CREEES DANS DES PALES D'HELICOPTERE AGUSTA.

I. Introduction

En 1993, la Défense belge a acheté 46 hélicoptères AGUSTA A-109-BA parmi lesquels 28 hélicoptères version anti tank et 18 hélicoptères de reconnaissance, ceux-ci se distinguant seulement par l'arsenal embarqué dans l'appareil. La 255^{ème} compagnie de Bierset est en charge de leur maintenance. Celle-ci est effectuée en accord avec les technical orders émis par AGUSTA qui stipulent notamment que les pales du rotor principal doivent être vérifiées par tap test.

Cette méthode d'essais non destructifs basée sur le son émis lorsqu'une pièce est percutée par un marteau nécessite un personnel spécialisé car l'interprétation du résultat du test est très délicate.

Cette méthode présente un degré de subjectivité important, le résultat pouvant être influencé par divers facteurs extérieurs comme notamment le bruit environnant.

Les pales principales ayant une fonction vitale pour les pilotes et devant le peu de confiance accordée aux résultats du tap test, le personnel de maintenance préfère souvent retirer des stocks les pièces litigieuses pour lesquelles un doute subsiste. Ce réflexe de sauvegarde a malheureusement un coût très important et immobilise une quantité non négligeable de pièces.

Un test thermographique des pales donnant une confirmation des résultats obtenus par tap test serait de nature à rassurer le personnel de maintenance.

II. Description des échantillons de pales

La société AGUSTA Liège nous a très gentiment fourni des échantillons de pales d'AGUSTA A-109. Ces pales sont principalement constituées d'une peau comportant 3 plis de CFRP inclinés respectivement à 0°, 30° et -30° et d'un nid d'abeille. La matière constitutive de ce nid d'abeille varie en fonction de la localisation dans la pale.



Figure 159: Coupe dans une pale d'AGUSTA A-109

Les pales étant importées d'Italie, il n'a pas été possible de réaliser des défauts pendant la fabrication des pièces.

Les défauts ont été réalisés à postériori grâce à un impacteur. Ces défauts sont néanmoins représentatifs du type de dégâts d'impact que peuvent subir des pales durant leur utilisation.

Sur une face de la pale ont été créés de défauts d'impact dont les intensités sont respectivement de 5, 7 et 10J tandis que sur l'autre face ont été réalisés de défauts d'intensité 12, 2.5 et 20J.

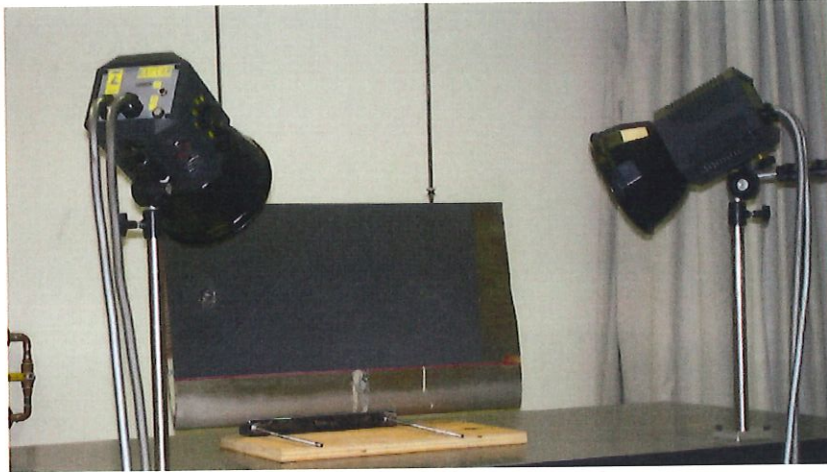


Figure 160: Vue d'un échantillon de pale présentant des défauts d'impact.

Les échantillons de pales ont été testés par thermographie pulsée, thermographie pulsée de phase au laboratoire du Professeur Maldaque à l'Université de Laval.

III. Thermographie pulsée

III.1. Acquisition des images

Pour des raisons de disponibilité au sein du laboratoire de l'Université de Laval, le choix de la caméra s'est porté sur une caméra Santa Barbara Focal Plane SBF125 qui travaille dans la zone 3-5 μm et possède un capteur CCD InSb. Cette caméra présente l'inconvénient d'être refroidie à l'azote liquide, ce qui complique la mise en œuvre du test. De plus, ce type de refroidissement limite la durée du test si l'on désire conserver des qualités d'image constantes.

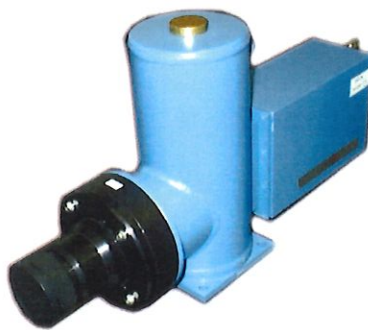


Figure 161: Caméra Santa Barbara Focal Plane SBF125

Le système de chauffe est constitué de deux lampes flash de 3,2 KJ permettant de générer des pulses thermiques de 2ms.



Figure 162: Lampes flashes Balcar® FX 60

III.2. Traitement des images

Une pale d'hélicoptère présente toujours une courbure afin d'augmenter la portance qu'elle développe. Cette caractéristique doit idéalement être prise en compte lors de l'analyse des thermogrammes obtenus lors d'une chauffe orthogonale à l'axe longitudinal et à la corde de la pale. La valeur de la température de chaque pixel doit être corrigée en tenant compte de la courbure locale en vertu de l'équation suivante obtenue précédemment pour les segments non linéaires :

$$T_{\text{mesuré}} - T_i = (T_{\text{réel}} - T_i) \cos \vartheta \quad [\text{Équation 48}]$$

où $T_{\text{mesuré}}$ est la température relevée sur le thermogramme, $T_{\text{réel}}$ la température réelle, T_i la température initiale et θ la pente locale de la courbe.

Dans le cas de la pale d'Agusta, cette courbure est faible et le profil est presque symétrique. Nous ne disposons malheureusement pas de la géométrie exacte de la pale. Nous sommes donc contraints d'effectuer un relevé manuel des cotes de l'échantillon de pale et d'y faire correspondre au mieux une courbe de 9^{ème} degré. La dérivée locale de l'équation obtenue permet de connaître la pente en tout point.

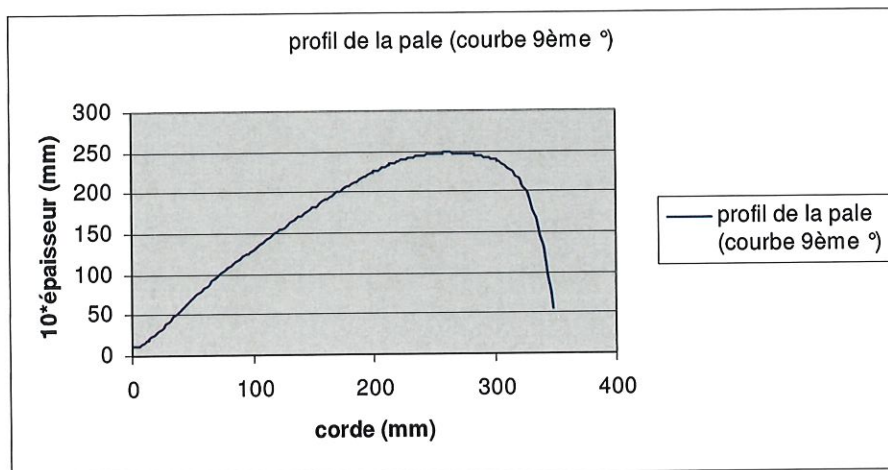


Figure 163: Géométrie de l'échantillon de pale

La figure 164 représente un profil horizontal dans un thermogramme obtenu après chauffe de la pale Agusta ainsi que la courbe obtenue après correction de pente.

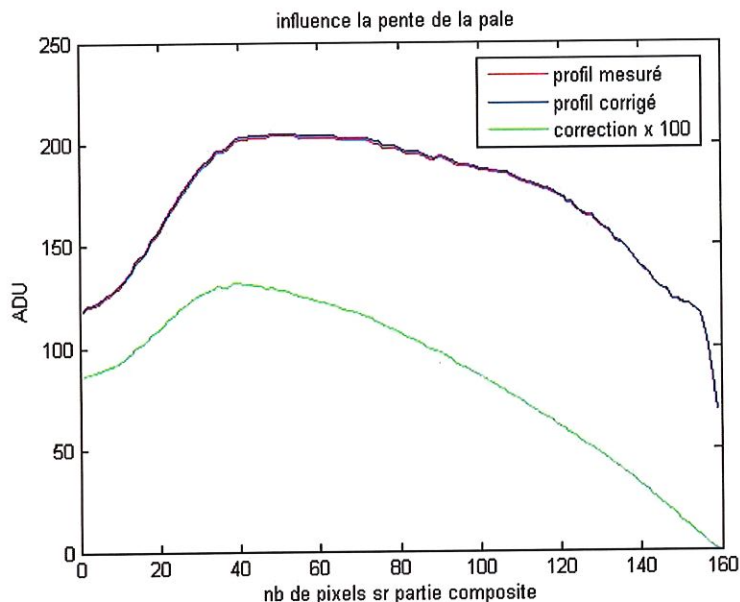


Figure 164: Profil horizontal d'un thermogramme d'une pale

Nous constatons que le profil mesuré et le profil corrigé ne se différencient pas fortement, la correction à appliquer étant proportionnelle au cosinus d'un angle très faible.

III.3. Exploitation des résultats

L'échantillon de pale a été soumis à un pulse thermique (quelques millisecondes) utilisant une source de puissance élevée (6,3 kJ). Le relevé de l'évolution au cours du temps de la température au niveau du centre du défaut ainsi que la moyenne de température de la zone saine entourant le défaut a permis de calculer l'évolution du contraste thermique engendré par l'existence du défaut d'impact (figure 165).

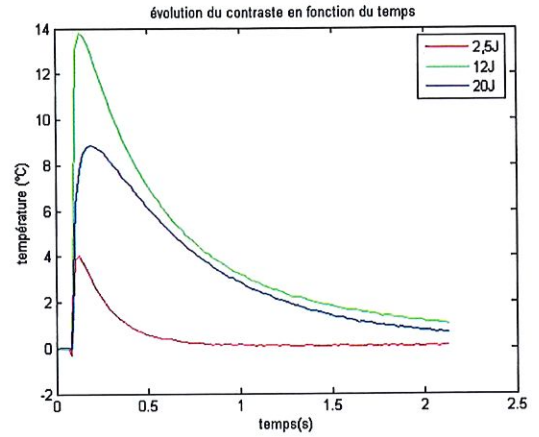
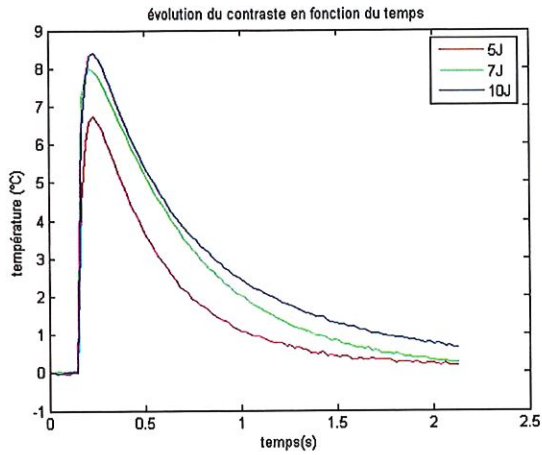


Figure 165: Evolution du contraste au cours du temps pour 6 défauts d'impact

Ces courbes montrent que non seulement tous les défauts sont facilement détectables par thermographie pulsée mais également que l'amplitude du contraste thermique est directement reliée à l'énergie de l'impact subi.

L'opérateur Canny permet de visualiser les différents défauts présents sur la pale

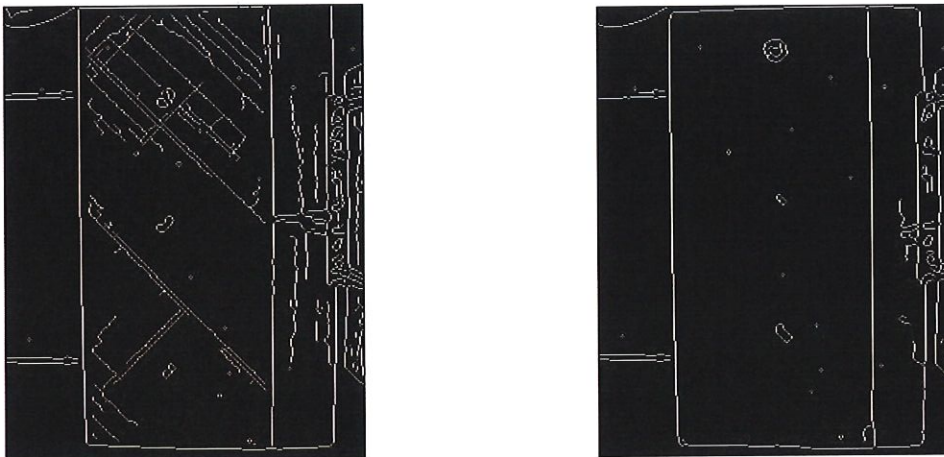


Figure 166: Image après l'application d'un filtre Canny, défauts de 5,7 et 10J (image de gauche), défauts de 12,2.5 et 20J (image de droite).

