

Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :
Génie mécanique, mécanique des matériaux

Présentée et soutenue par :
Elodie PERONNET

le : jeudi 4 octobre 2012

Titre :

Identification expérimentale du comportement d'un fuselage composite :
détection de défauts par mesures de champs

Ecole doctorale :
Mécanique, Énergétique, Génie civil et Procédés (MEGeP)

Unité de recherche :
Laboratoire Génie de Production (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes)

Directeur(s) de Thèse :

Moussa KARAMA
Sébastien MISTOU

Professeur des Universités, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
Maître de Conférences, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes

Rapporteurs :

Alain GERARD
Abdelghani SAOUAB

Professeur des Universités, Université de Bordeaux
Professeur des Universités, Université du Havre

Membre(s) du jury :

Florent EYMA
Abdelouhed LAKSIMI
Mostapha TARFAOUI
Hélène WELEMANE
Serge CRISTANTE

Maître de Conférences, IUT de Tarbes
Professeur des Universités, UT de Compiègne
Maître de conférences - HDR, ENSTA Bretagne
Maître de Conférences, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
Ingénieur DAHER SOCATA SAS
Invité

Remerciements

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein de l'équipe Mécanique des Matériaux, des Structures et des Procédés (M2SP) du Laboratoire Génie de Production (LGP) de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT). Ils ont été financés, dans le cadre du programme FUSCOMP, par DAHER-SOCATA et par le Conseil Général des Hautes Pyrénées.

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des membres du jury qui ont alimenté les discussions grâce à leurs remarques et questions constructives, et ont permis d'enrichir ce manuscrit. Je remercie plus particulièrement Mostapha Tarfaoui d'avoir présidé ce jury, ainsi que Alain Gérard et Abdelghani Saouab d'avoir accepté de rapporter mon mémoire de thèse.

Je remercie également Moussa Karama, mon directeur de thèse, de sa disponibilité lorsque nécessaire. J'adresse de remerciements à Sébastien Mistou, mon co-directeur de thèse, pour m'avoir soutenu tout au long de ces travaux, dans les bons comme dans les moments difficiles et de m'avoir cadré et recadré quand c'était nécessaire. Merci aussi à Hélène Weleman et Florent Eyma de s'être impliqués dans la réalisation de ces travaux de thèse.

Je veux également remercier Marie-Laetitia Pastor et Olivier Dalverny qui ont eu un rôle clé dans le développement des deux thématiques de cette thèse.

Je remercie Serge Cristante de s'être toujours soucié de la valorisation industrielle de cette thèse.

J'aimerais aussi remercier l'ensemble des membres du CRCC et de Nimitech qui m'ont accueilli avec bienveillance et aidé à la fabrication des cinq éprouvettes étalons. Je voudrais remercier, plus particulièrement, Nathalie Coureau pour son implication dans la réalisation de l'ensemble des plaques étalons.

J'adresse aussi des remerciements à Christophe Pescay et à Marianne Perrin pour les

nombreuses mesures ultrasonores réalisées. Je remercie également, Richard Huillery de Thermoconcept et Sylvain Génot de TomoAdour pour leur collaboration.

Je passe ensuite une dédicace spéciale à tous les doctorants que j'ai eu le plaisir de côtoyer durant ces trois ans à Tarbes et toute la troupe du Laboratoire Génie de Production. Et je remercie, plus particulièrement, mes colloques de bureau (Benji et Damien) ainsi que mes voisins de palier (Valentin et Marina) pour m'avoir supporté et soutenu.

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	v
Liste des tableaux	xi
Introduction	1
1 Contrôle de défauts par mesures de champs acoustiques, densimétriques, thermiques	5
1.1 Introduction	6
1.2 Mesures de champs acoustiques : les ultrasons	8
1.2.1 Principe physique	8
1.2.2 Principe de contrôle	13
1.2.3 Bilan	18
1.3 Mesures de champs densimétriques : radiographie à rayons X et tomographie à rayons X	19
1.3.1 Principe physique	19
1.3.2 Principe de contrôle	22
1.3.3 Bilan	28
1.4 Mesures de champs thermiques : la thermographie infrarouge	29
1.4.1 Principe physique	30
1.4.2 Principe du contrôle	32
1.4.3 Bilan	39
1.5 Conclusion	40
2 Matériaux et protocoles expérimentaux	41
2.1 Introduction	42
2.2 Présentation des échantillons	42

2.2.1	Eprouvette 1 : matériau monolithique avec inserts Téflon [®]	43
2.2.2	Eprouvette 2 : matériau monolithique avec trous à fond plat	44
2.2.3	Eprouvette 3 : matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 0.66 mm)	46
2.2.4	Eprouvette 4 : matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 1.08 mm)	48
2.2.5	Eprouvette 5 : matériau multi-structures	50
2.3	Protocoles expérimentaux	54
2.3.1	Mesures de champs acoustiques : les ultrasons	54
2.3.2	Mesures de champs densimétriques	61
2.3.3	Mesures de champs thermiques : thermographie infrarouge	66
2.4	Conclusion	73
3	Etude comparative sur éprouvettes étalons	75
3.1	Introduction	76
3.2	Principes d'analyse	77
3.2.1	Dimensionnement des défauts par traitement d'image	77
3.2.2	Critères d'analyse	79
3.3	Résultats expérimentaux	80
3.3.1	Etalons monolithiques avec inserts Téflon [®]	80
3.3.2	Etalon monolithique avec trous à fond plat	88
3.3.3	Etalons sandwich avec inserts Téflon [®]	94
3.3.4	Synthèse	103
3.4	Conclusion	108
4	Identification des défauts par mesures de champs cinématiques	111
4.1	Introduction	112
4.2	Méthodes de mesures de champs	113
4.2.1	Mesures surfaciques (2D)	113
4.2.2	Mesures surfaciques et hors-plan (2D 1/2)	115
4.2.3	Mesures volumiques (3D)	118
4.3	Méthodes d'identification du comportement	119
4.3.1	Méthodes itératives	120
4.3.2	Méthodes non itératives	123
4.4	Méthodologie d'identification multi-zones	125
4.5	Identification des propriétés d'un matériau orthotrope plan	128

4.5.1	Modèles de référence et de recalage	129
4.5.2	Description du fonctionnement de l'algorithme d'identification . . .	131
4.5.3	Résultats	134
4.6	Identification des propriétés d'une zone dégradée	135
4.6.1	Création de la cartographie d'erreurs	136
4.6.2	Estimation de la taille de la zone dégradée	139
4.6.3	Identification des propriétés de la zone dégradée	141
4.7	Conclusion	144
	Conclusion	147

Table des figures

1.1	Principe général d'un contrôle non destructif	6
1.2	Intensité acoustique sur l'axe du faisceau (D est le diamètre de la source utilisée et λ la longueur d'onde) (Dumont-Fillon [71])	9
1.3	Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide (Dumont-Fillon [71])	10
1.4	Ondes de volume : (a) ondes de compression, (b) ondes de cisaillement (Lefebvre et al. [133])	11
1.5	Ondes et contraintes induites : (a) onde volumique de compression, (b) onde volumique de cisaillement, (c) onde de surface (Mistou [143])	11
1.6	Méthode écho ultrasonore par immersion ou par contact avec sabot (Cherfaoui [55], Lambert et al. [121])	14
1.7	Méthode écho ultrasonore par contact (Framezelle et al. [79])	14
1.8	Différents modes de présentation de l'inspection ultrasonore (Dumont-Fillon [71])	15
1.9	Contrôle en mode transmission (Chaix et al. [53])	16
1.10	Principe de détection par transmission (Lacroix [119])	17
1.11	Spectre électromagnétique (Garnier [83])	20
1.12	Interaction entre le rayonnement et la matière lors de la traversée d'un matériau (Lecomte [130])	21
1.13	Evolution du coefficient d'atténuation μ d'un milieu en fonction de l'énergie E des photons	21
1.14	Principe de contrôle par rayons X (Lecomte [130])	22
1.15	Contraste d'un défaut sur l'image radiante (Lecomte [130])	23
1.16	Schéma d'un tube à rayons X (Badel [24], Le-Bras [125], Lecomte [130])	24
1.17	Schéma de principe du contrôle par tomographie X : du faisceau jusqu'aux coupes (Carmona [50])	25
1.18	Schéma d'une coupe (Lenoir [134])	25

1.19	Généralisations de scanners (Lenoir [134])	26
1.20	Principe de la méthode de reconstruction d'images tomographiques (Lenoir [134])	28
1.21	Bilan radiatif (Pajani [155])	31
1.22	Types de sollicitations thermiques (Maillard et al. [135])	33
1.23	Correspondance entre les méthodes de thermographie IR et leur signal respectif	34
1.24	Thermographie infrarouge en face avant	34
1.25	Thermographie infrarouge en face arrière	35
1.26	Schéma de câblage de la TIR	36
1.27	Schéma de câblage de la TIRM	36
1.28	TIRM ultrasonore (Gleiter et al. [89])	38
1.29	Schéma de câblage de la TIRP	38
2.1	Photo du matériau monolithique avec inserts Téflon [®]	43
2.2	Vue de dessus du matériau monolithique avec inserts Téflon [®] - Positionnement des inserts	44
2.3	Matériau monolithique avec inserts Téflon [®] - Coupe schématique dans l'épaisseur au niveau d'une rangée d'inserts de même diamètre	44
2.4	Photo du matériau monolithique avec trous à fond plat	45
2.5	Vue de dessus du matériau monolithique avec trous à fond plat - Positionnement des trous	45
2.6	Matériau monolithique avec trous à fond plat - Coupe schématique dans l'épaisseur au niveau d'une rangée de trous de même diamètre	46
2.7	Photo du matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 0.66 mm)	46
2.8	Vue de dessus du matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 0.66 mm) - Positionnement des inserts Téflon [®]	47
2.9	Matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 0.66 mm) - Coupe schématique au niveau d'une rangée d'inserts de même diamètre	47
2.10	Photo du matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 1.08 mm)	48
2.11	Vue de dessus du matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 1.08 mm)	49
2.12	Matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 1.08 mm) - Coupe schématique dans l'épaisseur au niveau d'une rangée d'inserts de même diamètre	49
2.13	Photo du matériau multi-structures	50
2.14	Master en résine usinable	51

2.15	Moule rigide en verre-époxy	51
2.16	Vue de dessus du matériau multi-structures - Positionnement des inserts Téflon	52
2.17	Matériau multi-structures - Coupes schématiques dans l'épaisseur au ni- veau d'une rangée d'inserts de même diamètre : (a) partie monolithique fine, (b) zone sandwich, (c) partie épaisse	53
2.18	Mise en place du film micro perforé	53
2.19	Capteur multi-éléments équipé du sabot	55
2.20	Dispositif expérimental du contrôle par écho ultrasonore par contact	55
2.21	Système de fixation de la structure inspectée (matériau multi-structures)	56
2.22	A-scan réalisé en écho ultrasonore par contact (phase d'étalonnage, sans défaut)	57
2.23	C-Scan (matériau monolithique avec insert Téflon [®]) : (a) en amplitude, (b) en épaisseur	57
2.24	Pièce et capteur immergés dans la cuve	58
2.25	Dispositif expérimental de l'écho ultrasonore par immersion	59
2.26	Dispositif de fixation de l'éprouvette	59
2.27	Montage de transmission ultrasonore par immersion	60
2.28	Positionnement de la porte A	61
2.29	C-Scan en amplitude (sur une partie du matériau multi-structures)	61
2.30	Montage expérimental du contrôle par radiographie X	61
2.31	Dispositif expérimental dédié au contrôle par radiographie X utilisé par Daher Socata sur le site de Tarbes	62
2.32	Radiographie X (matériau sandwich avec peau de 0.66 mm)	63
2.33	Scanner SOMATOM Sensation Open	64
2.34	Schéma de fonctionnement du scanner médical SIEMENS	64
2.35	Reconstructions par tomographie X (matériau sandwich avec peaux de 0.66 mm) : (a) Coupe 2D reconstruite parallèlement à la surface moyenne de la pièce, (b) : reconstruction volumique	65
2.36	Dispositif expérimental en configuration face avant	67
2.37	Dispositif expérimental en configuration face arrière	67
2.38	Mesures de champ thermique (en relatif) réalisées par TIR (matériau mo- nolithique avec inserts Téflon [®])	69
2.39	Cartographie 2D des mesures de champs thermiques obtenus par TIRM (matériau monolithique avec inserts Téflon [®]) : (a) amplitude, (b) phase	70
2.40	Dispositif expérimental de la TIRP en configuration face avant	71

2.41	Dispositif expérimental de la TIRP en configuration face arrière	72
2.42	Cartographie 2D des mesures de champs thermiques par TIRP (matériau monolithique avec inserts Téflon [®])	73
3.1	Procédure de traitement d'image automatique	78
3.2	Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Etalons monolithiques : (a) matériau monolithique avec inserts Téflon [®] , (b) éprouvette multi-structure	85
3.3	Précision de détection en fonction du diamètre des défauts - Etalons monolithiques : (a) matériau monolithique avec inserts Téflon [®] , (b) éprouvette multi-structure	86
3.4	Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Matériau monolithique avec trous à fond plat	91
3.5	Précision de détection en fonction du diamètre de défauts - Matériau monolithique avec trous à fond plat	92
3.6	Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Matériau sandwich avec peaux de 0.66 mm	99
3.7	Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Matériau sandwich avec peaux de 1.08 mm	99
3.8	Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Zones sandwichs de l'éprouvette multi-structure	100
3.9	Précision de détection en fonction du diamètre de défauts - Matériau sandwich avec peaux de 0.66 mm	100
3.10	Précision de détection en fonction du diamètre de défauts - Matériau sandwich avec peaux de 1.08 mm	101
3.11	Précision de détection en fonction du diamètre de défauts - Zones sandwichs de l'éprouvette multi-structure	101
3.12	Précision moyenne de détection - Structures monolithiques	104
3.13	Précision moyenne de détection - Structures sandwichs	106
3.14	Précision moyenne de détection - Défauts de 6 mm de diamètre	107
4.1	Système possédant deux caméras (Fazzini [76])	116
4.2	Principe stéréoscopique (Fazzini [76])	116
4.3	Images de gauche et droite et reconstruction 3D du cylindre (Fazzini [76])	117
4.4	Détermination du champ de déplacement 3D par stéréo-corrélation (Fazzini [76])	118
4.5	Principe de la méthode d'identification FEMU	121

4.6	Problème considéré	126
4.7	Stratégie d'identification multi-zones	126
4.8	Structure multi-zones de référence au niveau de la zone d'intérêt : (a) principe, (b) modèle "expérimental numérique" associé (vue de la face arrière, les zooms montrent les différents plis de chaque zone)	127
4.9	Orientation de la symétrie matérielle du matériau orthotrope	129
4.10	Identification des propriétés orthotropes - Zone d'intérêt	130
4.11	Schéma de fonctionnement de l'algorithme d'identification	131
4.12	Courbes de convergence du cas FUSCOMP	135
4.13	Calcul d'erreur - Zone d'intérêt	136
4.14	Evolution des composantes (U_x, U_y) du champ de déplacement U et des composantes $(\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy})$ du champ de déformations ε dans la base (\mathbf{x}, \mathbf{y}) en face avant de la structure de référence le long d'une ligne AB traversant les zones saine et dégradée	138
4.15	Cartographie d'erreur en déformation (référence vs matériau monozone sain)139	
4.16	Identification de la taille de la zone dégradée : (a) coupes réalisées sur la carte d'erreur, (b) et (c) : évolution des niveaux de gris et définition des seuils	140
4.17	Intégration de la zone dégradée	141
4.18	Identification des propriétés dégradées - Zone d'intérêt	141
4.19	Cartographie d'erreur en déformation (référence vs structure multizones basée sur la théorie de stratifiés)	142
4.20	Courbes de convergence de l'identification multi-zone	144

Liste des tableaux

3.1	Résultats du traitement d'image par famille de mesures de champs	79
3.2	Sensibilité de détection - Matériau monolithique avec inserts Téflon [®]	81
3.3	Sensibilité de détection - Zones monolithiques de l'éprouvette multi-structure	81
3.4	Précision moyenne de détection - Etalons monolithiques	84
3.5	Sensibilité de détection - Matériau monolithique avec trous à fond plat	89
3.6	Précision moyenne de détection - Matériau monolithique avec trous à fond plat	91
3.7	Sensibilité de détection - Matériau sandwich avec peaux de 0.66 mm	95
3.8	Sensibilité de détection - Matériau sandwich avec peaux de 1.08 mm	95
3.9	Sensibilité de détection - Zones sandwichs de l'éprouvette multi-structure	96
3.10	Précision moyenne de détection - Etalons sandwichs	98
3.11	Sensibilité de détection - Structures monolithiques	104
3.12	Sensibilité de détection - Structures sandwichs	105
3.13	Sensibilité de détection - Défauts de 6 mm de diamètre	107
4.1	Données de base et résultats des problèmes directs et indirects (Kleiner- mann [118])	120
4.2	Propriétés planes du tissu Hexcel HexForce [®] G0926 dans ses axes principaux	130
4.3	Identification de matériaux orthotropes par procédure FEMU (le calcul de chaque paramètre selon la théorie classique des stratifiés est donné entre parenthèses)	134
4.4	Théorie des stratifiés : empilement [45°/0°/45°]	142

Introduction

Le développement de nouveaux procédés de fabrication pour les composites constitue à l'heure actuelle une problématique cruciale et ouverte, dont les enjeux concernent à la fois l'optimisation des méthodes et étapes de mise en oeuvre mais également celle des matériaux et structures du point de vue de leurs performances mécaniques. Dans ce contexte, le procédé d'infusion de résine liquide (*Liquid Resin Infusion*) présente de nombreux atouts dont la possibilité de fabriquer des pièces de formes complexes et des panneaux entiers de fuselage en matériaux composites, réduisant considérablement les étapes d'assemblages et donc les temps de production. Parallèlement, la résistance mécanique de ces pièces s'avère particulièrement intéressante grâce notamment à la possibilité de réaliser des structures intégrées (raidisseurs par exemple).

Labellisé par le pôle de compétitivité Aerospace Valley, le projet de Recherche & Développement FUSCOMP (FUSelage COMPOSITE) vise à la réalisation d'un test de démonstrateur de fuselage composite produit par LRI. Ces travaux réunissent principalement quatre partenaires de la Région Midi-Pyrénées : la société DAHER-SOCATA située à Louey, le Laboratoire Génie de Production de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, l'Institut Universitaire Technologique de Tarbes (dépendant de l'Institut Clément Ader de Toulouse) et le Centre de Ressources et de Compétences Composites (CRCC) du Lycée Jean Dupuy de Tarbes.

Le thème principal de la thèse présentée ici est l'identification de défauts internes au sein de matériaux composites constituant le fuselage. Il s'agit d'un sujet primordial pour le développement d'un procédé de fabrication puisque la validation de la santé matière des pièces est portée par de nombreuses normes aéronautiques, dont les standards AITM (Airbus Industry Test Method - Méthode d'essai d'AIRBUS Industrie), et correspond à une étape obligatoire du processus qualité permettant de répondre aux exigences du client avant livraison.

Dans ce cadre, deux objectifs majeurs ont été visés pour ce travail de recherche. Le premier porte sur l'évaluation des méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) sur ces types de matériaux, incluant des stratifiés monolithiques et des sandwichs. DAHER-SOCATA ayant la volonté d'acquérir de nouvelles compétences dans ce domaine, cette première étape a consisté en une analyse comparative de différentes techniques jugées intéressantes pour les applications industrielles. Précisément, les méthodes étudiées sont toutes basées sur des mesures de champs capables de mesures globales sous forme de cartographies, ce qui est un avantage certain du point de vue de la maintenance des structures. Ces techniques se distinguent par ailleurs par leur rapidité d'exécution, leur capacité à contrôler des pièces à géométrie complexe et leur utilisation le plus souvent sans contact.

Dans la continuité de cette analyse, le second enjeu abordé dans ce travail porte sur l'identification paramétrique des matériaux composites plans à partir de mesures de champs cinématiques. L'idée à ce stade est d'enrichir la caractérisation fournie par le CND au travers d'une quantification des propriétés élastiques. S'appuyant sur certains développements existants au sein du laboratoire, une procédure d'identification globale puis locale par recalage de modèles éléments finis a été mise en place de manière à pouvoir capter le caractère hétérogène d'une structure présentant un défaut et déterminer les paramètres de chacune des zones (saine et dégradée).

La rédaction de ce mémoire s'organise autour de quatre parties.

Le premier chapitre est dédié à la revue bibliographique des méthodes de CND existantes et basées sur des mesures de champs. Trois grandes familles sont notamment traitées, fournissant des mesures de champs acoustiques, densimétriques et thermiques sur structures composites. Pour chacune des méthodes abordées dans l'analyse comparative, des présentations du principe physique et du principe de contrôle sont réalisées. Un bilan des avantages et inconvénients de chaque famille est également proposé.

La présentation des matériaux et des protocoles expérimentaux employés fait l'objet du deuxième chapitre. Outre les détails sur la constitution et la fabrication des éprouvettes employées ainsi que sur leurs défauts, cette partie expose précisément la démarche des mesures réalisées de manière à mieux comprendre les résultats obtenus par la suite.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude comparative en elle-même. A partir de critères d'analyse définis en lien avec les objectifs industriels, les différentes méthodes de contrôle utilisées sont évaluées sur les différents matériaux et les différents types de défauts.

Une synthèse générale par type de structures vient conclure cette partie en indiquant les tendances observées pour les trois familles de mesures de champs.

L'identification des défauts par mesures de champs cinématiques est abordée dans le dernier chapitre. Après une synthèse bibliographique sur les méthodes de mesures de champs et les techniques d'identification les plus répandues, la procédure d'identification sur structure composite multi-zones est détaillée de manière à appréhender les verrous scientifiques levés dans le cas présent (matériaux anisotropes et macroscopiquement hétérogènes). Un certain nombre de résultats sont enfin présentés pour illustrer chacune des différentes étapes de la méthodologie.

Chapitre 1

Contrôle de défauts par mesures de champs acoustiques, densimétriques, thermiques

Sommaire

1.1	Introduction	6
1.2	Mesures de champs acoustiques : les ultrasons	8
1.2.1	Principe physique	8
1.2.2	Principe de contrôle	13
1.2.3	Bilan	18
1.3	Mesures de champs densimétriques : radiographie à rayons X et tomographie à rayons X	19
1.3.1	Principe physique	19
1.3.2	Principe de contrôle	22
1.3.3	Bilan	28
1.4	Mesures de champs thermiques : la thermographie infrarouge	29
1.4.1	Principe physique	30
1.4.2	Principe du contrôle	32
1.4.3	Bilan	39
1.5	Conclusion	40

1.1 Introduction

Les Contrôles Non Destructifs (CND) ont pour vocation de fournir des informations concernant la santé matière des pièces contrôlées sans altérer ni modifier leurs propriétés physico-chimiques ainsi que mécaniques. Ils évaluent les défauts d'une pièce durant son cycle de vie (durant le processus de fabrication, après fabrication, en maintenance) afin de définir si celle-ci est toujours utilisable suivant les critères mécaniques associés lors de sa conception. Cette démarche d'investigation est un élément majeur du contrôle qualité des pièces dans l'industrie aéronautique.

Généralement, une technique de CND se décompose en trois phases (Boro-Djordjevic [44], Cawley [52], Cherfaoui [55], Framezelle et al. [79], Hsu [107], figure 1.1) :

- la sollicitation, souvent de nature mécanique, électromagnétique ou thermique,
- la perturbation, définie par la pièce et les anomalies qu'elle contient, et qui traduit l'interaction avec la sollicitation,
- la révélation, assurée soit par l'œil soit par des capteurs associés à un système imageur, traduisant la réaction entre l'excitation et la perturbation.

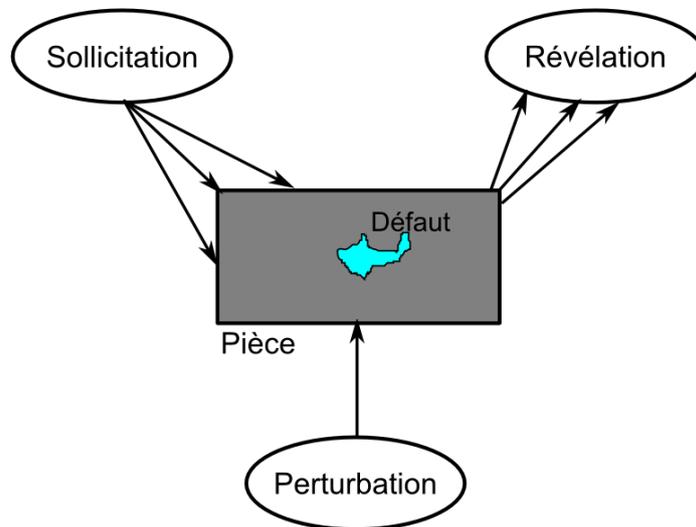


FIGURE 1.1 – Principe général d'un contrôle non destructif

En ce qui concerne les structures composites, les principaux défauts que l'on cherche à identifier sont d'une part les imperfections dues au procédé de fabrication (porosités, mauvaises imprégnations, fibres non alignées,..) et d'autre part, les décohésions de matière

induits en service (rupture de fibres, fissures, délaminages, décollements fibres-matrice, impacts,..) (Adams and Cawley [1], Colin [62], Geier [85]).

Parmi les techniques de CND destinées à répondre à cette problématique, on distingue généralement deux grandes classes :

- les contrôles surfaciques tels que le contrôle visuel (Cherfaoui [55], Perdijon [162]), les courants de Foucault (Gros [101], Mook et al. [149]) ou le ressuage (Al-Maghribi [14], Duplessis-Kergomard [72], Geier [85]) ; ces méthodes visent à détecter des indications ou des défauts débouchants mais leur application au cas des composites reste limitée dans l'industrie du fait en particulier de perturbations liées à la couleur des matériaux concernés ou à la contamination par le fluide d'examen/de ressuage (Tsao and Hocheng [192]) ;
- les contrôles volumiques s'avèrent quant à eux plus performants car ils permettent d'accéder également à des défauts internes en précisant éventuellement leur profondeur ; outre la shearographie (Hung [108], Hung et al. [109], Muzet et al. [152]) ou l'émission acoustique (Aggelis et al. [3], Benmedakhene et al. [35], Dzenis and Qian [74], Mizutani et al. [144], Wevers [195]), on trouve notamment dans cette catégorie différentes méthodes basées sur des mesures de champs tels que les ultrasons, les analyses par rayons X ou la thermographie infrarouge. L'absence de contact, la richesse des informations obtenues (mesures globales), la rapidité d'exécution ainsi que l'adaptation à l'inspection des pièces à géométries complexes sont autant d'arguments pour expliquer leur plein essor (Cawley [52], Grediac [93]).

Dans cette première partie du travail, nous avons focalisé notre étude sur trois types d'acquisition :

- la mesure de champs acoustiques (contrôle ultrasonore), qui est actuellement la technique la plus employée dans le secteur aéronautique,
- la mesure de champs densimétriques, incluant la radiographie à rayons X et la tomographie à rayons X,
- la mesure de champs thermiques par thermographie infrarouge.

Toutes ces mesures sont basées sur le même principe général :

1. l'émission par une source d'un flux d'ondes dont la nature diffère suivant la mesure concernée,
2. la réception par un détecteur de ce flux propagé par la pièce analysée ; deux options sont ici possibles : soit une mesure en "réflexion" (on dit aussi "contrôle face

avant”) si le détecteur se trouve du même côté que l’émetteur¹, soit une mesure en “transmission” (ou “contrôle face arrière”) si le détecteur est situé du côté opposé à l’émetteur,

3. l’obtention d’une mesure de champ par cartographie 2D ou 3D selon les techniques.

On se propose donc à présent de décrire les méthodes précitées en précisant pour chacune leur principe physique ainsi que leurs différentes configurations d’utilisation dans l’industrie.

1.2 Mesures de champs acoustiques : les ultrasons

La mesure de champ acoustique étudiée ici est celle du contrôle ultrasonore des pièces qui correspond à la méthodologie d’analyse non destructive la plus répandue actuellement dans l’industrie aéronautique (Adams and Cawley [1], Adams and Drinkwater [2]). Par le recul expérimental et industriel cumulé depuis des années, la pratique de cette technique est très normalisée (AITM6-0013 [5], AITM6-0016 [7], AITM6-4002 [8], AITM6-4010 [10], AITM6-4014 [11], AITM6-0011 [4], AITM6-4005 [9]).

Suivant la démarche générale exposée précédemment, le contrôle ultrasonore suit les étapes suivantes (Dumont-Fillon [71], Perdijon [161]) :

- l’émission d’un flux d’ondes acoustiques (volumiques ou superficielles),
- la réception d’un flux acoustique par un détecteur, en face avant ou arrière,
- l’obtention d’une mesure de champ acoustique en cartographie 2D (qui permet d’identifier la projection en surface des défauts), dont on peut tirer éventuellement une représentation 3D (par combinaison des vues 2D).

1.2.1 Principe physique

1.2.1.1 Le positionnement optimal du traducteur

Le traducteur ultrasonore est le capteur qui permet d’émettre et/ou de recevoir les ondes ultrasonores. Il est principalement constitué par le transducteur, soit l’élément piézo-électrique traduisant les pressions mécaniques induites par les ondes ultrasonores en signal électrique. Un traducteur est caractérisé par sa fréquence, le type d’onde qu’il génère et la forme de son faisceau acoustique.

1. dans ce cas, le même capteur peut éventuellement assurer les rôles d’émetteur et de récepteur

La fréquence choisie doit satisfaire deux conditions nécessaires au respect de l'hypothèse des milieux continus lors du contrôle non destructif (Castaings [51]) :

- le milieu solide doit être homogène à l'échelle des longueurs d'onde utilisées. Pour cela, il suffit que la plus petite longueur d'onde des modes générés soit supérieure aux dimensions des hétérogénéités de la structure. Si le milieu n'est pas homogène, il est dispersif et la propagation des ondes générées est régie par des phénomènes de réfraction.
- le milieu doit pouvoir être assimilé à un milieu semi-infini, c'est-à-dire que les échos des divers modes générés doivent être parfaitement séparés, après transmission de l'échantillon, pour permettre la mesure du temps de vol (temps de passage de l'onde dans l'échantillon).

Le faisceau acoustique du transducteur se décompose classiquement en deux parties : le champ proche (dit zone de Fresnel) et le champ lointain (dit zone de Fraunhofer). De manière à s'affranchir de l'instabilité du champ proche tout en ayant le maximum d'intensité acoustique, il convient de positionner le capteur à $\frac{D^2}{4\lambda}$ de la surface de la pièce inspectée (figure 1.2).

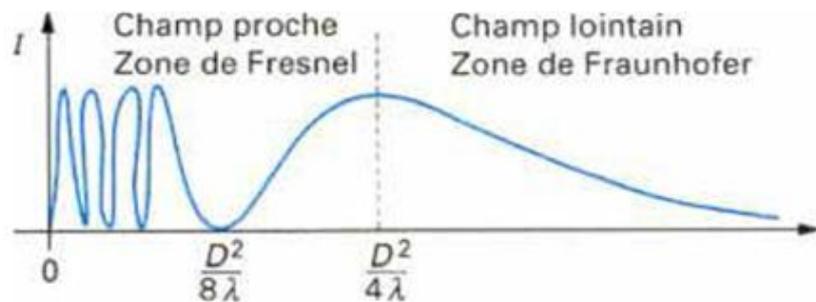


FIGURE 1.2 – Intensité acoustique sur l'axe du faisceau (D est le diamètre de la source utilisée et λ la longueur d'onde) (Dumont-Fillon [71])

1.2.1.2 Les différents types d'ondes

Suivant l'orientation du capteur (d'où implicitement celle du transducteur), plusieurs types d'ondes peuvent être générées (Colin [62], Dumont-Fillon [71], Lefebvre et al. [133], figure 1.3) :

- les transducteurs droits produisent des ondes de volume longitudinales,

- les traducteurs d'angles permettent de produire des ondes de volume transversales, des ondes de surface ainsi que des ondes de plaque.

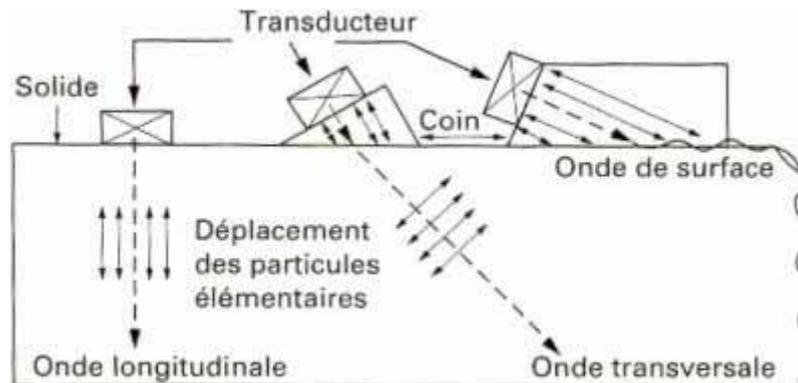


FIGURE 1.3 – Types d’ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide (Dumont-Fillon [71])

Les ondes de volume longitudinales dites ondes de compression se caractérisent par un déplacement des particules élémentaires parallèle au déplacement de l’onde (figure 1.4-a). Ces ondes font intervenir des contraintes de traction-compression (figure 1.5-a) et se propagent aussi bien dans les liquides, les gaz et les solides. Elles permettent de détecter des défauts parallèles à la surface de détection, ce qui s’avère particulièrement pertinent dans le cas de composites multicouches puisque les défauts y sont majoritairement parallèles aux plis.

Dans le cas des ondes de volume transversales dites ondes de cisaillement, le déplacement des particules élémentaires se fait perpendiculairement au déplacement de l’onde (figure 1.4-b). Celles-ci induisent des contraintes de cisaillement-torsion (figure 1.5-b) et ne peuvent être transmises par des liquides ou des gaz. Leur utilisation est adaptée à la détection de défauts non parallèles à la surface de détection tels que des “kissing” bonds (Adams and Drinkwater [2]).

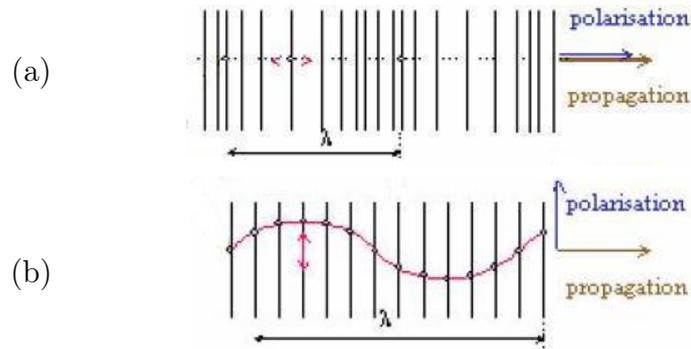


FIGURE 1.4 – Ondes de volume : (a) ondes de compression, (b) ondes de cisaillement (Lefebvre et al. [133])

Les ondes de surface dites ondes de Rayleigh résultent quant à elles de la combinaison d'une onde longitudinale et d'une onde transversale en quadrature se propageant à la surface libre du matériau. Le déplacement des particules élémentaires suit une orbite elliptique dont le grand axe est perpendiculaire à la surface inspectée et dont le petit axe est parallèle à la direction de propagation de l'onde qui correspond au contour de la surface contrôlée (onde guidée). Ces ondes ne prennent naissance qu'à la surface du matériau et permettent de détecter des défauts très proches de la surface mais non débouchants ou qui se situeraient dans la zone de Fresnel de certains traducteurs (Lefebvre et al. [133]).

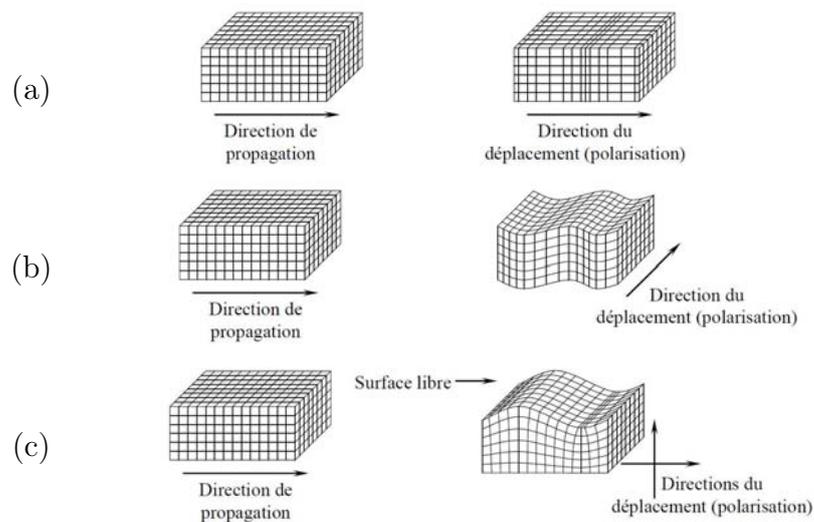


FIGURE 1.5 – Ondes et contraintes induites : (a) onde volumique de compression, (b) onde volumique de cisaillement, (c) onde de surface (Mistou [143])

On distingue enfin les ondes de plaque dites ondes de Lamb qui se propagent parallèlement aux surfaces étudiées (onde guidée également) et qui résultent de la superposition de deux ondes longitudinales et de deux ondes transversales. Ces ondes sont utilisées pour contrôler des plaques de faible épaisseur (quelques longueurs d'ondes au maximum) puisque leur caractéristique est de se propager dans l'épaisseur d'une paroi (Cherfaoui [55]). Elles sont ainsi adaptées à la détection de défauts se situant au niveau de la colle entre 2 plis ou entre un pli et une âme car les ondes de plaques sont également sensibles aux propriétés mécaniques des adhésifs (Adams and Drinkwater [2]), à l'évaluation de délaminages produits par un impact ainsi que de décollements de semelle d'oméga (Yashiro et al. [198]).

1.2.1.3 L'atténuation ultrasonore

Les composites stratifiés sont généralement dotés de propriétés d'absorption non négligeables qui sont dues au comportement viscoélastique des matrices. De plus, leur structure multi-couche entraîne des effets de diffraction des ondes dans la structure interne (interfaces solide-solide imparfaites, porosités, fibres, fissures et autres défauts). La combinaison de ces deux phénomènes entraîne l'atténuation de l'amplitude de l'onde ultrasonore lors de sa propagation dans le composite, soit une perte dans l'amplitude du signal de sortie par rapport à celle du signal d'entrée.

L'analyse de l'atténuation ultrasonore est utilisée dans les techniques de contrôle non destructif par ultrasons (écho ultrasonore, transmission ultrasonore). Dans le cas par exemple de porosités se situant dans un joint de colle entre 2 plis ou entre un pli et une mousse, la comparaison de l'atténuation mesurée sur la pièce par rapport à celle obtenue sur des éprouvettes étalons non poreuses permet d'évaluer quantitativement le taux volumique de vides (Boyer [46], Ledru [131], Phani [165]). Il est important de noter que la résolution de la détection par contrôle ultrasonore s'améliore en augmentant la fréquence de l'onde ultrasonore, et en conséquence l'épaisseur de la structure pouvant être contrôlée diminue (Bar-Cohen et al. [28]).

A partir des principes généraux sur les ondes ultrasonores qui viennent d'être évoqués, on se propose à présent de détailler les méthodologies de contrôle par ultrasons les plus utilisées sur les structures composites.

1.2.2 Principe de contrôle

1.2.2.1 Echo ultrasonore : contrôle en face avant

Cette méthode est très appropriée au contrôle des pièces ne possédant qu'une surface accessible puisqu'elle ne nécessite l'utilisation que d'un seul capteur jouant à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur. Deux typologies de capteurs ultrasonores peuvent être employés (Framezelle et al. [79]) :

- les capteurs mono-éléments contenant un seul élément piézo-électrique émettant et recevant l'onde et qui sont les plus employés dans l'industrie,
- les capteurs multi-éléments appelés aussi "phased array", composés de plusieurs éléments individuels pouvant être pilotés indépendamment ; ils permettent une focalisation électronique du faisceau ultrasonore diminuant les zones mortes d'investigation.

D'un point de vue pratique, une couche d'agent couplant est placée entre le capteur et la pièce de façon à guider le passage de l'onde. Ce couplant peut être de nature diverse (Bar-Cohen et al. [28], Mouritz et al. [151], Zani [199]) :

- un corps gras, un gel ou de l'eau (éventuellement additionnée d'un agent mouillant) en petite quantité positionnée sur la pièce ; on parle alors de méthode par contact,
- de l'eau (éventuellement additionnée d'un agent mouillant) en grande quantité, par immersion partielle (capteur et une partie de la pièce) ou totale (capteur et pièce) dans une cuve.

L'épaisseur de l'agent de couplage doit absolument rester constante tout au long du contrôle afin d'assurer une inspection complète et homogène de la zone balayée par le traducteur sur la structure. Lorsque la taille de la cuve le permet, ceci justifie le recours préférentiel aux mesures en immersion qui bénéficient d'autre part de systèmes de guidage automatique. Dans certains cas, il est nécessaire de placer en plus un sabot entre la pièce et le traducteur afin d'éloigner l'entrée du signal dans la pièce de la zone de Fresnel, et ainsi permettre un contrôle optimal dès les premiers millimètres.

L'analyse des défauts est ensuite basée sur le principe du radar : les ondes ultrasonores émises dans la pièce sont réfléchies sur les interfaces principales du matériau (entrée et fond) ainsi que sur les hétérogénéités internes produisant des échos par rupture d'impédance acoustique. La distance entre les différents échos par rapport à l'écho d'entrée dans la pièce est reliée directement aux temps de propagation aller-retour de l'onde dans l'épaisseur de celle-ci. Le résultat mesuré se présente alors sous forme d'un échogramme (également appelé A-scan) traduisant l'amplitude (en dB) des échos en fonction de la distance traversée par l'onde (Mouritz et al. [151]) (figure 1.6) :

- l'écho d'émission représentant le lieu d'émission du train d'ondes,
- l'écho d'entrée 1 représentant la pénétration du train d'ondes dans la pièce inspectée ; si le traducteur n'est utilisé qu'avec un couplant acoustique de faible épaisseur (méthode par contact), l'écho d'entrée est confondu avec l'écho d'émission dans la pièce (figure 1.7).
- l'écho de défaut 2 représentant la réflexion de l'onde sur l'imperfection (si elle existe) (figure 1.6),
- l'écho de fond 3, toujours situé en dernier dans l'échogramme, représentant la réflexion de l'onde sur le fond de la pièce (figure 1.6).

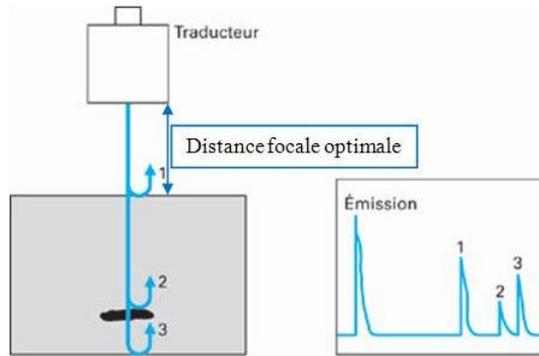


FIGURE 1.6 – Méthode écho ultrasonore par immersion ou par contact avec sabot (Cherfaoui [55], Lambert et al. [121])

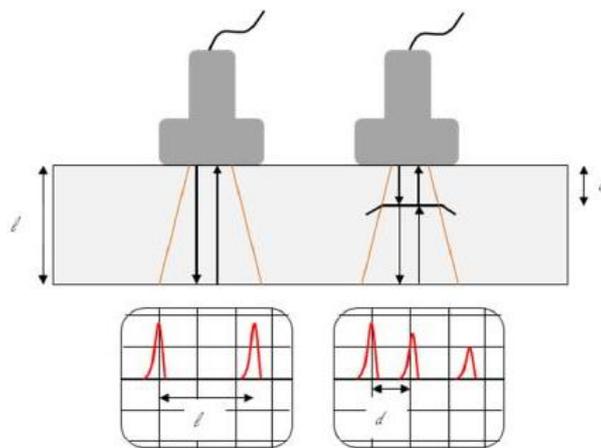


FIGURE 1.7 – Méthode écho ultrasonore par contact (Framezelle et al. [79])

L'observation de ces échos permet de localiser les défauts internes présents dans une structure mais également d'en réaliser des mesures dimensionnelles. Un traitement du signal peut éventuellement être réalisé pour améliorer l'analyse, comme par exemple pour la méthode -6dB, qui consiste à faire un écrêtage des amplitudes pour enlever une partie du bruit de mesure. La taille des défauts est ensuite estimée par la comparaison entre les amplitudes des échos de fond et de défaut ; la profondeur des défauts est quant à elle déterminée par le temps de vol entre l'écho d'entrée (ou de fond) dans la pièce et l'écho du défaut (Bar-Cohen et al. [28]) (figure 1.6). Pour cela, il faut bien sûr étalonner avant tout test l'appareil de mesure avec une plaque étalon représentative de la structure inspectée. Cette plaque est composée de défauts artificiels ayant pour but de représenter au plus près les défauts devant être identifiés aussi bien en terme de nature, qu'en terme de dimension. L'utilisation d'une plaque étalon permet de réaliser les différents réglages nécessaires à la visualisation des défauts signalés comme critiques pour la structure contrôlée.

Il existe traditionnellement deux cartographies 2D interprétées d'un contrôle ultrasonore, à savoir le B-scan sous la forme d'une coupe dans l'épaisseur de la pièce (figure 1.8) et le C-scan sous la forme d'une projection en surface des défauts présents dans la pièce contrôlée (Bar-Cohen et al. [28], Perdijon [161]) (figure 1.8). Le couplage de ces trois vues permet d'avoir une visualisation 3D de la répartition des défauts dans la pièce contrôlée. On peut enfin signaler que l'emploi de sondes multi-éléments permet d'accéder à des vues sous des angles différents (par exemple B-scan angulaire appelé aussi le S-scan (Fidahoussen et al. [78])).

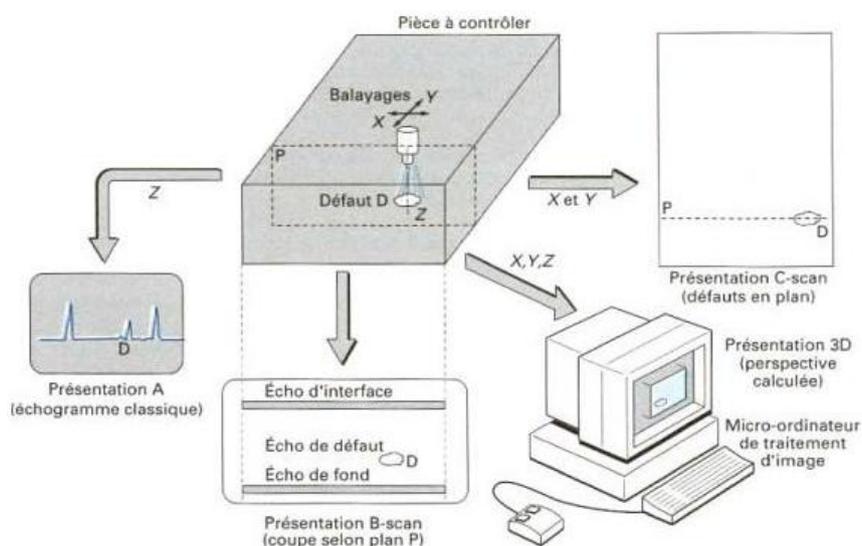


FIGURE 1.8 – Différents modes de présentation de l'inspection ultrasonore (Dumont-Fillon [71])

L'écho ultrasonore permet d'identifier essentiellement les défauts suivants dans les composites dus :

- à la fabrication : porosités, décollements, variations du taux d'imprégnation (Boro-Djordjevic [44], Ledru [131], Wong and Ron [196]),
- et/ou leur utilisation en service : délaminages, impacts (Boro-Djordjevic [44], Mouritz et al. [151], Wong and Ron [196]).

1.2.2.2 Transmission ultrasonore : contrôle en face avant et face arrière

La transmission ultrasonore utilise deux transducteurs, l'un jouant le rôle d'émetteur et l'autre de récepteur. Cette technique se base sur des mécanismes de transmission d'ondes ou de diffusion et réflexion suivant la configuration choisie (Chaix et al. [53], Cherfaoui [55], Framezelle et al. [79], Zani [199]) :

- en mode transmission, émetteur et récepteur sont placés de part et d'autre de la pièce inspectée (figure 1.9) ; cette approche est la plus classique car la plus simple à mettre en oeuvre et généralement plus précise ;
- en mode émission-réception, les deux transducteurs sont du même côté de la pièce.

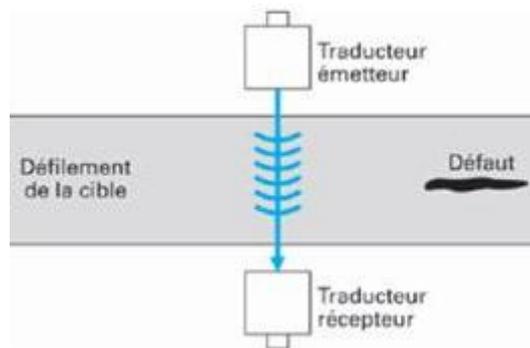


FIGURE 1.9 – Contrôle en mode transmission (Chaix et al. [53])

Dans le cas de cette technique, la détection des défauts se réalise par mesure de l'atténuation ou coupure directe du faisceau ultrasonore suivant les propriétés d'absorption du défaut intercepté (figure 1.10). Généralement, l'étalonnage de l'appareil de test se réalise à vide ou avec un matériau sain. Avant chaque test, il convient de s'assurer que les capteurs soient correctement positionnés pour que le signal soit émis et réceptionné de façon

optimale. Une fois le test réalisé, les résultats sont bien sûr visualisables par les 3 vues (A-scan, B-scan et C-scan) déjà détaillées dans la partie précédente.

