

BTS AERONAUTIQUE

LES PROCÉDES DE MESURES ET DE CONTRÔLE

- Cours
-Les contrôles non destructifs-



Référence au programme :

Savoir 7.1 Les procédés et processus d'assemblage et de maintenance des aéronefs
S7.1.2 Les procédés de production

S7 Procédés et processus d'assemblage et de maintenance des aéronefs

REDACTEUR MAILLOU H.	RELECTEUR .	CHARGE DE COURS MAILLOU H.
-------------------------	----------------	-------------------------------

I INTRODUCTION

Les constructeurs d'aéronefs définissent des programmes de base d'entretien qui s'organisent autour de 2 grands principes :

- ⇒ La périodicité calendaire
- ⇒ Les cycles et heures de vols

L'établissement des programmes d'inspections en maintenance nécessite la connaissance :

- ⇒ Des zones vitales et préférentielles d'amorçage des défauts types (corrosion, criques, fissure...)
- ⇒ Des efforts rencontrés par les structures
- ⇒ Les lois de comportement des matériaux en statique et fatigue (matière RDM, ...)
- ⇒ Des lois des évolutions des défauts types (fissures, corrosion, ...)
- ⇒ Des performances des méthodes CND

Suivant leurs activités aériennes (saisonniers ou continues) et le type d'avion exploités (cours, moyens ou longs courriers), la philosophie des compagnies aériennes divergent.

Ainsi les visites d'entretien programmé se décompose en général par :

- Des visites opérationnelles regroupant des tâches d'entretiens élémentaires de services (tous les mois soit 400 à 500 heures de vols pour un A320)
- Des visites fonctionnelles caractérisées par des vérifications plus approfondies (hydrauliques, électriques et structurales) (Environ tous les 15 mois / entre 3000 et 4500h de vol pour un A320)
- Des grandes visites réalisées par des ateliers hautement spécialisés et agréés (grandes compagnies aériennes ou centre de maintenance)

C'est lors de grandes visites que l'avion subit un certain nombre de vérifications structurales parmi lesquelles les inspections en contrôle non destructif ont une place importante.

On profite alors de la dépose des équipements (trains d'atterrissage, moteurs, mats, volets, ...) et du démontage de la cabine, cockpit et des soutes pour vérifier les zones de critiques et s'assurer de l'absence de dommages (criques, corrosion, délamination, décollements, impacts,...)

Le contrôle non destructif représente l'ensemble des techniques permettant de tester une pièce sans la détruire et d'évaluer son aptitude au bon fonctionnement sans altérer sa tenue de service.

C'est une activité normalisée s'appuyant sur les codes de fabrication spécifiques des secteurs d'application.

II Choix des procédés CND

Le choix d'une méthode de CND est fonction de plusieurs critères :

Suivant l'âge de la pièce

- ⇒ Fabrication matière (lingôt,...)
- ⇒ Fabrication de la pièce (usinage, soudage, ...)
- ⇒ Service pièce (corrosion, fatigue, ...)
- ⇒ Etat des traitements thermiques

Suivant la nature de défauts

- ⇒ Débouchant ou non
- ⇒ Gros ou petit

- ⇒ Ponctuel, surfacique, etc....
- ⇒ Petite ou grosse pièce
- ⇒ Pièce ferromagnétique ou non
- ⇒ Pièce conduisant l'électricité ou non

III Les principaux défauts rencontrés

Soufflures : Les liquides ont un certain pouvoir de dissolution des gaz. Lorsqu'ils se solidifient, ce pouvoir devient nul. Des bulles se forment. Si ces bulles restent emprisonnées, on voit apparaître des soufflures.

Retassures : Lors de la solidification d'un métal, (passage de l'état liquide à solide), le volume diminue. Les retassures représentent le défaut pouvant apparaître lors du refroidissement d'une pièce, sous l'effet du retrait.

Inclusions : Ceux sont des particules emprisonnées lors de la solidification (particules métalliques ou non métalliques). En fonderie, ceux peut être :

- Goutte froide, goutte phosphoreuse, scories, crasse, laitier, sable

En soudage, ce peut être :

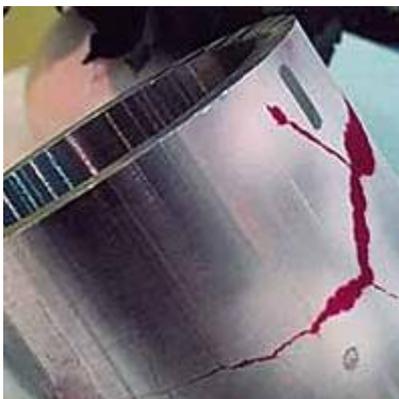
- Laitier, silicates, tungstène

Fissures :

Séparation locale abrupte dans la matière, en surface ou dans le volume, pouvant mener à la rupture.

IV LE RESSUAGE

Le ressuage est une technique de contrôle surfacique qui permet de détecter les défauts débouchant sur tous type de matériaux non poreux. C'est une technique simple à mettre en œuvre, qui nécessite une mise en œuvre rigoureuse pour garantir une sensibilité optimale. Le ressuage exploite les propriétés de capillarité des produits utilisés.



Ressuage fluorescent

IV . 1 Principe de mise en œuvre :

Le ressuage consiste à appliquer sur une surface à contrôler préalablement nettoyée, un pénétrant coloré ou fluorescent qui va pénétrer par capillarité dans les défauts débouchants.

