

M. Tréca et J. Odorico
Laboratoire Central, Aérospatiale
Suresnes, France

Résumé

Le développement de l'emploi des matériaux composites dans les structures d'avion conduit à revoir le problème du contrôle non destructif, pour lequel les méthodes utilisables sont passées en revue.

Parmi ces méthodes, certaines sont utilisées de façon industrielle, d'autres sont au stade recherché en laboratoire.

Pour chaque type de structure, il est intéressant de pouvoir disposer de plusieurs méthodes qui puissent se compléter, par exemple : ultrasons en transmission, avec enregistrement type C, ultrasons par réflexion, radiographie, courants de Foucault et, dans certains cas particuliers, holographie.

1. Introduction

Le développement de l'emploi des composites dans les structures d'avion conduit à revoir le problème du contrôle non destructif afin de l'adapter à ces matériaux nouveaux.

Les structures avions à contrôler sont de plusieurs types et l'on rencontre essentiellement soit des caissons réalisés en plusieurs opérations et assemblés par collage (revêtements carbone et âme en nid-d'abeilles ou raidisseurs collés), soit des caissons monolithiques obtenus en une seule opération.

Suivant les cas le contrôle s'effectue sur l'élément terminé ou en interopérations pour les éléments fabriqués en plusieurs opérations.

Nous allons passer en revue les méthodes retenues pour le contrôle soit en cours de production, soit en cours de maintenance.

2. Pièces à contrôler

Trois types de pièces à contrôler sont décrites ci-après.

Eléments sandwichs revêtement carbone, âme nid-d'abeilles Nomex

1. Composition d'un revêtement (carbone-résine) et défauts recherchés. Un revêtement est composé d'un certain nombre de plis imprégnés de résine. Les plis sont drapés de façon variable et chaque pli a une épaisseur de 0,125 mm environ.

Les principaux défauts pouvant affecter les revêtements sont les porosités, les délaminages, les inclusions (oubli de séparateurs par exemple), les chevauchements de plis ou les absences locales de plis (mauvais raboutages).

(Voir figure 1).

2. Composition d'une structure sandwich et défauts recherchés. Les structures sandwichs dont il est question ici sont constituées essentiellement de revêtements carbone et d'âme en nida non métallique (Nomex). Les bordures sont en titane.

L'assemblage est réalisé par collage des divers éléments constitutifs.

Les défauts susceptibles d'être rencontrés en contrôle final sont de 3 types :

- défauts dans les revêtements : ces derniers ayant déjà été contrôlés avant assemblage, on ne recherche à ce stade que les défauts apparus pendant l'assemblage (essentiellement des délaminages)
- les défauts de collage aux différents niveaux :
 - . revêtements-Nomex
 - . revêtements-Titane
 - . Titane -Nomex
- les défauts dans l'âme Nomex (déformations, déplacements).

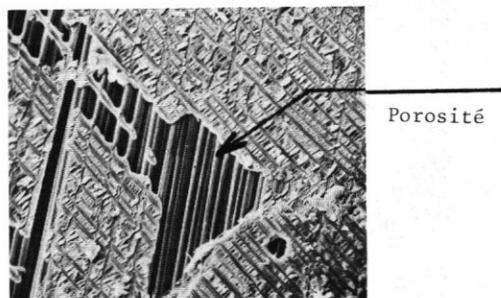
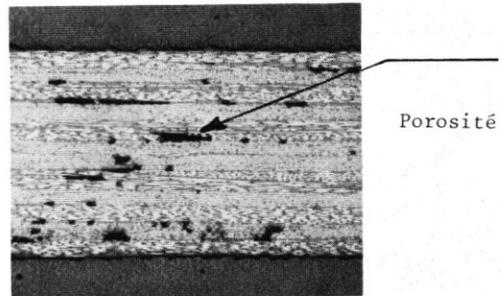


FIGURE 1.

LIFT DUMPER A300B Contrôles non destructifs en fabrication

Nervure : US-CSCAN en double transmission

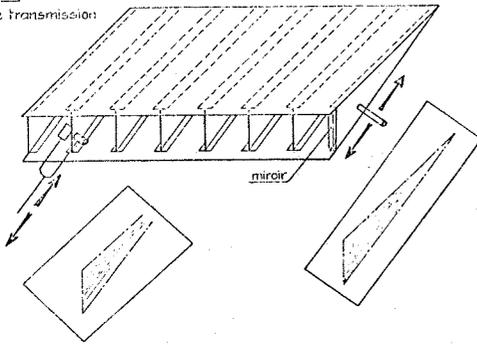


FIGURE 7.