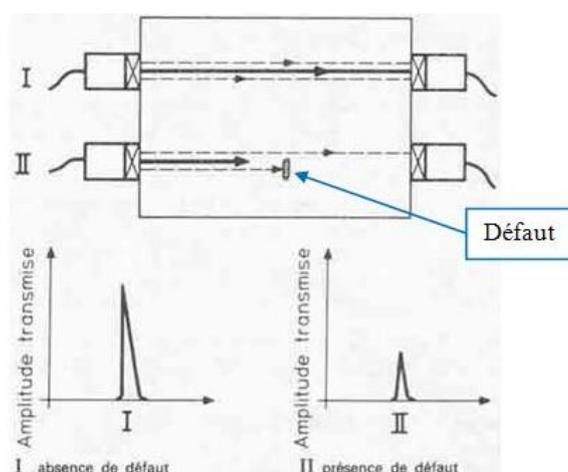


FIGURE 1.10 – Principe de détection par transmission (Lacroix [119])

Les difficultés liées à cette technique sont les modifications de l'onde ultrasonore qui ne sont pas dues à la présence des défauts et qui, de fait, perturbent l'analyse : problème lié à l'agent couplant, désalignement des deux transducteurs, changement de structure dans la pièce contrôlée par exemple. Par conséquent, cette technique est généralement associée aux techniques d'écho ultrasonore par contact ou immersion.

L'agent couplant utilisé pour la transmission ultrasonore peut être un corps gras, de l'eau (en immersion ou par jet d'eau) ou de l'air. Le recours au jet d'eau est très fréquent dans le milieu industriel, associée généralement à un système automatique de déplacement des transducteurs assurant une liaison acoustique optimale (Hsu [107], Robert and Green [176]). Toutefois, face à la contamination potentielle des surfaces de la structure par ce moyen (endommagement, corrosion) et autre perturbation induite par les changements de milieux dans la propagation de l'onde, des méthodes sans contact et sans milieu couplant tendent à se développer. On peut citer par exemple les trois suivantes qui peuvent être éventuellement couplées entre elles (Cawley [52], Clorennec [61], Eyma et al. [75], Kazys et al. [116], Robert and Green [176], Ruzek et al. [179], Zani [199]) :

- les ultrasons à couplage air, qui sont particulièrement adaptés au contrôle des structures hydrophobes ou sensibles à l'eau telles que composites sandwichs (Hsu

[107], Kazys et al. [116]); on peut noter que les capteurs couplés à l'air sont adaptés à la génération et à la détection d'ondes de Lamb en mode émission-réception (Framezelle et al. [79], Hsu [107]),

- les ultrasons lasers, générées par un laser et dont la détection est souvent réalisée par une sonde interférométrique comme le système de Fabry-Perot (Cawley [52], Robert and Green [176], Voillaume and Campagne [194]); dans cette démarche, la présence d'une surface réfléchissante s'avère nécessaire (par exemple, un film mince peut être collé à cette fin en surface de composites en carbone-époxy);
- ultrasons avec traducteurs magnéto-acoustiques.

Ces nouvelles technologies sont de plus en plus convoitées dans les inspections sur structures composites (Cawley [52], Zani [199]). Outre les avantages précités, elles minimisent en effet les bruits de mesures (impliquant une bonne reproductibilité), permettent l'inspection de pièces chaudes ou à géométrie complexe comportant de multiples courbures ainsi qu'un contrôle sur la ligne de fabrication.

Parmi les défauts sur matériaux composites pouvant être identifiés par la transmission ultrasonore, on peut citer également :

- des défauts de fabrication : porosités, décollements entre l'âme et les peaux de matériaux sandwichs Hsu [107],
- et/ou leur utilisation en service : délaminages, fissures Hsu [107], Mouritz et al. [151].

1.2.3 Bilan

Le contrôle ultrasonore est aujourd'hui la technique la plus utilisée et la plus reconnue dans l'industrie aéronautique au travers des standards AITM. Parmi ses avantages principaux, il faut citer :

- même si les représentations planes sont les plus couramment employées, la possibilité de détecter des défauts dans le volume de la pièce (par combinaison des vues 2D),
- une grande sensibilité de détection des défauts plans, grâce à l'utilisation très répandue des ondes longitudinales à incidence normale,
- l'automatisation possible du contrôle permettant d'obtenir une liaison acoustique optimale,
- le caractère portable de certains dispositifs expérimentaux.

Toutefois, cette technique présente quelques inconvénients dont notamment une mise en oeuvre difficile et délicate, le besoin le plus souvent de l'agent couplant ainsi que la nécessité de réaliser une plaque étalon représentative de la pièce inspectée et des défauts recherchés. Par ailleurs, il existe certaines contraintes d'application dues à l'emploi de traducteurs spécifiques selon le matériau testé, son épaisseur, la forme de la structure ainsi que de son état de surface. Enfin, il convient de signaler la sensibilité de la méthode par rapport au type d'ondes choisi (les résultats obtenus pour chaque type diffèrent selon l'orientation de la surface du défaut) ainsi qu'à leur fréquence.

1.3 Mesures de champs densimétriques : radiographie à rayons X et tomographie à rayons X

Depuis de nombreuses années, les mesures de champs densimétriques sont employées dans le milieu industriel (Babout [22], Badel [24], Lecomte [130]). Dans l'industrie aéronautique, sa pratique est normalisée, entre autres par les normes AITM (AITM6-7002 [12], AITM6-7006 [13]). Au fil des années, beaucoup de développements ont été réalisés sur les mesures de champs densimétriques comme moyen de CND pour les structures composites, sous l'impulsion notamment du secteur médical. En particulier, la radiographie X est devenue maintenant incontournable (Sreelekshmi et al. [187]) alors que la tomographie X, qui constitue une extension 3D de la radiographie, est en plein essor (Badel [24]).

Les mesures de champs densimétriques sont basées sur :

- l'envoi d'un flux d'ondes électromagnétiques (rayons X) au travers de la pièce,
- la réception du flux transmis par un ou des détecteurs (contrôle en face arrière),
- l'obtention d'une mesure de champ en cartographie 2D (radiographie X) ou 3D après traitement d'images et reconstruction (tomographie X).

Compte tenu de leur base physique commune, on fait en premier lieu une présentation conjointe des grandes lignes de ces deux techniques avant d'aborder leurs spécificités propres.

1.3.1 Principe physique

1.3.1.1 Le rayonnement X

Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques de très forte énergie, de quelques keV à plusieurs MeV, c'est-à-dire de longueur d'onde très faible (de 10^{-10} à 10^{-14} m) par rapport au rayonnement visible (voir figure 1.11). L'interaction des rayons

X avec la matière conduit à la production d'électrons responsables d'ionisations dans le milieu traversé. Ils sont classés dans le domaine des rayonnements ionisants, mais ils le sont en fait indirectement. Leurs effets dans le milieu parcouru proviennent des ionisations provoquées par les particules secondaires. Ce sont ces effets qui sont utilisés pour la détection et la visualisation des rayonnements.

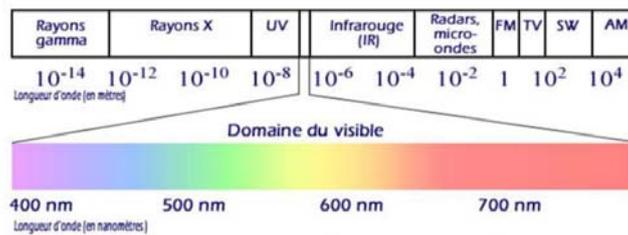


FIGURE 1.11 – Spectre électromagnétique (Garnier [83])

1.3.1.2 Loi d'atténuation des rayons X

Lorsque des rayons X traversent un milieu, on note une perte par rapport au nombre de particules incidentes, soit en d'autres termes une variation d'intensité du faisceau. Ce phénomène, appelé atténuation, résulte de l'interaction des photons avec la matière au travers de plusieurs processus distincts (Le-Bras [125], Freud [81], Lecomte [130]) :

- interaction avec les atomes du milieu (effet photoélectrique),
- interaction avec les électrons des atomes (effet Compton),
- interaction avec le noyau des atomes (effet Thomson-Rayleigh) ; vis-à-vis des énergies utilisées dans la radiographie (entre 10 et 150 keV), cet aspect est habituellement négligé car il ne contribue que très faiblement à l'atténuation globale.

Durant une interaction, l'énergie du photon incident est complètement ou partiellement absorbée et transférée à un électron sous forme d'énergie cinétique. Dans la figure 1.12, les différents parcours et interactions possibles pour les photons X lors de la traversée d'un matériau sont détaillés.

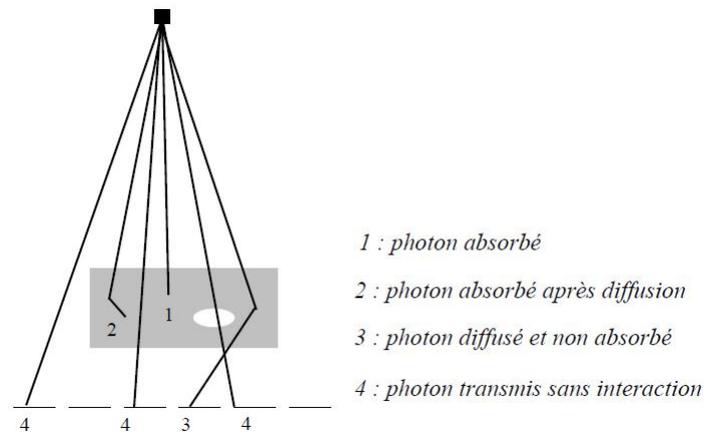


FIGURE 1.12 – Interaction entre le rayonnement et la matière lors de la traversée d'un matériau (Lecomte [130])

La loi d'atténuation des rayons X dépend de l'épaisseur de l'objet et du coefficient massique d'atténuation du matériau (Babout [22], Badel [24], Bayraktara et al. [32], Le-Bras [125], Carmona [50], Lecomte [130], Lenoir [134], Bossi et al. [45]). Ce dernier point représente tout l'intérêt de ces mesures d'atténuation des radiations X dans le cadre du CND par la dépendance à la densité du matériau. Il s'agit ainsi d'une méthode de mesure de champ densimétrique : chaque pixel (radiographie) ou voxel (tomographie) caractérise en effet la moyenne des densités massiques des différents constituants compris dans celui-ci et permet donc de différencier localement les hétérogénéités telles que les vides ou inclusions. On note que l'énergie du faisceau de photons intervient également dans cette analyse puisque le coefficient d'atténuation du milieu décroît lorsque l'énergie des photons augmente (figure 1.13).

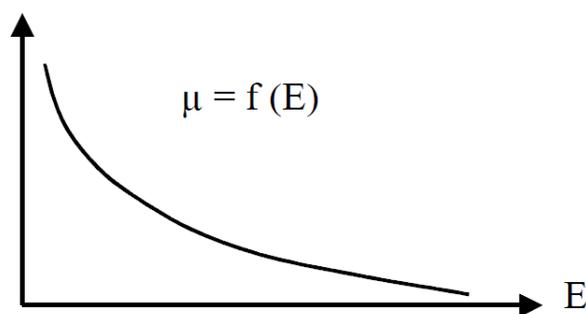


FIGURE 1.13 – Evolution du coefficient d'atténuation μ d'un milieu en fonction de l'énergie E des photons

1.3.2 Principe de contrôle

1.3.2.1 Démarche globale

De manière générale, le contrôle par rayons X se réalise en transmission (contrôle en face arrière, figure 1.14). La chaîne de contrôle comprend la source de rayons X, le support de l'objet contrôlé ainsi que le détecteur avec ou sans système imageur.

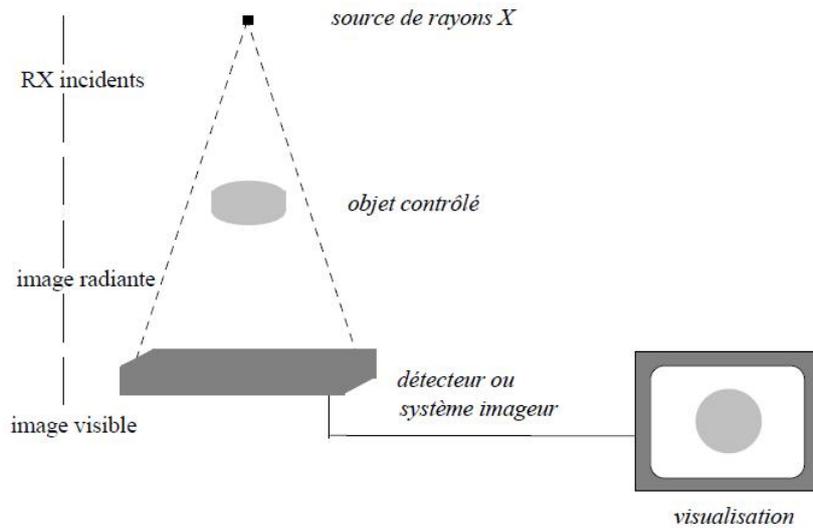


FIGURE 1.14 – Principe de contrôle par rayons X (Lecomte [130])

Les résultats du contrôle par rayons X étant basés sur les différences d'absorption de la pénétration de ces radiations dans le matériau inspecté, deux paramètres conditionnent fortement la résolution des images obtenues et donc la performance de la technique en terme de détection :

- d'une part la capacité du matériau testé à absorber les radiations X, soit l'importance de son coefficient massique d'atténuation ; pour les composites en carbone dont le coefficient d'absorption est faible à la base, il est ainsi recommandé d'utiliser une faible énergie de radiation (les tensions les plus couramment employées se trouvent entre 10 keV et 50 keV mais l'intervalle de 10 keV à 20 keV est généralement suffisant) voire d'employer un liquide pénétrant radiographiquement opaque (comme par exemple le tétrabrométhane) si l'on souhaite détecter des défauts débouchants et connectés entre eux (Schilling et al. [181], Wong and Ron [196]),
- d'autre part le contraste d'absorption entre le matériau dit sain et les défauts au sein de celui-ci, soit le rapport entre le nombre N_2 de photons X transmis par le

défaut et le nombre N_1 de photons X transmis par son voisinage (voir figure 1.15 pour une pièce d'épaisseur constante comportant un vide, Lecomte [130]) ; de façon évidente, le contraste sera d'autant meilleur que le défaut sera épais.

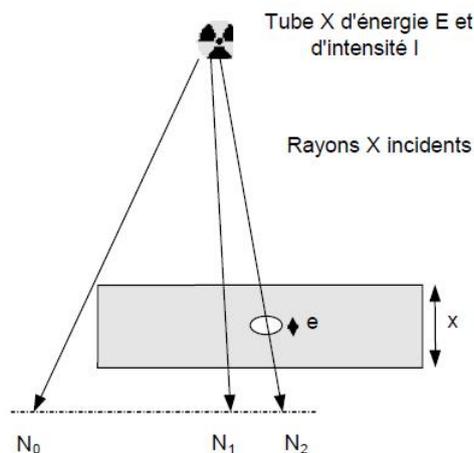


FIGURE 1.15 – Contraste d'un défaut sur l'image radiante (Lecomte [130])

Au niveau de la résolution spatiale des images obtenues (soit la taille des pixels/voxels), un certain nombre de paramètres entre en jeu et de manière différente suivant la configuration matérielle du système :

- la source de rayons X (taille, type, énergie des rayons),
- le détecteur (nature, dimensions, résolution spatiale, grossissement²),
- l'échantillon (taille et forme).

Du point de vue du CND, la qualité de la détection sera liée à une résolution spatiale de la mesure inférieure à la taille habituelle des défauts recherchés en ultrasons ; cela conditionnera donc une grande partie des réglages du dispositif expérimental (Lenoir [134]) ainsi que les temps d'acquisition nécessaires.

1.3.2.2 La radiographie à rayons X

La radiographie X correspond à l'application bidimensionnelle de la démarche précédente. La création des rayons X est réalisée dans ce cas par un tube à rayons X dans lequel les électrons sont accélérés sous une différence de potentiel importante venant percuter une cible métallique généralement en tungstène (Freud [81], Lecomte [130]) (figure 1.16).

2. Le grossissement est le rapport entre la taille de l'image de l'échantillon enregistrée par le détecteur et la taille réelle de l'échantillon ; plus il est important, meilleure est la résolution spatiale.

Lors de cette accélération, l'énergie des photons va varier de quelque keV à l'énergie correspondant à la haute tension choisie. Les interactions des électrons avec la cible sont de deux types (Le-Bras [125], Lecomte [130]) :

- par collision des électrons avec les électrons des atomes de la cible,
- par collision et freinage des électrons dans le champ électrique des noyaux de la cible.

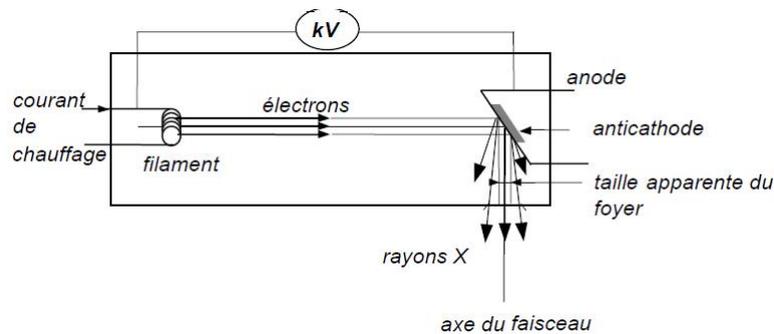


FIGURE 1.16 – Schéma d'un tube à rayons X (Badel [24], Le-Bras [125], Lecomte [130])

Parmi les différents supports de visualisation des résultats, le plus fréquemment utilisé est le film radiographique (film argentique). Ce dernier comprend un support transparent dont les deux faces sont recouvertes de couches d'émulsion comportant des cristaux d'halogénures d'argent. Le rayonnement X y produit des actions de différents types : tout d'abord l'arrachement d'électrons et ensuite des réactions chimiques entre ces électrons libérés et les cristaux de bromure d'argent présents dans le film. Un traitement chimique de développement transforme complètement ces cristaux modifiés en argent métallique noir, les autres étant éliminés. Ce traitement peut être effectué de façon manuelle ou automatiquement en machine. L'action du rayonnement X sur le film dépend, entre autres, de la durée de l'exposition et de son intensité (Lecomte [130]).

En ce qui concerne les matériaux composites, les principales applications de la radiographie X concernent la détection d'inclusions comme des inserts métalliques (Avril et al. [18]), des manques de colle (Herve et al. [105]) ou d'endommagements locaux tels que des fissures et délaminages (Bertin et al. [37], Thomas [191]). Néanmoins, les mesures fournies par cette technique restent une projection 2D sur le détecteur des défauts présents dans le volume de la structure contrôlée. Afin de pouvoir compléter cette information et localiser les hétérogénéités en profondeur, il convient de se tourner vers l'extension 3D de cette méthode : la tomographie X.

1.3.2.3 La tomographie à rayons X

La tomographie X ou tomodensitométrie permet une mesure volumique du champ densimétrique. Cette extension tridimensionnelle s'obtient à partir de plusieurs images radiographiques 2D appelées coupes tomographiques (figure 1.17) (Babout [22], Bayraktara et al. [32], Carmona [50], Lenoir [134]). Ces coupes sont acquises par un système imageur numérique et sont composées d'une matrice de pixels sur une épaisseur finie de l'objet. L'association de ces différentes coupes (phase de reconstruction) conduit à l'image volumique composée de voxels dont la taille implique la résolution spatiale de la mesure (figure 1.18).

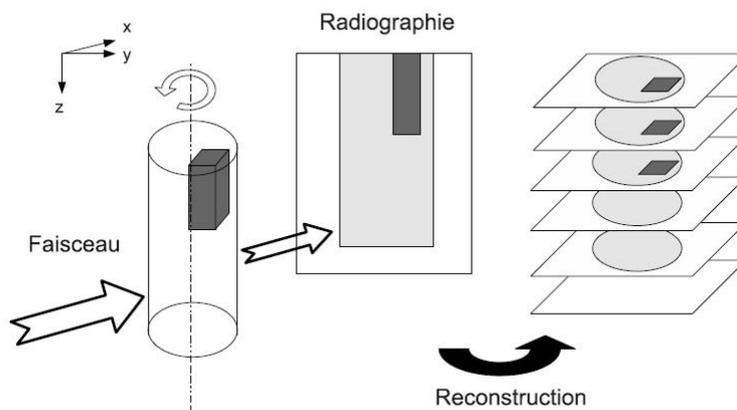


FIGURE 1.17 – Schéma de principe du contrôle par tomographie X : du faisceau jusqu'aux coupes (Carmona [50])

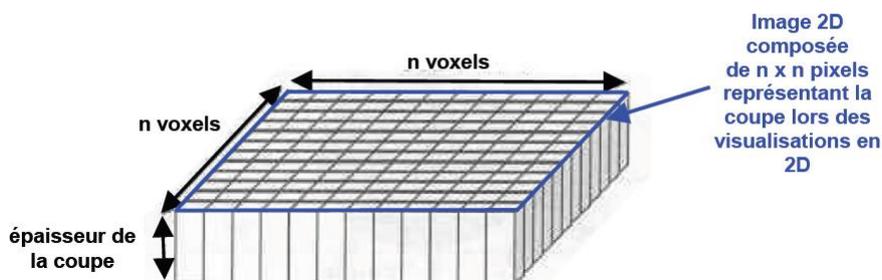


FIGURE 1.18 – Schéma d'une coupe (Lenoir [134])

Classiquement, la mesure par tomographie est effectuée à l'aide de scanners pour applications médicales ou industrielles. Ces appareils, basés sur le même principe de création des rayons X que précédemment, peuvent être distingués selon l'agencement des couples émetteur/détecteur (figure 1.19) (Lenoir [134]) :

- La première génération de scanners utilise un faisceau en pinceau et un seul détecteur, situés dans le plan de coupe; la mesure est effectuée par translation de l'ensemble source/détecteur sur toute la largeur de l'échantillon puis en recommençant l'opération après rotation de l'échantillon ou de l'ensemble source/détecteur,
- Dans la deuxième génération, la source subit également une translation mais se présente en éventail avec un faible angle d'ouverture et une ligne de détecteurs; l'avantage est d'obtenir plus d'informations en moins de temps par rapport à un scanner de première génération; il permet également d'obtenir des données plus précises que les autres générations utilisant une source en éventail mais pour un temps d'acquisition plus long,
- Les scanners de troisième et quatrième générations utilisent enfin une source et des détecteurs plus larges permettant la plupart du temps de couvrir l'échantillon en entier; la source est en éventail ou en cône, et les détecteurs sont respectivement en ligne ou en plan; ces configurations réduisent considérablement le temps d'acquisition notamment la configuration cône/plan qui permet de scanner plusieurs coupes en même temps; la différence entre les deux générations réside dans le fait que seul l'échantillon tourne dans la troisième génération alors que tout l'ensemble source/détecteur tourne dans la quatrième (si l'ensemble des détecteurs est circulaire comme dans la figure 1.19); les configurations où la rotation est effectuée par l'échantillon permettent d'améliorer la qualité des images car des filtres peuvent être facilement placés devant la source (ou les détecteurs) afin de réduire les artefacts.

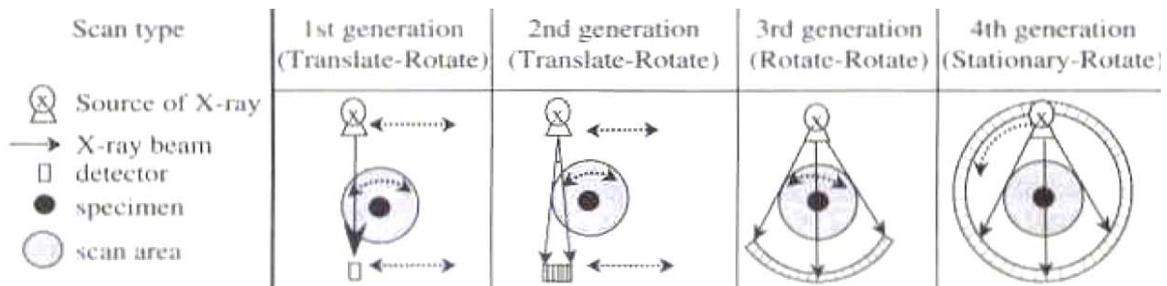


FIGURE 1.19 – Générations de scanners (Lenoir [134])

La tomographie X peut être également réalisée à l'aide de synchrotrons. Dans ce cas, le processus de création des radiations diffère des scanners médicaux et industriels et consiste à un changement de trajectoire dans un accélérateur à particules (Lenoir [134]). Les électrons sont accélérés à une vitesse proche de la lumière (électrons relativistes) puis déviés par un champ magnétique (force de Lorentz) ce qui crée l'émission d'un faisceau de photons tangentiellement à la courbe suivie par les électrons. Par rapport aux tubes à rayons X, les énergies émises sont plus importantes, le spectre d'énergies délivrables est plus large et les faisceaux peuvent être considérés comme convergents donc plus efficaces, pour une meilleure résolution spatiale.

La diversité des angles d'incidence des rayons X et la performance des détecteurs de cette technique d'imagerie conduisent généralement à de meilleurs résultats que la radiographie X avec films argentiques (Bayraktara et al. [32]). Parmi les facteurs influents sur la qualité de la mesure par tomographie, on peut ainsi citer le type et la génération de scanners utilisés ainsi que la résolution des détecteurs (soit la taille des cellules photoélectriques qui enregistrent les rayons transmis). A titre d'exemple, les scanners médicaux présentent des résolutions spatiales de l'ordre de plusieurs centaines de microns, les scanners industriels de l'ordre de quelques dizaines de microns et les synchrotrons de l'ordre du micron. En terme de rapidité d'acquisition, l'appareil le plus lent est le scanner industriel (jusqu'à plusieurs heures), et les plus rapides sont le scanner médical et le synchrotron (quelques minutes).

Il convient enfin de signaler que les résultats obtenus sont particulièrement sensibles au principe de reconstitution des images. La mesure radiographique de l'atténuation des rayons X à travers un objet est une mesure projetée pour un angle incident donné. Afin d'accéder à l'atténuation en chaque point du volume, il est nécessaire d'associer un ensemble de projections sous différents angles régulièrement espacés (figure 1.20 (Lenoir [134])). L'algorithme utilisé pour réaliser la reconstitution doit être capable de corriger les erreurs engendrées par les différences entre les conditions réelles de mesure et les conditions théoriques de la reconstruction afin de réduire ou supprimer les artéfacts qui peuvent masquer ou modifier des zones d'intérêt.

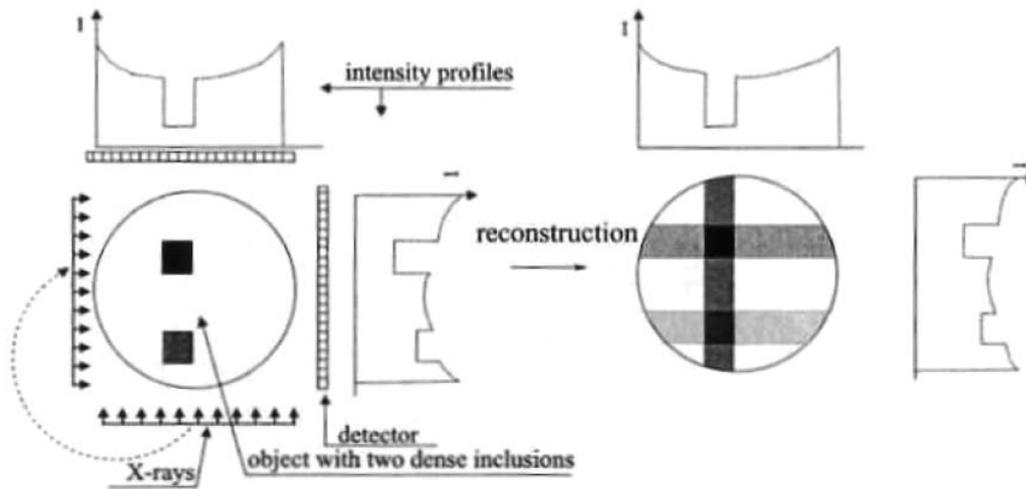


FIGURE 1.20 – Principe de la méthode de reconstruction d’images tomographiques (Lenoir [134])

En ce qui concerne les matériaux composites, la tomographie X est utilisée pour quantifier la présence de défauts induits par le procédé de fabrication ou par des sollicitations externes, par exemple :

- des porosités (Babout [22], Bayraktara et al. [32], Hanke et al. [104], Schilling et al. [181]),
- la distribution de l’orientation des fibres (Bernasconi et al. [36]),
- des fissurations (Moffat et al. [145], Schilling et al. [181]),
- des délaminages et leurs contours (Bayraktara et al. [32], Geier [85], Hanke et al. [104], Schilling et al. [181], Tsao and Hocheng [192]).

On notera également que cette technique permet le suivi de ces défauts sous contraintes lorsque la taille et le temps d’acquisition des tomographes sont respectivement compatibles avec la dimension des essais et les vitesses de phénomènes (Babout et al. [23], Carmona [50], Lenoir [134], Maire et al. [136, 137], Moffat et al. [145], Reifsnider and Williams [174]).

1.3.3 Bilan

Les mesures de champs densimétriques par radiographie X et tomographie X permettent d’accéder de manière non intrusive à des informations sur la microstructure interne des matériaux, en particulier de révéler toute hétérogénéité ou singularité. Dans le

cadre du CND, il s'agit donc de techniques particulièrement intéressantes dont les principaux avantages sont :

- leur applicabilité à la quasi-totalité des matériaux,
- la possibilité de contrôler des pièces à géométrie complexe,
- la détection volumique de défauts (inclusions gazeuses, inclusions de matière étrangère,...).

Par rapport à la radiographie qui n'offre qu'une visualisation 2D du défaut, la tomographie a permis des avancées notables grâce à une information dans le volume et la localisation des imperfections dans l'épaisseur des pièces. Dans les deux cas, on peut néanmoins citer comme limitations potentielles les contraintes de protection nécessaires lors de la réalisation du contrôle, la maîtrise technique indispensable à leur utilisation, le coût des appareillages et leur taille qui ne permet généralement pas de contrôler des pièces de grande envergure.

1.4 Mesures de champs thermiques : la thermographie infrarouge

Dans le cadre du CND sur structures mécaniques de faible épaisseur, une nouvelle technologie sans contact, rapide en terme d'exécution et permettant de réaliser des acquisitions de champs en une prise émerge depuis quelques années. Il s'agit de la thermographie infrarouge qui permet d'accéder à des mesures de champs thermiques (température ou propriétés thermiques, Bremond [47], Chrysochoos [57], Guibert [102], Lambert et al. [121]). Cette technique commence à être présente dans l'industrie puisque sa pratique est déjà normalisée par les standards AITM (AITM6-0015 [6]).

Elle est basée sur :

- l'excitation interne ou externe de la pièce,
- la réception du flux de chaleur restitué en réponse par celle-ci à l'aide d'un détecteur infrarouge, en face avant ou arrière,
- l'obtention d'une mesure de champ thermique en cartographie 2D (qui permet d'identifier la projection en surface des défauts).

1.4.1 Principe physique

1.4.1.1 Rayonnement InfraRouge (IR) et bilan radiatif

Le rayonnement thermique est une émission d'ondes électromagnétiques caractérisées par des longueurs d'ondes dites infrarouges comprises entre $3 \mu m$ et $1000 \mu m$ (Clerjaud [60], Garnier [83], Guibert [102], Pastor [159]) (figure 1.11). Le spectre de lumière infrarouge se décompose quant à lui en trois domaines :

- le domaine infrarouge proche (de $0,759$ à $3 \mu m$),
- le domaine infrarouge moyen (de 3 à $5 \mu m$),
- le domaine infrarouge lointain (de $5 \mu m$ à $1000 \mu m$),

les gammes les plus fréquemment étudiées étant les domaines proche et moyen.

Lorsqu'un flux thermique Φ est envoyé sur la pièce (figure 1.21), une partie Φ_r du rayonnement est réfléchi sur le corps, une autre partie Φ_t est transmise au travers de celui-ci et une dernière partie Φ_a est enfin absorbée. En absorbant ce flux Φ_a , le matériau s'échauffe et le flux de chaleur Φ_e qu'il émet est fonction de sa température à l'instant considéré. Si une sollicitation interne induit cet échauffement, la dissipation produite est de la même façon liée à sa température. Cette transcription en température se fait à partir de la connaissance de l'émissivité (rapport d'émission entre le matériau et un corps de référence dit corps noir ³) qui caractérise l'aptitude du matériau à émettre de l'énergie par rayonnement. L'émissivité du matériau, comprise entre 0 et 1, est une propriété thermique fonction notamment de sa densité, de son état de surface, de la température et de la longueur d'onde (Guibert [102], Ibarra-Castanedo [110], Pajani and Audaire [156]).

3. Un corps noir est un matériau idéal opaque d'émissivité égale à 1, qui absorbe intégralement tous les rayonnements qui lui parviennent, sans aucune réflexion, et indépendamment de la direction d'émission et de la longueur d'onde.

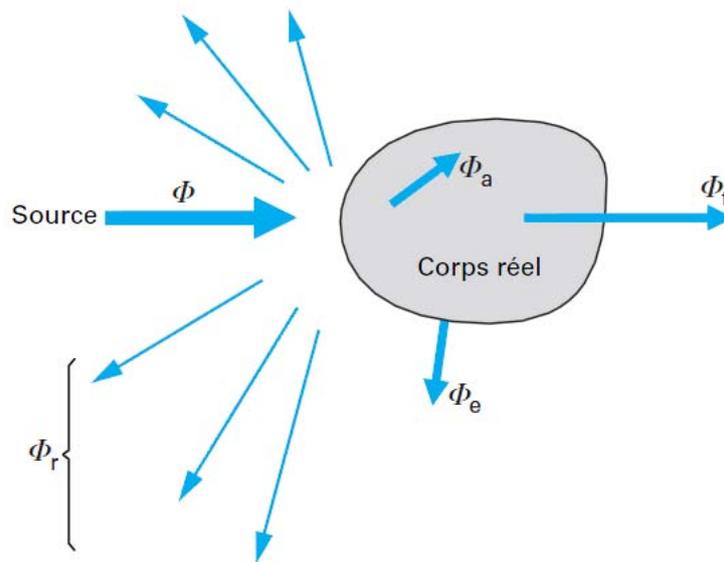


FIGURE 1.21 – Bilan radiatif (Pajani [155])

1.4.1.2 Capteurs infrarouges

Il existe essentiellement deux types de capteurs du rayonnement infrarouge (Guibert [102]) :

- les capteurs thermiques comme par exemple les microbolomètres, qui sont des résistances ou des jonctions évoluant avec la chaleur incidente,
- les capteurs photoniques, plus communs du fait de leur grande sensibilité et de leurs bonnes résolutions spatiales, qui mesurent directement la densité du flux de photons.

Pour réaliser des analyses d'imagerie thermique, les capteurs infrarouges sont disposés en matrice au sein de la caméra, chaque capteur formant un pixel de l'image. Pour les mesures infrarouges, des lentilles en silicium ou germanium sont employées car elles sont transparentes à ces longueurs d'onde (Guibert [102]).

Une mesure de température effectuée à l'aide d'une caméra infrarouge demande certaines précautions. Outre des réflexions optiques parasites et des effets de l'environnement, les capteurs infrarouges dans la caméra peuvent être perturbés par la température de la lentille. Ainsi les bords de l'image peuvent être plus chauds (respectivement froids) que son centre lorsque l'objet observé est plus froid (resp. chaud) que la température de la caméra. Pour limiter au maximum ces différents bruits, il conviendra par conséquent de travailler dans un laboratoire thermorégulé où les vibrations environnantes sont minimisées, de placer la caméra et les pièces à examiner dans celui-ci quelques jours avant le

test et de réaliser les essais dans le noir. Lorsque les mesures sont réalisées sur de très faibles dissipations thermiques, une calibration est par ailleurs recommandée avant chaque série d'expériences (Guibert [102]). Enfin, quel que soit le sens de contrôle adopté (voir ci-après), l'objectif de la caméra doit être positionné parallèlement à la surface examinée de façon à optimiser le champ optique et à éviter tout effet de distorsion de l'image.

1.4.2 Principe du contrôle

Le CND par thermographie consiste à mesurer le rayonnement infrarouge émis par la pièce suite à sa sollicitation et de fournir l'évolution temporelle du champ de température ou des propriétés thermiques associées. L'existence d'hétérogénéités dans ce champ traduit alors des différences locales de transmission et de restitution du flux thermique induites par des variations de densités (soit la présence de défauts internes et/ou débouchants) ainsi que des différences locales de réflexion (soit la variation de l'état de surface et/ou la présence de défauts débouchants) (Framezelle et al. [79], Larbi [122], Prodjinonto [170]).

Différentes méthodologies de contrôle par thermographie ont été mises en place pour analyser la réponse thermique des matériaux. Elles se distinguent notamment par la nature et le type de signal de la (ou des) sources d'excitation ainsi que par la position respective de la source et du capteur (sens du contrôle). On se propose d'évoquer ci-après ces deux aspects puis de passer en revue trois techniques couramment employées.

1.4.2.1 Types de sollicitations

Les dispositifs expérimentaux de contrôle comportent une ou plusieurs sources de sollicitation induisant une dissipation au sein du matériau. Celles-ci peuvent être de nature différente (figure 1.22) :

- en interne : la sollicitation par ultrasons (Framezelle et al. [79], Potet [168]) ou par courants de Foucault (Maillard et al. [135]),
- en externe : par exemple une lampe halogène, une lampe flash, un laser, un inducteur haute fréquence, une convection forcée d'air ou encore une conduction par liquide (Guibert [102], Pajani and Audaire [156]).

Dans la gamme des sollicitations externes par lampes, le signal émis par la source peut prendre différentes formes (sinusoïdale, créneau, impulsionnelle, figure 1.23) correspondant à des méthodes de thermographie infrarouge (IR) particulières que l'on se propose de détailler dans la suite.

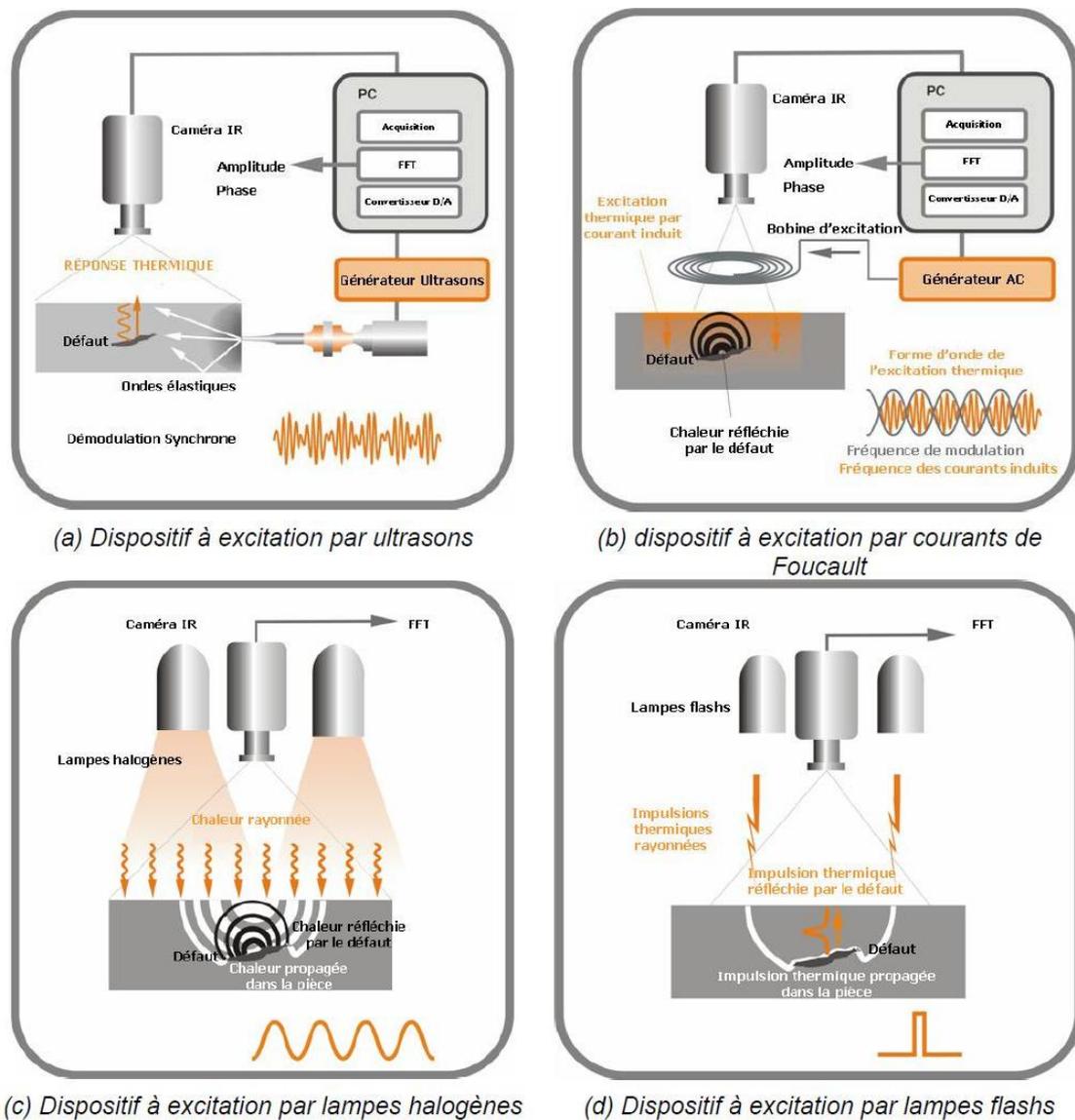


FIGURE 1.22 – Types de sollicitations thermiques (Maillard et al. [135])

1.4.2.2 Sens du contrôle

Contrôle en face avant

Pour le contrôle en face avant, la source thermique et la caméra sont positionnées du même côté de la pièce (figure 1.24). Le flux mesuré par la caméra correspond aux flux réfléchis et restitués par la pièce. Cette configuration est souvent employée quand les défauts sont supposés être près de la surface chauffée (Ibarra-Castanedo [110]). Elle se

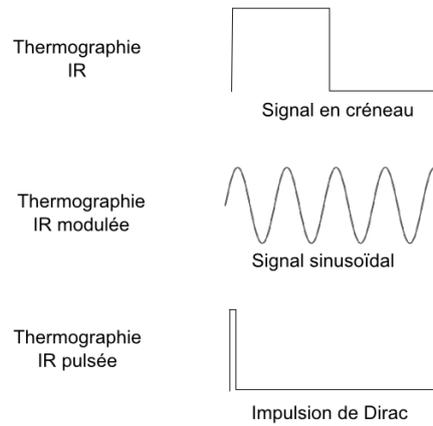


FIGURE 1.23 – Correspondance entre les méthodes de thermographie IR et leur signal respectif

révèle également attractive dans le cas d’assemblages fermés puisqu’elle ne nécessite pas d’avoir accès aux deux côtés de la pièce inspectée.

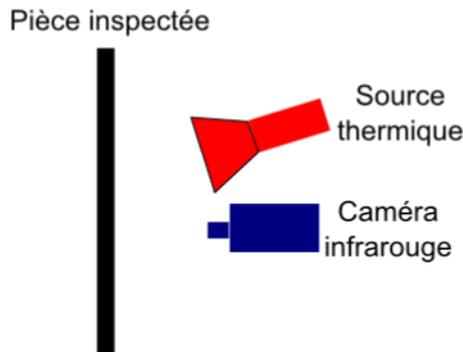


FIGURE 1.24 – Thermographie infrarouge en face avant

S’ajoutant au bruit environnant, il existe dans cette configuration deux autres bruits de mesure importants :

- les réflexions du rayonnement de la source, qui sera d’autant plus accentué que la surface étudiée est brillante,
- l’impact thermique sur la surface au niveau du point focal de la source, qui accélère la saturation de la pièce, et donc celle de l’image, rendant très peu visible les défauts localisés à cet endroit.

De plus, suivant la géométrie de la pièce contrôlée ainsi que la taille de la fenêtre de test utilisée, la notion d’encombrement entre la source thermique et la caméra IR peut devenir un problème crucial pour la bonne réalisation du contrôle.

Contrôle en face arrière

Dans ce cas, la caméra IR est positionnée du côté opposé à la source thermique (figure 1.25) ; la surface mesurée est donc opposée à la surface chauffée. Dans ce cas, le flux mesuré par la caméra correspond aux flux transmis et restitués par la pièce. Cette configuration, assez peu utilisée dans l'industrie, est préférentiellement adoptée lorsque les défauts sont supposés être près du côté de la caméra (Ibarra-Castanedo [110]).

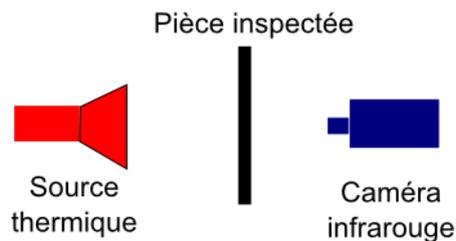


FIGURE 1.25 – Thermographie infrarouge en face arrière

Dans cette configuration, un seul autre type de bruit est adjoint à l'effet de l'environnement, à savoir les réflexions de la brillance de l'état de surface sur l'objectif de la caméra.

On notera que les trois techniques de thermographie infrarouge qui sont détaillées maintenant peuvent être utilisées soit en configuration face avant, soit en configuration face arrière.

1.4.2.3 Thermographie InfraRouge (TIR)

La TIR est caractérisée par le signal en créneau de la source thermique. Le schéma de câblage pour effectuer le contrôle est assez simple (figure 1.26) : le flux thermique de la source est généré par l'amplificateur de signal qui permet de faire varier son amplitude (dans les limites de la puissance de la source thermique et de l'ampérage de l'amplificateur), le contrôle (déclenchement du test, acquisition des données et arrêt) étant géré par le PC relié à la caméra IR.

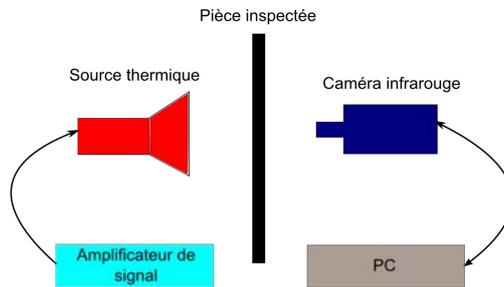


FIGURE 1.26 – Schéma de câblage de la TIR

Cette technique permet d’obtenir une cartographie 2D du champ thermique sur la surface observée, dont les hétérogénéités induites par les défauts internes peuvent être dimensionnées. Bien que particulièrement rapide et aisée à mettre en oeuvre, très peu d’études dans la littérature ont été consacrées à l’analyse de structures composites par le biais de cette méthode de thermographie IR.

1.4.2.4 Thermographie InfraRouge Modulée (TIRM)

La TIRM peut également porter le nom de thermographie infrarouge “lock-in”, à détection synchrone ou encore radiométrie photothermique (Clerjaud [60], Prodjinonto [170]). Cette technique est caractérisée par l’utilisation d’un signal périodique sinusoïdal de la source thermique. Le schéma de câblage de cette technique s’articule autour du générateur de signal (figure 1.27) : celui-ci pilote la source thermique via l’amplificateur de signal et permet de faire varier à la fois l’amplitude mais aussi la fréquence de l’onde envoyée ; il communique par ailleurs via la caméra thermique sa fréquence de travail au PC qui gère comme précédemment le contrôle.

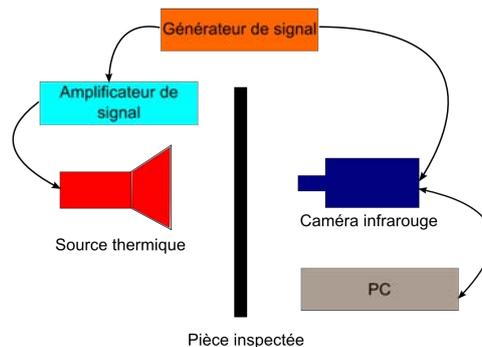


FIGURE 1.27 – Schéma de câblage de la TIRM

La TIRM conduit à l'acquisition de deux types de cartographies de défauts :

- celle du module (modification de l'amplitude du signal), qui correspond à la donnée obtenue par la méthode TIR, et qui permet de dimensionner la taille des défauts présents dans la pièce contrôlée,
- celle de la phase (déphasage entre les signaux émis et mesuré), qui conduit à une information à la fois sur la dimension des défauts mais également sur leur profondeur dans la pièce ; précisément, on peut déduire de l'analyse de la cartographie de phase la position relative des défauts dans la profondeur (caractérisation qualitative) ; l'estimation directe (quantitative) de leur localisation respective requiert un traitement des résultats à l'aide d'algorithmes spécifiques (Choi et al. [56], Guibert [102], Ibarra-Castanedo [110]).

Outre des facteurs propres à la pièce (notamment l'épaisseur de l'éprouvette ou la nature des défauts), la capacité de détection de cette technique est influencée par les paramètres de l'onde émise (amplitude et fréquence) Bai and Wong [27, 26, 25], Horny and Lannoy [106], Meola et al. [138, 140]. Ces derniers peuvent donc être modifiés de façon à capter l'information voulue, ce qui est un avantage certain pour la méthode. En particulier, une fréquence faible augmente la profondeur de détection.

Ce fonctionnement général de la TIRM a été appliqué à l'aide de différentes sources d'excitation :

- à partir de sources internes, générées par exemple par une onde ultrasonore sinusoïdale traversant la pièce (méthode ultrasonique ou vibrothermographie (Gleiter et al. [89], Potet [168], Zweschper et al. [202]), figure 1.28) ; pour l'identification de fissures, on peut utiliser également un champ électrothermique induit par les courants de Foucault autour des pointes de celles-ci (Maillard et al. [135], Sakagami and Kubo [180]) (méthode dite singulière) ;
- à partir de sources externes telles que les lampes au Xenon (Sakagami and Kubo [180]) ("méthode d'isolation" permettant de détecter des défauts de type trous à fond plat dans des matériaux tels que la céramique et le graphite) ou plus classiquement des lampes halogènes (Choi et al. [56]).

