

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA.

**Institut d'Aéronautique et Etudes Spatiales.**



## Mémoire de Master

*En vue de l'obtention du diplôme de*

**MASTER**  
**Aéronautique**

Option : ***CNS/ATM***

**THEMES**

**LA MISE EN ŒUVRE EXPERIMENTAL DU CONTROLE NON  
DESTRUCTIF PAR COURANT DE FOUCAULT**

Encadré par :

-Mr ZABOT Ammar

-Mr *BELHAMISSI Abderrahmane*

Elaboré et présenté par :

Mr BOUALEM Fouad

Mr CHEBLI Fayez

Septembre 2013

# RESUME

# **REMERCIEMENTS**

# **TABLES DES MATIERES**

**LISTE DES  
ILLUSTRATIONS,  
GRAPHIQUES ET  
TABLEAUX**

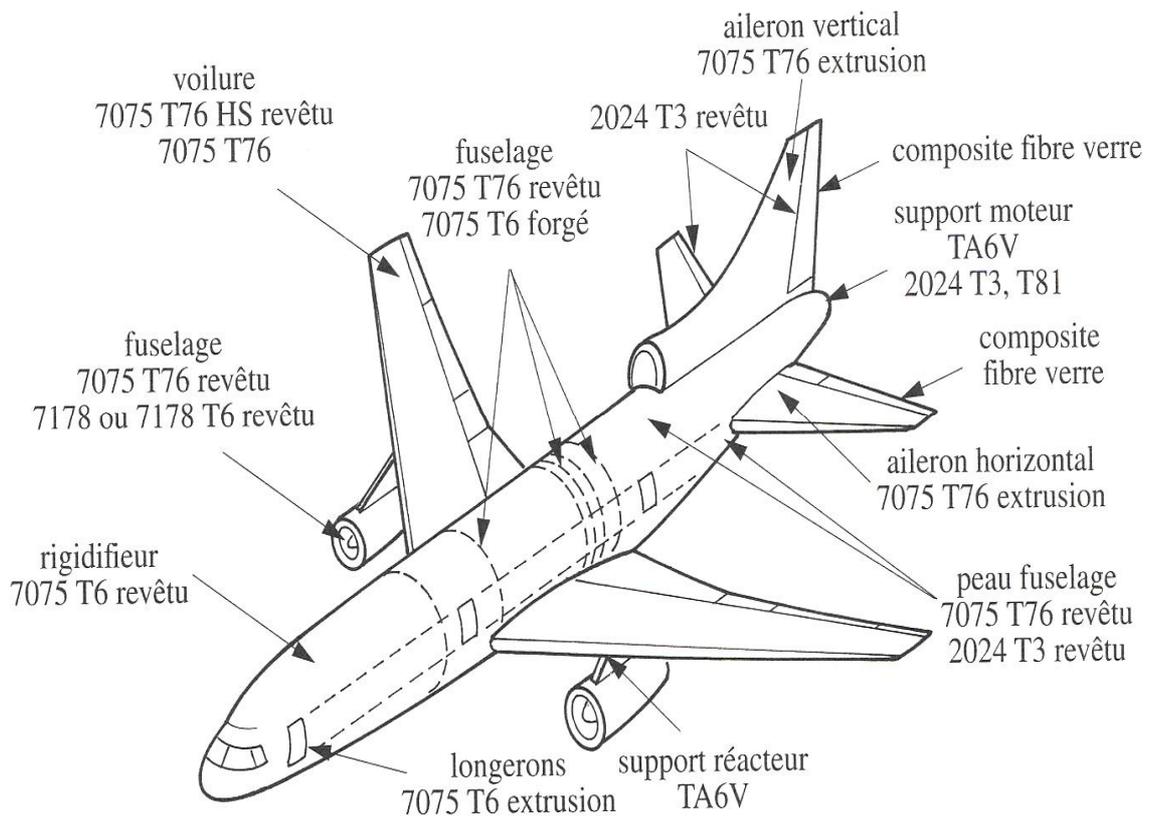
# **LISTE DES SYMBOLES**

# **INTRODUCTION GENERALE**

# PARTIE THEORIQUE

## CHAPITRE I

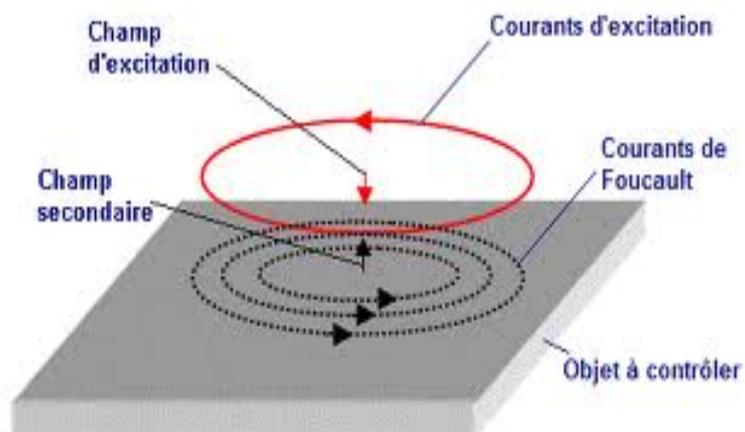
### LES ENJEUX DES MATERIAUX AERONAUTIQUES



# PARTIE THEORIQUE

## CHAPITRE II

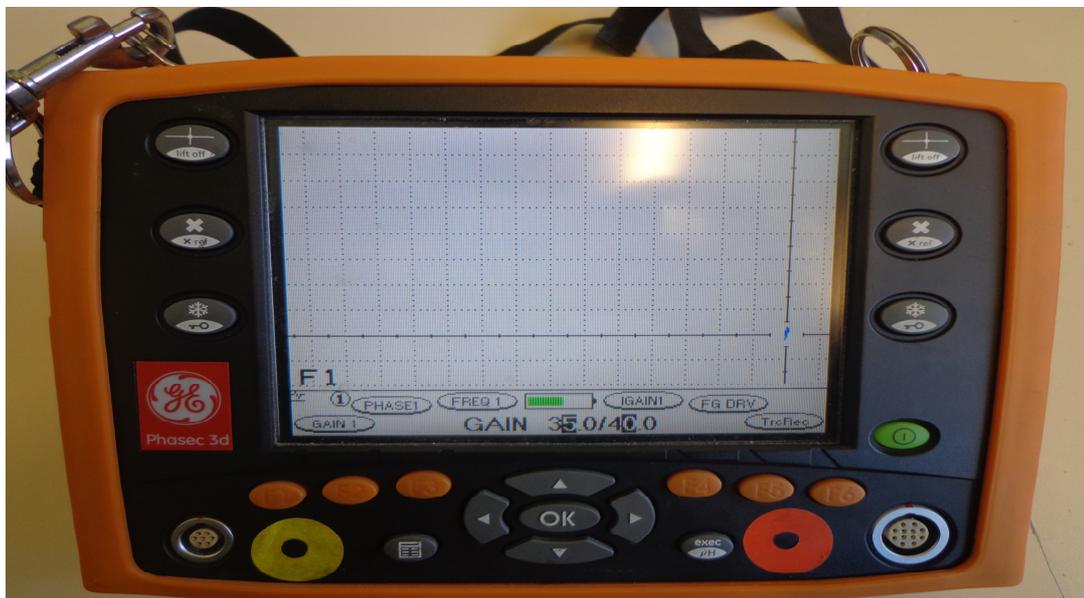
### LE CONTROLE NON DESTRUCTIF



# PARTIE PRATIQUE

## CHAPITRE I

### LES PROCEDES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT



# **PARTIE PRATIQUE**

## **CHAPITRE II**

### **LA MISE EN ŒUVRE EXPERIMENTALE DES COURANTS DE FOUCAUT EN MAINTENANCE AERONAUTIQUE**



# **CONCLUSION GENERALE**

# **ANNEXES**

# **BIBLIGRAPHIE**

## الملخص

في الطيران، المتطلبات الاعتمادية وخفضا لتكاليف والسلامة أصبحت أكثر صرامة أثناء تشغيل جزء طائرات، لان العمل فيظروفاً وأمنية يتطلب معرفة جيدة بالأجزاء المركبة . هذه المعرفة تعني علوجها لخصوص بالقيام بعمليات تفتيش دون تقويض سلامة الأجزاء وتقليلاً لتداخل مع توافر المنتج.