Du fait des faibles épaisseurs des composites, il est nécessaire d'obtenir des zones mortes les plus faibles possibles. Ceci peut être obtenu en utilisant :

- un émetteur-récepteur d'ultrasons à très haute résolution,
- une fréquence relativement élevée (10 MHz),
- une base de temps suffisamment rapide pour étaler sur l'écran toute l'épaisseur du composite.

La technique par réflexion peut être utilisée soit en immersion avec enregistrement de type C (C-Scan), soit par contact.

L'immersion ne s'avère en fait intéressante que pour les composites de forte épaisseur du fait de la difficulté de synchroniser parfaitement le crâneau à l'intérieur du composite (accroissement de la zone morte).

La méthode par contact donne des zones mortes de l'ordre de 0,5 mm près de la face d'entrée et de 0,3 mm près de la face de sortie. C'est une méthode souple, ne nécessitant pas d'appareillage compliqué. Elle est parfaitement adaptée au contrôle en maintenance et permet par exemple le suivi du contour d'un défaut.

LIFT DUMPER A300B Contrôles non destructifs en fabrication

Boîte de nervure : US-CSCAN en double transmission

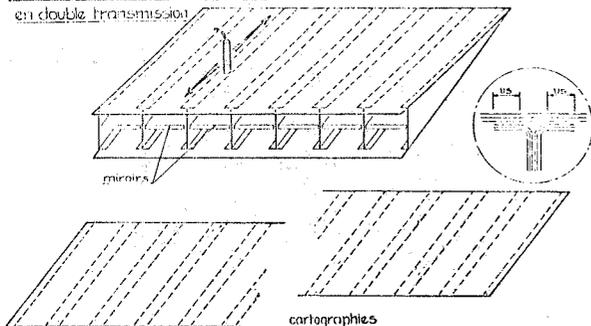


FIGURE 8.

Courants de Foucault

Les propriétés électriques des matériaux composites sont tout à fait différentes de celles des métaux. Il s'agit en fait dans le cas des fibres de carbone, d'une matrice non conductrice renforcée avec des fibres conductrices. C.N. Owston (1) a montré que les défauts modifiaient localement les propriétés électriques du matériau et qu'ils pouvaient ainsi être détectés à condition d'utiliser des fréquences suffisamment élevées.

Nous avons, en utilisant cette méthode, mis en évidence des oublis de séparateur dans un revêtement monolithique de 4 plis avec accessibilité d'un seul côté. Aucune autre méthode ne nous avait permis de détecter ce défaut.

LIFT DUMPER A300B Contrôles non destructifs en fabrication

Boîte de nervure : US en réflexion

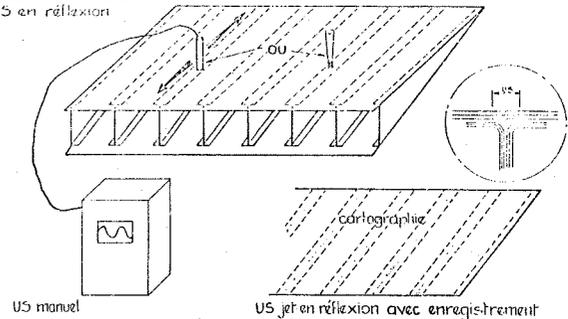


FIGURE 9.

Radiographie

La radiographie est utilisable aussi bien pour le contrôle des monolithiques que des assemblages sandwichs. Pour le contrôle des revêtements monolithiques, on utilise la radiographie basse tension et l'on peut détecter les défauts suivants :

- manque local d'un pli,
- écartement local des fibres dans un pli,
- chevauchement de nappes,
- rabotage,
- écartement de mèches,
- hétérogénéité de taux de résine,
- inclusions métalliques,
- oubli de séparateur.

La détection des défauts cités ci-dessus est d'autant meilleure que le nombre de plis est faible. En ce qui concerne les structures sandwichs nid-d'abeilles, la radiographie est utilisée pour la détection des défauts de l'âme Nomex (déformations, accostage Nomex-bordures, positionnement d'inserts, ruptures de nid-d'abeilles, etc...)

Holographie (Voir figures 10 et 11)

L'interférométrie holographique puisqu'elle permet la détection de légers déplacements de la surface d'un objet, est donc capable de détecter des défauts dans les joints collés ou des délaminages

La figure 2 récapitule les différentes phases de la fabrication ainsi que les examens à effectuer en interopérations ou en contrôle final.