Wu (Wu and Busse [197]) présente une étude comparative entre TIRM avec sources de chaleur interne (ultrasonore) et externe (lampes halogènes) pour la détection de délaminages dans du stratifié carbone-époxy et d'impacts dans de la céramique. Les résultats sont apparemment meilleurs avec la TIRM à source interne. Toutefois, ces deux démarches semblent complémentaires puisque la TIRM avec lampes halogènes est une technique

d'analyse globale alors que la TIRM ultrasonore présente un domaine d'investigation plus local.

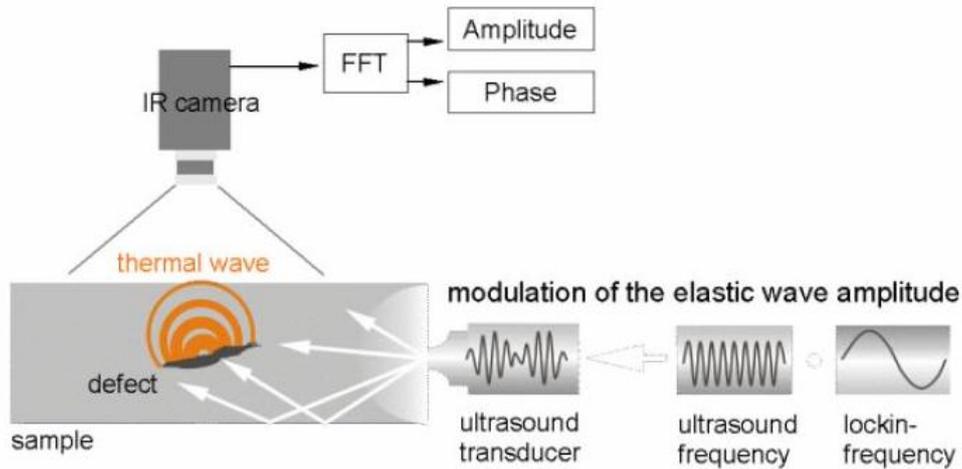


FIGURE 1.28 – TIRM ultrasonore (Gleiter et al. [89])

1.4.2.5 Thermographie InfraRouge Pulsée (TIRP)

La TIRP, également appelée méthode flash associée à la thermographie, est caractérisée par l'utilisation d'un signal impulsionnel de type Dirac de la source sollicitante (Prodjinonto [170], Sakagami and Kubo [180]). Selon l'épaisseur et la diffusivité de la pièce inspectée, la durée de l'impulsion varie de quelques millisecondes à quelques secondes (Ibarra-Castanedo [110], Larbi [122]). Le schéma de câblage s'apparente à celui de la TIR, la seule différence se situant au niveau de la source thermique, en l'occurrence des lampes flash qui ne nécessitent pas d'amplificateur de signal (figure 1.29).

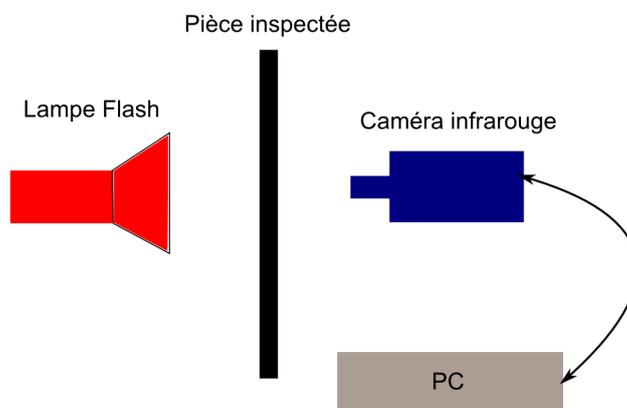


FIGURE 1.29 – Schéma de câblage de la TIRP

L'utilisation de la lampe flash permet de solliciter la pièce inspectée sur toutes ses fréquences caractéristiques en une seule impulsion (Larbi [122]). De nombreux traitements d'images (par exemple analyse de contraste, traitement statistique, décomposition en valeurs singulières, cartographie de paramètres thermophysiques) sont appliqués aux images thermiques réalisées lors des contrôles par TIRP dans le but de mettre en évidence les défauts présents dans la pièce inspectée (Larbi [122], Prodjinonto [170]). Les données de sortie généralement utilisées sont des mesures de champs de diffusivité ou conductivité (Parker et al. [158]) et les défauts présents au sein de la structure inspectée sont mis en évidence à partir des variations locales de ces propriétés thermiques. Depuis quelques années, de multiples améliorations ont été apportées, rendant cette technique particulièrement efficace et rapide pour le CND en milieu industriel (Batsale et al. [30, 29], Bendada et al. [33, 34], David et al. [66], Degiovanni and Laurent [69], Degiovanni [68], Ramond et al. [172, 171]).

Cette méthode est plutôt adaptée à l'étude des matériaux fins (Prodjinonto [170]) (les temps d'exposition requis pour des matériaux épais, de l'ordre de l'heure, ne sont pas compatibles avec un maintien uniforme du flash). Des essais en TIRP ont été réalisés sur des structures composites sandwichs avec une âme en nid d'abeille d'aluminium et des structures monolithiques de type CFRP (plastique renforcé de fibres de carbone (Larbi [122])). La TIRP est également employée dans le cadre du suivi d'essai de fatigue (Steinberger et al. [188]).

Il existe aussi une autre méthode appelée thermographie infrarouge de phase pulsée qui est une combinaison des avantages de la thermographie pulsée avec sa rapidité d'acquisition de données, et de la thermographie modulée avec la localisation du défaut en profondeur moyennant l'exécution de différents calculs après tests (Clerjaud [60], Guibert [102], Ibarra-Castanedo and Maldague [113, 112], Ibarra-Castanedo [110]).

1.4.3 Bilan

Les mesures de champs thermiques sont des mesures optiques sans contact présentant de nombreuses potentialités pour le CND. Du point de vue industriel, on peut citer comme avantages principaux leur rapidité d'exécution, un caractère portable et une mise en oeuvre facile ainsi que la capacité à contrôler les pièces à géométrie complexe, de manière globale et/ou locale selon le besoin. Certains inconvénients subsistent à l'heure

actuelle, parmi lesquels la difficulté à obtenir une information sur la profondeur du défaut, une détection limitée pour des pièces composites épaisses, une mesure de champs par visualisation surfacique uniquement.

1.5 Conclusion

Ce premier chapitre a été dédié à un état de l'art des techniques industrielles de CND par mesure de champs, en focalisant notamment sur des applications composites. Trois familles de méthodes ont été abordées :

- les ultrasons, technique la plus utilisée actuellement dans l'aéronautique, qui conduit à des mesures de champs acoustiques,
- la radiographie X et la tomographie X qui fournissent des mesures de champs densimétriques,
- la thermographie infrarouge qui permet des mesures de champs thermiques.

Pour chacune d'elles, leur base physique et les principes généraux de leur mise en oeuvre ont été détaillés. Leurs avantages et les limitations ont été également mis en évidence. Ceci permet d'avoir une vision globale de ce qui est pratiqué actuellement dans l'industrie.

Si certaines des techniques évoquées sont couramment employées et maîtrisées par DAHER SOCATA, d'autres en revanche suscitent son intérêt. L'enjeu est alors de pouvoir mesurer leurs performances respectives sur des configurations de matériaux/défauts spécifiques au secteur aéronautique et de développer si besoin de nouvelles compétences en matière de CND. A cette fin, on se propose donc à présent de mener une étude comparative sur des méthodes représentatives de chacune des trois familles précitées.

Chapitre 2

Matériaux et protocoles expérimentaux

Sommaire

2.1	Introduction	42
2.2	Présentation des échantillons	42
2.2.1	Eprouvette 1 : matériau monolithique avec inserts Téflon [®]	43
2.2.2	Eprouvette 2 : matériau monolithique avec trous à fond plat	44
2.2.3	Eprouvette 3 : matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 0.66 mm)	46
2.2.4	Eprouvette 4 : matériau sandwich avec inserts Téflon [®] (peaux de 1.08 mm)	48
2.2.5	Eprouvette 5 : matériau multi-structures	50
2.3	Protocoles expérimentaux	54
2.3.1	Mesures de champs acoustiques : les ultrasons	54
2.3.2	Mesures de champs densimétriques	61
2.3.3	Mesures de champs thermiques : thermographie infrarouge	66
2.4	Conclusion	73

2.1 Introduction

Cette partie est consacrée à la mise en place d'un certain nombre de techniques de CND parmi les trois familles de méthodes de mesure de champs évoquées au chapitre précédent. La démarche comparative a été menée sur des structures représentatives des constituants d'un fuselage composite, à savoir des structures monolithiques et des structures sandwichs.

Chacune des méthodes employées a été testée sur cinq éprouvettes étalons :

- deux éprouvettes monolithiques et deux éprouvettes sandwichs fabriquées au Centre de Ressources et de Compétences Composites de Tarbes,
- une éprouvette multi-structure comprenant deux zones monolithiques et une zone sandwich, fabriquée par la société NIMITECH située à Bagnères-de-Bigorre.

Ces étalons sont constitués de deux typologies de défauts artificiels visant à représenter des porosités et/ou délaminages :

- des inserts Téflon[®] insérés lors du process de fabrication,
- des trous à fond plat exécutés après fabrication.

Ces défauts répondent aux exigences des normes AITM AITM6-0013 [5], AITM6-0016 [7], AITM6-4002 [8], AITM6-4005 [9], AITM6-4010 [10] régissant notamment le contrôle ultrasonore, et sont fréquemment employés dans les études de CND sur structures composites (Bai and Wong [25], Batsale et al. [29], Bremond [47], Choi et al. [56], Ibarra-Castanedo et al. [111], Junyan et al. [115], Larbi [122], Meola et al. [138, 139, 140], Montanini [148], Rodriguez et al. [177], Sakagami and Kubo [180]).

2.2 Présentation des échantillons

Chaque étalon fabriqué est composé de défauts de différents diamètres à différentes profondeurs. Parmi les tailles employées, l'ensemble des échantillons comporte des inserts Téflon[®] ou des trous à fond plat de 6 mm de diamètre, taille de défaut référencée dans les standards aéronautiques. Néanmoins, d'autres tailles (de 15 mm à 3 mm de diamètre) sont utilisées de manière à mieux appréhender les limites de détection des techniques employées.

Les différents procédés de fabrication utilisés permettent l'obtention d'états de surface distincts. Ils ont été répertoriés de la manière suivante :

- type A : aspect lisse et brillant,
- type B : aspect rugueux, bosselé et mat,
- type C : aspect rugueux et mat,

- type D : aspect lisse et mat,
- type E : aspect rugueux et brillant.

Ils seront expliqués dans la suite du chapitre.

2.2.1 Epreuve 1 : matériau monolithique avec inserts Téflon[®]

Ce matériau est une structure monolithique stratifiée composée de 8 plis de tissus carbone Hexcel HexPly[®] G803(tissu)/1457(résine époxy). Chaque pli est orienté à 30° et présente une épaisseur théorique de 0.35 mm (figure 2.1).



FIGURE 2.1 – Photo du matériau monolithique avec inserts Téflon[®]

Cette éprouvette a été réalisée à partir de fibres pré-impregnées de résine par moulage poinçon/matrice ou moulage sous vide (dépression/autoclave). Il s'agit du procédé de fabrication actuellement le plus répandu pour les composites dans l'aéronautique [90].

Le protocole expérimental de fabrication est composé de plusieurs étapes :

1. choix du procédé/contre moule : la pièce peut être réalisée avec un moule et contre-moule rigides (pressage à chaud) ou avec un moule rigide et un contre-moule souple (dépression/autoclave) ; concernant cette éprouvette, un moule et un contre-moule rigides ont été employés, conduisant à un aspect lisse et brillant pour les deux surfaces de la pièce (type A d'état de surface),
2. préparation du moule et du contre-moule (démoulant),
3. empilement des tissus selon la séquence désirée,
4. mise en place du contre-moule,

5. pressage à chaud.

Au cours de l'étape 4, des disques en Téflon[®] de différents diamètres (4, 6, 8, 10, 12 et 15 mm) ont été mis en place à différentes profondeurs (0.7, 1.4 et 2.1 mm) (figure 2.2) ; précisément, chaque rangée horizontale d'inserts a été positionnée tous les deux plis (figure 2.3).

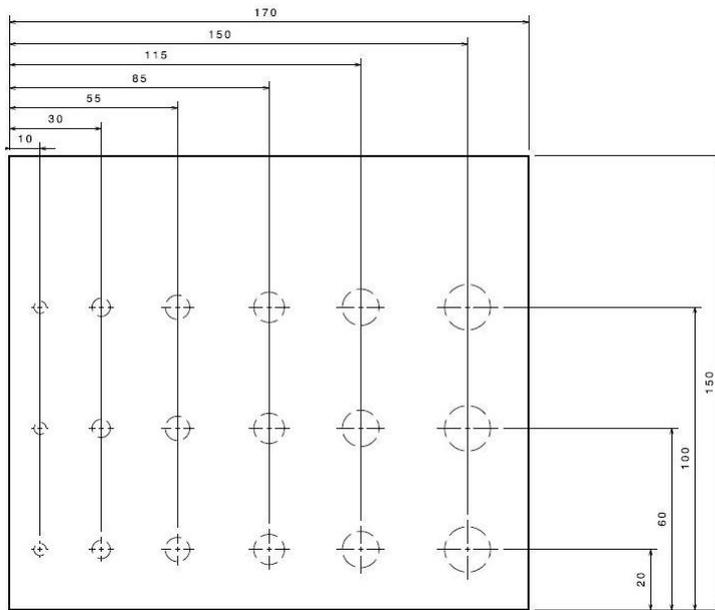


FIGURE 2.2 – Vue de dessus du matériau monolithique avec inserts Téflon[®] - Positionnement des inserts

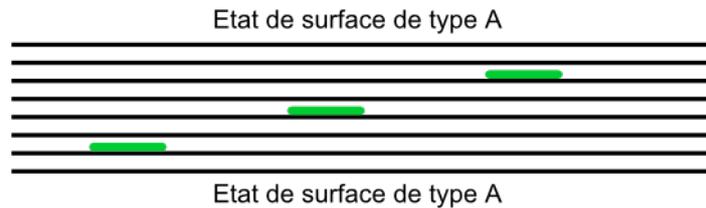


FIGURE 2.3 – Matériau monolithique avec inserts Téflon[®] - Coupe schématique dans l'épaisseur au niveau d'une rangée d'inserts de même diamètre

2.2.2 Eprouvette 2 : matériau monolithique avec trous à fond plat

Ce matériau stratifié est composé de tissus en carbone unidirectionnels préimprégnés Hexcel HexPly[®] T700 (fibres Toray[®])/M21 (résine époxy). Cette pièce comprend une

variation d'épaisseur avec une partie à 4 mm sur 50 mm de long et une partie à 8 mm sur 130 mm de long (figures 2.4 et 2.5). La séquence d'empilement de la partie à 4 mm d'épaisseur correspond à $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ]_{2,S}$ et celle de la partie à 8 mm d'épaisseur est $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ]_{4,S}$.

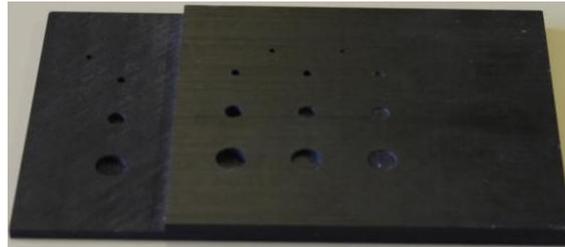


FIGURE 2.4 – Photo du matériau monolithique avec trous à fond plat

Le procédé de fabrication suit globalement la même démarche que précédemment. Cependant, l'étape 1 consiste ici à utiliser un moule rigide et un contre-moule souple (emploi d'une bâche) sans tissu d'arrachage, ce qui implique dans ce dernier cas l'obtention d'un état de surface lisse et brillant pour les deux côtés de la pièce (type A). L'étape 5 est, quant à elle, décomposée en deux parties avec d'abord une mise sous vide puis une mise en autoclave.

Les défauts artificiels sont ici des trous à fond plat de différents diamètres (2, 3, 6 et 10 mm) jusqu'à différentes profondeurs (0.52, 2.8, 3, 3.48 et 5.2 mm) après fabrication de l'éprouvette (figures 2.5 et 2.6).

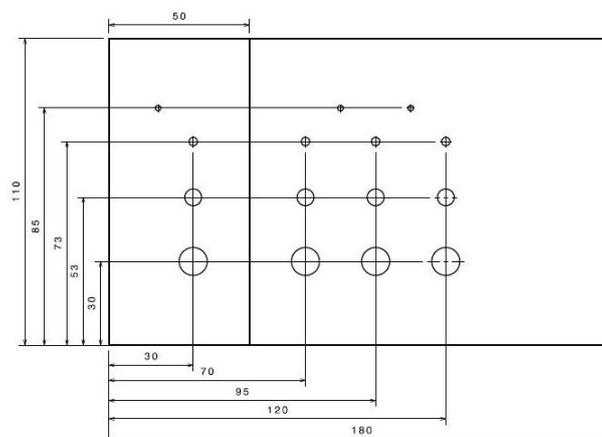


FIGURE 2.5 – Vue de dessus du matériau monolithique avec trous à fond plat - Positionnement des trous

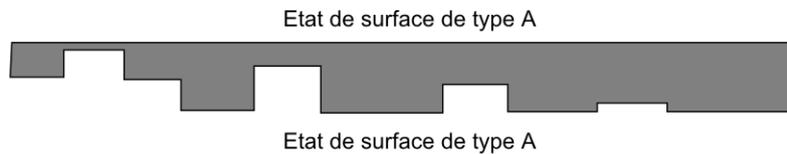


FIGURE 2.6 – Matériau monolithique avec trous à fond plat - Coupe schématique dans l'épaisseur au niveau d'une rangée de trous de même diamètre

2.2.3 Epreuve 3 : matériau sandwich avec inserts Téflon[®] (peaux de 0.66 mm)

Le matériau sandwich à faible épaisseur de peau comprend une âme en mousse haute performance Airex[®] R82 fabriqué par Alcan Composites de 10 mm d'épaisseur et de deux peaux composées de 3 plis de tissus en carbone-verre préimprégnés Hexcel HexPly[®] G973(tissu)/913(résine époxy). L'orientation des plis est à 0° pour une épaisseur théorique de 0.22 mm (figure 2.7).



FIGURE 2.7 – Photo du matériau sandwich avec inserts Téflon[®] (peaux de 0.66 mm)

Le procédé de fabrication employé s'articule autour des étapes suivantes :

1. préparation du moule rigide ; la face de ce côté du matériau est donc lisse et brillante (type A, figure 2.9),
2. empilement des tissus selon la séquence désirée,
3. mise en place du tissu d'arrachage (impliquant un aspect rugueux),
4. mise en place du feutre de drainage,

5. mise en place d'une bâche comme contre-moule souple,
6. compactage des tissus par tirage de vide (dépression) et mise en étuve.

Lors de l'empilement des tissus (étape 2), des inserts Téflon[®] de 3 et 6 mm de diamètre ont été positionnés entre tous les plis des peaux ainsi qu'entre la mousse et le premier pli de chaque peau (figure 2.9). Du fait de la fine épaisseur des plis utilisés, deux inserts ont été superposés, à chaque localisation de défaut artificiel, afin de simuler au mieux un délaminage (figure 2.9). Cette double épaisseur, de l'ordre de grandeur de l'épaisseur des plis, a alors généré des surépaisseurs sur la surface finale de la pièce du côté du contre-moule souple, qui présente de fait un aspect rugueux, bosselé et mat (type B). Par conséquent, cette solution n'a pas été retenue par la suite.

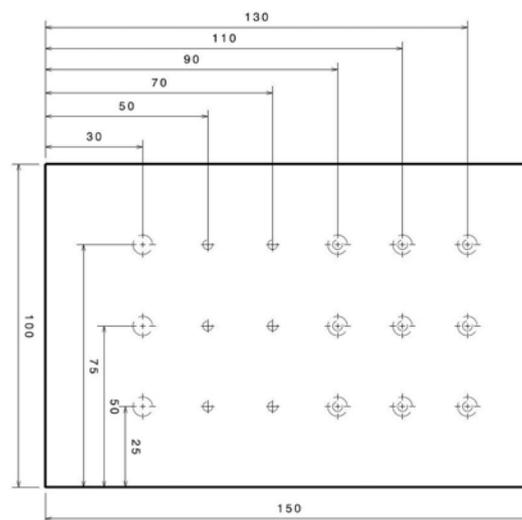


FIGURE 2.8 – Vue de dessus du matériau sandwich avec inserts Téflon[®] (peaux de 0.66 mm) - Positionnement des inserts Téflon[®]

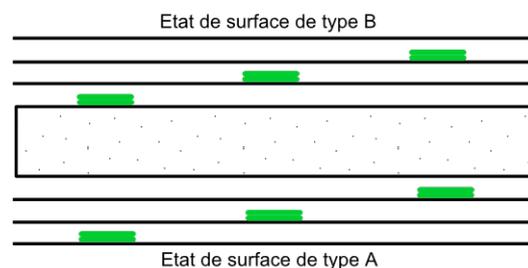


FIGURE 2.9 – Matériau sandwich avec inserts Téflon[®] (peaux de 0.66 mm) - Coupe schématique au niveau d'une rangée d'inserts de même diamètre

2.2.4 Epreuve 4 : matériau sandwich avec inserts Téflon[®] (peaux de 1.08 mm)

Cette dernière mono-structure est un matériau sandwich présentant une âme en mousse haute performance Airex[®] R82 de 15 mm d'épaisseur et des peaux constituées de 3 plis de tissu carbone Hexcel HexForce[®] G0926. La séquence d'empilement de chaque peau est $[45^\circ/0^\circ/45^\circ]$ pour une épaisseur théorique de 1.08 mm (figure 2.10). Cette éprouvette a été fabriquée par infusion de résine liquide (procédé LRI, *Liquid Resin Infusion*), procédé pour lequel les préformes sèches sont imprégnées par la résine époxy SR1710/SD8822 dans l'assemblage moule/contre-moule avant polymérisation thermique.



FIGURE 2.10 – Photo du matériau sandwich avec inserts Téflon[®] (peaux de 1.08 mm)

Après la préparation de la mousse (chanfreinage des bords, perçage au laser tous les 5 mm avec des trous de 1 mm de diamètre pour conduire la résine), un point important de ce procédé consiste à préparer la préforme sèche selon les différentes étapes suivantes :

1. drapage de tissus carbone secs poudrés (peau inférieure), positionnement de l'âme en mousse, drapage de tissus carbone secs poudrés (peau supérieure) ; dans le cas présent, le drapage a été réalisé sur une plaque de verre jouant le rôle de moule rigide plan, amenant de ce côté un aspect de type A,
2. mise en place du tissu d'arrachage,
3. mise en place du feutre de drainage,
4. implantation du réseau de vide et mise en place de la bâche qui sert de contre-moule souple,
5. préformage des tissus secs poudrés par tirage de vide (dépression) et mise en étuve (durée 1h à 105°C avec une rampe de 1°C/min).

Pour l'étape d'infusion, il convient en premier lieu d'enlever au montage précédent le feutre de drainage et d'ajouter le réseau des valves d'alimentation résine qui dépend de la taille de l'éprouvette. Dans le cas présent, la résine choisie permet cette opération à température ambiante et donc le suivi de son évolution au cours du temps. Une fois l'infusion terminée, l'ensemble est mis en étuve (4h à 80°C) afin de polymériser la résine. Durant cette étape de polymérisation, le réseau de vide est maintenu tandis que celui d'infusion est clampé.

Durant le drapage, des inserts Téflon[®] de 3 et 6 mm de diamètre ont été insérés entre chaque pli et entre la mousse et le premier pli (figures 2.11 et 2.12). Contrairement à l'éprouvette sandwich précédente, un seul insert a été positionné à chaque localisation de défauts afin de minimiser la déformation des tissus et d'optimiser la planéité de l'état de la surface. Compte tenu de ce protocole, l'état de surface du côté du contre-moule est rugueux et mat (type C).

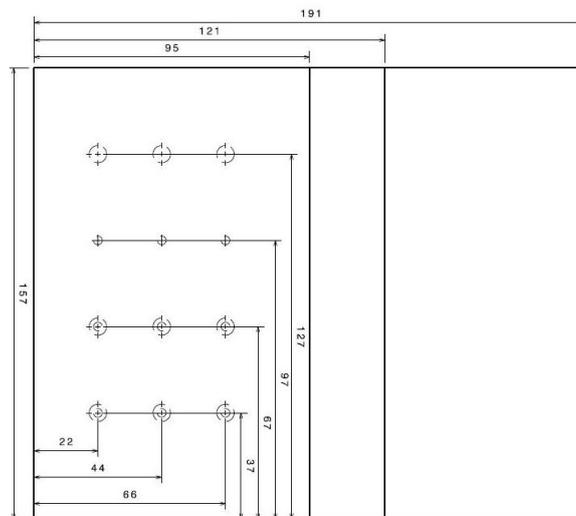


FIGURE 2.11 – Vue de dessus du matériau sandwich avec inserts Téflon[®] (peaux de 1.08 mm)

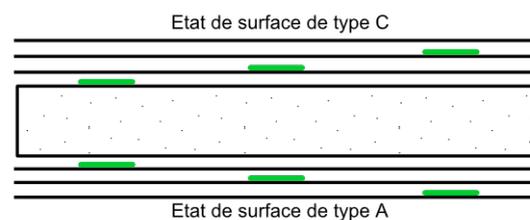


FIGURE 2.12 – Matériau sandwich avec inserts Téflon[®] (peaux de 1.08 mm) - Coupe schématique dans l'épaisseur au niveau d'une rangée d'inserts de même diamètre

2.2.5 Epreuve 5 : matériau multi-structures

Ce matériau multi-structures est composée de deux structures monolithiques stratifiées d'épaisseurs différentes et d'une structure sandwich avec une âme en mousse haute performance Airex R82 de 15 mm d'épaisseur (figure 2.13).



FIGURE 2.13 – Photo du matériau multi-structures

Tous les plis de cette structure sont réalisés à partir de tissus carbone Hexcel HexForce[®] G0926. La plus mince des parties monolithiques est composée de 6 plis avec la séquence d'empilement $[45^\circ/0^\circ/45^\circ]_2$, la plus épaisse comporte 12 plis empilés selon la séquence $[(45^\circ/0^\circ/45^\circ) (0^\circ)_6(45^\circ/0^\circ/45^\circ)]$. Les peaux de la partie sandwich sont quant à elles composées de 3 plis de ce même tissu avec la séquence d'empilement $[45^\circ/0^\circ/45^\circ]$.

Le procédé d'infusion LRI a également été employé pour fabriquer cette éprouvette, selon un protocole expérimental quasi-identique à celui de la pièce précédente. Néanmoins, étant donnée sa géométrie complexe, certaines particularités ont été mises en place, que l'on se propose de détailler à présent.

Tout d'abord, la stratégie choisie ici est l'utilisation d'un moule et d'un contre-moule rigides : le moule rigide permettra de donner sa forme géométrique à la structure tandis

que le contre-moule rigide (plaque de PMMA) donnera la surface plane de la pièce. Pour réaliser le moule rigide, il a fallu au préalable réaliser un master en résine usinable (figure 2.14) sur lequel le moule rigide a été réalisé.



FIGURE 2.14 – Master en résine usinable

Le moule rigide est réalisé en deux parties :

- la première partie est du gel coat appliqué directement sur le master permettant d'obtenir, d'une part la forme géométrique de la pièce, et d'autre part, lors de la fabrication de la pièce, un état de surface lisse et mat ;
- la deuxième partie est un empilement de tissus de verre (moulage au contact, résine époxy) directement drappés sur la couche de gel coat ayant atteint l'état B (figure 2.15).

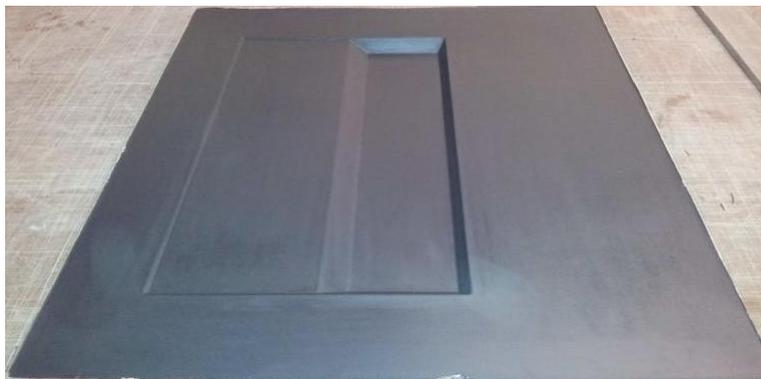


FIGURE 2.15 – Moule rigide en verre-époxy

A partir de ce moule rigide, on réalise l'étape de préformage des tissus secs poudrés de la même manière que pour l'éprouvette 4. Durant l'étape de préformage, des inserts Téflon[®] de 3 et 6 mm de diamètre (figure 2.16) ont été positionnés tous les deux plis dans les parties monolithiques et tous les plis dans la structure sandwich, selon la procédure détaillée précédemment (figure 2.17). Différents préformages ont été réalisés afin d'optimiser d'une part la forme de la pièce avec le respect des angles et des pentes au niveau de la structure sandwich et, d'autre part, de maximiser la réticulation des tissus poudrés sur lesquels les inserts Téflon[®] ont été positionnés. Pour cela, les trois premiers et trois derniers plis ont été préformés un par un ; concernant le bloc de six plis à 0°, ceux-ci ont été préformés tous les deux plis.

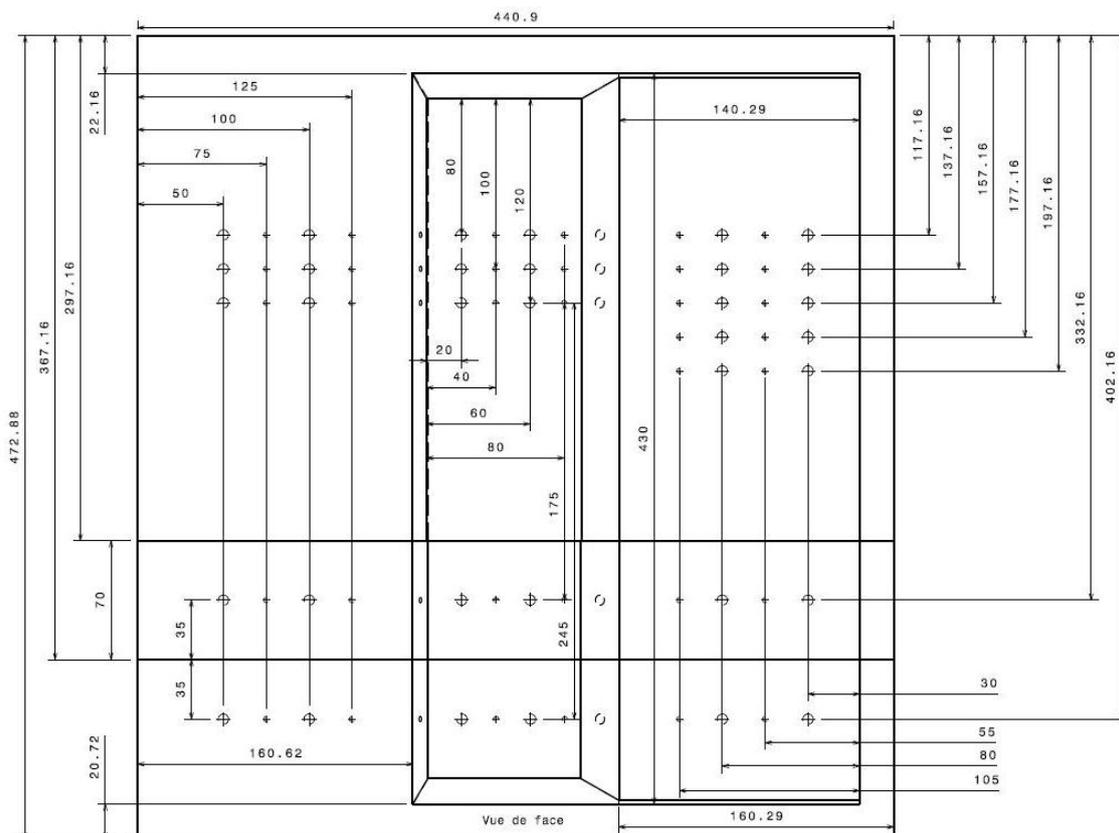


FIGURE 2.16 – Vue de dessus du matériau multi-structures - Positionnement des inserts Téflon

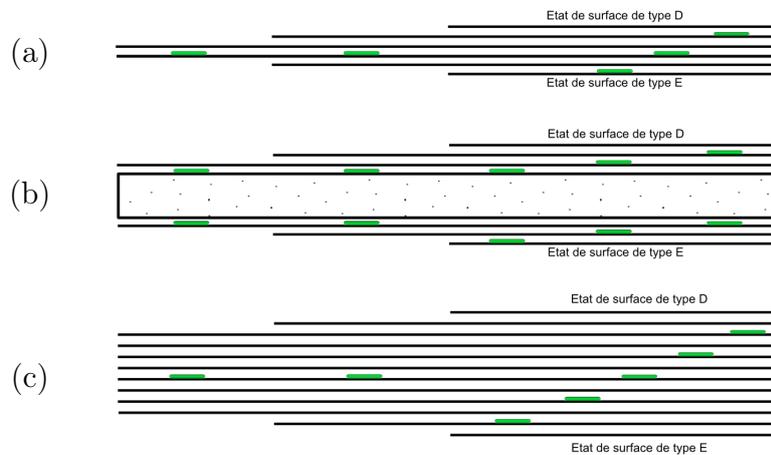


FIGURE 2.17 – Matériau multi-structures - Coupes schématiques dans l'épaisseur au niveau d'une rangée d'inserts de même diamètre : (a) partie monolithique fine, (b) zone sandwich, (c) partie épaisse

En ce qui concerne l'étape d'infusion, un film micro perforé a été disposé entre la pièce et le tissu d'arrachage de façon à limiter l'aspect rugueux obtenu par le contact direct de la pièce avec le tissu d'arrachage (figure 2.18). De plus, le contre-moule rigide en PMMA a été usiné aux dimensions de l'éprouvette et perforé selon le positionnement du réseau d'injection. Une fois l'infusion terminée, la structure a été mise en étuve (16h à 60°C) afin de polymériser le mélange résine/durcisseur injecté (résine époxy SR1710/SD8822) et ensuite démoulée. L'ensemble du procédé de fabrication (préformage et infusion) implique l'obtention du côté moule d'un état de surface lisse et mat du fait du gel coat (type D) alors que le côté contre-moule est rugueux et brillant grâce au film micro perforé (type E, figure 2.17).



FIGURE 2.18 – Mise en place du film micro perforé

2.3 Protocoles expérimentaux

On se propose dans cette partie de détailler les différentes étapes de mise en oeuvre des techniques employées en vue de l'étude comparative. A la fin de la présentation de chacune d'entre elles, une illustration de la mesure de champ obtenue sera présentée.

2.3.1 Mesures de champs acoustiques : les ultrasons

L'ensemble des contrôles ultrasonores ont été réalisés au laboratoire IUT-ICA de Tarbes. Les trois techniques mises en jeu sont l'écho ultrasonore (par contact et par immersion) et la transmission ultrasonore par immersion.

En ce qui concerne le premier aspect de la démarche d'étude, à savoir l'émission des ondes acoustiques, il convient de préciser qu'elles sont dans le cas présent du type volumique longitudinale. Pour ce qui est de leur réception, le flux sera détecté en configuration face avant pour l'écho ultrasonore et en configuration face arrière pour la transmission ultrasonore par immersion. L'ensemble des contrôles ultrasonores ont été effectués avec des transducteurs de fréquence 5 MHz, et ce de façon à respecter les usages aéronautiques actuels sur chaque étalon fabriqué.

2.3.1.1 Echo ultrasonore par contact : contrôle en face avant

Le dispositif expérimental (figure 2.20) est composé des éléments suivants :

- un transducteur multi-éléments 5L64-NW1 (Olympus) équipée d'un sabot ; il s'agit d'un transducteur ultrasonore de 5 MHz comprenant 64 éléments (figure 2.19),
- un Omniscan 32 : 128 PR (Olympus) ; cet appareil de contrôle ultrasonore dédié à l'utilisation des transducteurs haute fréquence gère d'une part l'émission et la détection du flux d'ondes et, d'autre part, l'étalonnage du test, l'analyse ainsi que la visualisation des résultats,
- un Freescan (IXTREM) ; ce système de codage, sans contact par tracking optique, calcule les mouvements du transducteur à chaque instant grâce à la localisation de la pastille argentée positionnée sur le transducteur (figure 2.19) ; ceci permet de réaliser les cartographies 2D par projection des défauts en surface.

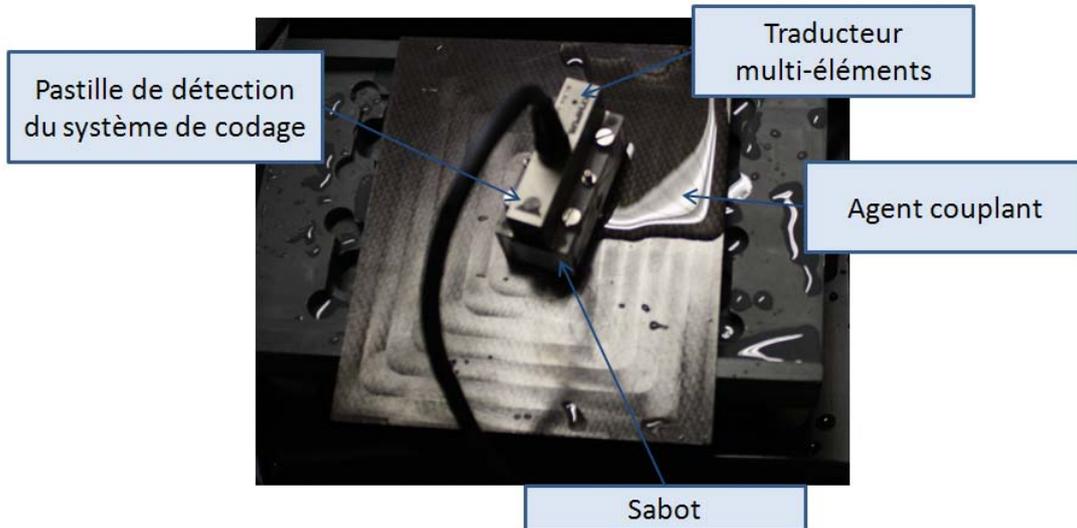


FIGURE 2.19 – Capteur multi-éléments équipé du sabot

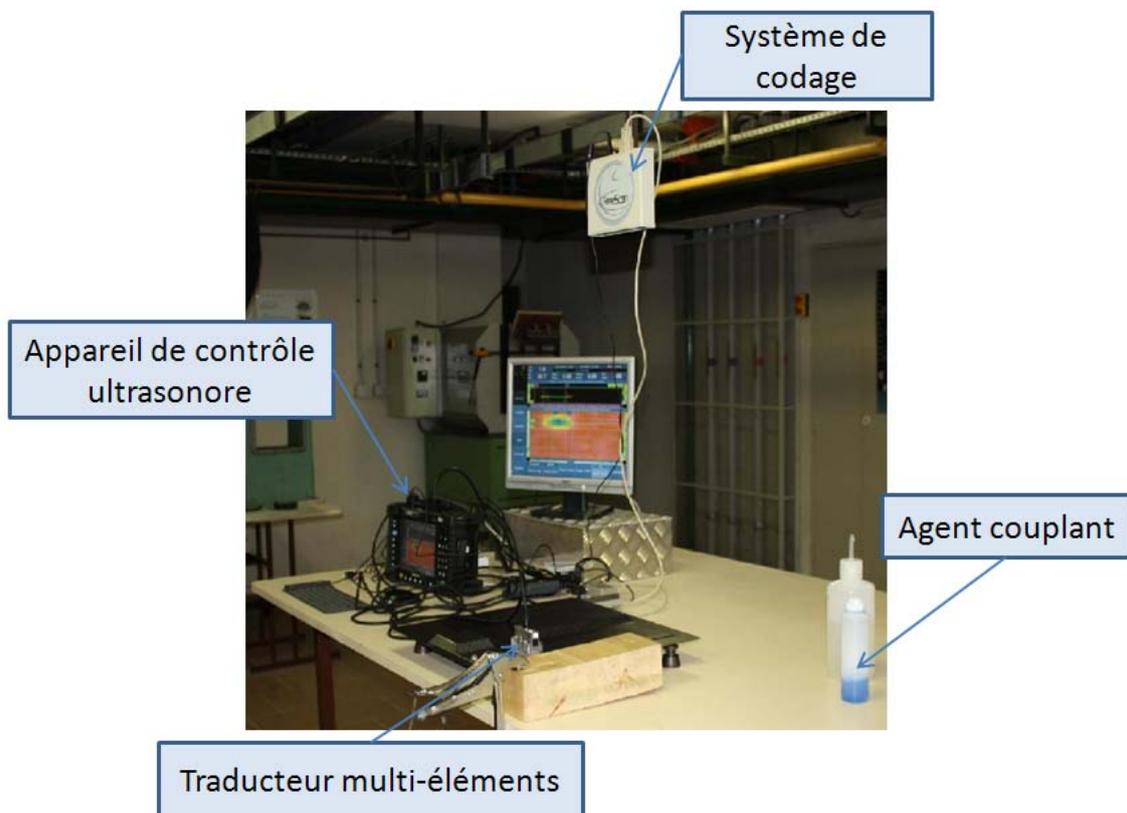


FIGURE 2.20 – Dispositif expérimental du contrôle par écho ultrasonore par contact

La méthode d'écho ultrasonore par contact étant manuelle, le système de fixation de la structure inspectée doit être stable, parallèle aux capteurs optiques du Freescan et centré par rapport à son champ optique (figures 2.20 et 2.21).

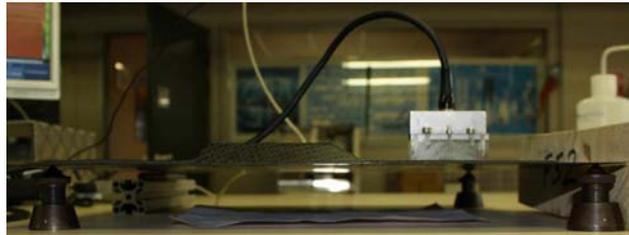


FIGURE 2.21 – Système de fixation de la structure inspectée (matériau multi-structures)

Une fois ce dispositif expérimental ajusté, la structure est positionnée sur celui-ci et recouverte de l'agent couplant (constitué ici de 50% de gel couplant et 50% d'eau). L'étalonnage du capteur par rapport à la structure inspectée est réalisé avec l'Omniscan et se décompose en trois étapes :

1. calcul de la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau inspecté : ceci permet de traduire la mesure en temps de vol en mesure en épaisseur, et ainsi d'en déduire la profondeur des défauts en fonction des échos mesurés,
2. positionnement des trois portes de détection des échos correspondant aux trois types d'échos détaillés dans le chapitre 1 :
 - la porte I (jaune sur le A-scan de la figure 2.22) placée sur l'écho d'entrée et synchronisée sur l'impulsion de l'onde ultrasonore,
 - la porte A (rouge) positionnée sur l'écho de fond et synchronisée sur le pic d'entrée de l'onde dans la pièce,
 - la porte B (verte) placée entre l'écho d'entrée et l'écho de fond afin de distinguer l'apparition d'un défaut et synchronisée comme la porte A sur le pic d'entrée de l'onde dans la pièce.

Ainsi la distance entre l'écho d'entrée (détecté par la porte I) et l'écho de fond (détecté par la porte A) correspond à l'épaisseur de la zone inspectée, la porte B localisant la position du défaut. La hauteur de chaque porte doit être au minimum supérieure à celle du bruit de mesure,

- réglage de la sensibilité de détection de façon à obtenir le même pouvoir de détection quelle que soit la loi focale utilisée ; ici l'écho de fond a été ajusté à 80% de son amplitude.

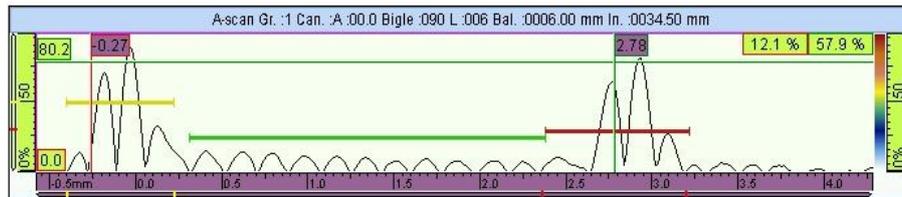


FIGURE 2.22 – A-scan réalisé en écho ultrasonore par contact (phase d'étalonnage, sans défaut)

Les cartographies 2D obtenues après contrôle sont de deux types :

- un C-Scan en amplitude représentant la répartition des amplitudes des échos (figure 2.23-a),
- un C-Scan en épaisseur permettant de localiser les défauts dans l'épaisseur de la structure (figure 2.23-b).

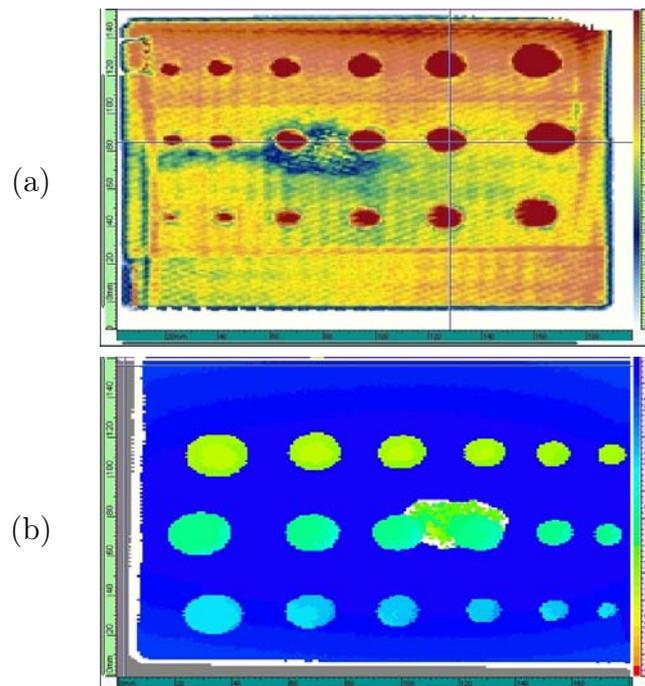


FIGURE 2.23 – C-Scan (matériau monolithique avec insert Teflon[®]) : (a) en amplitude, (b) en épaisseur

2.3.1.2 Echo ultrasonore par immersion : contrôle en face avant

Le principe de contrôle de l'écho ultrasonore par immersion est quasiment identique à celui de l'écho ultrasonore par contact. Dans cette méthode, la structure inspectée et le traducteur sont complètement immergés dans une cuve, optimisant ainsi la couche d'agent couplant (figure 2.24).

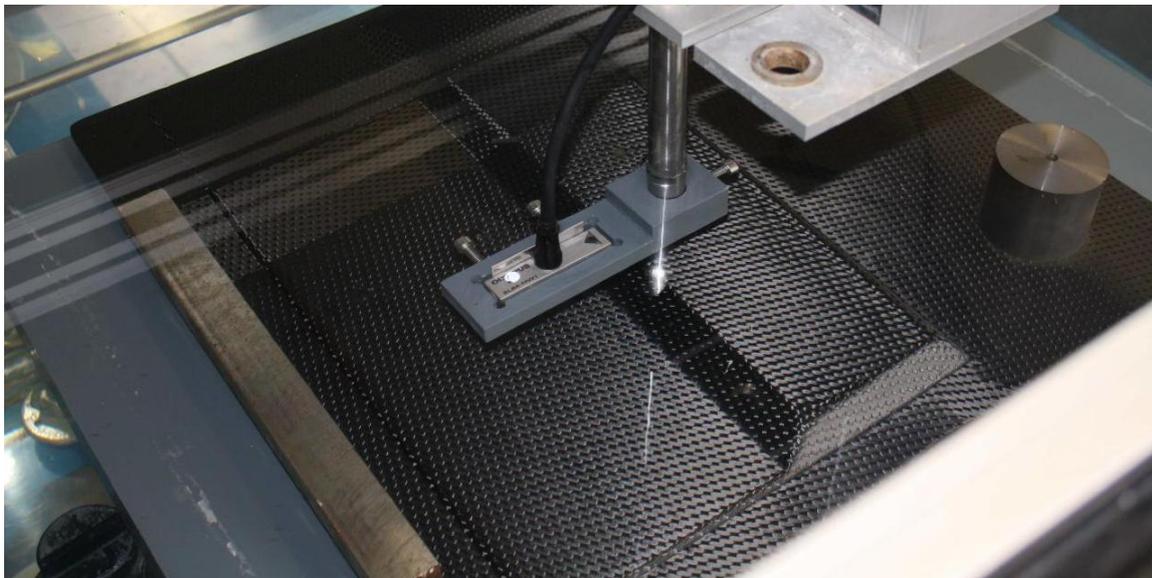


FIGURE 2.24 – Pièce et capteur immergés dans la cuve

Les éléments suivants composent le dispositif expérimental (figure 2.25) :

- un traducteur multi-éléments 5L64-NW1 (Olympus),
- un Omniscan 32 : 128 PR (Olympus),
- une cuve munie de bras automatiques permettant le positionnement des capteurs en X et en Y,
- un ordinateur avec le logiciel UT-WIN permettant de piloter les bras automatiques en X et en Y.

