

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DEHLEB BLIDA
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département : Aéronautique



Mémoire pour l'obtention
du diplôme d'ingénieur d'état en Aéronautique
Option : construction
Spécialité : Structure

THEME

Etude et application des techniques de contrôles non
destructifs (CND) des matériaux du type composite

PRESENTE PAR :

Mr: DJOUDI Amine

ENCADRE PAR :

Promoteur : Dr. DRAÏ Redouane
Co-promrteur: Dr. HAMDI. ELArbi

ANNEE UNIVERSITAIRE 2005 /2006

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu, le bon dieu (Allah) qui m'a donné la force, la volonté et le courage pour terminer ce projet de fin d'étude.

Je tiens à exprimer mes profondes reconnaissances à mes promoteurs Monsieur Draï Redouane et Monsieur Hamdi El Arbi pour leurs aides précieuses qu'ils m'ont offerts et leurs disponibilités à tout moment pour l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier les enseignants de département d'Aéronautique et tous les personnes qui nous a assistés soutenus de près ou de loin.

Mes remerciements s'adresse aussi à l'ensemble du personnel du CSC, chercheurs et employés. En particulier Mr ZERGOUG .Et l'ensemble du personnels de la compagnie AIR ALGERIE responsables et employés.

Mes remerciements à toute l'équipe de l'atelier composite, et l'atelier NDT, en particulier Mr DAHI Sid Ahmed et Mr boudjelti.

Enfin, je présente tous mes sincères remerciements à monsieur le président et les membres du Jury qui acceptent de nous honorer par leur présence.

Dédicaces

C'est avec une grande joie que je dédie ce modeste travail à ma mère que j'aime infiniment, à mon père, mes frère et mes sœurs. et à tous mes oncles, belkacem et mustapha ,mahfoud et bouabe ma grande mère qui m'aime beaucoup,

A tous mes proches et mes enseignants.

*A tous mes amis que j'aime et je respecte beaucoup ,
à tous les mohamed , toufik ,sadek ,nabil
,sidahmed,yones ,abderrezek, amine, mostapha, ami el
arbi ,ali, nassim, lakhder, alaa, et.....*

Amine

Sommaire

Introduction Générale

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

I.1 Introduction	3
I.2 Définition des matériaux composites	3
I.3 Pourquoi les matériaux composites.....	3
I.4 Les éléments constituant d'un matériau composite	4
I.4.1 Le renfort	4
I.4.1.1 Les fibres de verre	5
I.4.1.2 Les fibres de carbone	5
I.4.1.3 Les fibres aramides	5
I.4.1.4 Les fibres de bore	6
I.4.2 La matrice	7
I.4.2.1 Résines thermodurcissables	7
I.4.2.2 Résines thermoplastiques	7
I.4.2.3 Matrice métallique.....	7
I.4.3 L'interface	8
I.4.4 Les charges et les additifs.....	8
I.5 Classification des matériaux composites	8
I.5.1 Les composites de grande diffusion	8
I.5.2 Les composites à haute performance	8
I.6 Les matériaux composites structuraux.....	9
I.6.1 Les monocouches.....	9
I.6.2 Les stratifiés.....	9
I.6.3 Les sandwiches.....	10
I.7. Procédés de fabrication.....	10
1.7.1. Procédés artisanaux.....	10
1.7.2. Procédés industriels.....	11

Chapitre II : Application des matériaux composites en aéronautique

II. Applications des composites.....	14
II.1 Avions et hélicoptères.....	14
II.1.1 Pièces d'aménagement intérieur.....	14
II.1.2 Pièces de structure.....	15
II.1.3 Pièces de structures zones moteurs.....	19
II.2 Notions des défauts dans les matériaux composites.....	20
II.2.1 Les défauts dans les matériaux composites.....	20
II.2.1.1 Concepts des défauts	20
II.2.1.2 Les défauts pour les produits finis.....	21
II.3 Classification des dommages	22
II.4 Maintenance et réparation des matériaux composites.....	24
II.4.1 maintenance.....	24
II.4.2 Réparation.....	24
II.4.2.1 Inventaire des réparations.....	24

Chapitre III : Le contrôle non destructif par Radiographie

III.1 Introduction.....	27
III.2 Radiographie.....	27
III.2.1 Rappels physiques.....	27
III.2.1.1 Définition des rayons X	27
III.2.1.2 Caractéristiques énergétiques	27
III.2.1.3 Rayonnement électromagnétique	28
III.2.1.4 Propagation et interaction avec la matière	28
III.2.2 Production des rayons X et γ	30
III.2.2.1 Génération des rayons X	30
III.2.2.2 Production des rayons γ	30
III.2.3 Principe de la radiographie.....	31
III.2.4 La Radioscopie	31
III.2.5 L'image latente.....	32
III.2.5.1 Enregistrement de l'image radiographique.....	32

III.2.5.2 Formation de l'image latente	33
III.2.6 Matériels et produits utilisés.....	33
III.2.6.1 Matériels.....	33
III.2.6.2 Produits de développement.....	34
III.2.7 Domaines d'application	35
III.2.8 Avantages et inconvénients	36
III.2.8.1 Avantages.....	36
III.2.8.2 Inconvénients	36
III.2.9 contrôle des structures composites.....	36

Chapitre IV : Le contrôle non destructif par Ultrasons

IV.1 Introduction.....	38
IV.2 Rappels physiques.....	38
IV.2.1 Nature des ultrasons	38
IV.2.2 Position des ultrasons dans l'échelle des sons.....	38
IV.2.3 Les différents types d'ondes	39
IV.2.4 Propagation des ondes ultrasonores.....	40
IV.2.5 Atténuation des ondes ultrasonores.....	42
IV.3 La production des ultrasons.....	42
IV.3.1 Palpeurs piézoélectrique.....	42
IV.3.2 Palpeurs EMA.....	43
IV.3.3 palpeurs lasers.....	43
IV. 4 Techniques et méthodes de contrôle par ultrasons	43
IV.4.1 Techniques de contrôle par ultrasons	44
IV. 4. 2 - Méthodes utilisées en contrôle.....	45
IV.5 Matériels et produits utilisés.....	46
IV.5.1 matériels.....	46
IV.5.2 produits.....	47
IV.6 Réglage du matériel.....	47
IV.7 Détection des défauts dans les structures composites par ultrasons.....	48
IV.8 Champ d'application.....	49

IV.9 Évolution.....	50
IV.10 Avantages et inconvénients.....	50
IV.10.1 Avantages.....	50
IV.10.2 Inconvénients.....	50

Chapitre V : Etude expérimentale

V.1 Préparation des échantillons.....	52
V.2.Simulation des défauts.....	53
V.3 Matériels utilisées.....	54
V.3.1 Matériels utilisées pour les ultrasons.....	54
V.3.2 Matériels utilisées pour la radioscopie.....	55
V.4 Contrôle par ultrasons.....	55
V.4.1. Pièces à contrôler.....	55
V.4.2 Résultats obtenus.....	56
V.4.3 Interprétation.....	60
V.5 Contrôle par radiographie.....	61
V.5.1. Pièces à contrôler	61
V.5.2 Les résultats obtenues.....	62
V.5.3 Interprétation des résultats.....	63

Conclusion Générale

Références Bibliographiques

Introduction Générale

Introduction

La recherche permanente de performances techniques ou économiques a conduit les chercheurs et les techniciens à développer de nouveaux matériaux capables de remplacer avantageusement les matériaux classiques.

Pour mieux connaître ces matériaux modernes, on a utilisé deux types de contrôle qui sont capable de mettre en évidence les défauts en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Il était donc nécessaire de recourir au développement de nouvelles méthodes de caractérisation non destructive.

Les structures en matériaux composites peuvent, en termes de contrôle au cours de leur fabrication ou en service, présenter des problèmes spécifiques par rapport à leur certification et leur fiabilité.

Les sources des défauts et discontinuités dans les pièces de structure en matériaux composites peuvent provenir du matériaux lui même et de la variation de ces propriétés lorsque la pièce est produite, mais aussi de discontinuités structurales engendrées par les phases de fabrication ou les condition de service

Les contrôles non destructifs trouvent leur position à deux niveaux :

- en suivi d'essais de caractérisation et de qualification des pièces de structure (détermination non destructive des propriétés des matériaux, analyse des phénomènes de l'endommagement)
- en contrôle de santé (détection de défauts de fabrication et de service)

Dans ce travail, il nous a été demandé d'étudier les matériaux composites, de voir leur utilisation dans un type ou plusieurs types d'avions, de recenser les principaux défauts rencontrés et d'étudier l'application de la technique ultrasonore et de la technique de radiographie dans le contrôle de ce type de matériau.

Pour cela, nous avons divisé notre mémoire en cinq chapitres :

Après une introduction générale, le chapitre I est consacré à l'étude des matériaux composites. Le chapitre II traite l'utilisation des différents matériaux composites en aéronautique et les défauts qui peuvent apparaître lorsque ces matériaux sont sollicités par les conditions de leur utilisation.

Dans le chapitre III, nous décrivons la technique de radiographie et de radioscopie. Le chapitre IV est consacré au principe du contrôle par ultrasons et son application dans la détection de défaut.

Enfin dans le dernier chapitre, nous décrivons la partie expérimentale. Tout d'abord, nous montrons comment fabriquer des défauts dans les matériaux composites et comment détecter ces défauts par la radioscopie et la technique ultrasonore.

Chapitre I :
Généralités sur les
matériaux composites

I.1 Introduction

Le matériau composite n'est pas un concept nouveau, on en trouve de nombreux exemples dans la nature, on en citera deux :

- le bois, constitué de fibre de cellulose reliée entre elles par la lignine.
- l'os, composé à la périphérie d'un tissu compact, à l'intérieure de la moelle, l'ensemble étant enveloppé par une membrane fibroélastique riche en éléments cellulaires, vaisseaux et nerfs.

Depuis l'antiquité, l'homme a créé, de part sa propre imagination, des matériaux composites afin d'obtenir, dans le matériaux fini, les propriétés intéressantes de chacun des constituants tout en neutralisant leurs faiblesse. Le torchis (terre renforcée de paille), et le cas de certains armes anciennes tels que l'arc mongols (tendons de boeuf - bois - soie collées); épées damassées (lame en fer et en acier), en sont des exemples parmi tant d'autres.

A la fin de XIX^{ème} siècle et au début de XX^{ème} siècle sont apparus les premier composites industriels tels le béton armé (béton + fer), le contreplaqué ou aggloméré (colle + bois), la bakélite, etc.

Ces matériaux seront des facteurs clé de succès pour l'économie d'énergie dans les années à venir.

I.2 Définition des matériaux composites [01].[02]

Un matériau composite est la réunion à l'échelle macroscopique, de deux ou plusieurs éléments différents par la forme ou par la composition, se complétant et permettent d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Dans le cas le plus général un matériau composite consiste d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice, et la phase discontinue le renfort.

I.3 Pourquoi les matériaux composites [03]

L'utilisation des matériaux traditionnels à des fins technologiques implique des choix restreints conditionnés par les performances propres au matériau choisi et par les procédés de mise en œuvre. Une autre contrainte des matériaux traditionnels, d'ordre économique, est le coût de la performance (matériaux noble, céramique, aciers réfractaires, aciers inoxydables).

Le développement des matériaux composites est né de la volonté d'allier les qualités techniques au besoin d'allègement dans un même matériau, qui par la suite doit s'adapter aux solutions technologiques des problèmes à résoudre. L'idée a donc été exploitée d'associer (et non d'allier) dans une même masse, des matériaux de nature différent afin de bénéficier des performances de chacun des composants.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent des nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme, meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques

I.4 Les éléments constitutants d'un matériau composite

I.4.1 Le renfort [05]

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. Ils sont caractérisés par :

- La nature de la fibre, minérale ou organique,
- L'architecture du renfort.

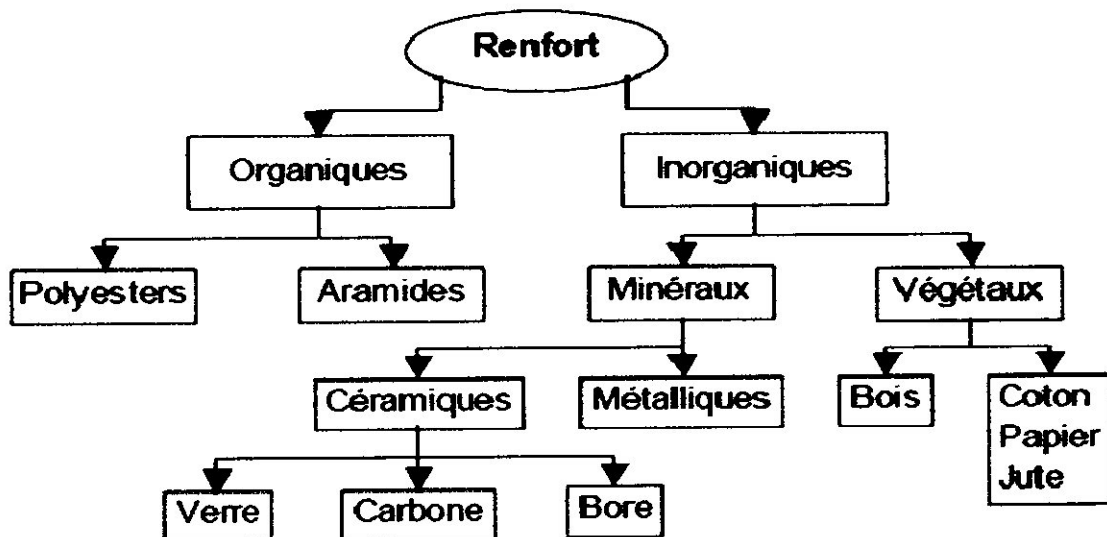


Fig.I.1 les principaux matériaux de renfort

I.4.1.1 Les fibres de verre

Elles sont fabriquées par étirage rapide de baguettes de verre de quelques dixièmes de millimètre de diamètre. Suivant les applications auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en :

Fibres E pour les composites de grande diffusion (GD);

Fibres D pour les applications dans la construction électrique (Radômes) ;

Fibres R ou S pour les composites à haute performance (HP);

Fibres c pour les couches superficielles de structures anti-corrosion.

L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par :

- une **rigidité** insuffisante pour certaines applications comme les pièces de structure primaire en aéronautique ;
- un **vieillissement** accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de températures élevées.

I.4.1.2 Les fibres de carbone

Les fibres de carbone sont obtenues par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Ce sont des fibres conductrices, d'une faible masse volumique, ayant de très bonnes propriétés mécaniques tels que la grande résistance à la traction compression, rigidité très importante, et une excellente résistance à l'humidité.

Les fibres de carbone sont principalement utilisées pour les composites à hautes performances en aéronautique, mais souffrent de handicaps techniques qui limitent également leur utilisation pour certaines applications dans les composites :

- un allongement à la rupture insuffisant (inférieur à 2%) comparé à celui des fibres de verre et d'aramide (3 à 4%) ;
- une caractérisation encore insuffisante pour permettre une conception fiable à prix modéré.

I.4.1.3 Les fibres aramides

Souvent appelée KEVLAR®, ces fibres sont des polyamides aromatiques. Elles présentent une masse volumique très faible, et de très bonnes caractéristiques spécifiques en traction.

Elles ont l'inconvénient d'avoir une faible résistance en compression, une forte reprise d'humidité et d'être sensibles aux rayons ultraviolets. Les composites renforcés de

fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) mais souffrent :

- d'une adhérence moyenne entre matrice et fibre,
- d'un prix encore trop élevé.

I.4.1.4 Les fibres de bore

La fabrication de ces fibres est réalisée par un dépôt en phase vapeur du bore sur un filament de tungstène. Ces fibres chères ont de très bonnes caractéristiques mécaniques.

Leur utilisation se restreint au profit des fibres de carbone.

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

Il existe différentes géométries et textures de renforts :

- **Les unidirectionnels (UD)** : Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère.
- **Les tissus** : Le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles); suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin.

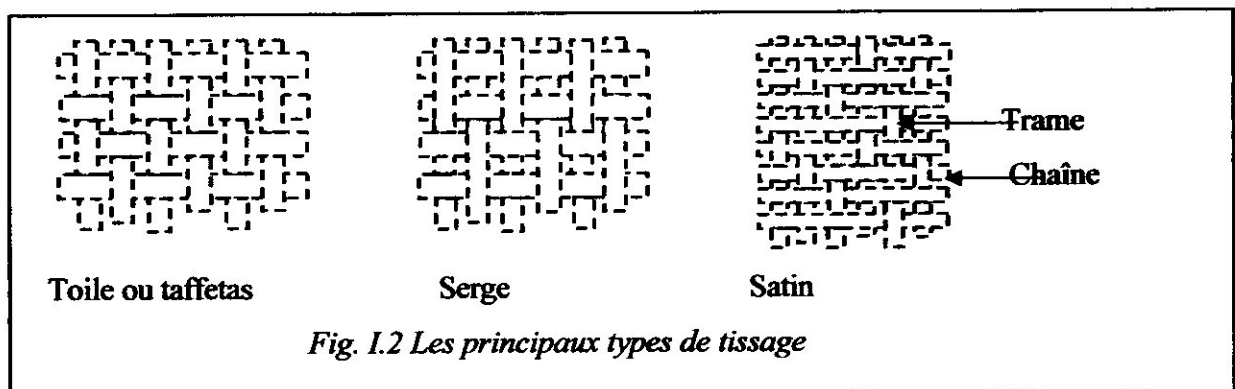


Fig. I.2 Les principaux types de tissage

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes (tissu hybride carbone-aramide).

I.4.2 La matrice [06]

Pour lier les fibres ensemble, on utilise généralement des matrices qui se classent en trois grandes catégories : les résines thermodurcissables, les résines thermoplastiques et les matrices métalliques.

I.4.2.1 Résines thermodurcissables

Une résine thermodurcissable est une formulation de différents produits appartenant essentiellement à la chimie organique, qui possède la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à un état solide. Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

- Résine polyester : elle présente un bon accrochage sur les fibres, un prix réduit, mais a un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide.
- Résine époxyde : c'est la plus utilisée dans l'industrie aéronautique. Elle présente un bon accrochage sur les fibres, un faible retrait au moulage (de l'ordre de 0,5 %) et de bonnes propriétés mécaniques. Elle garde d'excellentes caractéristiques jusqu'à une température de 170 °C.
- Résine phénolique : ayant de moins bonnes propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de la tenue au feu (toxicité).
- Résine polyimide : d'un emploi relativement difficile, chère, elle a l'avantage de garder de bonnes caractéristiques sur une large plage de température (de - 100 à + 260 °C).

I.4.2.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux, Les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux. Elles ont une meilleure ténacité que les résines thermodurcissables.

Les résines thermoplastiques avaient au départ deux graves défauts : une faible tenue en température et peu de résistance aux solvants.

I.4.2.3 Matrice métallique

Malgré une densité (par rapport à l'eau) importante, elles présentent des propriétés intéressantes pour la réalisation de pièces soumises à des frottements. Seule la voie aluminium et fibres de bore a été étudiée de façon précise et les résultats obtenus ont été moins bons que prévus. Il ne faut pas confondre ces composites composés de fibres longues, et ayant un pourcentage important de fibres, avec les matériaux métalliques renforcés par des renforts

discontinus. Dans ce dernier cas, on obtient principalement une augmentation du module d'élasticité.

I.4.3 L'interface

L'utilisation d'une couche d'interface (sizing) permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice. Les fibres destinées à la fabrication des composites reçoivent un apprêt spécifique comportant un agent collant qui permet de coller les filaments pour en faire des fils et assure, en outre, une fonction de lubrification (pour le protéger contre l'abrasion due au frottement entre fibres).

I.4.4 Les charges et les additifs

L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécanique et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre, la quantité des produits ajoutés peut être de quelques dizaines de % dans le cas des charges et peut descendre à quelques % et même moins dans le cas des additifs.

I.5 Classification des matériaux composites [04]

Il est possible de définir des classes de matériaux composites en se référant à leurs domaines d'applications et à leurs performances mécaniques ou thermiques.

Donc, on classe habituellement deux grandes catégories correspondant aux matériaux composites de grande diffusion et de matériaux composites à hautes performances;

I.5.1 Les composites de grande diffusion (GD)

Les GD représentent 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort avoisinant 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters (95% des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre (plus de 99% des renforts utilisés). Les renforts et les matrices sont à des coûts voisins.