Pour un dimensionnement plus précis, les défauts sont isolés grâce à la méthode du maximum du gradient explicitée partie 4.

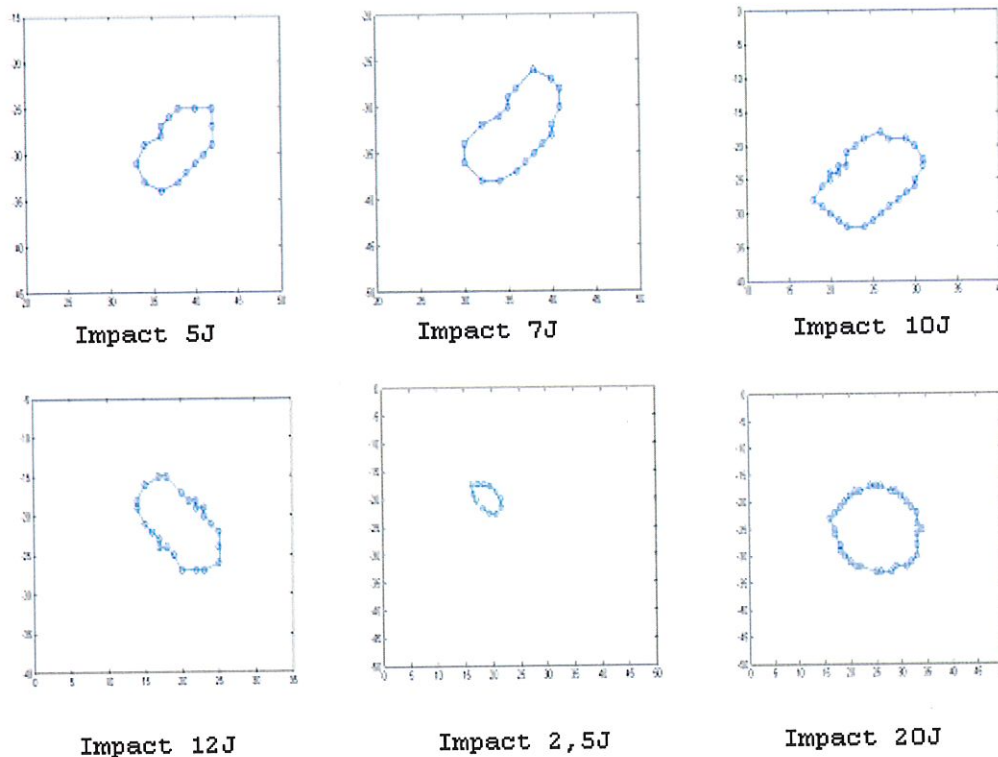


Figure 167: Dimensions des défauts par la méthode du maximum du gradient

Le relevé des dimensions des défauts montre que les défauts d'impact sont quasi circulaires et que leur diamètre augmente proportionnellement à l'énergie d'impact (figure 168).

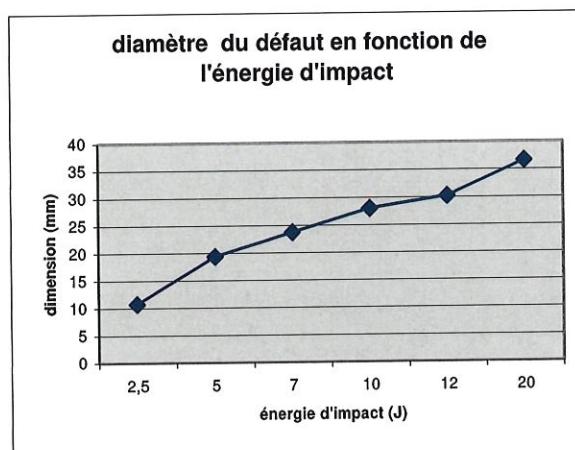


Figure 168: Diamètre du défaut en fonction de l'énergie d'impact

Certes certains défauts d'impact sont détectables visuellement à la surface de la pale sans l'aide de la thermographie, mais il est essentiel de réaliser que la taille réelle du défaut estimée par thermographie est beaucoup plus importante que la trace laissée à la surface de la pièce. Cette constatation est conforme à la théorie de propagation d'un défaut d'impact dans une structure composite (propagation en forme de sapin). De plus, la thermographie fournit un dimensionnement quantifiable de la taille du défaut alors que le tap test actuellement utilisé ne peut pas fournir ce type de renseignement.

IV. Thermographie pulsée de phase

L'application d'une transformée de Fourier aux thermogrammes de l'expérience de thermographie pulsée a permis d'obtenir l'évolution du contraste de phase en fonction du contenu fréquentiel des images (figure 169).

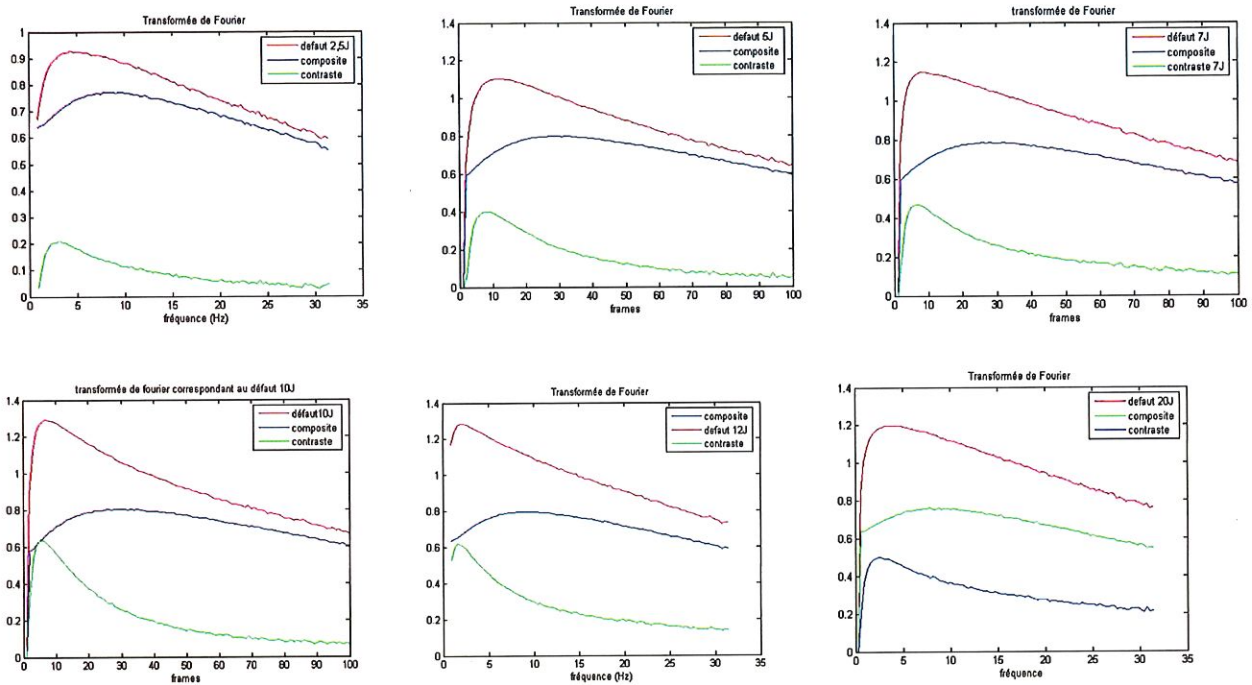


Figure 169: Evolution du contraste de phase en fonction de l'énergie d'impact.

Ces courbes montrent que le contraste de phase augmente avec l'énergie d'impact de manière similaire au comportement du contraste de température. L'amplitude du contraste pourrait donc être utilisée pour estimer l'énergie d'impact d'un défaut inconnu.

CONCLUSIONS

L'utilisation croissante des matériaux composites en aéronautique et leur défauts spécifiques expliquent l'importance du développement d'une nouvelle technique d'essais non destructifs complémentaire aux tests classiques applicables sur ce type de matériaux (radiographie, tests par ultrasons). **(Objectif 1)**

Les principaux défauts de ces techniques classiques résident dans le temps nécessaire à l'obtention d'un résultat et dans le coût de leur mise en œuvre. Elles devraient idéalement être réservées à la recherche de défauts dans des zones très limitées pour lesquelles une suspicion existe. Plusieurs nouvelles techniques NDT sont en cours d'élaboration comme la shearographie, les tests par micro-ondes et la thermographie infrarouge. Une première analyse comparative des différentes techniques émergentes montre la faisabilité de l'utilisation des techniques thermographiques lors de l'inspection de pièces en composite grâce notamment à leur revêtement. En effet, ces pièces ne présentent pas les problèmes d'émissivité inhérents à l'inspection des métaux. **(Objectif 2)**

Les différentes méthodes de thermographie active (thermographie pulsée PT, thermographie pulsée de phase PPT et lockin LT) varient dans la façon d'injecter l'énergie thermique à la surface du spécimen. Dans tous les cas, le principe de détection des défauts est basé sur l'hypothèse qu'un défaut va posséder des propriétés thermiques différentes que le matériau sain, produisant une différence de température observable à la surface.

La thermographie pulsée de phase permet de retrouver des informations sur la phase et l'amplitude du signal à différentes fréquences suite à l'application d'un algorithme de transformation (transformée de Fourier). **(Objectif 3)**

Le matériel nécessaire à la réalisation de tests par thermographie est limité essentiellement à une caméra infrarouge et à un ordinateur pour le traitement des images.

Différents critères interviennent dans le choix d'une caméra thermique. Les caractéristiques des caméras peuvent être classées en sept grandes familles. L'importance subjective de ces propriétés variant en fonction des applications nécessitant l'utilisation de la caméra, l'acquisition du matériel nécessaire à la mise en œuvre d'un test NDT doit faire l'objet d'une étude personnalisée.

Cependant, une bonne résolution thermique (idéalement 0,01K minimum) est nécessaire pour permettre la détection de défaut présentant un très faible contraste thermique.

Afin d'obtenir une estimation correcte de température, l'opérateur doit tenir compte de certains paramètres pouvant influencer sa mesure.

Il s'agit de paramètres liés aux caractéristiques du corps observé (émissivité, facteur de réflexion, forme), de facteurs liés à l'environnement (absorption par l'atmosphère, température environnante, température atmosphérique) ainsi que des conditions liées à la chauffe (temps de chauffe, intensité de chauffe et non uniformité de chauffe). **(Objectif 4)**

Divers traitements d'images aisés à mettre en œuvre sont proposés pour permettre à l'opérateur d'améliorer la visibilité d'un défaut. Certains traitements peuvent être appliqués à toute image quelque soit la technique thermographique utilisée. Il s'agit alors de supprimer le vignetage, un effet de bord, et d'atténuer l'influence de la géométrie de la pièce sur les résultats.

D'autres traitements d'images sont spécifiques à la thermographie pulsée.

Un lissage spatial et temporel (gaussienne de largeur 2 et accumulation de 4 images) permet d'augmenter significativement le rapport signal/bruit tout en conservant une résolution spatiale acceptable. **(Objectif 5)**

Outre la détection des défauts par apparition d'un contraste thermique après chauffe (PT) ou d'un contraste de phase (PPT et LT), la thermographie permet une analyse quantitative du défaut observé.

Pour des défauts de type délamination, la profondeur et la taille du défaut peuvent être déduites de la séquence thermographique et comparées aux critères de rejet du fabricant. L'estimation de la profondeur d'un défaut est très précise tant en utilisant les données dans le domaine temporel que dans le domaine fréquentiel. Une très bonne corrélation linéaire entre la profondeur et la longueur de diffusion thermique a également été montrée. La thermographie peut aussi être utilisée pour la détection d'inclusion d'eau. La thermographie permet également de caractériser le comportement thermique du matériau testé en établissant sa diffusivité thermique.

Afin d'illustrer cette nouvelle méthode NDT, nous avons effectué des tests sur des calibres contenant des défauts créés artificiellement. Les résultats obtenus mettent en valeur les différentes potentialités de la thermographie et éclairent le lecteur dans la démarche à mettre en œuvre lors de la conception d'un test thermographique. **(Objectif 6)**

La première étape de l'élaboration d'un test est le choix du matériel. Nous avons donc effectué une comparaison sur deux types de caméras thermographiques d'origines très différentes. La première est un imageur thermique très répandu à la Défense notamment dans l'infanterie (caméra Sophie-Thalès). La seconde est une caméra civile parmi les plus performantes (SC3000, FLIR).