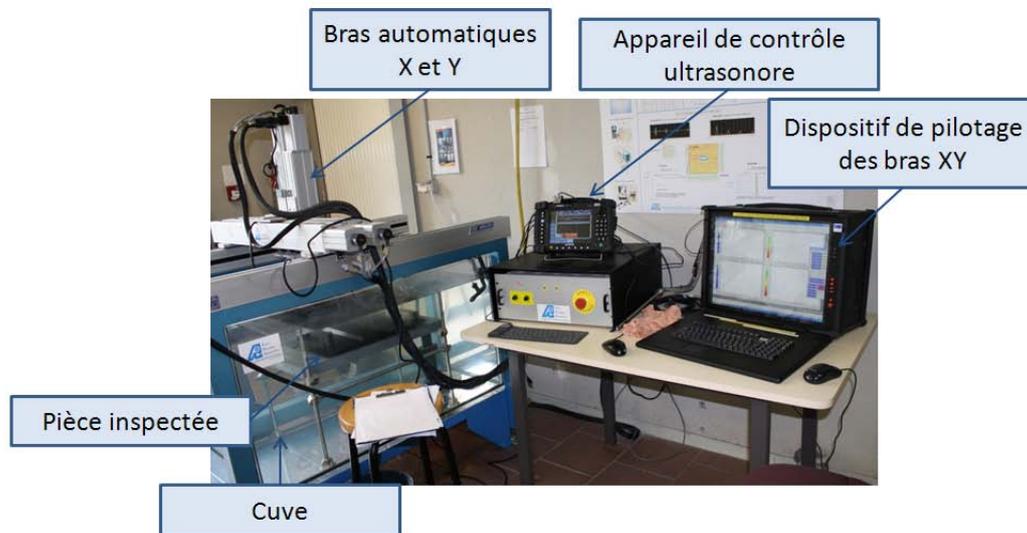


FIGURE 2.25 – Dispositif expérimental de l'écho ultrasonore par immersion

En comparaison avec la méthode précédente, la structure inspectée est simplement posée sur deux cales positionnées sur le réflecteur d'ondes en PMMA (figure 2.26). La procédure d'étalonnage du capteur par rapport à la pièce inspectée diffère quant à elle simplement au niveau de la synchronisation de la porte I. Celle-ci doit être synchronisée sur le pic d'entrée de l'onde ultrasonore dans la pièce de façon à s'affranchir d'éventuels problèmes de parallélisme entre l'éprouvette et les axes XY.



FIGURE 2.26 – Dispositif de fixation de l'éprouvette

Une fois l'éprouvette placée et l'étalonnage terminé, la sonde multi-éléments doit être positionnée au dessus d'un coin de la pièce contrôlée qui constituera le départ de la trajectoire du contrôle. La distance entre le capteur et la pièce (distance de focalisation) est prise de façon à s'extraire du champ proche du faisceau du transducteur, soit 50 mm dans le cas présent. Les cartographies 2D obtenues après le contrôle sont les mêmes que pour l'écho ultrasonore par contact.

2.3.1.3 Transmission ultrasonore par immersion : contrôle en face arrière

La transmission ultrasonore par immersion suit les mêmes principes d'inspection que l'écho ultrasonore par immersion mais selon un contrôle en configuration face arrière. Deux transducteurs mono-éléments V309 (fréquence de 5 MHz, diamètre de 0,5 pouce) sont utilisés, l'un jouant le rôle d'émetteur et l'autre de récepteur (figure 2.27).

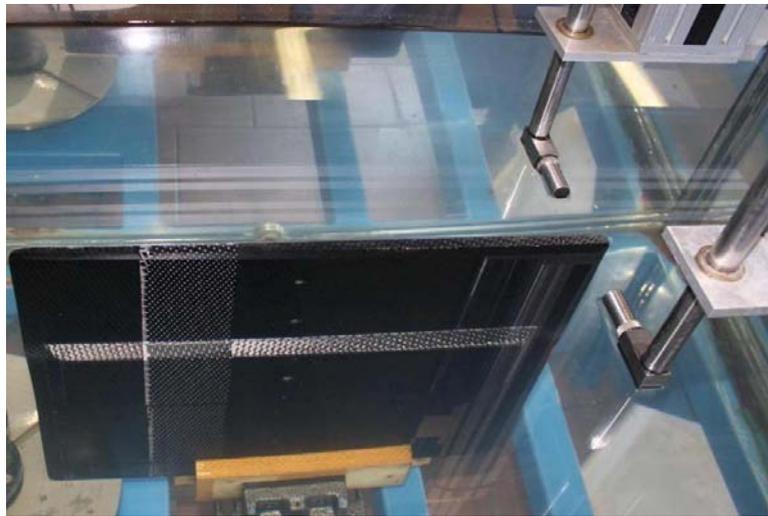


FIGURE 2.27 – Montage de transmission ultrasonore par immersion

Le support de fixation de l'éprouvette a pour objectif de la maintenir en position verticale (figure 2.27). Concernant la procédure d'étalonnage, l'étape de positionnement des portes ultrasonores diffère des deux précédentes techniques. Le principe de contrôle par transmission consiste en effet à détecter l'absence ou l'atténuation de l'onde émise par le premier capteur. De ce fait, le A-scan ne présente ici que l'écho de réception ; seule donc la porte A doit être positionnée sur cet écho (figure 2.28). La hauteur de cette porte est définie au-dessus du bruit de mesure comme précédemment. Lorsque l'amplitude de l'écho de réception présente une baisse 50% par rapport à l'étalonnage réalisé sur une zone sans défaut, on considère qu'il y a présence d'un défaut (méthode à -6 dB). La seule cartographie 2D obtenue avec cette méthode est un C-Scan en amplitude (figure 2.29).



FIGURE 2.28 – Positionnement de la porte A

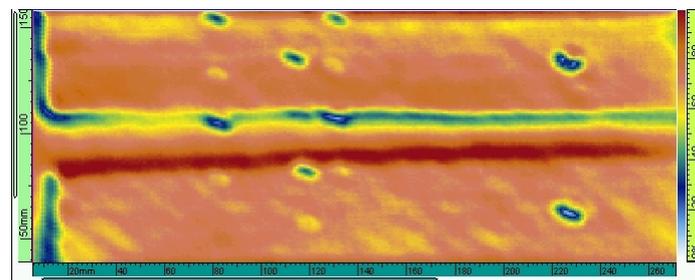


FIGURE 2.29 – C-Scan en amplitude (sur une partie du matériau multi-structures)

2.3.2 Mesures de champs densimétriques

2.3.2.1 Radiographie X

Tous les contrôles de radiographie X ont été réalisés par le site de Tarbes du groupe Daher-Socata. Le montage expérimental utilisé est composé du tube à rayons X (émetteur), du film radiographique (récepteur) ainsi que de l'écran de blocage (figures 2.30 et 2.31). Le pupitre de commande permet d'ajuster l'intensité, la tension ainsi que la position du tube à rayons X ainsi que de déclencher le test.

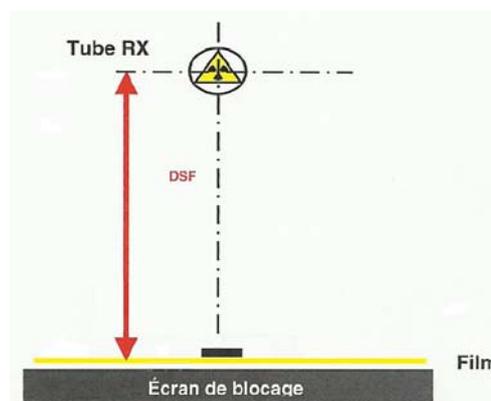


FIGURE 2.30 – Montage expérimental du contrôle par radiographie X

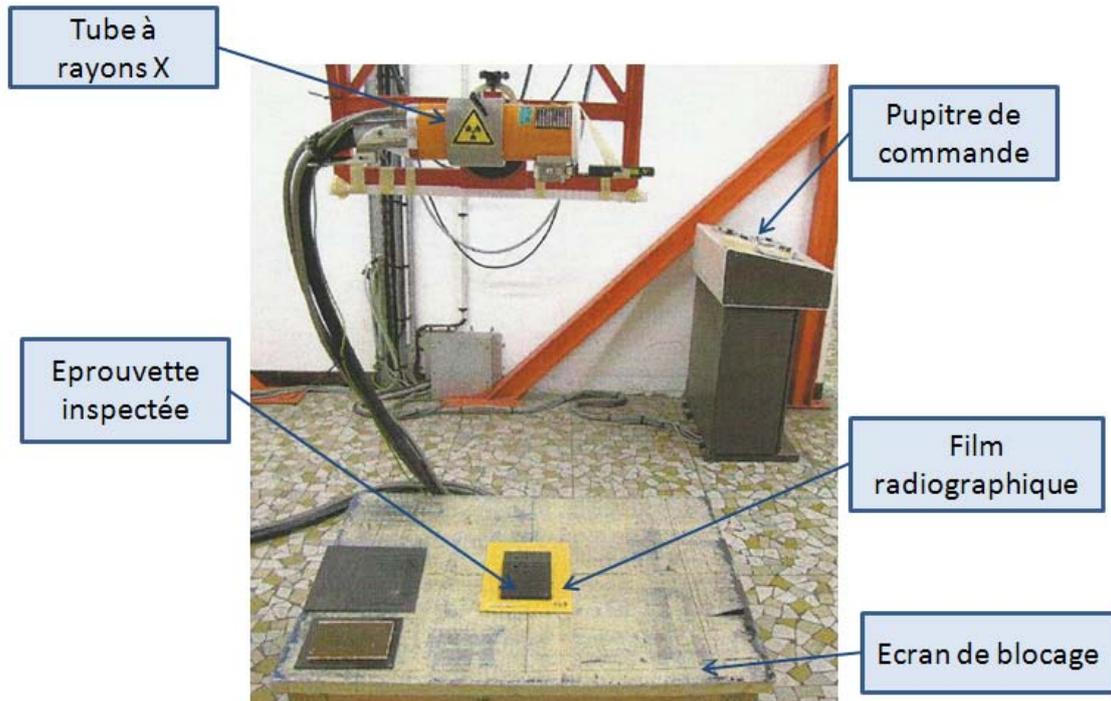


FIGURE 2.31 – Dispositif expérimental dédié au contrôle par radiographie X utilisé par Daher Socata sur le site de Tarbes

Avant de démarrer l'analyse, il convient de régler les deux distances spécifiques à la configuration adoptée, à savoir la distance source-film (DSF), égale dans notre cas à 950 mm, et la distance pièce-film (DPF), ici nulle (la pièce est posée sur le film). Ensuite, l'intensité et la tension du tube à rayons X doivent être ajustées de façon à obtenir un faisceau de rayons X suffisamment puissant pour optimiser le contrôle. En l'occurrence, l'intensité du tube retenue est de 19 mA, la tension employée de 20 kV pour les structures monolithiques et 10 kV pour les structures sandwichs. Une fois le contrôle terminé, les négatifs du film sont ensuite développés pour obtenir la visualisation des résultats (figure 2.32).

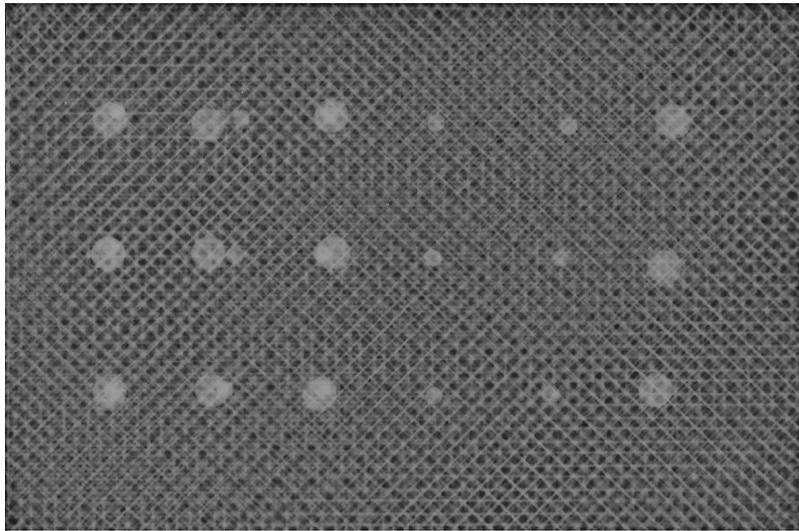


FIGURE 2.32 – Radiographie X (matériau sandwich avec peau de 0.66 mm)

2.3.2.2 Tomographie X

Les contrôles par tomographie X ont été pris en charge par la société Tomo Adour située à Pau. Un scanner médical de quatrième génération adapté à la mesure de pièces industrielles a été employé, à savoir le SOMATOM Sensation Open de SIEMENS d'énergie maximale 140 keV (figure 2.33). Cet appareil se compose :

- d'un ordinateur de gestion permettant d'exécuter les programmes d'animation, de contrôle et de dialogue avec l'utilisateur,
- d'un système d'acquisition assurant la saisie et le prétraitement des mesures d'atténuation ; celui-ci est constitué du banc mécanique de positionnement et de balayage de l'objet, du générateur de rayonnement X (source en éventail) et de l'ensemble de détection (capteurs céramiques haute définition en ligne, figure 2.34) associé à l'électronique de numérisation,
- du système d'analyse des images et de reconstruction fournissant notamment les coupes en temps réel et les vues 3D après post-traitement.

Du fait d'une large couverture permise par la configuration du couple source-détecteurs ainsi que par son temps de rotation rapide (environ une seconde), ce scanner permet l'analyse de volumes importants dans un temps très court.



FIGURE 2.33 – Scanner SOMATOM Sensation Open

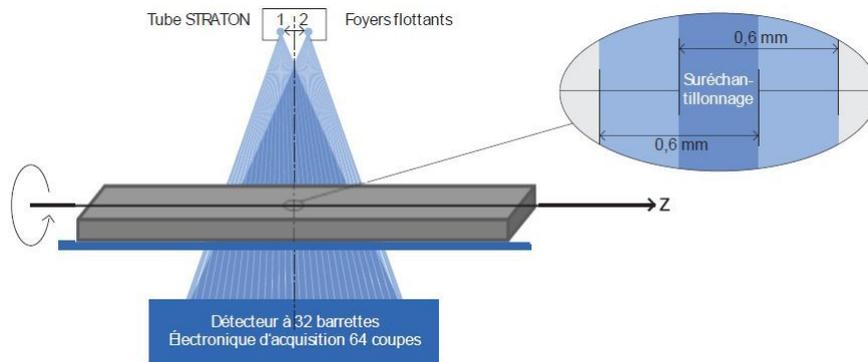


FIGURE 2.34 – Schéma de fonctionnement du scanner médical SIEMENS

La préparation des mesures s'articule autour des points importants suivants :

- mise en place et réglage de la position des éprouvettes : les pièces sont fixées sur un support en bois dont la faible densité minimise les perturbations avec de l'adhésif double face pour éviter tout mouvement lors du déplacement du support mobile ; les pièces sont ensuite positionnées précisément à l'aide de lasers de façon à définir l'origine de l'examen ;
- réglage du banc mécanique sur lequel reposent les contraintes spécifiques du contrôle à effectuer : ses paramètres (longueur de la translation, poids,..) dépendent directement du type et de la nature des pièces à examiner ;

- confinement de la pièce où se trouve la machine pour éviter toute radiation des opérateurs,
- exécution automatique du protocole de pré-chauffe de la machine comprenant notamment l'étalonnage,
- définition de la résolution spatiale, soit ici une taille de voxel de $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$ (en d'autres termes, les coupes 2D d'acquisition présentent une épaisseur de 0.1 mm).

Les coupes radiographiques sont réalisées perpendiculairement à la surface moyenne des pièces. A partir de ces résultats, on peut également accéder à des cartographies 2D dites reconstruites (*reslice*), c'est-à-dire situées dans des axes différents de ceux de la mesure initiale, notamment dans des plans parallèles à la surface moyenne des pièces (figure 2.35-a). Les algorithmes de reconstruction permettent, également, de se ramener au volume de la pièce inspectée (figure 2.35-b).

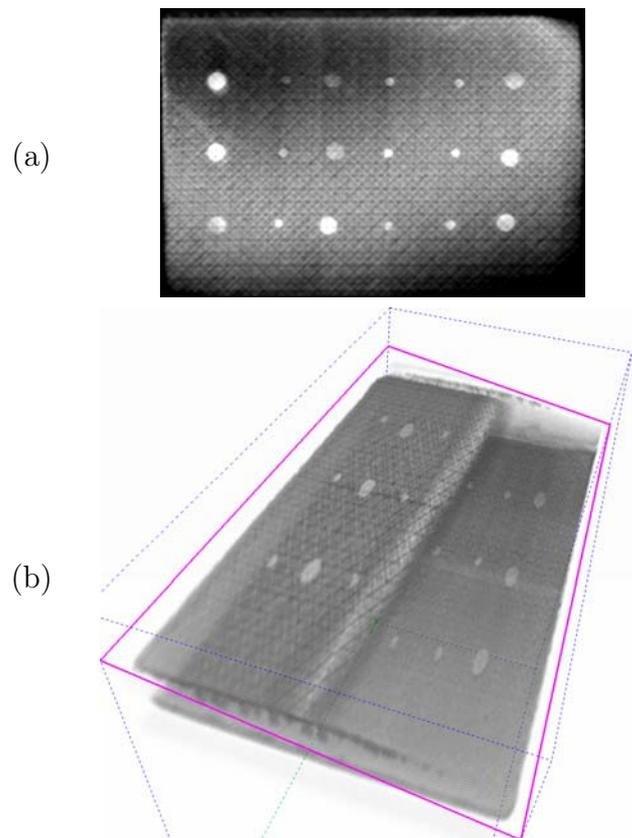


FIGURE 2.35 – Reconstructions par tomographie X (matériau sandwich avec peaux de 0.66 mm) : (a) Coupe 2D reconstruite parallèlement à la surface moyenne de la pièce, (b) : reconstruction volumique

2.3.3 Mesures de champs thermiques : thermographie infrarouge

Trois techniques de thermographie infrarouge ont été étudiées :

- les thermographies “classique” (TIR) et modulée (TIRM) au laboratoire ENIT-LGP à Tarbes,
- la thermographie pulsée (TIRP) par l’entreprise THERMOCONCEPT située à Talence et associée au laboratoire TREFLE de l’Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux.

2.3.3.1 Thermographie infrarouge (TIR) : contrôle en face avant et face arrière

Pour la thermographie infrarouge “classique”, le matériel utilisé est le suivant :

- 1 ou 2 lampes halogènes 120V 1000W,
- un amplificateur de signal (Pulsar),
- une caméra infrarouge JADE CEDIP rétrofitée en FLIR Titanium (résolution : 20 mK, objectif : MW 50 mm 2.0 Jade) qui joue le rôle de détecteur,
- le logiciel ALTAIR (FLIR) permettant la réalisation du film ainsi que sa visualisation.

L’amplificateur de signal permet de piloter le voltage des lampes halogènes faisant varier la puissance du flux thermique émis par ces dernières. Le choix de cette tension dépend de la nature du matériau inspecté, de son épaisseur, de sa conductivité, de son état de surface et de la configuration de test adoptée. Généralement, les valeurs retenues sont comprises entre 90 et 110 V (niveau maximal d’utilisation). Si un voltage supérieur s’avère nécessaire, on associe alors deux lampes halogènes.

Le dispositif expérimental utilisé en face avant, pour lequel le flux thermique est émis et détecté du même côté de la pièce, est illustré à la figure 2.36. La configuration face arrière qui consiste à détecter le flux thermique du côté opposé à son émission est quant à elle présentée sur la figure 2.37. Dans ces deux configurations, le positionnement des émetteurs et récepteurs doit en premier lieu être ajusté afin de minimiser les bruits de mesure. En particulier, la lampe halogène et l’objectif de la caméra doivent être parallèles à la pièce et leur point focal respectif (thermique pour l’halogène, optique pour la caméra) doit être centré sur la zone inspectée (des laser mètres sont utilisés à cette fin, figure 2.37).

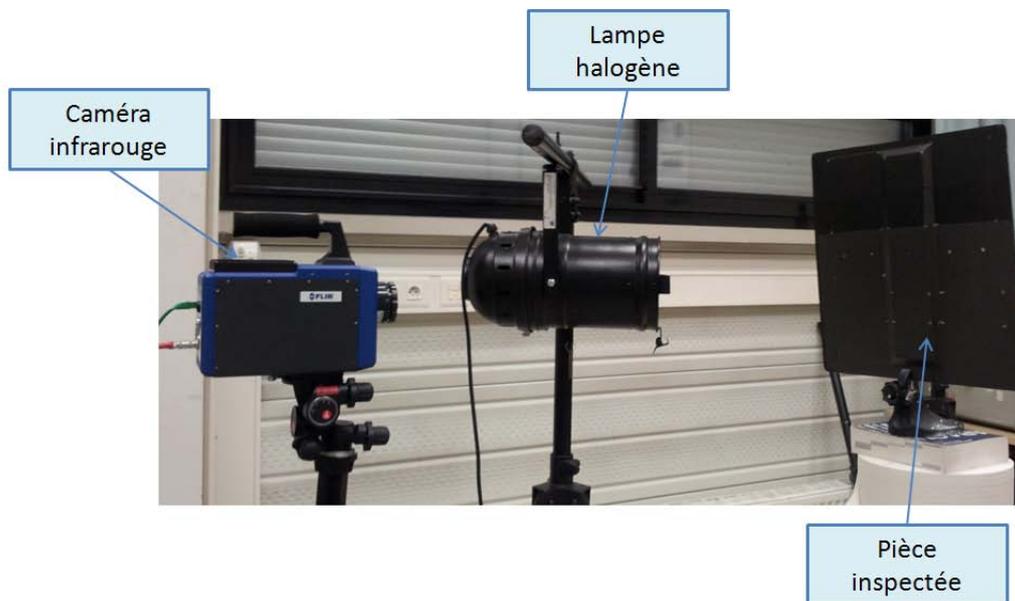


FIGURE 2.36 – Dispositif expérimental en configuration face avant

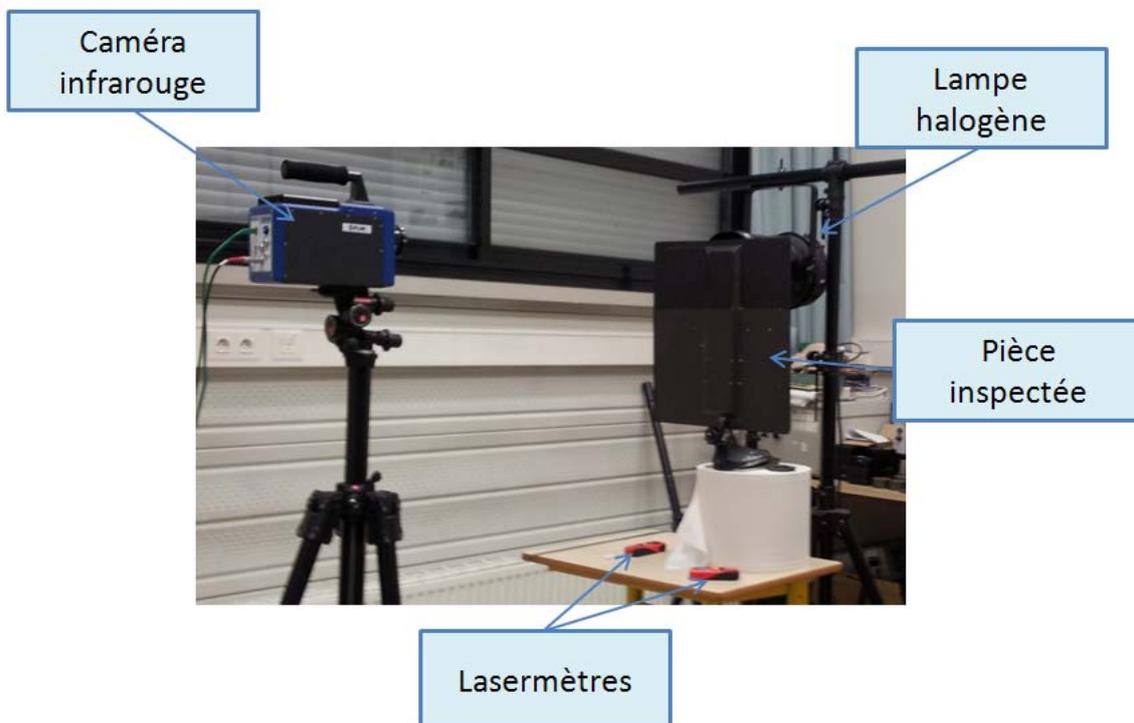


FIGURE 2.37 – Dispositif expérimental en configuration face arrière

Cinq étapes doivent ensuite être réalisées avant de procéder aux essais :

- l'étalonnage sur une référence (corps noir) ; cette étape s'effectue de façon automatique avec la caméra employée qui bénéficie d'un système de dernière génération,
- la définition de l'émissivité du matériau étudié ; cette donnée est très sensible à de nombreux paramètres intrinsèques mais aussi extrinsèques au matériau étudié (Bodnar [39]) ; en l'absence d'informations spécifiques, nous avons choisi d'entrer ici une valeur constante et uniforme, à savoir celle du carbone (0,98),
- le réglage de la fréquence d'acquisition du champ de température ; dans le cas présent, nous avons considéré une valeur de 50 Hz, soit 50 images par seconde,
- la mesure de la distance éprouvette-caméra afin d'obtenir la résolution spatiale ; dans notre cas, cette distance est comprise suivant les essais entre 80 cm et 1 m,
- la mise au point de l'objectif.

Une fois ces différents réglages effectués, le test se déroule selon le protocole suivant :

1. extinction des lumières, la salle de contrôle devant être complètement dans le noir de façon à optimiser le test,
2. simultanément, démarrage du film sur le logiciel Altair et allumage de la lampe halogène,
3. chauffage de la pièce pendant 10 secondes en moyenne,
4. extinction de la lampe halogène,
5. attente de 20 secondes pour le refroidissement de la pièce,
6. arrêt du film.

Comme détaillé dans le chapitre 1, le résultat du test correspond à un film de la durée du contrôle (environ 30 secondes) représentant l'évolution temporelle du champ thermique au cours du temps. Après la phase d'acquisition, un traitement des données peut s'avérer nécessaire. De façon à éliminer au maximum les effets perturbants pour la mesure (notamment l'impact de la température ambiante) et à améliorer l'interprétation des résultats, nous avons opté pour une analyse en relatif des données en soustrayant à chaque instant l'image thermique du point de départ de l'essai. Les résultats traiteront donc exclusivement des champs de variations de température $\Delta T = T - T_0$ avec T la température à l'instant t et T_0 la température initiale, sous la forme de cartographies 2D (figure 2.38).

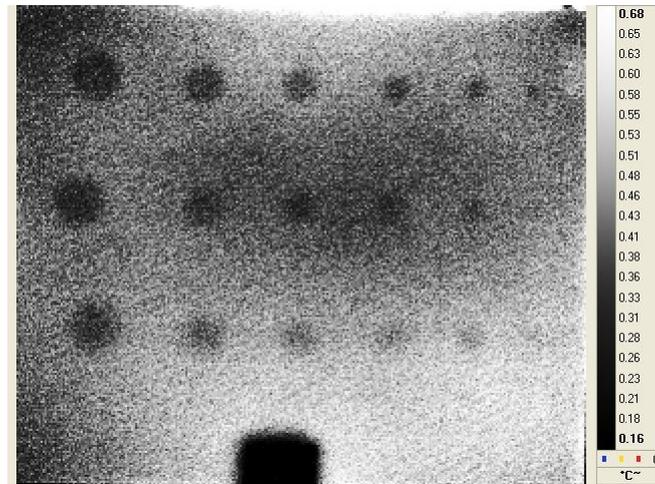


FIGURE 2.38 – Mesures de champ thermique (en relatif) réalisées par TIR (matériau monolithique avec inserts Téflon[®])

2.3.3.2 Thermographie infrarouge modulée (TIRM) : contrôle en face avant et face arrière

En comparaison avec le matériel employé pour la TIR, cette méthode requiert en plus un générateur de signal (HAMEG) qui permet d'une part d'envoyer un signal sinusoïdal via l'amplificateur à la lampe halogène et, d'autre part, de le connecter avec la caméra infrarouge. Le logiciel employé pour la réalisation des films est par ailleurs dans ce cas ALTAIR-LI (FLIR), capable de reconnaître la fréquence de travail du générateur ainsi que le type de signal émis.

Les configurations employées pour cette technique ainsi que les précautions de positionnement de la source et de la caméra sont les mêmes que celles indiquées précédemment. Le protocole expérimental diffère légèrement :

1. extinction des lumières,
2. simultanément, démarrage du film sur le logiciel ALTAIR-LI et lancement du signal sinusoïdal,
3. attente de l'arrêt simultané du film et du flux thermique.

La durée d'un film de TIRM peut varier entre 1 min 20 sec et 2 min 40 sec suivant l'épaisseur des éprouvettes testées. Ce film permet d'accéder à des cartographies 2D de

l'évolution de l'amplitude du champ thermique (figure 2.39-a), et de l'évolution du déphasage entre l'émission et la réception (figure 2.39-b). On notera que l'identification des défauts a été faite à partir des cartographies de phase qui s'avèrent nettement moins bruitées.

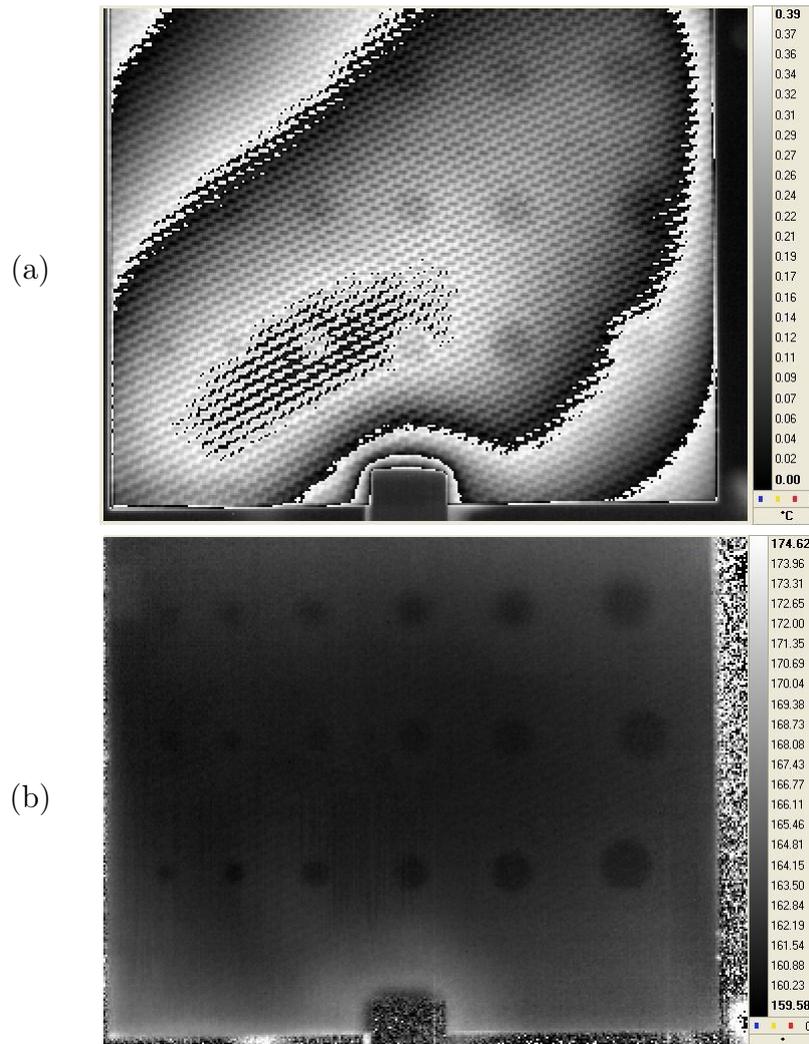


FIGURE 2.39 – Cartographie 2D des mesures de champs thermiques obtenus par TIRM (matériau monolithique avec inserts Téflon[®]) : (a) amplitude, (b) phase

2.3.3.3 Thermographie infrarouge pulsée (TIRP) : contrôle en face avant et face arrière

Cette technique a été mise en oeuvre à l'aide du matériel suivant :

- 2 lampes flash 230V 1500J,
- une caméra infrarouge SC7500 (résolution : 20 mK) (FLIR),
- un boîtier de déclenchement (THERMOCONCEPT) destiné d'une part à synchroniser le lancement du test avec celui du flash de chaque lampe employée et, d'autre part, de trigger la caméra infrarouge avec les deux sources thermique utilisées,
- le logiciel ALTAIR (FLIR), pour la réalisation du film,
- le logiciel THERMO-CND (THERMOCONCEPT) qui traite les données de manière à fournir une seule image représentative de l'ensemble du film effectué.

La société THERMOCONCEPT utilise un dispositif expérimental spécifique pour les configurations en face avant ou arrière (figure 2.40 et 2.41). Dans ces deux cas, le banc expérimental CND permet le déplacement vertical de la caméra, le déplacement horizontal et vertical des systèmes d'excitation ainsi que le positionnement de l'échantillon. De plus, un réflecteur est positionné à l'extrémité de chaque lampe flash de façon à focaliser et concentrer l'émission du flux thermique sur la zone inspectée.

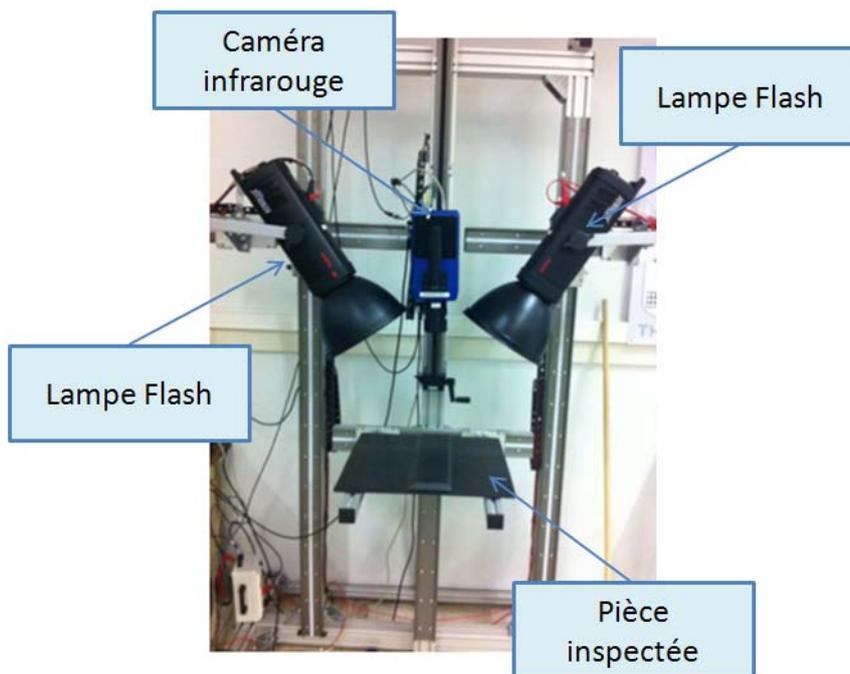


FIGURE 2.40 – Dispositif expérimental de la TIRP en configuration face avant

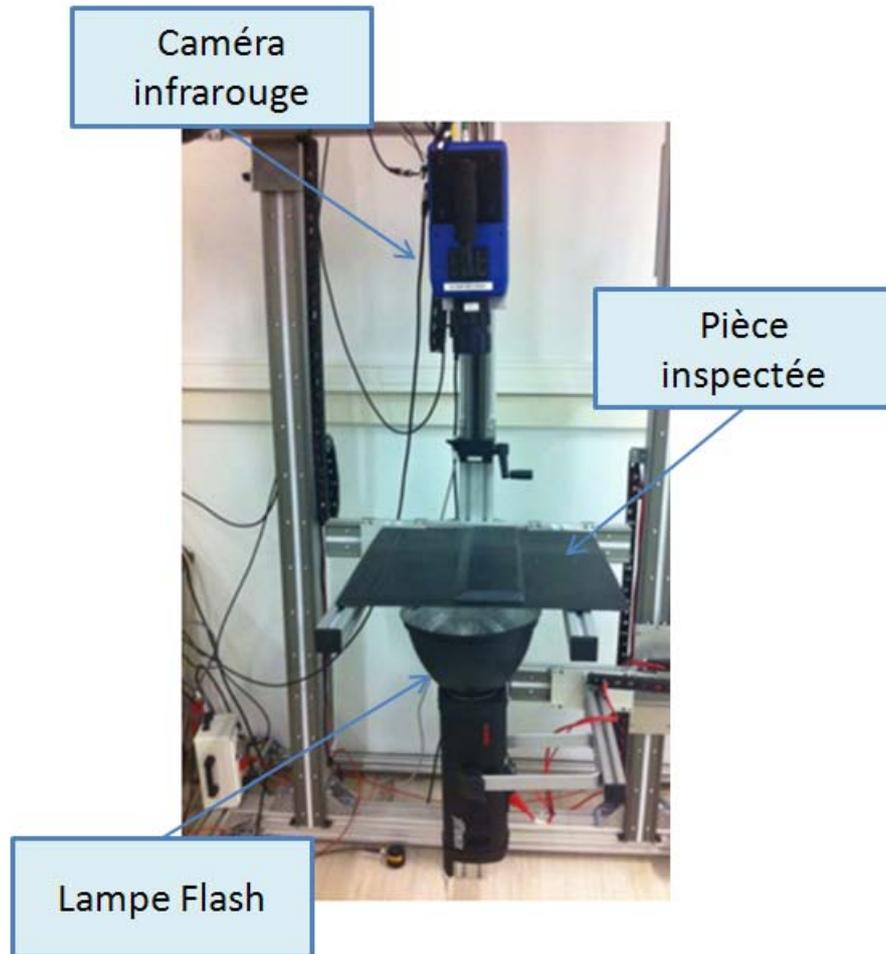


FIGURE 2.41 – Dispositif expérimental de la TIRP en configuration face arrière

Le protocole expérimental exécuté est le suivant :

1. extinction des lumières,
2. lancement du film et du flash des lampes par déclenchement synchronisé,
3. attente de l'arrêt du film.

La durée d'un test varie de 0.18 à 11 sec suivant l'épaisseur des étalons contrôlés. Après traitement du film par le logiciel THERMO-CND, le résultat obtenu est une unique cartographie 2D caractéristique des mesures de champs thermiques (figure 2.42).

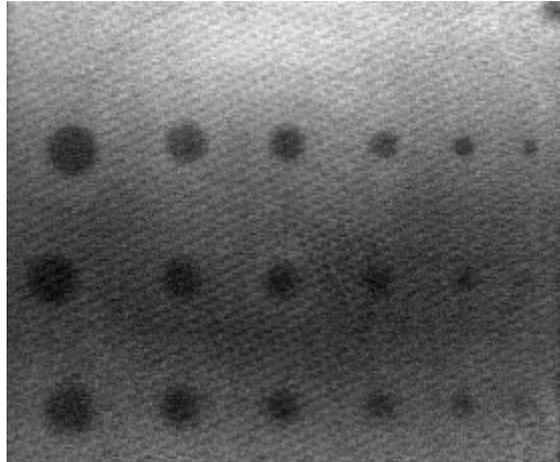


FIGURE 2.42 – Cartographie 2D des mesures de champs thermiques par TIRP (matériau monolithique avec inserts Téflon[®])

2.4 Conclusion

Il était important dans cette partie de bien détailler tant la conception et le procédé de fabrication des matériaux et structures faisant l'objet de l'étude que les détails de mise en oeuvre des huit techniques de CND employées dans chacune des familles de mesures de champs (trois ultrasonores, deux densimétriques, trois thermiques). Toutes ces informations seront en effet cruciales pour la compréhension et l'interprétation des résultats qui vont être présentés au chapitre suivant.

Chapitre 3

Etude comparative sur éprouvettes étalons

Sommaire

3.1	Introduction	76
3.2	Principes d'analyse	77
3.2.1	Dimensionnement des défauts par traitement d'image	77
3.2.2	Critères d'analyse	79
3.3	Résultats expérimentaux	80
3.3.1	Etalons monolithiques avec inserts Téflon [®]	80
3.3.2	Etalon monolithique avec trous à fond plat	88
3.3.3	Etalons sandwich avec inserts Téflon [®]	94
3.3.4	Synthèse	103
3.4	Conclusion	108

3.1 Introduction

L'enjeu de ce chapitre est de présenter la démarche d'analyse comparative de techniques de CND. Si certaines études dans ce sens existent dans la littérature, elles ne portent en général que sur les variantes de mesures de champs thermiques abordées au chapitre précédent (voir par exemple Clerjaud [60], Giorleo and Meola [88], Ibarra-Castanedo et al. [111], Larbi [122], Pradere et al. [169], Sakagami and Kubo [180]). L'originalité de ce travail consiste en une large portée de cette comparaison qui couvre les trois grandes familles de méthodes de mesure de champs au travers de huit techniques spécifiques mises en oeuvre sur les cinq éprouvettes étalons présentées au chapitre précédent :

- champs acoustiques avec l'écho ultrasonore par contact, l'écho ultrasonore par immersion et la transmission ultrasonore par immersion,
- champs densimétriques avec la radiographie X et la tomographie X,
- champs thermiques avec la thermographie Infra-Rouge (TIR), la TIR Modulée (TIRM) et la TIR Pulsée (TIRP).

A ce stade, l'éprouvette multi-structure permet une analyse uniformisée en terme de matériaux et de défauts tandis que les autres éprouvettes étalons présentent des défauts de différents types (inserts ou trous à fond plat) et des diamètres plus variés.

Ces méthodes ont généralement des applications et des notoriétés différentes dans le domaine du CND sur structures composites pour l'industrie aéronautique. DAHER-SOCATA ayant la volonté d'élargir ses compétences en la matière, l'objectif principal de cette étude comparative est de fournir un bilan des capacités de détection de chacune des techniques employées en terme de largeur de spectre et de précision. Outre la mise en évidence de l'adéquation de celles-ci selon le type de structures, cette démarche permettra plus généralement de comparer les capacités de techniques récentes (tomographie X et mesures de champs thermiques) par rapport aux méthodes plus classiques (mesures de champs acoustiques et radiographie X).

Ce chapitre s'articule autour de deux parties avec tout d'abord l'explication du principe d'analyse des résultats, puis l'étude détaillée de l'ensemble des résultats obtenus sur les cinq structures présentées précédemment.

3.2 Principes d'analyse

Comme cela a été présenté au chapitre précédent, chacune des méthodes de CND étudiées conduit à une visualisation des résultats par une cartographie de défauts 2D ou 3D sous un format image ou assimilé, en couleur ou en niveau de gris. De ce fait, le traitement des résultats, et notamment leur analyse quantitative, nécessite en général un traitement de ces images.

Le principe d'analyse des résultats se décompose en deux parties :

- l'explication du traitement d'image permettant de dimensionner les défauts identifiés,
- le détail des critères d'analyse utilisés sur l'ensemble des résultats.

3.2.1 Dimensionnement des défauts par traitement d'image

Le dimensionnement des défauts localisés a été réalisé par traitement d'image pour chaque technique de CND :

- les résultats des contrôles ultrasonores par des méthodes manuelles de traitement basées sur les cartographies en épaisseur pour les techniques par écho ultrasonore (figure 2.23-b) et sur les cartographies en amplitude pour la transmission ultrasonore (figure 2.23-a) : méthodes habituellement utilisées dans l'industrie aéronautique. On considèrera qu'il y a présence d'un défaut quand l'amplitude de l'écho de fond chute de 50 % ; on parle également de méthode à -6 dB.
- tous les autres résultats avec une procédure automatique écrite en langage Python ; le choix du langage Python étant lié avec l'identification de défauts par mesures de champs cinématiques objet du chapitre suivant et permettant d'uniformiser le traitement des données.

On se propose dans cette partie de détailler le fonctionnement de cette dernière procédure qui a été mise en place afin de s'extraire au maximum de la dépendance du résultat vis-à-vis de l'opérateur. Il convient de noter que cette démarche est également applicable sur les cartographies ultrasonores. Afin d'illustrer les différentes étapes de cette procédure, on se propose justement de l'appliquer au C-scan en épaisseur du matériau monolithique avec inserts Téflon[®] obtenu par écho ultrasonore par immersion (figure 2.23-b).

L'image est en premier lieu segmentée manuellement de façon à isoler chacun des défauts identifiés (figure 3.1-a). Sur celle-ci, la procédure consiste à appliquer les opérations suivantes :

1. conversion de l'image en niveau de gris (figure 3.1-b),
2. recherche du niveau de gris maximum sur l'abscisse et l'ordonnée de l'image (figure 3.1-c),
3. repérage des coordonnées du point identifié à l'étape précédente (figure 3.1-d),
4. seuillage de la courbe de niveau de gris représentant le défaut (figure 3.1-e), à mi-hauteur environ, ce traitement est explicité en détail dans le chapitre suivant,
5. dimensionnement du défaut correspondant au seuillage déterminé (figure 3.1-f),
6. conversion en mm du diamètre déterminé en pixel par une mise à l'échelle de l'image.

A titre d'exemple, le tableau 3.1 récapitule le type de résultat obtenu par cette démarche pour des techniques de chacune des familles des méthodes de mesures de champs.

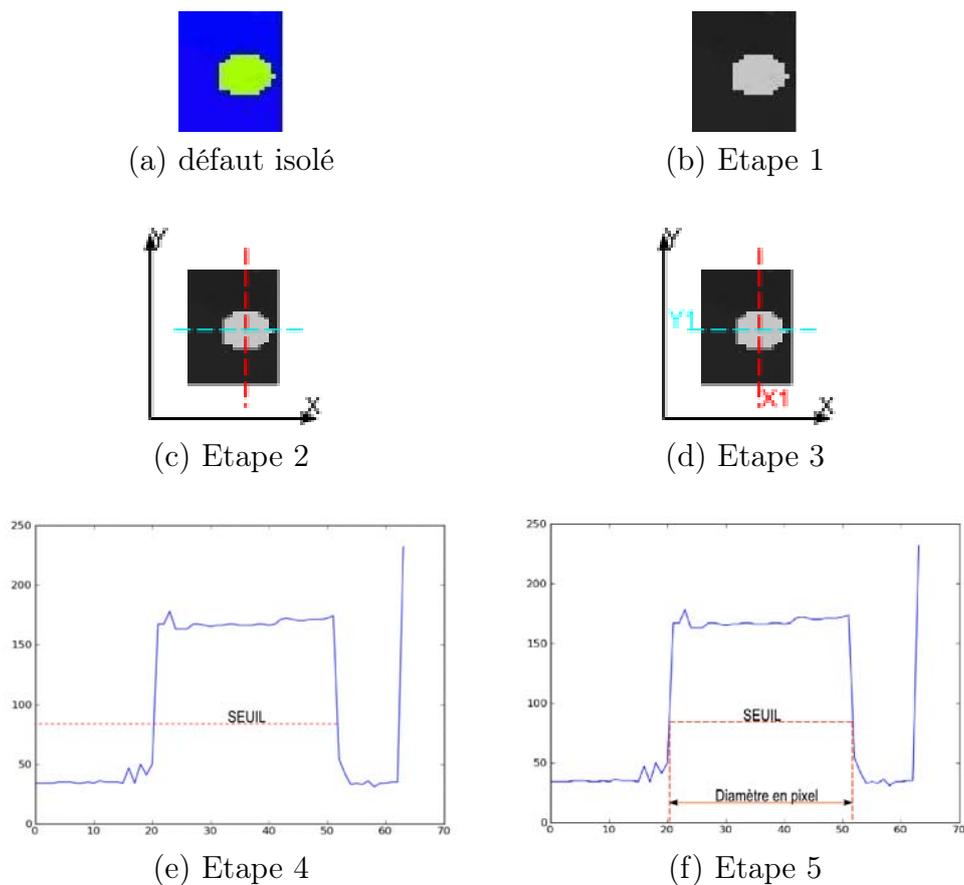


FIGURE 3.1 – Procédure de traitement d'image automatique

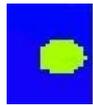
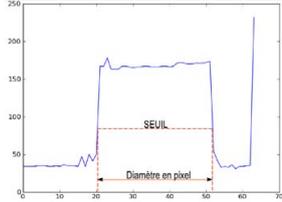
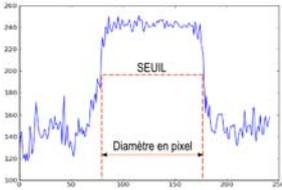
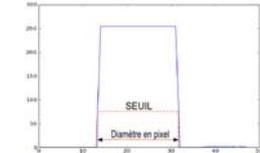
Famille de mesure de champs	Image en sortie de test	Image en niveau de gris	Seuillage	Diamètres réels / détectés
Acoustiques (écho US par immersion)				4/4 mm
Densimétriques (radiographie X)				10/10.84 mm
Thermiques (TIRM)				15/16.53 mm

TABLE 3.1 – Résultats du traitement d'image par famille de mesures de champs

3.2.2 Critères d'analyse

Les huit méthodes de CND ont été testées sur les cinq éprouvettes étalons décrites au chapitre précédent, ce qui représente un traitement de 1160 défauts. De façon à réaliser une comparaison complète et détaillée sous différents points de vue, les résultats expérimentaux obtenus ont d'abord été analysés par étalon puis par type de structure (monolithique et sandwich). Pour ces études, les critères d'analyse reposent sur deux aspects importants du point de vue du CND :

- la sensibilité de détection, soit le nombre de défauts détectés par la technique ; la technique jugée la plus efficace dans ce domaine est celle qui détecte le plus grand nombre de défauts,
- pour les défauts détectés, la précision de détection caractérisée par la moyenne des écarts de mesure (en mm) calculés entre la valeur du diamètre du défaut inséré et celle du défaut détectée par le contrôle ; la méthode la plus précise pour ce critère conduit à l'écart moyen de mesure le plus petit ; notons que cette précision sera appréciée d'une part en fonction de la localisation des défauts en profondeur (la profondeur des défauts est définie par rapport à la source d'émission des flux), et d'autre

part, en fonction de leur diamètre. Cette dernière analyse apporte notamment des informations quant à la prédisposition des techniques à identifier des défauts considérés comme critiques par le référentiel aéronautique (de taille supérieure à 6 mm de diamètre (AITM6-4002 [8])) voire également de plus petite taille.