1- Après un temps d'imprégnation de 15 à 20 mn à température ambiante, l'excès de pénétrant est éliminé par lavage

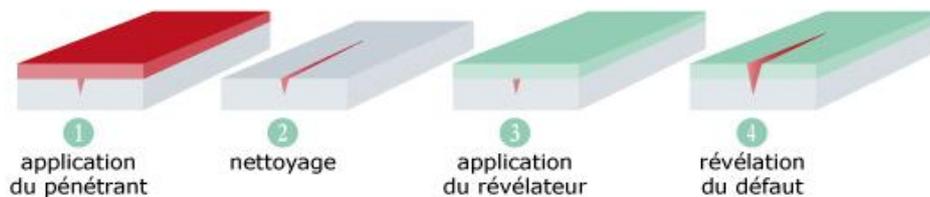
2- Après séchage, un révélateur blanc est appliqué sur la surface à contrôler. Ce révélateur agit comme un buvard absorbant le pénétrant.

3- Le pénétrant contenu dans les défauts éventuels resse alors dans le révélateur

4- Les images de défauts apparaissent immédiatement ou jusqu'à 30 mn après l'application des révélateurs. Deux modes opératoires sont principalement utilisés : les pénétrants colorés lavables à l'eau avec un révélateur à support organique et les pénétrants fluorescents pré-émulsionnés avec un révélateur sec, ce dernier mode étant plus sensible aux fissures très fines.

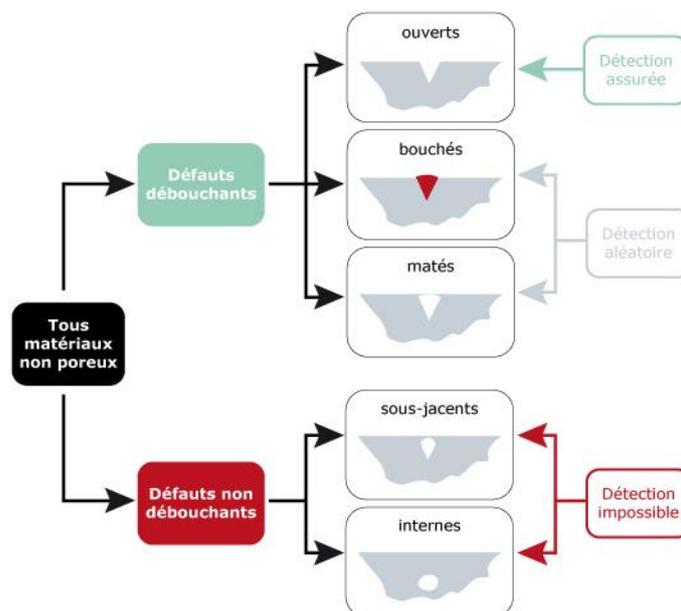
On examine la pièce :

- Soit en lumière blanche pour un pénétrant coloré
- Soit en lumière ultra violette pour un pénétrant fluorescent.



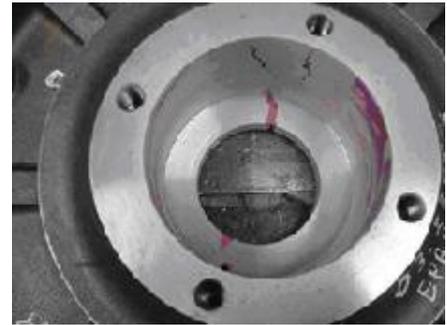
IV. 2 Domaines d'application du ressuage

Le ressuage est une technique particulièrement adaptée aux assemblages soudés, aux produits de forge, aux produits de fonderie, et aux pièces mécaniques.



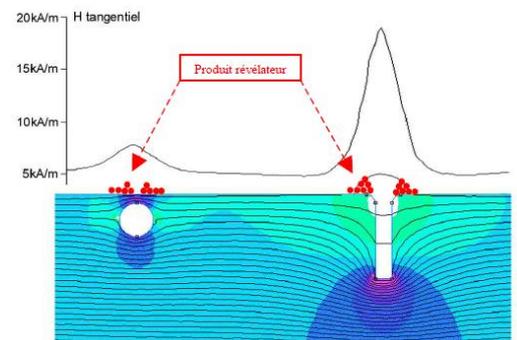
Avantages :

- facile à mettre en œuvre manuellement sur chantier
- économique
- insensible à l'orientation des défauts par rapport à la surface
- détection possible de petits défauts susceptibles de générer des fuites
- possibilités de lignes automatisées de contrôle
- utilisable sur des matériaux non ferromagnétiques pour lesquels le contrôle magnétoscopique est inefficace
- utilisable sur des pièces ferromagnétiques lorsque les problèmes de désaimantation sont critiques ou lorsque les pièces présentent une géométrie trop complexe.