Deux paramètres fondamentaux des détecteurs IR ont été mesurés au laboratoire d'optronique de la Défense: la MRTD et la NETD. En analysant les résultats obtenus lors de la mesure de la MRTD, nous pouvons conclure que la caméra militaire présente une résolution spatiale légèrement meilleure pour les défauts de faible contraste thermique. Cependant au regard de la NETD, la caméra commerciale est deux fois plus performante. Les deux détecteurs IR montrent une asymétrie significative dans l'histogramme de la NETD, 60% des pixels ont une NETD inférieure à la NETD moyenne. La qualité du détecteur de la SC3000 est spatialement uniforme, ce qui n'est pas le cas du détecteur Thales dont le centre présente une NETD inférieure à celle des pixels périphériques.

Après l'obtention de données thermographiques, l'opérateur doit appliquer le traitement d'images approprié à la situation.

Afin d'illustrer la démarche de correction d'un thermogramme pour prendre en compte la forme de l'objet observé, nous avons traité des thermogrammes obtenus après une chauffe uniforme d'un calibre formé d'un plan incliné sur lequel est fixé un demi-cylindre. Tant la correction apportée aux parties planes inclinées du calibre que la correction apportée aux parties courbes du calibre ont permis de retrouver une distribution quasi uniforme de la température indiquée sur le thermogramme.

La thermographie pulsée a été utilisée pour détecter des défauts simulant des délaminations sur un calibre en composite CFRP comportant des trous borgnes de diamètre 10mm situés à des profondeurs variables et connues. Un traitement d'images initial est nécessaire afin de réduire les défauts inhérents à toute image thermique : le vignetage et la non uniformité de chauffe. Cette précaution préalable permet d'éviter qu'un défaut profond, donc de signature thermique faible, soit caché par ces perturbations d'images facilement corrigibles.

Un lissage spatial et temporel (gaussienne de largeur 2 et accumulation de 4 images) a permis d'augmenter significativement le rapport signal/bruit (SNR passant de 41,54 dB à 47,87 dB).

Ce test a permis de visualiser l'évolution du contraste thermique en fonction de la profondeur du défaut.

Les résultats obtenus par thermographie pulsée sur ce calibre FBH sont corroborés par deux modèles éléments finis, un modèle simplifié applicable dans le cas des défauts de forme cylindrique et un modèle commercial.

Afin de montrer l'efficacité de la thermographie dans la détection et la quantification de défauts, différents calibres ont été utilisés. Il s'agit principalement du calibre FBH à trous borgnes précédemment décrit et d'une plaque en CFRP impactée avec une énergie de 16J.

La profondeur d'un défaut est déterminée soit en effectuant un test par thermographie pulsée soit par thermographie pulsée de phase.

La détermination de la profondeur par thermographie pulsée se base sur le maximum du contraste thermique entre une partie saine du spécimen et le défaut ainsi que sur le temps d'occurrence de ce contraste maximum. Le test effectué sur le calibre FBH a montré la grande précision de la mesure de profondeur (précision minimale de 42 microns pour des défauts de 3mm de profondeur maximum). Cependant, le test sur plaque d'impact a mis en lumière une des limitations importantes de la thermographie, son incapacité à détecter des défauts dont la profondeur excède quelques millimètres (3,6mm).

La profondeur d'un défaut peut également être déterminée par la thermographie pulsée de phase. L'image de phase est moins bruitée par les non uniformités de chauffe et par les variations d'émissivité de la surface que l'image obtenue en thermographie pulsée. Les défauts les plus profonds étant détectés grâce aux images basse fréquence (plus la fréquence est basse et plus la pénétration est profonde), des temps d'acquisition longs (100s) sont nécessaires pour la détection du défaut situé à 3mm de profondeur.

En jouant sur les fréquences, on peut ainsi effectuer une tomothermographie, visualisant tranche par tranche l'état de la pièce.

Une relation linéaire existe entre la profondeur du défaut et la longueur de diffusion thermique. Cette dernière est déterminée en se basant sur la fréquence aveugle ou fréquence à laquelle il n'est plus possible de distinguer un défaut de la partie saine de la pièce et sur les propriétés thermiques du matériau. L'application de ce précepte a permis d'obtenir la profondeur des défauts du calibre FBH avec une précision minimale de 83 microns. Cette précision est moins bonne que celle obtenue par thermographie pulsée mais le calcul de la profondeur s'en trouve grandement simplifié.

Un autre critère important dans la prise de décision de rejet d'une pièce par un opérateur NDT est le dimensionnement du défaut détecté. Dans le cas d'un défaut non circulaire, il est nécessaire de disposer d'un algorithme permettant d'estimer facilement la surface du défaut. La démarche proposée se base sur l'analyse de l'image de contraste maximal. Le défaut est estimé en calculant le gradient de l'image obtenu par la matrice de Roberts et en cherchant le maximum du gradient dans toutes les directions.

L'application de cet algorithme aux thermogrammes obtenus par thermographie pulsée sur le calibre FBH a permis de montrer son efficacité pour des défauts d'un diamètre de 10mm peu profonds, la précision de mesure diminuant lorsque la profondeur du défaut augmente.

Outre la recherche de délaminations, la thermographie permet de détecter des inclusions d'eau dans des panneaux sandwich, situation courante dans le cas de pièces aéronautiques. Afin d'illustrer cette opportunité, un panneau sandwich a été aménagé afin de permettre l'introduction de quantités

définies d'eau. Des tests de thermographie pulsée ont été menés en faisant varier la surface et la hauteur de la colonne d'eau introduite dans les cellules du nid d'abeille. Les contrastes thermiques (amplitude et occurrence) ont été mesurés et ces résultats expérimentaux confirment les prédictions obtenues par le modèle éléments finis. **(Objectif 7)**

La thermographie peut également être utilisée pour déterminer la diffusivité thermique d'un matériau. Pour illustrer cette utilisation, un test de Parker a été effectué sur un échantillon de pale Agusta.

Les différentes expériences menées sur les calibres montrent donc sans équivoque l'utilité de la thermographie dans une démarche d'essais non destructifs. Cependant, le développement d'une nouvelle méthode NDT ne se justifie économiquement que si elle apporte des informations supplémentaires par rapport aux techniques NDT existantes ou si elle simplifie la mise en œuvre des tests. C'est pourquoi, nous avons comparé la thermographie à deux méthodes valides sur composite, un test conventionnel (test par ultrasons) et un test toujours au stade expérimental (la shearographie).

Le test par ultrasons a confirmé son efficacité lors de l'analyse de pièces monolithiques. Il permet de détecter des défauts dont la profondeur excède les limites de la thermographie mais la précision de la mesure de la profondeur du défaut est inférieure à celle obtenue par thermographie pulsée. Le gain de précision n'est cependant pas l'argument principal en faveur de la thermographie mais bien l'économie de temps réalisée lors d'un test, la thermographie étant une technique globale alors que le test par ultrasons est un test point à point.

L'utilisation de la thermographie et de la shearographie sur un calibre en nid d'abeille comportant une série de défauts de différentes natures et de différentes dimensions montre l'équivalence des résultats obtenus par les deux méthodes bien que chacune ait ses spécificités. La thermographie est plus efficace sur les défauts de faibles dimensions, la shearographie est légèrement supérieure pour la détection de défauts plus profonds, les deux techniques restant cantonnées aux défauts dans les plaques ou dans l'adhésif, l'analyse du nid d'abeille n'étant pas probante. Cependant, dans l'optique du développement d'une méthode NDT applicable sur site, la grande simplicité de mise en œuvre de la thermographie est un argument essentiel. **(Objectif 8)**

La portabilité du test thermographique a montré son importance dans l'étude de cas réels sur site. En effet, l'équipe chargée de l'inspection NDT des avions F16 au sein de la Défense était confrontée à l'inefficacité des techniques NDT conventionnelles dans l'analyse de certaines zones critiques de l'avion.

Par exemple, l'inspection de l'entrée d'air par ultrasons était rendue difficile par la géométrie de la pièce et relativement longue. La thermographie a permis de détecter très rapidement des défauts de décollements dans le revêtement interne.

L'inspection des ventral fins a également été fructueuse, montrant facilement les zones délaminées. Ce test a cependant attiré l'attention sur le danger de travailler dans un environnement moins contrôlé sur site qu'en laboratoire et sur la nécessité d'une analyse soignée des résultats afin d'éliminer les fausses indications.

L'analyse des pales d'Agusta a confirmé l'efficacité de la méthode dans la détection de défauts d'impact. **(Objectif 9)**

Conclusions générales

Cette étude de la thermographie comme méthode d'essais non destructifs pour pièces en composite a montré ses capacités prometteuses. Cette méthode globale, rapide, peu onéreuse et sans contact devrait avantageusement seconder voir suppléer les techniques ultrasoniques et radiographiques existantes.

Grâce à la thermographie, l'opérateur NDT pourra réaliser très rapidement une analyse de pièces sur site, sans démontage et sans traitement spécifique puisque naturellement les pièces en composite et leur revêtement classique en aéronautique ne présentent pas de problème d'émissivité. Le matériel nécessaire à la mise en œuvre de cette technique NDT est relativement limité et peu coûteux. Les systèmes de chauffe actuellement utilisés pour la peinture des pièces après décapage et donc déjà présents dans les ateliers de maintenance conviennent parfaitement pour l'aspect qualitatif de la détection. Pour quantifier les dimensions et la profondeur des défauts, il est cependant préférable d'acquérir des lampes flashes pouvant générer des pulses thermiques courts. D'autre part, les caméras infrarouges se démocratisent et ce d'autant plus qu'une grande précision absolue n'est pas nécessaire puisque la méthode est principalement basée sur l'étude du contraste thermique et non sur la valeur absolue de la température.

Il existe plusieurs techniques thermographiques, les plus simples à utiliser sur site étant la thermographie pulsée et la thermographie pulsée de phase. La thermographie pulsée est une méthode très intuitive et peut être mise en œuvre rapidement pour obtenir des premiers résultats rapides lors de l'analyse d'une pièce. La thermographie pulsée de phase est complémentaire et permet notamment d'obtenir des informations sur la profondeur d'un défaut en se basant uniquement sur les mesures thermographiques et la connaissance du matériau constitutif de la pièce.

Bien entendu, la thermographie a ses limites. L'une des plus importantes est la profondeur restreinte des défauts qu'elle peut détecter (quelques millimètres). A l'avenir, l'opérateur NDT devra donc, comme il le fait déjà actuellement, jongler avec les techniques NDT à sa disposition en fonction des pièces à analyser.

Par exemple, il préférera la radiographie pour la détection de défauts profonds mais elle sera inopérante s'il s'agit de délaminations. Il pourra également utiliser les tests par ultrasons pour confirmer les défauts trouvés par thermographie, la zone à inspecter ayant déjà été fortement réduite par ce test préalable, ce qui signifie un gain de temps appréciable.

Les grands constructeurs aéronautiques ont bien compris l'apport économique de la thermographie. Ils sont d'ailleurs les premiers à l'incorporer dans leurs procédures de maintenance. Il est évident que l'essor de la thermographie ne fait que commencer, son intégration industrielle est d'autant plus encouragée que l'utilisation des matériaux composites est sans cesse croissante.

**Annexe 1 : Exemple d'utilisation de la thermographie
dans la maintenance chez Boeing.**



NONDESTRUCTIVE TEST

PART 9

THERMOGRAPHY

NOTE: The inspection procedures contained in this part must be done by qualified persons. Refer to Part 1, 51-01-00, Page 1.

TABLE OF CONTENTS

<u>Subject</u>	<u>Subject No.</u>	<u>Page</u>
STRUCTURES - GENERAL		
Inspection for Ice or Water in Honeycomb Parts.....	51-00-01	1
Inspection for Water in Honeycomb with Liquid Crystal Sheets.....	51-00-02	1
Pulsed Thermography Inspection for Disbonds in Bonded Aluminum Structure.....	51-00-03	1
Lock-In Thermography Inspection for Disbonds in Bonded Aluminum Structure.....	51-00-04	1
FUSELAGE - PLATES/SKINS		
Inspection for Disbonds Between the Fuselage Skin and Doublers.....	53-30-01	1

EFFECTIVITY
MODEL: ALL



PART 9 - THERMOGRAPHY

INSPECTION FOR ICE OR WATER IN HONEYCOMB PARTS

1. Purpose

- A. Use this procedure to do an inspection for ice or water in non-metallic honeycomb structure with an infrared thermography camera.
- B. This procedure gives instructions for a flight line or a maintenance facility inspection.
- C. The Flight Line Procedure must be done within one hour after the airplane lands.
- D. It is necessary to heat the part if the Heat Source Procedure is used in the maintenance facility. There is no limit for the inspection time of the Heat Source Procedure if the heat source is frequently applied to the inspection area.