3.3 Résultats expérimentaux

Les protocoles expérimentaux concernant les techniques de mesure de champs thermiques (TIR, TIRM, TIRP) ont abordé les configurations de contrôle en face avant et en face arrière. Toutes les éprouvettes fabriquées ont été testées selon ces deux modes mais, afin d'alléger le propos, seuls les résultats de la configuration la plus pertinente pour chaque type de structure sont détaillés dans ce qui suit, précisément les mesures en configuration face arrière pour les structures monolithiques et en configuration face avant pour les structures sandwichs.

L'incapacité de certaines techniques à identifier l'ensemble des défauts dépend à la fois du matériel de mesure mais également des échantillons étudiés. C'est le couple matériel utilisé/matériau contrôlé qui va définir la sensibilité et la précision des résultats obtenus.

3.3.1 Etalons monolithiques avec inserts Téflon[®]

Cette partie recouvre les résultats concernant le matériau monolithique avec inserts Téflon[®] ainsi que les deux zones monolithiques de l'éprouvette multi-structure.

3.3.1.1 Sensibilité de détection

Les tableaux 3.2 et 3.3 récapitulent les analyses de la sensibilité de détection pour ces étalons monolithiques, respectivement pour l'éprouvette monolithique et pour les zones concernées de la structure multi-structure. Trois techniques présentent une efficacité remarquable pour ces deux éprouvettes, conduisant à la détection de la totalité des défauts (tableau 3.2) :

- deux techniques de mesures acoustiques en configuration face avant, à savoir les méthodes d'écho ultrasonore par contact et par immersion,
- une technique de mesure densimétrique en mode face arrière : la radiographie X.

Technique	Pourcentage des défauts détectés	Commentaires
Echo ultrasonore par contact	100%	
Echo ultrasonore par immersion	100%	
Transmission ultrasonore par immersion	100%	
Radiographie X	100%	
Tomographie X	83%	Défauts non détectés : 4 mm, 6 mm et 8 mm de diamètre situés à 1,4 mm de profondeur
TIR	89%	Non détectés : défauts 4 mm de diamètre situés à 1,4 mm et 2,1 mm de profondeur
TIRM	94%	Non détectés : défauts 4 mm de diamètre situés à 2,1 mm de profondeur
TIRP	83%	Non détectés : défauts 4 mm de diamètre situés à 1,4 mm et 2,1 mm de profondeur, et 6 mm de diamètre à 2,1 mm de profondeur

TABLE 3.2 – Sensibilité de détection - Matériau monolithique avec inserts Téflon[®]

Technique	Pourcentage des défauts détectés	Commentaires
Echo ultrasonore par contact	100%	
Echo ultrasonore par immersion	100%	
Transmission ultrasonore par immersion	48%	84% des défauts non détectés mesurent 3 mm de diamètre
Radiographie X	100%	
Tomographie X	65%	59% des défauts non détectés mesurent 3 mm de diamètre et sont localisés exclusivement dans la partie la plus fine.
TIR	40%	69% des défauts non détectés mesurent 3 mm de diamètre et sont localisés à une profondeur égale ou supérieure à 1,44 mm
TIRM	65%	82% des défauts non détectés mesurent 3 mm de diamètre et sont localisés à une profondeur égale ou supérieure à 1,8 mm
TIRP	44%	63% des défauts non détectés mesurent 3 mm de diamètre et sont localisés à une profondeur égale ou supérieure à 1,8 mm

TABLE 3.3 – Sensibilité de détection - Zones monolithiques de l'éprouvette multi-structure

Si l'on examine les caractéristiques des défauts non détectés, on remarque que la majorité d'entre eux possède un diamètre inférieur au défaut critique des normes aéronautiques (6 mm de diamètre (AITM6-4002 [8])). De manière générale, les techniques en face arrière sont d'autant plus perturbées que les défauts sont situés en profondeur par rapport à la source d'émission. Par exemple pour le matériau monolithique avec inserts Téflon[®], les phénomènes de dispersions d'ondes sont notablement amplifiés à partir de la profondeur médiane (1,4 mm), amenant à une réduction de la capacité de détection des mesures.

Transmission ultrasonore

Bien qu'efficace pour l'éprouvette monolithique, cette méthode s'avère défailante pour les zones monolithiques de l'éprouvette multi-structure : 52% des défauts ne sont pas détectés, dont 84% d'inserts de 3 mm de diamètre, et ce quelle que soit la profondeur. Cette différence peut s'expliquer par les états de surface des structures étudiées. En effet, sur l'éprouvette n° 5 le contrôle a été effectué avec le capteur émetteur du côté lisse (type D) et le capteur récepteur sur la surface rugueuse et brillante (type E). Ainsi, l'entrée des ondes ultrasonores est optimisée (minimisation des phénomènes de réflexion) mais pas leur réception. De plus, pour cette technique, la détection des ondes est réalisée uniquement par le positionnement de la porte A récupérant l'écho de réception. Lors du dimensionnement à -6 dB, la chute d'amplitude générée par la présence de défauts de 3 mm de diamètre n'est pas suffisante pour permettre l'identification de défauts.

Tomographie X

En dépit des nombreuses études d'optimisation dans le traitement des images, l'inconvénient majeur de la tomographie X reste la présence éventuelle d'artefacts produits lors de la phase de reconstruction. En effet, ceux-ci soit empêchent directement la visibilité des défauts, soit perturbent la détermination précise de leur contour. C'est ainsi le cas des 3 défauts non détectés pour le matériau monolithique (artéfact situé à 1,4 mm de profondeur) et de la partie monolithique la plus fine de l'éprouvette multi-structure. Et contrairement à ce qui est préconisé par la norme AITM, la nature des défauts (Téflon[®]) n'est peut être pas adéquat à la tomographie X en rapport à la densité et à l'atténuation un peu trop proche de la résine polymère.

TIR

Cette technique détecte très difficilement les défauts de 3 et 4 mm présents en profondeur (au-delà de 2.1 mm) dans les deux structures étudiées. De manière à observer le

plus grand nombre de défauts, le point focal des halogènes est positionné au centre de la zone inspectée. Les défauts excentrés par rapport à ce point sont dès lors difficilement accessibles. Par ailleurs, la source thermique de TIR émet un signal en créneau qui a tendance à se disperser facilement, amenant à une sollicitation de faible intensité pour les défauts de petite taille localisés en profondeur.

A cette justification, s'ajoutent d'autres perturbations de la propagation du flux thermique associées à la composition et au procédé de fabrication de l'éprouvette multi-structure. La taille du tissage faisant environ 3 mm de large, la vision de l'armure est très prépondérante sur les images thermiques et du même ordre de grandeur que la taille des petits défauts. De plus, les images du film sont également très bruitées sur toute l'épaisseur de la structure au niveau des emplacements des grilles destinées à propager la résine lors de l'infusion (état de surface de type E). De ce fait, la détection des défauts localisés en ces endroits est rendue quasiment impossible dans la mesure où le bruit de mesure est équivalent à l'écart thermique généré par chaque défaut.

TIRM

Les performances de détection de la TIRM sont bien meilleures que celles de la TIR grâce à l'emploi du signal périodique basse fréquence (sinusoïdal de fréquence 0,05 Hz). Le signal périodique atténue en effet les phénomènes de dissipation thermique puisque la pièce emmagasine de la chaleur tout au long du contrôle et par conséquent en transmet davantage au détecteur. Dans le même temps, l'utilisation d'une onde basse fréquence augmente la capacité de celle-ci à se propager dans l'épaisseur de la structure inspectée et diminue le bruit des images des films thermiques. Enfin, les cartographies de phase sont plus contrastées que les cartographies en amplitude et permettent donc une identification plus complète des défauts, notamment des plus profonds.

TIRP

Concernant cette technique, les résultats obtenus sont quasiment identiques à ceux de la TIR. Comme pour toute technique thermique, le point focal des lampes flash est situé au centre de la zone à contrôler de façon à réaliser un film optimisant la propagation du champ thermique. Ici, l'utilisation d'un signal non périodique (impulsion de Dirac) augmente les phénomènes de dissipation thermique au niveau des extrémités de la structure, rendant à nouveau les petits défauts en profondeur difficilement identifiables.

3.3.1.2 Analyse de la précision de détection

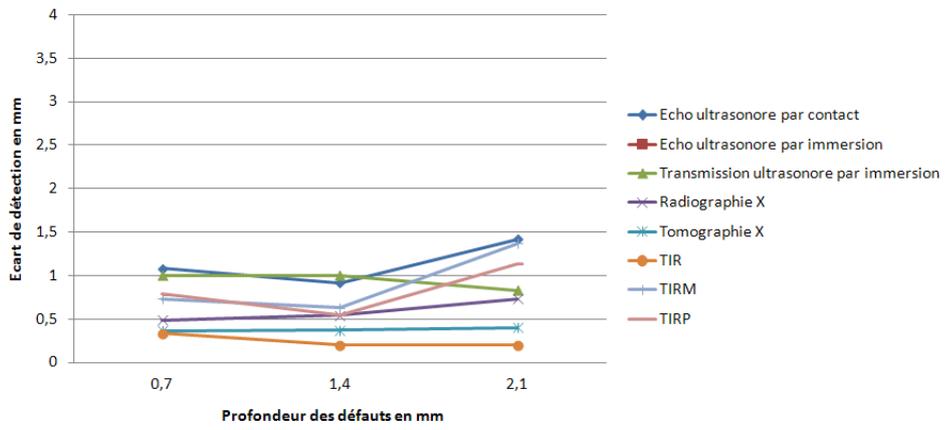
La précision moyenne de chaque technique est établie, *pour les défauts détectés*, à l'aide de la moyenne des écarts entre la valeur du diamètre réel et celle du diamètre mesuré, quel que soit le diamètre et quelle que soit sa profondeur. Il est bien entendu que les techniques capables de détecter 100% des défauts sont susceptibles d'engendrer des écarts moyens plus importants que celles ne détectant que 40% de défauts. L'écart moyen calculé sur un dénominateur commun en terme de défauts modifie les résultats (i.e. diminution des écarts moyens pour les techniques détectant 100% des défauts) mais le dénominateur commun est souvent faible, seulement 15% des défauts environ, et donc non représentatif.

Le tableau 3.4 apporte une vue globale de la performance dans ce domaine de chaque technique. Les mesures de champs densimétriques sont globalement les plus pertinentes avec un écart moyen inférieur à 0.6 mm, suivies de près par les méthodes par thermographie : la TIR conduit à de meilleurs résultats pour le matériau monolithique avec inserts Téflon[®] alors que la radiographie X semble plus adaptée à l'éprouvette multi-structure (écarts inférieurs ou égaux à 0.3 mm). Dans les deux cas cependant, les techniques les moins précises sont les trois méthodes ultrasonores, avec des écarts moyens pratiquement tous supérieurs à 1 mm. En particulier, la méthode d'écho ultrasonore par immersion conduit à une assez mauvaise estimation sur le cas du matériau monolithique (écart supérieur à 6 mm), les résultats n'étant pas représentatifs et notamment influencés par une mauvaise compaction de l'éprouvette, ils ont été supprimés des figures suivantes (figures 3.2, 3.3) pour une meilleure lisibilité des autres résultats.

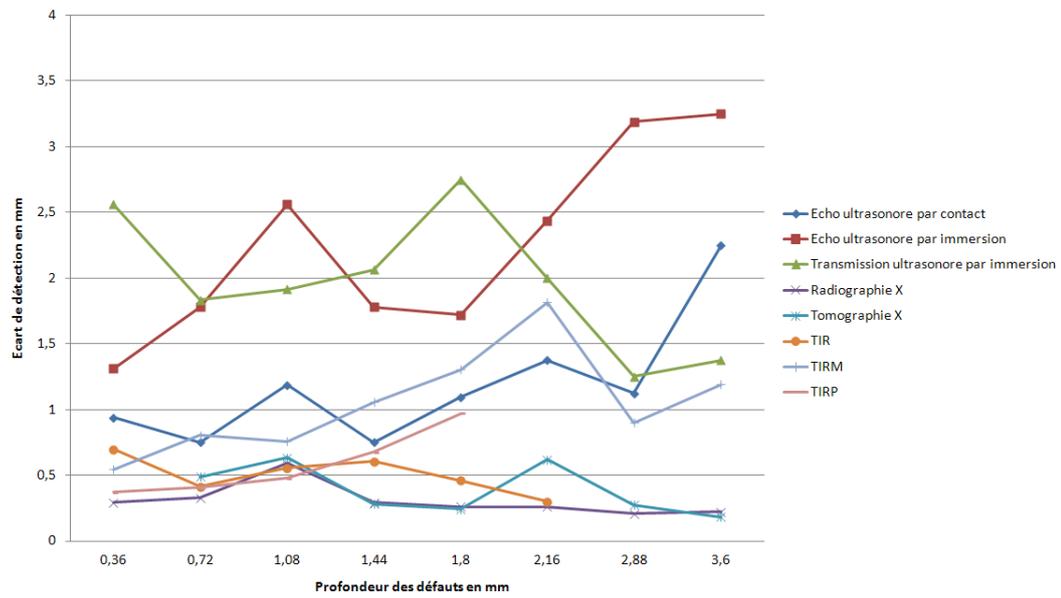
Technique	Ecart moyen en mm du matériau monolithique avec inserts Téflon (18 défauts)	Ecart moyen en mm de l'ensemble des zones monolithiques de l'éprouvette multi-structure (48 défauts)
Echo ultrasonore par contact	1,14	1,08
Echo ultrasonore par immersion	6,35	2,05
Transmission ultrasonore par immersion	0,94	2,12
Radiographie X	0,59	0,30
Tomographie X	0,38	0,36
TIR	0,25	0,57
TIRM	0,88	0,90
TIRP	0,80	0,47

TABLE 3.4 – Précision moyenne de détection - Étalons monolithiques

Afin d'aller plus loin dans l'analyse, ces résultats généraux sont détaillés pour chaque technique vis-à-vis des profondeurs des défauts (figure 3.2) et vis-à-vis de leur diamètre (figure 3.3).

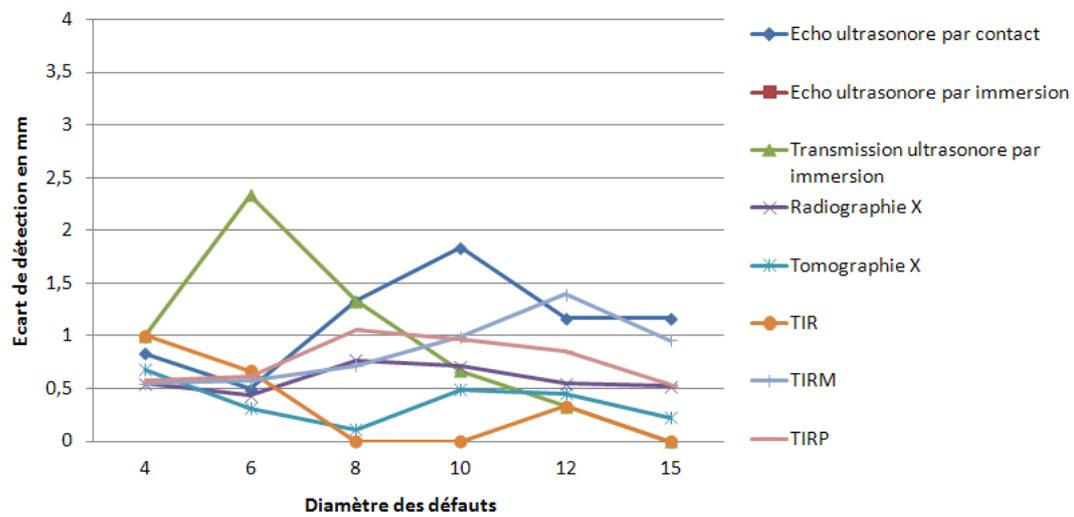


(a)

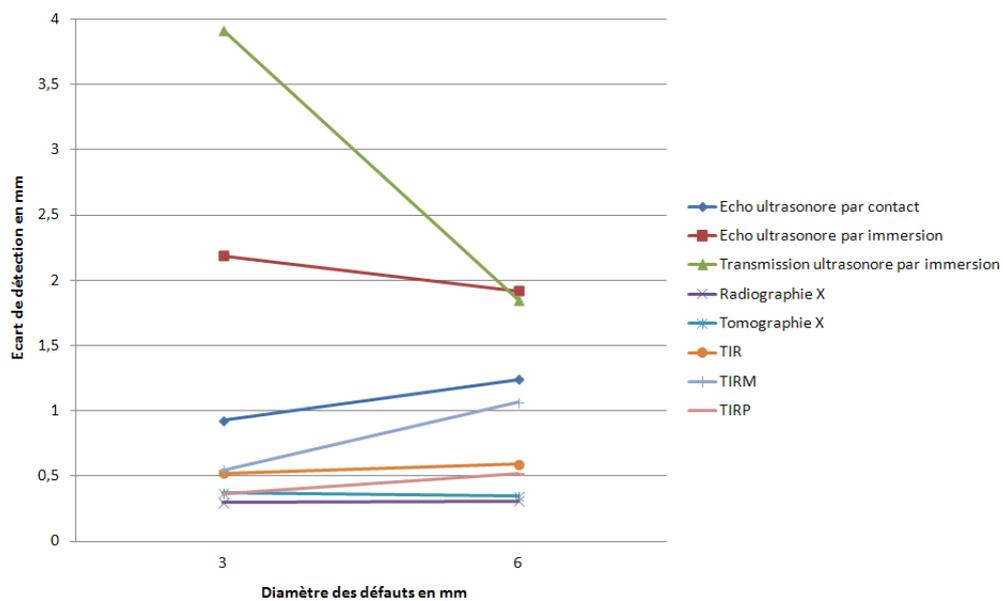


(b)

FIGURE 3.2 – Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Etalons monolithiques : (a) matériau monolithique avec inserts Téflon[®], (b) éprouvette multi-structure



(a)



(b)

FIGURE 3.3 – Précision de détection en fonction du diamètre des défauts - Etalons monolithiques : (a) matériau monolithique avec inserts Téflon®, (b) éprouvette multi-structure

Mesures de champs acoustiques

Pour chacun des matériaux testés, les écarts de détection de l'écho ultrasonore par contact augmentent sensiblement avec la profondeur des défauts. Plus le défaut est proche de la surface de détection, plus il y a des risques qu'il soit confondu avec l'écho d'entrée

ou l'écho de fond. Qui plus est, plus le défaut est profond, plus le chemin à parcourir par l'onde ultrasonore est important : l'onde de retour, reçue par le traducteur, sera donc plus atténuée et perturbée par les défauts présents dans l'épaisseur de l'éprouvette. La capacité de détection de la technique est quant à elle faiblement impactée par la taille des défauts ; notons en particulier qu'elle se révèle performante pour des défauts inférieurs à 6 mm de diamètre.

Enfin, comme cela a déjà été mis en évidence sur la sensibilité de détection, l'analyse faite sur la précision confirme une très bonne performance de la transmission ultrasonore par immersion sur le matériau monolithique avec inserts Téflon[®], d'un niveau quasi analogue aux techniques les plus précises, alors que les résultats sont plus discutables pour le cas de l'éprouvette multi-structure. Cette différence de réponse entre les deux pièces s'explique notamment par les états de surface mis en jeu : le matériau monolithique avec inserts Téflon[®] possède deux surfaces lisses alors que la plaque multi-structure possède une surface lisse (où est placé l'émetteur) et une surface rugueuse (où se trouve le récepteur). Il semble donc que les rugosités dans cette seconde situation perturbent la sortie des ondes ultrasonores et engendrent des difficultés de détection. Du point de vue des diamètres détectés, on soulignera que la précision de cette technique tend à s'améliorer globalement avec l'augmentation des taille de défauts.

Mesures de champs densimétriques

Les constats concernant la radiographie X et la tomographie X sont comparables. Elles conduisent à des résultats précis, cohérents pour les deux types d'éprouvettes et pratiquement constants quelles que soient la profondeur des défauts et leur taille.

Mesures de champs thermiques

Dans la gamme d'accessibilité de la TIR (profondeurs de défauts inférieures à 2.1 mm), les résultats obtenus conduisent pour les deux structures à une précision équivalente aux méthodes basées sur les mesures de champs densimétriques, et ce de manière constante quelle que soit la profondeur. Pour le matériau monolithique, on note également une amélioration avec l'augmentation du diamètre des défauts, cette tendance restant limitée pour l'éprouvette multi-structure du fait des bruits de mesure sur les films thermiques évoqués lors de l'analyse de la sensibilité de détection.

Du point de vue de la précision, la performance de la méthode TIRM est un peu moins bonne que celle de la TIR. Elle décroît globalement avec la profondeur des défauts ainsi qu'avec la taille de ceux-ci. Ainsi, si la périodicité du signal permet d'améliorer la sensibilité de détection, elle apporte en revanche des difficultés supplémentaires sur le dimensionnement des défauts puisque le signal détecté est en perpétuel mouvement tout au long du contrôle. De ce fait, l'image optimale pour effectuer le dimensionnement est parfois difficile à obtenir et conditionne la performance des résultats.

Le traitement des images développé par THERMOCONCEPT facilite enfin énormément l'analyse des résultats de la TIRP puisque le film global est transformé en une unique image représentative des propriétés thermiques et conduit à des précisions de mesure comparables à la radiographie X. En terme de tendance, elle suit une évolution en fonction des profondeurs et diamètres pratiquement équivalente à la TIRM.

3.3.2 Etalon monolithique avec trous à fond plat

Abordons à présent selon la même méthodologie d'analyse le cas du matériau monolithique avec trous à fond plat. Pour cette plaque, la face avant où sont placées les sources d'émission correspond à la surface plane et la face arrière comporte les trous. La profondeur des défauts est indiquée par rapport à la face avant.

3.3.2.1 Sensibilité de détection

D'après le tableau 3.5, trois méthodes sur huit détectent la totalité des défauts :

- l'écho ultrasonore par immersion (configuration face avant),
- les deux méthodes de champs densimétriques, radiographie X et tomographie X (configurations face arrière).

On peut associer à ces méthodes les plus efficaces l'écho ultrasonore par contact (configuration face avant) dont le seul défaut non détecté est le plus petit défaut (2 mm de diamètre) le plus proche de la surface de détection (1 mm de profondeur) pour lequel l'écho de défaut est difficilement dissociable de l'écho d'émission.

Technique	Pourcentage des défauts détectés	Commentaires
Echo ultrasonore par contact	93%	Non détecté : défaut de 2 mm de diamètre à 1 mm de profondeur
Echo ultrasonore par immersion	100%	
Transmission ultrasonore par immersion	47%	Non détectés : défauts de 2 à 6 mm de diamètre à 7,48 mm de profondeur, défauts de 2 et 3 mm de diamètre à 5,2 mm de profondeur, défauts de 3 mm de diamètre à 0,52 mm et 2,8 mm de profondeur, défaut de 2 mm de diamètre à 1 mm de profondeur
Radiographie X	100%	
Tomographie X	100%	
TIR	40%	Non détectés : totalité des défauts présents à 7,48 mm de profondeur, défauts de 2 à 6 mm de diamètre à 5,2 mm de profondeur, défaut de 3 mm situé à 2,8 mm de profondeur et défaut de 2 mm à 1 mm de profondeur
TIRM	53%	Non détectés : totalité des défauts présents à 7,48 mm de profondeur, défauts de 2 à 6 mm de diamètre à 5,2 mm de profondeur
TIRP	20%	Non détectés : tous les défauts situés à des profondeurs supérieures à 0,52 mm

TABLE 3.5 – Sensibilité de détection - Matériau monolithique avec trous à fond plat

La majorité des défauts non détectés sont localisés aux profondeurs les plus importantes (5.2 et 7.48 mm). Examinons dans le détail le cas des techniques qui présentent des limitations pour ce cas de figure.

Transmission ultrasonore par immersion

En transmission ultrasonore, le faisceau d'ondes doit traverser l'épaisseur complète de la pièce inspectée et s'avère donc considérablement atténué lorsqu'il arrive au détecteur dans le cas de pièces épaisses. En présence de défauts, le signal reçu est encore plus faible. De manière générale, la détection de défauts de petite ou moyenne taille (inférieure à 6 mm) est rendue difficile avec cette technique du fait de la faible atténuation du signal générée par ces derniers. La taille critique est donc ici de 3 mm (aucun défaut de diamètre inférieur ou égal à 3 mm n'est détecté) et ce phénomène s'accroît d'autant plus que les défauts sont profonds (les défauts de 6 mm ne sont plus accessibles au-delà de 5.2 mm, le seul défaut visible à 7.48 mm de profondeur fait 10 mm de diamètre).

TIR

A nouveau, la diffusion du flux thermique des halogènes et donc la profondeur d'investigation de cette technique est limitée dans cette pièce épaisse. Aucun défaut n'est

ainsi identifié à 7.48 mm de profondeur alors qu'ils le sont tous à 0.52 mm de profondeur. De manière générale, la profondeur limite de détection d'un défaut critique pour l'aéronautique (6 mm de diamètre (AITM6-4002 [8])) vaut ici 2.8 mm de profondeur. En comparaison, celle d'un défaut de 10 mm de diamètre est de 5.2 mm de profondeur.

TIRM

Les résultats de la TIRM sont à peu près équivalents à ceux de la TIR. Néanmoins, on remarque une amélioration notable concernant l'identification des défauts localisés aux faibles profondeurs (entre 0.52 et 2.8 mm) pour lesquelles le signal périodique semble plus adapté à la détection.

TIRP

Bien moins performante que les autres mesures par thermographie, la TIRP ne détecte sur cette éprouvette que les défauts proches de la surface (0.52 mm de profondeur). La puissance du flash thermique ne semble donc pas être suffisante vis-à-vis de l'épaisseur inspectée.

3.3.2.2 Analyse de la précision de détection

Les résultats concernant la précision moyenne sur les défauts détectés sont présentés à la figure 3.6. Lorsqu'ils sont visibles par les différentes techniques, les trous à fond plat engendrent davantage d'hétérogénéités dans les champs que les inserts, et du coup sont facilement détectés. Ainsi, sur les huit méthodes employées,

- cinq d'entre-elles (écho ultrasonore par contact, écho ultrasonore par immersion, radiographie X, tomographie X et TIR) présentent un écart de détection global inférieur ou égal à 0.5 mm ; en particulier, la tomographie X est la plus efficace ;
- les trois autres (transmission ultrasonore par immersion, TIRM, TIRP) ne dépassent pas un écart de 2 mm.

Technique	Ecart moyen en mm (15 défauts)
Echo ultrasonore par contact	0,45
Echo ultrasonore par immersion	0,52
Transmission ultrasonore par immersion	1,86
Radiographie X	0,28
Tomographie X	0,21
TIR	0,50
TIRM	1,02
TIRP	1,60

TABLE 3.6 – Précision moyenne de détection - Matériau monolithique avec trous à fond plat

Comme précédemment, les figures 3.4 et 3.5 illustrent l'analyse des précisions par profondeur et par diamètre de défauts.

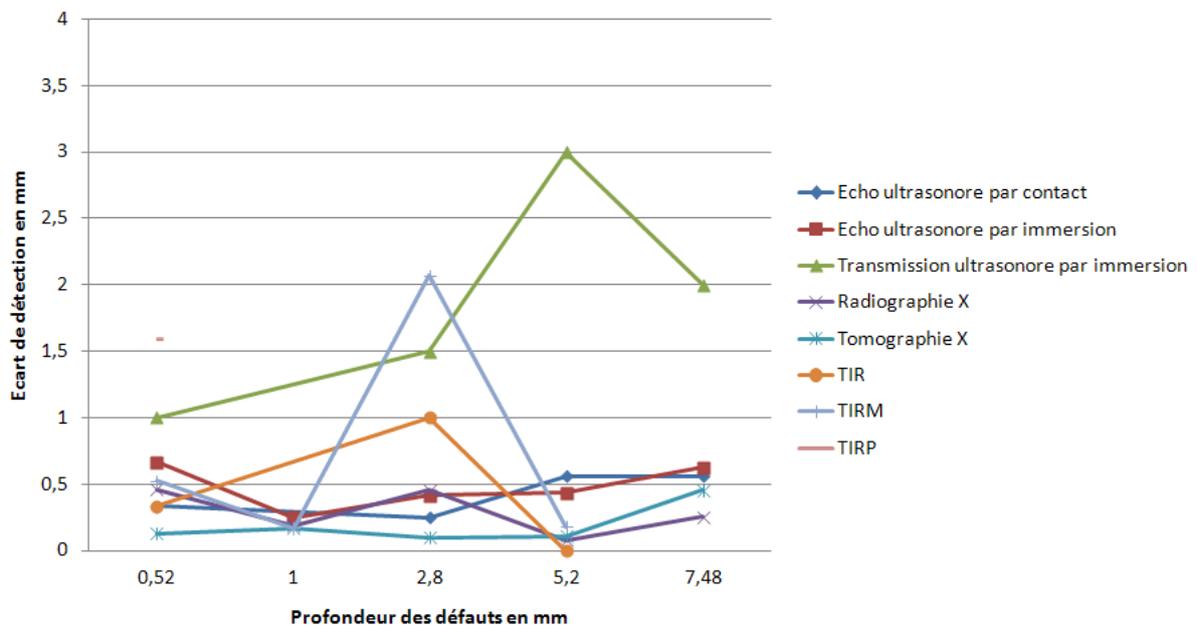


FIGURE 3.4 – Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Matériau monolithique avec trous à fond plat

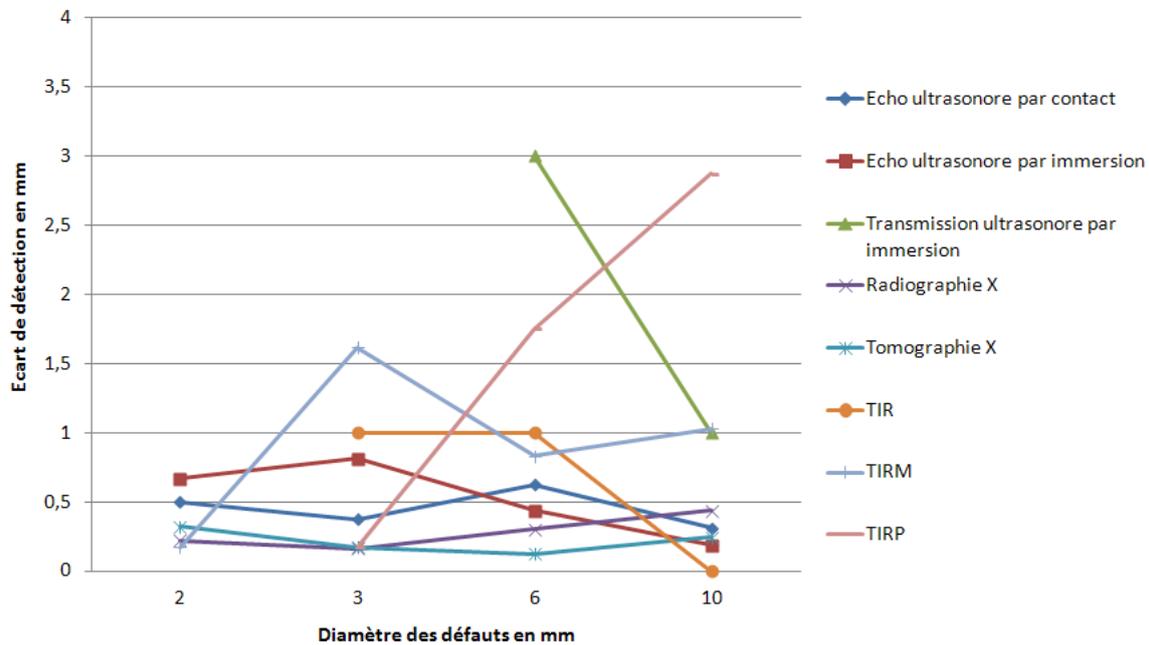


FIGURE 3.5 – Précision de détection en fonction du diamètre de défauts - Matériau monolithique avec trous à fond plat

Mesures de champs acoustiques

L'écho ultrasonore par contact conduit, comme dans le cas des structures monolithiques, à de très bons résultats et fait preuve d'une capacité d'identification relativement constante quelle que soit la profondeur des défauts et leur taille.

En ce qui concerne l'écho ultrasonore par immersion, la courbe de la précision en fonction de la profondeur indique de moins bons résultats dans les zones proches de la surface de mesure et celles proches de la surface de fond, que l'on attribue à la mauvaise identification de l'écho d'entrée ou de l'écho de fond par rapport à l'écho de défaut. Parallèlement, ses performances augmentent logiquement avec le diamètre des défauts, avec une réponse très satisfaisante pour les défauts de 6 et 10 mm.

Bien que la précision s'améliore avec l'augmentation des tailles de défauts, la transmission ultrasonore est le contrôle qui génère les écarts les plus importants, et ce sur la quasi totalité des profondeurs des défauts. La particularité de la transmission ultrasonore

par immersion réside dans le placement d'une seule porte sur l'écho de réception (porte A). L'onde ultrasonore étant fortement atténuée par l'épaisseur de la pièce, l'amplitude de cet écho de réception est faible. De ce fait, il faut ajouter du gain pour amplifier le signal, et par voie de conséquence le bruit de mesure. Cette perturbation, associée à la faible atténuation provoquée par les défauts sur une partie aussi épaisse expliquent ces imprécisions des mesures obtenues.

Mesures de champs densimétriques

Comme pour les inserts, les résultats de radiographie X et tomographie X sont très bons avec une bonne stabilité de la précision quelle que soit la profondeur et la taille des trous.

Mesures de champs thermiques

Le nombre de défauts détectés avec la TIR diminue avec l'augmentation de la profondeur de ces derniers, les résultats sont dès lors légèrement faussés et ne permettent pas l'observation d'une vraie tendance (la précision d'identification à 5.2 mm ne fait intervenir qu'un défaut de 10 mm de diamètre). Néanmoins, pour la gamme des profondeurs comprises entre 0.52 et 2.8 mm, et des tailles de défauts entre 3 et 10 mm de diamètre, la détection est bonne et stable avec des écarts inférieurs à 1 mm.

Les résultats de la TIRM sont assez hétérogènes, tant pour l'analyse des profondeurs que des tailles. Dans la mesure où un seul défaut est identifié à 1 et 5.2 mm de profondeur et qu'aucun défaut n'est détecté à 7.48 mm de profondeur, les profondeurs représentatives des performances de cette méthode sont 0.52 et 2.8 mm. Plutôt satisfaisante sur des défauts proches de la surface d'émission (0.5 mm d'écart à 0.52 mm de profondeur), cette technique est très sensible à l'augmentation de la profondeur (plus de 2 mm d'écart à 2.8 mm de profondeur). Cet aspect se confirme au niveau des diamètres des défauts avec le défaut de 2 mm parfaitement mesuré se situant proche de la surface d'émission. Pour les défauts de 3 à 10 mm, la tendance globale est à l'amélioration avec l'augmentation des tailles, à l'instar de la TIR. En revanche, si le signal périodique améliore la sensibilité de détection par rapport à cette dernière, la précision de la TIRM est globalement plus faible.

L'analyse de la TIRP reste limitée car seuls sont repérés les défauts présents à 0.52 mm de profondeur. Qui plus est, le résultat pour chaque diamètre ne correspond qu'à un seul défaut. La précision dans ce cas est moyenne (écart légèrement supérieur à 1.5 mm), induite par des phénomènes d'ovalisation sur les images d'autant plus importants que les défauts sont grands.

3.3.3 Etalons sandwich avec inserts Téflon[®]

Les résultats des tests sur les éprouvettes sandwichs ainsi que la partie sandwich de la plaque multi-structure vont être détaillés maintenant.

Seuls les résultats des méthodes de mesures ultrasonores et thermiques menés en configuration face avant sont présentés ici. La transmission ultrasonore n'est par ailleurs pas intégrée dans l'analyse qui suit car elle n'a pas permis de détecter le moindre défaut. En effet, l'âme en mousse étant un isolant acoustique, les ondes ultrasonores émises n'arrivent pas à traverser les matériaux étudiés et à être détectées par le traducteur récepteur.

D'autre part, afin de faciliter la compréhension des phénomènes expliqués par la suite, on rappelle brièvement certains aspects essentiels concernant ces matériaux. Chacun des étalons est constitué de fines peaux : l'épaisseur des peaux de la première éprouvette est de 0.66 mm alors que celles des deux autres éprouvettes est de 1.08 mm. Par ailleurs, les états de surface de chacune des structures conditionne la qualité de la mesure :

- le sandwich avec peaux de 0.66 mm possède un état de surface lisse et brillant du côté moule (type A) et un état de surface rugueux, bosselé et mat du côté contre-moule (type B) ; les mesures pour cette éprouvette ont été réalisées du côté bosselé ;
- le sandwich avec peaux de 1.08 mm présente un état de surface lisse et brillant (type A) du côté moule et un état de surface rugueux (type C) du côté contre-moule ; la face contrôlée correspond dans ce cas au côté lisse ;
- l'éprouvette multi-structure a quant à elle un état de surface lisse et mat du côté moule (type D) et un état de surface brillant et bosselé du côté contre-moule (type E) ; pour cette dernière, les deux côtés ont été testés et l'on présente dans la suite la moyenne des résultats obtenus qui s'avère donc représentative d'un état de surface de nature intermédiaire entre les deux types de côtés.

3.3.3.1 Sensibilité de détection

D'après les tableaux 3.7, 3.8 et 3.9, les méthodes de mesures de champs densimétriques sont les plus efficaces pour le contrôle des structures sandwichs. La radiographie X détecte notamment la totalité des défauts insérés dans les trois éprouvettes étudiées. La tomographie X identifie quant à elle l'ensemble des défauts présents sur les éprouvettes sandwichs mais sa mesure est légèrement perturbée par des artefacts pour l'éprouvette multi-structure. En ce qui concerne la qualité des mesures ultrasonores et thermiques, on note des disparités suivant les éprouvettes contrôlées.

Technique	Pourcentage des défauts détectés	Commentaires
Echo ultrasonore par contact	44%	Non détectés : 2 défauts de 6 mm de diamètre à 0,66 mm de profondeur, 4 défauts de 3 mm à 0,44 mm de profondeur, 4 défauts de 6 mm de diamètre à 0,22 mm de profondeur
Echo ultrasonore par immersion	0%	
Radiographie X	100%	
Tomographie X	100%	
TIR	100%	
TIRM	94%	Non détectés : défaut de 3 mm de diamètre à 0,66 mm de profondeur
TIRP	100%	

TABLE 3.7 – Sensibilité de détection - Matériau sandwich avec peaux de 0.66 mm

Technique	Pourcentage des défauts détectés	Commentaires
Echo ultrasonore par contact	67%	Non détectés : 2 défauts de 3 mm de diamètre, un à 0,72 mm et l'autre à 1,08 mm de profondeur
Echo ultrasonore par immersion	100%	
Radiographie X	100%	
Tomographie X	100%	
TIR	50%	Non détectés : totalité des défauts de 3 mm de diamètre
TIRM	50%	Non détectés : totalité des défauts de 3 mm de diamètre
TIRP	67%	Non détectés : 2 défauts de 3 mm de diamètre (à 0,72 mm et 1,08 mm de profondeur)

TABLE 3.8 – Sensibilité de détection - Matériau sandwich avec peaux de 1.08 mm

Technique	Pourcentage des défauts détectés	Commentaires
Echo ultrasonore par contact	53%	Non détectés : totalité des défauts localisés à 1,08 mm de profondeur ainsi que la majorité des défauts de 3 mm de diamètre
Echo ultrasonore par immersion	85%	Non détectés : 5 défauts de 3 mm de diamètre situés aux trois profondeurs étudiées
Radiographie X	100%	
Tomographie X	75%	Non détectés : 6 défauts de 6 mm de diamètre et 4 défauts de 3 mm de diamètre sont masqués par les artefacts présents sur différentes coupes
TIR	35%	Non détectés : majorité des défauts de 6 mm et 3 mm de diamètre localisés à 0,72 mm et 1,08 mm de profondeur
TIRM	53%	Non détectés : majorité des défauts de 3 mm de diamètre présents aux trois profondeurs étudiées
TIRP	43%	Non détectés : majorité des défauts de 6 mm et 3 mm de diamètre localisés à 0,72 mm et 1,08 mm de profondeur

TABLE 3.9 – Sensibilité de détection - Zones sandwichs de l'éprouvette multi-structure

Comme précédemment, examinons dans le détail les sensibilités de détection de chacune des techniques.

Echo ultrasonore par contact

Trois impératifs majeurs doivent être respectés pour la mise en oeuvre du contrôle en écho ultrasonore par contact sur des matériaux sandwichs avec peau de fine épaisseur (inférieure ou proche de 1 mm) :

- pouvoir différencier l'écho d'entrée dans la pièce, l'écho de fond et l'écho de défaut,
- assurer la visibilité de ces échos dans le A-scan en ayant des échos de fond et de défaut d'amplitude suffisante,
- maintenir (manuellement) une liaison acoustique constante et homogène.

Les mauvais résultats obtenus pour les trois éprouvettes, notamment pour la première, sont associés à des difficultés dans ces trois domaines. En effet, le sandwich avec peaux de 0.66 mm possède d'une part la peau la plus fine et, d'autre part, sa surface de détection est rugueuse et bosselée. Une épaisseur constante d'agent couplant ne peut alors être assurée ; le faisceau d'ondes tend à être dévié et les portes de détection (portes I, B et A) sont difficiles à positionner. Les performances sont meilleures sur les deux autres éprouvettes pour lesquelles la technique a été testée sur des côtés plus lisses. On notera en revanche l'incapacité de cette technique à accéder aux défauts localisés à 1.08 mm de profondeur dans la structure multi-structure. Cette difficulté s'explique par la position du défaut entre la peau et la mousse.

Echo ultrasonore par immersion

L'écho ultrasonore par immersion détecte la totalité des défauts sur la seconde éprouvette qui a été testée du côté lisse, renforçant ainsi la qualité de l'immersion par rapport au contact. En revanche, aucun défaut n'est détecté sur le premier étalon pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment (peau de fine épaisseur, état de surface bosselé). En ce qui concerne l'éprouvette multi-structure, son état de surface "moyen" est moins lisse que la seconde éprouvette, les seuls défauts non détectés mesurent 3 mm et sont localisés près des transitions vers les parties monolithiques où les effets de bord tendent à diminuer fortement le pouvoir de détection de la technique.

TIR

Les mesures thermiques en configuration face avant sont de manière générale sensibles à deux phénomènes :

- la saturation thermique très rapide des structures suite à l'émission du flux, qui réduit le temps de visibilité des défauts,
- l'impact thermique du point focal de l'halogène qui minimise la visibilité des défauts à cet endroit.

Plus la surface est brillante, plus ces aspects sont accentués et affectent la capacité de détection de ces mesures. Les résultats obtenus avec la TIR confirment ce propos : cette technique détecte la totalité des défauts dans la première structure (état de surface mat) et moins de 50% pour les autres étalons (états de surface brillant et intermédiaire). Dans le premier cas, il faut noter que le doublement des inserts accroît sans doute également les écarts thermiques et améliorent leur visibilité. Les deux dernières structures, fabriquées à partir du même tissu carbone, sont également perturbées par le bruit généré par son armure vis-à-vis des défauts de 3 et 6 mm. Enfin, la différence entre les résultats de celles-ci (50% pour l'éprouvette sandwich épaisse, 35% pour l'éprouvette multi-structure d'aspect moyen pourtant plus mat) s'explique en grande partie par l'effet isolant induit par les nombreuses étapes de préformage nécessaires à la fabrication de l'éprouvette multi-structure (modification physico-chimique) ainsi que par les effets de bords dus à la géométrie de l'éprouvette.

TIRM

Les commentaires précédants pour la TIR peuvent être étendus à la TIRM. Néanmoins, l'utilisation d'un signal périodique et le traitement des images sur la cartographie de phase permettent de diminuer le bruit de mesure lié à l'armure du tissu et donc d'améliorer la

sensibilité de détection pour l'éprouvette multi-structure.

TIRP

A nouveau, les conclusions sur la TIR s'appliquent à cette dernière méthode par thermographie. Le traitement d'images spécifique ne permet cependant pas de s'extraire totalement de la perturbation liée à l'armure du tissu de l'éprouvette multi-structure.

3.3.3.2 Analyse de la précision de détection

Le tableau 3.10 récapitule, *pour les défauts détectés*, les écarts moyens obtenus pour chacune des techniques. A nouveau, les mesures de champs densimétriques sont les plus performantes (écart moyen inférieur à 0.5 mm), les mesures thermiques donnent de très bons résultats (avec un écart moyen inférieur à 1 mm hormis pour la TIR sur le premier matériau), et les mesures acoustiques restent un peu en retrait (écart moyen autour de 2 mm).

Technique	Ecart moyen en mm du matériau sandwich avec peaux de 0.66 mm (18 défauts)	Ecart moyen en mm du matériau sandwich avec peaux de 1.08 mm (6 défauts)	Ecart moyen en mm des zones sandwichs de l'éprouvette multi-structure (40 défauts)
Echo ultrasonore par contact	2,54	2,06	2,14
Echo ultrasonore par immersion	aucun défaut détecté	2,15	1,49
Radiographie X	0,31	0,71	0,24
Tomographie X	0,28	0,53	0,41
TIR	2,73	0,37	0,72
TIRM	0,86	1,06	0,78
TIRP	0,94	0,60	0,86

TABLE 3.10 – Précision moyenne de détection - Etalons sandwichs

L'évolution de ces écarts de mesure vis-à-vis des profondeurs (figures 3.6, 3.7 et 3.8) et des diamètres de défauts (figures 3.9, 3.10 et 3.11) complètent l'analyse. Il convient de noter pour la première éprouvette que les défauts situés à 0.22 mm de profondeur font tous 6 mm de diamètre, que ceux à 0.44 mm de profondeur font tous 3 mm de diamètre et que les deux diamètres de défauts sont présents à 0.66 mm de profondeur. Ceci explique

notamment le pic d'écart observé à 0.44 mm de profondeur sur la figure 3.6 pour de nombreuses techniques. Pour les deux autres éprouvettes, les défauts de 3 mm et 6 mm de diamètre sont répartis équitablement selon la profondeur.