Structures comportant des revêtements carbone et des raidisseurs collés.

Ces structures s'apparentent, au point de vue phases de contrôle, aux structures précédemment décrites. Les examens portent :

- sur les revêtements carbone,
- sur les jonctions collées revêtements-raideurs.

Structures monolithiques réalisées en une seule opération.

Le contrôle doit s'effectuer dans ce cas sur une structure de forme géométrique complexe.

(Voir figure 3).

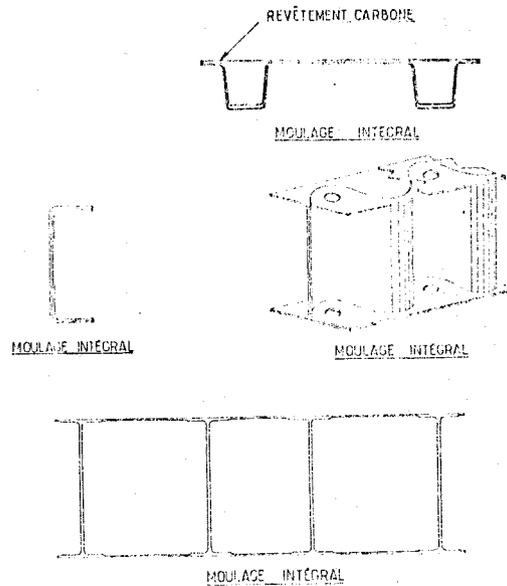


FIGURE 2.

FIGURE 3.

Structures monolithiques

CYCLES DE FABRICATION ET DE CONTROLE	
FABRICATION	CONTROLE
<p><u>REVÊTEMENTS</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Santé du composite carbone. - Santé du collage des inclusions.
<p><u>COLLAGE NIDA-BORDURES</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Santé du collage nida-bordures. - Eventuellement santé du collage nida-nida.
<p><u>COLLAGE FINAL</u></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Collage revêtements-nida. 2 - Collage revêtements-bordures. 3 - Collage nida-bordures. 4 - Détection éventuelle de délaminages du composite pouvant se produire après 1er contrôle.

3. Méthodes de contrôle

Contrôle ultrason par transmission (Voir figures 4 et 5)

La méthode la plus utilisée pour le contrôle des revêtements monolithiques, celle qui donne le maximum d'informations sur la santé du matériau, est la méthode ultrasons par transmission avec enregistrement type C (C.Scan).

Principe de la méthode. Lorsqu'un faisceau ultrasonore traversant un composite rencontre un défaut, la partie du faisceau interceptée par le défaut est réfléchiée et renvoyée en partie vers le palpeur, la partie du faisceau non interceptée par le défaut continue son chemin et traverse complètement le composite.

La détection d'un défaut peut donc se faire, soit en analysant les échos réfléchis, soit en étudiant la diminution d'amplitude du faisceau transmis. C'est cette dernière méthode qui est décrite ici et que nous utilisons pour le contrôle des revêtements. Elle présente l'avantage de permettre le contrôle du revêtement sur toute son épaisseur (même lorsque cette épaisseur est faible) alors que la méthode par réflexion laisse subsister des zones mortes non contrôlées. De plus, la méthode par transmission se prête très bien au contrôle automatique avec enregistrement.

Le signal reçu après simple ou double transmission dans le matériau est analysé et une cartographie est effectuée, le noircissement du papier étant fonction de l'amplitude du signal.

FIGURE 4.