2. Equipment

A. General

- (1) Use inspection equipment that can be calibrated on the reference standard as specified in paragraph 4.
- (2) Refer to Part 1, 51-01-00 for data about the equipment manufacturers.

B. Instruments

- (1) Use a thermography camera that:
 - (a) Displays a grayscale image on a video monitor (a color display is not necessary).
 - (b) Can find water or ice in reference standard NDT1046 as specified in this procedure.
 - (c) The instruments specified below were used to help prepare this procedure.
 - 1) Thermo Tracer TH1101; NEC San-ei Instruments Ltd.
 - 2) Thermo Tracer TH1100; Mikron Instruments
 - 3) 760; Inframetrics Inc.

BOEING 
COMMERCIAL JET
NONDESTRUCTIVE TEST

C. Heat Source

- (1) Boeing recommends that quartz lamps, with 1000 Watt outputs be used as the external heat sources for the Heat Source Procedure.

NOTE: A heat source is not necessary for the flight line inspection.

D. Reference Standards

- (1) Use reference standard NDT1046. See Figure 1 for data about the reference standard.

3. Preparation for Inspection

A. Prepare the reference standard as follows:

- (1) To do the "Flight Line Procedure":
 - (a) Fill the cells in reference standard NDT1046 with water as specified in Figure 2.
 - (b) Freeze reference standard NDT1046 until the water is solid.
 - (c) Remove the reference standard from the freezer immediately before the test.
- (2) To do the "Heat Source Procedure":
 - (a) Fill the cells of reference standard NDT1046 with water as specified in Figure 2.
 - (b) Let the water come to room temperature.

B. Prepare the airplane as follows:

- (1) Get access to the inspection areas.
- (2) Remove loose paint, dirt, or grease from the surface of the inspection area if it can effect the inspection.

4. Instrument Calibration

NOTE: Refer to the instrument instruction manual for the equipment operation instructions.

A. Approve the instrument for use as follows:

NOTE: It is necessary to approve the thermography camera only one time to make sure the camera can identify subsurface ice.

NONDESTRUCTIVE TEST

- (1) Prepare the reference standard as specified in paragraph 3.A.
 - (2) Let the thermography camera cool to its operation temperature.
 - (3) Put the reference standard in front of the thermography camera.
 - (a) Make sure that the reference standard is the same distance from the camera that the inspection area will be during the inspection.
 - (4) Look at the reference standard with the thermography camera.
 - (a) Adjust the focus until the edge of the reference standard can be seen clearly.
 - (5) Adjust the instrument sensitivity and temperature level until you can clearly see the ice in the reference standard. Use the lowest temperature range that permits you to see the full reference standard.
 - (a) If you cannot see the ice in the reference standard, then:
 - 1) The sensitivity and temperature levels are not set correctly. Refer to the instrument instruction manual for the calibration instructions about how to set the sensitivity.
 - 2) The thermography camera is too far from the reference standard. Do the calibration again at a closer distance.
 - 3) If paragraphs 5 (a)(1) and 5 (a)(2) cannot correct the problem, the thermography camera cannot be calibrated for this inspection procedure. You cannot use the thermography camera for this inspection.
 - (6) Make a record of how the thermography camera is set for use during the airplane inspection.
 - (7) Make a record of the distance between the reference standard and the thermography camera. This is the maximum distance that can be used during the inspection.
- B. Calibrate the equipment to do a thermography inspection with the airplane on the flight line as follows (This is the Flight Line Procedure):
- (1) Let the thermography camera cool to its operation temperature.
 - (2) Use the data in paragraph 4.A.(5) and 4.A.(6) to make the initial calibration adjustments

NONDESTRUCTIVE TEST

- (3) Make sensitivity and temperature level adjustments to the thermography camera.
- (4) Calibrate the thermography equipment with the reference standard or the airplane inspection area, as applicable, as follows:
 - (a) If you use the frozen reference standard to calibrate the instrument:
 - 1) See paragraph 3.A.1. for the reference standard preparation instructions.
 - 2) Put the reference standard at a distance that is equivalent to the distance between the thermography camera and inspection area on the airplane.
 - 3) Adjust the sensitivity and the temperature levels to make sure the ice is clearly seen with the best contrast.
 - (b) If you use the airplane inspection area to calibrate the instrument:
 - 1) Align the thermography camera so its view is perpendicular (approximately) to the inspection area as shown in Figure 3.
 - 2) Adjust the sensitivity and temperature levels to make sure subsurface structure or areas with subsurface ice or water can be clearly seen with the best contrast.

NOTE: Do not make an inspection with the thermography camera at a larger distance from the inspection area than the distance found in paragraph 4.A.(7).

- (c) Make a record of how the thermography camera controls are set.
- C. Calibrate the equipment to do a thermography inspection with a heat source as follows (This is the Heat Source Procedure):
- (1) Let the thermography camera cool to its operation temperature.
 - (2) Use the data in paragraph 4.A.(5) and 4.A.(6) to make the initial calibration adjustments.
 - (3) Calibrate the thermography equipment with the reference standard or the airplane inspection area, as applicable, as follows:
 - (a) To calibrate the thermography equipment with the reference standard:

NONDESTRUCTIVE TEST

- 1) Make sure that the reference standard contains water at room temperature.
 - 2) Point the thermography camera at the reference standard.
 - a) Make sure the thermography camera is less than the distance found in paragraph 4.A.7 from the reference standard.
 - 3) Apply heat to the reference standard equally with a quartz lamp.
 - a) As you apply the heat, monitor the surface temperature of the reference standard with the thermography camera to make sure that all areas of the inspection surface are heated equally. Do not heat the surface more than 10 degrees Celsius (18 degrees Fahrenheit).
 - 4) Immediately examine the reference standard and identify temperature differences caused by water.
 - 5) Adjust the thermography camera controls to get the best image contrast.
 - 6) Make a record of how the thermography camera is set.
- (b) To calibrate the thermography equipment on the airplane:
- 1) Get drawings of the inspection area.
 - 2) Point the thermography camera so it is perpendicular (approximately) to the calibration surface on the airplane in an area with subsurface structure.
 - 3) Apply heat to the inspection area equally with the quartz lamp.
 - a) As you apply the heat, monitor the surface temperature with the thermography camera to make sure that all areas of the inspection surface are heated equally. Do not heat the surface more than 10 degrees Celsius (18 degrees Fahrenheit).
 - 4) Immediately examine the surface with the thermography camera and identify temperature differences caused by water.
 - 5) Adjust the controls to get the best image contrast.

NONDESTRUCTIVE TEST

- 6) If no subsurface structure or water is seen then:
- a) Apply the heat several times and monitor the area for water. Permit the part surface to cool each time you apply heat.
 - b) If you do step 4.C.(3)(b)6)a) and you cannot see a subsurface structure or water, then look at an area with known subsurface structure to make sure the camera is set correctly as follows:

NOTE: It is necessary to see the subsurface structure or water to make sure the calibration is set correctly.

 - 1 Set the camera in a position to view a known subsurface structure.
 - 2 Apply heat to the subsurface structure.
 - 3 Monitor the area for the subsurface structure (and/or water)
 - c) If you could not identify the subsurface structure (or water) during steps 4.C.(3)(b)6)a) and b), do the calibration again on the reference standard.
- 7) Make a record of how the thermography camera is set.

5. **Inspection Procedure**

A. Use the "Flight Line" or "Heat Source" procedures to examine the inspection area as follows:

(1) Examine the inspection area with the "Flight Line" procedure as follows:

- (a) Point the thermography camera so it is perpendicular (approximately) to the inspection part. For inspection areas that are larger than the camera's field of view, point the camera at one end (corner) of the inspection area. Figure 3 shows how to position the camera.

NOTE: If the part to be examined has a septum or is made from separate panels, then each side of the part must be examined. Examine horizontal parts that have only honeycomb between the skins from the lower side of the part. Examine vertical parts that have only honeycomb between the skins from one side of the part.

- (b) Monitor the video display for local areas that are colder than the adjacent inspection area. Make small contrast adjustments if necessary.



NONDESTRUCTIVE TEST

- (c) Make a record of the local cold areas in the inspection area. These cold areas are possible defects. It is necessary to do more analysis of these areas. Use one of the procedures that follow to make the record.
 - 1) Make a record of the defect data on a digital storage system (floppy disk drive or video cassette recorder) or,
 - 2) Make a record of the defect areas on the airplane with an approved pencil or marker.
 - (d) Move the thermography camera to the next inspection area. If the inspection area is too large to fit in the camera's field of view, make sure that subsequent adjacent images overlap.
 - (e) Make sure the thermography camera is perpendicular (approximately) to the inspection surface.
 - (f) Do paragraphs 5.A.1.(b) thru 5.A.1.(e) until the full inspection area is examined. Stop the inspection if one (or more) of these conditions occur.
 - 1) You cannot see the ice/water in the reference standard.
 - 2) You cannot see subsurface structure in the inspection area.
 - 3) One hour has passed since the airplane landed.
- (2) Examine the inspection area with the "Heat Source" Procedure in the Maintenance Facility as follows:
- (a) Point the thermography camera so it is perpendicular (approximately) to the inspection part. For inspection areas that are larger than the camera's field of view, point the camera at one end (corner) of the inspection area. Figure 3 shows how to position the camera.
- NOTE:** If the part to be examined has a septum or is made from separate panels, then each side of the part must be examined. Examine horizontal parts that have only honeycomb between the skins from the lower side of the part. Examine vertical parts that have only honeycomb between the skins from one side of the part.
- (b) Apply heat to the inspection area equally with the quartz lamp.
 - 1) As you apply the heat, monitor the surface temperature with the thermography camera to make sure that all areas of the inspection surface are heated equally. Do not heat the surface more than 10 degrees Celsius (18 degrees Fahrenheit).

NONDESTRUCTIVE TEST

- (c) Immediately examine the part and identify temperature differences caused by water.
- (d) Adjust the thermography camera controls to get the best image contrast. If no subsurface structure or water is seen then:
 - 1) Apply the heat several times and monitor the area for water. Permit the part surface to cool each time before you apply heat.
 - 2) If you do step 5.A.(2)(d)1) and you cannot see subsurface structure or water, then look at an area with known subsurface structure to make sure the camera is set correctly as follows:
 - a) Set the camera in a position to view a known subsurface structure.
 - b) Apply heat to the subsurface structure.
 - c) Monitor the area for the subsurface structure (and/or water).
 - 3) If you could not identify the subsurface structure (or water) during steps 5.A.(2)(d)1) and 2), do the calibration again on the reference standard.
- (e) Make a record of the local cold areas in the inspection area. These cold areas are possible defects. It is necessary to do more analysis of these areas. Use one of the procedures that follow to make the record.
 - 1) Make a record of the defect data on a digital storage system (floppy disk drive or video cassette recorder) or,
 - 2) Make a record of the defect areas on the airplane with an approved pencil or marker.
- (f) Move the thermography camera to the next inspection area. If the inspection area is too large to fit in the camera's field of view, make sure that subsequent adjacent images overlap.
- (g) Make sure the thermography camera is perpendicular (approximately) to the inspection area.