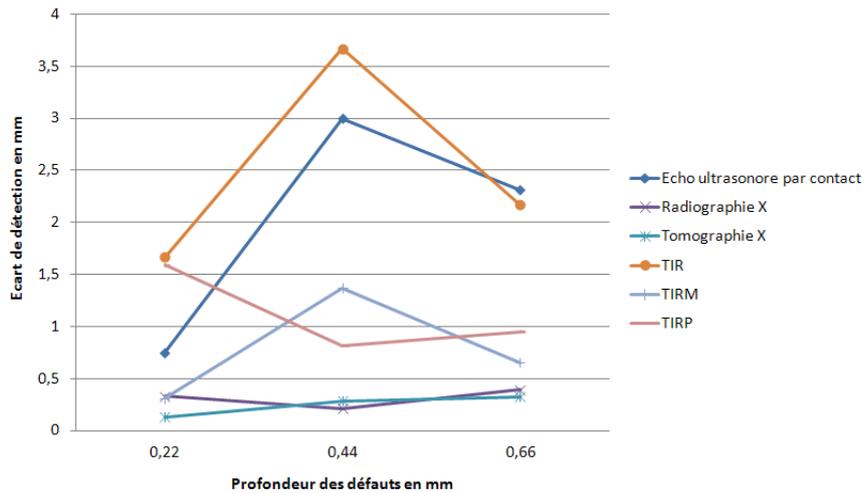


FIGURE 3.6 – Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Matériau sandwich avec peaux de 0.66 mm

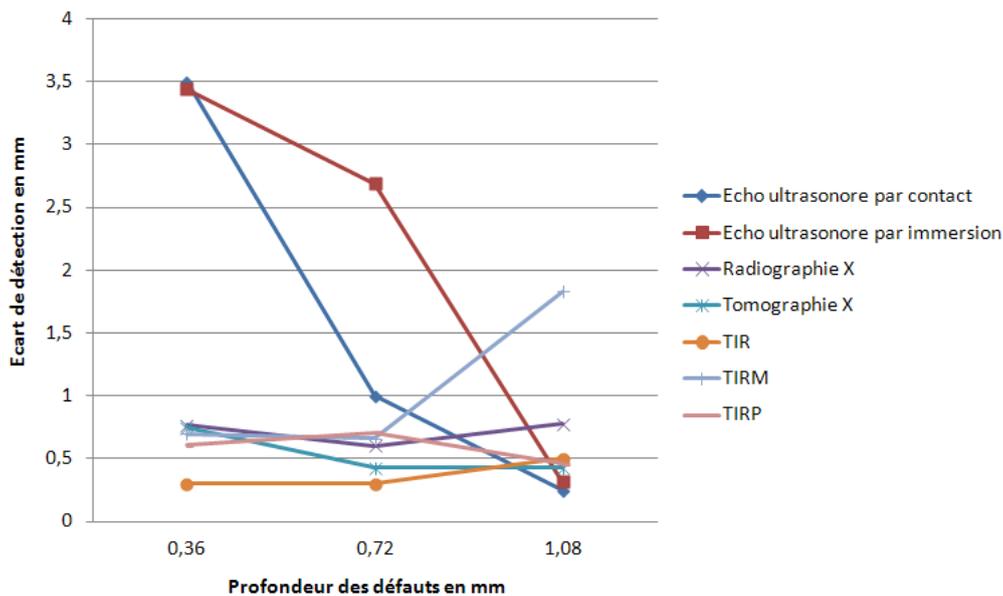


FIGURE 3.7 – Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Matériau sandwich avec peaux de 1.08 mm

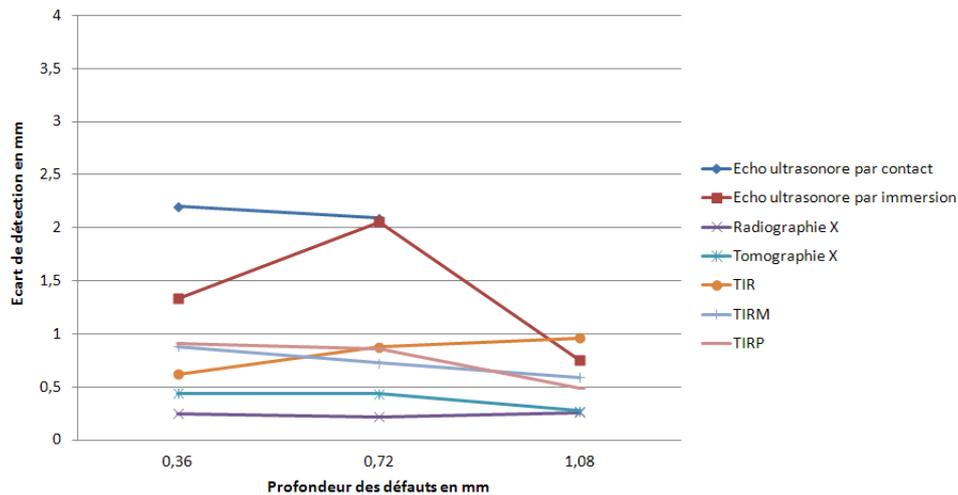


FIGURE 3.8 – Précision de détection en fonction de la profondeur des défauts - Zones sandwichs de l'éprouvette multi-structure

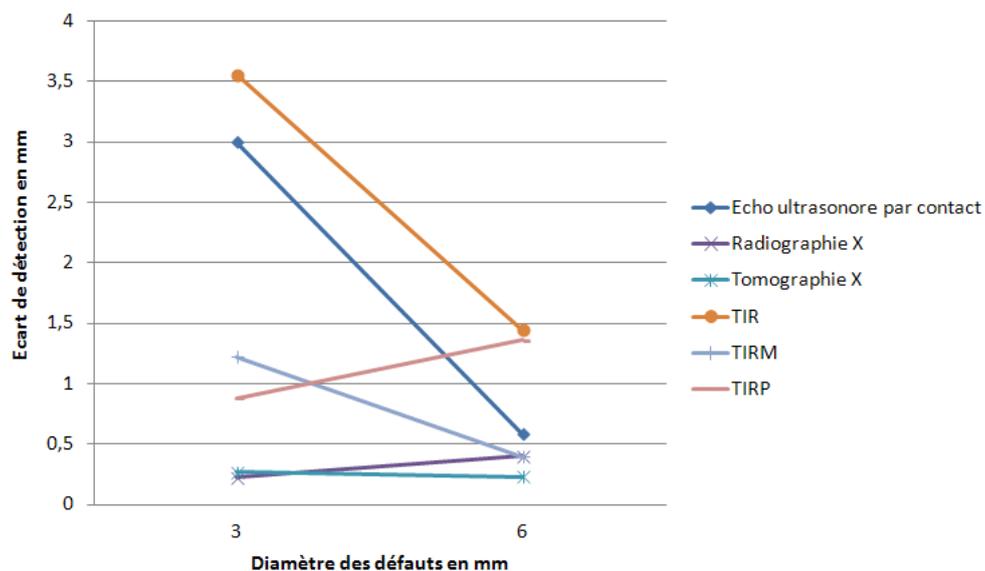


FIGURE 3.9 – Précision de détection en fonction du diamètre de défauts - Matériau sandwich avec peaux de 0.66 mm

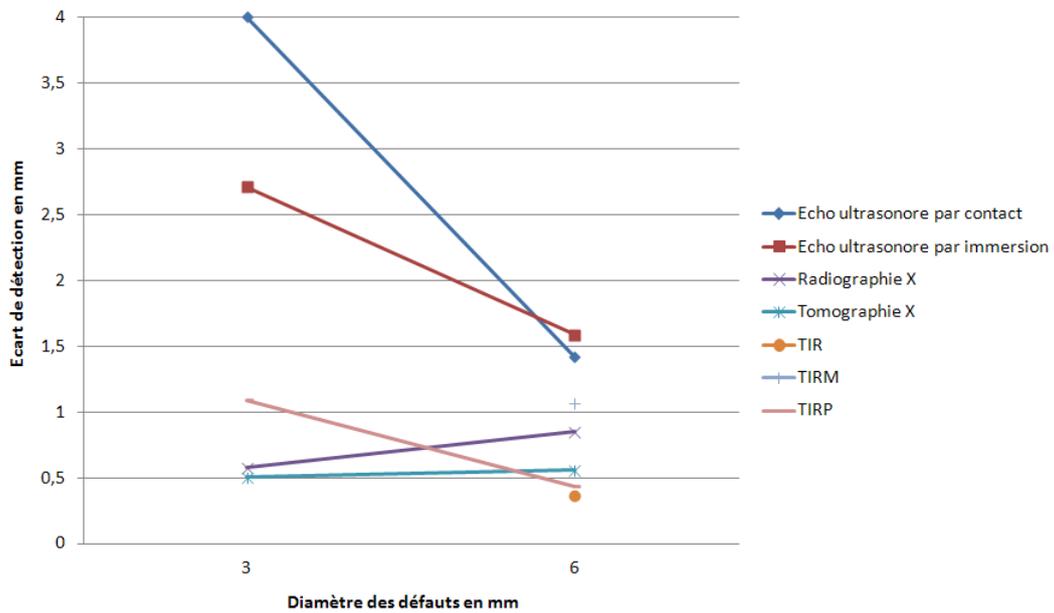


FIGURE 3.10 – Précision de détection en fonction du diamètre de défauts - Matériau sandwich avec peaux de 1.08 mm

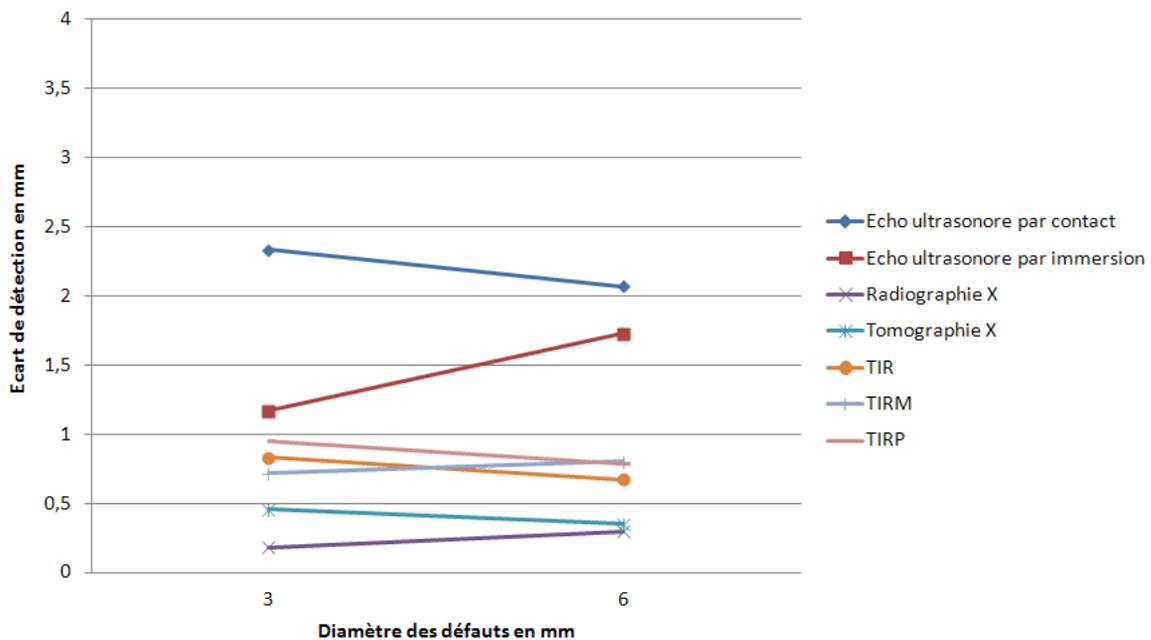


FIGURE 3.11 – Précision de détection en fonction du diamètre de défauts - Zones sandwichs de l'éprouvette multi-structure

Mesures de champs acoustiques

Comparée aux techniques étudiées, la précision de l'écho ultrasonore par contact sur ces structures sandwichs est assez faible. Affectée par un état de surface bosselé, elle semble également sensible au procédé de fabrication. Le premier étalon est fabriqué à partir de tissus pré-imprégnés alors que les deux autres sont réalisés par infusion de résine liquide. Dans ces derniers cas, la présence de résine en plus forte quantité entre le dernier pli et la mousse, et dans une moindre mesure, au sein de la mousse elle-même doivent diminuer l'atténuation des ondes ultrasonores dans l'âme. L'identification de l'écho de fond est beaucoup moins délicate et donc la détection des défauts est plus précise en profondeur qu'en surface pour ces deux étalons, contrairement au premier matériau qui subit pleinement l'effet de la mousse. En terme de taille, comme il a pu être constaté précédemment, cette méthode est plus précise sur les défauts de 6 mm de diamètre que sur ceux de 3 mm.

L'écho ultrasonore par immersion apporte une réponse en terme de précision globalement meilleure que la précédente méthode ultrasonore, grâce notamment aux améliorations associées à son protocole expérimental. Si l'évolution avec la profondeur et la taille suit la même tendance que l'écho par contact sur le matériau sandwich avec peaux de 1.08 mm, les résultats obtenus sur ces deux critères pour l'éprouvette multi-structure sont plus instables. Une des explications est l'utilisation d'un procédé de fabrication légèrement modifié entre les deux étalons (notamment vis-à-vis des étapes de préformage).

Les mauvais résultats obtenus par transmission ultrasonore par immersion s'expliquent par le manque d'adéquation entre le matériel utilisé (fréquence du capteur) et le type de structure contrôlée (épaisseur de la pièce). En effet, actuellement de nombreuses pièces sandwichs aéronautiques sont inspectées par transmission ultrasonore par immersion avec des fréquences beaucoup plus faibles ($< 1\text{MHz}$).

Mesures de champs densimétriques

Sur ces étalons sandwichs, les mesures de radiographie X et tomographie X sont à nouveau très proches, d'une grande précision et stables par rapport à la profondeur d'investigation et à la taille des défauts.

Mesures de champs thermiques

Si l'on extrait le cas de la première éprouvette où la TIR présente les mêmes spécificités de précision que l'écho par contact, cette méthode thermique conduit pour les deux autres étalons à de bons résultats. De manière générale, la précision diminue sensiblement avec la profondeur, de façon plus marquée pour la première éprouvette du fait de la mauvaise détection des petits défauts situés en profondeur. Là encore, les précisions les plus grandes sont obtenues sur des défauts de plus grand diamètre.

Le signal périodique de la TIRM et le signal impulsionnel associé au traitement d'images spécifique de la TIRP améliorent les résultats de ces méthodes par rapport à la TIR pour le premier étalon. En revanche, les résultats pour les deux autres éprouvettes sont relativement analogues pour ces trois méthodes. Notons cependant que la TIRP se révèle la plus stable quelle que soit la profondeur grâce à une meilleure performance sur la détection des défauts de 3 mm (voir par exemple sur le premier étalon, figures 3.6 et 3.9).

3.3.4 Synthèse

On se propose pour conclure cette partie d'établir un bilan général des performances des différentes techniques, regroupées selon les trois familles de mesures de champs. Compte tenu des problématiques industrielles, le point de vue retenu pour ce bilan est celui d'une analyse par types de structures, monolithiques et sandwichs, et vis-à-vis de la taille des défauts. Les moyennes ont été calculées à partir des 1160 résultats individuels et non à partir des tableaux précédents liés à la précision moyenne de détection qui portent sur des échantillons différents.

3.3.4.1 Structures monolithiques

Le tableau 3.11 et le graphique 3.12 présentent un bilan des moyennes obtenues pour toutes les structures monolithiques étudiées (éprouvettes monolithiques et éprouvette multi-structure, avec inserts et trous à fond plat), respectivement vis-à-vis de la sensibilité de détection et de la précision moyenne. Pour ces matériaux, on rappelle que les résultats des méthodes thermiques concernent la configuration face arrière.

En terme de sensibilité de détection (tableau 3.11), les méthodes acoustiques et densimétriques sont globalement les plus performantes sur les structures monolithiques dans

Famille de mesures de champs	Technique	Pourcentage des défauts détectés
Acoustiques	Echo ultrasonore par contact	99%
	Echo ultrasonore par immersion	100%
	Transmission ultrasonore par immersion	59%
Densimétriques	Radiographie X	100%
	Tomographie X	75%
Thermiques	TIR	51%
	TIRM	69%
	TIRP	48%

TABLE 3.11 – Sensibilité de détection - Structures monolithiques

la gamme d'épaisseurs considérées (0.72 à 8 mm). En particulier, les techniques d'écho ultrasonore (contact et immersion) et la radiographie X présentent une efficacité remarquable. Les techniques basées sur les mesures de champs thermiques, réalisées en face arrière, identifient quant à elles environ la moitié des défauts en présence, du fait d'une limitation de détection en profondeur.

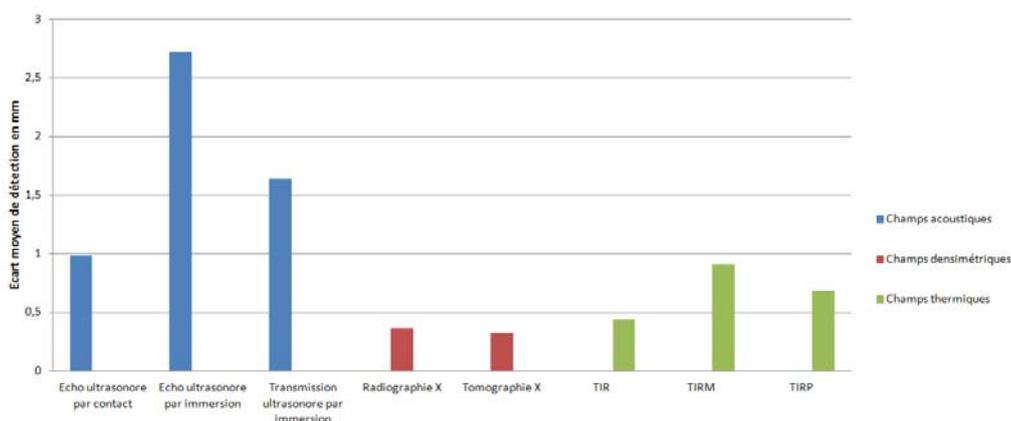


FIGURE 3.12 – Précision moyenne de détection - Structures monolithiques

L'analyse des précisions moyennes montre en revanche une très bonne capacité des méthodes densimétriques et thermiques avec un écart moyen de détection inférieur à 1 mm, voire inférieur à 0.5 mm pour la radiographie X et la tomographie X qui sont moins affectées par la profondeur des défauts (figure 3.12). Il faut noter en particulier les très bons résultats de la TIR pour ces structures monolithiques, d'une précision globale analogue à

la radiographie X. Avec le matériel à notre disposition, les mesures de champs acoustiques s'avèrent généralement en retrait sur ce critère, même si l'écho ultrasonore par contact approche la précision de mesure de la TIRM. Le mauvais résultat de l'écho ultrasonore par immersion est quant à lui fortement accentué par le problème de porosité sur l'éprouvette monolithique avec inserts, le niveau de précision moyenne de cette technique sans inclure cet étalon valant environ 1.68 mm.

3.3.4.2 Structures sandwichs

Une analyse identique est proposée pour les structures sandwichs (éprouvettes monolithiques et éprouvette multi-structure). Dans ces cas, les techniques thermiques ont été mises en oeuvre en configuration face avant et la transmission ultrasonore par immersion a échoué du fait d'une trop forte atténuation du signal par la mousse dans cette configuration (matériel utilisé/matériau contrôlé).

Famille de mesures de champs	Technique	Pourcentage des défauts détectés
Acoustiques	Echo ultrasonore par contact	52%
	Echo ultrasonore par immersion	64%
	Transmission ultrasonore par immersion	0%
Densimétriques	Radiographie X	100%
	Tomographie X	84%
Thermiques	TIR	55%
	TIRM	64%
	TIRP	61%

TABLE 3.12 – Sensibilité de détection - Structures sandwichs

Y compris sur les structures sandwichs, la sensibilité de détection la plus performante est celle des méthodes de mesures de champs densimétriques avec une forte proportion de défauts détectés, la radiographie X détectant en particulier l'intégralité des défauts sur toutes les éprouvettes (tableau 3.12). Les méthodes ultrasonores et thermiques sont quant à elles globalement équivalentes avec en moyenne 60% des défauts détectés du fait des perturbations induites par les états de surface dans cette configuration face avant :

- par le relief en mesure ultrasonore, notamment l'écho par contact,
- par la brillance en mesure thermique.

La très bonne performance de la radiographie X et de la tomographie X se confirme au niveau des précisions moyennes, avec un écart inférieur à 0.5 mm (figure 3.13). Outre la configuration de test en face avant, les contraintes liées à l'étude des sandwiches (peaux de fine épaisseur, âme absorbante) engendrent, en moyenne, pour les autres méthodes une perte de qualité notable par rapport aux structures monolithiques ¹. Néanmoins, on observe que les méthodes par thermographie sont un peu moins impactées par ces phénomènes et conduisent à des précisions qui restent intéressantes, de l'ordre du mm pour la TIRM et la TIRP.

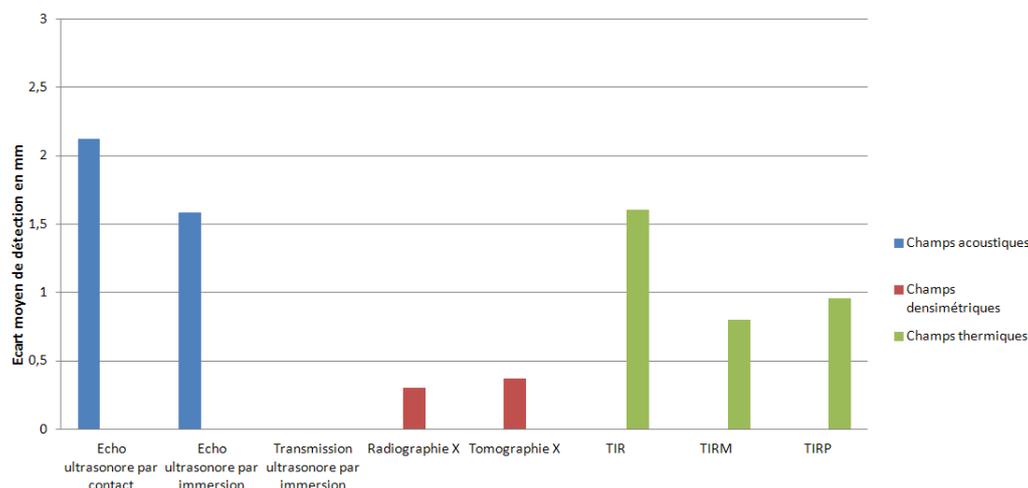


FIGURE 3.13 – Précision moyenne de détection - Structures sandwiches

3.3.4.3 Taille des défauts

En terme de taille de défaut, il faut souligner la capacité des mesures de champs densimétriques à mesurer avec une grande précision les défauts critiques pour l'aéronautique (diamètre 6 mm AITM6-4002 [8] (tableau 3.13 et figure 3.14)) et même ceux de taille inférieure (écart inférieur à 0.5 mm). Les résultats des méthodes par thermographie sont

1. Pour l'écho ultrasonore par immersion, ce constat est fait par rapport au niveau de précision a priori le plus représentatif, soit celui obtenu sans inclure l'étalon monolithique avec inserts.

également satisfaisants pour la gamme 6 mm avec un écart généralement inférieur à 1 mm (tableau 3.13 et figure 3.14). En revanche, il est difficile de conclure de manière générale sur les techniques ultrasonores dans la mesure où les résultats sont assez disparates selon les matériaux, le type de défauts et la technique de CND employée (tableau 3.13 et figure 3.14).

Famille de mesures de champs	Technique	Pourcentage des défauts de 6 mm de diamètre détectés
Acoustiques	Echo ultrasonore par contact	83%
	Echo ultrasonore par immersion	86%
	Transmission ultrasonore par immersion	41%
Densimétriques	Radiographie X	100%
	Tomographie X	78%
Thermiques	TIR	67%
	TIRM	86%
	TIRP	60%

TABLE 3.13 – Sensibilité de détection - Défauts de 6 mm de diamètre

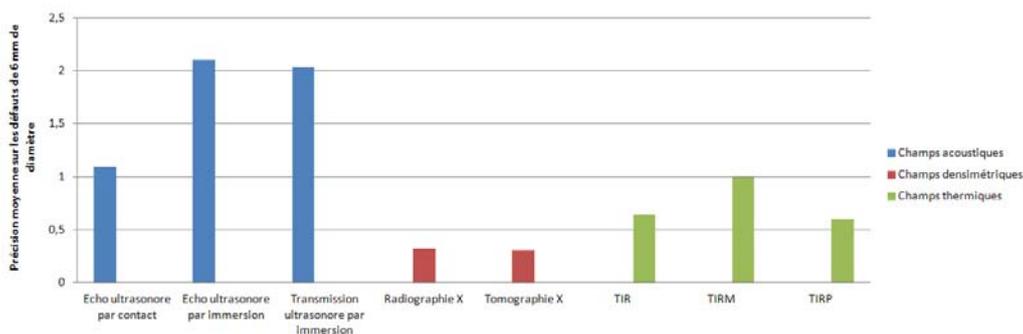


FIGURE 3.14 – Précision moyenne de détection - Défauts de 6 mm de diamètre

3.4 Conclusion

Cette étude comparative a permis de comparer des techniques de CND basées sur des mesures de champs acoustiques, densimétriques et thermiques :

- les mesures ultrasonores sont les plus utilisées dans le milieu aéronautique,
- la radiographie X est peu employée dans les structures composites,
- la tomographie X et les mesures de champs thermiques connaissent actuellement un important essor.

L'ensemble des défauts artificiels considérés dans cette étude (inserts Téflon[®] et trous à fond plat) sont en général pertinents pour les contrôles ultrasonores mais beaucoup moins représentatifs de défauts de cohésion (fissurations, cavités, délaminages) du point de vue de leur densité ou des propriétés thermiques. En dépit d'un contraste qui n'est donc pas optimal, les méthodes de mesures de champs densimétriques et thermiques ont révélé sur les matériaux étudiés des capacités de détection au moins équivalentes et souvent meilleures que les méthodes de CND courantes de l'aéronautique. L'analyse des sensibilités de détection et des précisions démontre en effet d'excellentes performances de la radiographie X et de la tomographie X, quels que soient le type de structure (monolithique ou sandwich), la profondeur ou la taille des défauts. Les mesures de champs acoustiques et thermiques montrent enfin une réelle complémentarité au regard de l'ensemble des résultats sur les deux types de structures composites. D'autres paramètres pourraient également être intégrés à cette analyse, à savoir : le temps de mise en oeuvre et de contrôle, non favorable aux techniques acoustiques ; le coût du matériel et des infrastructures nécessaires, non favorable aux techniques densimétriques. Enfin, la notion de contrôle face avant ou face arrière est aussi importante à prendre en compte, car la face arrière n'est pas toujours accessible ce qui peut être non favorable aux techniques densimétriques.

L'intérêt de la détection de défauts en production comme en maintenance réside dans la possibilité d'une réparation. Se posent alors les questions de la localisation du défaut et de la détermination de sa taille. La localisation est tridimensionnelle, c'est-à-dire qu'il faut connaître la profondeur. Pour identifier la profondeur du défaut, seules les techniques d'écho-ultrasonore et de tomographie X sont aujourd'hui capables de fournir cette information (les développements en thermographie IR sont en cours). Dans ce travail, cette information de profondeur n'a pu être identifiée que par la tomographie X, avec des précisions identiques que celles dans le plan.

On peut enfin conclure sur des choix ou positions qui résultent de cette étude :

- Procédés de fabrication : les techniques acoustiques (ultrasons) ne sont pas adaptées pour des états de surface rugueux induits par la présence de tissus d'arrachage, ou grilles de drainage de résine ; les techniques thermiques ne sont pas adaptées pour des états de surface brillants induits par la présence de certains consommables (micro-perforé, démoulant) ou d'états de surfaces d'outillages à très faible rugosité ; les techniques densimétriques sont indépendantes de ces états de surface,
- Structures sandwichs : les techniques acoustiques et thermiques ne sont pas adaptées pour les structures sandwichs, il est souvent nécessaire d'avoir accès aux deux peaux et si les peaux sont peu épaisses (inférieur au mm) les techniques thermiques sont les seules adéquates ; il faut donc préférer les techniques densimétriques qui sont très bien adaptées à ce type de structures,
- Position et taille des défauts dans les structures monolithiques : les techniques acoustiques permettent de mesurer des défauts de diamètre 3 mm ou plus dans un intervalle de profondeur compris entre 1 et 5 mm, les techniques thermiques permettent de mesurer des défauts de diamètre 3 mm ou plus dans un intervalle de profondeur compris entre 0 et 1.5 mm, les techniques densimétriques n'ont pas de limite en taille et en profondeur. En général les défauts proches de la surface (quelques dixièmes de profondeur) sont les plus difficiles à identifier. Il faut enfin noter que la précision n'étant pas la même suivant les techniques, un défaut de diamètre 6 mm sera identifié comme un défaut de 7.5 mm par les techniques acoustiques, de 7 mm par les techniques thermiques et de 6.5 mm par les techniques densimétriques, le critère d'acceptabilité du défaut sera interprété différemment.

Chapitre 4

Identification des défauts par mesures de champs cinématiques

Sommaire

4.1	Introduction	112
4.2	Méthodes de mesures de champs	113
4.2.1	Mesures surfaciques (2D)	113
4.2.2	Mesures surfaciques et hors-plan (2D 1/2)	115
4.2.3	Mesures volumiques (3D)	118
4.3	Méthodes d'identification du comportement	119
4.3.1	Méthodes itératives	120
4.3.2	Méthodes non itératives	123
4.4	Méthodologie d'identification multi-zones	125
4.5	Identification des propriétés d'un matériau orthotrope plan	128
4.5.1	Modèles de référence et de recalage	129
4.5.2	Description du fonctionnement de l'algorithme d'identification	131
4.5.3	Résultats	134
4.6	Identification des propriétés d'une zone dégradée	135
4.6.1	Création de la cartographie d'erreurs	136
4.6.2	Estimation de la taille de la zone dégradée	139
4.6.3	Identification des propriétés de la zone dégradée	141
4.7	Conclusion	144

4.1 Introduction

La démarche du contrôle non destructif consiste à identifier des zones de faiblesse au sein des structures et à en mesurer leur étendue. Cette approche, abordée précédemment sous l'angle de diverses techniques expérimentales, permet d'accéder à une localisation spatiale des zones dégradées et d'introduire des alertes dans les procédés de fabrication et/ou maintenance si la taille des défauts excède une taille critique définie selon les applications.

On se propose dans cette dernière partie du mémoire de compléter ce diagnostic de la santé matière au travers d'une évaluation quantitative des propriétés de ces zones dégradées. En plus de l'aspect dimensionnel des défauts capté par les méthodes de CND, il semble en effet intéressant et complémentaire de pouvoir définir leur taux de dégradation par rapport aux propriétés du matériau sain. Ces deux informations conduiraient ainsi à une caractérisation plus complète, d'un intérêt crucial pour la prise de décision par rapport à la pièce contrôlée et de son éventuelle réparation.

A cette fin, notre objectif est de mettre en place une procédure d'identification des propriétés élastiques de matériaux macroscopiquement hétérogènes à partir de mesures de champs cinématiques. En lien avec les développements de méthodes de mesures telles que la stéréo-corrélation d'images numériques, l'identification paramétrique a fait l'objet d'études récentes au sein du laboratoire vis-à-vis du comportement élasto-plastique de matériaux métalliques isotropes (Fazzini [76], Fazzini et al. [77]). Dans le cadre de ce travail, la première difficulté est donc d'étendre ces travaux au cas des composites propres au projet FUSCOMP, en l'occurrence des matériaux orthotropes plans. A partir de ce résultat, une des contributions majeures de ce travail consiste à établir une méthodologie d'analyse "multi-zones", qui vise à déterminer la variation spatiale des propriétés macroscopiques du matériau (zones saines et zones dégradées).

Ce chapitre comprend en premier lieu une présentation bibliographique des techniques de mesures de champs cinématiques ainsi que des principales méthodes d'identification. Après une explication des grandes lignes de la démarche employée dans cette étude, les procédures spécifiques dans les cas macroscopiquement homogènes et macroscopiquement hétérogènes seront détaillées. Les performances des algorithmes développés en Python seront finalement illustrées au travers de quelques résultats.

4.2 Méthodes de mesures de champs

De nombreuses méthodes optiques dimensionnelles de mesure de champs peuvent être rencontrées dans la littérature. Avec une sensibilité mécanique, nous avons choisi de les classer en trois familles selon la dimension de mesure réalisée. Elles peuvent en effet être utilisées pour des mesures surfaciques dites “2D”, des mesures surfaciques et hors-plan dites “2D 1/2” ou des mesures volumiques dites “3D”.

Au cours de cette revue, une attention particulière sera consacrée à la stéréo-corrélation d’images numériques. Cette technique est en effet employée depuis dix ans environ au sein du Laboratoire Génie de Production et les démarches d’identification déjà mises au point par l’équipe Mécanique des Matériaux, des Structures et des Procédés s’appuient sur les mesures issues de celle-ci.

4.2.1 Mesures surfaciques (2D)

Les mesures surfaciques permettent d’obtenir un champ de déplacement 2D sur une surface plane. Dans un repère (O, x, y, z) , les composantes planes du déplacement u et v sont mesurées et elles sont fonction de x, y variables et z_0 constante (équation 4.1) :

$$\begin{cases} u(x, y, z_0) \\ v(x, y, z_0) \end{cases} \quad (4.1)$$

Le gradient de déplacement F décrit par l’équation 4.2 ne permet pas de calculer le tenseur de Green-Lagrange. Seules les composantes planes du tenseur des petites déformations $\underline{\underline{\varepsilon}}$ sont accessibles (équation 4.3).

$$F = \begin{pmatrix} F_{xx} & F_{xy} & \times \\ F_{yx} & F_{yy} & \times \\ \times & \times & \times \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \frac{1}{2} (\underline{\underline{F}}^T + \underline{\underline{F}}) - \underline{\underline{I}} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \times \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \times \\ \times & \times & \times \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Les techniques de mesure surfaciques les plus couramment rencontrées sont la photoélasticité, l’interférométrie, le moiré et les méthodes utilisant l’analyse d’images.

La photoélasticimétrie 2D C’est une technique expérimentale d’analyse des déformations et des contraintes. La méthode est basée sur la propriété de double réfraction ou

biréfringence de certains matériaux transparents comme les résines époxy ou le polyméthacrylate (PMMA). Des franges isochromes et isoclines représentant la répartition de la déformation (différence de déformations principales et directions principales) sont visibles avec l'aide d'un polariscope (Chen [54], Jessop and Harris [114], Morimoto et al. [150], Patterson and Wang [160]).

Le moiré Le moiré consiste à faire apparaître des franges d'interférence entre une grille de référence (réseau régulier de lignes) et une seconde grille, identique à la grille de référence, qui est déposée sur la surface de la pièce à étudier et qui se déforme avec celle-ci. Les franges sont alors analysées par le biais d'un interféromètre moiré qui permet de mesurer des déplacements et des déformations à la surface de la pièce (Post et al. [167]).

Les techniques de corrélation - corrélation d'images et méthode des grilles Ces techniques permettent la détermination des champs de déplacement et de déformation à la surface d'un objet par comparaison de deux images : une image de référence de l'objet à l'état initial et une image du même objet après avoir subi une transformation mécanique (déplacement ou déformation) (Sutton et al. [190]). En marquant la surface d'un motif régulier (pour la méthode des grilles, Avril [19], Surrel [189]) ou aléatoire (pour la corrélation d'images), chaque point de la surface est identifié dans chaque image. En corrélant l'image de référence et l'image de l'objet déformé, nous obtenons une information en deux dimensions des déplacements.

L'interférométrie holographique Cette technique consiste à faire apparaître des franges d'interférences en superposant des ondes lumineuses dont une au moins est produite par un hologramme (Françon [80], Rastogi [173], Smigielski [183, 184, 185]), un hologramme étant un enregistrement par interférométrie de l'onde lumineuse diffusée ou diffractée par un objet.

L'interférométrie de speckle L'interférométrie de speckle permet l'analyse de franges d'interférences en superposant les intensités lumineuses diffusées ou diffractées par un objet présentant une surface rugueuse en l'éclairant par des faisceaux de lumière cohérente, issues du même laser, et orientées dans des directions différentes par un jeu de miroirs (Laermann [120], Leendertz and Butters [132], Rastogi [173], Smigielski [186]).

4.2.2 Mesures surfaciques et hors-plan (2D 1/2)

Les mesures surfaciques et hors-plan permettent d'obtenir un champ de déplacement 3D sur une surface. Dans un repère (O, x, y, z) , les composantes du déplacement u , v et w sont mesurées. Elles sont fonction de x , y et z , cette dernière étant exprimée en fonction de x et y :

$$\begin{cases} u(x, y, z(x, y)) \\ v(x, y, z(x, y)) \\ w(x, y, z(x, y)) \end{cases} \quad (4.4)$$

Le gradient de déplacement décrit par l'équation 4.5 ne permet d'accéder qu'aux composantes planes du tenseur de Green-Lagrange $\underline{\underline{E}}$ (équation 4.6).

$$F = \begin{pmatrix} F_{xx} & F_{xy} & \times \\ F_{yx} & F_{yy} & \times \\ F_{zx} & F_{zy} & \times \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$$\underline{\underline{E}} = \frac{1}{2} \left(\underline{\underline{F}}^T + \underline{\underline{F}} \right) - \underline{\underline{I}} = \begin{pmatrix} E_{xx} & E_{xy} & \times \\ E_{xy} & E_{yy} & \times \\ \times & \times & \times \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Dans cette gamme, l'interférométrie, le moiré et la stéréo-corrélation d'images figurent parmi les méthodes les plus répandues.

L'interférométrie holographique et interférométrie de speckle Ces techniques, déjà décrites, permettent également des mesures hors-plan (i.e. en augmentant le nombre de direction d'illumination).

Le moiré d'ombre La technique du moiré peut être utilisée pour déterminer le relief d'une pièce. Dans ce cas, l'ombre de la grille de référence est projetée sur la surface d'un objet par une source ponctuelle. La superposition du réseau et de son ombre montre les lignes de niveau de l'objet par rapport au plan de référence défini par le plan de la grille (Breque et al. [48], Post et al. [167]).

Stéréo-corrélation d'images numériques La stéréo-corrélation permet d'effectuer des mesures de déplacement plan et hors-plan en combinant la corrélation d'images et l'utilisation de la stéréoscopie (Cornille [64], Garcia [82], Orteu [153]). Deux types d'appariements d'images sont réalisés : un appariement temporel d'une paire d'images issues d'une même caméra prise à deux instants différents, et un appariement stéréoscopique d'une paire d'images prise au même instant par deux caméras différentes (figure 4.1).

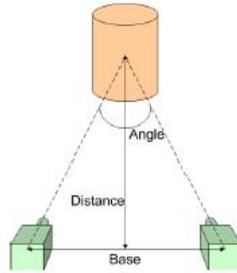


FIGURE 4.1 – Système possédant deux caméras (Fazzini [76])

L'utilisation de deux caméras en stéréovision permet en effet d'accéder à une information tridimensionnelle. Deux points sur la même droite projective depuis l'une des caméras peuvent ainsi être distingués par la seconde caméra (figure 4.2) et, de façon plus générale, on peut à partir des deux images 2D d'un même point sous deux angles différents déterminer la position tridimensionnelle de celui-ci par triangulation.

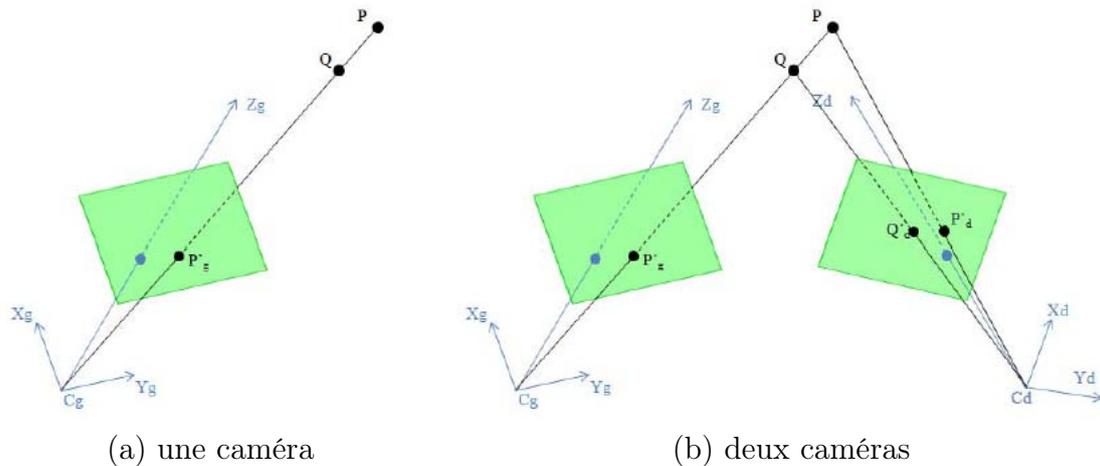


FIGURE 4.2 – Principe stéréoscopique (Fazzini [76])

En enregistrant une paire d'images stéréoscopiques relatives à chaque état de déformation, la stéréo-corrélation d'images permet ainsi de mesurer : le champ de déplacements tridimensionnel des points de sa surface étudiée, et par voie de conséquence, l'évolution de la géométrie 3D d'une surface (figure 4.3). De ce fait, elle permet aussi, lors de suivis d'essais, de mesurer les champs de déformations de l'objet inspecté.

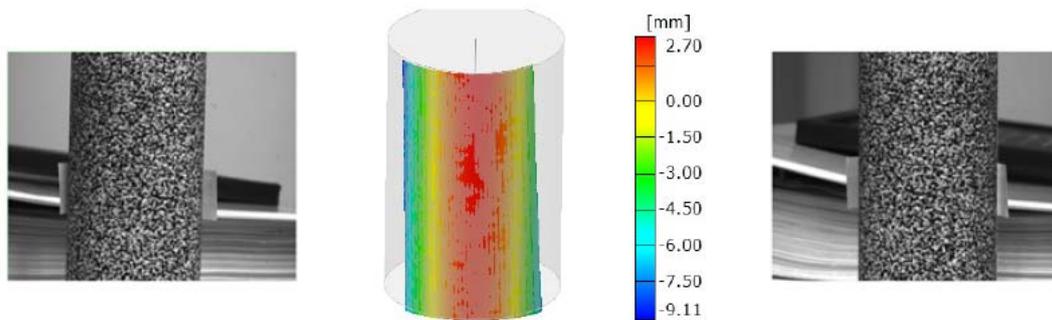


FIGURE 4.3 – Images de gauche et droite et reconstruction 3D du cylindre (Fazzini [76])

Techniquement, le principe de la méthode est résumé à la figure 4.4 dans le cas de deux paires stéréoscopiques (une avant déformation et une après). A l'état initial, une paire d'images stéréoscopiques est utilisée pour reconstruire l'objet au repos par un appariement stéréoscopique (étape 1). Une seconde paire d'images est prise lorsque l'objet est déformé et un appariement temporel est effectué sur les images de la caméra de gauche (à l'état initial et à l'état déformé) (étape 2). Enfin, un nouvel appariement stéréoscopique est réalisé sur les images de la caméra de droite et la caméra de gauche à l'état déformé (étape 3).

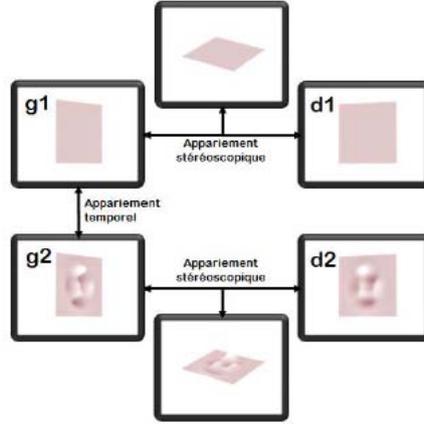


FIGURE 4.4 – Détermination du champ de déplacement 3D par stéréo-corrélation (Fazzini [76])

4.2.3 Mesures volumiques (3D)

Les mesures volumiques permettent d'obtenir un champ de déplacement 3D dans le volume du système étudié. Dans un repère (O, x, y, z) , les composantes du déplacement u , v et w sont mesurées et elles sont fonction de x , y et z :

$$\begin{cases} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{cases} \quad (4.7)$$

Le gradient de déplacement F décrit par l'équation 4.8 permet d'accéder cette fois à l'intégralité du tenseur de Green-Lagrange $\underline{\underline{E}}$ (équation 4.9).

$$F = \begin{pmatrix} F_{xx} & F_{xy} & F_{xz} \\ F_{yx} & F_{yy} & F_{yz} \\ F_{zx} & F_{zy} & F_{zz} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$\underline{\underline{E}} = \frac{1}{2} \left(\underline{\underline{F}}^T + \underline{\underline{F}} \right) - \underline{\underline{I}} = \begin{pmatrix} E_{xx} & E_{xy} & E_{xz} \\ E_{xy} & E_{yy} & E_{yz} \\ E_{xz} & E_{yz} & E_{zz} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

On détaille ci-dessous deux ensembles de techniques de mesure volumiques, la photoélasticité et les méthodes utilisant l'analyse d'images.

La photoélasticimétrie 3D par découpage optique La photoélasticimétrie 3D par découpage optique consiste à isoler un feuillet d'une pièce tridimensionnelle constituée de matériaux biréfringent par deux faisceaux laser plans. Un programme d'analyse des champs lumineux diffusés permet d'obtenir une série de franges isochromes et isoclines. Cette image est similaire à celle obtenue en plaçant dans un polariscope rectiligne le même feuillet découpé mécaniquement (Bilek et al. [38], Dupré and Lagarde [73], Germaneau [86], Zenina [200], Zenina et al. [201]). Contrairement à la photoélasticimétrie 2D, cette méthode a l'avantage d'être non destructive et permet des mesures en temps quasi-réel.

Corrélation volumique La corrélation volumique est une extension en trois dimensions de la corrélation d'image numérique bidimensionnelle (pixels) utilisant des images numériques de volumes (voxels) générés par tomographie à rayons X (Bay et al. [31], Bornert et al. [43], Germaneau [86]) ou des images obtenues par tomographie optique (Doumalin et al. [70], Germaneau [86]) (méthode consistant à isoler un plan du volume de la pièce par un faisceau laser et à reconstituer le volume en regroupant les différentes coupes).

4.3 Méthodes d'identification du comportement

L'identification de paramètres pilotant un modèle de comportement, à partir d'une réponse mécanique mesurée au cours d'un essai statiquement indéterminé, constitue un problème inverse (Bui [49], Decultot [67]). Ce type de problème s'oppose au problème direct qui consiste à calculer la réponse d'un système mécanique, pour un chargement et une loi de comportement donnée (Latourte [123]) (tableau 4.1).

Le plus souvent, le problème direct est dit bien posé au sens de Hadamard : une solution existe, elle est unique, elle dépend continûment des données. Les problèmes inverses sont dit souvent mal posés car ne vérifiant pas au moins une des trois conditions de Hadamard (Bonnet [40]).

Problème direct		Problème indirect	
Données de base	Résultats	Données de base	Résultats
géométrie initiale	géométrie déformée	géométrie initiale	géométrie déformée
maillage	contraintes	maillage	contraintes
chargement	déformations	chargement	déformations
conditions limites		conditions limites	lois de comportement
lois de comportement		un résultat expérimental	
paramètres des lois			

TABLE 4.1 – Données de base et résultats des problèmes directs et indirects (Kleinermann [118])

Les méthodes d’identification paramétrique peuvent globalement être classées en deux catégories :

- les techniques itératives, pour la plupart inspirées de la résolution du problème direct,
- les techniques non itératives, en général spécifiques aux mesures de champs.

On se propose dans ce qui suit de réaliser un inventaire des méthodes les plus courantes de chacune de ces classes (Avril et al. [20], Grediac [93, 94]). Notons que la technique de recalage par modèles éléments finis y sera davantage approfondie dans la mesure où elle est utilisée dans le cadre de ces travaux.

4.3.1 Méthodes itératives

Recalage de modèles éléments finis (FEMU) La méthode de recalage de modèles éléments finis (*Finite Element Model Updating method*) est sans doute l’approche la plus intuitive de toutes les méthodes d’identification inventoriées. Elle consiste à recalculer de façon itérative les paramètres d’un modèle Eléments Finis (EF) afin d’approcher au mieux des champs cinématiques dits de *référence*. Dans l’idéal, la référence est bien entendu la mesure expérimentale mais dans certains cas (mesures non disponibles, mise en place de procédure) il est possible que les champs de référence soient donnés par un modèle numérique jugé représentatif de la réalité : on parle alors de modèle “expérimental numérique” (Crouzeix [65], Fazzini [76], Lecompte [128], Pagnacco and Caro-Bretelle [154], figure 4.5). Le but de la méthode est ainsi de minimiser l’écart entre le modèle EF à identifier et la référence, appelé également fonctionnelle coût ou fonction objectif. S’il existe différentes

fonctions coût et différentes méthodes de résolution, la minimisation de la fonction se fait généralement par les algorithmes de Gauss-Newton ou de Levenberg-Marquardt (Avril et al. [20]).

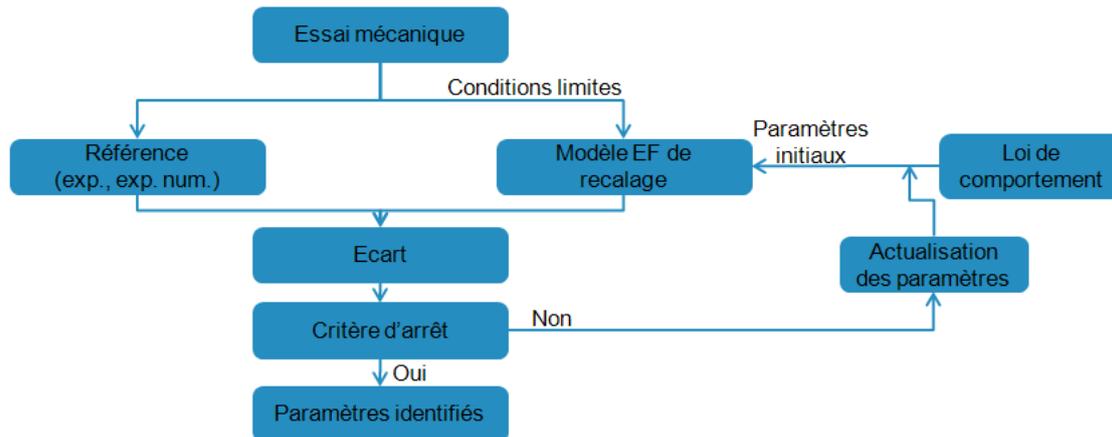


FIGURE 4.5 – Principe de la méthode d'identification FEMU

Grâce notamment à l'utilisation des éléments finis, cette méthode est flexible et peut être utilisée avec un nombre limité de données (elle n'est d'ailleurs pas restreinte aux mesures de champs). Elle est ainsi largement applicable à des pièces de géométrie et chargement complexes. De nombreux travaux ont été réalisés pour identifier les paramètres élastiques ou élasto-plastique de matériaux isotropes (Avril and Pierron [21], Claire et al. [58, 59], Crouzeix [65], Fazzini [76], Pannier [157]), les paramètres élastiques de matériaux orthotropes (Leclerc et al. [127], Lecompte et al. [129], Molimard et al. [147], Rikards et al. [175], Vautrin et al. [193]). Elle a également été employée dans des cas de comportements non-linéaires tels que l'endommagement (Geers et al. [84]), l'élasto-plasticité (Cooreman [63], Fazzini [76], Fazzini et al. [77]) ou la viscoplasticité (Le-Magorou et al. [126]). On notera que les calculs itératifs peuvent néanmoins conduire dans certains cas à des temps de calcul importants et qu'il convient de vérifier la stabilité/unicité de la solution par rapport aux valeurs initiales.

Erreur en relation de comportement (CEGM) La méthode de l'erreur en relation de comportement (*Constitutive Equation Gap Method*) repose sur une fonctionnelle coût construite à partir des principes variationnels de la théorie de l'élasticité (Bonnet and

Pagano [42], Latourte [123], Latourte et al. [124]). L'objectif est de minimiser une erreur en relation de comportement entre le déplacement u mesuré et la contrainte σ sur le volume Ω , dont l'expression est basée sur l'écriture de la somme des énergies potentielles et complémentaires :

$$E(u, \sigma, C) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (\sigma - C : \epsilon(u)) : C^{-1} : (\sigma - C : \epsilon(u)) dv \quad (4.10)$$

avec C le tenseur d'élasticité recherché. D'après les principes variationnels, cette erreur E est positive pour tout champ de déplacement u cinématiquement admissible et tenseur de contraintes σ statiquement admissible et nulle pour un problème de mécanique des solides bien posé. Dans la pratique, avec des champs mesurés, cette minimisation peut être partielle (Bonnet and Pagano [42]).

Cette technique, qui peut également fonctionner avec un nombre limité de mesures, a été mise en place pour l'identification de comportements élastiques linéaires ou non ainsi que de comportements élastoplastiques (Bonnet et al. [41], Geymonat et al. [87], Latourte [123], Merzouki et al. [142]).