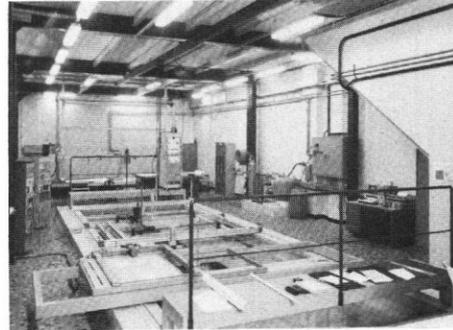
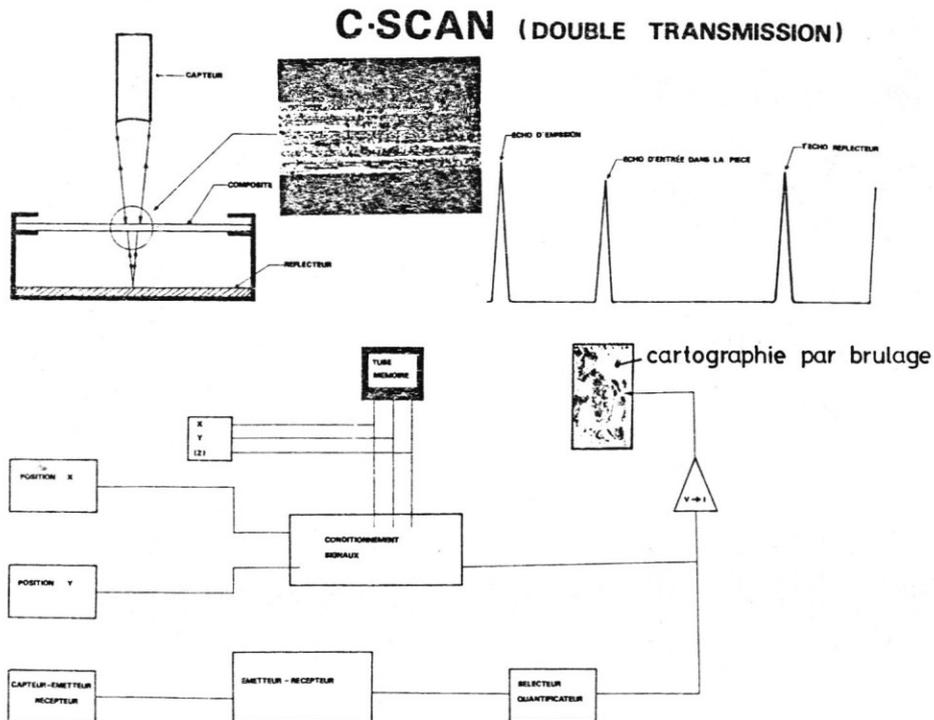


FIGURE 5.

Appareillage utilisé. L'installation utilisée pour ces contrôles comprend :

- une cuve remplie d'eau au fond de laquelle se trouve une plaque de verre jouant le rôle de réflecteur,
- un système de balayage permettant le déplacement du palpeur suivant deux axes X et Y,
- un système d'enregistrement par brûlage de papier. Cet enregistrement s'effectue par niveaux : 6 niveaux de gris (allant du blanc au noir) sont obtenus suivant l'amplitude du signal recueilli,

- palpeur ultrasons émetteur-récepteur,
- appareillage ultrason équipé d'un voltmètre digital permettant des mesures locales d'atténuation ultrasonore précises.

Principes de l'absorption dans le composite.

Le faisceau d'ultrasons émis par le palpeur traverse le composite, se réfléchit sur la plaque de verre et après une deuxième traversée du composite revient vers le palpeur qui joue à ce moment le rôle de récepteur. A chaque traversée d'interface (interface eau-composite et composite-eau, réflexion sur le verre) une partie de l'énergie est perdue.

En fait, la mesure de l'atténuation se fait sur l'écho correspondant au retour du faisceau après réflexion sur le verre en comparant l'écho recueilli sans composite et l'écho obtenu après interposition du composite. Dans ces conditions, l'atténuation dans l'eau et les pertes par transmission dans le verre s'annulent.

Il reste donc :

- l'atténuation due aux réflexions aux interfaces,
- l'absorption dans le composite,
- l'absorption due aux défauts éventuels.

Avec une fréquence de 5 MHz un faisceau focalisé à 50 mm et un diamètre de faisceau de 3 mm, la courbe d'étalonnage d'un composite carbone-résine peut s'écrire avec une précision suffisante :

$$A_{dB} = K_1 + n K_2 - 40 (n - 1) \log \left(1 - \frac{\bar{S}}{S} \right)$$

avec

A_{dB} = Atténuation pour un double parcours entre un trajet dans l'eau sans composite et le même trajet avec composite.

K_1 = Atténuation aux interfaces + états de surface.

K_2 = Atténuation intrinsèque.

n = Nombre de plis.

$\frac{\bar{S}}{S}$ = Taux de porosité.

Influence du palpeur ultrasonore. Le type de palpeur utilisé a une grande importance sur les courbes d'étalonnage.

L'absorption dépend de la fréquence, mais la caractéristique la plus importante du palpeur est la géométrie du faisceau et notamment le diamètre dans la partie active (trajets dans le composite).

Pour nos structures, nous utilisons un faisceau de diamètre 3 mm (compromis entre définition et sensibilité). Un tel diamètre d'autre part, n'est pas trop sensible à l'état de surface, ce qui n'est pas forcément le cas avec des faisceaux plus ponctuels.