I.5.2 Les composites à haute performance (HP)

Les HP, leur principal domaine d'application est l'aéronautique et ils sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le coût. Contrairement aux GD, les propriétés mécaniques comme la résistance mécanique et la rigidité sont largement supérieures à celles des métaux.

I.6 Les matériaux composites structuraux

I.6.1 Les monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

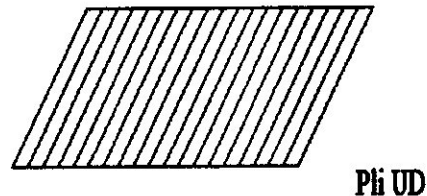


Fig.I.3 Pli unidirectionnel

I.6.2 Les stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

On pourra avoir des stratifiés de type :

- **1. Equilibré** : stratifié comportant autant de couches orientée suivant la direction $+\theta$ que de couches orientée suivant la direction $-\theta$.
- **2. Symétrique** : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
- **3. Orthogonal** : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches à 90° .

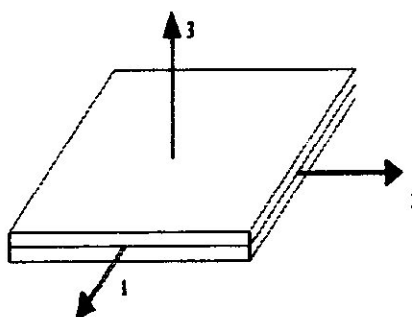


Fig.I.4 Sstratifié à base de pli unidirectionnel

1.6.3 Les sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

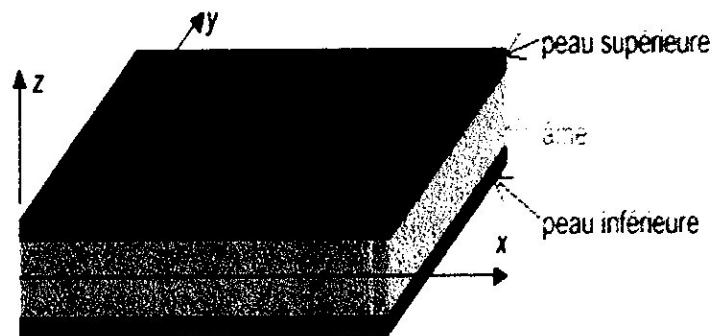


Fig.1.5 Sandwiche

1.7. Procédés de fabrication

Il existe des procédés de moulage spéciaux pour la fabrication de différentes pièces suivant la demande spécifique attendue, quelle soit mécanique, esthétique, de rendement ou autres.

1.7.1. Procédés artisanaux

1.7.1-a. Moulage au contact

Cette méthode est utilisée pour la fabrication de bateaux, réservoirs, boîtiers et d'autres pièces nécessitant une résistance élevée. Elle permet la fabrication de n'importe quelle forme avec outillage relativement simple, l'enlèvement des bulles d'air (débullage) est très important pour garantir une bonne répartition de la résine en recherche de la cohésion entre les fibres.

1.7.1-b. Moulage par projection simultanée de fibres de verre et de résine

Ce procédé permet la réalisation de forme simple telles que capot de camion, évier ou

baignoire. Elle présente un usinage très simple et bon marché, il rend possible l'automatisation pour la fabrication de nombreuses pièces identiques, le façonnage de pièces sur chantier est envisageable car l'équipement est léger.

1.7.1-c. Moule contacts

Ces procédés permettent d'attendre des propriétés mécaniques supérieures, il en existe trois :

- **Sac à dépression** : L'apport de pression donne une meilleure adhérence entre les couches de fibres.
- **Sac sous pression** : Cette méthode densifie et améliore la finition de la surface hors moule.
- **Autoclave** : Améliore les deux procédés précédents par un apport de chaleur et de pression supplémentaire.

Tous les trois évitent le procédé de debulage et permettent la bonne finition d'une des surfaces de la pièce.

1.7.2. Procédés industriels

1.7.2-a. Injection de résine

Elle permet de fabriquer des bacs à manutention et de stockage ou des pièces de carrosserie automobile. C'est elle qui offre le plus grand volume et la plus grande uniformité des pièces. Son automatisation rend possible l'obtention de formes très complexes.

1.7.2-b. Enroulement filamentaire

Utilisé pour la fabrication de tuyaux et autres formes circulaires creuses, sa fabrication est assez simple et permet l'obtention de stratifiés au rapport résistance / poids très avantageux. Egalement, il assure une meilleure uniformité et orientation de la fibre.

1.7.2-c. Pultrusion

Procédé continu pour la fabrication de produits à profil constant tels que poutres, canalisation et autres. Cette méthode entièrement automatisée permet l'obtention de très fortes résistances grâce à la concentration élevée de fibres et à son orientation parallèle à la longueur du profilé.

1.7.2-d. Moulage par compression

- **Presse à chaud** : Permet de fabriquer des pièces de voiture, camions, bateau, etc. Particulièrement intéressante pour la fabrication en série de pièces de dimensions différentes, mais demande un matériel assez important et coûteux. Caractérisée par une

excellente imprégnation du renfort, des excellentes propriétés mécaniques et des caractéristiques constantes vu les pressions appliquées allant jusqu'à 30 Kg/cm^2 .

- **Presse à froid** : Sert essentiellement à la fabrication de bacs et coffrets électriques, il est moins onéreux et convient pour des séries moyennes.
- **Premix** : On obtient d'excellentes caractéristiques diélectriques, il est destiné aux usages électriques, ces bonnes propriétés mécaniques invitent à la fabrication de pare-chocs, chaises, etc. Un premier résulte d'un mélange de résine, fibres coupées et charges moulées par compression entre 80 et 150 Kg/cm^2 .

Les moulages par compression permettent le plus gros volume et la plus grande uniformité des pièces pouvant être automatisées créant des pièces d'une grande souplesse de conception, bonnes propriétés mécaniques et chimiques.

1.7.2-e. Moulage continu

Utilisé pour la production des feuilles telles que les panneaux de vitrage et du matériel d'isolation électrique, il ne convient qu'aux profils extrudables, le coût d'usinage est très bas et permet la fabrication des panneaux de longueur illimitée avec des textures et couleurs très diverses l'épaisseur de la paroi peut être étroitement contrôlée.

1.7.2-f. Centrifugation :

Utilisé pour la fabrication de formes cylindriques creuses tels que réservoirs, tuyaux et autres.

Les renforcements des résines sont imprégnés à l'aide d'une force centrifuge qui par sa vitesse régule les diamètres, les caractéristiques de renfort, l'épaisseur de la pièce ou le nombre de couches. Ce procédé peut être automatisé pour produire un gros volume de tuyaux ou de réservoir à faible coût d'usinage.

1.7.2-g. Emboutissage à froid :

Consiste en un équipement de presse et de moulage d'une feuille thermoplastique préchauffée et renforcée avant d'être placée dans un moule métallique, largement utilisé dans les industries automobiles et électroménagères, son coût de production, finition et main d'œuvre est très réduit. Des pigments peuvent être incorporés directement au moulage.

1.7.2-h. Comoformage :

Procédé qui combine les formes thermoplastiques façonnées sous vide et les laminées des plastiques renforcés des fibres moulées à froid. On obtient des éléments avec des résistances aux chocs et aux intempéries excellentes, une propriété mécanique très bonne et

une apparence de surface magnifique, le coût d'équipement sont très basses et le délai d'exécution est très bref.

1.7.2-i. Façonnage sous vide :

Il convient surtout pour la fabrication de coffrage à béton, carrosserie de véhicules et des pièces pour salle de bain. Le procédé est comparable au moulage au contact ou à la pulvérisation avec gel et il élimine l'application du gel tout en permettant un meilleur contrôle de la surface.

Chapitre II :
Application des matériaux
composites en
aéronautique

II. Applications des composites

II.1 Avions et hélicoptères

II.1.1 Pièces d'aménagement intérieur

Les matériaux composites ont très vite trouvé leur place sur les pièces d'aménagement intérieur d'avions ou d'hélicoptères. Les principales caractéristiques demandées pour ces applications sont :

- une mise en œuvre pouvant être réalisée de façon peu onéreuse sans utilisation de moyens lourds comme les autoclaves ;
- des propriétés de feu/fumée/toxicité répondant aux normes en vigueur.

Ce dernier point est très important car il représente le principal inconvénient pour l'utilisation des matériaux composites à matrice organique dans les aménagements intérieurs. De nombreuses victimes du transport aérien périssent non pas à cause du crash de l'avion mais asphyxiées par les fumées dégagées lors des incendies qui se déclarent à la suite du crash. Pour les aménagements intérieurs d'avions, les trois principales exigences concernent l'opacité des fumées, la toxicité de fumées et la quantité de chaleur dégagée par le matériau, pendant la combustion.

Les pièces d'aménagement intérieur qui se situent dans la partie visible de la cabine sont les panneaux de revêtement et d'habillage du fuselage, les pourtours de hublots, les coffres à bagages, les tablettes de sièges, les galets de service. Les planchers font aussi partie des aménagements intérieurs bien qu'un minimum de performances mécaniques soit requis pour ces pièces. Les planchers avions sont des structures sandwich avec âme nid d'abeille Nomex (résine phénolique sur fibres d'aramide) avec des peaux en fibres carbone ou de verre dans une résine époxyde. Pour les pièces non visibles, on trouve les conduites de conditionnement d'air.

Les pièces d'aménagement intérieur sont principalement réalisées en composites renforcés par des tissus en fibres de verre ou d'aramide dans une matrice phénolique. Les matrices phénoliques sont utilisées à cause de leurs bonnes propriétés en feu/fumée/toxicité malgré une mise en œuvre délicate avec dégagement de produit de réaction pendant la polymérisation qui nécessite des gammes de fabrication adaptées permettant d'évacuer le produit de réaction formé (eau).

II.1.2 Pièces de structure

L'utilisation des matériaux composites sur les structures d'avions n'a cessé de croître au fil des années. Le tableau II.1 présente les taux d'utilisation de composite par rapport à la masse totale de structure de l'appareil.

Pièce	Matériau fibres/résine	Variation de masse par rapport à une solution métallique (%)	Variation de coût par rapport à une solution métallique (%)
Carénages	Aramide/époxyde	- 55	- 80
Empennage horizontal	Carbone/époxyde	- 45	- 55
Moyeu rotor principal	Verre/époxyde	- 40	- 65
Portes	Aramide/époxyde	- 30	- 70
Siège pilote	Aramide/époxyde	- 20	- 80
Moyeu rotor fenestron	Verre/époxyde	- 20	- 60
Dérive fenestron	Aramide-carbone/époxyde	- 20	- 35
Dérive empennage	Carbone/époxyde	- 20	+ 10
Planchers	Aramide-carbone/époxyde	- 20	+ 70 % (pas rentable)
Verrière	Aramide-carbone/époxyde	- 15	- 50
Pales	Verre-carbone/époxyde	0	- 30

Tableau II.1 Taux de matériaux composites par rapport à la masse totale de structure

Sur tous les avions civils, de type Airbus ou Boeing, l'appareil qui utilise le plus de composite en pourcentage est l'Airbus A320. Le taux de composite de la structure représente environ 20 % du total de la masse. Les pièces réalisées en composite sur l'Airbus A320 sont principalement :

- les radômes fabriqués en structure sandwich avec âme nid d'abeille Nomex (résine phénolique sur papier en fibres d'aramide) et peaux en tissu de fibres de quartz dans une résine époxyde. Cette pièce a pour but principal de protéger les instruments de navigation de l'appareil (radars) des chocs pouvant intervenir comme par exemple les collisions avec les oiseaux pendant les phases de décollage et d'atterrissage. De par sa fonction, la qualité première demandée à cette pièce est la transparence aux ondes électromagnétiques. Pour respecter cette exigence, les fibres de carbone ne peuvent pas être utilisées. Les radômes doivent assurer le maintien du profil aérodynamique en résistant à la pression exercée par l'air en vol. De nombreuses opérations de réparation sont effectuées au cours de la vie de l'appareil sur les radômes ;



Fig II.1 Radome de L'airbus A330-200

- toutes les parties mobiles de la voilure en grande partie aussi réalisées en structure sandwich (ailerons, volets de profondeur, aérofreins) avec pour les zones les plus chargées mécaniquement l'utilisation de composite monolithique. Certaines de ces pièces suivant leur positionnement par rapport aux roues du train d'atterrissage sont aussi soumises à de nombreux endommagements provoqués pendant les phases de roulage sur piste au décollage et à l'atterrissage par projection d'éléments comme des gravillons;
- les carénages de protection du train d'atterrissage sous l'avion qui ont surtout un rôle aérodynamique vis-à-vis du train d'atterrissage en position rentrée pendant le vol de l'appareil. Ces pièces sont réalisées en structure sandwich avec âme Nomex et peaux en tissus de fibres de verre ou d'aramide dans une résine époxyde. Ces pièces sont aussi soumises aux dommages lors du roulement de l'appareil sur la piste et aussi aux collisions des engins de manutention lors des opérations de chargement et de déchargement des soutes de l'appareil ;
- la dérive et les plans horizontaux arrière qui sont essentiellement réalisés en composite monolithique à partir de préimprégnés nappe unidirectionnelle ou tissu de fibres de carbone dans une résine époxyde. Pour les pièces monolithiques réalisées à partir de préimprégné nappe unidirectionnelle, l'utilisation de machines à draper automatiques (réalisation de l'empilement des différentes couches de préimprégné) a contribué très fortement à la réduction des coûts de fabrication des pièces de structure en composite.



Fig II.2 la dérive et les plans horizontaux arrière A330-200 (Air Algérie)

Sur les derniers avions Airbus qui ont été conçus, l'usage des composites a encore progressé. Dans l'A340-500/600 on utilise des composites monolithiques pour :

- la réalisation de deux poutres ventrales de 16 m de long environ (poutres situées en partie basse du fuselage au niveau de la voilure qui permettent de reprendre les efforts du train d'atterrissage). Pour ces deux poutres ventrales, l'utilisation du composite a permis de gagner globalement 1 600 kg par rapport à une solution en alliage d'aluminium. Les matériaux utilisés sont des préimprégnés à base de nappes unidirectionnelle et de tissu en fibres de carbone dans une résine époxyde ;
- les bords d'attaque de voilure fabriqués en composite monolithique avec des tissus de fibres de verre dans une matrice thermoplastique polysulfure de phénylène (PPS) ;
- le fond arrière étanché du fuselage, pièce circulaire de grande dimension, qui permet de réaliser l'étanchéité du fuselage à l'arrière de l'appareil entre la zone pressurisée et la zone non pressurisée. Cette pièce est fabriquée en composite monolithique et sandwich à partir de préimprégnés tissu en fibres de carbone dans une résine époxyde.

Sur un avion, la voilure fait partie des zones de structure qui sont mécaniquement les plus chargées. Le premier avion de série dédié au transport civil qui a intégré un caisson extrême de voilure réalisé en composite est l'ATR72 qui est sorti en 1989. La voilure est réalisée en composite monolithique à partir de préimprégné unidirectionnel en fibres de carbone dans une résine époxyde.

Sur le gros porteur Airbus A380, par rapport aux programmes précédents, la grande innovation qui est une première mondiale sera l'introduction de la structure caisson central de voilure qui sera réalisée en composite. Cette pièce de 7 m par 7 m et de 3 m de haut est la pièce la plus chargée mécaniquement dans un avion. Les panneaux présenteront des zones courantes pouvant atteindre 44 mm d'épaisseur. Les matériaux utilisés seront des composites monolithiques réalisés avec des préimprégnés en fibres de carbone haute résistance et module intermédiaire dans une résine époxyde. L'utilisation du composite sur cette structure permet un gain de masse de 3 000 kg environ par rapport à la même structure réalisée en alliage d'aluminium.

Sur les hélicoptères civils, les composites représentent entre 25 % et 30 % de la masse totale de structure. Si en règle générale, les composites sont introduits pour gagner entre 25 % et 30 % de masse par rapport à une solution métallique, il existe sur hélicoptère une exception à cette règle, les pales. En cas de panne turbine moteur, la réglementation impose qu'un hélicoptère puisse se poser en utilisant le phénomène d'autorotation des pales. La mise en autorotation n'est pas possible au-dessous d'une masse minimale des pales qui est déjà atteinte avec les pales réalisées en matériaux métalliques. Pourtant, les composites vont rapidement s'imposer dans les années 1960 comme la solution incontournable pour la réalisation des pales. Plusieurs raisons ont dicté ce choix :

- les performances en fatigue des matériaux composites. Une pale métallique, à cause de la propagation des fissures en fatigue nécessite d'être remplacée toutes les 2 000 h de vol. Une pale composite, insensible aux problèmes de fatigue, présente une durée de vie supérieure à la durée de vie globale de l'hélicoptère. Le gain obtenu sur le coût d'exploitation de l'hélicoptère est très significatif (66 %);
- la possibilité de réaliser par moulage des formes aérodynamiques optimisées (section cambrée et vrillée), ce qui permet par exemple sur un AS330 d'augmenter la masse au décollage de 400 kg (+ 6 %) et de diminuer la consommation de carburant en vol de croisière de 6 % environ ;
- le prix de revient global d'une pale en matériau composite qui est diminué de plus de 20 % par rapport au prix de revient de la même pale réalisée en matériau métallique

Tous ces avantages permettent de proposer des hélicoptères avec une diminution de l'ordre de 13 % du coût de revient du kilogramme transporté par kilomètre.

Les pales sont réalisées en structure sandwich avec des zones monolithiques à partir de composite contenant des fibres de verre, des fibres de carbone haute résistance et des fibres de

carbone haut module dans une résine époxyde. Les matériaux d'âmes utilisés sont de la mousse et du nid d'abeille. Pour compenser le gain de masse procuré par le composite, les pales sont lestées avec des contrepoids en plomb. Les bords d'attaque, pour des problèmes d'érosion, sont en acier inoxydable.

Le moyeu rotor est l'exemple typique de pièce qui réalisée en composite permet un gain de coût global obtenu essentiellement par la diminution du nombre de pièces élémentaires. Les moyeux de l'ancienne génération étaient entièrement métalliques, les articulations étaient assurées par des systèmes de roulement à aiguilles ou à billes chers, lourds et demandant une maintenance relativement importante (graissage, vérification et renouvellements périodiques). Les matériaux composites ont permis de remplacer avantageusement ces roulements par des zones souples et de simplifier les concepts par une bonne intégration des fonctions. Le moyeu du Dauphin en composite divise par trois le nombre de pièces, par trois le prix de revient et divise par deux la masse totale de l'ensemble. Les matériaux utilisés sont des fibres de verre dans une résine époxyde.

II.1.3 Pièces de structures zones moteurs

Pour les parties proches des moteurs, les composites à matrice organique peuvent encore trouver des applications dans les zones tièdes. Sur hélicoptère, les capots moteurs sont réalisés en composite, les températures d'utilisation sont de l'ordre de 150 °C en continu. Les matrices époxydes peuvent être utilisées, mais la température de service, relativement élevée pour ce type de matériau, provoque un vieillissement accéléré de la structure en accélérant les phénomènes de fissuration, ce qui raccourcit la durée de vie de la pièce. Sur avions civils de type Airbus, les entrées d'air et les nacelles sont réalisées en composite. Ces zones, bien que proches des moteurs, ne travaillent pas à des températures très élevées. Les principales caractéristiques demandées à ce type de pièce sont une atténuation du niveau sonore des réacteurs. Cette fonction est assurée par une structure sandwich adaptée qui absorbe une partie du bruit émis. Ces pièces, du fait de leur relativement faible température de service, utilisent des résines époxydes.