V LA MAGNETOSCOPIE

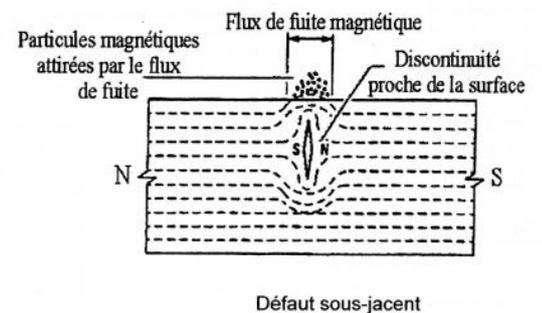
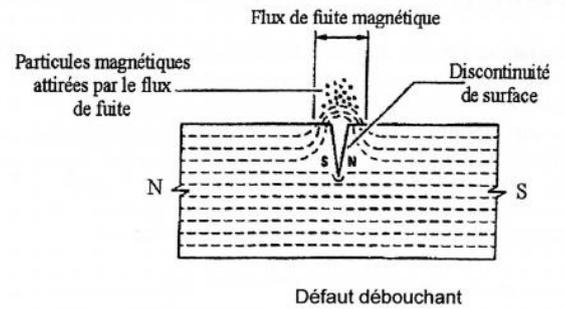
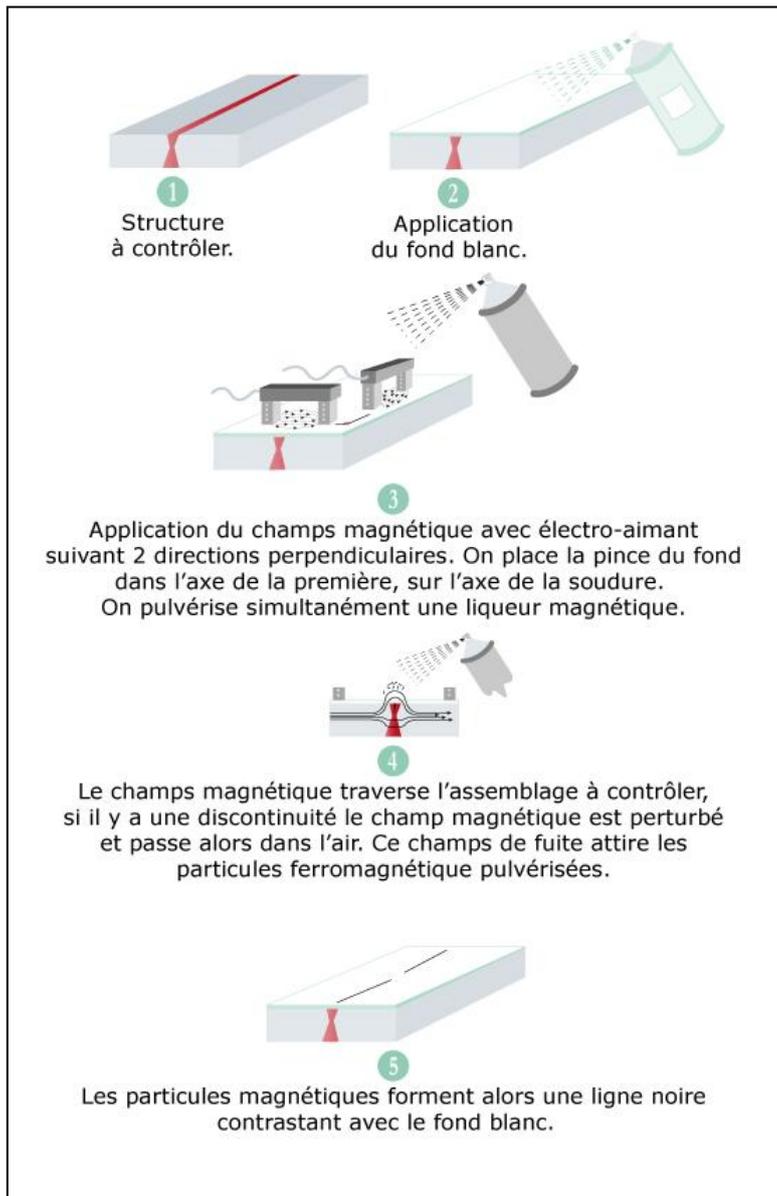
La magnétoscopie est une technique de contrôle par aimantation qui s'applique par l'action d'un champ magnétique continu ou alternatif sur les matériaux ferromagnétiques comme les aciers (sauf austénitiques), les fontes... Les discontinuités de surfaces (ou sous-jacentes) provoquent à leur endroit des fuites magnétiques. Ce dernier est composé de micro-particules ferromagnétiques (fluorescente ou pas) en suspension dans un liquide porteur qui est déposé à la surface de la pièce et attiré au niveau des fuites magnétiques.



La magnétoscopie utilise de nombreux moyens d'aimantation et différents produits pour adapter le contrôle à la forme de la pièce, à l'orientation du défaut recherché... La méthode de contrôle est rapide car les phénomènes d'aimantation sont immédiats.

Remarque : Avant et après toute opération par magnétoscopie, il faut procéder à une démagnétisation de la pièce. Pour cela, on peut faire passer l'élément dans un tunnel de démagnétisation, jusqu'à ce que la densité magnétique soit mesurée à un niveau acceptable

Schéma de principe de mise en œuvre :



L'accumulation des particules en un endroit donné forme une indication représentative du défaut.

Domaines d'application de la magnétoscopie :

Le magnétoscopie est utilisé pour le contrôle :

- des soudures bout à bout ou d'angle,
- des pièces moulées (craques dans les congés de raccordement, réseaux de fissures superficielles...),
- des pièces forgées (craques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement, retassures comportant des fissures de décohésion...),
- des produits laminés et étirés (fissures sur les peaux tendues des produits emboutis ou cintrés)

Pour les assemblages (emmanchements, rivet, vis,...) la méthode est fortement déconseillée, à cause des particules ferromagnétiques qui risquent de s'incruster et provoquer par la suite des foyers de corrosion.

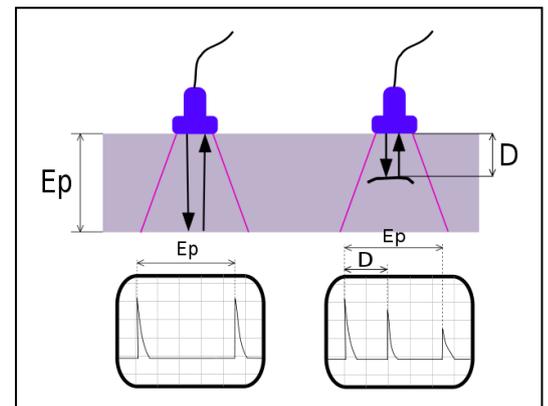
VI ULTRASONS

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut. Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts en profondeur. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Par contre, c'est une méthode lente car il faut faire un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts.