Résultats obtenus. La plupart des défauts (tels que délaminages) présents dans les revêtements apparaissent de façon claire sur les enregistrements. Par contre, la porosité peut varier de façon progressive depuis un taux très faible jusqu'à des porosités très importantes. Il a donc été nécessaire, afin de pouvoir étalonner la méthode, d'effectuer des enregistrements ultrasonores sur un grand nombre d'éprouvettes (éprouvettes de réception, étude des différents paramètres de fabrication, etc...),

afin de pouvoir relier les atténuations ultrasonores au taux de porosité du matériau et aux caractéristiques mécaniques. Les faibles taux de porosité n'ont pas d'influence notable sur les caractéristiques mécaniques. Par contre, dès que l'on dépasse quelques %, les caractéristiques chutent rapidement et d'autre part la tenue au vieillissement risque d'être fortement affectée.

Pour l'interprétation des résultats, il faut noter que l'absorption ultrasonore mesurée peut être due soit à une porosité répartie dans l'épaisseur du composite, soit à un défaut du type délaminage situé à un seul niveau.

Des difficultés d'interprétation peuvent se présenter pour les composites épais (supérieurs à une quarantaine de plis). Dans ce cas un défaut du type délaminage peut se traduire par une absorption similaire à celle donnée pour une porosité répartie de 3 %.

Il est nécessaire dans ce cas d'examiner les échos d'interface afin de rechercher la présence de délaminages.

Cette méthode ultrasonore par double transmission avec enregistrement type C est la méthode de base pour le contrôle des revêtements.

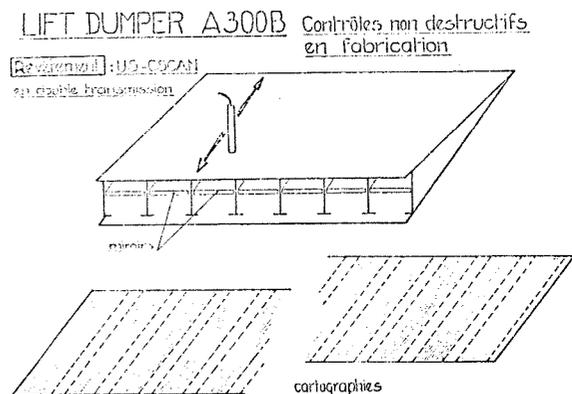


FIGURE 6.

Un exemple de contrôle d'un élément monolithique est donné sur les figures 6, 7, 8 et 9. (ci-dessus et page suivante).

Contrôle ultrason par réflexion

Comme nous l'avons vu précédemment, le contrôle d'un composite peut s'effectuer en examinant les échos réfléchis par les défauts.

Cette méthode présente, par rapport à la précédente, l'inconvénient de laisser subsister des zones non contrôlées (zones mortes) près des faces d'entrée et de sortie. Par contre, elle ne nécessite que l'accès d'un seul côté et se prête ainsi parfaitement bien au contrôle sur structure assemblée terminée (contrôle en maintenance notamment) ainsi que dans le cas de structures à raidisseurs intégrés.

dans le revêtement. Le contrôle de structures avion par cette méthode a déjà été effectué avec succès, notamment par Fokker Hollande (2).

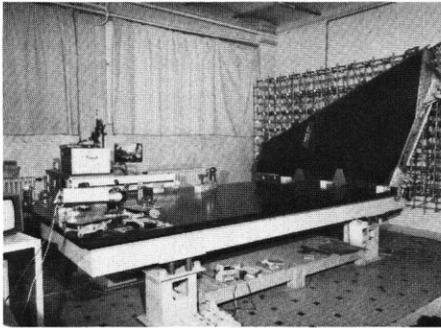


FIGURE 10.

Nous avons effectué des essais en laboratoire afin de déterminer les modalités d'application de la méthode à nos structures. Les résultats se sont révélés très prometteurs, notamment en ce qui concerne le contrôle des sandwichs nid-d'abeilles et ont abouti à la réalisation d'une installation pour le contrôle des pales d'hélicoptères. Pour cette installation, le mode de contrainte qui s'est révélé le plus intéressant est la dépression, la pale ou un tronçon de pale étant placée dans un caisson à dépression.