هذا يبرز أهمية الاختبار اغير المدمرة التي يتم استخدامها لتقييم كميات المميز للمنتج (سمك، الناقلية...) او لاكتشاف وجود عيوب وتميز من بين الأساليب الأكثر استخداماً على نطاق واسع هي المراقبة غير المدمرة بالتيار اتفوكول تالأسلوب الذي هو بسيط لتنفيذه و العمل به.

## RESUME

Dans l'aéronautique, les exigences de fiabilité, de réduction des coûts et de sécurité deviennent de plus en plus contraignantes. Durant l'exploitation d'un élément aéronef, son maintien en état de marche dans de bonnes conditions de sécurité nécessite une bonne connaissance de l'évolution des pièces qui le constitue. Cette connaissance implique en particulier de réaliser des contrôles ne portant pas atteinte à l'intégrité des pièces et en entravant le moins possible la disponibilité du produit.

Ceci justifie l'importance croissante que prend le contrôle non destructif (CND). Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité . . .), soit pour détecter la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées Le contrôle par CF est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre et complexe.

## ABSTRACT

In aeronautics, the requirements for reliability, cost reduction and safety are becoming more stringent. During the operation of an aircraft part, his continued working in safe conditions requires a good knowledge of the changing that is. This knowledge implies in particular to carry out checks without undermining the integrity of parts and minimizing interference with the availability of the product.

This justifies the growing importance that is non-destructive testing (NDT). The NDT methods are used either to evaluate the characteristic quantities of the product (thickness, conductivity ...) or to detect the presence of defects and characterize. Among the most widely used methods for CF control is a method that is simple to implement and complex.

# **Remerciements**

*Tout d'abord, nous tenons à exprimer tous nos remerciements et louanges à **DIEU** tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.*

*La rédaction de ce mémoire nous a permis d'apprécier la qualité des gens, qui nous ont apporté beaucoup d'aide et de soutien dans nos recherches et que nous souhaitons aujourd'hui les remercier :*

*Nos remerciements les plus sincères s'adressent à notre encadreur **Mr ZABOT Ammar**, chargé de cours à l'institut d'Aéronautique de **BLIDA**, qui nous a prodigués sans compter conseils et observations, qui a répondu à toutes nos sollicitations et qui nous a sans cesse encouragés à persévérer.*

*Nous exprimons toute notre gratitude à **Mr BELHAMISSI Abderrahmane**, Ingénieur en chef à Air Algérie, pour son aide inestimable qui nous a permis d'avoir accès à l'entreprise et qui nous a facilité les conditions pour effectuer notre stage pratique.*

*Nos vifs remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignants de l'institut aéronautique de Blida qui nous ont accompagné et guidé tout au long de notre cursus universitaire pour mener à bien cette recherche.*

*En fin, Un autre merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail. En particulier nos familles, sans qui l'achèvement de ce travail aurait été beaucoup plus difficile.*

## **TABLES DES MATIERES**

**RESUME**

**REMERCIEMENTS**

**TABLES DES MATIERES**

**LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX**

**LISTES DES SYMBOLES**

**INTRODUCTION GENERALE**

**PARTIE I : THEORIQUE**

**CHAPITRE I : LES ENJEUX DES MATERIAUX AERONAUTIQUES**

<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2 SELECTION DES MATERIAUX UTILISES.....</b>	<b>1</b>
<b>2.1 Les Métalliques.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1.1 Les alliages.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1.2 Les aciers.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Les Composites.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3 Les hybrides : le Glare.....</b>	<b>5</b>
<b>3 DOMMAGES DES MATERIAUX CONSTITUANT LES ELEMENTS AERONEFS.....</b>	<b>6</b>
<b>3.1 Identification des dommages structuraux.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2 Les principales causes des dommages.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.1 Dommages liés aux contraintes répétées.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.1.1 Les criques (Crack).....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.2 Dommages liés aux agressions chimiques.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.2.1 La corrosion (Corrosion).....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.3 Dommages liés aux mouvements.....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.3.1 Usure par arrachement de métal : (Fretting).....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.3.2 Distorsion : (Distorsion).....</b>	<b>9</b>
<b>3.2.3.3 Abrasion : (Abrasion).....</b>	<b>9</b>
<b>3.2.4 Dommages liés aux chocs accidentels.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2.4.1 Rayure(Scratch).....</b>	<b>10</b>
<b>3.2.4.2 Impact (dent).....</b>	<b>10</b>
<b>3.2.4.3 Ride (Gouge).....</b>	<b>10</b>
<b>3.2.4.4 Délamination : (Delaminating).....</b>	<b>11</b>
<b>4 CONCLUSION.....</b>	<b>11</b>

## **PARTIE I : THEORIQUE**

### **CHAPITRE II : LE CONTROLE NON DESTRUCTIF**

<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>13</b>
<b>2 DIFFERENTES METHODES DE CND.....</b>	<b>13</b>
2.1 Examen visuel.....	13
2.2 Ressuage.....	13
2.2.1 Introduction au ressuage.....	13
2.2.2 Avantages de ressuage.....	14
2.2.3 Inconvénients de ressuage.....	14
2.3 Magnétoscopie.....	15
2.3.1 Introduction au magnétoscopi.....	15
2.3.2 Les avantages de la magnétoscopie.....	15
2.3.3 Les inconvénients de la magnétoscopie.....	15
2.4 Radiographie.....	15
2.4.1 Introduction à la radiographie.....	15
2.4.2 Avantages de la radiographie.....	16
2.4.3 Inconvénients de la radiographie.....	16
2.5 Ultrasons.....	16
2.5.1 Introduction au Ultrasons.....	16
2.5.2 Les avantages des ultrasons.....	17
2.5.3 Les inconvénients des ultrasons.....	17
2.6 Thermographie.....	17
2.7 Courants de Foucault :.....	18
<b>3 CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT.....</b>	<b>18</b>
3.1 Origine des courants de Foucault (CF).....	18
3.2 Le principe des CND par CF.....	18
3.3 Avantages du CND par courants de Foucault.....	19
3.4 Limites du CND par courants de Foucault.....	20
<b>4 CONCLUSION.....</b>	<b>22</b>

## **PARTIE II : PRATIQUE**

### **CHAPITRE I : LES PROCEDES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULTS**

<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>23</b>
<b>2 RAPPEL DU PRINCIPE DE MESURE.....</b>	<b>23</b>
<b>3 APPAREILLAGE.....</b>	<b>24</b>

<b>3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN APPAREIL.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.1 LE GENERATEUR.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.2 LE SYSTEME DE DETECTION.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.3 LE SYSTEME DE RECEPTION ET D'EXPLOITATION.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.3.1 AMPLIFICATION.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.3.2 FILTRAGE.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.3.3 EXPLOITATION.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 REGLAGE ET ETALONNAGE DES APPAREILS.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.1 CHOIX DE LA FREQUENCE DE CONTROLE.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.2 ETALONNAGE.....</b>	<b>32</b>
<b>4 CONCLUSION.....</b>	<b>33</b>
<b>PARTIE II : PRATIQUE</b>	
<b>CHAPITRE II : LA MISE EN ŒUVRE EXPERIMENTALE DES COURANTS DE FOUCAULT EN MAINTENANCE AERONAUTIQUE</b>	
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>34</b>
<b>2 INSTRUCTION DE CONTROLE.....</b>	<b>34</b>
<b>2.1 Objet de contrôle.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2 Préparation avant inspection et calibration.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3 Mode opératoire et analyse des signaux.....</b>	<b>35</b>
<b>3 OBJET DE CONTROLE AVEC LA TECHNIQUE CF.....</b>	<b>35</b>
<b>4 LA MISE EN OEUVRE EXPERIMENTALE DE L'INSPECTION :.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Le contrôle haute fréquence sur des jantes avion.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Le contrôle ROTOTEST sur des jantes avion.....</b>	<b>40</b>
<b>4.3 Le contrôle Wheelscan sur jantes avion.....</b>	<b>44</b>
<b>5 CONCLUSION.....</b>	<b>46</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>47</b>
<b>ANNEXE</b>	
<b>BIBLIGRAPHIE</b>	