Une onde ultrasons est émise par un palpeur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans le matériau. Il existe des méthodes par contact (le palpeur est en contact avec la pièce) ou par immersion (la pièce et le palpeur sont immergés dans de l'eau). Dans le cas de la méthode par contact, il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes. Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des impédances acoustiques différentes, il y a réflexion. Les ultrasons réfléchis sont captés par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur). Il y a création d'un « écho ».

Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut.

D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les échos sont représentés par des pics sur l'écran.



Principe du contrôle par ultrasons :
Exemple du contrôle d'une tôle.

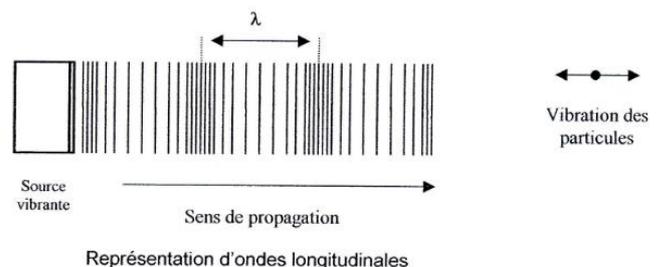
- L'écran de l'oscilloscope montre un pic d'entrée à gauche et un pic de sortie à droite. La distance entre les deux pics correspond à 2 fois l'épaisseur de la tôle (aller+retour).
- Le palpeur émet au dessus d'un défaut, il y a apparition d'un pic correspondant au défaut. La position relative du pic créé par le défaut permet de connaître sa profondeur.

VI.1 Les différents types d'ondes

Les ondes se propagent suivant un sens et une direction donnée. Il existe donc plusieurs types d'ondes. Le choix du type d'onde utilisé se fait en fonction de la géométrie de la pièce et du défaut recherché.

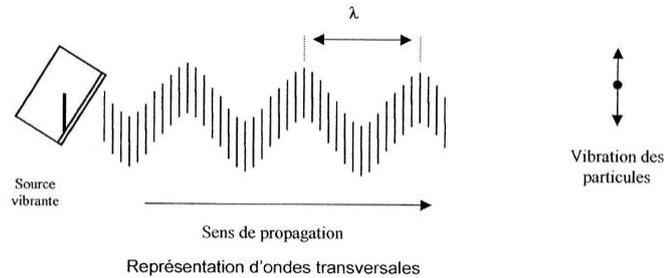
- Les ondes longitudinales

Ces ondes sont générées par le déplacement des particules parallèles à la direction de propagation. Elles se propagent dans les gaz, les liquides et les solides. Les ondes ultrasonores sont caractérisées par leur longueur d'onde λ .



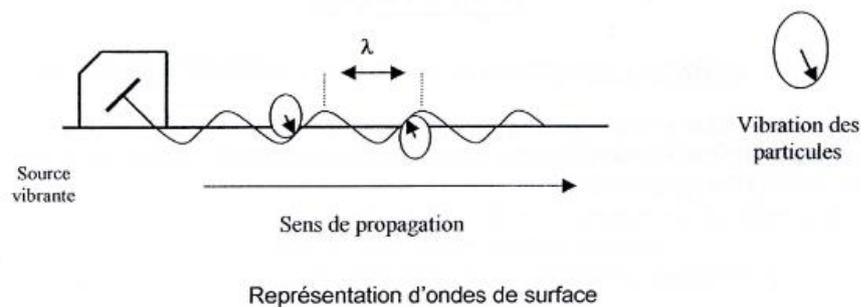
- Les ondes transversales

Ces ondes correspondent à un déplacement des particules perpendiculaire à la direction de propagation donnant lieu à des efforts de cisaillement. Elles se propagent uniquement dans les solides.



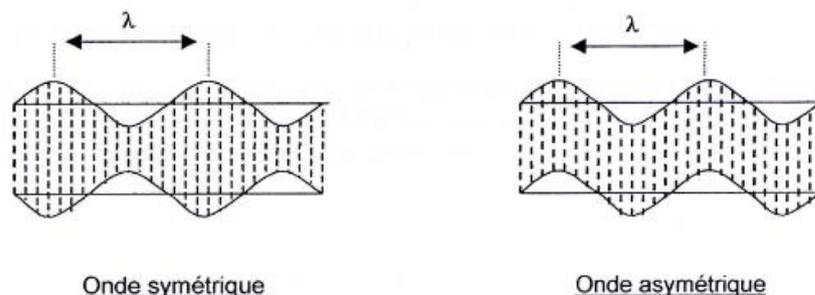
- Les ondes de surface (ou de RAYLEIGH)

Ces ondes sont la combinaison d'ondes transversales et longitudinales. Elles se propagent à la surface d'un gaz et d'un solide. Le mouvement des particules est ici elliptique.



- Ondes de Lamb

Ces ondes sont la combinaison de 2 ondes longitudinales et de 2 ondes transversales ; Il existe 2 types d'ondes de Lamb, l'onde symétrique où les particules vibrent en opposition de phase et l'onde asymétrique où elles sont en phase.