NONDESTRUCTIVE TEST

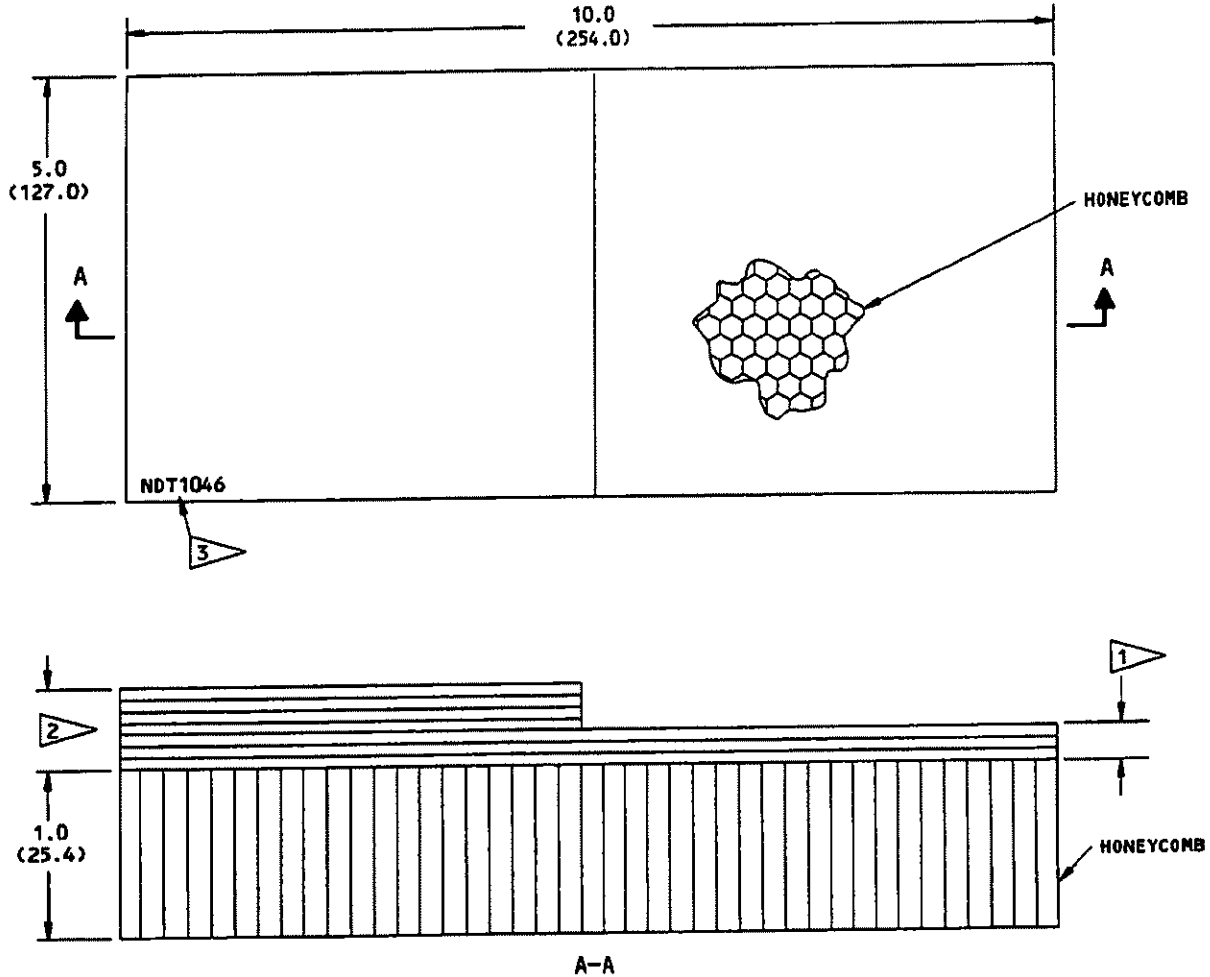
- (h) Do 5.A.(2)(b) thru 5.A.(2)(g) until the full inspection area is examined.

NOTE: No time limit is applicable if the heat and examination cycle is continued.

6. Inspection Results

- A. Compare the defect indications with drawings of the inspection area.
 - (1) All high contrast areas that are not caused by structural material changes (fasteners, doublers, fittings) must be thought of as ice or water and the areas must be examined some more. Figure 4 shows example thermographs.
- B. Make sure that all of the surface contamination has been removed to make sure that the identified defect areas contain ice or water. Local surface conditions (chipped paint, grease, dirt) can cause incorrect defect indications.
- C. Use a different NDT procedure, if possible, to make sure of the results.

BOEING 
COMMERCIAL JET
 NONDESTRUCTIVE TEST



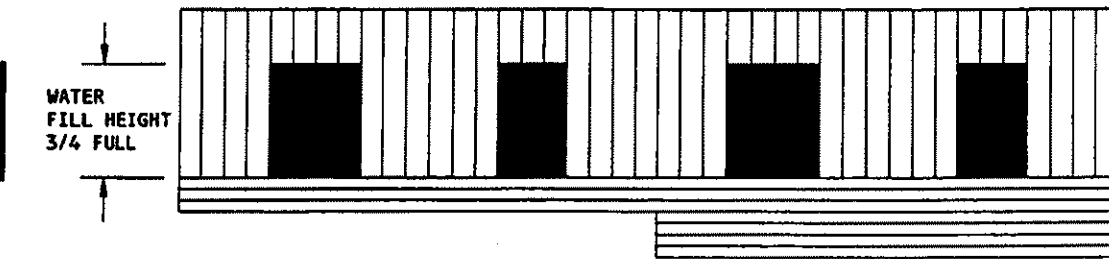
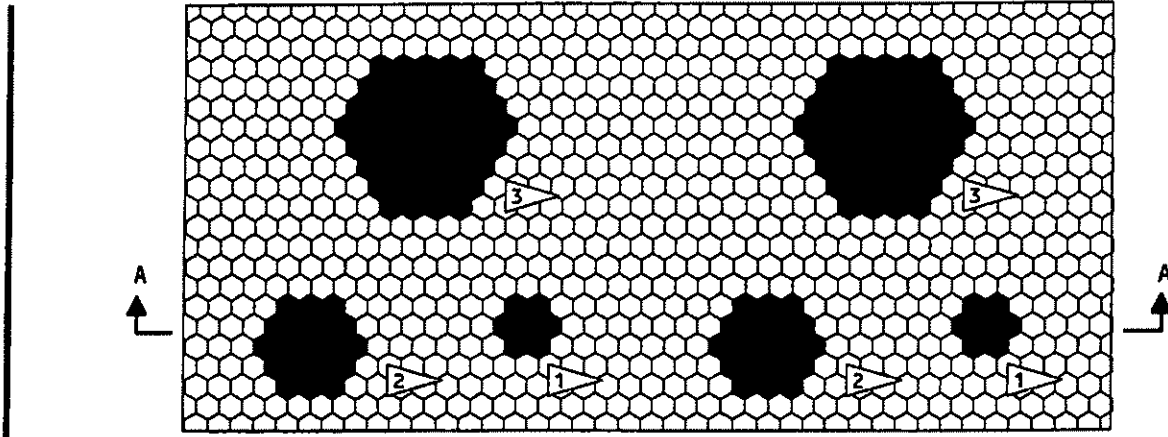
NOTES

- ALL DIMENSIONS ARE IN INCHES (MILLIMETERS ARE IN PARENTHESES)
- TOLERANCE: ± 0.1 (2.5)
- MAKE THE REFERENCE STANDARD FROM THE SAME MATERIALS THAT ARE USED IN THE INSPECTION AREA

- 1** USE THREE PLYS (MINIMUM) IF MADE FROM NONMETALLIC COMPOSITE. THE THICKNESS MUST BE EQUIVALENT TO THE MINIMUM THICKNESS IN THE INSPECTION AREA.
- 2** THIS THICKNESS MUST BE EQUIVALENT TO THE MAXIMUM SKIN THICKNESS IN THE INSPECTION AREA.
- 3** IDENTIFY THE REFERENCE STANDARD NUMBER "NDT1046" IN THIS AREA.

Reference Standard NDT1046
Figure 1




BOEING 
COMMERCIAL JET
 NONDESTRUCTIVE TEST



A-A

NOTE:

FILL ADJACENT CELLS WITH WATER TO GET THE APPROXIMATE DIAMETERS SHOWN IN THE FLAGNOTES. THE ACTUAL SIZE WILL CHANGE WITH THE DIMENSIONS OF THE CORE CELLS. PUT TAPE ON THE CORE TO SEAL THE WATER.

-  0.5 INCH (13mm) DIAMETER
-  1.0 INCH (25mm) DIAMETER
-  2.0 INCH (50mm) DIAMETER

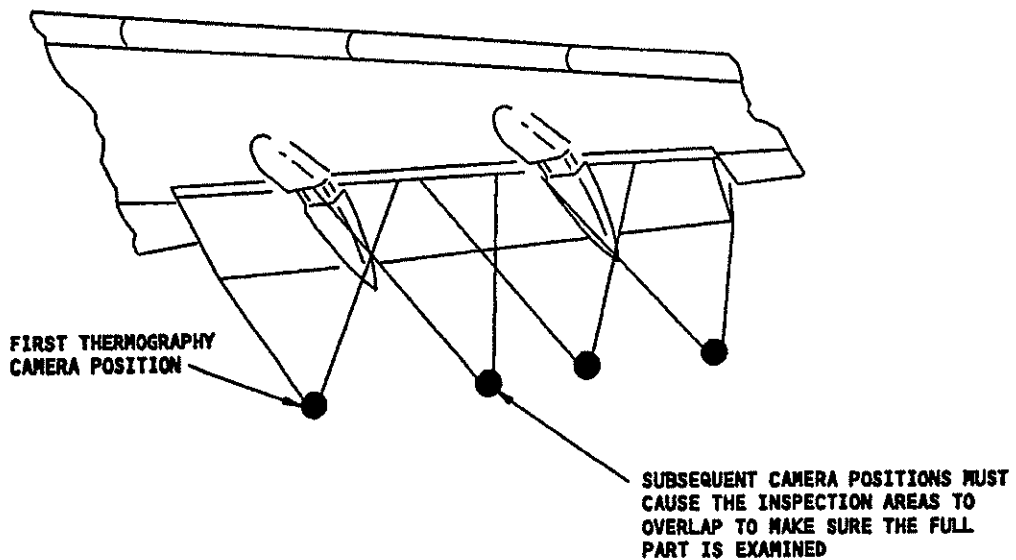
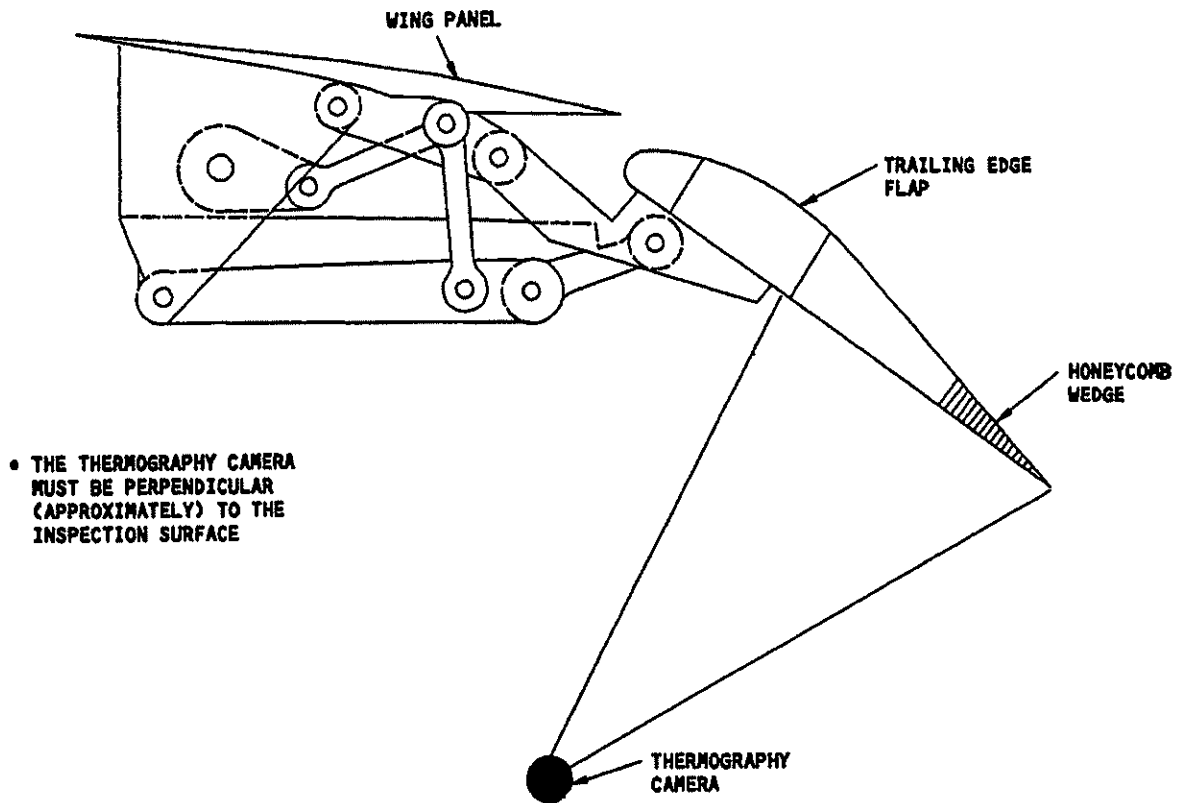
Subsurface Water Preparation
 Figure 2