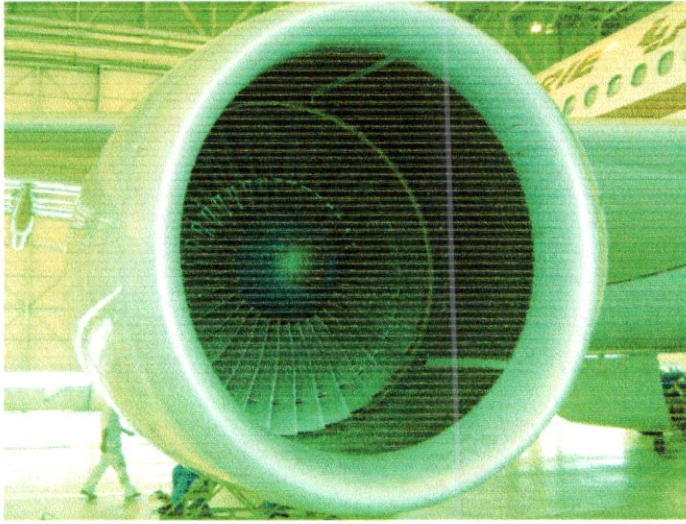


Fig II.3 L'entrée du réacteur A330-200

À l'entrée du réacteur, les aubes de compresseur et les aubes de redressement de flux d'entrée d'air sont réalisées en composite. En fonction de la position de ces pièces dans le moteur et de leur température de service, les matériaux sont des tissus de carbone dans des résines époxyde ou bismaléimides. Les grilles et les volets d'inverseur de poussée sont réalisés en tissu de fibres de carbone dans une matrice bismaléimide. Les inverseurs de poussée sont des pièces situées à la périphérie du moteur qui lors de l'atterrissage de l'avion orientent le flux du réacteur dans le sens opposé au sens de roulement de l'avion afin de participer au freinage de l'appareil sur la piste. Ces pièces sont sollicitées pendant des temps relativement courts sur la durée de vie d'un avion mais sont soumises à un flux de chaleur important qui peut faire monter la température de la pièce au-delà de 200 °C.

II.2 Notions des défauts dans les matériaux composites :

II.2.1 Les défauts dans les matériaux composites :

Les matériaux composites sont des stratifiés à structures hétérogènes et anisotropes. La nature de leurs défauts internes et surfaciques est différente de celle des matériaux classiques et leurs mécanismes de rupture sont plus complexes.

II.2.1.1 Concepts des défauts :

On identifie trois stades d'apparition et d'évolution des défauts, soit :

1er stade : les défauts inhérents aux produits de base et semi-produits

- Rapport volumique fibres-matrices.
- Variations des propriétés fibres-matrices.
- Désalignements des fibres ; déséquilibre des tissus.
- Conditions de stockage, de manutention, de découpe.
- Hétérogénéité des agents, oxydants, mouillants durcisseur.

2^{ème} stade : les défauts inhérents à la mise en œuvre

- Etape de polymérisation : croissance du poids moléculaire.
- Etape de durcissement : pontages latéraux.
- Etape fluide : agrégats des matrices et fibres.

3^{ème} stade : post-cuisson

La post consistante à de relaxer les contraintes internes. Elle peut représenter un recuit tel qu'il est pratiqué en métallurgie.

Ce traitement n'élimine pas des défauts existants. Il consolide et stabilise le matériau composite :

- Dégazage.
- Polymérisation résiduelle.

II.2.1.2 Les défauts pour les produits finis :

Après ces trois stades de fabrication, les défauts restants typiquement situés à trois niveaux.

- Au niveau interlaminaire :
 - Délaminage
 - Fissure dans les matrices.
 - Inclusion des nappes, déséquilibre, désordre d'orientation.
 - Porosités et vides.
 - Variations volumiques.
 - Hétérogénéité de cuisson.
- Au niveau des fibres :
 - Inadéquations fibres-matrices.
 - Sinuosité des rowings et entrelacement
 - Inclusions.
 - Fibres coupées.
 - Désorientations, foisonnement des rowings.

- Au niveau surfacique :
 - Piqûres, brûlures.
 - Bulles.
 - Soufflages interlaminaires.
 - Manque de gel coat.
 - Retassure, vague.

II.3 Classification des dommages [07]

Les dommages sur les éléments d'une structure composite aéronautique peuvent être classés suivant deux grandes catégories:

- Les dommages accidentels
 - en cours de fabrication, chute d'outils lors des opérations d'assemblage ou de maintenance, chocs d'oiseaux, de cailloux, dommages d'origines militaires, collisions, crash.
- Les dommages liés à l'environnement:
 - humidité, température, rayonnement, grêle, foudre directe ou indirecte.

Ces dommages peuvent également être classés suivant leur importance:
rayure, entaille, écaillage, délaminage, décollement, enfoncement, perforation.
(voir figure II.4)

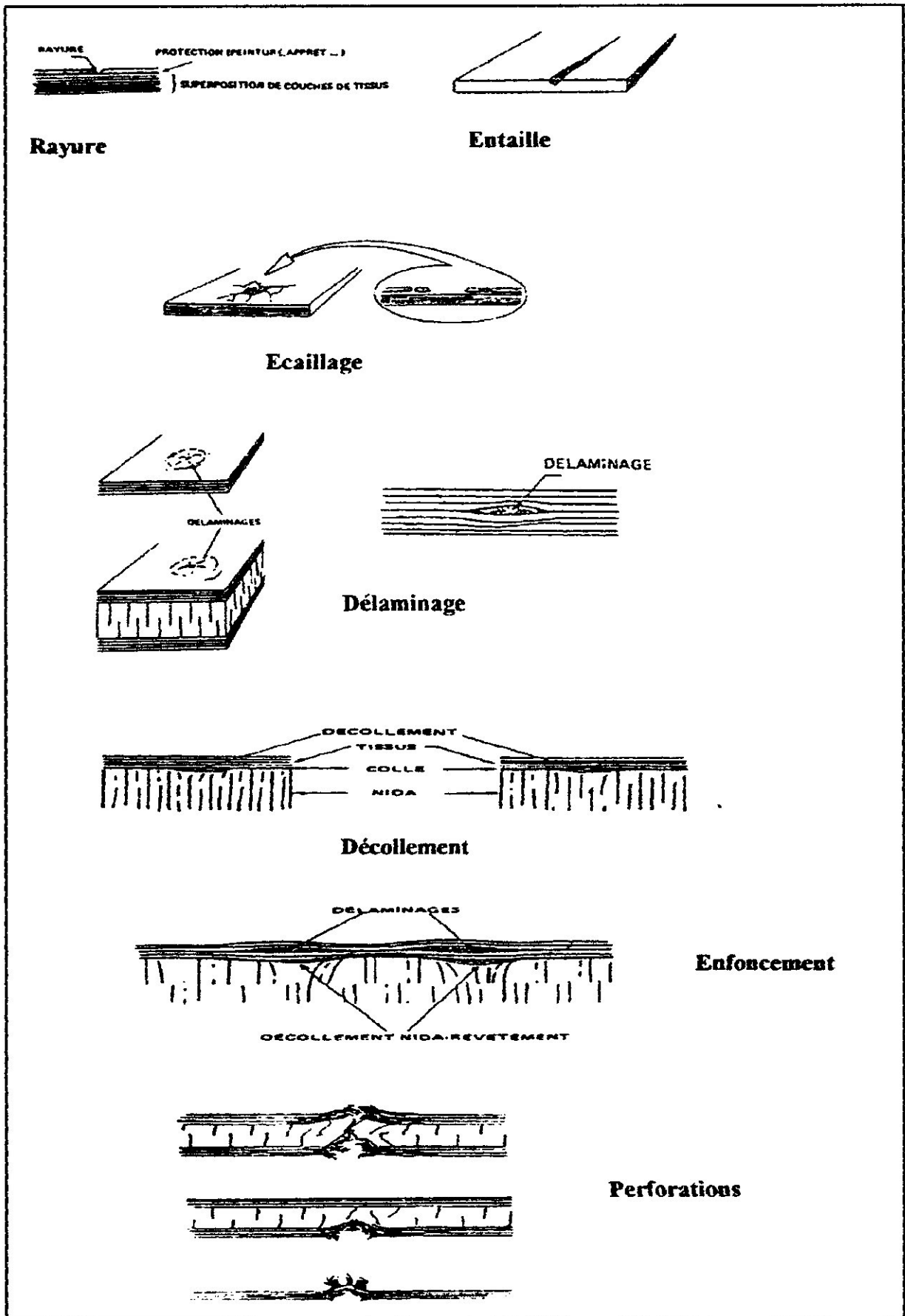


Fig.II.5 Identification des dommages suivant leur importance

II.4 Maintenance et réparation des matériaux composites

II.4.1 maintenance :

L'une des intérêts des matériaux composites à matrice plastique est d'accepter une maintenance fortement réduite. L'exemple le plus convaincant est ce-lui des coques de bateaux. Alors qu'une coque bois nécessite une attention constante, de même à un niveau moindre, qu'une coque aluminium ou d'acier (corrosion atmosphérique, saline et par électrolyse) une coque en composite et la mise en ouvre correctement effectuée, ne demande aucune entretien durant plusieurs années. Le vieillissement se traduisant essentiellement par une modification des couleurs originale (freinage) sans grande influence sur les propriétés mécaniques, le choix de la résine, de la fibre et de son ensimage sont les points à surveillés en fonction du milieu dans le quel séjournera la pièce .

II.4.2 Réparation :

II.4.2.1 Inventaire des réparations

On distingue deux grands modes de réparations dans les éléments d'une structure composite endommagée :

- La réparation provisoire à durée de vie limitée.
- La réparation définitive qui permet en général de remonter aux caractéristiques mécaniques initiales de la pièce.

a) Réparation provisoire

Cette réparation permet à l'élément endommagé de continuer à voler en attente de définition de la réparation définitive. Ce type de réparation a donc une durée de vie limitée dans le temps (1000 heures ou plus). Il est envisagé pour permettre à l'appareil de poursuivre sa mission, à la limite d'effectuer la mission suivante ou de rallier une installation mieux équipée (aéronefs militaires en zone de combat, hélicoptères civils sur plate forme pétrolière....). Cette réparation provisoire peut également permettre de subvenir aux besoins immédiats dans l'attente de la grande visite de l'aéronef.

Actuellement les réparations provisoires peuvent être de deux types en fonction du temps disponible et du lieu:

- Réparations à l'aide de renforts métalliques boulonnés ou rivetés.
- Réparations à l'aide de renforts ou "rustines" (métalliques ou composites) collés associés éventuellement à un certain nombre de rivets.

b) Réparation définitive

La réparation définitive de mise en oeuvre beaucoup plus longue est réalisée par un personnel qualifié, dans des locaux adaptés (salle d'usinage, salle blanche...) avec des procédures identiques à celles appliquées à la fabrication des pièces hautes performances à partir de préimprégnés. Cette réparation peut être de deux types:

- Réparation esthétique.
- Réparation structurale sur pièces monolithiques ou sur pièces sandwiches.

La réparation structurale est effectuée pour:

- Restituer localement une partie des caractéristiques mécaniques de la pièce endommagée.
- Neutraliser les dommages supplémentaires occasionnés par une réparation provisoire mal adaptée.
- Stopper la pénétration de l'humidité dans la pièce.
- Protéger l'avionique.

Un autre intérêt des matériaux composites est la facilité de réparation pour un professionnel correctement équipé. Seuls les composites hautes performances à base de rubans unidirectionnels ou de sandwiches présentent des difficultés de réparation pour obtenir la résistance mécanique initiale. De même, les composites à matrice thermoplastique seront plus difficilement réparables que ceux à matrice thermodure.

Les réparations restent souvent visibles en raison des surépaisseurs ou du revêtement qui n'aura pas la même teinte que la pièce du fait de vieillissement de celle-ci. On peut essentiellement distinguer trois types de dégâts :

- Le dégât superficiel n'ayant pas entamé le stratifié.
- Le dégât profond dans le stratifié.
- La rupture totale ou partielle de la pièce.

I. Le dégât superficiel :

Se lon la profondeur et l'épaisseur de la couche protectrice. Il est peut être éliminé par ponçage. Lors qu'il est trop profond il est nécessaire de procéder par matriçage, ponçage et trop-coatage ou peinture ; s'il l'on ne dispose pas le trop-coat ou le gel coat de finition, un gel-coat standard convient à condition de l'isoler de l'air par un film plastique pour éviter qu'il ne poisse. La plus part d'épaisseur déposée est supérieure à l'épaisseur d'usure. Il est nécessaire de poncer,

puis polir le surplus, toujours il est difficile d'obtenir la même teinte que l'ensemble du stratifié et par conséquent la réparation reste souvent visible.

2. Le dégât profond :

Dans ce cas la couche protectrice est détruite, le stratifié est soumis à l'attaque des agents extérieurs et il est mécaniquement affaibli. Il est nécessaire de le renforcer dans les premiers temps, puis de l'isoler à nouveau du milieu extérieur. Pour le renfort, deux possibilités peuvent se présenter :

- Le stratifié est accessible intérieurement.
- Il peut être réparé que par l'extérieur.

Préférable pour des raisons d'aspect est de réparer intérieurement. Le stratifié est d'abord poncé pour éliminer soit le gel-coat, soit du stratifié qui a été souillé (eau, eau de mer, produits chimiques, poussières) la couche est en suite activée pour permettre un bon adhérence. Il faut veiller à ce que les matériaux de réparation et de structure soient compatibles, par exemple réparation polyester sur époxyde.

Lors que la surface est préparée, il est possible de disposer plusieurs couches de mats ou de tissus de taille croissante pour renforcer la structure. Lors que le stratifié n'est accessible que de l'extérieur, il est souvent préférable d'agrandir le défaut par ponçage, introduire en suite un mastic éventuellement mélangé de fibre de la verre courte et de terminer par les opérations au paragraphe (dégât superficiel).

Chapitre III :

Le contrôle non destructif Par Radiographie

III.1 Introduction

Le CND est un ensemble de méthodes destiné pour le contrôle et la caractérisation des matériaux et des structures, de façon à ne pas endommager leurs intégrités. En effet, il en existe diverses méthodes de contrôle non destructif utiliser pour contrôle des composites, parmi elles on peut citer :

- Radiographie X.
- Thermographie.
- Ultrasons.
- Les micro-ondes.

III.2 Radiographie

III.2.1 Rappels physiques

III.2.1.1 Définition des rayons X et γ [10]

Les rayons X et γ sont des ondes électromagnétiques de très courte longueurs d'onde (comprises entre environ 0.1 pm et 1000 pm). Ce sont des photons, sans charge ni de masse, se propage a la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s). Leur énergie peut varie de 1 KeV a 10 MeV environs. Ils sont des rayonnements très pénétrants, pouvant traverser la matière et leur pouvoir de pénétration dépend de la nature de la matière (le numéro atomique Z des éléments constituant la matière ou de sa masse volumique) et de leurs énergies.

III.2.1.2 Caractéristiques énergétiques [11]

On caractérise couramment ces rayonnements par l'énergie unitaire E des photons associés, exprimée en électronvolt (eV). Si l'on exprime E en MeV et la longueur d'onde λ en pm, on tire de la relation du photon :

$$E = h \nu$$

où h est la constante de Planck,

ν la fréquence de l'onde,

la relation pratique : $E = \frac{1,24}{\lambda}$

On notera ainsi que l'énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde, et Les énergies requises en contrôle non destructif se situent dans une gamme allant de **50 keV** à **20 MeV**.

III.2.1.3 Rayonnement électromagnétique [12]

La lumière est l'une des formes observable que prend une transmission d'énergie ultrarapide à travers l'espace. C'est une radiation décrite par une onde électromagnétique composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique

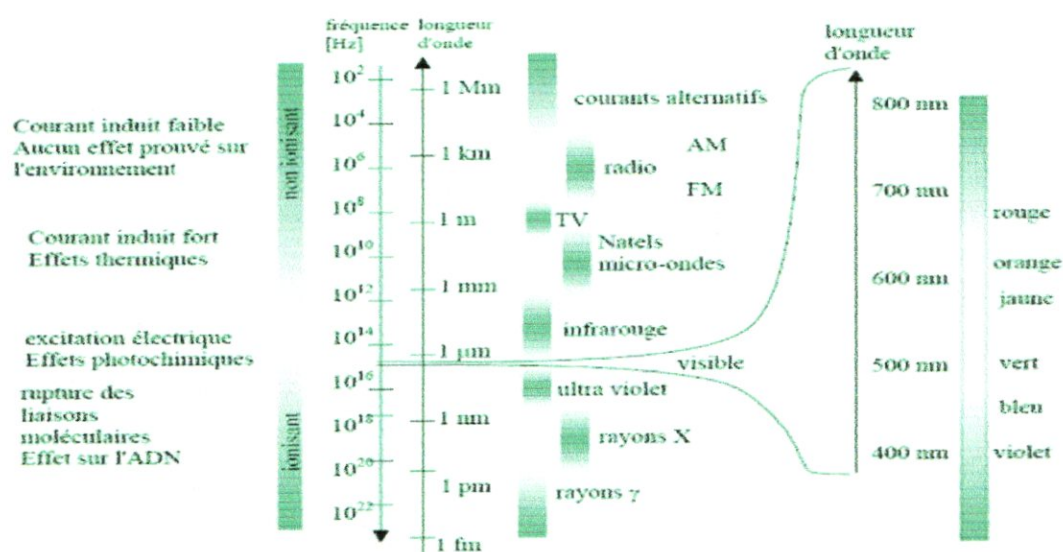


Fig III .1 Le domaine des ondes électromagnétiques

III.2.1.4 Propagation et interaction avec la matière

Les rayons X et γ se propagent en ligne droite et à la vitesse de la lumière dans le vide. L'atténuation d'un rayonnement monochromatique X ou γ , traversant un matériau résulte essentiellement de trois processus d'interaction : l'effet photoélectrique, l'effet Compton et la « production de paires » selon la nature du matériau et l'énergie de photon.

Effet Photoélectrique

Correspondant à un transfert complet d'énergie entre le photon incident et un électron conduisant à son absorption totale, et les photo-électrons sont émis dans la direction du photon incident (qui disparaît totalement) aux grandes énergies. La déviation est plus importante que l'énergie du photon incident est faible.

Effet Compton

Correspondant à un transfert partiel d'énergie du photon vers un électron, les photons sont déviés et les électrons activés provoquent une émission secondaire. Cette diffusion Compton devient prépondérante vers 1 MeV, vis-à-vis de l'effet photoélectrique et constitue le phénomène prédominant en radiographie industrielle.

La production de paires électron-positon

N'est pas un phénomène d'absorption vrai, la réalisation de la production exige une énergie du photon supérieure à deux fois l'énergie équivalente à la masse d'un électron $2 m_0 c^2 = 1,02 \text{ MeV}$. Pour les photons d'énergie supérieure à 5 MeV, cet effet devient prédominant. Le positon se recombine avec un électron en émettant deux photons de 511 KeV.

Ces trois types d'interaction expliquent le phénomène d'absorption des rayons X et γ par la matière (détection et visualisation des défauts), et le phénomène de diffusion due aux réémissions d'ondes de plus basse énergies que l'onde incidente. Ce dernier phénomène est très gênant en radiographie (dégradation de la qualité d'image). Il existe un autre type d'interaction limité aux rayons X de faible énergie; il s'agit de la diffraction sur les réseaux cristallographiques du matériau.

La loi d'absorption d'un rayonnement monochromatique incident d'intensité I_0 traversant un matériau homogène d'épaisseur x (cm) est de la forme :

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (\text{III-1})$$

avec : μ (cm^{-1}) coefficient d'absorption linéaire

III.2.2 Production des rayons X et γ

III.2.2.1 Génération des rayons X [10],[11]

Deux phénomènes bien distincts sont à l'origine de la production des rayons X :

L'émission d'un spectre continue :

Lorsqu'on bombarde un matériau cible, l'interaction électrons-cible produit un rayonnement de freinage correspondant à une émission d'un spectre continu, ce spectre comporte un seuil d'émission brusque du côté des courtes longueurs d'onde (λ_0). Empiriquement le maximum du spectre se produit pour λ_m de l'ordre $\frac{3}{2}$ de λ_0 .

L'émission des raies caractéristiques :

Au spectre du rayonnement de freinage se superpose un spectre de raies dont les longueurs d'onde, ne dépendent que de la nature de la cible. Ce sont les raies caractéristiques des atomes constituant la cible, certains atomes et sous l'action du bombardement électronique sont ionisés, le retour à un état énergétique plus stable se fait par un ensemble de transition électroniques accompagnées d'émission des photons. Ces derniers peuvent être très énergétiques.

III.2.2.2 Production des rayons γ

Les rayons γ sont issus du réarrangement de noyaux instables d'isotopes radioactifs au cours de leur désintégration.

Le contrôle non destructif utilise 4 types de radioéléments artificiels :

L'Iridium

C'est le radioélément le plus utilisé pour son grand spectre. On l'utilise sur des épaisseurs de matière allant de 5mm à 100mm d'équivalent en acier.

Le cobalt

Il est très utilisé pour la radiographie des matériaux de forte épaisseur ou très absorbant. Epaisseur de travail de 50mm à 200mm d'équivalent en acier.

Le thulium

Sert au control des métaux légers. Essentiellement adapté aux faibles épaisseurs, quelques millimètres d'aluminium ou équivalent.

Le césium

Produit de fission de l'uranium 235, peu utilisé à cause de son rayonnement monochromatique .même gamme de travail qu'avec l'Iridium.