D'autres essais de laboratoire sont également effectués afin d'étudier les possibilités de mise sous contrainte par vibration avec analyse en temps moyenné. Le contrôle par interférométrie holographique nous semble dès à présent applicable à un certain nombre de structures en utilisant un laser continu. L'utilisation de lasers pulsés qui permet de s'affranchir d'installations encombrantes est également en cours d'étude, l'utilisation de tels lasers s'avérant intéressante pour le contrôle de pièces de grandes dimensions et pour des contrôles in situ.

L'holographie est une méthode très sensible qui permet de détecter des défauts de petites dimensions (surtout dans le cas des revêtements minces). La définition des critères d'acceptation nécessite de nombreux essais en collaboration étroite avec les Bureaux d'Etudes.

Ultrasons pour le contrôle des joints collés.

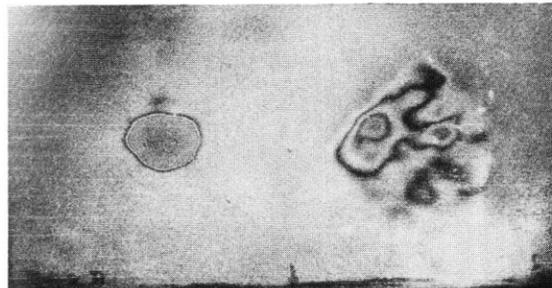
Pour le contrôle des joints collés (monolithique/monolithique, monolithique/métal, monolithique/nid-d'abeilles Nomex) on peut également utiliser les ultrasons tels qu'ils sont utilisés sur les structures métalliques, c'est-à-dire en examinant la courbe enveloppe des échos multiples provoqués par le joint de colle.

Cette méthode présente l'avantage d'être simple et facile à mettre en oeuvre.

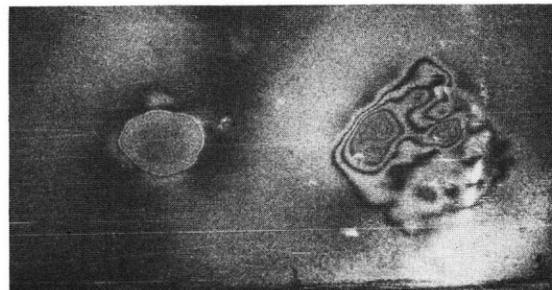
Autres méthodes

Un certain nombre d'autres méthodes sont également utilisées en complément des méthodes précédentes. Ce sont notamment :

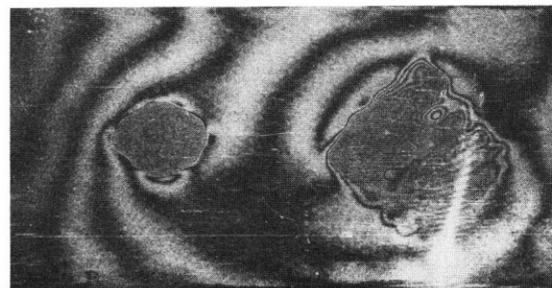
Fokker Bond Tester,
Sonic Resonator,
Sondicator.



$\Delta p = 10 \text{ mb}$



$\Delta p = 25 \text{ mb}$



$\Delta p = 80 \text{ mb}$

FIGURE 11.

5. Conclusions

Nous venons de passer en revue un certain nombre des méthodes utilisables pour le contrôle des composites en fibre de carbone. Parmi ces méthodes, certaines sont déjà utilisées de façon industrielle, d'autres sont encore au stade recherche en laboratoire. Pour chaque type de structure, il est intéressant de pouvoir disposer de plusieurs méthodes qui puissent se compléter. Par exemple, pour le contrôle des revêtements monolithiques, la méthode de base est le contrôle par ultrasons en transmission avec enregistrement type C. Cette méthode globale, fournit des renseignements très intéressants.

Elle peut être complétée ponctuellement par d'autres méthodes telles que ultrasons par réflexion, radiographie ou courants de Foucault.

Pour le contrôle des structures sandwichs ou autres joints collés, nous pensons que l'holographie devrait pouvoir jouer le rôle de méthode globale.

Il est donc nécessaire de poursuivre les essais d'évaluation des différentes méthodes afin de pouvoir définir pour chaque cas particulier, la ou les méthodes à retenir.

Références

- 1 - C.N. OWSTON. Eddy Current Methods for the examination of Carbon Fibre Reinforced Epoxy Resins Materials Evaluation Nov. 1976.
- 2 - SCHLIEKELMANN R.J. Holographic Interference as a Means for Quality Determination of Adhesive Bonded Metals Joints. The eighth Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences , Amsterdam 1972.

o o o