## LISTE DES SYMBOLES

MT : Technique du CND par Magnétoscopie  
ET : Technique du CND par Courants de Foucault  
RT : Technique du CND par Radiographie  
PT : Technique du CND par Ressuage  
UT : Technique du CND par Ultrasons  
E : Champ électrique  
D : Induction électrique  
H : Champ magnétique  
B : Induction magnétique  
J : Densité de Courant  
V : Tension électrique  
I : Courant électrique  
T : Température  
t : Temps  
F : Fréquence  
 $\omega$  : Pulsation angulaire  
Z : Impédance  
Z<sub>0</sub> : impédance électrique à vide (dans l'air)  
 $\Delta Z$  : variation d'impédance  
R : Résistance  
L : Inductance  
C : Capacité  
 $\phi$  : Phase  
l : Longueur de la bobine  
 $\delta$  : l'épaisseur de peau ou la profondeur de pénétration standard des CF  
CF : Courants de Foucault  
NDT : Non destructif testing  
CND : Contrôle non destructif  
IC : courants de Foucault  
UV : UltraViolet  
 $\rho$  : Masse volumique

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Tableau I.I.1 – Utilisation des matériaux dans les structures d'avions civils.....	1
Tableau I.I.2 – Principales familles d'alliages d'aluminium.....	3
Figure I-I.1 – Sollicitations appliquées à un avion .....	6
Figure I-I.2 Criques.....	7
Figure I-I.3 Corrosions .....	8
Figure I-I.4 Usures.....	8
Figure I-I.5 Distorsion.....	9
Figure I-I.6 Abrasion.....	9
Figure I-I.7 Rayure.....	10
Figure I-I.8 Impacts.....	10
Figure I-I.9 Rides.....	11
Figure I-I.10 – Délamination.....	11
Figure I-II.1 : Principe du ressuage.....	14
Figure I-II.2 : Principe de la magnétoscopie.....	15
Figure I-II.3 : Principe de Radiographie.....	16
Figure I-II.4 : Principe des ultrasons .....	17
Figure I-II.5 : Principe des courants de Foucault.....	19
Tableau I-II.1 : Application des méthodes CND.....	21
FIG II – I – 1 Présence de défaut provoque une discontinuité des CF.....	23
FIG II – I – 2 VARIATION de DZ.....	24
FIG II – I – 3 Schématisation de l'appareil courant Foucault.....	24
FIG II – I – 4 LE GENERATEUR .....	25
FIG II – I – 5 LE SYSTEME DE DETECTION.....	26
FIG II – I – 6 LE SYSTEME DE DETECTION ET D'EQUILIBRAGE PAR SOMMATEUR.....	26
FIG II – I – 7 Le système de réception.....	27
FIG II – I – 8 Les filtres .....	28
FIG II – I – 9 EFFET D'UN FILTRE PASSE-BAS POUR SUPPRESSION D'UN BRUIT HAUTE FREQUENCE.....	28
FIG II – I – 10 EFFET D'UN FILTRE PASSE-HAUTE POUR SUPPRESSION D'UN BRUIT BASSE-FREQUENCE.....	28
FIG II – I – 11 Le circuit d'exploitation .....	30
Tableau II-II.1: Paramètres d'étalonnage .....	36
Figure II-II.1 : Bloc de calibration en haute fréquence.....	36
Figure II-II.2: BEAD SEAT AREA with scanning direction (twice at 90°) to cover the whole possible cracks directions.....	37
Figure II-II.3: Possible cracks around air <b>VENT HOLE</b> (in red).....	37
Figure II-II.4: Inspection du demi attaché de la jante avec boulons .....	38
Figure II-II.5 Area of the bolt washers (scan circularly and radially to cover all possible cracks directions).....	38
Figure II-II.6 Scan area around drive key areas.....	39
Figure II-II.7 Position du défaut.....	39
Tableau II-II.2 : Paramètres d'étalonnage pour ROTOTEST .....	40
Figure II-II.8 Ecran typique pendant la calibration du rototest.....	40
Figure II-II.9 Bloc de calibration Rototest .....	41
Figure II-II.10 Vérification du rapport Signal Bruit sur le bloc étalon en rototest.....	42

Figure II-II.11 Défauts typiques observés sur l'écran lors des inspections.....	43
Figure II-II.12 Analyse de la position du défaut sur l'écran (mode Y – T).....	43
Figure II-II.13 Positions des Défauts typiques observés sur l'écran lors des inspections.....	44
Figure II-II.14: Roue Calibre B767-300 utilisée comme contrôle de performance journalier.....	44
Figure II-II.15 Impression des paramètres d'étalonnage .....	45
Figure II-II.16 Bloc de calibration wheelscan ( Alu Notch de 0.5 mm) - sonde 1.5 MHz....	45
Figure II-II.17 constatation des fissures.....	46

Les recherches en domaine aéronautique visent constamment à améliorer la sécurité. Deux grands axes peuvent être dégagés en ce qui concerne la sécurité en aéronautique : la sécurité lors de la construction et la sécurité lors de l'exploitation (maintenance).

Rigueur et précision dans la construction d'un avion sont primordiales pour assurer une sécurité optimale. Si bien qu'un grand nombre de pièces doivent remplir les conditions d'acceptation draconiennes pour pouvoir être utilisées.

Jusqu'ici, Il en est de même pour les structures d'avions où on se contente de gérer l'entretien, de manière à éviter des anomalies par des actions préventives. Cette approche, connue sous le nom « Trouver et Réparer », entraîne des coûts prohibitifs de maintenance. De plus, les inspections, qui sont effectuées pour la plupart en « visuelle détaillée », ne permettent pas de détecter les defaults dites « cachées ».

Pour la maintenance, les avions subissent des contrôles tout au long de leur exploitation. Les différents organes sont inspectés de manières non destructives en suivant des procédures bien précises.

**Ainsi, l'idée générale est de montrer les différentes techniques de contrôles non destructifs afin de garantir la qualité des pièces utilisées ainsi que la qualité de leur assemblage.**

Le choix de ce thème n'est pas fortuit, il repose sur un constat que le contrôle non destructif a une place prépondérante au sein de la maintenance aéronautique.

Pour ce faire, nous nous sommes tout d'abord intéressés à structurer notre présent projet de recherche sur deux parties distincts ; l'une théorique et l'autre pratique ; basées principalement sur la méthode analytique et expérimentale.

La première partie, théorique, a un double objectif. Le premier est de revenir sur les concepts et les enjeux des matériaux. Le second est de construire une discussion théorique autour de la problématique posée celle des techniques de contrôles non destructifs.

Pour ce faire, cette partie s'articule autour de deux chapitres, ayant chacun comme objectif de répondre à un questionnement spécifique :

- ✚ Le premier, qui s'intitule « LES ENJEUX DES MATERIAUX AERONAUTIQUES» vise à donner le choix des matériaux utilisés sur l'avion et les différents défauts occasionnés par le fonctionnement de ces matériaux lors de l'exploitation de l'avion.

- ✚ Le second chapitre procède à définir l'ensemble des techniques de contrôle non destructif en spécifiant les avantages et les limitations de chaque méthode, un aspect particulier est donné à l'étude de la technique courants de Foucault.

La seconde partie du mémoire, basée sur la pratique, étudie et analyse de manière empirique la mise en œuvre des courants de Foucault.

La partie pratique, est aussi scindée en deux chapitres :

✚ Le premier chapitre procède à décrire les procédés de contrôle non destructif par l'utilisation des courants de Foucault, en précisant l'appareillage.