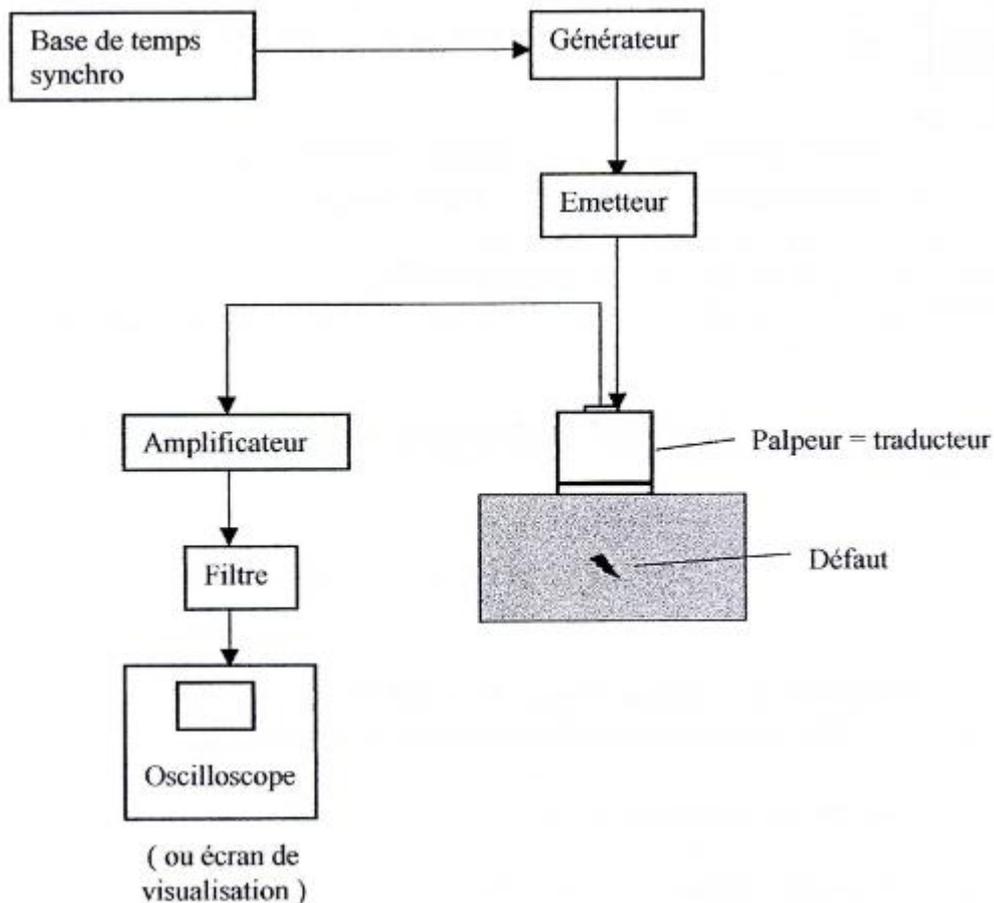


Représentation d'ondes de Lamb

Remarque : En maintenance aéronautique, on utilise principalement les ondes transversales et longitudinales.

Appareillage nécessaire :

Le principe de l'appareillage mis en œuvre se présente ainsi :



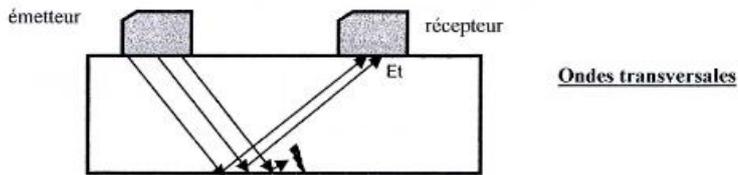
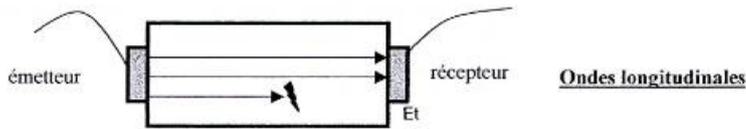
VI 2 Les différentes techniques de contrôle

- **Contrôle par transmission**

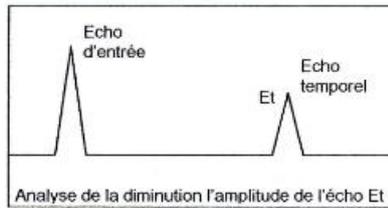
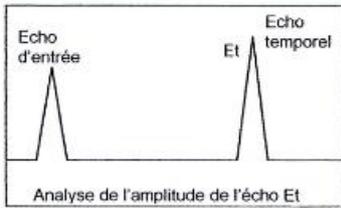
On utilise deux capteurs (un émetteur et un récepteur) séparés par la pièce à contrôler.

Le récepteur reçoit une pression acoustique qui est fonction de la pression générée par l'émetteur et de l'absorption du matériau. Un défaut sur les parcours ultrasonores se traduit par une absorption locale importante que dans le reste de la pièce.

Cette technique de faible résolution est généralement utilisée sur des produits absorbants, pour des pièces de fortes épaisseurs avec de gros défauts.