Écart à la réciprocité (RGM) La méthode d'écart à la réciprocité (*Reciprocity Gap Method*) consiste à minimiser une fonctionnelle coût définie à partir du Principe des Puissances Virtuelles (PPV) ou à partir du théorème de Maxwell-Betti (Andrieux et al. [16], Andrieux and Constantinescu [17], Bonnet et al. [41]). L'idée est alors d'écrire ce principe entre deux états, l'un issu de la mesure u (ϵ, σ, C) et l'autre adjoint u^* (ϵ^*, u^*, C^*) :

$$\int_{\Omega} \epsilon^* : [C^* - C] : \epsilon dV = \int_{\partial\Omega} (T^* \cdot u - T \cdot u^*) dS \quad (4.11)$$

avec T le vecteur contrainte sur la frontière extérieure $\partial\Omega$ au domaine. Cette méthode ne requiert ainsi que des données de bord (supposées connues dans le problème posé).

Concernant les applications, la méthode de l'écart à la réciprocité est principalement utilisée pour l'identification de fissures (Andrieux et al. [16], Andrieux and Constantinescu [17], Bonnet et al. [41]) et de champs de modules élastiques ou de rigidités de flexion hétérogènes. Il convient de souligner qu'il n'y a pas à l'heure actuelle de mise en oeuvre de cette démarche à partir de données expérimentales.

4.3.2 Méthodes non itératives

Méthode des champs virtuels (VFM) Introduite par Grediac [91], la méthode des champs virtuels (*Virtual Fields Method*) repose sur l'écriture de l'équilibre global de l'éprouvette testée avec le Principe des Travaux Virtuels (PTV). En l'absence de forces volumiques extérieures et pour un chargement surfacique T sur la surface extérieure $\partial\Omega$ d'un volume Ω , ce principe s'écrit :

$$\int_{\Omega} \sigma : \varepsilon^* d\Omega = \int_{\partial\Omega} T \cdot u^* dS \quad (4.12)$$

pour tout champ de déplacement virtuel cinématiquement admissible u^* (ε^* la déformation associée, Grediac [94], Grediac et al. [95, 98, 99], Meraghni et al. [141], Pannier [157]).

Le principe de la méthode est de construire un ensemble d'équations en introduisant plusieurs champs virtuels judicieusement choisis de manière à faire apparaître les paramètres de la loi de comportement $\sigma = f(\epsilon)$ (Grediac [91], Grediac et al. [95], Pannier [157]). Une procédure a été proposée par Grediac et al. [99] pour générer ces champs virtuels spéciaux dont le choix (nombre et type) dépend de la loi de comportement à déterminer et va conditionner le degré d'indépendance des équations du système développé. En particulier, s'il y a au moins autant de champs virtuels spéciaux que de paramètres à déterminer et si ces paramètres sont écrits sous forme polynomiale, le système d'équations sera linéaire et les inconnues seront déterminées directement après inversion du système.

La méthode des champs virtuels permet d'identifier des paramètres de lois de comportement de matériaux à partir de champs cinématiques hétérogènes. Elle a été appliquée à l'identification de rigidités de flexion de plaque en statique (Grediac and Vautrin [100], Grediac [92]) et en dynamique (Grediac and Paris [96], Guo [103]). Elle a également permis l'identification dans le plan de propriétés élastiques de matériaux (Pierron et al. [166]). Son emploi reste cependant assez rare pour les comportements non linéaires (Grediac and Pierron [97]) et la construction des champs virtuels spéciaux peut s'avé-

rer très délicate dans des cas plus complexes (matériau anisotrope, géométrie complexe, chargement multiaxial).

Méthode de l'écart à l'équilibre (EGM) L'objectif de la méthode de l'écart à l'équilibre (*Equilibrium Gap Method*) est de déterminer un champ de propriétés mécaniques satisfaisant, pour un champ de déplacement donné, à l'équilibre interne ($div(\sigma) = 0$) de la structure (Amiot et al. [15], Claire et al. [58, 59], Crouzeix [65]). La discrétisation des équations d'équilibre, écrites sous une forme faible (entre des éléments adjacents pour une discrétisation éléments finis), conduit à un système d'équations linéaires dont les données sont les champs de déplacement mesurés et les inconnues les champs de modules élastiques. Les résultats de cette méthode sont des cartographies de propriétés mécaniques.

En pratique, la technique de l'écart à l'équilibre consiste à minimiser les résidus d'efforts nodaux associés aux contrastes de propriétés élastiques entre éléments voisins (Amiot et al. [15], Perie et al. [164, 163]) :

$$\{f_{res}\} = [K(\{d\})] \{u_{mes}\} - \{f_{vol}\} \quad (4.13)$$

avec $\{f_{res}\}$ le vecteur des résidus d'efforts nodaux associés au champ de déplacement mesuré $\{u_{mes}\}$, $\{d\}$ le champ d'endommagement à déterminer, $[K(\{d\})]$ la matrice de rigidité et $\{f_{vol}\}$ les forces nodales liées au chargement extérieur. Cette méthodologie a par exemple été mise en place pour l'identification de modules de cisaillement d'un composite orthotrope hétérogène (essai sur éprouvette biaxiale) (Crouzeix [65]).

Une des grandes limites de cette méthode est liée au maillage sur lequel s'applique la discrétisation de la formulation qui doit être basé directement sur les points de mesure. Cela ne permet pas l'étude de géométries complexes et justifie le recours généralement à des champs simulés (tests virtuels) comme champs mesurés (Claire et al. [58, 59], Crouzeix [65], Perie et al. [163, 164], Roux and Hild [178]).

4.4 Méthodologie d'identification multi-zones

Comme cela a été évoqué précédemment, la méthode FEMU a été implémentée au sein du laboratoire en lien avec le développement des méthodes optiques de mesures de champs cinématiques. Cette démarche d'identification a ainsi été mise en application sur le cas d'un alliage d'aluminium élastoplastique isotrope à partir de mesures expérimentales réalisées par stéréo-corrélation d'images. On pourra trouver des informations détaillées à ce sujet dans la thèse de Fazzini [76].

Vis-à-vis des objectifs liés à ce travail, nous nous sommes donc naturellement appuyés sur le savoir-faire et une partie des développements internes dans ce domaine. La technique d'identification FEMU a en particulier été privilégiée, et ce d'autant plus que le contexte de multi-zones limite une grande partie des autres méthodes d'identification. Si la méthode des champs virtuels a été récemment appliquée au cas d'une plaque composite endommagée (Kim et al. [117]), un certain nombre de problèmes de stabilité se posent encore vis-à-vis du choix des fonctions polynomiales introduites dans la formulation (Vautrin et al. [193]). Le logiciel de calcul par éléments finis employé est quant à lui Abaqus (Simulia [182]).

L'enjeu de ce chapitre est donc de présenter la démarche d'identification permettant d'identifier la variation spatiale des propriétés élastiques macroscopiques d'une structure composite. Précisément, le problème considéré ici fait le lien avec le premier axe de la thèse dédié au CND au travers de l'étude d'une pièce comportant deux zones :

- l'une "saine" constituant majoritairement la structure,
- l'autre "dégradée" représentant un défaut interne localisé (figure 4.6).

Les données d'entrée de ce problème sont les champs cinématiques induits sur cette pièce lors d'un chargement mécanique, qui présentent une hétérogénéité macroscopique spécifiquement induite par la présence du défaut. A partir de ces informations, la méthodologie d'identification vise alors à :

- délimiter spatialement les deux zones,
- déterminer pour chacune d'entre elles les propriétés élastiques effectives du matériau.



FIGURE 4.6 – Problème considéré

A l’instar de Vautrin et al. [193], la stratégie employée pour résoudre cette problématique repose sur une analyse globale puis locale qui s’articule autour des grandes étapes suivantes (figure 4.7) :

1. Identification globale des paramètres élastiques du matériau sain (macroscopiquement homogène) sur une éprouvette étalon,
2. Analyse des écarts entre la référence et le modèle EF de recalage constitué d’un matériau macroscopiquement homogène et sain puis localisation de la zone dégradée par seuillage au niveau des écarts significatifs,
3. Intégration de la zone dégradée dans le modèle EF de recalage (matériau macroscopiquement hétérogène comportant deux zones de propriétés distinctes),
4. Identification locale des paramètres élastiques de la zone dégradée.

La démarche proposée ici se distingue cependant des travaux de Vautrin et al. [193] par l’étude d’une structure hétérogène pleine (ce qui rend l’identification globalement plus difficile, voir Molimard et al. [146, 147]), dont la zone dégradée est constituée d’un matériau de même classe (d’où un contraste de propriétés plus faible) et orthotrope.

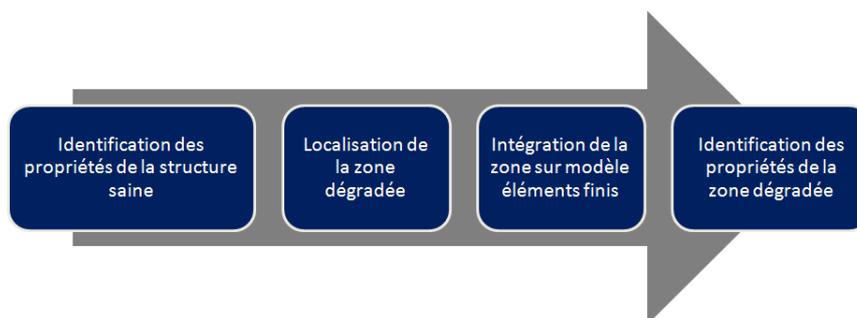


FIGURE 4.7 – Stratégie d’identification multi-zones

Précisément, le cas industriel faisant l'objet de cette étude concerne un composite stratifié monolithique en tissu carbone Hexcel HexForce[®] G0926 associés à la résine RTM6 possédant la séquence d'empilement $[45^\circ/0^\circ/45^\circ]_2$. La présence d'un défaut dans cette structure saine est prise en compte au travers d'une singularité géométrique, à savoir un trou à fond plat de 6 mm de diamètre situé en face arrière de cette plaque et faisant 3 plis d'épaisseur. La procédure de recalage concerne une zone d'intérêt carrée située autour du trou (voir à la figure 4.8-a) et porte sur les données de champs cinématiques obtenus en face avant qui intègrent de manière continue (la face avant étant plane) l'existence de ce défaut. Notons que la taille du défaut considéré a été dictée par les exigences aéronautiques ; sa profondeur a quant à elle été choisie de manière à obtenir une hétérogénéité suffisamment significative macroscopiquement sur les déplacements de la face avant tout en conservant le type de symétrie matérielle du matériau sain (notamment les axes principaux) au niveau de la zone du défaut.

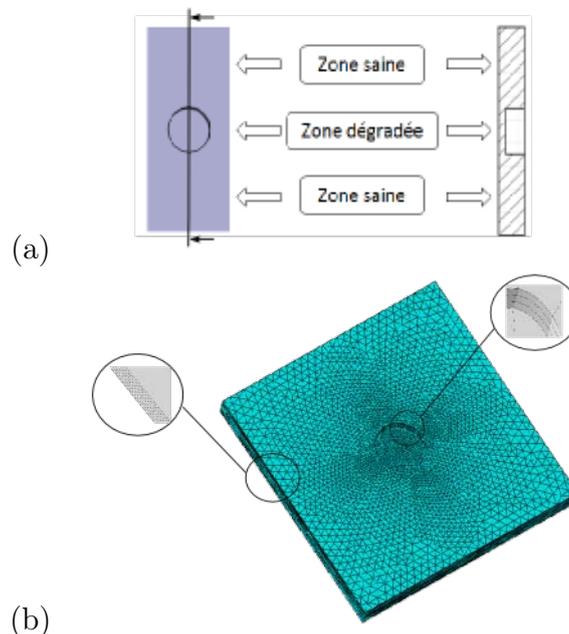


FIGURE 4.8 – Structure multi-zones de référence au niveau de la zone d'intérêt : (a) principe, (b) modèle “expérimental numérique” associé (vue de la face arrière, les zooms montrent les différents plis de chaque zone)

Comme cela a été évoqué précédemment, la méthodologie classique par FEMU se base sur des résultats expérimentaux pour constituer la référence de l'identification. Dans ce

travail, nous avons adopté une démarche progressive afin de s'extraire en première approche d'un certain nombre de difficultés liées aux bruits de mesures et aux discontinuités locales des champs expérimentaux. Ainsi, la *référence* consiste ici en un jeu de données simulées numériquement (modèle "expérimental numérique"), ce qui permet de construire entièrement la procédure d'identification multi-zones. Afin de s'approcher au plus près de la réalité du comportement du composite étudié, la référence sera établie à l'aide d'une modélisation par éléments finis qui tient compte de l'empilement des différents plis (propriétés et orientation, figure 4.8-b).

L'ensemble de la démarche étant posée, on se propose à présent de détailler les différentes étapes de sa mise en place.

4.5 Identification des propriétés d'un matériau orthotrope plan

On s'intéresse dans cette partie à l'identification des propriétés d'un matériau macroscopiquement homogène élastique et anisotrope (étape 1 de la stratégie décrite à la figure 4.7). Précisément, il correspond dans le problème étudié au composite stratifié G0926/RTM6 sain (sans défaut) qui présente une symétrie matérielle de type orthotropie plane.

En règle générale, cette élasticité anisotrope est décrite par quatre paramètres élastiques plans ainsi que par l'orientation des axes d'orthotropie. Le tissu de carbone utilisé dans le cas d'étude est parfaitement équilibré et les orientations des plis considérées pour le stratifié (matériau FUSCOMP et autres validations) sont par la suite exclusivement 0° , $\pm 45^\circ$ et 90° ; le repère principal d'orthotropie $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$ correspond alors au repère de calcul $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ (ces deux bases étant orthonormées directes, figure 4.9). L'identification revient donc à déterminer les quatre coefficients élastiques plans suivants (la direction $\mathbf{z} = \mathbf{e}_3$ étant perpendiculaire à la surface du stratifié) :

- les modules d'Young E_1 et E_2 , associés respectivement aux directions de vecteur unitaire \mathbf{e}_1 et \mathbf{e}_2 ,
- le coefficient de Poisson ν_{12} , associé au couple de directions $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$,
- le module de cisaillement G_{12} , associé au couple de directions $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$.

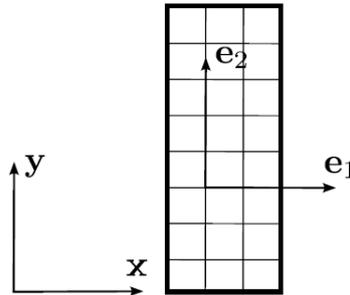


FIGURE 4.9 – Orientation de la symétrie matérielle du matériau orthotrope

4.5.1 Modèles de référence et de recalage

L'identification des quatre paramètres précités requiert la génération d'un champ de contraintes hétérogènes. Selon (Molimard et al. [146,147]), l'utilisation des champs cinématiques induits sur la surface d'une éprouvette munie d'un trou débouchant lors d'un essai de traction uniaxiale permet l'obtention de ces propriétés. Dans le cas présent, les axes principaux dans le plan de l'éprouvette de traction correspondent à $(\mathbf{x} = \mathbf{e}_1, \mathbf{y} = \mathbf{e}_2)$ et l'essai est réalisé selon l'axe $\mathbf{y} = \mathbf{e}_2$ (figure 4.9).

La structure de référence considérée pour cette première étape est ainsi une éprouvette de traction trouée en son centre, dont on décrit chaque pli à l'aide d'une modélisation 3D solide stratifié dans Abaqus. La procédure d'identification est illustrée par la suite sur plusieurs cas de matériaux composites basés sur l'emploi du même tissu carbone Hexcel HexForce® G0926 mais qui se distinguent vis-à-vis de l'orientation de leurs plis :

- le composite FUSCOMP à 6 plis, d'empilement $[45^\circ/0^\circ/45^\circ]_2$,
- un composite noté COMP-A à 4 plis, d'empilement $[0^\circ/90^\circ]_s$,
- un composite noté COMP-B à 4 plis, d'empilement $[45^\circ/-45^\circ]_s$.

Pour chaque pli i de ces structures, les données à préciser sont donc :

- son orientation définie par l'angle $\theta_i = (\mathbf{x}, \mathbf{x}'_i)$ entre le repère de calcul $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ et le repère principal du tissu $(\mathbf{x}'_i, \mathbf{y}'_i, \mathbf{z})$ (cette base est également orthonormée directe),
- les propriétés principales planes du tissu : les modules d'Young E'_1 et E'_2 ($E'_1 = E'_2$ puisque le tissu est équilibré), le coefficient de Poisson ν'_{12} et le module de cisaillement G'_{12} (tableau 4.2).

Pour tous ces matériaux, chaque pli est discrétisé dans l'épaisseur en cinq éléments finis de façon à s'approcher au mieux du comportement réel du composite et notamment assurer la continuité des contraintes de cisaillement transverse aux interfaces entre les plis (figure 4.6-a). Les éléments finis utilisés sont des tétraèdres C3D4 et le modèle comporte en tout

470219 éléments soit 1880876 noeuds dont 2399 noeuds sur la surface de la zone d'intérêt.

Propriétés élastiques principales du pli	
modules d'Young	$E'_1 = E'_2 = 64000 \text{ MPa}$
coefficient de Poisson	$\nu'_{12} = 0.05$
module de cisaillement	$G'_{12} = 4500 \text{ MPa}$

TABLE 4.2 – Propriétés planes du tissu Hexcel HexForce[®] G0926 dans ses axes principaux

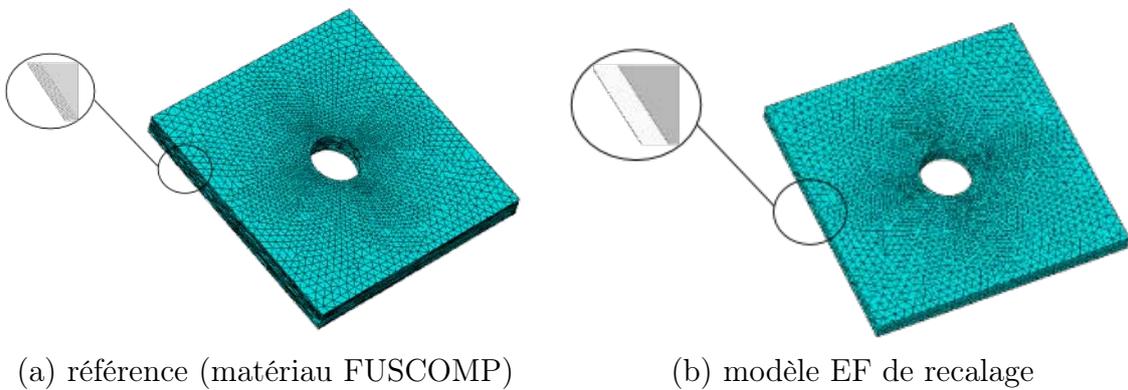


FIGURE 4.10 – Identification des propriétés orthotropes - Zone d'intérêt

Le modèle EF de recalage sert quant à lui à identifier les propriétés macroscopiques du matériau. Il est également troué en son centre mais construit à l'aide d'une modélisation 3D solide classique, c'est-à-dire homogène dans l'épaisseur (figure 4.6-b). Deux éléments finis ont également été placés dans l'épaisseur pour assurer la stabilité numérique du calcul. Les éléments finis utilisés sont des tétraèdres C3D4 et le modèle comporte 168891 éléments soit 675564 noeuds dont 2400 noeuds sur la surface de la zone d'intérêt.

Il est enfin important de signaler deux points importants de la démarche proposée :

- d'une part, les maillages utilisés pour chacun des deux modèles (référence "expérimental numérique" et recalage) sont différents ; la plus grande généralité a été conservée à ce niveau afin de préparer d'ores et déjà l'extension à une référence véritablement expérimentale ;
- l'identification a été réalisée ici sur une zone d'intérêt comportant près de 2400 points (voir figure 4.6), soit en d'autres termes en comparant les déplacements de 2400 noeuds en surface du modèle EF de recalage avec leurs homologues de la référence (voir bloc « PtVoisin » ci-après) ; par rapport à l'algorithme utilisé par Fazzini [76], le nombre de points d'analyse a ainsi été fortement augmenté.

4.5.2 Description du fonctionnement de l'algorithme d'identification

Le script du programme d'identification, lancé à partir du logiciel Abaqus et réalisé en langage Python, comporte douze blocs fonctions subdivisés en deux familles de programme :

- le programme principal « FonctionnelleCout » qui fait appel à l'ensemble des autres modules,
- les onze autres programmes subordonnés au module principal (figure 4.11).

Outre les fonctions classiques d'une procédure d'identification FEMU, ce programme comporte un ensemble d'actions spécifiques permettant la comparaison des différents maillages (de la référence et du modèle EF de recalage).

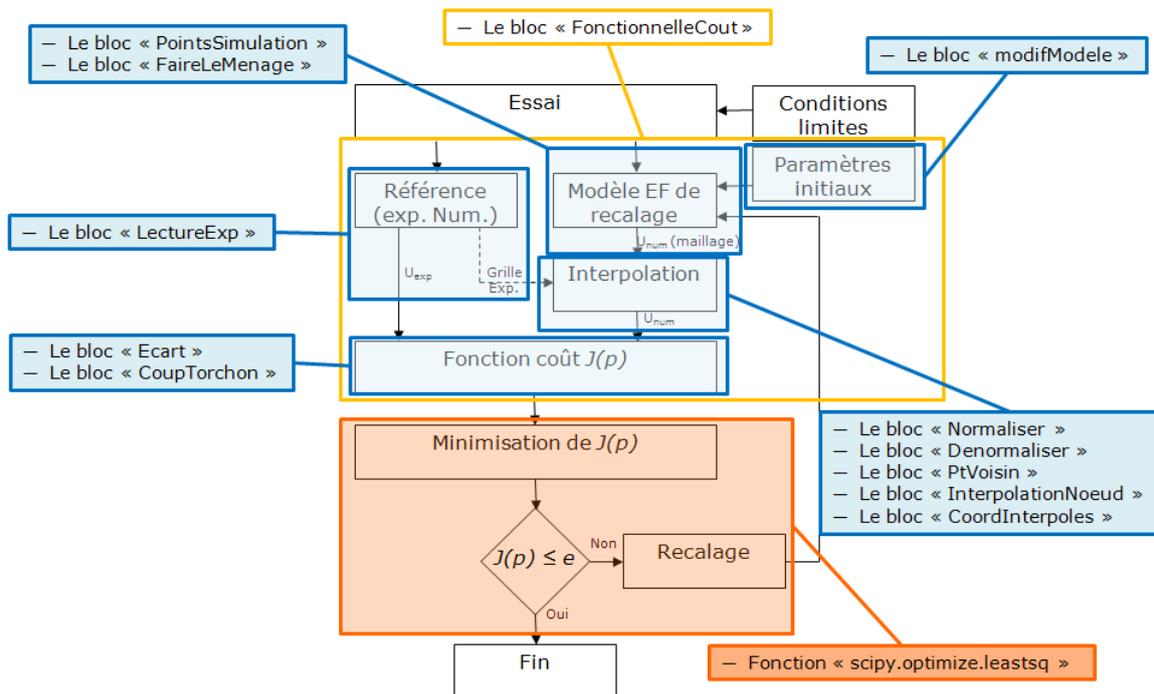


FIGURE 4.11 – Schéma de fonctionnement de l'algorithme d'identification

4.5.2.1 Programme principal « FonctionnelleCout »

Le programme principal est employé à chaque itération par la fonction « `scipy.optimize.leastsq` » qui est un algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt disponible

dans la librairie Python. Cette partie du programme régit ensuite l'enchaînement des onze autres modules : elle fait appel à eux pour leur fonction individuelle et récupère dans une variable la modification apportée. Le module « FonctionnelleCout » renvoie la fonction coût nécessaire à l'algorithme d'optimisation. Dans le cas présent, la fonction coût est définie par :

$$J(p) = \sqrt{\sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left((u_{ij}^{num}(p) - u_{ij}^{exp})^2 \right)} \quad (4.14)$$

où p est le vecteur des valeurs des paramètres. Le couple $(i; j)$ correspond aux coordonnées suivant x et y et le paramètre k indique le step.

4.5.2.2 Programme subordonnés

Bloc « modifModele » Ce premier bloc permet de modifier directement les paramètres de la loi de comportement d'un matériau dans le fichier modèle EF qui est utilisé à chaque itération. Dans notre cas, ce bloc actualise donc les modules d'Young E_1 et E_2 , le coefficient de Poisson ν_{12} et le module de cisaillement G_{12} .

Blocs « PointsSimulation » et « LectureExp » Le premier bloc récupère les coordonnées dans le repère $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ des points du maillage du modèle EF de recalage pour chaque pas de calcul, le second réalisant une opération similaire sur l'objet référence. Ces points sont extraits dans un tableau à n lignes et 6 colonnes, avec n le nombre de points du maillage : les trois premières colonnes représentent les coordonnées des points à l'état non déformé, les trois colonnes suivantes correspondant au cas déformé.

Blocs « Normaliser » et « Denormaliser » La fonction « Normaliser » permet de définir une variation des paramètres de la loi de comportement comprise entre +1 (borne haute) et -1 (borne basse) des paramètres. Cette normalisation permet un travail plus efficace de la fonction d'optimisation.

La fonction « Denormaliser » effectue bien entendu le travail inverse et fournit à la fin de chaque itération de calcul du programme d'identification, les valeurs des paramètres de la loi de comportement.

Bloc « FaireLeMenage » Cette fonction permet de supprimer les fichiers temporaires créés par le calcul éléments finis.

Les deux blocs suivants permettent d'appliquer le processus itératif d'identification sur les mêmes points physiques de la structure, bien que les maillages de référence et de recalage soient distincts.

Bloc « PtVoisin » Ce bloc calcule la distance entre un point du maillage de référence et un point du maillage numérique. Les trois points du maillage numérique les plus proches d'un point expérimental sont repérés. Notons que le maillage EF tétraédrique permet d'éviter les configurations d'alignements de points (amenant à des aires d'interpolation quasi nulles et à des divisions par zéro dans le calcul d'interpolation).

Bloc « InterpolationNoeud » Cette partie du programme permet, à l'aide d'une fonction d'interpolation, d'évaluer les coordonnées d'un point en fonction des trois points voisins trouvés dans le bloc précédent. Ces points sont situés sur le maillage non déformé et proches du point de la référence concerné. Après cette étape, une matrice de points identiques aux points de référence est obtenue possédant les coordonnées déformées du modèle numérique de recalage.

Bloc « CoordInterpoles » Cette fonction permet de préparer les trois variables matricielles nécessaires au calcul du point numérique créé par l'interpolation. Une des matrices correspond aux coordonnées d'un point de la référence à l'état initial, une autre aux coordonnées des trois points voisins du modèle EF de recalage à l'état initial et une troisième aux coordonnées des trois points voisins de ce dernier à l'état déformé.

Bloc « Ecart » Ce bloc calcule en chaque point le vecteur écart entre les points numériques interpolés et les points de référence.

Bloc « CoupTorchon » Cette fonction permet de supprimer tous les points aberrants liés à une erreur de la fonction d'interpolation.

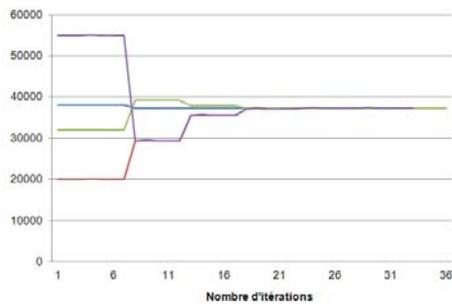
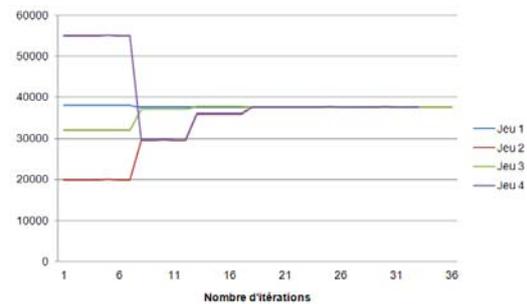
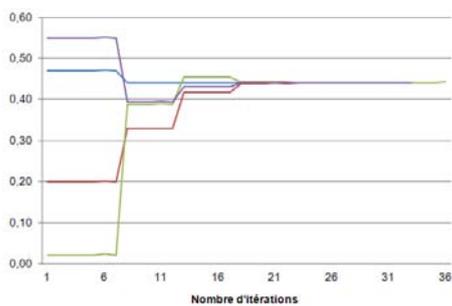
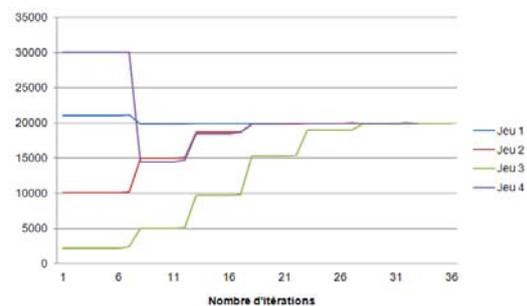
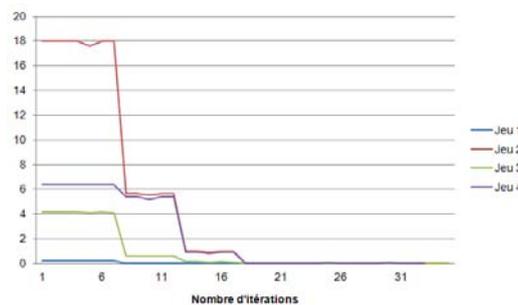
4.5.3 Résultats

Le tableau 4.3 indique les résultats issus de la procédure d'identification pour les trois matériaux orthotropes homogènes considérés. Les valeurs des paramètres issus de la théorie classique des stratifiés pour chaque empilement sont également précisés. Pour un temps de calcul CPU relativement court (environ 30 minutes avec processeur Intel Xeon E5410 2,33 GHz à 4 coeurs), on observe donc une bonne cohérence des résultats obtenus par recalage vis-à-vis de cette représentation.

	Module d'Young E_1 [MPa]	Module d'Young E_2 [MPa]	Coefficient de Poisson ν_{12}	Module de cisaillement G_{12} [MPa]
Matériau FUSCOMP	37224 (37849)	37653 (37849)	0.4406 (0.438)	19871 (21817)
Matériau COMP-A	63707 (64000)	64006 (64000)	0.0496 (0.050)	4494 (4500)
Matériau COMP-B	15885 (15878)	15877 (15878)	0.7647 (0.764)	30241 (30476)

TABLE 4.3 – Identification de matériaux orthotropes par procédure FEMU (le calcul de chaque paramètre selon la théorie classique des stratifiés est donné entre parenthèses)

Afin de démontrer la stabilité de la procédure développée, les évolutions des paramètres ainsi que de la fonction coût avec le nombre d'itérations sont indiquées pour le cas du matériau FUSCOMP (figure 4.12). Les différentes courbes se distinguent par les valeurs initiales employées pour les paramètres. Pour les quatre jeux de départ employés, on note une convergence assez rapide vers des valeurs quasi-identiques, une valeur de départ éloignée nécessitant bien entendu davantage d'itérations. Egalement, la fonction coût obtenue est dans tous les cas proche de zéro, ce qui démontre la bonne convergence de l'algorithme.

(a) Module d'Young E_1 [MPa](b) Module d'Young E_2 [MPa](c) Coefficient de poisson ν_{12} (d) Module de cisaillement G_{12} [MPa]

(e) Fonction coût

FIGURE 4.12 – Courbes de convergence du cas FUSCOMP

4.6 Identification des propriétés d'une zone dégradée

L'identification d'un matériau orthotrope macroscopiquement homogène étant réalisée, revenons à présent au problème multi-zones de départ (figure 4.6). A ce stade, les données considérées sont donc :

- la référence, constituée par le modèle "expérimental numérique" décrit à la figure 4.8, c'est-à-dire un composite (matériau FUSCOMP) comportant un trou à fond plat en face arrière,

- le modèle EF de recalage d'épaisseur constante (plein), dont on cherche à identifier les paramètres dans la zone dégradée pour se rapprocher au plus près des déplacements observés en face avant de la référence.

L'objectif de cette partie est donc de traiter les étapes 2 à 4 de la stratégie d'identification multi-zones décrite à la figure 4.7. La plus grande difficulté dans ce processus réside en l'étape 2 qui consiste en la localisation de la zone dégradée. Elle requiert en premier lieu la quantification d'une erreur pour distinguer le matériau sain du matériau dégradé puis la définition d'un seuil pour préciser sa position spatiale.

4.6.1 Création de la cartographie d'erreurs

Les propriétés du matériau sain étant connues (étape 1), on cherche à mettre en évidence l'écart entre celui-ci et le matériau dégradé. Pour cela, on compare pour des éprouvettes d'axes ($\mathbf{x} = \mathbf{e}_1, \mathbf{y} = \mathbf{e}_2$) soumises à un essai de traction simple d'axe $\mathbf{y} = \mathbf{e}_2$:

- la référence décrite ci-dessus,
- avec le modèle EF de recalage plein, auquel on affecte des propriétés macroscopiques homogènes (mono-zone) correspondant au matériau sain.

Compte tenu du défaut dans la structure de référence, il y aura par conséquent une différence de réponse entre les deux.

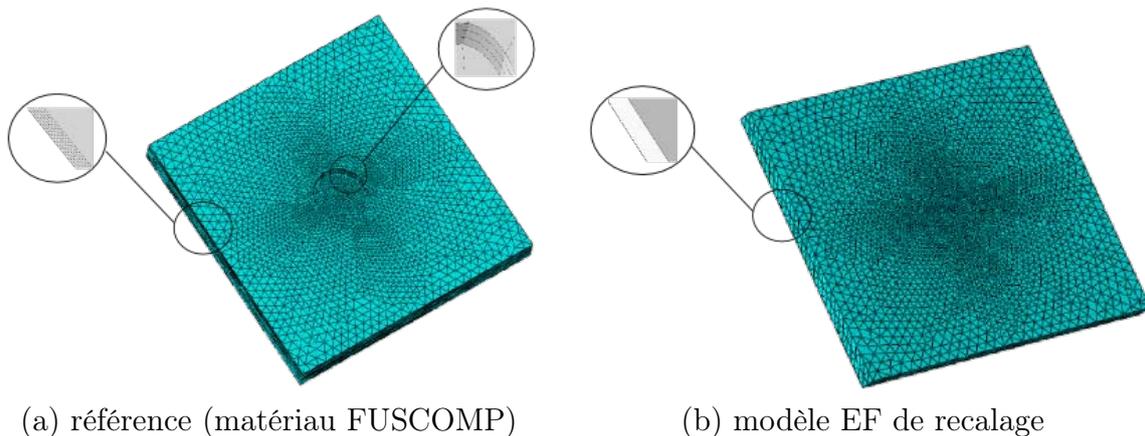


FIGURE 4.13 – Calcul d'erreur - Zone d'intérêt

A l'instar de la démarche pour matériaux orthotropes, la structure de référence intègre la stratification du composite FUSCOMP à l'aide d'une modélisation 3D solide stratifié dans Abaqus ; la différence porte uniquement sur la présence du trou à fond plat en face arrière (6 mm de diamètre, profondeur correspondant à trois plis, figure 4.13-a). Le

maillage présente également les mêmes spécificités (5 éléments dans l'épaisseur de chaque pli, éléments tétraédriques C3D4, 545221 éléments soit 2180884 noeuds dont 2800 noeuds en face avant de la zone d'intérêt).

Le modèle EF de recalage suit lui aussi les mêmes prérogatives qu'au paragraphe 4.5.1, avec une modélisation 3D solide mais cette fois d'épaisseur constante et continue (structure pleine). Son maillage est conforme au cas 4.5.1 (2 éléments dans l'épaisseur, éléments tétraédriques C3D4, 174860 éléments soit 699440 noeuds dont 2800 noeuds sur la surface de la zone d'intérêt). Les propriétés saines affectées au matériau qui le constitue sont celles identifiées dans la partie précédente pour le matériau FUSCOMP (tableau 4.3).

La comparaison des réponses fournies par la référence et le modèle EF de recalage lors de l'essai de traction est réalisée sur une zone d'intérêt comportant plus de 2800 points. Précisément, deux options sont a priori possibles quant à l'objet de cette comparaison :

- le champ de déplacements ε ,
- le champ de déformations U ,

Afin de guider ce choix, on présente à la figure 4.14, les évolutions des composantes de ces différents champs sur la face avant de la référence, selon une ligne traversant les zones saine et dégradée. On observe ainsi que les champs de déformation mettent beaucoup plus en évidence la singularité géométrique et offrent ainsi la réponse la plus représentative de la présence du défaut. Le calcul portera donc sur cette information. D'autre part, l'ensemble des composantes du tenseur de déformation étant affectées, il semble pertinent pour intégrer de manière globale tous ces phénomènes de recourir à la déformation équivalente au sens de Von Mises dans le calcul d'erreur :

$$\varepsilon_{\text{équi}} = \sqrt{\frac{5}{6}\varepsilon_{xx}^2 + \frac{5}{6}\varepsilon_{yy}^2 - \frac{4}{3}\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + 3\varepsilon_{xy}^2} \quad (4.15)$$

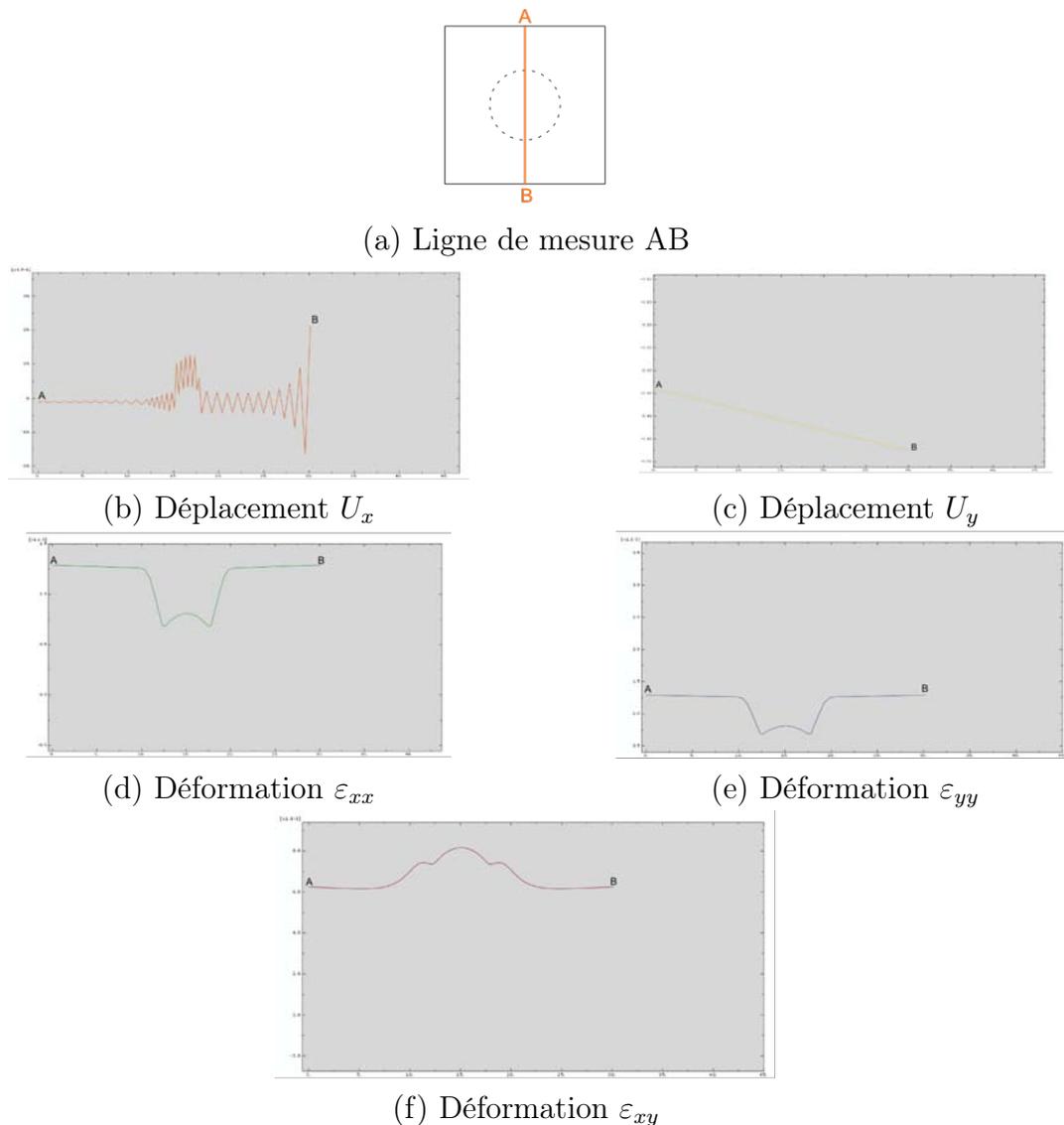


FIGURE 4.14 – Evolution des composantes (U_x, U_y) du champ de déplacement U et des composantes $(\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy})$ du champ de déformations ε dans la base (\mathbf{x}, \mathbf{y}) en face avant de la structure de référence le long d'une ligne AB traversant les zones saine et dégradée

Un algorithme spécifique en langage Python a ainsi été développé pour réaliser automatiquement la cartographie d'erreur entre le modèle de référence et le modèle EF de recalage supposé homogène et sain. Ses principales étapes sont les suivantes :

- extraction pour les deux structures, des coordonnées de chaque point de leur maillage ainsi que des trois composantes planes du champ de déformation $(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12})$ en celui-ci,
- calcul de la déformation équivalente au sens de Von Mises en chacun des points des deux structures,

- interpolation des points du maillage numérique sur celui de la structure de référence de façon à comparer les mêmes points géométriques de chacune des structures (voir paragraphe 4.5.2),
- calcul d'écart entre les deux modèles :

$$\text{écart} = \frac{\varepsilon_{\text{équi}}^{\text{ref}} - \varepsilon_{\text{équi}}^{\text{modèle EF}}}{\varepsilon_{\text{équi}}^{\text{ref}}} \quad (4.16)$$

La figure 4.15 illustre une cartographie d'erreur obtenue selon cette démarche. Notons qu'elle est réalisée en 256 niveaux de gris de façon à faciliter les traitements d'images par la suite.

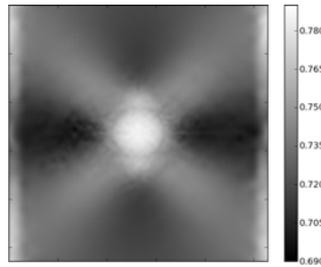


FIGURE 4.15 – Cartographie d'erreur en déformation (référence vs matériau monozone sain)

4.6.2 Estimation de la taille de la zone dégradée

A partir de la carte d'erreur, on trace les profils de niveaux de gris obtenus selon deux coupes correspondant aux directions principales du problème (figure 4.16), le long de la direction axiale de traction ($x = 0$) et le long de la direction transversale ($y = 0$); ce traitement d'image est du même type que celui utilisé dans le chapitre 3 pour l'analyse CND des défauts.

On définit les hauteurs réelles h des profils entre le point haut de la courbe déterminé automatiquement et la valeur basse identifiée manuellement. Reste à définir le seuil qui permet d'estimer la taille de la zone dégradée. Plusieurs choix sont possibles, point d'inflexion, mi-hauteur, ... il a été décidé dans une première approche de se baser sur le seuil représentatif du diamètre du défaut. Une zone affectée par le défaut de propriétés moyennes entre la zone saine et la zone dégradée n'a pas été prise en compte dans cette

première approche. Les seuils identifiés correspondant au défaut de 6 mm de diamètre dans l'éprouvette sont représentés en pointillés rouges sur les figures 4.16-b et c. Sur la coupe 4.16-c, le seuil établi par rapport à la taille réelle du défaut représente ainsi 67% de la hauteur réelle du profil alors que sur la coupe 4.16-b, il correspond à 73%. La mesure d'erreur étant effectuée sur l'état déformé de la pièce, cet effet est induit par la traction effectuée selon l'axe y qui a tendance à accentuer l'ovalisation du trou à fond plat dans ce sens.

De manière à simplifier la démarche de localisation et de dimensionnement du défaut, un niveau médian entre les deux états est alors considéré qui correspond à 70% de la hauteur de chacune des coupes (en pointillés verts sur les figures 4.16-b et c). Ceci permet d'obtenir les coordonnées de quatre points (E, F sur la coupe $x = 0$; G et H sur la coupe $y = 0$) par lesquels passent simultanément les deux profils. La forme du défaut étant approximée par des fonctions polynomiales, l'obtention de ces quatre points permet donc à ce stade d'établir la disposition spatiale de la zone dégradée dans la pièce (figure 4.17).

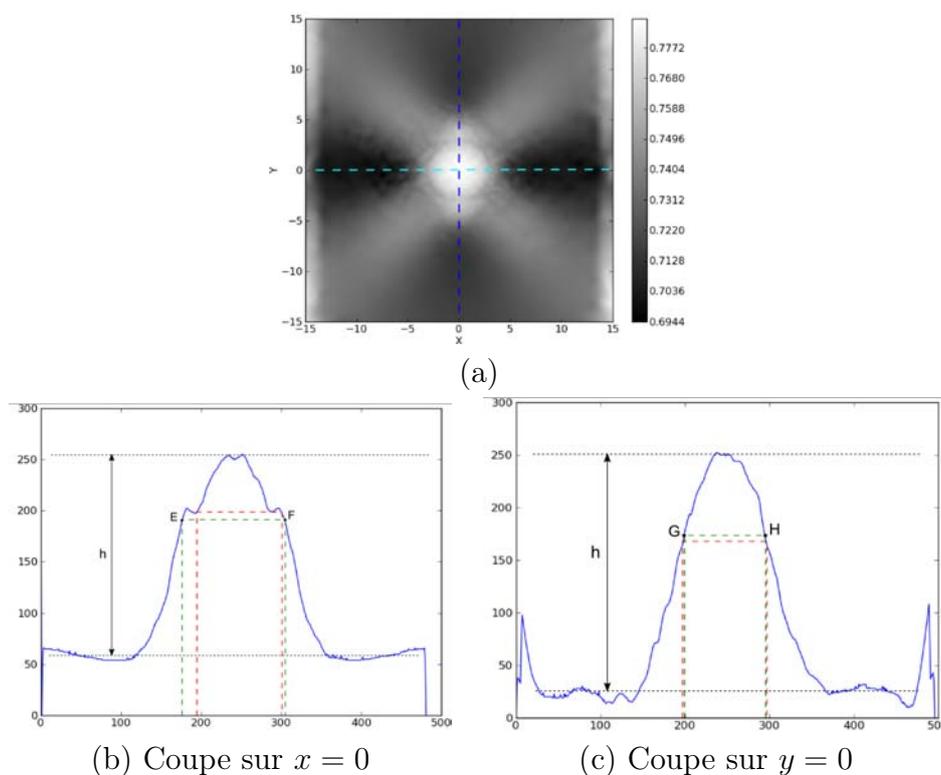


FIGURE 4.16 – Identification de la taille de la zone dégradée : (a) coupes réalisées sur la carte d'erreur, (b) et (c) : évolution des niveaux de gris et définition des seuils

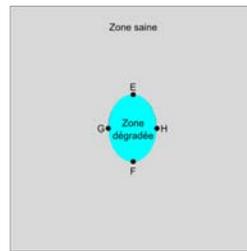


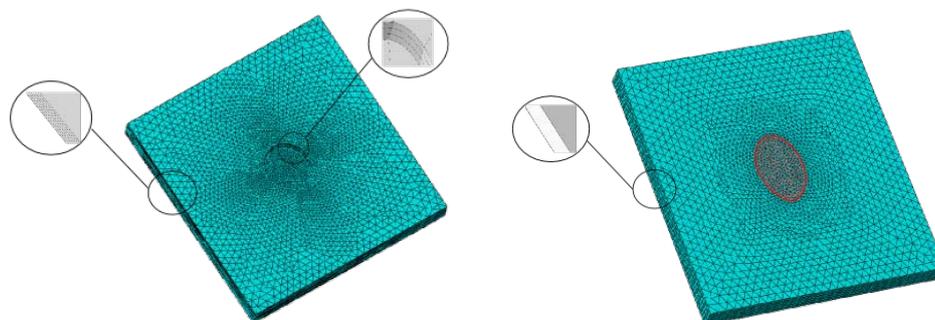
FIGURE 4.17 – Intégration de la zone dégradée

4.6.3 Identification des propriétés de la zone dégradée

Dans cette dernière étape, la structure de référence est la même qu’au paragraphe 4.6.1 mais il convient de modifier le modèle EF de recalage de sorte que (figure 4.18) :

- deux zones de propriétés distinctes soient déclarées selon la position spatiale issue de l’étude précédente (figure 4.17),
- les propriétés identifiées pour le matériau FUSCOMP (tableau 4.3) soient affectées à la zone saine,
- les propriétés à identifier (quatre paramètres apparents plans élastiques orthotropes) soient celles de la zone dégradée.

Les paramètres de ce nouveau modèle numérique sont analogues aux études précédentes (modèle 3D solide comportant deux matériaux, éléments tétraédriques C3D4, 178562 éléments soit 714248 noeuds dont un peu plus que 2800 noeuds en surface de la zone d’intérêt). Notons simplement que la zone dégradée comporte 400 points alors que la zone saine en comprend 2400. La comparaison des réponses fournies par la référence et le modèle EF de recalage lors de l’essai de traction est donc réalisée sur une zone d’intérêt comportant plus de 2800 points.



(a) référence (matériau FUSCOMP) (b) modèle EF de recalage

FIGURE 4.18 – Identification des propriétés dégradées - Zone d’intérêt

Deux jeux de départ, extrêmes, ont été employés pour l'identification de la zone dégradée :

- jeu 1 : les valeurs du matériau FUSCOMP sain (tableau 4.3),
- jeu 2 : les valeurs des paramètres calculées par la théorie classique des stratifiés pour un empilement $[45^\circ/0^\circ/45^\circ]$ (tableau 4.4).