E76438

CMN NDT
 May 5/96

Part 9
 51-00-01
 Page 11

BOEING 
COMMERCIAL JET
NONDESTRUCTIVE TEST

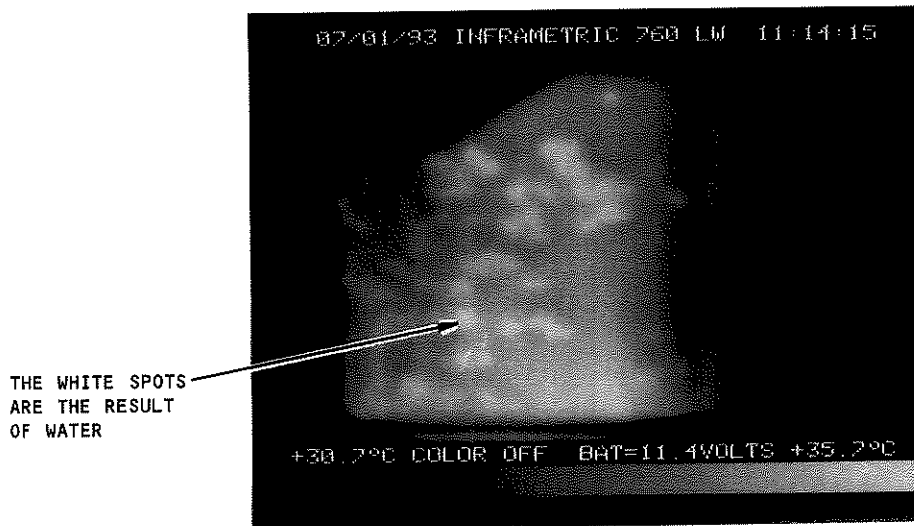


Example of How to Position the Thermography Camera
Figure 3

BOEING
NONDESTRUCTIVE TEST



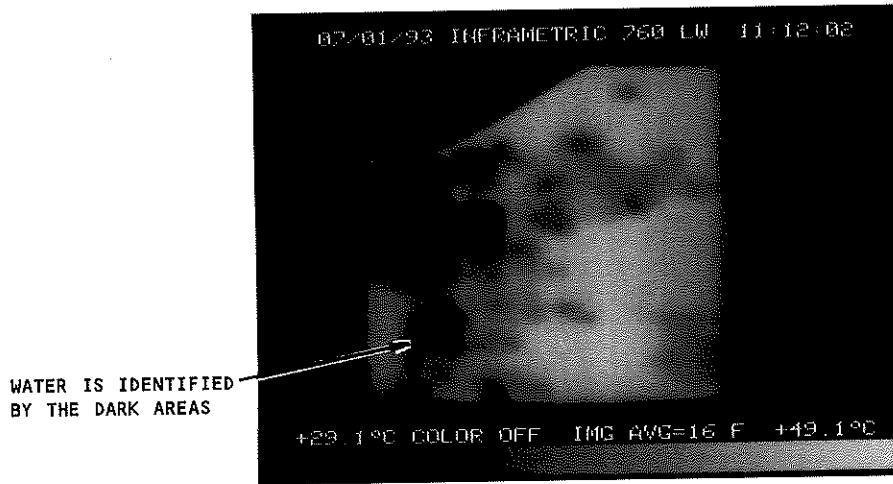
SKIN HOTTER THAN THE WATER



WATER HOTTER THAN THE SKIN

Example Thermographs
Figure 4 (Sheet 1)

BOEING
NONDESTRUCTIVE TEST



EXAMPLE OF SHADOW EFFECT
AROUND WATER FILLED CELLS

Example Thermographs
Figure 4 (Sheet 2)

U48010

Part 9
51-00-01
Page 14

CMN NDT
Feb 5/95

**Annexe 2 : Définition des différents paramètres
caractérisant le capteur**

Définition des différents paramètres caractérisant le capteur

MRTD

Paramètre subjectif qui décrit la capacité d'un système homme-imageur à détecter des détails faiblement contrastés de l'objet testé. C'est une fonction de la différence de température minimum entre les barres d'une cible de 4 barres et l'arrière plan nécessaire pour la résolution de l'image thermique des barres par un observateur en fonction de la fréquence spatiale de la cible.

MDTD

Paramètre subjectif qui décrit la capacité d'un système imageur-homme à détecter des cibles de petites tailles. C'est une fonction de la différence de température minimale entre une cible circulaire (carrée) et l'arrière plan nécessaire pour la détection de la cible par un observateur en fonction de l'inverse de la taille spatiale de la cible.

SITF

Partie linéaire de la fonction de réponse. C'est la tangente de l'angle entre la fonction de réponse et l'axe des températures (pente de la partie linéaire).

Dynamic range

Rapport entre le signal d'entrée mesurable maximum et le signal d'entrée mesurable minimum.

Niveau de saturation

Partie supérieure de la fonction de réponse

SRF

Fonction du signal généré par une fente en fonction de la largeur de la fente normalisée par le signal généré par une fente très large. Le SRF fournit directement des informations sur la capacité du système à détecter des cibles longues et étroites.

ATF

Réponse normalisée du système face à une cible circulaire de taille variable. Cela fournit de l'information sur la capacité du système à détecter des petites cibles.

NETD

Différence de température entre une cible corps noir et son arrière plan nécessaire pour produire un rapport signal/bruit égal à l'unité.

FPN

Bruit spatial haute fréquence. Le bruit spatial génère des variations spatiales de l'intensité des pixels même en cas de cible de température uniforme.

IFOV

Dimensions angulaires d'un détecteur simple d'un FPA utilisé dans la caméra.
IFOV (mrad) = $a(\text{um})/f(\text{mm})$

MTF

Fonction du contraste de l'image d'une cible sinusoïdale à une fréquence spatiale donnée relativement au contraste à la fréquence zéro.

CTF

Idem MTF mais la cible varie en carré à une fréquence spatiale donnée.

EIFOV

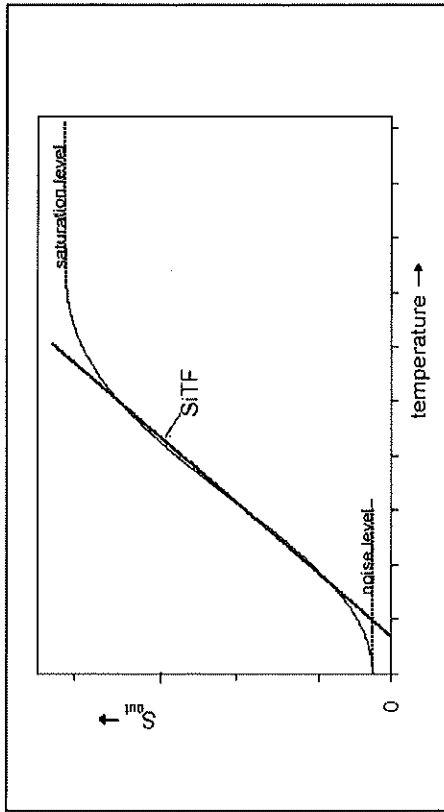
EIFOV = $1/2\text{HF}$ où HF est la fréquence spatiale à laquelle MTF tombe à 0,5

Précision

Plage autour de la température vraie de l'objet dans laquelle la température de sortie est sûre lorsque les sources externes d'erreurs sont négligeables.

Sensibilité

La courbe de sensibilité en température est la dérivée de la courbe d'étalonnage en température. Elle prend une valeur variable en fonction de la température T_0 observée



Fréquence (cycles/mm)	MTF	Original pattern	Image
1	0.94		
2	0.78		
3	0.57		
4	0.37		
5	0.21		
6	0.11		
7	0.05		
8	0.02		
9	0.01		
10	0.0		

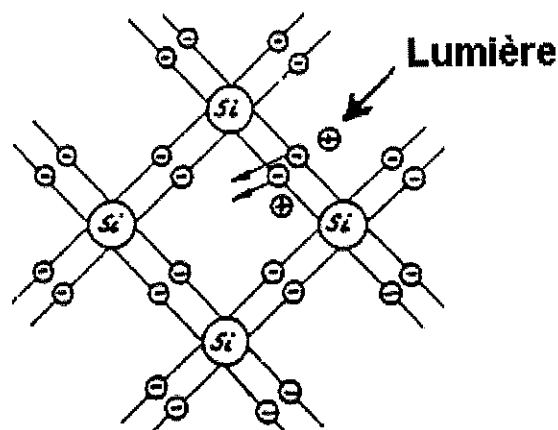
Annexe 3 : Description des capteurs pour caméra infrarouge

ANNEXE 3 : Description des capteurs pour caméra infrarouge

a) Description d'un capteur quantique HGcdTe

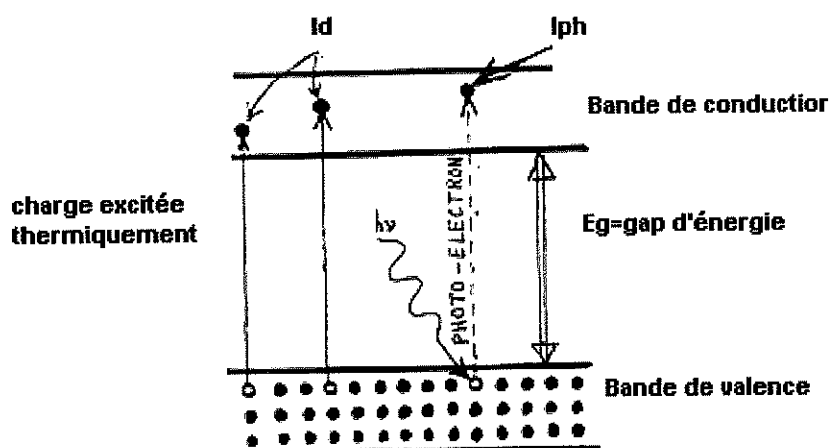
Les détecteurs quantiques sont les détecteurs les plus rapides et les plus sensibles car ils exploitent l'interaction directe photon-électrons de l'effet photoélectrique.

Le principe de fonctionnement d'un détecteur quantique peut facilement être visualisé au moyen d'une image 2D d'un cristal de silicium : chaque photon absorbé brise une liaison covalente créant dès lors une paire électron-trou.



Annexe 3 Figure 1: Apparition d'électrons libres par absorption de lumière

L'absorption d'un photon transfère un « photon-électron » dans la bande de conduction laissant un trou dans la bande de valence. Les photo-électrons forment le photo-courant I_{ph} représentant la distribution de température dans le plan objet.



Annexe 3 Figure 2: Fonctionnement d'un détecteur quantique

Le schéma de fonctionnement explique aussi le narcissisme des détecteurs quantiques dû aux charges excitées thermiquement formant le courant d'obscurité I_d du détecteur photovoltaïque.

Comme le courant d'obscurité est donné par :

$$I_d = I_0 \exp\left[-\frac{E_g}{KT}\right] \quad \text{[Équation 1]}$$

Il s'en suit que le narcissisme (c-à-d le détecteur voit sa propre température plutôt que la température de la cible) peut être réduit en refroidissant le détecteur.

Il s'en suit de la figure 2 que le photon $h\nu$ ne peut être absorbé que si

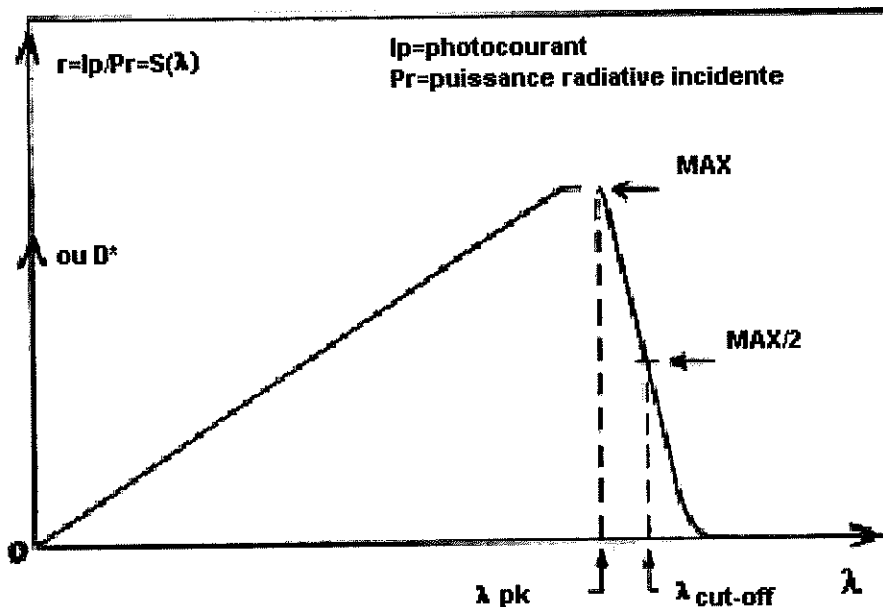
$$h\nu = hc/\lambda > E_g \quad \text{[Équation 2]}$$

où E_g est le gap d'énergie.