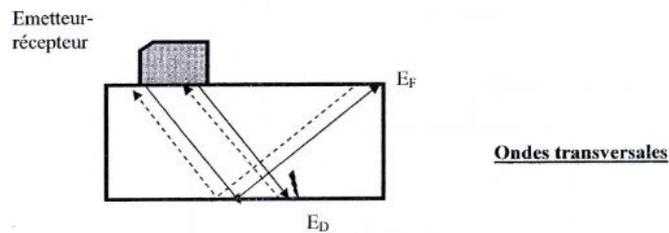
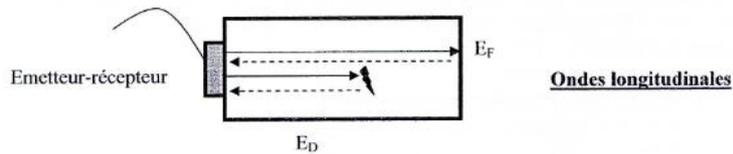


CONTRÔLE PAR TRANSMISSION

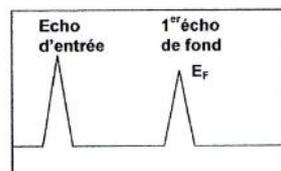


- Contrôle par réflexion

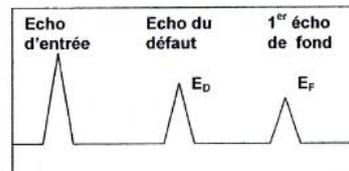
Cette méthode est la plus utilisée car elle permet de faire le contrôle avec un seul transducteur en émission-réception. On analyse ici les échos de défauts qui se situent entre les échos d'entrée et les échos de fond. L'amplitude de l'écho de défaut permet de faire une estimation de la dimension du défaut.



CONTRÔLE PAR REFLEXION



L'impulsion se réfléchit sur le fond de la pièce.



L'impulsion se réfléchit sur un défaut de la pièce.

- Contrôle par résonance

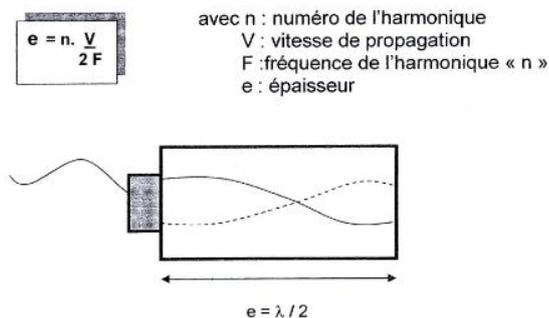
Ce procédé utilise le phénomène de la résonance d'épaisseur d'un corps.

Si un corps à 2 parois parallèles, une tôle par exemple, dont l'épaisseur mesure précisément une demi longueur d'onde ultra sonore, alors ce dernier entre en résonance et réagit sur l'élément piezo émetteur. Ceci restant valable pour « n » longueur d'ondes.

Le phénomène de résonance est appliqué

- aux mesures d'épaisseur de matériau
- aux contrôles du collage de pièces assemblées.

La fréquence de l'excitation sinusoïdale est modifiée de façon continue : lors de la résonance de la plaque, on constate une augmentation de l'amplitude des vibrations reçues par le palpeur. On peut calculer l'épaisseur grâce à la valeur de la fréquence de la résonance :



Exemple de contrôle :

Vérification de couplage et recherche de criques semelle inférieure longeron avant de voilure A300

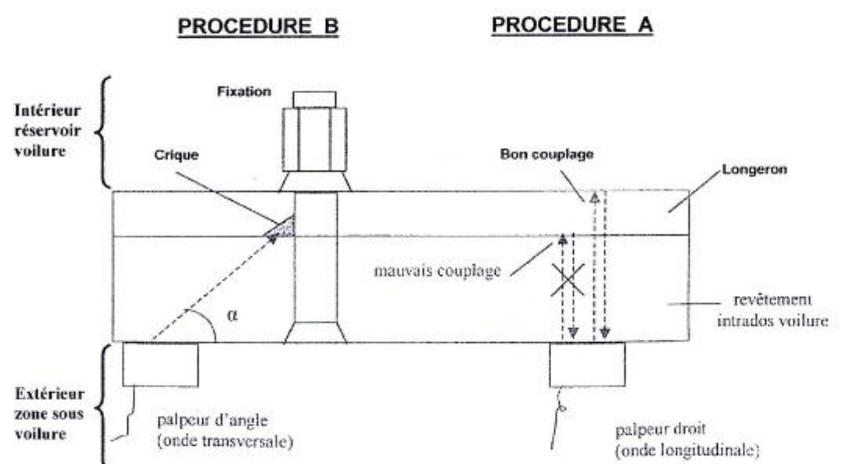
Cette procédure se déroule en 2 étapes. Elle permet de contrôler toutes les fixations étanches au niveau de la voilure. On utilise les ultrasons car cette procédure évite la dépose des fixations (gains de temps et de réductions des coûts d'inspection).

Procédure A : Vérification du couplage

Il faut d'abord vérifier le couplage des deux parties (longeron + revêtement) constituant la voilure par ultrasons en ondes longitudinales (méthode de l'écho de fond)

Procédure B : Recherche de criques dans le longeron

Si le couplage est bon (sans décollement), on recherche les criques dans le longeron par la face externe du revêtement intrados de voilure après décapage afin d'assurer au palpeur un état de surface propre et lisse. Ceci permet de ne pas perdre d'énergie car les peintures peuvent être absorbantes. On utilise alors des palpeurs d'angles en ondes transversales.



VII Courants de Foucault

Les courants de Foucault se basent sur la mesure d'un courant induit. En effet, comme les pièces sont métalliques, elles sont conductrices de l'électricité. Un électroaimant, alimenté par une tension électrique haute fréquence, induit un courant électrique dans la pièce à évaluer. Si elle ne présente aucune anomalie, ce courant induit peut circuler librement dans sa masse. Inversement, toute microfissure constitue une rupture dans ce circuit électrique : elle se comporte comme un isolant local et s'oppose donc à la libre circulation du courant induit. Cette perte se traduit par une modification de la consommation électrique de l'électroaimant, que détecte l'appareil de mesure. En somme, les fluctuations de sa consommation sont l'image de la structure interne du métal. Leur analyse précise met en évidence toute anomalie géométrique ou métallurgique. Disques de freins ou éléments moteurs sont testés par cette méthode, mais les courants de Foucault permettent également de mesurer avec précision l'épaisseur d'un enduit ou d'une couche de peinture.