✚ Le second ayant pour titre « LA MISE EN ŒUVRE EXPERIMENTALE DES COURANTS DE FOUCAULT EN MAINTENANCE AERONAUTIQUE», donne l'application réalisé sur les jantes avion.

Une conclusion intervient en dernier lieu, pour rappeler les résultats obtenus, et répondre à la problématique posée.

## 1 INTRODUCTION

Les matériaux et leurs procédés de mise en œuvre sont depuis toujours l'un des facteurs clés dans le développement des aéronefs et équipements aéronautiques. Ils ont largement contribué aux progrès considérables survenus dans le domaine de la fiabilité et des performances de ces structures, aussi bien en termes de résistance que de masse et durabilité. Des premiers engins volants à armatures en bois recouvertes de toile, propulsés par des hélices, elles aussi en bois, entraînées par des moteurs mettant en œuvre des alliages d'aluminium coulés, des aciers au carbone et des bronzes jusqu'aux avions les plus modernes intégrant matériaux composites à fibres de carbone, alliages d'aluminium corroyés et aciers très performants, alliages de titane à résistance spécifique élevée et superalliages base nickel permettant d'atteindre de très hautes températures, on peut mesurer le fantastique chemin parcouru en un siècle par les matériaux dont on a su repousser les limites d'utilisation. Cette marche en avant n'est aujourd'hui pas terminée, même si la voie paraît maintenant plus étroite, surtout quand on intègre le volet économique aux considérations purement techniques.

## 2 SELECTION DES MATERIAUX UTILISES

La construction d'un avion demande non seulement un savoir-faire, mais également la maîtrise des matériaux qui le constituent. Si nous regardons uniquement la partie extérieure d'un avion, nous voyons un assemblage complexe de nombreuses pièces de formes et de natures différentes. L'optimisation de la forme de l'avion est guidée par les lois de la mécanique de fluides, l'aérodynamique et la résistance des matériaux. L'une des problématiques majeures rencontrées par les concepteurs en aéronautique est l'optimisation du poids des éléments constituant les avions par rapport à la résistance qu'ils doivent fournir. L'aluminium a longtemps été le matériau principal du fuselage d'avion, comme le montre le tableau I.I.1, ceci en regard de sa relative légèreté en fonction de sa résistance mécanique et de sa facilité de mise en œuvre. Cependant, les efforts de recherche dans le domaine des matériaux ont permis de mettre en avant les avantages incontestables de nouveaux matériaux. Aussi, les fuselages sont maintenant une combinaison de matériaux métalliques, composites et hybrides.

Tableau I.I.1 – Utilisation des matériaux dans les structures d'avions civils

<i>Appareils</i>	<i>Alliages d'Aluminium</i>	<i>Alliages de titane</i>	<i>Composites organiques</i>	<i>Aciers</i>	<i>Autres</i>
A310	67 %	5 %	10 %	13 %	5 %
A320	58 %	6 %	20 %	13 %	3 %
A330/A340	73 %	6.5 %	10 %	7.5 %	3 %
A380	75 %	7 %	8 %	7 %	3 %

## **2.1 Les Métalliques**

Seuls à être utilisés pendant longtemps, les matériaux métalliques constituent encore actuellement du moins 60% de la structure des avions commerciaux. Ce sont principalement des alliages d'aluminium de différents types, caractérisés par différentes propriétés mécaniques, comme par exemple :

- ✚ Aile supérieure : (compression, stabilité) ;
- ✚ Aile Inférieure : (traction, fatigue, dommage) ;
- ✚ Fuselage.

De plus, en fonction des caractéristiques mécaniques, de sécurité ou encore thermiques de ces pièces, les alliages d'aluminium utilisés subissent des traitements spécifiques (trempe, recuit). Ainsi, une grande diversité de nuances d'alliage d'aluminium est présente sur un avion.

L'assemblage des différentes tôles se fait général par rivetage, ce qui constitue une augmentation du poids et des concentrations de contraintes mécaniques. Par conséquent, des alliages d'aluminium à base de silicium ont vu le jour afin de permettre un assemblage par soudure.

### **2.1.1 Les alliages**

Il est bien admis que les propriétés des alliages d'aluminium sont déterminées essentiellement par la microstructure des produits correspondants. Bien qu'actuellement encore toutes les interactions entre microstructure et propriétés ne soient pas parfaitement connues, les résultats des nombreuses et importantes recherches effectuées ces dernières années ont permis d'améliorer considérablement nos connaissances à cet égard, si bien qu'aujourd'hui on peut considérer que les ingénieurs disposent des éléments suffisants pour obtenir la microstructure optimale nécessaire pour une application donnée.

La microstructure est essentiellement conditionnée par la nature, la quantité et surtout la répartition des éléments d'addition. La plupart des éléments métalliques peuvent être alliés à l'aluminium, mais seul un nombre restreint d'éléments est utilisé à titre d'addition principale et conditionne les propriétés maîtresses des alliages.

Ces éléments sont le cuivre, le magnésium, le manganèse, le silicium, le zinc et, plus récemment, le lithium. Par contre, un grand nombre d'éléments dits secondaires sont utilisés pour obtenir une propriété spécifique, les principaux étant le fer, le chrome, le nickel, le zirconium, le titane, le cobalt, le vanadium, le plomb, le bismuth, l'étain, le cadmium...