L'expression peut aussi s'écrire :

$\lambda < \lambda_c$ où $\lambda_c = hc/E_g$ est la longueur d'onde de coupure donnée par la formule pratique

$$\lambda_c(\mu) = 1,24/E_g(\text{eV}) \quad \text{[Équation 3]}$$



Annexe 3 Figure 3: La sensibilité spectrale chute rapidement au-dessus de la longueur d'onde de pic

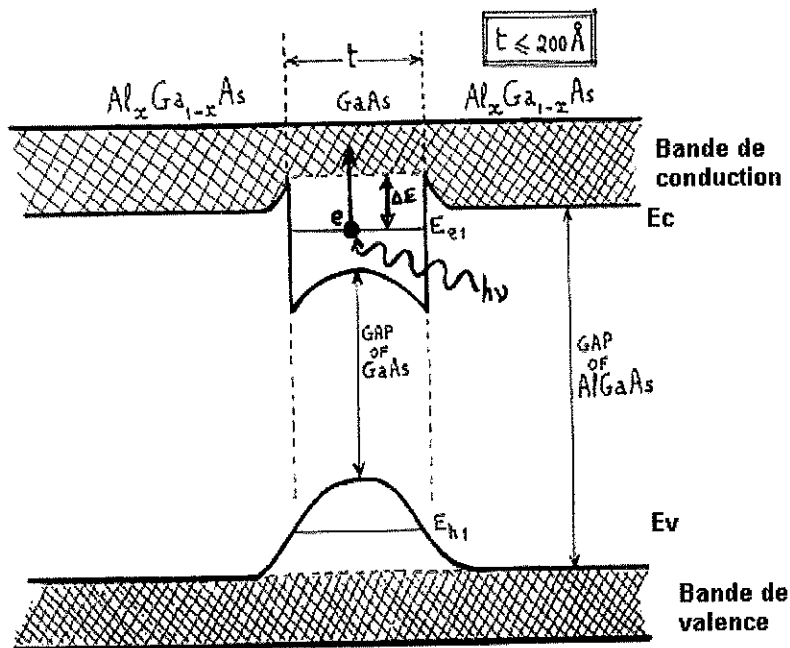
En conclusion, un photon peut seulement être absorbé en-dessous de la longueur d'onde de coupure. Le détecteur quantique sera transparent pour tous les photons dont la longueur d'onde est supérieure à λ_c .

Comme la longueur d'onde du pic de la réponse λ_{pk} est proche de la longueur d'onde de coupure λ_c , il s'en suit que les imageurs ($3\mu\text{m}-5\mu\text{m}$) nécessitent un semi-conducteur avec un gap $E_g=0,25\text{ eV}$ (correspondant $\lambda_c=5\mu\text{m}$) tandis qu'un imageur ($8\mu\text{m}-12\mu\text{m}$) nécessite un semi-conducteur avec un gap $E_g=0,1\text{ eV}$, ce qui est très faible comparé aux valeurs habituelles de $E_g=1\text{ eV}$ pour les semi-conducteurs classiques tels Si, Ge ou GeAs.

Dans la caméra Thales, le matériau choisi est la CMT (Cadmium Mercure Tellure) refroidi à 77K.

b) Description d'un capteur QWIP

Un "quantum well" est formé lorsque une fine couche de matériau puits (« well ») (comme le GaAs pur) avec un gap d'énergie faible et une épaisseur $t < 200 \text{ \AA}$ ($200 \text{ \AA} = 20 \text{ nm}$ est la longueur d'onde de Broglie des électrons dans le GaAs à 300 K, c'est-à-dire que le caractère ondulatoire des électrons est dominant), est entourée d'un matériau barrière (comme $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) avec un gap d'énergie plus important, c'est-à-dire que le matériau puits est en sandwich entre deux matériaux barrières.



Annexe 3 Figure 4: Structure d'un Quantum Well (QW).

Dans le puits quantique, en-dessous du continuum des niveaux d'énergie de la bande de conduction, il existe des niveaux d'énergie discrets E_{e1} (appelé états limites). La même situation existe dans la bande de valence (E_{h1}).

Le nombre et les dimensions de ces états limites dépendent de l'épaisseur t du matériau puits et de la composition x ($0 < x < 1$) du matériau barrière. Les électrons situés dans un état limite peuvent seulement être transportés par effet tunnel (autrement ils ne peuvent s'échapper du puits) tandis que les

électrons dans le continuum de la bande de conduction sont libres de se déplacer sans effet tunnel.

Pour réaliser un QWIP, le puits quantique est étudié (par le choix de x et t) pour ne contenir qu'un état limite E_{el} dont l'énergie de séparation ΔE par rapport au continuum est bien inférieure au gap d'énergie du matériau puits. ($E_g=1,43$ eV pour le GaAs). Les électrons sont excités vers ce continuum au-dessus des barrières par des radiations IR à grandes longueurs d'onde.

Une fois que ces électrons sont arrivés dans le continuum, ils sont libres de se déplacer et d'être transportés sans effet tunnel.

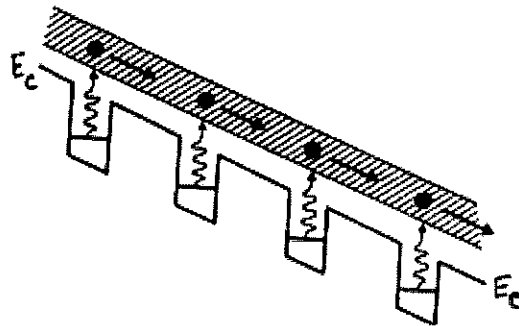
Ce détecteur présente une grande sensibilité avec une longueur de coupure $\lambda_c=1,24/\Delta E=12\mu m$ parce que l'énergie de séparation $\Delta E=0,1$ eV.

Il faut bien sûr refroidir un détecteur QWIP à très basse température puisque l'énergie de séparation ΔE est très faible.

L'énergie de séparation ΔE et donc la longueur d'onde de coupure λ_c sont ajustables en jouant sur x ou t .

Le détecteur QWIP utilise une absorption intrabande (c-à-d à l'intérieur même de la bande de conduction) à la place d'une absorption interbande (cas où un électron de la bande de valence est excité vers la bande de conduction) comme le font les autres types de détecteurs.

La figure suivante (où l'inclinaison du niveau d'énergie E_c est due au biais appliqué) représente la structure d'un détecteur quantum well multiple (MQW).



Annexe 3 Figure 5: Structure de MQW

Par rapport à un quantum well simple, le MQW augmente fortement l'efficacité quantique du détecteur puisque chaque photon impactant a plus de chance d'être absorbé. S'il n'est pas absorbé dans le premier puits, il peut être absorbé dans le deuxième, ou le troisième. Habituellement un MQW comprend 40 à 50 quantum well.

La longueur d'onde de coupure d'un QWIP peut être ajustée par le choix judicieux de x et t mais également en jouant sur la tension de biais appliquée.

La technologie QWIP présente de nombreux avantages sur les autres détecteurs :

- Les matériaux semi-conducteurs utilisés (GaAs/AlGaAs) sont beaucoup plus stables et plus faciles à fabriquer que le HgCdTe.
- L'uniformité est très bonne, l'opérabilité (pixels utilisables) dépasse 99%.
- De larges matrices peuvent être fabriquées (512x512).
- La détectivité spécifique D^* est 2 à 3 fois supérieure à celle du HgCdTe.

- La sensibilité spectrale peut être réglée sur un intervalle très tendu (de $3\mu\text{m}$ à $19\mu\text{m}$).

Par contre la technologie QWIP comporte également quelques désavantages dont une efficacité quantique inférieure à celle du HgCdTe et la nécessité d'un refroidissement (65K) inférieure à la température de l'azote liquide.

**Annexe 4 : Description des caméras Thales Sophie et
FLIR SC3000**



SOPHIE

Low-weight and multi-application binoculars/thermal imager



The reference in Hand-Held Binoculars and Thermal Imager

- Day & night passive operation
- High resolution 754 x 576 stabilised image
- Image capture, mission reporting
- Detection of camouflaged targets
- 8 - 12 μm , the solution insensitive to solar dazzle and battlefield obscurants
- In service worldwide - combat proven



SOPHIE

Low-weight and multi-application binoculars/thermal imager

CHARACTERISTICS

Spectral band:

- 8-12 μ m

Field of view (FOV)-CCIR:

- Wide FOV : 8° x 6°
- Narrow FOV : 3.2° x 2.4°
- Electronic zoom (x2) : 1.6° x 1.2°

Image resolution:

- 754 x 576

Thermal sensitivity (NETp):

- < 50 mK

Boresighting:

- Axis stability < 0.6 mrad

Weight:

- 2.4kg

Size:

- 31 x 25 x 11 cm

Video standard:

- 625 lines or 525 lines (SMPTE 170M)

Power supply:

- 15 VDC

Battery life:

- > 5 hours with rechargeable battery

Remote control:

- RS 422 serial datalink

Cooling:

- Integrated micro-cooler, rotative stirling type

Cooling down time:

- < 5 min

Internal display:

- OLED

Temperature range:

- Operating : -40°C to +55°C

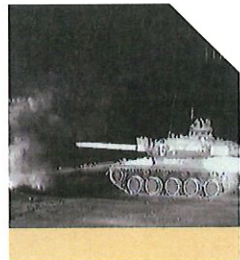
Environmental conditions:

- Fully ruggedised / mil STD 461 and MIL STD 810 - Military wheeled vehicles

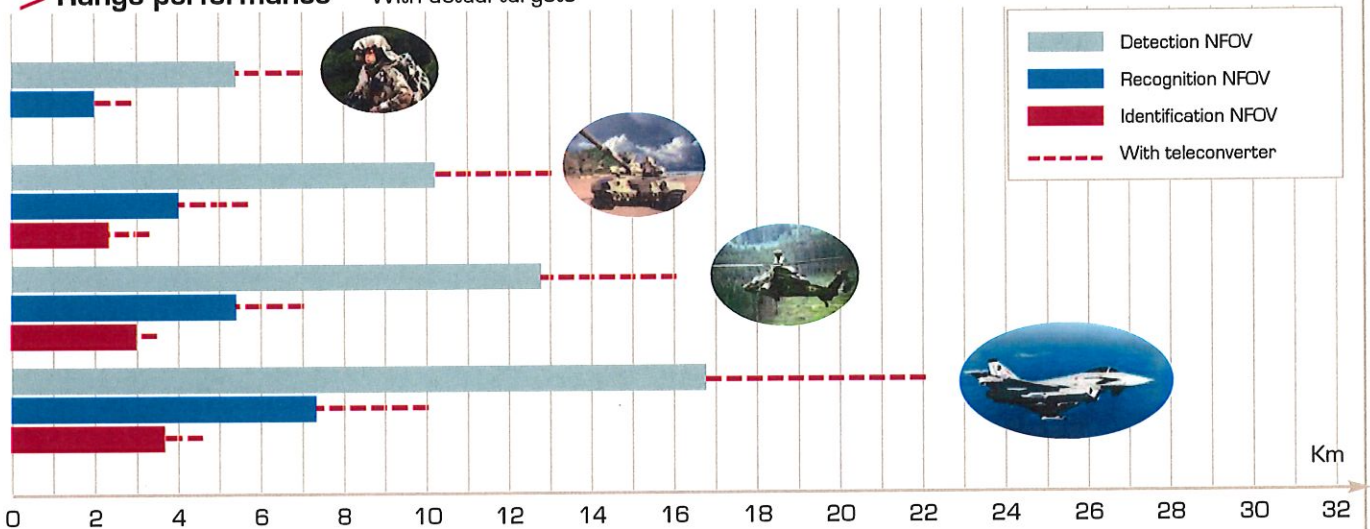
ACCESSORIES

- Tripods, displays
- Batteries, rechargeable batteries
- Battery Chargers
- AC or DC Converters
- Optical tele-converters
- Integrated HH Display/remote box
- Transmission and tele-operation

- Large FOV (20°) teleconverter for operation in urban area
- Transmission and tele-operation
- Integrated HH display / Remote control box



> Range performance With actual targets



ThermaCAM® SC 3000

Caméra infrarouge «hautes performances», idéale pour les applications scientifiques, et de recherche et développement

La caméra ThermaCAM SC 3000 a été étudiée et conçue spécifiquement pour répondre aux besoins pointus en thermographie des scientifiques et des départements de recherche et de développement. La ThermaCAM se situe au sommet de sa catégorie d'instruments et répond aux attentes des utilisateurs de ces marchés, qui considèrent qu'une sensibilité thermique extrêmement élevée, une excellente qualité d'image, une très grande précision et des possibilités très poussées de traitement de l'image sont des atouts fonctionnels essentiels pour aborder leurs applications d'analyse thermique.