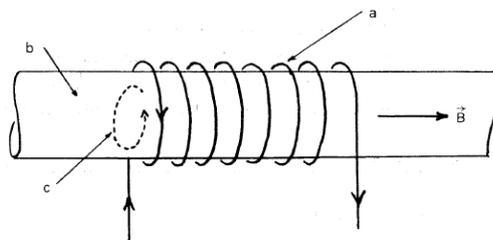
Principe :

Le champ magnétique variable au cours du temps est responsable de l'apparition d'une force électromotrice à l'intérieur du milieu conducteur. Cette force électromotrice induit des courants dans la masse. Ces courants ont deux effets :

- ils provoquent un échauffement par effet Joule de la masse conductrice ;
- ils créent un champ magnétique qui s'oppose à la cause de la variation du champ extérieur (loi de Lenz).

Lorsque la variation de flux est due à un déplacement du milieu devant un champ magnétique constant, les **courants de Foucault** sont responsables de l'apparition de forces de Laplace qui s'opposent au déplacement, d'où l'effet de freinage observé.

Principe 2 :



- a) Bobine parcourue par un courant alternatif (fréquence ajustable)
- b) Pièce à contrôler placée dans l'excitation magnétique de la bobine. Un champ magnétique prend naissance dans la pièce.
- c) Naissance de courants induits dans la pièce qui devient une bobine fictive

L'ensemble de la bobine excitatrice et du barreau équivalent électriquement à une impédance Z (résistance + inductance). Si le barreau est parfait, Z ne varie pas lorsque la bobine se déplace.

Par contre toute zone présentant une anomalie provoque, lors de son passage dans le bobinage, une modification de la répartition du champ magnétique ou de ses courants de Foucault. Ainsi, toute variation locale des propriétés électriques (conductivité), magnétiques (perméabilité) ou géométriques (dimensions, hétérogénéités...) modifie l'impédance Z lue aux bornes de la bobine primaire.

Applications :

Les courants induits alternatifs qui prennent naissance dans la pièce sont assez intenses en surface. Leur intensité décroît en profondeur. Ce type de contrôle révèle les hétérogénéités proches de la surface. (quelques mm)

Exemple d'application sur jonctions circonférentielles des fuselages d'A320

On utilise cette inspection pour détecter des criques internes dans la 2^{ème} couche d'un empilage de tôle depuis la surface externe du fuselage au niveau de la 1^{ère} rangée de rivets d'un cadre de jonction du fuselage (voir figure ci-dessous)