Le tableau I-1.2 donne les principales familles d'alliages d'aluminium

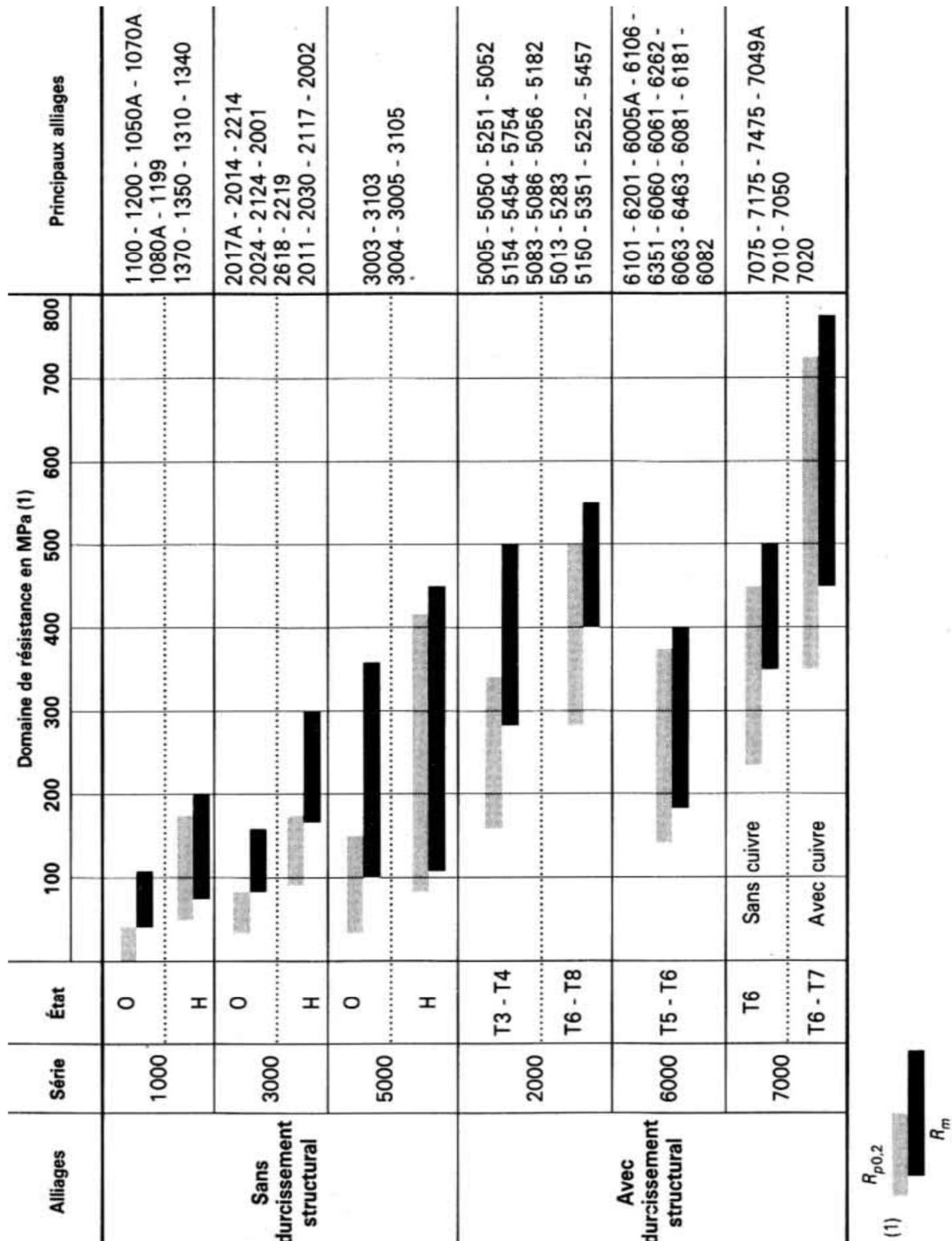


Tableau I.I.2 – Principales familles d’alliages d’aluminium

### 2.1.2 Les aciers

Les aciers sont en réalité des matériaux à haute teneur en fer et à teneur variable en carbone, manganèse, Phosphore et soufre, ainsi qu'accessoirement des corps tels que le silicium, le nickel, le chrome, le tungstène, etc.

Les caractéristiques mécaniques des aciers dépendent très directement de leur composition et du traitement thermique qu'ils ont subi, et par conséquent, dans un grand nombre de cas, l'acier peut répondre aux besoins de l'avionneur.

Si sa densité (7,8) paraît bien élevée pour la construction aéronautique, un certain nombre de qualités font qu'il est de plus en plus utilisé aujourd'hui :

- ✚ Son homogénéité ;
- ✚ Sa facilité d'assemblage : car la soudure autogène est utilisable aussi bien pour les aciers doux que les aciers spéciaux au chrome-molybdène ;
- ✚ La haute résistance des aciers au nickel, au chrome ou au tungstène.

### 2.2 Les Composites

La volonté d'optimiser le plus possible les capacités de vol des avions, en durée et en quantité de charge transportée par rapport à la consommation de carburant, a poussé avionneurs à développer de nouveaux matériaux. Ces matériaux requièrent des caractéristiques mécaniques de sécurité équivalentes, voire supérieure, aux éléments mécaniques remplacés. Les matériaux composites à matrice organique ont ainsi fait leur apparition. Parmi ceux-ci, les matériaux composites à base de fibres de carbone sont les plus employés dans le domaine aéronautique. La proportion de ces matériaux dans les avions est passée de 3% (AIRBUS-A300) à 25% (AIRBUS-A380) en l'espace d'une vingtaine d'années.

Contrairement aux matériaux métalliques, les matériaux composites à base de fibres de carbone sont constitués de plusieurs couches de brins tissés, posées les unes au-dessus des autres . Il s'agit du renfort qui constitue le squelette supportant les efforts mécaniques. Ces couches ont généralement des orientations différentes, permettant ainsi une bonne répartition de la résistance mécanique. Ces couches sont maintenues en position au moyen d'une matrice époxy qui transmet les efforts au renfort.

Ces structures sont donc hétérogènes et anisotropes.

Les matériaux composites à fibres de carbone sont définis par couche, par leurs nombres de couches et par l'orientation des couches vis-à-vis d'un référentiel. Leurs caractéristiques résultant de l'association "renfort/matrice" sont fonctions :

- ✚ Des proportions de renfort de la matrice ;
- ✚ Du conditionnement du renfort ;
- ✚ Du processus de fabrication.

Leurs avantages :

- ✚ Poids réduit ;
- ✚ Bonne tenue en corrosion et en fatigue ;
- ✚ Mise en œuvre simple, forme complexe et grande structure.

Leurs limitations :

- ✚ Cout relativement élevé ;
- ✚ Effets du vieillissement mal connus ;
- ✚ Fiable résistance aux chocs ;
- ✚ Tenue moindre des résines à haute température ;
- ✚ Difficulté de réparation de certaines structures ;
- ✚ Recyclage difficile.

La recherche et l'innovation dans le domaine des matériaux poussent toujours plus loin les caractéristiques mécaniques de ces nouveaux éléments ainsi que leur mise en œuvre. Les deux principales techniques d'assemblage de ces éléments sont à l'heure actuelle le rivetage et le collage. Néanmoins, de nouvelles techniques telles que le soudage par ultrasons ou par induction électromagnétique peuvent être envisagées.

### **2.3 Les hybrides : le Glare**

Le Glare, matériau stratifié est une alternance de matériaux métalliques (feuille d'aluminium d'épaisseur inférieure à 500  $\mu\text{m}$ ) et de matériaux organiques (nappes unidirectionnelles de fibres de verre imprégnées de résine époxyde) comme le montre la figure 1.3. Ils sont également issus de la recherche et de la volonté de trouver un compromis entre les différentes caractéristiques souhaitées (résistance, souplesse et légèreté).

Ses principaux avantages :

- ✚ Caractéristiques mécaniques améliorées comparées aux alliages d'aluminium ;
- ✚ Résistance à la corrosion ;
- ✚ Résistance au feu (capital au cas de crash) ;
- ✚ Vitesse de fissuration quasiment constante et relativement faible ;
- ✚ Répartition des contraintes mécaniques ;
- ✚ Résistance au niveau des jonctions d'assemblage ;
- ✚ Résistance aux impacts (déformation sans rupture) ;
- ✚ Une densité moins élevée que des panneaux classiques en aluminium.

Le Glare est un produit relativement récent (1970), ce qui explique son utilisation restreinte dans l'aéronautique malgré ses nombreux avantages. Toutefois, la société AIRBUS a intégré ce nouveau matériau dans son nouvel appareil A380.

### 3 DOMMAGES DES MATERIAUX CONSTITUANT LES ELEMENTS AERONEFS

La structure composant un avion civil est soumise, lorsque celui-ci est en service, à de nombreuses sollicitations (Figure I-I.1). Elles sont engendrées par la combinaison des effets de facteurs divers dont les principaux sont les suivants :

- ✚ Pressurisation du fuselage ;
- ✚ Efforts aérodynamiques ;
- ✚ Poids de l'appareil ;
- ✚ Turbulences atmosphériques ;
- ✚ Manœuvres du pilote ;
- ✚ Contacts avec le sol.