Haute technologie du plan focal

La SC 3000 offre une impressionnante palette de caractéristiques fonctionnelles, qui font d'elle une nouvelle référence en instrumentation. La haute technologie du détecteur plan focal QWIP dote la SC 3000 d'une très grande pré-

La caméra ThermaCAM SC 3000 QWIP possède une sortie vidéo numérique 14-bits en temps réel. Elle offre d'incomparables performances de précision de mesure et de sensibilité thermique.

cision de mesure de température à $\pm 1^\circ\text{C}$ et d'une sensibilité thermique de moins de $0,02^\circ\text{C}$ (à 30°C). La technologie QWIP s'annonce dès aujourd'hui comme la technologie matricielle radiométrique du futur. Le détecteur QWIP, unique en son genre, utilisé par la ThermaCAM SC 3000 permet à l'utilisateur l'acquisition d'images thermiques à une fréquence maximale de 750 Hz (900 Hz en version NTSC).

Une flexibilité inégalée

En dehors des caractéristiques techniques intrinsèques demandées à toute caméra infrarouge, la grande flexibilité de la SC 3000 est un atout non négligeable. En effet, il n'est pas rare de constater que les applications en recherche peuvent varier d'une année sur l'autre et d'un projet à l'autre. Aucune autre caméra infrarouge ne peut offrir la grande variété d'optiques, d'options de traitement de l'image et de transfert des données qu'on trouve sur la SC 3000.

La SC 3000 possède l'option de sauvegarde d'images de haute définition spatiale et thermique sur des cartes PCMCIA de grande capacité. Ces images pourront ensuite être analysées au moyen de la caméra, ou de nos programmes de traitement d'images tournant sous Windows®. Pour la mémorisation en temps réel, le chercheur peut sélectionner le stockage d'images sur un PC Portable, en utilisant une simple interface numérique de type PCMCIA. Lorsque l'utilisateur souhaite bénéficier de la pleine puissance de nos logiciels, il peut utiliser la sortie numérique de la caméra et transmettre des images 14 bits à des vitesses maximales de transfert de données de 750 Hz, vers notre système numérique de traitement d'images : ThermaCAM Researcher™.



BIBLIOGRAPHIE

- (1) Servais P., Generalization of thermography for in field non destructive testing of aircraft composite structures, VUB, 2008.
- (2) Gerlach N., Comparison of Thermal Imaging Systems Used in Thermography as a Non Destructive Testing Method for Composite Parts, ECNDT 2006, Berlin, 2006.
- (3) Gerlach N., Non destructive testing using thermography method for composite material inspection, Técnicas de Análise Experimental, ISEP, Porto, 2006.
- (4) Gerlach N., Servais P, Développement de la thermographie infrarouge comme méthode d'essais non destructifs, BANT, Liège, 2005.
- (5) Servais P., Gerlach N., Habermehl J., Ibarra-Castanedo C., Maldague X, Characterization of manufacturing and maintenance aerospace composite defects using infrared thermography, Materials Evaluation, Septembre 2008.
- (6) Bathias C., Matériaux composites, Dunod/L'Usine Nouvelle, 2005.
- (7) Gerlach N., Technique des matériaux, IMPRISIL, 2005.
- (8) Gay D., Matériaux composites, 4^{ème} édition, Hermes, 1997.
- (9) Sabena Technics, M & O Technical Training, AV-BASICS MOD 2 FR, 1997.
- (10) Olivier P., Marguerès P., Orteu J., Contrôles non-destructifs et matériaux composites, Journée scientifique et technique - AMAC/COFREND - Revue des composites et des matériaux avancés - Volume 17 - N° 2/2007
- (11) David Turnbull J., TP 185 - Sécurité aérienne - Nouvelles , Bulletins de la sécurité aérienne, Transport Canada , N°4, 2007.
- (12) Essais non destructifs (Recueil 2003 sur CD-ROM), Editions Lavoisier, 03-2003.
- (13) Perdijon J., Aide-mémoire du contrôle des matériaux, Dunod/L'Usine Nouvelle,2003.
- (14) Cartz L., Nondestructive Testing, ASM International, 1995.
- (15) Wache G., Le contrôle non destructif par ressuage, Journal du traitement thermique, n°223, pp.66-70,1988.
- (16) Gerlach N., Les essais non destructifs, DEFI, 2000.
- (17) Chemin P., Dubosc P., Présentation des normes et codes utilisés en magnétoscopie, Contrôle Essais et Mesures, 2008.
- (18) Cousin M., Le contrôle qualité par courants de Foucault à chaud et à grande cadence. Les trains à fil (1000°C-100 m/s), Revue pratique de contrôle industriel, 1985, vol. 24, no133bis, pp. 57-60.

- (19) Perdijon J., Le contrôle non destructif par ultrasons, Hermes, 1993.
- (20) Peix G., Contrôles non destructifs, INSA De Lyon, 1980.
- (21) Rao M., Review of nondestructive evaluation techniques for FRP composite structural components, Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, West Virginia, 2007.
- (22) M.-A. DE SMET, LA SHEAROGRAPHIE - UNE SOLUTION?, COFREND Congress on Nondestructive Testing, 22-26 septembre 1997.
- (23) DESCOMBES M., Les essais non destructifs par micro-ondes: principe, dispositifs et applications, Revue pratique de contrôle industriel, vol. 33, no188, pp. 54-57, 1994.
- (24) Pajani D., Mesure par Thermographie Infrarouge, ADD Editeur, 1989.
- (25) http://tice.utc.fr/moodle/file.php/121/cours_thermographie.pdf
- (26) Maldague X., Nondestructive testing handbook volume 3: Infrared and Thermal Testing, American Society for Nondestructive Testing, 2001.
- (27) Pajani D., Bremond P., Thermographie infrarouge appliquée à la maintenance industrielle, ADD Editeur, 1991.
- (28) Maldague X., Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing, John-Wiley & Sons, 2001.
- (29) Ibarra-Castanedo C., Maldague X., Digital treatment of thermal data by quantitative pulsed phase thermography for the non-destructive evaluation of materials, Electrical and Computer Engineering, 2004. Canadian Conference, Volume 3, Issue, 2-5 May 2004 Page(s): 1757 - 1760 Vol.3.
- (30) Fourier J.B., Théorie analytique de la chaleur, Edition Firmin, 1822.
- (31) D. Wu, Th. Zweschper, A. Salerno, and G. Busse, Lock-in Thermography for Nondestructive Evaluation of Aerospace Structures, ECNDT 98, Vol. 3, Septembre 1998.
- (32) Wu D., Salerno A., Malter U., Aoki R., Kochendörfer R., Kächele P. K., Woithe K., Pfister K., Busse G., Inspection of aircraft structural components using lockin-thermography. Proc. QIRT'96, Edizioni ETS, Pisa, 251-256.
- (33) Zweschper Th., Dillenz A., Riegert G., Scherling D., Busse G., Lockin Thermography Methods for the NDT of CFRP Aircraft Components, Proc. 8th ECNDT Barcelona, 2002.
- (34) Chrzanowski K., Park S.N., Evaluation of Thermal Imagers For Non-Destructive Thermal Testing Applications, Infrared Physics and Technology, 42 (2) 101-105, 2001.
- (35) Fu-Chau Lu, Evaluation of Effective MDTD/MRTD for FLIR From PREOS92 Measurement Data, Naval postgraduate School, Monterey CA, 1996.
- (36) Schweicher E., Thermal IR imagers : a non-exhaustive review, Optronics & Microwaves, Royal Military Academy, Brussels.

- (37) www.inframet.com/Technical_Specifications/DT%20750.pdf
- (38) La thermographie infrarouge en maintenance prédictive - Cas du centre hospitalier Saint-Joseph-Espérance, Portail de l'énergie en Région wallonne, 2004.
- (39) http://tice.utc.fr/moodle/file.php/121/cours_thermographie.pdf
- (40) http://vision.gel.ulaval.ca/fr/Projects/Id_148/Projet.php
- (41) http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6a/Atmosfaerisk_spre_dning.gif
- (42) Ibarra-Castanedo C., González D., Galmiche F., Maldague X. P., Bendada A., Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data, SPIE - The International Society for Optical Engineering, Thermosense XXVIII, 2006.
- (43) Bellaïche P., Les Secrets de l'Image Vidéo, 5ème édition, Eyrolles, 2003.
- (44) Roy S., Tardif JP., Drouin MA, Vision par ordinateur: formation d'image et photographie, Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal, 2007.
- (45) Ibarra-Castanedo C., Bendada A. , Maldague X., Thermographic Image Processing for NDT, IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, 2007.
- (46) Fisher R., Perkins S., Walker A., Wolfart E., Image processing learning resources, Hypermedia Image Processing Reference (HIPR), University of Edinburgh, 2004.
- (47) Chan R., Ho C., Nikolova M. ,IEEE Transactions on Image Processing, 14 (2005), 1479-1485.
- (48) Ibarra-Castanedo C., Genest M., Guibert S., Piau JM, Maldague X., Bendada A., Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: A comparative study, SPIE - The International Society for Optical Engineering, Thermosense XXIX, Orlando, FL, USA, 9-13 April 2007.
- (49) Ibarra Castanedo C., Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography : depth retrieval with the phase.
- (50) Maldague X. And Vavilov V., Basics of Infrared Thermography, Quantitative Infrared Thermography QIRT'04.
- (51) IBARRA-CASTANEDO C. AND MALDAGUE X., Pulsed Phase Thermography Reviewed, QIRT J., 1(1):47-70, 2004.
- (52) KRAPEZ J. C. AND CIELO P. , Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures. I: 1D Analysis, Res. Nondestr. Eval., 3(2):81-100, 1991.
- (53) IBARRA-CASTANEDO, C. AND MALDAGUE X., Interactive Methodology for Optimized Defect Characterization by Quantitative Pulsed Phase Thermography, 2005.

- (54) Maldague X., Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing, 392-397, John-Wiley & Sons, 2001.
- (55) Parker WJ, Jenkins RJ, Butler CP, Aboott GL, Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity, Journal of Applied Physics, 1679-1684, 1961.
- (56) Tascalos D., Diffusivité thermique, Techniques de l'ingénieur, 1984.
- (57) Hay B., Filtz JR., Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash, Technique de l'ingénieur, 2004.
- (58) STANAG No. 4349, Measurement of the minimum resolvable temperature difference (MRTD) of thermal cameras.
- (59) Holst G., Testing and evaluation of infrared imaging systems, JCD Publishing, 2008.
- (60) Holst G., Electro-optical imaging system performance, JCD Publishing, 2008.
- (61) Balageas DL, Déom AA, Boscher DM, Characterization and non-destructive testing of carbon-epoxy composites by a pulsed photothermal method, Materials Evaluation, 1987.
- (62) Rabet L, Scheppers J., Verpoest I., Pirlot M., Desmet B., Gilson L., Pirard P., Development of low cost composite plates for humanitarian demining operations, 2006.
- (63) Mayer M. Report of the Internship at the Department of electrical and Computer Engineering at the Université Laval, 2006.
- (64) Thomas Krell, Ralph Brandenburg, Elmar Lauterborn, Wehrwissenschaftliches Institut für Werk-, Explosiv und Betriebsstoffe, WIWEB Erding, Germany, Proceedings of the 9th ECNDT, Berlin, Sept 2006.
- (65) Couturier J-P. and Maldague X., Pulsed Phase Thermography of Aluminum Specimens, Proc. SPIE, vol 3056, 1997, p. 170-175.
- (66) Garcia J., Hernandez N., Morales A., Servent R., Considerations of Thermographic Inspection Reliability of Aircraft Components, Proc. 8th ECNDT Barcelona, 2002.
- (67) Lapresté J-T., Introduction à Matlab, Ellipses, 1999.
- (68) Maldague X. and Marinetti S., Pulse Phase Infrared Thermography, J. Appl. Phys., vol 79, no 5, 1996, p2694-2698.
- (69) Wall M., Wedgwood F.A. , Burch S., Modelling of NDT Reliability (POD) and Applying Corrections for Human Factors, NDT.net-June 1998.
- (70) Technical Manual Non Destructive Inspection, T.O. 1F-16A-36, F-16A & B Aircraft, Lockheed Martin Corporation, Section 3 Stabilizer Inspection, 10 October 2004 (change 15).
- (71) Vavilov V, Nesteruk D, Detecting water in aviation honeycomb structures: the quantitative approach, Tomsk Polytechnic University, Institute of Introscopy, QIRT Journal, Volume 1, N°2, 173-184, 2004.

- (72) Lt Col Trivisonno G., Maj Dati E., Water detection in honeycomb structure by use of thermography, Italian Air Force, Chemistry Department, RTO, AVT Panel 124, Budapest, Apr 2005.
- (73) Meyer P., Anderson J., Branson K., Ultrasonic testing using phased arrays, 157me WCNDT, Rome, 2000.
- (74) Reinersmann J., Phased array technology for standard ultrasonic testing, Middle East non destructive testing conference, Bahrain, 2005.
- (75) Les ultrasons multi-éléments phased array, NDT Expert, 2003.