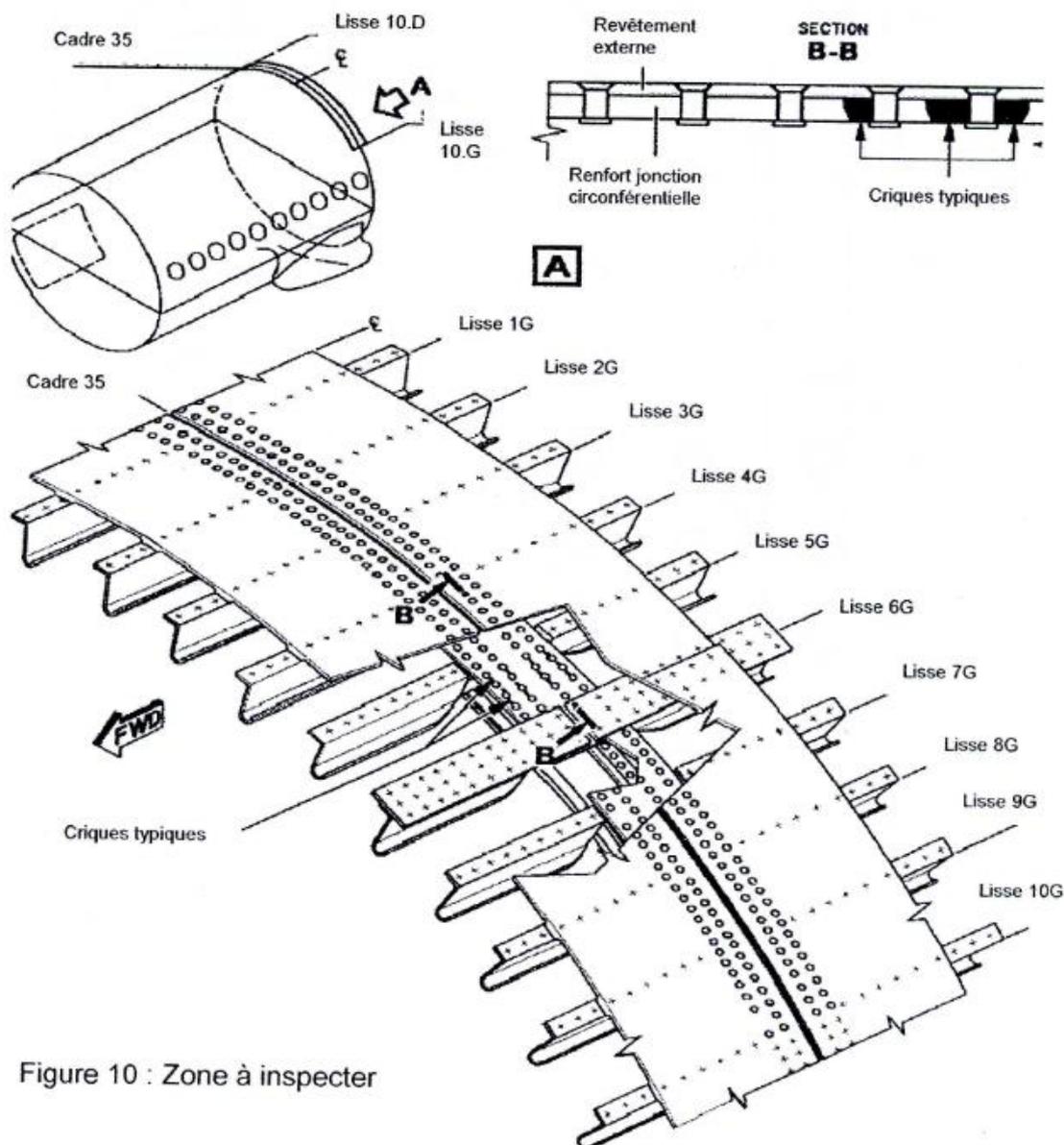


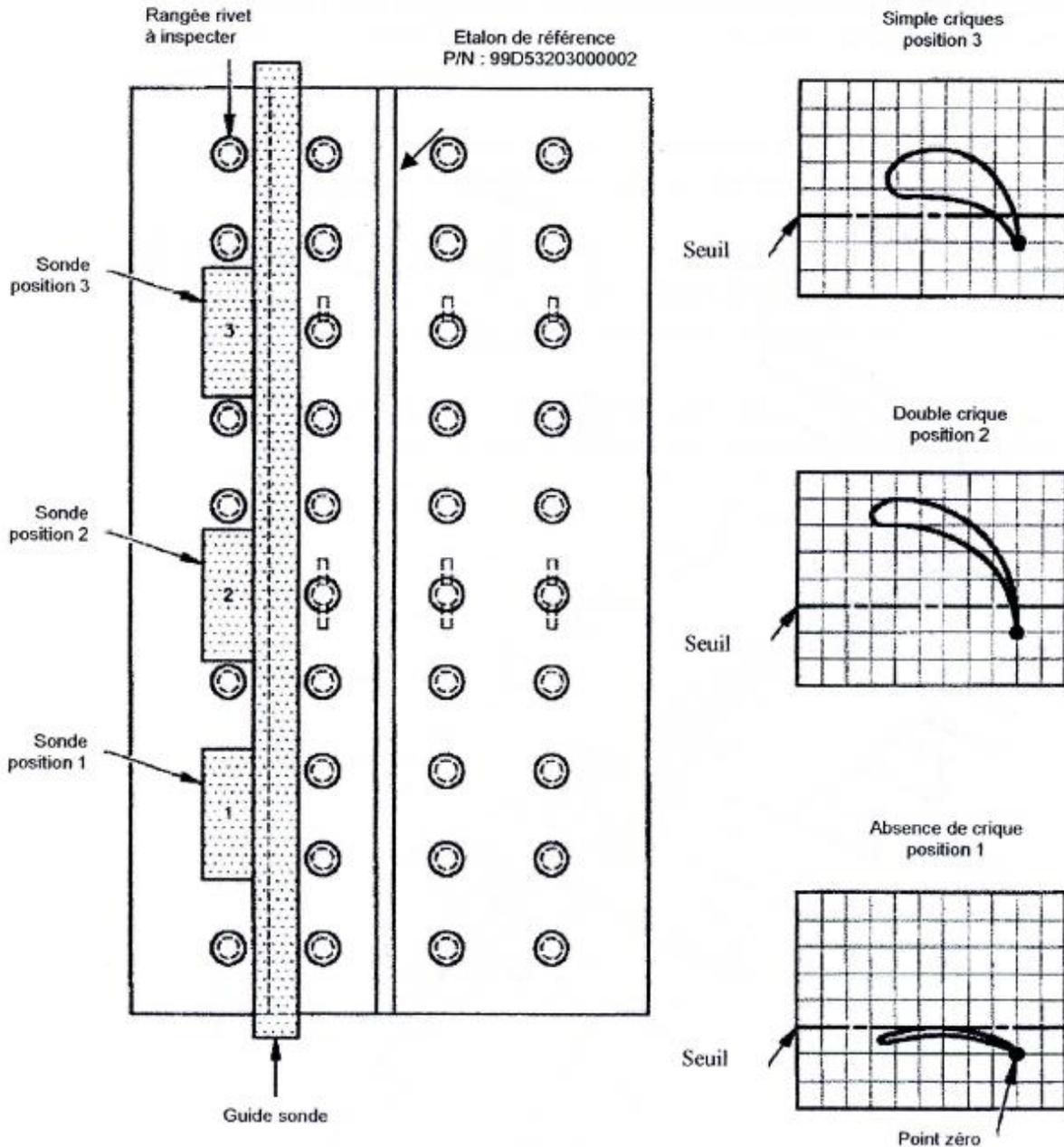
Figure 10 : Zone à inspecter

Mode opératoire :

Calibration :

On effectue l'étalonnage du générateur avec la sonde CF BF spécifique adaptée sur une cale de référence (exacte représentation de la configuration structurale à inspecter) ayant plusieurs types de défauts artificiels.

On calibre l'appareil en le réglant de manière à mettre en évidence les représentations des signaux des indications simulées sur l'écran de visualisation (voir figure).



Inspection :

Comme sur l'étalon de référence, on positionne un guide (non métallique) le long de la première rangée de rivets à inspecter afin d'assurer la linéarité du sondage de la zone (voir figure ci-dessous)