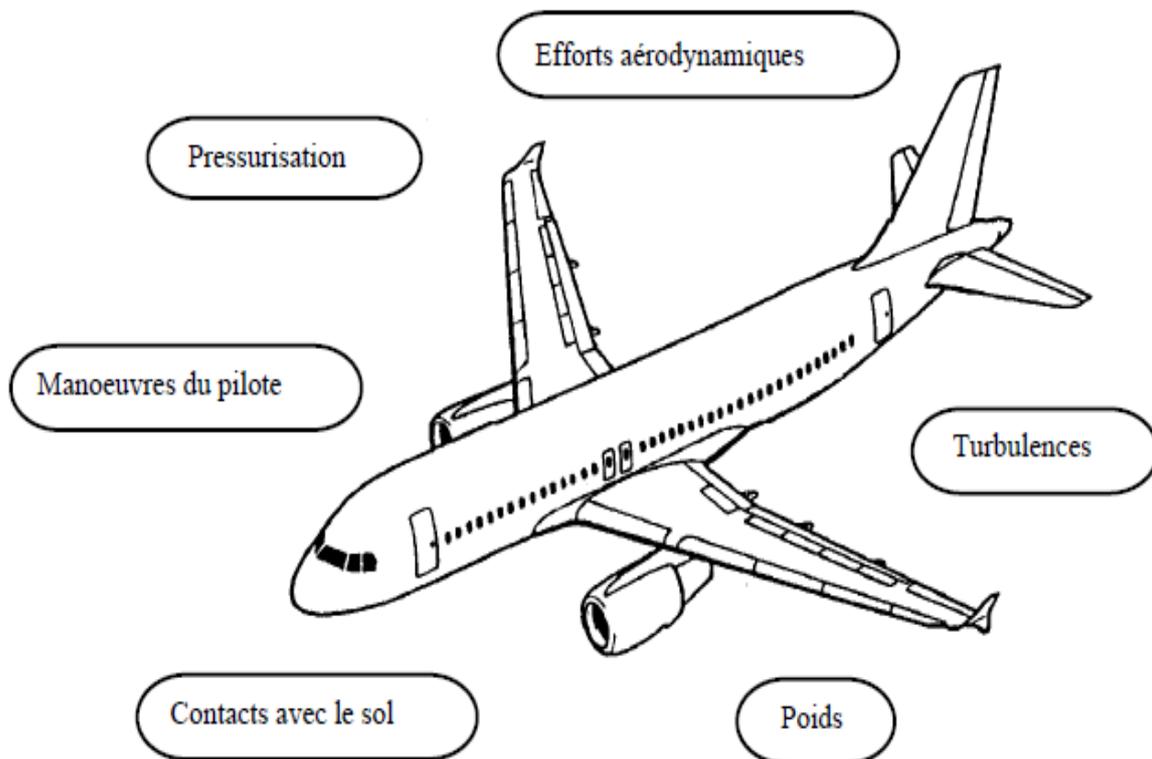


Figure I-I.1 – Sollicitations appliquées à un avion

La présence et l'intensité de ces sollicitations sont bien sûr liées aux phases d'utilisation de l'appareil (stationnement, décollage, vol, etc). L'évolution de ces efforts dans le temps et leur application répétée va provoquer des endommagements.

Le dommage est une dégradation ou un dégât que subissent les éléments d'aéronef. Il existe plusieurs formes des dommages parmi les quels sont répertoriés : (la corrosion, les rainures, l'impact, la crique....).

### **3.1 Identification des dommages structuraux**

Les dommages structuraux sont le résultat de plusieurs causes qui peuvent être catégorisés en général en quatre groupes :

- ✚ L'action mécanique ;
- ✚ La réaction chimique ou électro – chimique ;
- ✚ L'action cyclique ou thermique ;
- ✚ Les caractéristiques métallurgiques inhérentes.

### **3.2 Les principales causes des dommages**

nous avons classé les dommages selon les contraintes exercées sur les pièces

#### **3.2.1 Dommages liés aux contraintes répétées**

##### **3.2.1.1 Les criques (Crack)**

Une crique est une fracture partielle ou une cassure complète dans le matériau.

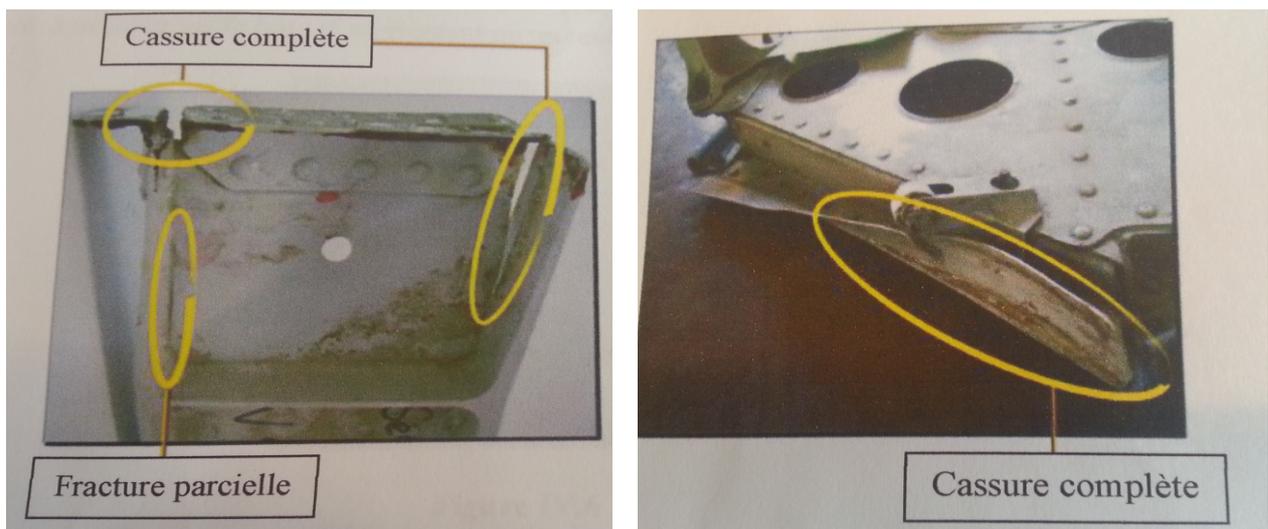


Figure I-I.2 Criques

#### **3.2.2 Dommages liés aux agressions chimiques**

##### **3.2.2.1 La corrosion (Corrosion)**

La corrosion est la destruction du métal par effet chimique ou électro- chimique.

Les différents types de corrosion qui peuvent exister dans l'avion sont :

- ✚ Corrosion par piqure (Pitting corrosion) ;
- ✚ Corrosion filiforme (filiform corrosion) ;
- ✚ Corrosion inter granulaire (intergranulaire corrosion) ;
- ✚ Corrosion galvanique (galvanic corrosion) ;

- ✚ Corrosion par fatigue (stress corrosion) ;
- ✚ Corrosion biologique (biological corrosion) ;
- ✚ Corrosion de zones en contact (fretting corrosion) ;
- ✚ Corrosion exfoliante ou feuilletée (exfoliation corrosion).

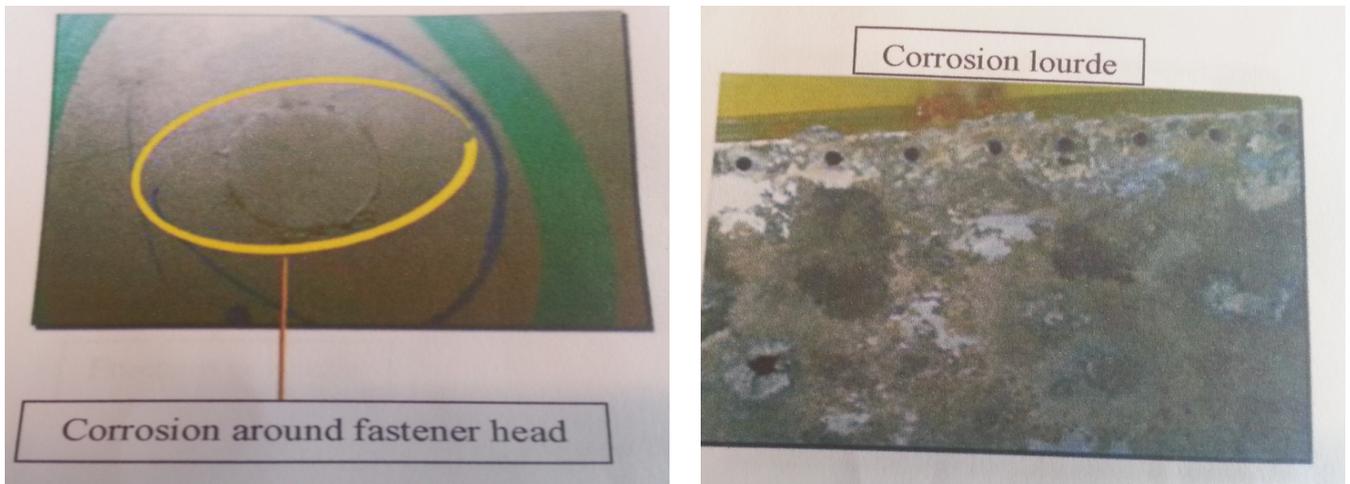


Figure I-I.3 Corrosions

### 3.2.3 Domages liés aux mouvements

#### 3.2.3.1 Usure par arrachement de métal : (Fretting)

Une usure par arrachement de métal est un dommage surfacique aux surfaces de contact dans les joints résultant de mouvements linéaires ou angulaires très petits. Le résultat de l'effritement est souvent la production d'une poudre fine noire.