III.2.3 Principe de la radiographie

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale. L'inspection consiste à faire traverser la pièce par un faisceau de rayons X ou γ , et à irradier un film placé derrière la pièce. La mise en évidence des défauts est assure par une variation de densité optique sur le radiogramme (film radiographique irradié et développé), suite aux déférence d'absorption des R-X ou γ entre une zone seine et une zone défectueuse, les zones les plus denses ou les plus épaisse apparaissent les plus claire sur le négatif obtenu.

Cette méthode de contrôle a l'avantage de pouvoir détecter des défauts de surface et des défauts internes.

III.2.4 La Radioscopie

La radioscopie consiste à examiner directement l'image radiographique captée par un écran fluorescent ou tout autre détecteur, conduisant à une image optique directement observable par l'opérateur. On utilise trois types de chaînes de radioscopie, les deux premiers étant les plus utilisées :

- Les systèmes avec intensifications d'image,
- Les systèmes avec détéctions,
- Les systèmes avec écran dit « ouvert »

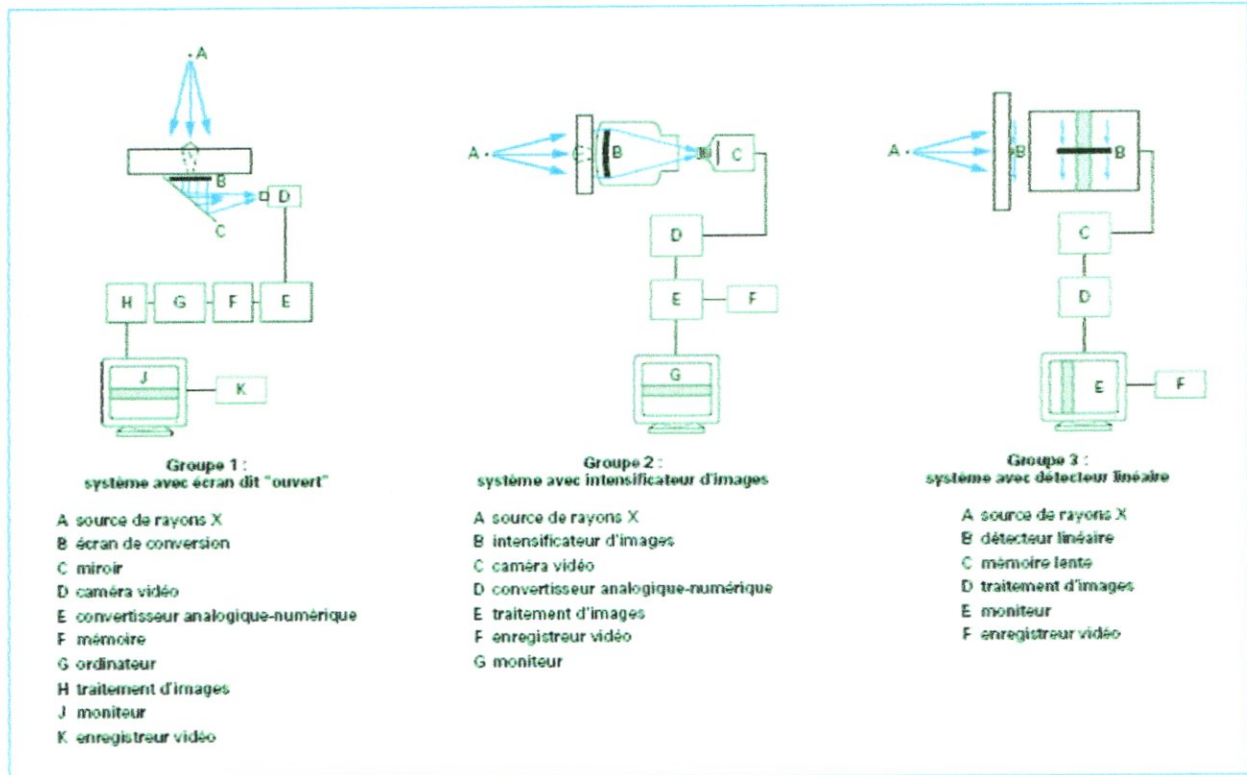


Fig. III.3 : schémas de principe des différents types de chaînes radioscopique

Après numérisation, l'image radioscopique est traitée par un système de traitement d'image doté des fonctions suivantes :

- Suppression du bruit de fond,
- Correction des niveaux de gris,
- Amélioration du contraste,
- Amélioration de la netteté des contours,
- Opérations géométrique (zoom, visualisation des niveaux de gris,...),
- Fonctions complémentaires (mesure de la longueur d'un défaut,...).

III.2.5 L'image latente

III.2.5.1 Enregistrement de l'image radiographique :

L'enregistrement de l'image radiographique peut se faire à l'aide d'un négatif appelé film, directement sur du papier ou par transfert de pigment. Le procédé le plus employé est l'utilisation d'un film radiographique.

- **film radiographique :**

Il est constitué d'une fine feuille de plastique transparent recouvert sur ses deux faces (parfois une seule) par de la gélatine contenant des grains de sels d'argent (bromure

d'argent). Les films sont classés en fonction de leur sensibilité. Celle-ci se déduit de la valeur de l'exposition nécessaire pour obtenir, après traitement, une densité nette égale à 2,0 par application de la formule suivante

$$s = \frac{10^{-2}}{x} \quad \text{sensibilité de la détection.}$$

III.2.5.2 Formation de l'image latente :

Lorsque le film radiographique est éclairé par les RX, il y a formation de l'image latente grâce à la propriété d'ionisation des Rx. Un électron qui a été arraché d'un atome sous l'effet des RX peut pénétrer dans un cristal de bromure d'argent et s'y trouver piéger. Le cristal de bromure d'argent ainsi touché sera transformé en germe d'argent invisible à l'œil (transformation de l'ion argent en atome d'argent).

III.2.6 Matériels et produits utilisés

III.2.6.1 Matériels :

1. Source de rayonnement :

Le choix d'une source est conditionné par les paramètres suivants : - disponibilité - possibilité d'installation - qualité des radiogrammes - prix de revient - pièces à radiographier (forme, épaisseur).

2. Générateur de tension :

Permet de régler la tension du tube, delà la qualité du rayonnement. La dureté ou le pouvoir de pénétration des rayons X croît précisément avec l'énergie cinétique des électrons touchant l'anticathode.

3. Casette :

Elles sont constituées de films et d'écrans renforçateurs.

- **Les écrans** : Il sont utilisés de manière à diminuer le temps de pose, c'est-à-dire d'augmenter artificiellement la sensibilité des films .Il existe deux types :

Les écrans métalliques (généralement en plomb) et les écrans fluorescents.

Les plus utilisés sont les écrans en plomb combinant les deux avantages suivants :

- Ils absorbent les radiations de basse énergie (rayonnements diffusés) ce qui améliore la netteté de l'image.

- Ils réduisent le temps de pose dans le cas où l'effet de renforcement par émission d'électrons est supérieur à l'atténuation du rayonnement primaire.

- Les films : Il existe deux types de films :

- Les films rapides D7 (temps de pose t)
- les films lents D4 (temps de pose $t' = 4 * t$).

3. Filtres :

Utilisés pour modifier la nature du rayonnement. Les épaisseurs des filtres en plomb varient de 1 mm à 3 mm. Us peuvent être situés entre la source et la pièce pour durcir le rayonnement et améliorer la qualité d'image pour des pièces épaisses.

4. Blocage :

Il est constitué d'une plaque de plomb (2 à 3mm) placée derrière le ou les films, son rôle est d'éviter que le rayonnement rétrodiffusé vienne impressionner le film.

5. Les cuves :

Elles sont en acier inoxydable ou en matériau synthétique, mais celles utilisées sont en acier inoxydable.

Cinq (05) cuves sont installées dans la chambre noire, placées dans l'ordre suivant : cuve de développement, cuve pour le bain d'arrêt ou pour le rinçage intermédiaire, cuve de fixation, cuve pour le lavage final, cuve pour la solution d'agent mouillant.

6. Sécheuse ;

Une enceinte thermostatée avec circulation d'air de haut en bas permet de sécher le film en un temps moins long.

7. Machine automatique (développeuse) :

Pour le traitement des radiogrammes ou le développement automatique.

8. Négatoscope :

La luminance du radiogramme éclairé doit être $> 30 \text{ Cd} / \text{m}^2$ (Cd=candella).

9. Densitomètre : nous donne la densité du film radiographique, il est vérifié et étalonné chaque jour.

III.2.6.2 Produits de développement :

1. révélateur :

Il existe sous forme de solution concentrée, qu'il faut dissoudre mais pas directement dans les cuves, ou sous forme de produits chimiques pulvérulents fournis en plusieurs sachets en plastique. C'est un milieu basique (PH = 10.6). Il agit grâce au phénomène d'oxydo-réduction. L'oxydation conduit à la libération d'électrons, qui a pour effet de faire grossir les germes pour obtenir des grains d'argent. Donc le but du révélateur est de transformer les grains impressionnés en argent métallique par attaque préférentielle de sites métastables.

2. Bain d'arrêt :

Il est constitué soit d'eau additionnée d'acide acétique, soit simplement d'eau renouvelée. Après le temps de révélation, le film est trempé dans le bain pour protéger le fixateur de la pollution par le révélateur.

3. fixateur :

C'est un milieu acide (PH = 4.5) généralement du Thiosulfate de Sodium. Il existe sous forme de solution concentrée ou sous forme pulvérulente. Il fixe les grains d'argent métalliques ; il élimine les sels d'argent non développés (les cristaux non irradiés) en les transformant en sel soluble, laisse l'argent sous forme d'image et durcit la gélatine.

4. L'eau :

Il élimine toutes traces de produits chimiques pouvant continuer de réagir avec le film. Le rinçage doit être soigné dans un bac avec renouvellement d'eau. Un bon rinçage améliore considérablement la durée de conservation du film.

5. Agent mouillant :

Le film est trempé dans un bac d'eau additionnée d'agent mouillant. Ce bain évite, durant le séchage, la formation de gouttes d'eau et par conséquent, des traces de calcaire sur le film.

6. Solution d'acide nitrique ou d'acide acétique glacial :

Utilisée pour le nettoyage des cuves en acier inoxydable. Le nettoyage se fait à chaque renouvellement des bains.

III.2.7 Domaines d'application :

C'est la méthode la plus difficile d'emploi mais dont les résultats spectaculaires élargissent les domaines d'application de la radiographie industrielle. Elle est utilisée dans la chirurgie, dans l'art et en génie civil mais plus dans les secteurs de l'industrie. Dans des unités de production, des produits sont tributaires de la radiologie industrielle ; parmi eux, citons : l'aéronautique, la construction navale, l'industrie chimique ou pétrolière, les centrales productrices d'électricité (hydraulique, thermiques à flamme ou nucléaires), les plates-formes de forage, la construction automobile, les pipelines, les matériaux composites, charpentes métalliques et les ancrages de téléphériques.

III.2.8 Avantages et inconvénients

III.2.8.1 Avantages :

- Détection de surface ou volumique dans tous les matériaux ;
- Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier variant de quelques micromètres à 600 mm (100 mm avec 450 kv, 600 mm avec un accélérateur de 10 Mev) ;
- Dimensionnement et identification possibles des défauts;
- Sensibilité de détection des défauts très élevée pour certaines techniques (appareils générateurs de rayons X à micro foyer et pièces minces) ;
- Conservation possible des radiogrammes plusieurs dizaines d'années ;
- Transportabilité (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radiographie gamma portatifs d'environ 20 kg : possibilité de radiographier jusqu'à 80 mm d'acier avec l'Iridium 192).

III.2.8.2 Inconvénients :

- La sensibilité de détection des défauts dépend des dimensions de la source et de son énergie, de la position et de l'orientation des défauts dans la pièce, de l'épaisseur de la pièce, de la sensibilité du film... ;
- Difficulté de localiser les défauts en profondeur ;
- Coûts de fonctionnement élevés (sources de rayonnement, entretien du matériel, films radiographiques, contrôles obligatoires, radioprotection...) ;
- L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite une formation des opérateurs de niveau élevé ainsi qu'une grande expérience.

III.2.9 contrôle des structures composites

La radiographie par neutron est plus efficace sur les matériaux composites à base de résine-carbone ou résine graphite.

La radiographie X est une application plus générale vis à vis des matériaux composites, en utilisant des liquides pénétrants opacifiants (cas des défauts débouchants).

- Cette méthode frontale ; non destructive permet de contrôler la répartition des fibres ainsi que le taux des renforts. Elle permet de détecter les parasites inclusions. On ne voit pas le délaminage.
- D'autre part elle offre la possibilité de visualiser l'endommagement des composites au niveau de

ses constituants ; observation fine : substance absorbante diffusée dans le matériau.

- Visualisation de l'endommagement : observation fine : substance absorbante diffusée dans le matériau.

Chapitre IV :
Le contrôle non destructif
par Ultrasons

IV.1 Introduction

Depuis de nombreuses années, les ondes ultrasonores de faibles amplitudes et de fréquences apparentant au domaine du Méga-Hertz sont largement utilisées dans l'industrie et en médecine. Le contrôle par ultrasons est un procédé de contrôle non destructif semblable aux technique radar ou sonar, consiste à engendrer une impulsion ultrasonore dans les matériaux et à observer les échos éventuels réfléchis par les discontinuités rencontrées.

IV.2 Rappels physiques

IV.2.1 Nature des ultrasons [11]

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures a la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 KHz (nettoyage) à plus de 100 MHz (microscopie acoustique, application électronique).

La gamme 1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel. Cela n'est pas un hasard car ces fréquences correspondent, pour les matériaux courants, à des longueurs d'onde ultrasonore de l'ordre du millimètre, valeur réalisant un bon compromis entre directivité, absorption, détectabilité des petits défauts, facilité de réalisation d'appareillages électroniques et de transducteurs fiables et économiques

IV.2.2 Position des ultrasons dans l'échelle des sons

Les ultrasons comme le sons, les infrasons et les hypersons sont les constituants du spectre sonore.



Fig. III.1 Domaine des ultrasons

IV.2.3 Les différents types d'ondes [11],[13]

Les ondes ultrasonores, vibrations élastiques de la matière, ont des propriétés liées aux caractéristiques élastiques du milieu de propagation. Ainsi, dans les liquides et les gaz, qui sont des milieux n'offrant aucune résistance au cisaillement, les ondes ultrasonores sont essentiellement des vibrations longitudinales, les particules matérielles se déplaçant, par rapport à leur position d'équilibre, parallèlement à la direction de propagation de l'onde, engendrant des fronts de compression-décompression, eux-mêmes perpendiculaires à cette direction. Ce type d'onde se retrouve dans les solides et est d'ailleurs le plus utilisé en pratique.

Toutefois, un autre mode, utilisant le cisaillement, peut exister : mode d'onde transversale pour lequel les vibrations des particules s'exercent perpendiculairement à la direction de propagation.

Ces deux types d'ondes, les plus couramment rencontrés en contrôle non destructif, sont des ondes de volume ; il est possible aussi de générer d'autres types d'ondes dont l'existence dépend en particulier de la configuration du support de propagation. Il y a tout d'abord les ondes de surface, ondes composites constituées à la fois par des déplacements longitudinaux et transversaux, et dont les plus connus et utilisées sont les ondes de Rayleigh ; d'autres modes sont possibles et connus : ondes rampantes de Love, ondes de Bleustein – Gulyaev. Lorsque le support a des dimensions de même ordre de grandeur que la longueur d'onde, cela génère des modes vibratoires particuliers : ondes de Lamb dans les tôles, il s'agit d'ondes dispersives avec mode de vibration symétrique ou antisymétrique ; ondes guidées dans les tiges et barres. Les ondes de Lamb sont utilisées industriellement pour le contrôle des tôles minces métalliques et de certains composites.

Les ondes longitudinales

Ce sont des ondes de compression, elles ont la particularité de se propager que dans les solides, la direction de vibration des particules est parallèle au sens de propagation de l'onde. La vitesse de propagation de ces ondes V_L est liée aux caractéristiques élastiques de matériau

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{IV.1})$$

avec E : module de Young ,
 ν : coefficient de poisson,
 ρ : masse volumique.

Les ondes transversales

Ce sont des ondes de cisaillement dont la direction de propagation est perpendiculaire au sens de vibration des particules. Elle ne se propagent que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement qui ne possède ni les liquides ni les gaz, leur vitesses de propagation est donnée par :

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (\text{IV.2})$$

Les ondes de surface (ondes de Rayleigh)

Elles sont le résultat de la superposition d'une onde longitudinale et d'une onde transversale de même fréquence déphasée de $\pi/2$, le mouvement vibratoire des particules est donc elliptique. Elles intéressent une faible épaisseur du matériau au voisinage de la surface libre, de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, et présentent une très grande sensibilité à toutes discontinuité de surface quelque soit son orientation.

La vitesse de propagation est d'environ 0.9 fois celles des ondes transversales

$$V_s = 0,9 \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = 0,9V_T \quad (\text{IV.3})$$

Les ondes de Lamb

Ces ondes sont aussi appelées ondes de plaques. Leur vitesse de propagation dépend de la fréquence.

IV.2.4 Propagation des ondes ultrasonores

Les principes fondamentaux du contrôle non destructif par ultrasons résident dans l'analyse de l'influence des défauts, du type localisés ou du type inhomogénéités de structure, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et diffraction sur les interfaces atténuation dans la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion, vitesse de propagation variables selon les directions.

Une bonne connaissance des phénomènes liés à la propagation des ultrasons est donc une base indispensable à la pratique de ce type de contrôle.

La réflexion et la réfraction : [14]

Concédons d'abord le couplage entre deux ondes libre se propageant dans deux milieux séparés par un dioptré (c'est-à-dire l'interface) et supposons que deux modes de propagation sont possibles dans chacun de ces milieux. La figure IV.2 donne la direction de propagation des ondes réfléchies et réfractées, suivant que l'onde incidente est longitudinale ou transversale, et la loi de Descartes s'écrit :

$$\frac{\sin i_L}{v_{1L}} = \frac{\sin i_T}{v_{1T}} = \frac{\sin r_L}{v_{2L}} = \frac{\sin r_T}{v_{2T}} \quad (\text{IV.4})$$

On désignant le milieu par l'indice 1 ou 2 et le mode de propagation par l'indice L ou T; les angles i (milieu 1) et r (milieu 2) sont pris avec la normale au dioptré. Cette loi s'écrit aussi avec $n = \frac{v_1}{v_2}$, indice de réfraction de second milieu par rapport au premier. Il en existe une autre expression tout à fait équivalente bien que d'écriture très différente : c'est le principe de Fermat selon lequel le temps mis par un rayon pour aller d'un point à un autre est un extremum.

Les ondes transversales sont plus lentes que les ondes longitudinales (d'environ un facteur 2).

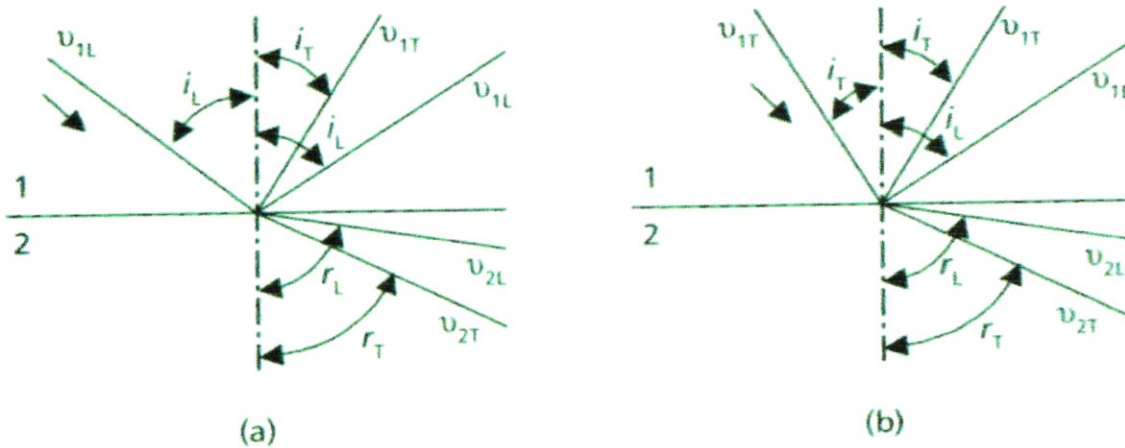


Fig. III.2 Réflexion et Réfraction :
Onde incidente longitudinale (a) ou transversale (b).