Compte tenu du type de défaut considéré (trou à fond plat), les valeurs d'identification de la zone dégradée devraient naturellement s'approcher de celles obtenues par la théorie des stratifiés pour les 3 plis. A la différence de l'erreur entre la référence et le modèle EF où les propriétés de la zone dégradée correspondent au premier jeu de départ (figure 4.15), l'erreur entre la référence et le modèle EF avec le second jeu comme propriétés pour la zone dégradée est bien quasi nulle sur l'essentiel de la zone d'intérêt (figure 4.19). Les paramètres issus de la théorie des stratifiés constituent donc bien des valeurs cohérentes pour le résultat de ce calcul.

Module d'Young E_1 [MPa]	Module d'Young E_2 [MPa]	Coefficient de Poisson ν_{12}	Module de cisaillement G_{12} [MPa]
18925	18925	0.438	10909

TABLE 4.4 – Théorie des stratifiés : empilement $[45^\circ/0^\circ/45^\circ]$

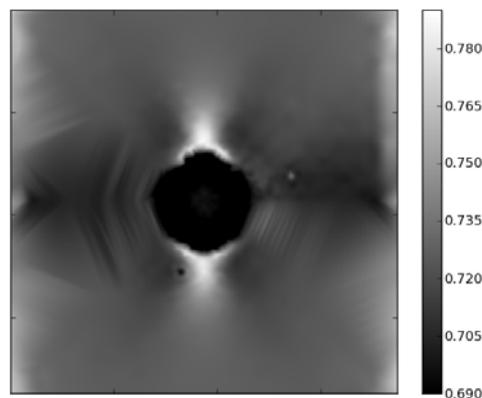


FIGURE 4.19 – Cartographie d'erreur en déformation (référence vs structure multizones basée sur la théorie de stratifiés)

Néanmoins, l'évolution des valeurs des différents paramètres identifiés en fonction du nombre d'itérations démontre la non convergence de la réponse d'identification selon le jeu de paramètres de départ choisi (figure 4.20). Avec le jeu 1, les paramètres restent en général stables, alors qu'ils évoluent avec le jeu 2 ; dans le même temps, les valeurs des fonctions coût respectives sont faibles.

Ces constats nous incitent à penser à plusieurs origines potentielles pour ces problèmes. Compte tenu des discontinuités de matière et de contraintes induites par le trou à fond plat dans la référence, il est certain tout d'abord qu'une représentation bi-zone telle que supposée à la figure 4.8-a constitue une simplification forte qui perturbe sans doute l'identification paramétrique. Celle-ci prend en compte en effet tous les points de la zone d'intérêt de manière identique qu'ils soient dans la zone saine, dans la zone centrale de la zone dégradée et dans la zone de transition entre les deux. Cela rend donc la procédure de minimisation et de convergence plus difficile. Par ailleurs, les soucis de localisation du défaut évoqués précédemment accentuent d'autant plus ce phénomène. Une des solutions envisagées viserait à sélectionner des points "représentatifs" des propriétés recherchées, soit parmi la zone centrale de la zone dégradée (la figure 4.19 confirme bien l'adéquation des paramètres issus de la théorie des stratifiés dans ce secteur).

Un autre point important concerne la sollicitation appliquée à l'éprouvette. En lien avec le reste du travail, nous avons considéré dans cette dernière partie un essai de traction uniaxiale. Si ce chargement permet en effet de solliciter tous les modules élastiques plans d'une éprouvette trouée (Molimard et al. [146, 147]), il n'est pas forcément le plus adapté à l'identification d'une éprouvette pleine. Dès lors, pour ce cas macroscopiquement hétérogène, il serait peut-être préférable d'envisager une (ou plusieurs) sollicitation(s) de traction bi-axiale qui permettrait de véritablement mettre en oeuvre différents modes de déformation (voir par exemple Lecompte et al. [129]).

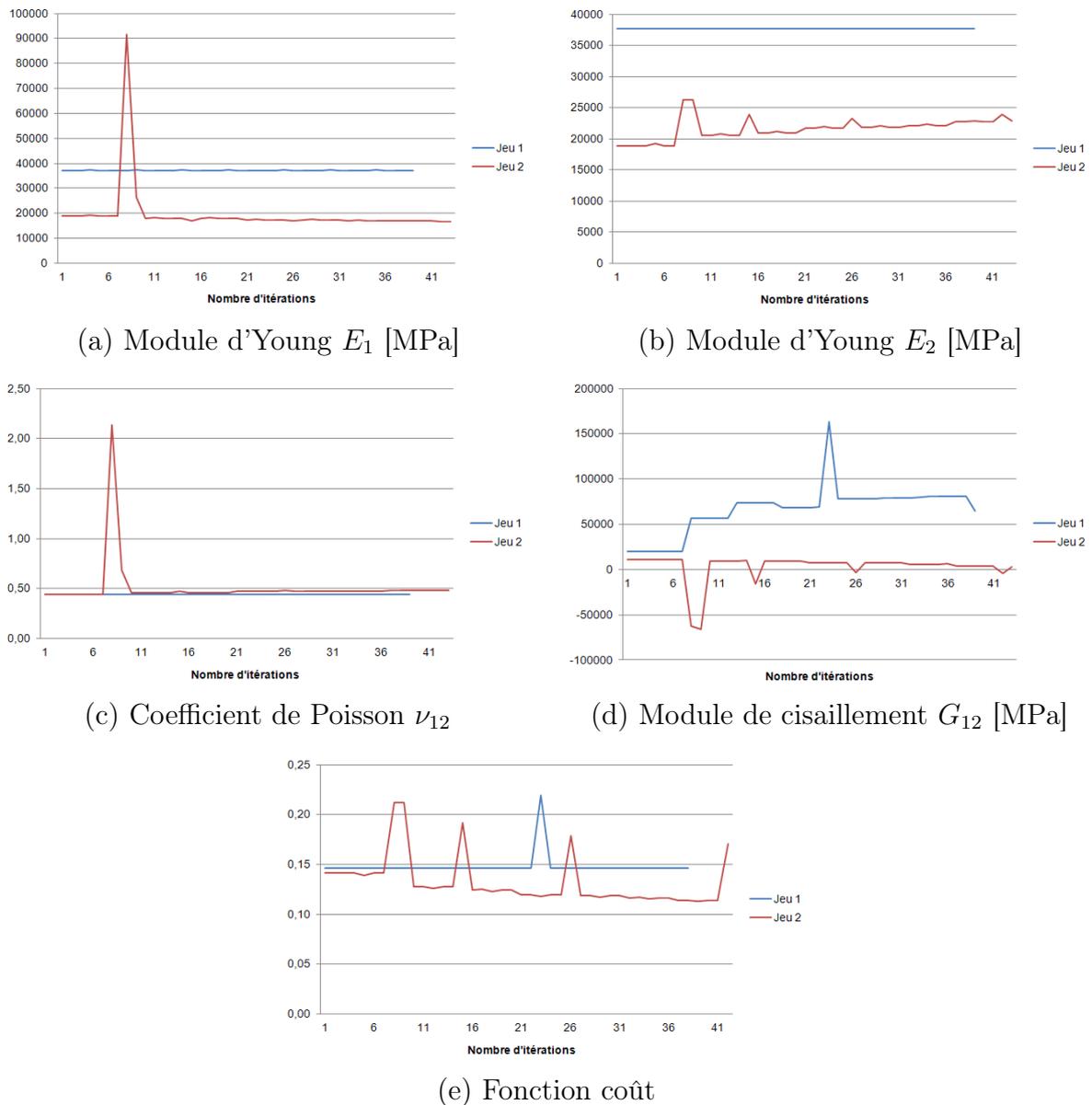


FIGURE 4.20 – Courbes de convergence de l'identification multi-zone

4.7 Conclusion

Au travers ce chapitre, une procédure d'identification paramétrique FEMU sur structure composite orthotrope multi-zones a été mise en place. Un certain nombre d'aspects importants ont pu être validés, notamment :

- l'identification des paramètres élastiques orthotropes plans d'un matériau sain,

- la démarche de localisation et de dimensionnement d'une zone dégradée présentant des propriétés apparentes distinctes.

Ces deux étapes s'appuient sur un nombre important de points d'analyse et étendent les travaux existants au contexte anisotrope. Le second point est de plus réalisé sur une éprouvette pleine, permettant d'établir à long terme une démarche analogue au CND à partir de champs cinématiques. La dernière étape concernant l'identification des propriétés de la zone dégradée n'est pas complètement aboutie à l'heure actuelle, mais un certain nombre de pistes de travail ont été évoquées afin de résoudre les difficultés de convergence. Notons enfin que les perspectives majeures de ce travail porteront sur l'identification de matériaux orthotropes d'orientation arbitraire (ce qui supposera l'extension à la prise en compte de l'angle de symétrie matérielle) ainsi qu'à la prise en compte de champs cinématiques expérimentaux comme référence de la procédure FEMU (issues notamment de mesures par stéréo-corrélation d'images).

Conclusion

Ce travail de recherche a été consacré à l'identification de défauts au sein de structures composites employées dans le secteur de l'aéronautique. Outre des matériaux fabriqués classiquement par fibres pré-imprégnées, cette démarche a porté également sur des composites réalisés par infusion de résine liquide, procédé innovant faisant l'objet du projet FUSCOMP.

L'étude présentée dans ce mémoire a contribué à la définition de méthodologies permettant la détection et la caractérisation de défauts internes, aujourd'hui indispensables pour le développement et la maintenance des aérostructures. L'idée générale a été de s'appuyer sur des données de champs qui permettent une analyse globale et généralement sans contact de panneaux de fuselage. Précisément, deux aspects ont été abordés ici :

- l'aspect expérimental en ce qui concerne la comparaison de méthodes de contrôle non destructif (CND) par mesures de champs acoustiques, densimétriques et thermiques sur étalons monolithiques et sandwichs ; vis-à-vis de l'objectif de DAHER-SOCATA d'élargir ses compétences actuelles, il a ainsi été démontré les perspectives particulièrement riches et intéressantes de techniques récentes telles que la tomographie X ou la thermographie par infrarouge ; les performances de celle-ci s'avèrent en effet comparables voire meilleures que les méthodes classiques basées notamment sur les ultrasons, tant sur leur capacité à détecter les défauts qu'à en mesurer l'étendue ;
- l'aspect numérique vis-à-vis de l'identification de propriétés élastiques de composites à partir de champs cinématiques ; basée sur la méthode de recalage par éléments finis, la procédure mise en place sur des champs simulés permet à ce stade d'établir les modules plans apparents d'un matériau orthotrope et de distinguer la présence d'une zone dégradée de propriétés différentes.

En perspective à ce travail de thèse, plusieurs pistes peuvent être envisagées en CND tout d'abord, en terme de technique de contrôle, en dehors des méthodes acoustiques et densimétriques qui sont bien maîtrisées, la thermographie infra-rouge modulée gagnerait à être complétée par l'obtention d'une mesure en localisation du défaut en profondeur à partir du film de phase. Toujours en CND, des études de sensibilité doivent être mises en place vis-à-vis des procédés de fabrication des composites et des natures des constituants (armure, fils, densité, poudrage, résine, ...). Enfin, la nature des défauts est à remettre en cause, contrairement à la spécification AITM dédiée principalement aux techniques ultrasonores, en effet, la thermographie et la tomographie nécessitent des caractéristiques de défauts différentes en terme de propriétés thermiques et densimétriques.

En ce qui concerne l'identification à partir de mesures de champs cinématiques, et plus particulièrement l'identification paramétrique multi-zones, des améliorations et enrichissements restent à être apportés, concernant notamment la caractérisation de la zone dégradée et surtout l'extension de la procédure au cas de champs cinématiques mesurés expérimentalement. Plus généralement enfin, il serait intéressant d'envisager une passerelle entre les deux approches sur le plan industriel, la première permettant de détecter et localiser des défauts, la seconde donnant des indications sur le niveau de dégradation associé, dans un but d'amélioration de l'aide au diagnostic.

Bibliographie

- [1] Adams, R. D. and P. Cawley. 1988. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints, *NDT International*, 21(4), 208–222.
- [2] Adams, R. D. and B. W. Drinkwater. 1997. Nondestructive testing of adhesively bonded joints, *NDT & E International*, 30(2), 93–98.
- [3] Aggelis, D., N.M. Barkoula, T. Matikas, and A. Paipetis. 2012. Acoustic structural health monitoring of composite materials : damage identification and evaluation in cross ply laminates using acoustic emission and ultrasonics, *Comp. Sci. Tech..*
- [4] AITM6-0011. 2010. Norme aitm6-0011 : Non destructive inspection of composite parts.
- [5] AITM6-0013. 2008. Norme aitm6-0013 : Evaluation of conventional ultrasonic inspection facilities, equipment and probes.
- [6] AITM6-0015. 2008. Norme aitm6-0015 : Thermographic inspection - general.
- [7] AITM6-0016. 2008. Norme aitm6-0016 : Evaluation of phased-array ultrasonic inspection facilities, equipment and probes.
- [8] AITM6-4002. 2008. Norme aitm6-4002 : Ultrasonic through transmission - inspection of fibre composite.
- [9] AITM6-4005. 2010. Norme aitm6-4005 : Ultrasonic pulse-echo inspection of carbon fibre plastics.
- [10] AITM6-4010. 2008. Norme aitm6-4010 : Inspection of fibre composites by ultrasonic phased array technique.
- [11] AITM6-4014. 2009. Norme aitm6-4014 : Thickness measurement of fiber composites by ultrasonic pulse-echo technique.

- [12] AITM6-7002. 2007. Norme aitm6-7002 : Radiographic inspection-general.
- [13] AITM6-7006. 2008. Norme aitm6-7006 : Computed tomography with x-rays.
- [14] Al-Maghribi, A. 2008. *Comportement des matériaux composites à fibres courtes : application à l'impact basse vitesse*, Ph.D. thesis, Université Paul-Sabatier.
- [15] Amiot, F., F. Hild, J. N. Périé, and S. Roux. 2009. Méthode de l'écart à l'équilibre, Tech. rep., Ecole thématique CNRS, Clermont-Ferrand, France.
- [16] Andrieux, S., A. Ben Abda, and H. D. Bui. 1997. Sur l'identification de fissures planes via le concept de l'écart à la réciprocité en élasticité, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 324, 1431–1438.
- [17] Andrieux, S. and A. Constantinescu. 2009. Ecart à la réciprocité, Tech. rep., Ecole thématique CNRS, Clermont-Ferrand, France.
- [18] Avril, C., D. Perreux, F. Thiebaud, and B. Reck. 2009. Optimisation du comportement mécanique de structures composites soumises à des hyper-accélération, in *JNC16*, Toulouse, France.
- [19] Avril, S. 2002. *Application des méthodes de mesure de champs à la caractérisation mécanique de poutre en béton armé réparées par matériaux composites*, Ph.D. thesis, Ecole nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne et Université Jean Monnet.
- [20] Avril, S., M. Bonnet, A. S. Bretelle, M. Grédiac, F. Hild, P. Ienny, F. Latourte, D. Lemosse, S. Pagano, E. Pagnacco, and F. Pierron. 2008. Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements, *Experimental Mechanics*, 48, 381–402.
- [21] Avril, S. and F. Pierron. 2007. General framework for identification of constitutive parameters from full field measurements in linear elasticity, *International Journal of Solids and Structures*, 44, 4978–5002.
- [22] Babout, L. 2002. *Etude par tomographie X et modélisation de l'endommagement de matériaux métalliques modèles*, Ph.D. thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [23] Babout, L., E. Maire, J.Y. Buffière, and R. Fougères. 2001. Characterization by x ray computed tomography of decohesion, porosity growth and coalescence in model metal matrix composites, *Acta Mater.*, 49, 2055–2063.

- [24] Badel, P. 2008. *Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X*, Ph.D. thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [25] Bai, W. and B. S. Wong. 2001. Evaluation of defects in composite plates under convective environments using lock-in thermography, *Meas. Sci. Technol.*, 12, 142–150.
- [26] Bai, W. and B. S. Wong. 2001. Photothermal models for lock-in thermographic evaluation of plates with finite thickness under convection conditions, *Journal of applied physics*, 89(6), 3275–3282.
- [27] Bai, W. and B.S. Wong. 2000. Non-destructive evaluation of aircraft structure using lock-in thermography, in *SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 3994, 37–46.
- [28] Bar-Cohen, Y., A. K. Mal, C. J. Hellier, W. Plumstead, K. Fowler, R. Grills, G. Anderews, M. C. Tsao, J. J. Snyder, J. F. Cook, D. A. Aldrich, and R. W. Pepper. 1996. *Non destructive evaluation and quality control*, ASM International, vol. 17, chap. Ultrasonic Inspection, 231–277.
- [29] Batsale, J. C., J. L. Battaglia, and D. Mourand. 2001. Traitement d’images infrarouges fortement bruitées associées au transfert thermique transitoire dans les milieux hétérogènes : application au contrôle non destructif de faible cout, in *XVème Congrès Français de Mécanique*, Nancy, France.
- [30] Batsale, J.C., D. Maillet, and A. Degiovanni. 1994. Extension de la méthode des quadripôles thermiques à l’aide de transformations intégrales - applications au défaut plan bidimensionnel, *International Journal of Heat Transfer*, 37, 111–127.
- [31] Bay, B., T. Smith, D. Fyhrie, and M. Saad. 1999. Digital volume correlation : Three-dimensional strain mapping using x-ray tomography., *Experimental Mechanics*, 39(3), 217–226.
- [32] Bayraktara, E., S. D. Antolovich, and C. Bathias. 2008. New developments in non-destructive controls of the composite materials and applications in manufacturing engineering, *Journal of materials processing technology*, 206, 30–44.
- [33] Bendada, A., J. C. Batsale, A. Dediovanni, and D. Mallet. 1994. Estimation de la répartition spatiale d’une résistance thermique d’interface à partir de la mesure de température de surface, in *Journée d’étude SFT-GUT*.

- [34] Bendada, A., D. Maillet, J. C. Batsale, and A. Degiovanni. 1998. Reconstruction of a non-uniform interface thermal resistance by inverse conduction, *Inverse Problems in Engineering*, 6, 79–123.
- [35] Benmedakhene, S., M. Kenane, and M. Benzeggagh. 1999. Initiation and growth of delamination in glass/epoxy composites subjected to static and dynamic loading by acoustic emission monitoring, *Comp. Sci. Tech*, 59, 201–208.
- [36] Bernasconi, A., F. Cosmi, and D. Dreossi. 2008. Local anisotropy analysis of injection moulded fibre reinforced polymer composites, *Composites Science and Technology*, 68, 2574–2581.
- [37] Bertin, M., F. Touchard, and M. C. Lafarie-Frenot. 2011. Stratifié carbone epoxy sous sollicitation de fatigue thermomécanique simulant le remplissage rapide de réservoirs à hydrogène : analyse expérimentale de l'influence de la température, in *JNC 17*, Poitiers, France.
- [38] Bilek, A., J. C. Dupré, F. Bremand, and A. Ouibrahim. 2004. Studies of contact problems by 3d photoelasticity, comparison with finite element analysis, in *International Conference on Experimental Mechanics - ICEM12*.
- [39] Bodnar, J. L. 2010. Contrôle non destructif par techniques infrarouges : principes et exemples d'applications, in *Colloque Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie CMOI*, Toulouse-Labège, France.
- [40] Bonnet, M. 2009. Présentation générale de la problématique et des méthodes d'identification disponibles, Tech. rep., Ecole thématique CNRS, Clermont-Ferrand, France.
- [41] Bonnet, M., H. D. Bui, and A. Constantinescu. 2003. Principes variationnels et exploitation de mesures de champs en élasticité, *Mécanique & Industries*, 4(6), 687–697.
- [42] Bonnet, M. and S. Pagano. 2009. Erreur en relation de comportement, Tech. rep., Ecole thématique CNRS, Clermont-Ferrand, France.
- [43] Bornert, M., P. Doumalin, and E. Maire. 2004. Mesure tridimensionnelle des champs de déformation par corrélation d'images microtomographiques, in *Colloque Photo-mécanique 2004*.

- [44] Boro-Djordjevic, B. 2009. Nondestructive test technology for the composites : Application of contemporary non-destructive testing in engineering, in *The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing*, Ljubljana, Slovenia.
- [45] Bossi, R., K. Friddell, and A. Lowrey. 1990. *Non destructive testing of fiber reinforced plastic composites - Ch. Computed tomography*, London : Elsevier Applied Science Publishers.
- [46] Boyer, Y. 1993. *Caractérisation de la porosité de composite carbone-résine minces par l'étude de la réflexion des ondes ultrasonores*, Ph.D. thesis, Université de technologie de Compiègne.
- [47] Bremond, P. 2001. Lock-in thermography : a tool to mesure stress and to detect defects in aircraft industry, in *AIAC*, Canberra Australia.
- [48] Breque, C., J. C. Dupre, and F. Bremand. 2004. Calibration of a system of projection moiré for relief measuring : biomechanical applications, *Optics and Lasers in Engineering*, 41(2), 241 – 260.
- [49] Bui, H. D. 1993. *Introduction aux problèmes inverses en mécanique des matériaux*.
- [50] Carmona, V. 2009. *Etude de l'endommagement de matériaux composites par tomographie X et émission acoustique*, Ph.D. thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [51] Castaings, M. 1993. *Propagation ultrasonore dans les milieux stratifiés plans constitués de matériaux absorbants et orthotropes*, Ph.D. thesis, Université de Bordeaux I.
- [52] Cawley, P. 2006. Inspection of composites : Current status and challenges, in *ECNDT*.
- [53] Chaix, J. F., V. Garnier, and G. Corneloup. 2006. Ultrasonic wave propagation in heterogeneous solid media : Theoretical analysis and experimental validation, *Ultrasonics*, 44, 200–210.
- [54] Chen, T. Y. 2000. Digital photoelasticity, in *Photomechanics*, 197–232.
- [55] Cherfaoui, M. 2006. Essais non destructifs chapitre contrôle par ultrason, Tech. rep., Techniques de l'ingénieur.

- [56] Choi, M., K. Kang, J. Park, W. Kim, and K. Kim. 2008. Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography, *NDT & E International*, 41, 119–124.
- [57] Chrysochoos, A. 2002. La thermographie infrarouge un outil en puissance pour étudier le comportement des matériaux, *Mécanique & Industries*, 3, 3–14.
- [58] Claire, D., F. Hild, and S. Roux. 2004. A finite element formulation to identify damage fields : The equilibrium gap, *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 61(2), 189–208.
- [59] Claire, D., F. Hild, and S. Roux. 2007. Identification of a damage law by using full field displacement measurements, *Int. J. Damage Mech.*, 16, 179–197.
- [60] Clerjaud, L. 2010. *Méthode d'hétérodynage pour la caractérisation de propriétés thermophysiques par thermographie infrarouge dans une large gamme spatiale et temporelle*, Ph.D. thesis, Université de Bordeaux I.
- [61] Clorennec, D. 2002. *Génération et détection optiques d'ondes guidées sur une pièce cylindrique : Application au contrôle non destructif sans contact*, Ph.D. thesis, Université Paris 7.
- [62] Colin, N. 1990. *Etude comparative de méthodes d'analyse de signaux d'échographie ultrasonore d'un matériau composite*, Ph.D. thesis, Université de technologie de Compiègne.
- [63] Cooreman, S. 2008. *Identification of the plastic material behaviour through full-field displacement measurements and inverse methods*, Ph.D. thesis, Université de Bruxelles.
- [64] Cornille, N. 2005. *Accurate 3D Shape and Displacement Measurement using a Scanning Electron Microscope*, Ph.D. thesis, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux et Université de Caroline du Sud.
- [65] Crouzeix, L. 2008. *Identification de champs de propriétés mécaniques de structures composites à partir de mesures de champs de déplacements*, Ph.D. thesis, Université de Paul Sabatier Toulouse III.
- [66] David, D., J. C. Batsale, and J. Gounot. 1998. New sequential method to process noisy temperature response from flash experiment measured by infrared camera, *Review of Scientific Instrument*, 69(3), 1437–1441.

- [67] Decultot, N. 2009. *Formage incrémental de tôle d'aluminium : étude du procédé à l'aide de la mesure de champs et identification de modèles de comportement*, Ph.D. thesis, Université de Paul Sabatier Toulouse III.
- [68] Degiovanni, A. 1977. Diffusivité et méthode flash, *Rev. Gén. Thermique*, 185, 420–441.
- [69] Degiovanni, A. and M. Laurent. 1986. Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique par la méthode flash, *Rev. Gén. Phys. Appl.*, 21, 229–237.
- [70] Doumalin, P., J. Drouot, and J. C. Dupré. 2004. Mesure du champ de déformation par corrélation d'images tridimensionnelles : application aux matériaux transparents, in *Colloque Photomécanique*.
- [71] Dumont-Fillon, J. 1996. Contrôle non destructif chapitre ultrasons, Tech. rep., Techniques de l'ingénieur.
- [72] Duplessis-Kergomard, Y. 2007. *Etude expérimentale et numérique de la fissuration intralaminare et de l'initiation du délaminage de bord libre dans les structures stratifiées pseudo-tissées*, Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Paris.
- [73] Dupré, J. and A. Lagarde. 1997. Photoelastic analysis of a three-dimensional specimen by optical slicing and digital image processing, *Experimental Mechanics*, 37(4), 393–397.
- [74] Dzenis, Y. and J. Qian. 2001. Analysis of microdamage evolution histories in composites, *Int. J. Solids Struct.*, 38, 1831–1854.
- [75] Eyma, F., D. Marlot, L. E. Denaud, and J. N. Felices. 2009. Utilisation d'une méthode ultrasonore sans contacts pour la recherche de défauts dans le contreplaqué de peuplier : manque de matières/défauts de collage, in *COFREND2009*, Mont de Marsant, France.
- [76] Fazzini, M. 2009. *Développement de méthodes d'intégration des mesures de champs*, Ph.D. thesis, Université de Paul Sabatier Toulouse III.
- [77] Fazzini, M., O. Dalverny, and S. Mistou. 2011. Identification of materials properties using displacement field measurement, *Key Engineering Materials*, 482, 57–65.
- [78] Fidahoussen, A., P. Calmon, and M. Lambert. 2008. Développement de techniques de reconstitution ultrasonore multi-éléments pour la localisation et la caractérisation de défauts dans des pièces de géométrie complexe, in *COFREND*.

- [79] Framezelle, G., F. Lepiller, J. Hatsch, and S. Remond. 2011. Contrôle non destructif de structures composites pour l'aéronautique, in *COFREND*.
- [80] Françon, M. 1986. *L'optique moderne et ses développements depuis l'apparition du laser*, Paris : CNRS.
- [81] Freud, N. 2003. *Modélisation et simulation de systèmes d'imagerie par rayons X ou gamma*, Ph.D. thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [82] Garcia, D. 2001. *Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images*, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [83] Garnier, C. 2011. *Etude du comportement dynamique des structures composites réalisées par LRI : application à l'impact et à la fatigue*, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [84] Geers, M. G. D., I. R. De Borsts, and W. A. M. Brekelmans. 1996. Computing strain fields from discrete displacement fields in 2d-solids, *International Journal of Solids and Structures*, 33(29), 4293–4307.
- [85] Geier, M. 1989. *Manuel qualité des composites*.
- [86] Germaneau, A. 2007. *Développement de techniques de mesure dans le volume : photoélasticimétrie 3D par découpage optique et corrélation volumique par tomographie optique et rayon X. Application à l'étude des effets mécaniques 3D dans les structures et les biomatériaux*, Ph.D. thesis, Université de Poitiers.
- [87] Geymonat, G., F. Hild, and S. Pagano. 2002. Identification of elastic parameters by displacement field measurement, *Comptes Rendus Mécanique*, 330(6), 403–408.
- [88] Giorleo, G. and C. Meola. 2002. Comparison between pulsed and modulated thermography in glas epoxy laminates, *NDT & E International*, 35, 287–292.
- [89] Gleiter, A., G. Riegert, T. Zweschper, and G. Busse. 2006. Ultrasound lockin thermography for advanced depth resolved defect selective imaging, in *ECNDT2006*.
- [90] Goidescu, C. 2011. *Caractérisation et modélisation de l'endommagement par microfissuration des composites stratifiés - Apports des mesures de champs et de l'homogénéisation*, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.

- [91] Grediac, M. 1989. Principe des travaux virtuels et identification, *Comptes rendus de l'académie des sciences*, 309, 1–5.
- [92] Grediac, M. 1996. On the direct determination of invariant parameters governing anisotropic plate bending problems, *International Journal of Solids and Structures*, 33(27), 3969–3982.
- [93] Grediac, M. 2004. The full-field measurement methods in composite material characterization : interest and limitations, *Composites*, 35, 751–761.
- [94] Grediac, M. 2010. Identification et mesures de champs, in *Colloque National MECA-MAT*, Aussois, France.
- [95] Grediac, M., S. Avril, and E. Toussaint. 2009. La méthode des champs virtuels, Tech. rep., Ecole thématique CNRS, Clermont-Ferrand, France.
- [96] Grediac, M. and P. A. Paris. 1996. Direct identification of elastic constants of anisotropic plates by modal analysis : theoretical and numerical aspects, *Journal of Sound and Vibration*, 195(3), 401–415.
- [97] Grediac, M. and F. Pierron. 2006. Applying the virtual fields method to the identification of elasto-plastic constitutive parameters, *International Journal of Plasticity*, 22(4), 602–627.
- [98] Grediac, M., E. Toussaint, and F. Pierron. 2002. Identification des propriétés mécaniques de matériaux avec la méthode des champs virtuels, une alternative au recalage par éléments finis, *C. R. Mécanique*, 330, 107–112.
- [99] Grediac, M., E. Toussaint, and F. Pierron. 2002. Special virtual fields for the direct determination of material parameters with the virtual fields method, *International Journal of Solids and Structures*, 39, 2691–2705.
- [100] Grediac, M. and A. Vautrin. 1990. A new method for determination of bending rigidities of thin anisotropic plates, *Journal of Applied Mechanics*, 57, 964–968.
- [101] Gros, X. E. 1995. An eddy current approach to the detection of damage caused by low-energy impacts on carbon fibre reinforced materials, *Materials & Design*, 16(3), 167–173.
- [102] Guibert, S. 2007. *La thermographie infrarouge à détection synchrone appliquée aux matériaux composites*, Master's thesis, Université de LAVAL, QUEBEC.

- [103] Guo, B. 2007. *Identification simultanée des paramètres de rigidité et d'amortissement de plaques isotropes minces en vibration par la méthode des champs virtuels*, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers en Châlon-en-Champagne.
- [104] Hanke, R., T. Fuchs, and N. Uhlmann. 2008. X ray based methods for non destructive testing and material characterization, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 591, 14–18.
- [105] Herve, C., F. Berthelot, and H. Walaszek. 2008. Application des méthodologies d'examen non destructives pour la fiabilité des structures en matériaux composites, in *COFREND2008*.
- [106] Horny, N. and B. Lannoy. 2003. Lock-in thermography with a focal plane array, *Meas. Sci. Technol.*, 14, 439–443.
- [107] Hsu, D. K. 2008. Nondestructive inspection of composite structures : methods and practice, in *17th World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China.
- [108] Hung, Y. Y. 1996. Shearography for non-destructive evaluation of composite structures, *Optics and Lasers in Engineering*, 24, 161–182.
- [109] Hung, Y. Y., Y. S. Chen, S. P. Ng, L. Liu, Y. H. Huang, B. L. Luk, R. W. L. Ip, C. M. L. Wu, and P. S. Chung. 2009. Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation, *Materials Science and Engineering*, 64, 73–112.
- [110] Ibarra-Castanedo, C. 2005. *Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography : depth retrieval with the phase*, Ph.D. thesis, Université de LAVAL, QUEBEC.
- [111] Ibarra-Castanedo, C., M. Genest, S. Guibert, J. M. Piau, X. P. V. Maldague, and A. Bendada. 2007. Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography : A comparative study, in *SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 6541.
- [112] Ibarra-Castanedo, C. and X. Maldague. 2004. Defect depth retrieval from pulsed phase thermographic data on plexiglas and aluminium samples, in *SPIE -The international Society for optical Engineering*, vol. 5405, 348–356.

- [113] Ibarra-Castanedo, C. and X. Maldague. 2005. Pulsed phase thermography inversion procedure using normalized parameters to account for defect size variations, in *SPIE -The international Society for optical Engineering*, vol. 5782, 334–341.
- [114] Jessop, H. T. and F. C. Harris. 1952. *Photoélasticité*, Paris.
- [115] Junyan, L., W. Yang, and D. Jingmin. 2010. Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for ndt, *Infrared Physics & Technology*, 53, 348–357.
- [116] Kazys, R., A. Demcenko, E. Z. ukauskas, and L. Mazeika. 2006. Air coupled ultrasonic investigation of multi-layered composite materials, *Ultrasonics*, 44, 819–822.
- [117] Kim, J. H., F. Pierron, M. R. Wisnom, and K. Syed-Muhamad. 2007. Identification of the local stiffness reduction of a damaged composite plate using the virtual fields method, *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 38, 2065–2075.
- [118] Kleinermann, J. P. 2000. *Identification paramétrique et optimisation procédés mise à forme par problèmes inverses*, Ph.D. thesis, Université de Liège.
- [119] Lacroix, M. 1986. Essais non destructifs chapitre ultrasons, Tech. rep., Techniques de l'ingénieur.
- [120] Laermann, K.H. 2000. *Optical methods in experimental solid mechanics*, New York.
- [121] Lambert, A., J. Rivenez, G. Waché, and M. Cherfaoui. 1994. Les contrôles non destructifs généralités, Tech. rep., Cahiers Formation CETIM.
- [122] Larbi, W. B. 2010. *Comparaison expérimentale de la thermographie modulée et de la thermographie pulsée pour l'évaluation non destructive des matériaux employés en aérospatial*, Master's thesis, Université de LAVAL.
- [123] Latourte, F. 2007. *Identification des paramètres d'une loi élastoplastique de prager et calcul de champs de contrainte dans des matériaux hétérogènes*, Ph.D. thesis, Université de Montpellier II.
- [124] Latourte, F., A. Chrysochoos, S. Pagano, and B. Watrisse. 2008. Elastoplastic behavior identification for heterogeneous loadings and materials, *Experimental Mechanics*, 48(4), 435–449.

- [125] Le-Bras, A. 2004. *Exploration des potentialités du système eos pour la caractérisation mécanique de structures osseuses : application à l'extrémité supérieure du fémur*, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure Arts et Métiers.
- [126] Le-Magorou, L., F. Bos, and F. Rouger. 2002. Identification of constitutive laws for wood-based panels by means of an inverse method, *Composites Science and Technology*, 62(4), 591–596.
- [127] Leclerc, H., J. N. Perie, F. Hild, and S. Roux. 2009. Corrélation d'images numériques intégrée pour identification de propriétés mécaniques, in *19^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France.
- [128] Lecompte, D. 2007. *Elastic and Elasto-Plastic Material Parameter Identification by Inverse Modeling of Static Tests using Digital Image Correlation*, Ph.D. thesis, Université de Brussel.
- [129] Lecompte, D., A. Smits, H. Sol, J. Vantomme, and D. Van Hemelrijck. 2007. Mixed numerical-experimental technique for orthotropic parameter identification using biaxial tensile tests on cruciform specimens, *International Journal of Solids and Structures*, 44, 1643–1656.
- [130] Lecomte, G. 2005. *Analyse d'images radioscopiques et fusion d'informations multimodales pour l'amélioration du contrôle de pièces de fonderie*, Ph.D. thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [131] Ledru, Y. 2009. *Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques*, Ph.D. thesis, Université de Toulouse.
- [132] Leendertz, J. A. and J. N. Butters. 1973. An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments, *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, 6(11), 1107–1110.
- [133] Lefebvre, J. P., P. Lasaygue, C. Potel, J. F. De Belleval, and P. Gatignol. 2004. *Acoustique ultrasonore et ses applications*, Tech. rep.
- [134] Lenoir, N. 2006. *Comportement mécanique et rupture dans les roches argileuse étudiés par micro-tomographie à rayon X*, Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier Grenoble I.

- [135] Maillard, S., J. Cadith, H. Walaszek, A. Dillenz, and J. L. Bodnar. 2008. La thermographie infrarouge stimulée, une nouvelle technique de contrôle sur les lignes de production, in *Cofrend*.
- [136] Maire, E., J. Y. Buffière, L. Salvo, J. J. Blandin, W. Ludwig, and J. M. Letang. 2001. On the application of x-ray tomography in the field of materials science, *Adv. Engng. Sci.*, 3, 539–546.
- [137] Maire, E., V. Carmona, J. Courbon, and W. Ludwig. 2007. Fast x-ray tomography and acoustic emission study of damage in metals during continuous tensile tests, *Acta Mater.*, 55, 6806–6815.
- [138] Meola, C., G. M. Carlomagno, A. Squillace, and G. Giorleo. 2002. Non-destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography, *Meas. Sci. Technol.*, 13, 1583–1590.
- [139] Meola, C., G. M. Carlomagno, A. Squillace, and G. Giorleo. 2004. The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints, *Infrared Physics & Technology*, 46, 93–99.
- [140] Meola, C., G. M. Carlomagno, A. Squillace, and A. Vitiello. 2006. Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography, *Engineering Failure Analysis*, 13, 380–388.
- [141] Meraghni, F., H. Chalal, F. Pierron, and M. Grédiac. 2002. Identification directe du comportement élastique endommageable de matériaux composites par la méthode des champs virtuels, *Journal de Physique IV*, 12, 291–300.
- [142] Merzouki, T., F. Meraghni, H. Chalal, and T. B. Zineb. 2009. Comparaison de configurations d’essais hétérogènes en vue d’améliorer l’identification du comportement élastique orthotrope par erreur en relation de comportement, *Mécanique & Industries*, 10, 351–364.
- [143] Mistou, S. 2000. *Développement d’un élément fini de coque composite à double courbure pour l’implémentation d’une application orientée objet*, Ph.D. thesis, Université de Bordeaux I.
- [144] Mizutani, Y., K. Nagashima, M. Takemoto, and K. Ono. 2000. Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon-fiber composites using acoustic emission analysis, *NDT & E Int.*, 33, 101–110.

- [145] Moffat, A. J., P. Wright, J. Y. Buffière, I. Sinclair, and S. M. Spearing. 2008. Micro-mechanisms of damage in 0 splits in a [90/0]s composite material using synchrotron radiation computed tomography, *Scripta Materialia*, 59, 1043–1046.
- [146] Molimard, J., R. Le Riche, A. Vautrin, and J. R. Lee. 2004. Identification of orthotropic plate stiffness using open hole tensile test, in *Xth SEM congress on experimental mechanics*, Costa Mesa (Californie, USA).
- [147] Molimard, J., R. Le Riche, A. Vautrin, and J. R. Lee. 2005. Identification of the four orthotropic plate stinesses using a single open-hole tensile test, *Experimental Mechanics*, 45(5), 404–411.
- [148] Montanini, R. 2010. Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography, *Infrared Physics & Technology*, 53, 363–371.
- [149] Mook, G., R. Lange, and O. Koeser. 2001. Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents, *Composites Science and Technology*, 61, 865–873.
- [150] Morimoto, Y., Y. Morimoto Jr., and T. Hayashi. 1994. Separation of isochromatics and isoclinics using fourier transform, *Experimental Techniques*, 18, 13–17.
- [151] Mouritz, A. P., C. Townsend, and M. Z. Shah Khan. 2000. Non destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics, *Composites Science and Technology*, 60, 23–32.
- [152] Muzet, V., P. Blain, and Y. Guillard. 2008. Application de la shearographie à la détection de fissures sur ouvrages d’art, Tech. rep., LRPC de Strasbourg.
- [153] Orteu, J. J. 2009. 3D computer vision in experimental mechanics, *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3-4), 282–291.
- [154] Pagnacco, E. and A. S. Caro-Bretelle. 2009. Identification par recalage de modèles éléments finis, Tech. rep., Ecole thématique CNRS, Clermont-Ferrand, France.
- [155] Pajani, D. 2001. Thermographie - principes et mesure, Tech. rep., Techniques de l’ingénieur.
- [156] Pajani, D. and L. Audaire. 2001. Thermographie technologies et application, Tech. rep., Techniques de l’ingénieur.

- [157] Pannier, Y. 2006. *Identification de paramètres élastoplastiques par des essais statiquement indéterminés : mise en oeuvre expérimentale et validation de la méthode des champs virtuels*, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Centre de Châlons-en-Champagne.
- [158] Parker, W. J., R. J. Jenkins, C. P. Butler, and G. L. Abbott. 1961. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity, *Journal of applied physics*, 32(9), 1679–1684.
- [159] Pastor, M. L. 2007. *Contribution à l'étude en fatigue de structures en aluminium renforcées par patchs composites*, Ph.D. thesis, Université Blaise Pascal - Clermont II.
- [160] Patterson, E. A. and Z. F. Wang. 1991. Towards full field automated photoelastic analysis of complex components, *Strain*, 27, 49–53.
- [161] Perdijon, J. 1993. *Le contrôle non destructif par ultrasons*.
- [162] Perdijon, J. 2002. *Contrôle des matériaux*.
- [163] Perie, J. N., H. Leclerc, S. Roux, and F. Hild. 2009. Digital image correlation and biaxial test on composite material for anisotropic damage law identification, *International journal of solids and structures*, 46, 2388–2396.
- [164] Perie, J. N., H. Leclerc, S. Roux, and F. Hild. 2009. Identification de lois d'endommagement anisotrope à partir de la corrélation d'images numériques, in *Comptes rendus des JNC 16*, Toulouse, France.
- [165] Phani, S. K. M. 2007. *Characterization of advanced composites : a nondestructive approach*, Ph.D. thesis, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.
- [166] Pierron, F., S. Zhavoronok, and M. Grediac. 2000. Identification of the through-thickness properties of thick laminated tubes using the virtual fields method, *International Journal of Solids and Structures*, 37(32), 4437–4453.
- [167] Post, D., B. Han, and Pr. G. Ifju. 2000. Moiré methods for engineering and science - moiré interferometry and shadow moiré, in *Photomechanics*, 151–196.
- [168] Potet, P. 2004. Connaissez-vous la vibrothermographie ?, *Mesures*, 768, 64–66.

- [169] Pradere, C., L. Clerjaud, J. C. Batsale, and S. Dilhaire. 2011. High speed heterodyne infrared thermography applied to thermal diffusivity identification, *Scientific Instruments*, 82(054901), 1–6.
- [170] Prodjintono, V. 2011. *Contribution à l'économie d'énergie dans le bâtiment : mesure de capacité de stockage dynamique d'une paroi*, Ph.D. thesis, Université de Bordeaux I.
- [171] Ramond, L., J. C. Batsale, and C. Gobbe. 1999. Méthodologie de mesure de coefficient d'échange en milieu poreux - application d'un modèle à deux températures, *Int. J. of Thermal Sciences*, 38, 250–257.
- [172] Ramond, L., J. C. Batsale, C. Gobbe, and M. Quintard. 1998. Measurement of a thermal exchange coefficient in porous media by infrared thermography : two temperature model application, in *11 th Int. Heat Transfer Conference*, Kyong Ju Korea.
- [173] Rastogi, P. K. 2000. Principles of holographic interferometry and speckle metrology, in *Photomechanics*, 103–150.
- [174] Reifsnider, K. L. and R. S. Williams. 1974. Determination of fatigue related heat emission in composite materials, *Exp. Mech.*, 14, 479–485.
- [175] Rikards, R., A. Chate, and G. Gailis. 2001. Identification of elastic properties of laminates based on experiment design, *International Journal of solids and structures*, 38, 5097–5115.
- [176] Robert, E. and Jr. Green. 2004. Non contact ultrasonic techniques, *Ultrasonics*, 42, 9–16.
- [177] Rodriguez, F. L., V. De Paulo Nicolau, H. Oshiro, and D. Tancredi. 2011. Non-destructive evaluation of composites materials by pulsed-phase thermography : depth inversion, in *COBEM 2011 - 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*.
- [178] Roux, S. and F. Hild. 2008. Digital image mechanical identification, *Experimental Mechanics*, 48, 495–508.
- [179] Ruzek, R., R. Lohonka, and J. Jironc. 2006. Ultrasonic C scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification, *NDT & E International*, 39, 132–142.

- [180] Sakagami, T. and S. Kubo. 2002. Application of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations, *Infrared Physics & Technology*, 43, 211–218.
- [181] Schilling, P. J., B. R. Karedla, A. K. Tatiparthi, M. A. Verges, and P. D. Herrington. 2005. X-ray computed microtomography of internal damage in fiber reinforced polymer matrix composites, *Composites Science and Technology*, 65, 2071–2078.
- [182] Simulia. 2002. Simulia : <http://www.simulia.com>.
- [183] Smigielski, P. 1984. *Holographie industrielle*, Toulouse.
- [184] Smigielski, P. 1998. Holographie optique, principes, Tech. Rep. AF 3340, Techniques de l'Ingénieur, traité Sciences fondamentales.
- [185] Smigielski, P. 1998. Interférométrie holographique, principes, Tech. Rep. AF 3345, Techniques de l'Ingénieur, traité Sciences fondamentales.
- [186] Smigielski, P. 2001. Interférométrie de speckle, Tech. Rep. R 6331, Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et contrôle.
- [187] Sreelekshmi, C., V.R. Ravindran, and V.P. Mahadevan Pillai. 2006. Theoretical modeling of digital radiograph of composite rocket nozzle for the analysis of defect, in *National Seminar on Non-Destructive Evaluation*.
- [188] Steinberger, R., T. I. Valadas Leitao, E. Ladstatter, G. Pinter, W. Billinger, and R.W. Lang. 2006. Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing, *International Journal of Fatigue*, 28, 1340–1347.
- [189] Surrel, Y. 2000. Fringe analysis, in *Photomechanics*, 55–102.
- [190] Sutton, M. A., S. R. McNeill, J. D. Helm, and Y. J. Chao. 2000. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision, in *Photomechanics*, 323–372.
- [191] Thomas, C. 2011. *Etude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV*, Ph.D. thesis, Ecole nationale supérieure des mines de Paris.

- [192] Tsao, C. C. and H. Hocheng. 2005. Computerized tomography and c-scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 1282–1287.
- [193] Vautrin, A., G. Silva, J. Molimard, and R. Le Riche. 2009. Localisation et identification de l'hétérogénéité de comportement mécanique de matériaux, in *19^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Marseille, France.
- [194] Voillaume, H. and B. Campagne. 2008. Les ultrasons laser appliqués aux matériaux composites aéronautiques, in *Cofrend*.
- [195] Wevers, M. 1997. Listening to the sound of materials : acoustic emission for the analysis of material behaviour, *NDT & E Int.*, 30, 99–106.
- [196] Wong, B. S. and C. F. M. Ron. 1998. Non destructive testing of fibre reinforced composites and honeycomb structures, Tech. rep., Nanyang Technological University, Singapore.
- [197] Wu, D. and G. Busse. 1998. Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials, *Revue Générale de Thermique*, 37(8), 693–703.
- [198] Yashiro, S., J. Takatsubo, and N. Toyama. 2007. An ndt technique for composite structures using visualized lamb-wave propagation, *Composites Science and Technology*, 67, 3202–3208.
- [199] Zani, M. L. 2001. CND par ultrason : le sans contact est prêt mais..., *Mesures*, 734, 63–66.
- [200] Zenina, A. 1998. *Analyse par photoélasticimétrie d'une pièce tridimensionnelle : modélisations et expérimentations*, Ph.D. thesis, Université de Poitiers.
- [201] Zenina, A., J.C. Dupré, and A. Lagarde. 1999. Separation of isochromatic and isoclinic patterns of a slice optically isolated in a 3d photoelastic medium, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 18(4), 633 – 640.
- [202] Zweschper, Th., A. Dillenz, , and G. Busse. 2000. Ultrasound lockin thermography - a ndt method for the inspection of aerospace structures, in *QIRT2000*.

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

DÉLIVRÉ PAR : Institut National Polytechnique de Toulouse

ECOLE DOCTORALE : MEGeP

SPÉCIALITÉ : Génie mécanique, mécanique des matériaux

DATE DE SOUTENANCE : Jeudi 04 Octobre 2012

AUTEUR : Elodie PERONNET

DIRECTEURS DE THÈSE : Moussa KARAMA / Sébastien MISTOU

TITRE : Identification expérimentale du comportement d'un fuselage composite : détection de défauts par mesures de champs

RÉSUMÉ :

Ces travaux concernent l'identification du comportement de structures composites. Le premier volet porte sur une étude expérimentale basée sur la révélation de défauts internes par des techniques de contrôle non destructif (mesures de champs acoustiques, thermiques et densimétriques), visant à déterminer leur position et leur taille. Le deuxième volet présente une démarche d'identification numérique permettant d'évaluer les caractéristiques mécaniques résiduelles d'une structure composite constituée d'une zone saine et d'une zone endommagée. Cette thèse s'inscrit dans une démarche qualité de développement d'un outil d'aide à la décision visant d'une part, la détection et la localisation des défauts internes, et d'autre part, l'évaluation de leur niveau de dégradation.

Mots-clés : composite, contrôle non destructif, mesures de champs, ultrasons, thermographie infrarouge, tomographie X, identification, recalage éléments finis

TITLE : Experimental identification of the behavior of a composite fuselage : defect detection by full field measurements

ABSTRACT :

These works are related to the identification of the behavior of composite structure. The first part concerns an experimental study based on internal defect revelation by non destructive testing methods (acoustic, thermal, densimetric full field measurements) to determine their location and their size. The second part presents a numerical identification method to evaluate the four in-plane elastic parameters of an orthotropic composite structure (sample with a healthy zone and a damaged zone simulated by a flat bottomed hole). This thesis is part of a quality approach in order to develop of a decision support tool with firstly, the detection and the localization of internal defects, and secondly, the evaluation of their damage level.

KEYWORDS : composite, non destructive testing, full field measurements, ultrasound, infrared thermography, X ray tomography, experimental identification, finite element model updating

Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes

47, Avenue d'Azereix, BP 1629, 65016 TARBES Cedex