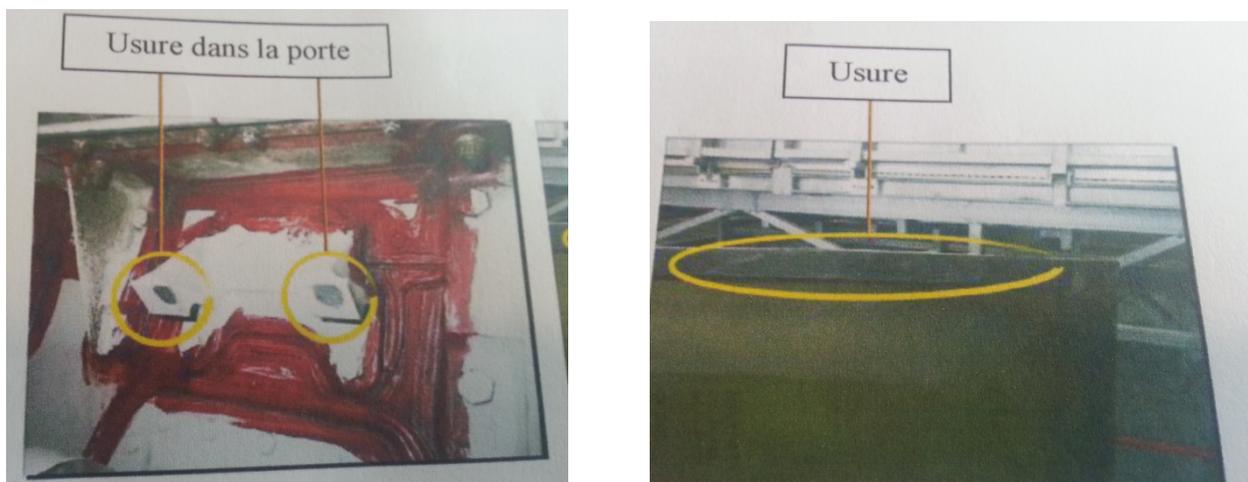


Figure I-I.4 Usures

### 3.2.3.2 Distorsion : (Distorsion)

Une distorsion est n'importe qu'elle torsion, fléchissement ou déformation permanente qui a pour conséquence un désalignement ou changement de forme. Elle peut être causée par un coup d'un objet inconnu, mais il est surtout le résultat de la vibration ou mouvement des éléments adjacents attachés à la pièce déformée. Ce groupe comprend le fléchissement, le voilement, la déformation, le déséquilibre, le désalignement, le serrage et le tortillement.



Figure I-I.5 Distorsion

### 3.2.3.3 Abrasion : (Abrasion)

C'est une zone endommagée de n'importe qu'elle dimension qui cause un changement dans la section transversale sous l'effet de frottement, friction, décapage ou tout autre érosion de surface. Elle est souvent rugueuse et irrégulière.

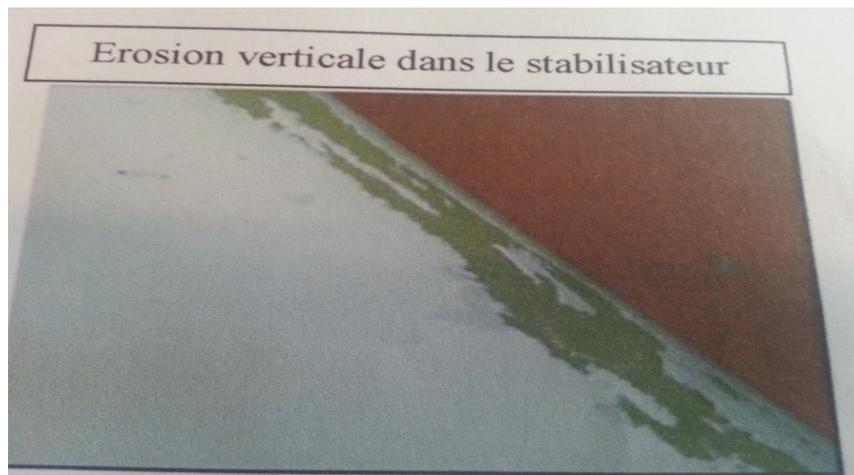


Figure I-I.6 Abrasion

### 3.2.4 Dommmages liés aux chocs accidentels

#### 3.2.4.1 Rayure(Scratch)

Une rayure est un dommage linéaire de n'importe qu'elle longueur et profondeur dans le matériau, qui cause un changement de la surface de la section transversale du matériau.

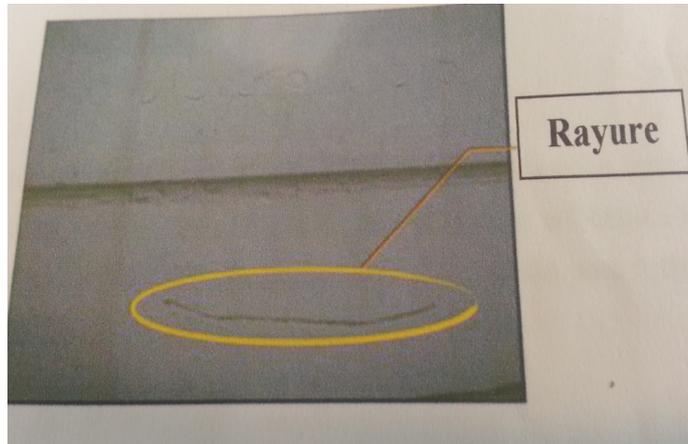


Figure I-I.7 Rayure

#### 3.2.4.2 Impact (dent)

Un impact est une zone endommagée, qui est déformée vers l'intérieur par rapport à son contour initial. Il n'y a pas de changement de la surface de la section transversale du matériau. Les bords de la zone endommagées son lisses.

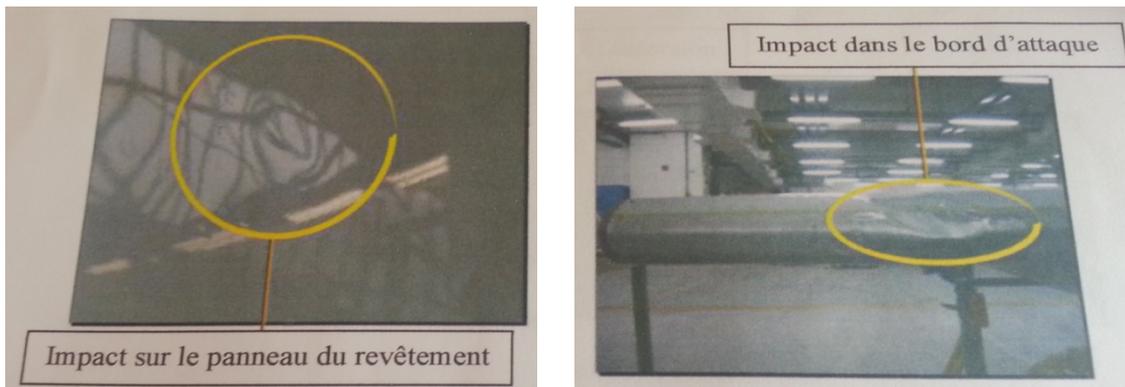


Figure I-I.8 Impacts

#### 3.2.4.3 Ride (Gouge)

Une ride est une zone endommagée de n'importe qu'elle dimension, qui consiste en un changement de la surface de la section transversale du matériau. Elle est causée en général par un contact avec un objet relativement tranchant, qui produit dans le matériau une sorte de canal continu, qui peut être coupant ou lisse, comme une rainure.