La diffraction

Lorsque un petit objet est frappé par une onde ultrasonore plane, il se comporte comme un émetteur d'onde sphérique suivant le principe de Huyghens. Ce phénomène est mis à profit pour la localisation des bords de fissures et le dimensionnement de celles-ci.

IV.2.5 Atténuation des ondes ultrasonores

L'amplitude d'une vibration, qui se propage dans un milieu, n'est pas constante durant sa propagation, l'atténuation de l'onde est toujours d'autant plus importante que la fréquence est élevée. Cette atténuation est provoquée par la conjonction de plusieurs facteurs :

L'absorption

C'est la conversion de l'énergie ultrasonore en chaleur à cause des frottement internes des molécules entre-elles, ce qui a pour conséquence une diminution non négligeable de l'énergie. Elle est prédominante dans les matériaux plastiques et synthétiques.

La diffusion

L'onde ultrasonore est réfléchiée ou dispersée par les discontinuités d'élasticité existants entre les joints de grains constituant le matériau, la diffusion est d'autant plus importante que les hétérogénéités sont grandes et elle augmente aussi avec la fréquence.

La divergence du champ ultrasonore

Du fait de la divergence du faisceau, l'énergie répartie par unité de surface ira en décroissant au fur et à mesure que l'on s'éloignera de la source.

IV.3 La production des ultrasons

La méthode la plus communément employée pour générer des ultrasons utilise le phénomène de « piézo-électrique », la piézoélectricité est la propriété réversible de certains matériaux de se déformer sous l'action d'un champ électrique.

Cependant, il existe d'autres méthodes pour lesquelles la génération des ultrasons se fait à la surface de la pièce elle-même par tout moyen susceptible d'activer les particules de milieu (forces électromagnétiques, impulsion thermique, ablation laser).

IV.3.1 Palpeurs piézoélectrique

De façon générale, un palpeur ultrasonore comporte, outre la pastille piézoélectrique circulaire ou rectangulaire taillée dans le matériau piézoélectrique choisi, dont les faces sont métallisées et raccordées à un connecteur électrique, une face avant de protection et de couplage et un bloc amortisseur arrière pour, à la fois, dissiper l'énergie rayonnant vers l'arrière et moduler

le spectre ultrasonore par amortissement de la résonance mécanique de la pastille transductrice. Une bobine d'accord ou un transformateur adaptateur d'impédance peut être inclus dans le boîtier, constituant l'ensemble du palpeur.

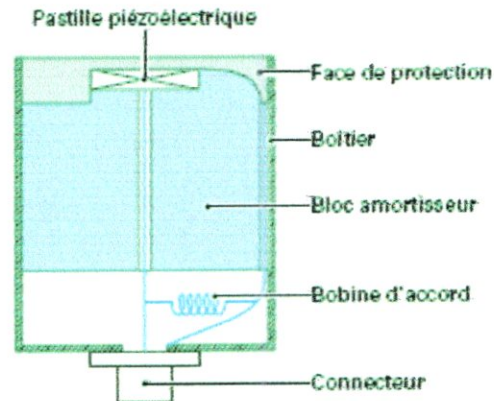


Fig.III.3 Structure d'un palpeur

Les 4 types de palpeur les plus utilisés dans l'industrie sont les suivants :

Palpeur droit cylindrique, palpeur d'angle à sabot, palpeur droit focalisé, palpeur droit double avec émission et réception séparées (palpeur SE). Certaines applications particulières font appel à des palpeurs spéciaux tels que les palpeurs droits rectangulaires, les palpeurs à focalisation cylindrique et les barrettes multi-palpeur.

IV.3.2 Palpeurs EMA

Ce nouveau type de transducteur met en œuvre les interactions champ magnétique-courant de Foucault induit dans un métal pour créer des forces donnant naissance à des vibrations ultrasonores, d'où son appellation de palpeur électro-magnéto-acoustique.

IV.3.3 palpeurs lasers

Le principe de génération des ultrasons par laser consiste à exciter la surface du produit avec un faisceau laser. Les ondes ultrasonores générées ont une directivité moins précise que celle obtenue par palpeurs piézoélectrique.

IV. 4 Techniques et méthodes de contrôle par ultrasons :

Pour assurer le passage des ultrasons entre le traducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre les deux un milieu dit de couplage.

IV.4.1 Techniques de contrôle par ultrasons :

Deux techniques existent pour assurer ce couplage.

- **contrôle par contact**

Le transducteur est directement placé sur la pièce à contrôler. La liaison acoustique est généralement assurée par un film de couplant, généralement une graisse ou une

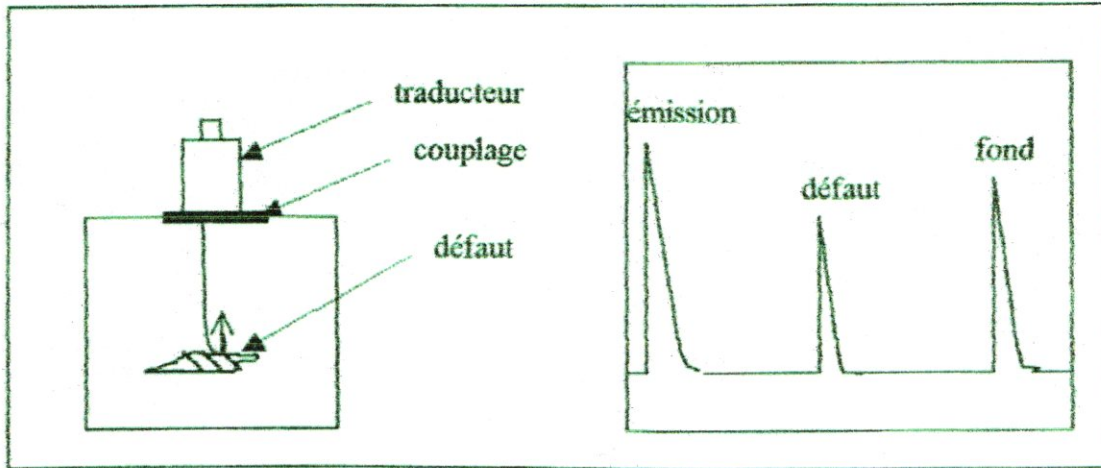


Fig. III.4: Contrôle par contact

- **Contrôle en immersion**

Le transducteur est situé à une certaine distance de la pièce, le couplage est assuré par un liquide, généralement de l'eau (fig. 11-13).

Cette technique s'inscrit dans le cadre de ce mémoire.

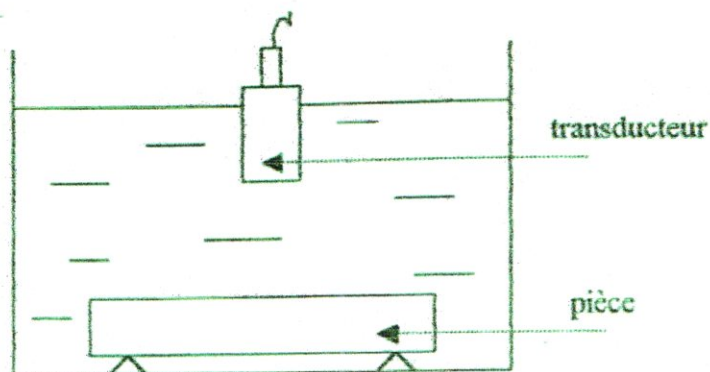


Fig.III.5: Contrôle en immersion.

Ces deux techniques donnent la possibilité de détecter les délaminages, porosités, les défauts perpendiculaires au faisceau ultrasonore dans les matériaux composites.

IV. 4. 2 - Méthodes utilisées en contrôle :

L'évolution du matériel, en particulier l'utilisation des impulsions brèves a permis de faire évoluer les méthodes par transmission. Parmi ces méthodes, on trouve :

- **Méthode de l'écho de fond** : Cette méthode est utilisée lorsque la pièce présente une

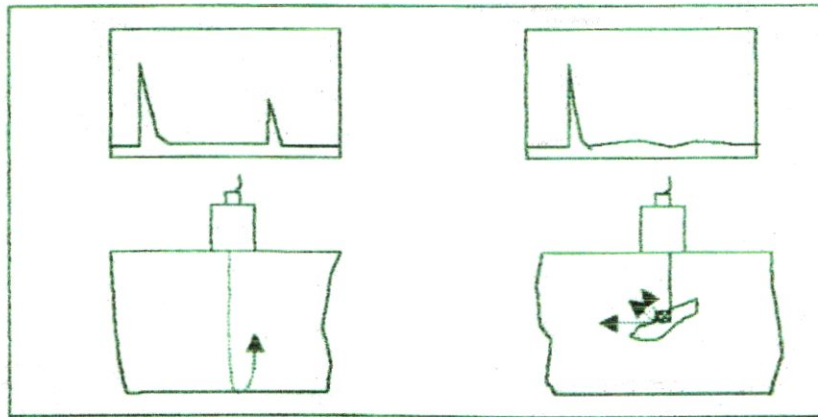


Fig.III.6 : Méthode de l'écho de fond.
surfac opposéc parallèlement à la surfacc d'exploitation.

- **Méthode du miroir (double transmission et réflexion sur un miroir)** :

Le procédé est surtout utilisé sur des systèmes de contrôle automatique de matériaux composites.

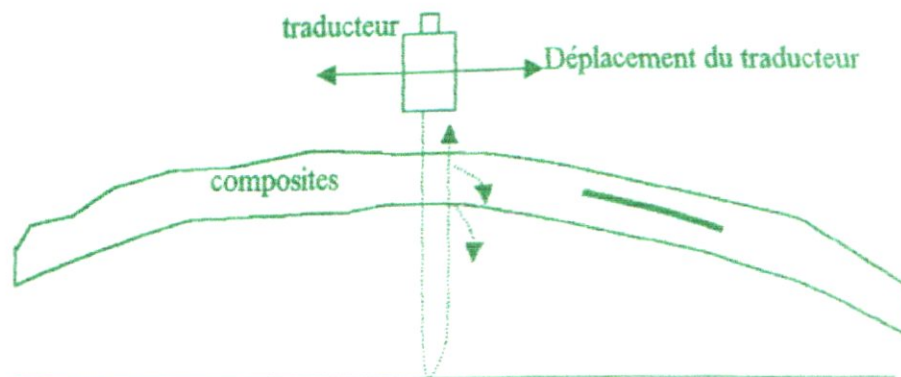


Fig. III.7 : Méthode du miroir.

IV.5 Matériels et produits utilisés

IV.5.1 matériels :

Les éléments indispensables à la pratique du contrôle ultrasonore sont presque systématiquement les mêmes.

a- Dispositif électronique d'excitation du palpeur :

Il est capable de fournir une impulsion brève de tension importante (de 50 à 300 V). ces impulsions sont par exemple réalisées parla décharge d'un thyristor ou par l'utilisation de transistor de puissance CMOS, cette excitation doit être répétée à intervalles réguliers qui définissent la fréquence de récurrence de soudage, de 50 à 500 MHZ en moyenne.

b- Palpeur émetteur piézoélectrique :

Dans la plus part des temps, il est relié à l'excitation par un câble ; les câbles et leur connexion ont une véritable importance, compte tenu des fréquences de quelques MHZ, on utilise en règle générale des câbles coaxiaux d'impédance adaptée à des sorties sur 50 ou 75 Ω . Le manque de productibilité d'un soudage peut tenir à un changement longueur ou de caractéristiques d'un câble de connexion.

c- Système d'amplification du signal électrique :

Le signal fourni par un palpeur piézoélectrique est de très bas niveau (quelques mV), pour le rendre exploitable, il est donc nécessaire de l'amplifier par une cascade de dispositifs électriques.

Le facteur d'amplification est classiquement de 60 dB, soit une multiplication par mille. Dans les cas les plus difficiles une amplification plus importante est possible et peut atteindre des amplifications de 90 à 100 dB, sans bruits électroniques excessifs, mais il faut alors prendre garde aux effets d'antenne dus aux câbles.

d-Dispositif de représentation du signal :

Le signal issu de l'amplificateur a une forme sinusoïdale amortie qui peut être exploitée telle qu'elle est représentée sur l'oscilloscope, ce qui permet éventuellement des analyses fines. Cette représentation a l'inconvénient, suivant la phase de l'ultrasonore, de représenter son maximum en signe (+) ou (-) de façon imprévisible, or une partie des interprétations des signaux ultrasonores repose sur la comparaison des maximums des signaux. C'est pourquoi, le plus fréquemment, le signal issu de l'amplificateur est redressé puis filtré de façon à n'en conserver que l'enveloppe.

IV.5.2 produits :

- **Le couplant :**

Film d'eau (parfois additionnée à des produits divers, tel que la colle de tapissier), d'huile, de graisse, etc. ou une colonne de liquide qui assure la transmission des ultrasons entre le palpeur et la pièce.

- **Eau :** dans le cas du contrôle par immersion la pièce est plongée dans un bain d'eau pour assurer la propagation de l'onde ultrasonore.

- **blocs d'étalonnage :**

Il existe deux types d'étalons :

-Les étalons avec défauts artificiels

-Les étalons avec défauts naturels.

les premiers étalons représentent des avantages sur les autres : facilité d'implanter le défaut dans la zone désirée, facilité de dimensionner le défaut, facilité également pour l'orienter ou reproduire de manière faible.

Cependant les défauts artificiels présentent l'inconvénient majeur de ne pas présenter fidèlement les défauts réels.

IV.6 Réglage du matériel :

Le réglage de la vitesse de balayage peut être réalisé avec un bloc de référence ou sur une partie de la pièce présentant des surfaces parallèles.

Les réglages de l'amplification et de la puissance sont effectués afin de permettre :

- de déceler dans le volume contrôle des indications égales au domaine de prise en compte.
- de caractériser en amplitude des indications selon la méthode retenue.

Dans la mesure où l'appareillage le permet, la puissance à l'amplification et à rémission doivent être réglées de façon à donner la zone de silence la plus faible possible dans les conditions d'examen. Ces réglages doivent être exécutés :

- Au début et à la fin de chaque séquence d'examen.
- Chaque fois que l'opérateur soupçonne une dérive.
- Régulièrement en cours d'examen toutes les deux heures.

IV.7 Détection des défauts dans les structures composites par ultrasons :

A l'interface entre deux milieux différents ; interface matériau sain-défaut, il y a réflexion des ondes ultrasonores.

La détection de ces réflexions permet de contrôler la pièce.

Le Principe :

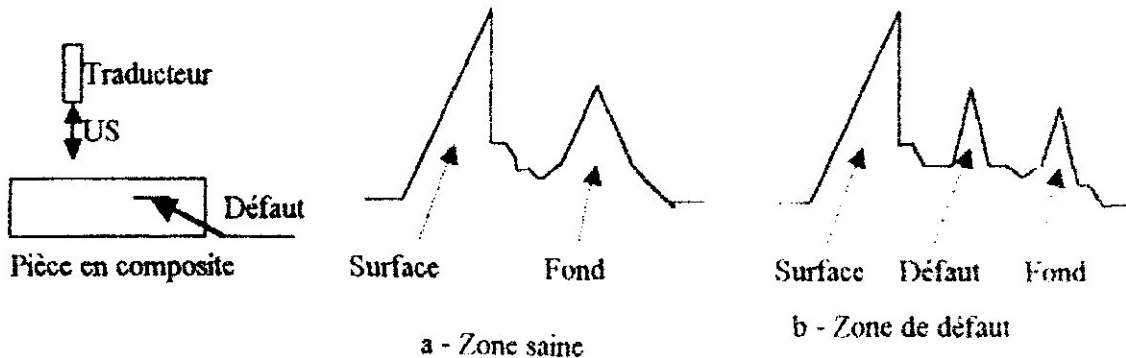


Fig. III.8 : Principe de détection de défauts par ultrasons.

Lorsque le matériau est sain, l'oscilloscope ne présente que le pic de surface et le pic de fond. Par contre s'il existe un défaut dans le matériau il provoque une réflexion de l'onde ultrasonore qui se présente par la présence d'un troisième pic (fig. III.8.b) situé entre les deux pics.

La position de l'écho dû au défaut par rapport à l'écho de surface ou de fond permet de déterminer la profondeur du défaut.

Cette méthode (ultrasons) permet de détecter les défauts suivants ;

- **Les délaminages :**

Un délaminage est situé entre deux plis d'un matériau composite, provoquera la réflexion du faisceau US et sera détecté si la surface de réflexion est suffisante.

- **Les défauts de reboutage :**

Ils sont caractérisés par un manque de tissu dans un pli.

La réflexion d'une onde ultrasonore sur chaque pli permet la détection d'un défaut de reboutage.

Un défaut ne sera détecté que si l'amplitude du pic dû à la réflexion sur ce défaut est supérieure à celle des pics dus aux réflexions sur les couches de tissu.

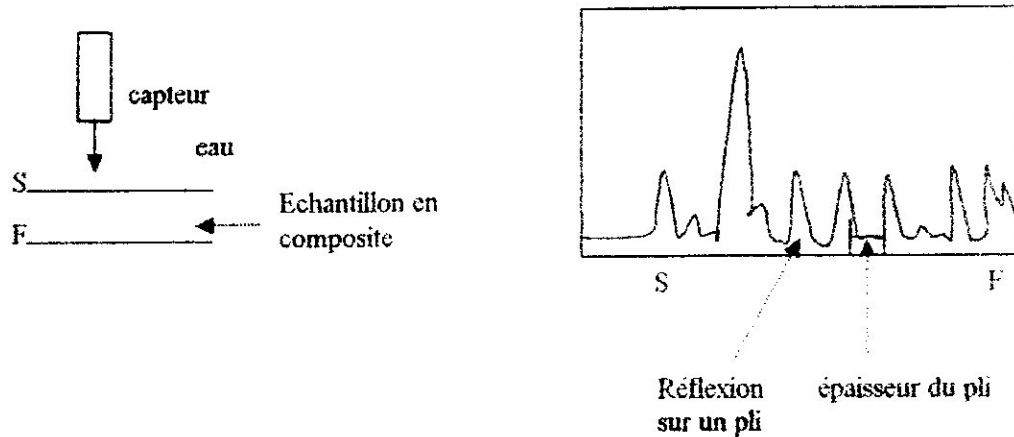


Fig. III.9 : détection d'un défaut de raboutage par ultrasons.

- **Les porosités** : On distingue deux types :

Porosités non réparties : elles sont détectées par l'apparition d'un écho après l'écho d'entrée correspondant à la réflexion sur l'interface matériau sain - zone de porosités.

Porosités réparties : sont difficiles à détecter car lorsque le taux de porosité dépasse 1% l'onde s'atténue rapidement. Il est préférable d'utiliser une base sur l'absorption d'un rayonnement comme la tomodynamétrie.

IV.8 Champ d'application

Le champ d'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, outre bien entendu le domaine médical, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques.

Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux et assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, béton ; cela s'effectue lentement, eu égard aux difficultés pratiques rencontrées et dues à la nature même de ces produits à structure peu homogène et anisotrope.

Il faut rappeler aussi qu'indépendamment de la défautologie, les ultrasons sont très employés pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les textures, les profondeurs de traitements thermochimiques superficiels sur les aciers, et enfin l'estimation des contraintes mécaniques.

IV.9 Évolution :

L'évolution du contrôle ultrasonore va vers un plus grand recours à l'automatisation des opérations, avec l'objectif de simplifier, de fiabiliser les procédures, d'accroître la reproductibilité et la productivité des essais. Cela est rendu possible grâce aux progrès du matériel et des moyens de traitement de l'information. Il n'en reste pas moins que la qualification du contrôleur reste primordial pour les raisons exprimées plus haut.

Notons enfin le développement de l'utilisation en laboratoire d'un nouvel outil d'investigation et d'étude de la microstructure des matériaux :

Le microscope acoustique utilisant de très hautes fréquences ultrasonores, ce qui conduit à un fort pouvoir de résolution (quelques micromètres) accompagné malheureusement d'une faible pénétration des ondes dans la matière (quelques dixièmes de millimètre).

IV.10 Avantages et inconvénients

IV.10.1 Avantages :

- Examen volumique ;
- Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forgé) ;
- Haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore) ;
- Localisation et dimensionnement des défauts ;
- Détection instantanée, se prête bien à l'automatisation ;

IV.10.2 Inconvénients :

- Méthode impliquant un très haut niveau de technicité ;
- Sensible à la géométrie (forme, rugosité, zones mortes) ;
- Eblouissement sous la surface (zone de silence) ;
- Sensible aux effets structure / anisotropie ;
- Assujetti à un couplage pièce / traducteur ;

- Nécessite absolument l'utilisation de blocs de référence difficiles à fabriquer ;
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les différents types d'ondes ultrasonores et les différentes méthodes de contrôle par ultrasons. Le choix d'une méthode ou du type d'onde et les autres paramètres de la théorie des ultrasons.

Dans l'industrie, le contrôle par ultrasons est souvent accompli par l'autre type de méthodes non destructif, la radiographie par exemple, malgré ses inconvénients elle trouve une forte place de la part de son principal caractère qui est la visualisation des défauts offrant un outil de travail facile à manipuler.

Chapitre V :

Etude expérimentale

V.1 Préparation des échantillons :

La réalisation des échantillons a eu lieu suite à un stage effectué au sein de la compagnie AIR ALGERIE, au niveau de l'atelier "plastique et composites", qui est un atelier destiné à la maintenance et à la réparation des compartiments composites de l'avion.

Les échantillons sont constitués d'une matrice en résine époxyde et de renforts en fibres de verre, et de carbone.

Ils sont différenciés par le type de renfort, la structure de la pièce (stratifié ou sandwich), l'orientation des fibres, la forme de nid d'abeille, et par les épaisseurs des couches. Les stratifiés constitués de fibres de verre ou fibre de carbone, comportons 14 à 16 plis, et les stratifié des échantillons sandwiches comporte 3 à 5 plis de verre et de Kevlar.

La réalisation de nos échantillons a nécessité certaines opérations préliminaires. Une fois que, les couches unidirectionnelles prêtes, il fallait les collées en alternant les couches les unes sur les autres. Pour cela la première couche à 0° est posée sur un nylon, sur quoi sont tracés des carrés de 0° et 45° pour l'orientation des couches. Puis la résine est répartie sur toute la surface en prenant soin de diriger la résine dans le sens des fibres pour ne pas les affaiblir, puis poser par la suite la deuxième couche à 45° et répartir la résine ainsi de suite jusqu'à la 15^{ème} couche. (épaisseur 4.3mm)

Les différents tissus utilisés pour La réalisation des échantillons sont :

Le perforé :

Comme son nom l'indique ; c'est un tissu qui contient de minuscules perforations (des trous) qui ont pour rôle de laisser passer à travers ce nylon le surplus de résine contenu dans l'échantillon.

Tissu d'arrachage :

C'est un tissu qui évitera le collage des échantillons avec l'ensemble des tissus lors de la séparation.

Tissu absorbant :

Son rôle est d'absorber la quantité de résine supplémentaire et de la piéger pour qu'il n'y ait pas de débordement.

Pour obtenir deux types des stratifiés différentes on a décidé de les traitées différemment, l'une sous vide et l'autre laisser à l'aire libre.

1- L'échantillon laissé à l'aire libre a été juste couvert avec un nylon (après avoir mis tous les tissus), puis un poids a été placé sur des parties de l'échantillon pour simuler des défauts de délaminage.

2- Pour l'échantillon traitée sous vide, et il été branchée avec une pompe qui va aspirer toutes les bulles d'aire contenues dans la pièce (échantillon sans défauts).

V.2.Simulation des défauts [09]

La fabrication de ces échantillons s'effectue en deux étapes. La première consiste à réaliser des pièces monolithiques et sandwiches sains. La deuxième étape consiste à fabriquer des pièces avec défauts.

Le de défauts recherché, en fabrication ou en service est donc de nature différente suivant le type de matériau. Pour les monolithiques, il s'agit principalement de détecter des délaminage, des bulles, des impact. Pour les sandwiches en plus des éléments cités précédemment, on peut rechercher des défauts de collage à l'interface peau-âme ou des défauts à l'intérieur de l'âme.

Les défauts simulés dans nous échantillons sont :

- **Le Délaminage (ou clivage)**

Origine : Décohésion entre deux couches du stratifié

Forme : Défaut plan, parallèle aux couches.

Position: Aléatoire.

Les délaminages peuvent apparaître dans des structures stratifiées monolithiques, dans la peau de structures sandwiches;

- **L'OUBLI DE SEPARATEUR**

Origine: Non retrait du film protecteur lors du drapage des couches.

Forme : Défaut plan, parallèles aux strates.

Position: Aléatoire.

Il existe divers types de séparateurs. Les séparateurs en papier silicone risquent généralement de conduire à des délaminages francs. Les séparateurs polyéthylènes sont souvent difficiles à détecter car peuvent fondre et se mélanger à la résine lors de la polymérisation.

- **L'inclusion**

Origine: Matériau étranger aux fibres et à la résine.

Forme : Aléatoire.

Position: Aléatoire.

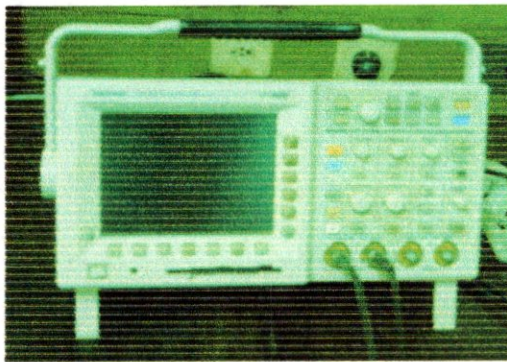
Il peut s'agir par exemple d'inclusions métalliques (morceaux de broche) dans le cas du tissage tridimensionnel.

- **les défauts de collage aux interfaces nida-peau :**

Les défauts de collage sont des absences de liaison entre le revêtement et le nida ou entre deux peaux;

V.3 Matériels utilisés

V.3.1 Matériels utilisés pour les ultrasons



FigV.1 oscilloscope numérique

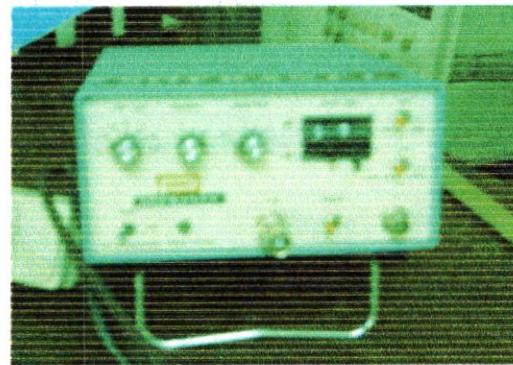


Fig. V.2 générateur émetteur- récepteur

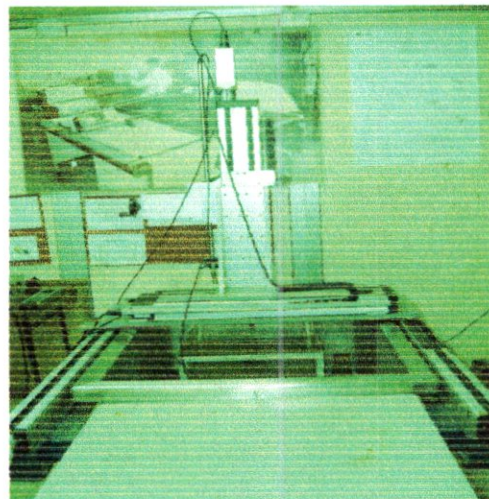


Fig. V.3 Cuve ultrasonore

V.3.2 Matériels utilisés pour la radioscopie

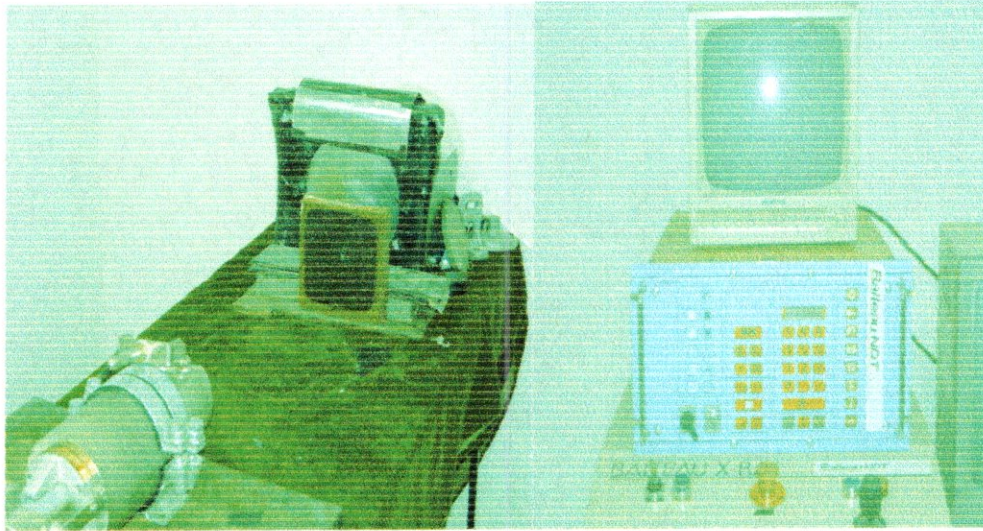


Fig. V.4 Chaîne radioscopique

V.4 Contrôle par ultrasons

Dans cette partie, nous présentons les échantillons qui ont été contrôlés par ultrasons.

V.4.1. Pièces à contrôler :

- 1^{er} échantillon (04mm): avec un défaut de délaminage

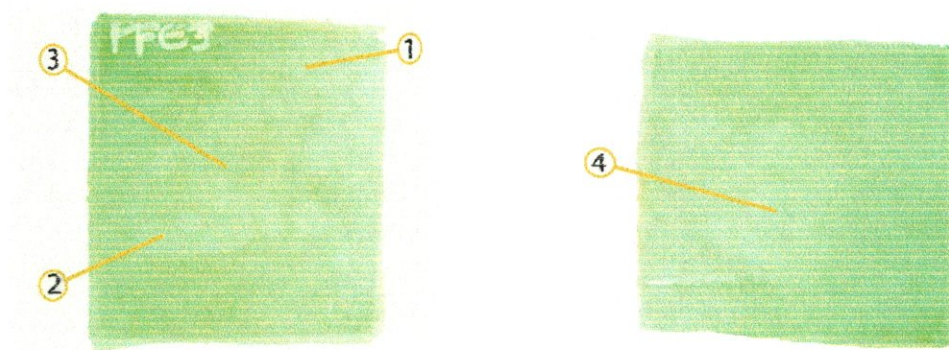


Fig. V.5 stratifié verre/époxy (épaisseur 04mm)

- 2ème échantillon (04.3mm)

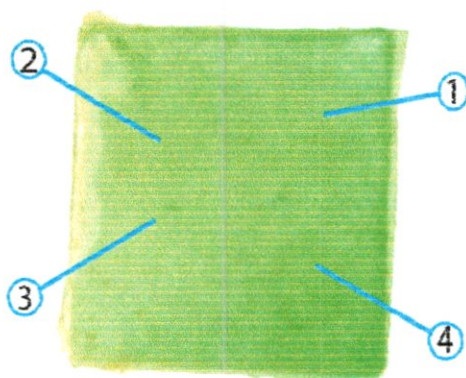


Fig .V.6 stratifié verre/époxy (épaisseur 04.3mm)

V.4.2 Résultats obtenus :

Pièce 01: (avec un défaut de délaminage)

(Épaisseur $\approx 4\text{mm}$)

Transducteur utilisé :

$f_c = 2.25\text{ MHz}$

Nombre de points = 500

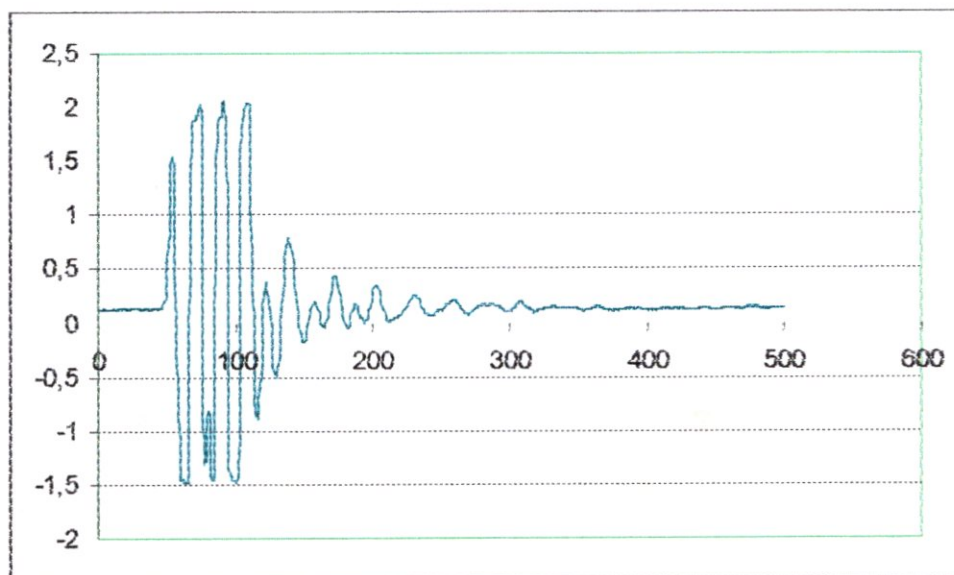


Fig .V.7 Oscillogramme de la pièce 01.
Echo de la face avant. Zone saine sans défaut.

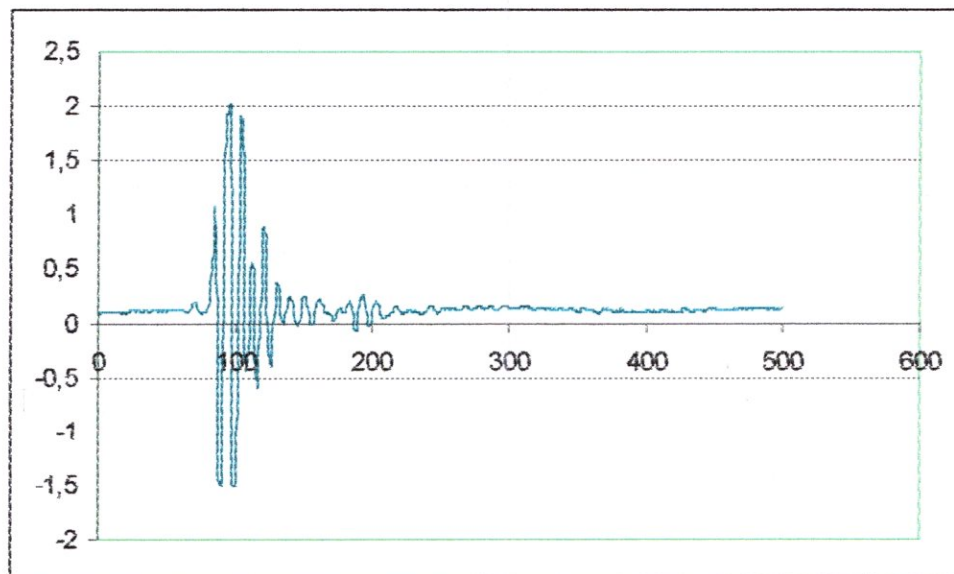


Fig. V.8 Oscillogramme de la pièce 01.
Echo de défaut (manque de collage) situé au point 120
et l'écho de face arrière au point 200.

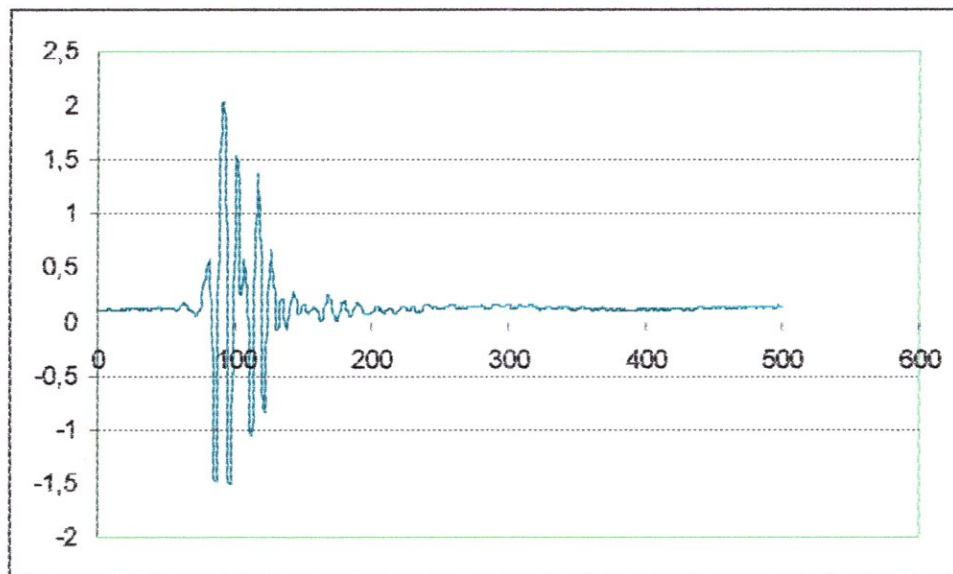


Fig.V.9.Oscillogramme de la pièce 01.
Echo de défaut (manque de collage) situé au point 120
et absence de l'écho de face arrière.

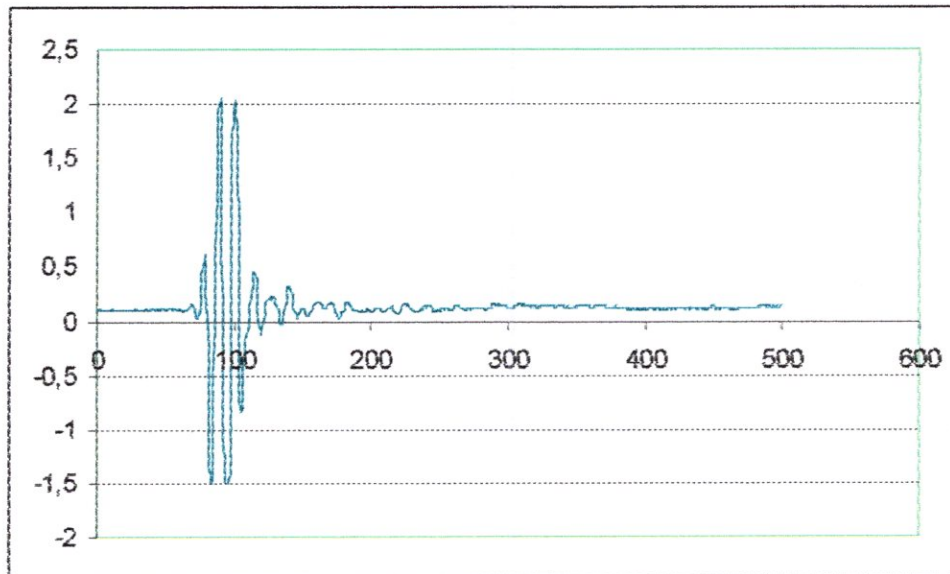


Fig. V.10 Oscillogramme de la pièce 01.
Echo de défaut (manque de collage) situé au point 120 et
Absence de l'écho de face arrière.

Pièce 02 :(avec un défaut de délaminage)
(épaisseur $\approx 4.3\text{mm}$)

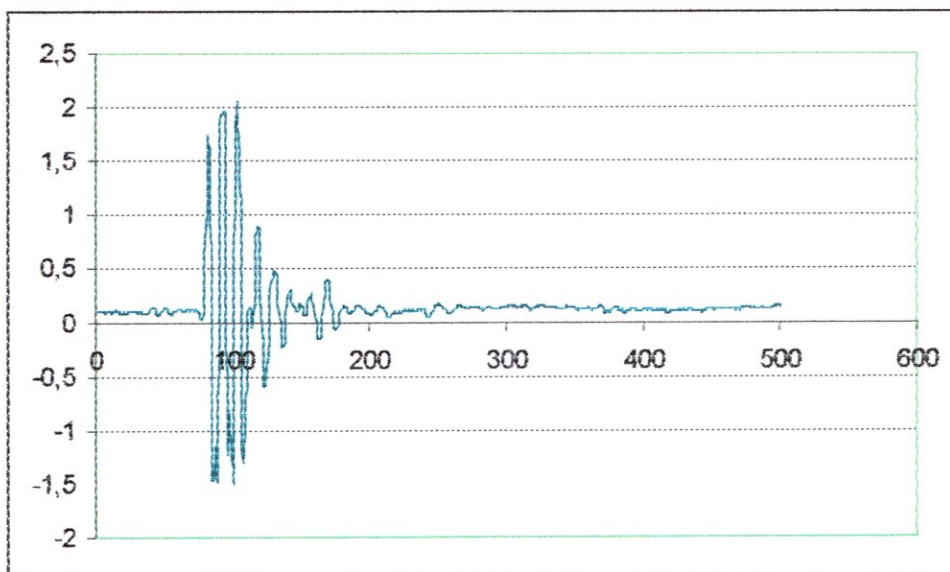


Fig. V.11. Oscillogramme de la pièce 02.
Echo de défaut de délaminage situé au point 110
et écho de face arrière au point 160.

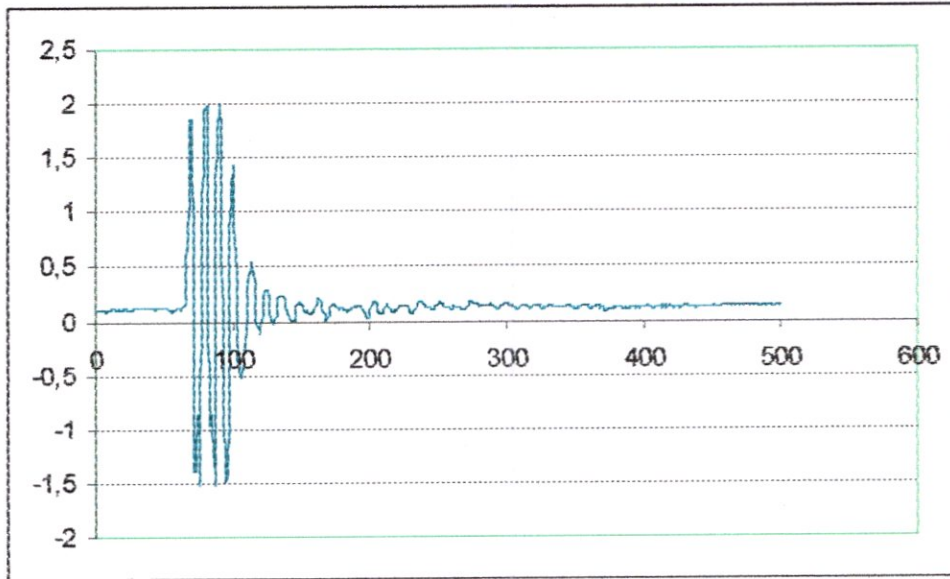


Fig. V.12 Oscillogramme de la pièce 01.
Echo de la face avant.

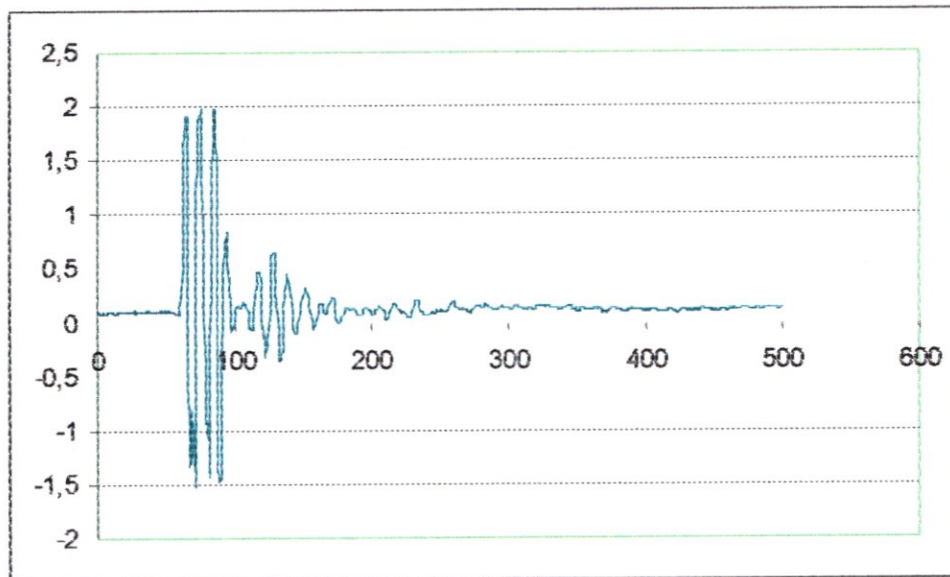


Fig. V.13 Oscillogramme de la pièce 02.
Echo de défaut de délaminage situé au point 120
et absence de l'écho de face arrière.

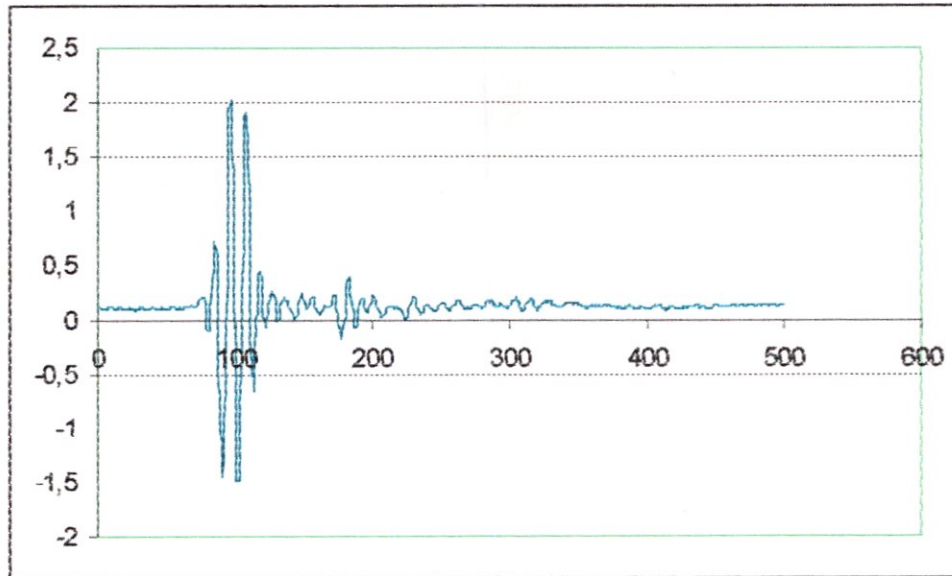


Fig.V.14 Oscillogramme de la pièce 02.
Écho de la face avant
Et écho de face arrière.

V.4.3 Interprétation :

Il faut d'abord signaler que les matériaux composites présentent une forte atténuation des ondes ultrasonores d'où l'utilisation de transducteurs ultrasonores de forte puissance et de basse fréquence (quelques kHz jusqu'à 1MHz). Par ailleurs, les deux échantillons d'épaisseurs respectivement 4mm et 4.3mm, nécessitent des transducteurs ultrasonores de haute résolution donc de fréquence élevée (de l'ordre de 5MHz jusqu'à 10MHz). Ces deux remarques contradictoires nous ont poussé à choisir un compromis entre ces deux plages de fréquences pour donner un transducteur de 2.25 MHz.

A travers les résultats obtenus, nous pouvons conclure que ce type de matériau peut être contrôlé par ultrasons. En effet, les oscillogrammes obtenus par l'examen des pièces 1 et 2 ont montré clairement l'apparition d'écho de défaut situé entre l'écho de la face arrière et l'écho de la face avant. Ceci est montré par les figures V.8, V.9, V.10, V.11 et V.13. Les autres figures montrent les zones saines des deux pièces.

V.5 Contrôle par radiographie

V.5.1. Pièces à contrôler

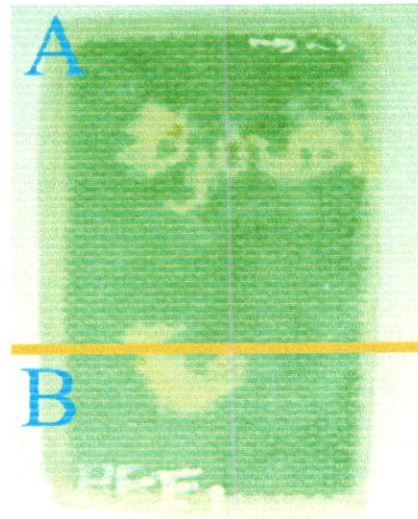


Fig.V.15.Sandwich (l'existence d'eau dans le nid d'abeille)

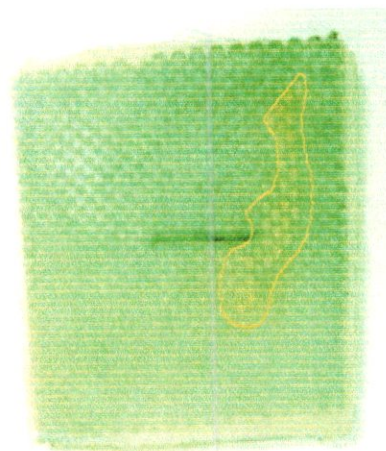


Fig.V.16.Sandwich (l'existence d'eau dans le nid d'abeille)

V.5.2 Les résultats obtenues :

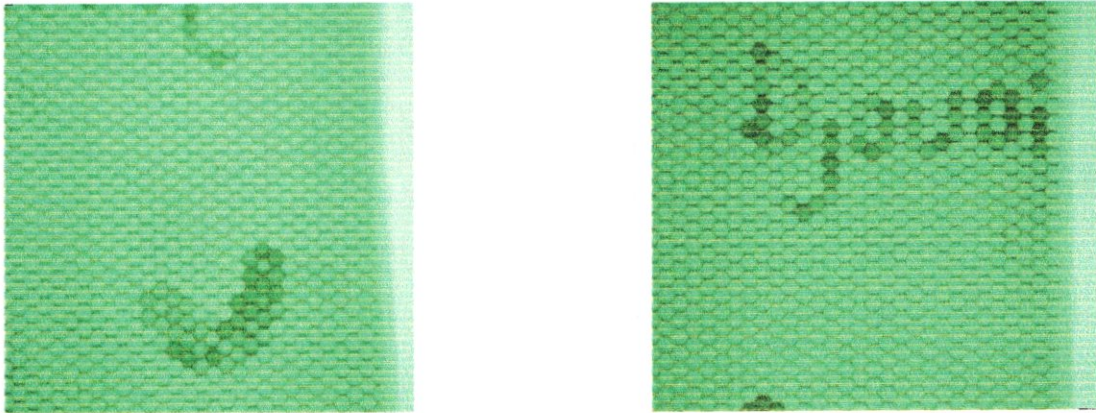


Fig. V.17. Image radioscopique Sandwich (détection d'eau)

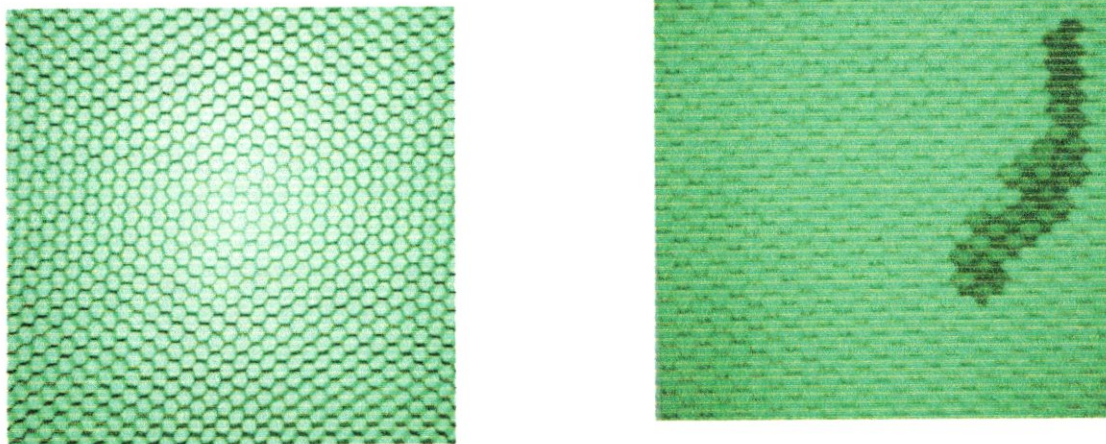


Fig. V.18. Image radioscopique Sandwich
(Détection d'eau + structure de nid d'abeille)

V.1 préparation des échantillons :

La réalisation de nos échantillons a nécessité certaines opérations préliminaires. Une fois que, les couches unidirectionnelles prêtes, il fallait les collées en alternant les couches les unes sur les autres. Pour cela la première couche à 0° est posée sur un nylon, sur quoi sont tracés des carrés de 0° et 45° pour l'orientation des couches. Puis la résine est répartie sur toute la surface en prenant soin de diriger la résine dans le sens des fibres pour ne pas les affaiblir, puis poser par la suite la deuxième couche à 45° et répartir la résine ainsi de suite jusqu'à la 15^{ème} couche. (épaisseur 4.3mm)

Les différents tissus utilisés pour La réalisation des échantillons sont :

Le perforé :

Comme son nom l'indique ; c'est un tissu qui contient de minuscules perforations (des trous) qui ont pour rôle de laisser passer à travers ce nylon le surplus de résine contenu dans l'échantillon.

Tissu d'arrachage :

C'est un tissu qui évitera le collage des échantillons avec l'ensemble des tissus lors de la séparation.

Tissu absorbant :

Son rôle est d'absorber la quantité de résine supplémentaire et de la piéger pour qu'il n'y ait pas de débordement.

Pour obtenir deux types des stratifiés différentes on a décidé de les traiter différemment, l'une sous vide et l'autre laisser à l'air libre.

1- L'échantillon laissé à l'air libre a été juste couvert avec un nylon (après avoir mis tous les tissus), puis un poids a été placé sur des parties de l'échantillon pour simuler des défauts de délaminage.

2- Pour l'échantillon traité sous vide, et il été branchée avec une pompe qui va aspirer toutes les bulles d'air contenues dans la pièce (échantillon sans défauts).

V.2 Contrôle par ultrasons

V.2.1 Les pièces a contrôlés :

- 1^{er} échantillon (04mm): avec un défaut de délaminage

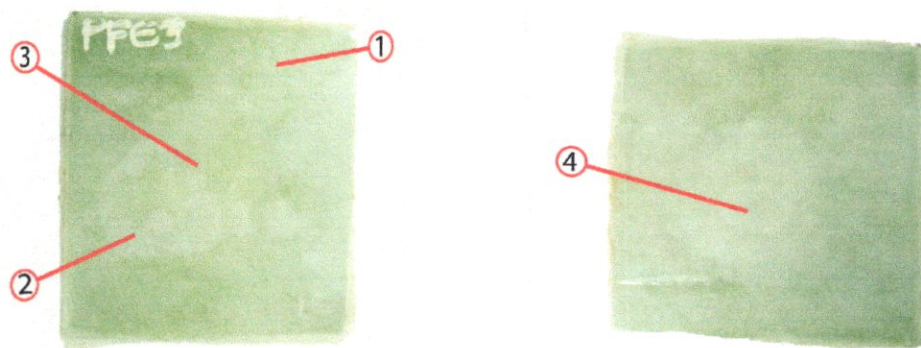


Fig .V.1 stratifié verre/époxy (épaisseur 04mm)

- 2^{ème} échantillon (04.3mm)

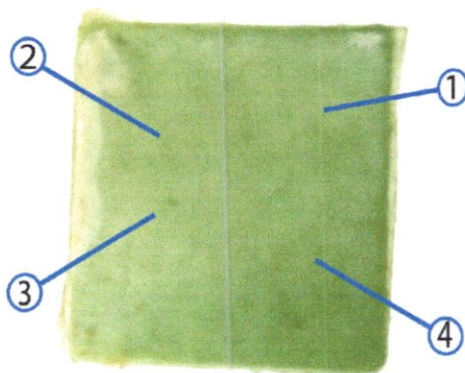


Fig .V.2 stratifié verre/époxy (épaisseur 04.3mm)

V.2.2 Les résultats obtenue :**La Pièce 01:** (avec un défaut de délaminage)**(Épaisseur $\approx 4\text{mm}$)**

Transducteur utiliser :

 $f_c = 2.25\text{ MHz}$

Nombre de points = 500

TEK 0 :

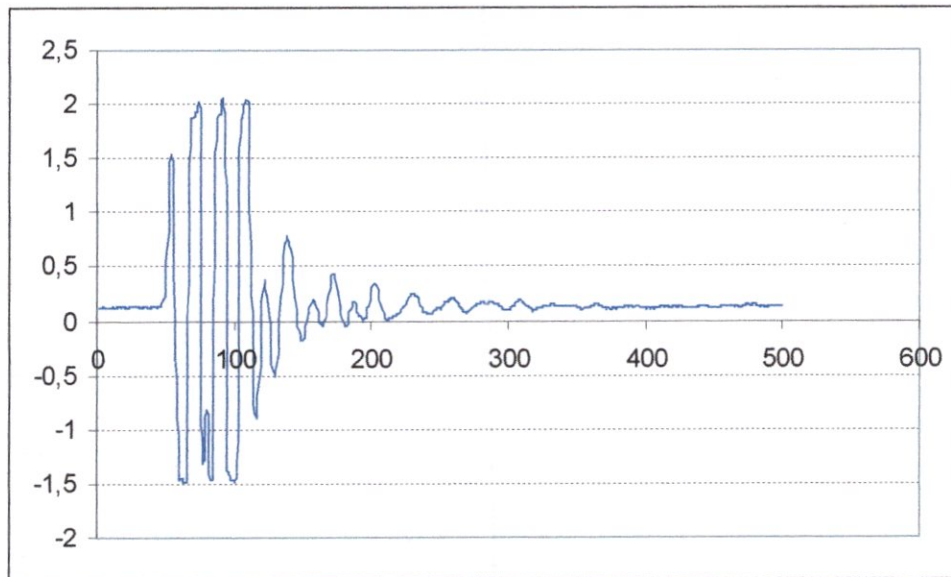


Fig. .V.3 tek 0 pour la pièce 01

TEK 1 (Av + défaut+Ar)

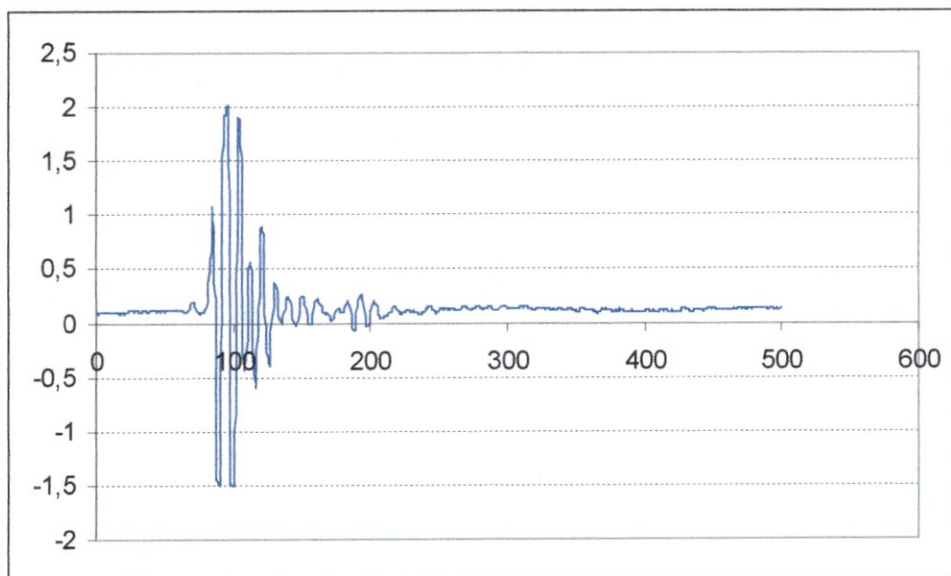


Fig. .V.4 Signale tek 1 pour la pièce 01

TEK 2 (Av +default)

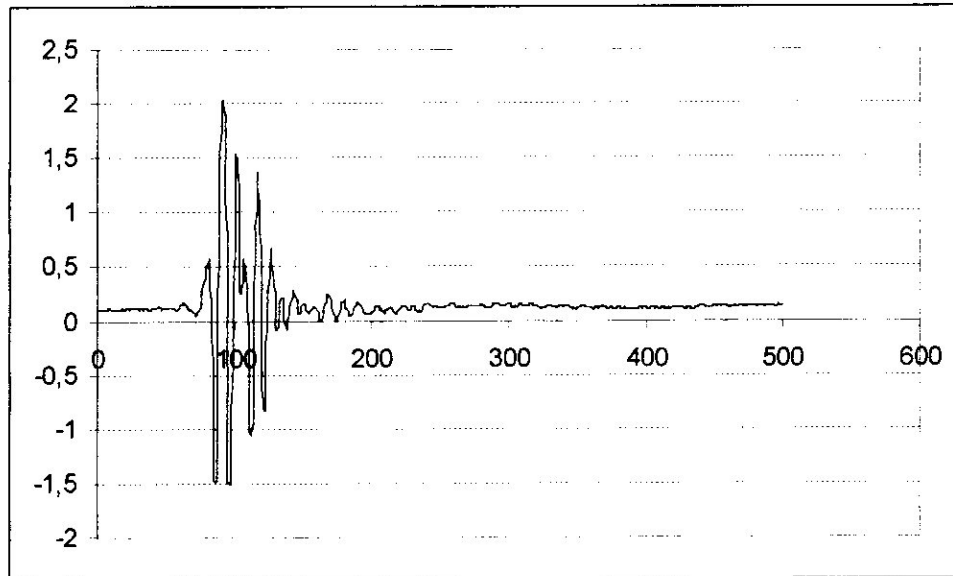


Fig. .V.5 Signale tek 2 pour la pièce 01

TEK 3 (Av) (en présence de manque de collage)

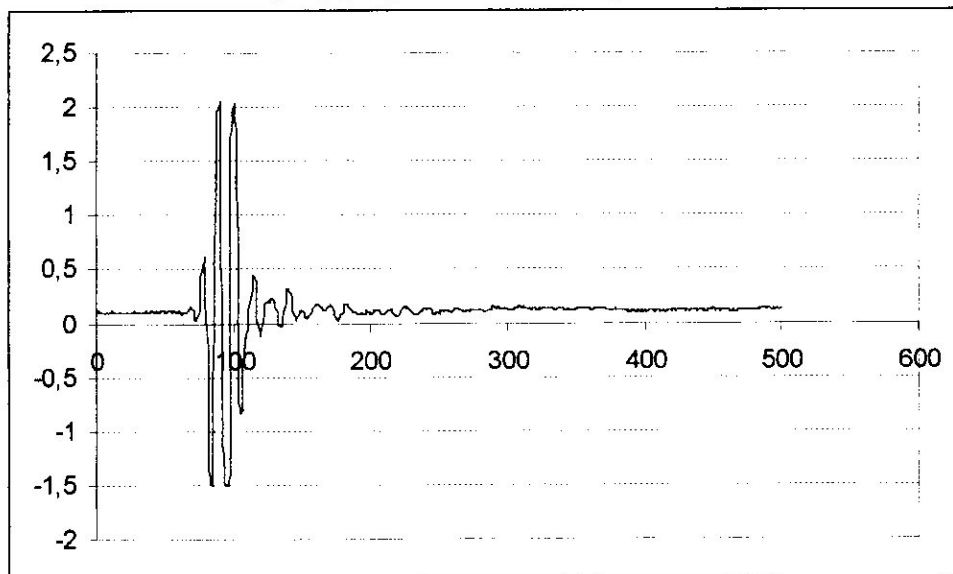


Fig. .V.6 Signale tek 3 pour la pièce 01

Pièce 02 :(avec un défaut de délaminage)
 (épaisseur $\approx 4.3\text{mm}$)

TEK 4 (Av +défaut+Ar)

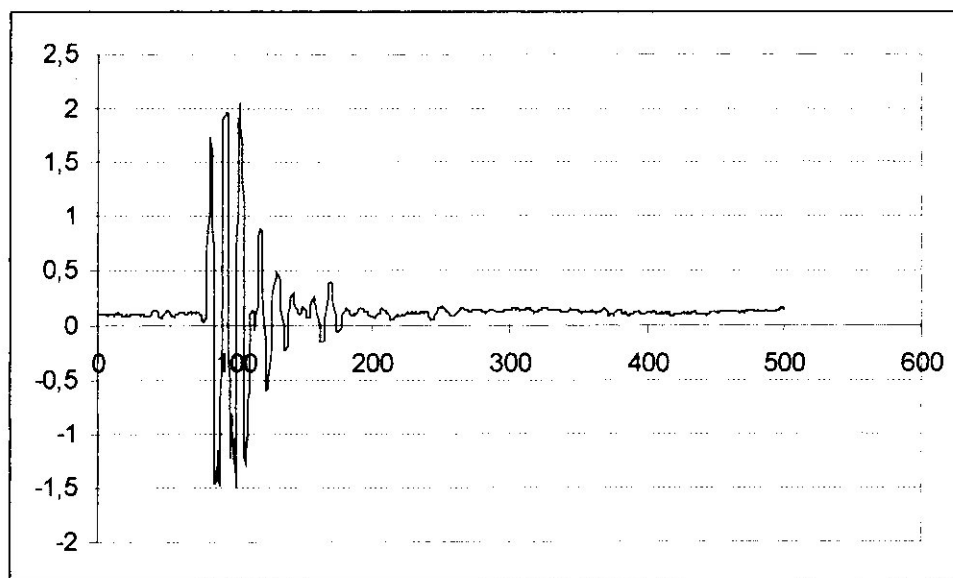


Fig. V.7 Signale tek 4 pour la pièce2

TEK 5 (Av)

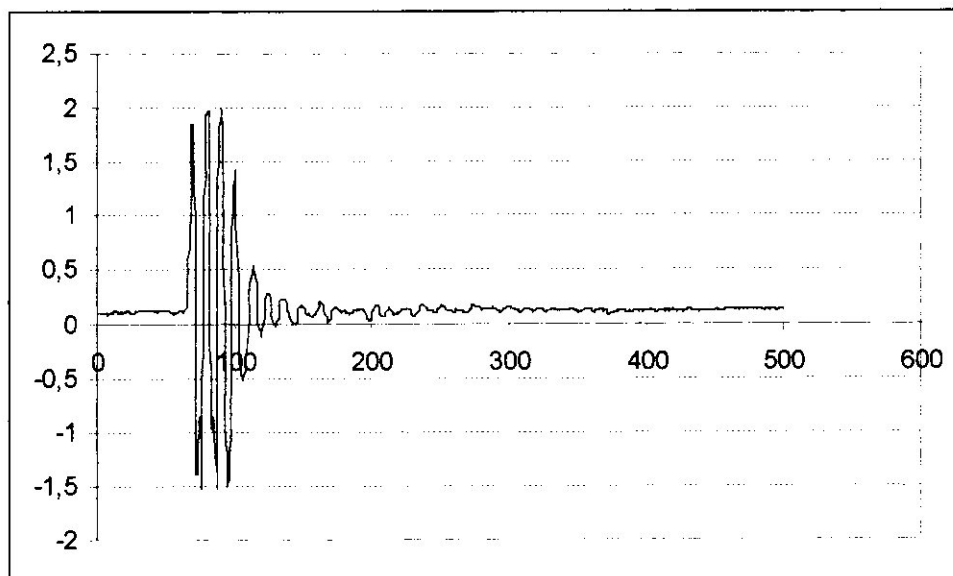


Fig. V.8 Signale tek 5 pour la pièce2

TEK 6 (Av + défaut)

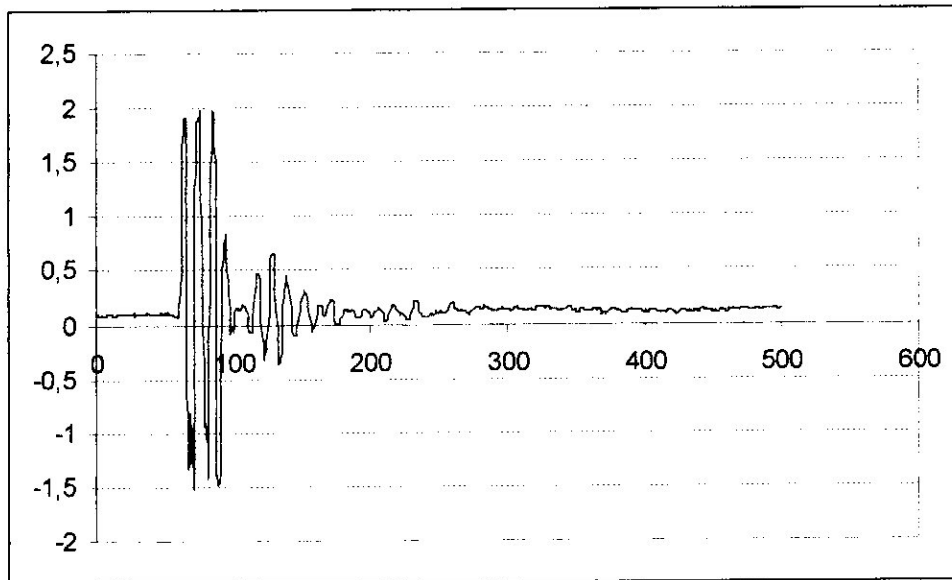


Fig.V.9 Signale tek 6 pour la pièce2

TEK 7 (Av + Ar)

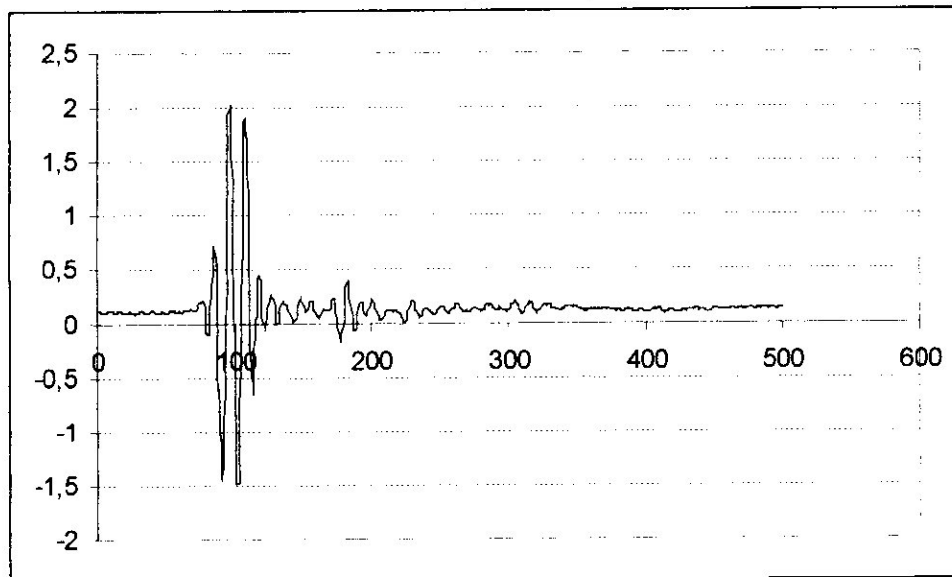


Fig.V.10 Signale tek 7 pour la pièce2

V.3 Contrôle par radiographie

V.3.1 Les pièces a contrôlés :

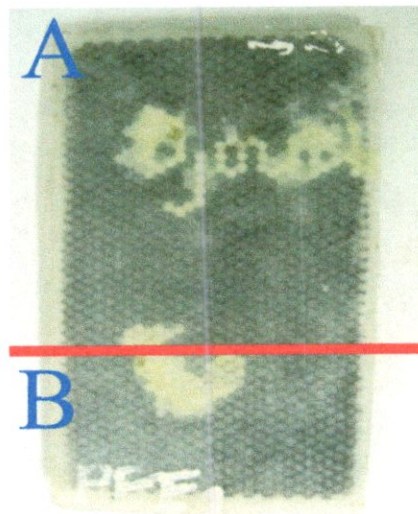


Fig. V.10. Sandwich (l'existence d'eau dans le nid d'abeille)

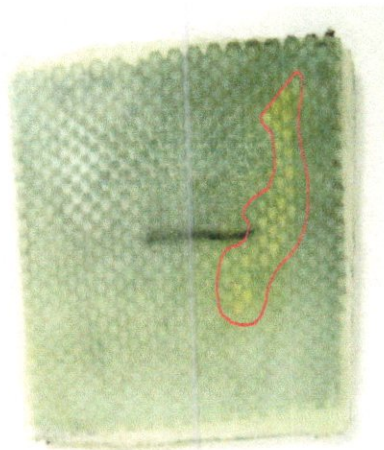


Fig. V.11. Sandwich (l'existence d'eau dans le nid d'abeille)

V.3.2 Les résultats obtenues :



Fig.V.12. Image radioscopique Sandwich (détection d'eau)

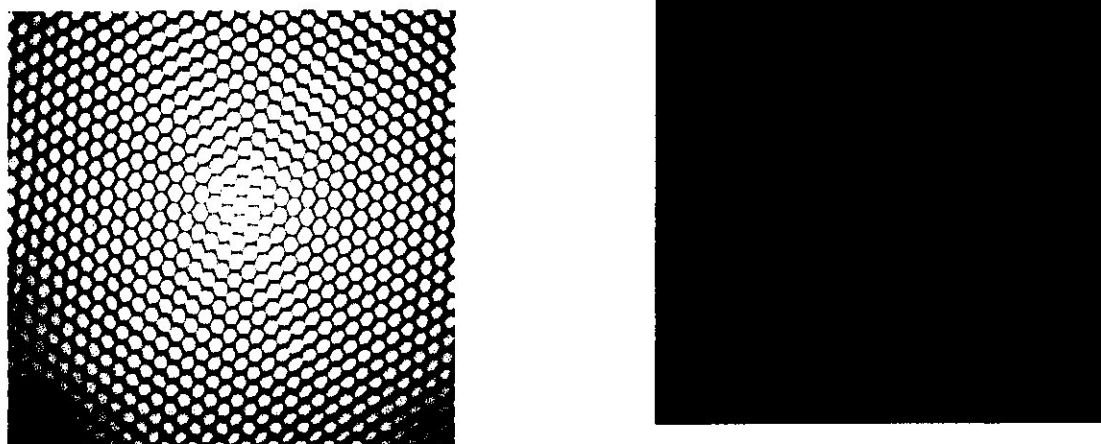


Fig.V.13. Image radioscopique Sandwich (Détection d'eau +structure de nid d'abeille)

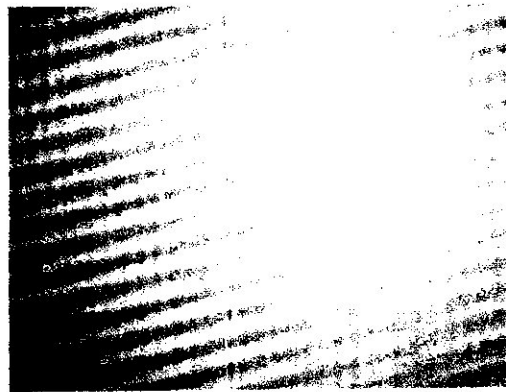


Fig.V.14 stratifié (verre/époxy)

V.4 Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenue on peut dire en générale que :

- pour la détection des défauts, l'utilisation de la technique radiographie elle nous donne des bons résultats (détection des inclusions, caractérisation de la structure tel que la forme de nid d'abeille dans les structures sandwiches).
- le contrôle des matériaux composites par La technique ultrasons reste n'est pas rentable, à cause de l'atténuation des ondes ultrasonores (absorption des matériaux composites). Ce problème nous conduit d'utilisée les techniques de traitement de signal

A la fin, on peut remarquer que pour l'obtention des bons résultats de contrôle des composites l'utilisation d'une seule technique est insuffisant. Pour cela il faut travailler avec les deux techniques à la fois.

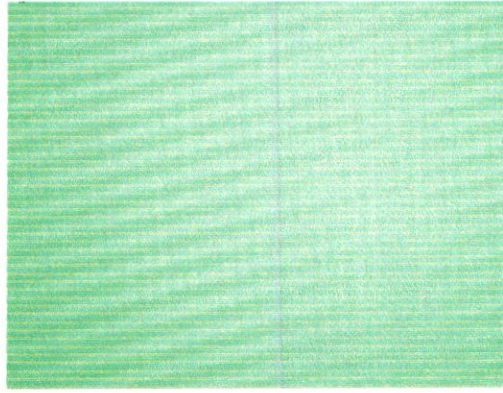


Fig.V.19 stratifié (verre/époxy)

V.5.3 Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que ce type de matériau composite :

- la détection des défauts par l'utilisation de la technique de la radiographie donne de bons résultats (détection des inclusions, caractérisation de la structure telle que la forme de nid d'abeille dans les structures sandwiches).
- le contrôle des matériaux composites du type mutli-couches par la technique des ultrasons est très indiqué. A cause de l'atténuation des ondes ultrasonores (absorption des matériaux composites), son utilisation est complexe et nécessite une grande expérience des opérateurs. Ce problème nous conduit à l'utilisation des techniques de traitement de signal.

A la fin, on peut remarquer que pour l'obtention des bons résultats de contrôle des composites l'utilisation d'une seule technique est insuffisante. Pour cela, l'utilisation des deux techniques est nécessaire.

Conclusion Générale

CONCLUSION

Cette étude a porté sur le contrôle des matériaux composites par ultrasons et radiographie. Dans le but de mieux connaître ces matériaux modernes, nous avons présenté suffisamment leur technologie et les différents procédés de leur mise en forme. Dans ce cadre, nous avons également indiqué les différents domaines d'utilisation de ces produits.

A travers la littérature, nous avons indiqué les bonnes propriétés mécaniques des matériaux composites, notamment une bonne tenue mécanique, de faibles masses volumiques, bonne résistance à la corrosion, la simplicité de mise en œuvre et d'entretien car ne nécessitant pas un traitement de surface à prévoir a priori.

Donc un matériau composite est un ensemble constitué d'une matrice renforcée de fibres. La matrice assure la liaison des fibres qui constituent la partie travaillante et permet de transférer les efforts entre les différentes couches. Les fibres sont généralement en bore, carbone, Kevlar ou verre. Les matrices sont en résines thermodurcissables ou thermoplastiques suivant les caractéristiques mécaniques, thermomécaniques ou résistance aux chocs que l'on veut obtenir.

Les principaux défauts que l'on est susceptible de trouver dans ces types de pièces sont : les porosités, les délamines et les corps étrangers. Pour les structures sandwich, il faut tenir compte des problèmes liés au collage.

Pour mieux connaître le comportement des pièces mécaniques en matériau composite, il était nécessaire de recourir au développement de nouvelles méthodes de caractérisation non destructive. La caractérisation peut être réalisée efficacement par emploi d'ultrasons et de radiographie. Elle porte essentiellement sur le contrôle de santé de ces matériaux.

Sur le plan de l'étude théorique, nous avons étudié les types de matériaux composites, à savoir les matériaux à renforts unidirectionnels et bidirectionnels, la nature des renforts, et les structures différentes des composites.

A titre d'exemple, nous avons effectué une étude expérimentale sur deux types de matériau composite à fibres unidirectionnelles.

Les mesures expérimentales ont été réalisées par une chaîne ultrasonore à immersion et par la radioscopie. Les deux techniques sont complémentaires, les résultats obtenus par radioscopie sont meilleurs à ceux donnés par ultrasons dans le cas des matériaux en sandwichs, par contre, les ultrasons donnent de meilleurs résultats dans le cas des stratifiés.

Cette étude théorique et expérimentale nécessite d'être poursuivie sur le plan expérimental afin de réaliser une bonne caractérisation des composites par l'emploi des techniques de traitement du signal.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [01] Berthelot.J-M. Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures, éd. Masson, 1992.
- [02] Réparation des structures aéronautiques en matériaux composites. AIR FRANCE INDUSTRIES, Mars 1995.
- [03] Jean Weiss et Claude Bord. Les matériaux composites, CETIM, éd.L'usine nouvelle, 1983.
- [04] Nadia BAHLOULI. Cours des matériaux composites.
- [05] NODAL CONSULTANTS. L'industrie française des matériaux composites. DiGITIP / SIM, Mai 2002.
- [06] J-J.BARRAU et S.LAROZE. Structures en matériaux composites, Technique de l'ingénieur (B5 080).
- [07] Y.TEMBLADOR Analyse et comportement des réparations dans des structures composites endommagées. Thèse Doctorat Toulouse III 1998.
- [08] Les contrôles non destructifs pour les matériaux composites. I.U.T Paul Sabatier Toulouse. 27 Juin 2006
- [09] le contrôle absolu. Les défauts dans les composites .NDT expert 2002
- [10] RADIOGRAPHIE NIVEAU 2. SERVICE FORMATION, s i r a c, Mars 1997.
- [11] Technique de l'ingénieur (M 4 130 – 3, R 1 400 –24).
- [12] J.-C.Bünzli, E.Moret. ANALYSE INSTRUMENTALE, 1992.
- [13] p. GIRON et P. PICHARD. Les Ultrasons, SGS QUALITEST, Juin 1987.
- [14] Jean .Perdijon. Aide-mémoire Contrôle des matériaux, DUNOD.
- [15] Draï. Redouane. Thèse de doctorat.USTHB