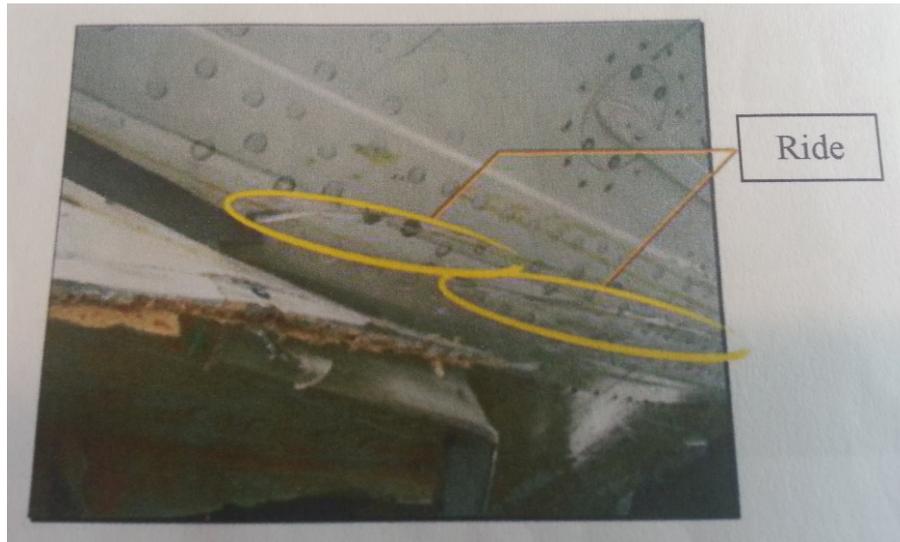


Figure I-I.9 Rides

#### 3.2.4.4 Délamination : (Delaminating)

On dit délamination lorsqu'il y a séparation entre plies dans un matériau laminé. Ce dommage peut être causé par des coups reçus par le matériau ou lorsque il y a un défaut de résine causé par d'autres raisons.



Figure I-I.10 – Délamination

## 4 CONCLUSION.

Les matériaux mis en œuvre dans l'industrie Aéronautique sont en constante amélioration en termes de performances (résistance mécanique, capacité en température, faible densité), maîtrise des procédés et réduction des coûts. De nouveaux outils pour la conception de matériaux innovants sont maintenant de plus en plus disponibles ce qui laisse entrevoir des progrès encore significatifs pour atteindre des spécifications objectives.

Malheureusement, ce progrès de matériaux n'a pas mis à l'abri la présence des défauts classiques que peut subir une pièce, plus les autres défauts spécifiques dus aux différentes applications.

Les contraintes de sécurité pour la filière aéronautique sont telles que le développement de moyens de Contrôles Non Destructif (C.N.D) a eu lieu, le chapitre suivant abordera les différentes techniques du contrôle non destructif utilisé en maintenance aéronautique.

## **1 INTRODUCTION**

Le Contrôle Non Destructif (CND) a pour objectif de vérifier l'intégrité d'une pièce ou d'un matériau sans l'endommager en détectant d'éventuels défauts présents dans celui-ci. Dans différents secteurs industriels (aéronautique, nucléaire, automobile, métallurgie...), le CND est primordial afin de garantir la sûreté de fonctionnement des systèmes critiques. Une grande variété de méthodes existent et permettent de détecter des anomalies internes ou de surface, de déterminer la composition ou la structure des matériaux. Le CND peut être utilisé en production, lors de la mise en service ou lors d'opérations de maintenance.

Le CND constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Aussi l'histoire du CND commence-t-elle avec celle de la physique moderne à la fin du XIX siècle : découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la piézo-électricité, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une importante accélération du progrès et du développement des CND s'est manifestée ensuite vers les années 1960-1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que les centrales électriques nucléaires ou encore l'aéronautique.

## **2 DIFFERENTES METHODES DE CND**

Les techniques de CND utilisées sont diverses : la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, les courants de Foucault... elles dépendent de la nature même du contrôle envisagé. Ces méthodes exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisition ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données. Ce deuxième chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui sera l'objet d'une étude plus détaillée.

### **2.1 Examen visuel**

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non destructifs. C'est la méthode la plus utilisée, car la plus économique à mettre en œuvre. Elle nécessite uniquement les "bons yeux" d'un opérateur.

### **2.2 Ressuage**

#### **2.2.1 Introduction au ressuage**

Cette méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes. La première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. Un liquide coloré ou

fluorescent dit "pénétrant" est ensuite appliqué sur la surface à contrôler. Il va s'infiltrer à l'intérieur des anomalies (fissures, porosités...).

L'excès de pénétrant est ensuite éliminé par un lavage adapté. La surface est alors recouverte d'une fine couche de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu dans les anomalies et donne une tache colorée en surface plus large que l'anomalie, permettant ainsi de la localiser. On dit alors que le révélateur fait "ressuer" le pénétrant (voir la figure I-II.1). Ces indications sont alors visibles à l'œil nu. Dans certains cas, on utilise un pénétrant fluorescent qui est révélé par un éclairage sous **UV**.

Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchants en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur d'autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec le pénétrant.

Les limitations du contrôle par ressuage sont liées au matériau lui-même : trop forte rugosité de surface, impossibilité d'employer les produits classiques qui endommageraient sa surface. Les défauts non débouchants ne peuvent être vus, de même que les fissures renfermant des corps susceptibles d'interdire l'entrée du pénétrant tels que peintures, oxydes. Le procédé lui-même est relativement lent, coûteux en temps. Il faut enfin prendre en compte, dans le coût du contrôle, la consommation des produits de ressuage dont l'utilisation peut nuire à l'environnement.

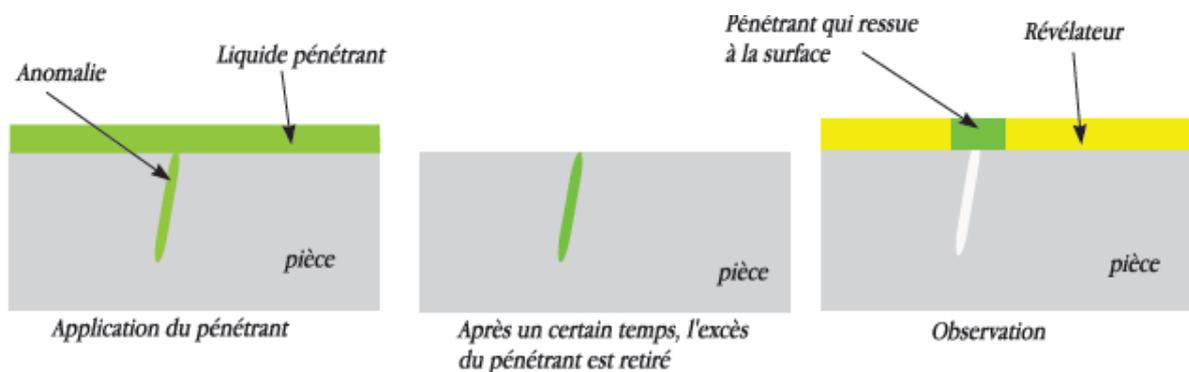


Figure I-II.1 : Principe du ressuage

### 2.2.2 Avantages de ressuage

- ✚ Simplicité d'utilisation ;
- ✚ Meilleure méthode pour les fissures de surface de rupture dans les métaux non ferreux ;
- ✚ Convient pour des tests automatiques, avec réserve concernant le visionnement ;  
( reconnaissance automatique des défauts dans l'inspection des particules magnétiques)
- ✚ Quantative.

### 2.2.3 Inconvénients de ressuage

- ✚ Réservé aux défauts de surface de rupture seulement ;
- ✚ Diminution de la sensibilité ;
- ✚ Utilise une quantité considérable de consommables.

## 2.3 Magnétoscopie

### 2.3.1 Introduction au magnétoscopie

C'est une technique qui révèle les défauts débouchants ou sous-cutanés. Toutefois, elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte,...).

L'examen par magnétoscopie consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Une poudre magnétique est ensuite projetée à la surface et se répartit de façon homogène si la pièce est saine. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques. Lorsqu'un défaut est présent dans la pièce au voisinage de la surface, l'orientation du flux de l'induction magnétique est modifiée localement et son intensité augmente en surface. Il apparaît alors une concentration de particules magnétiques qui révèle la présence du défaut comme l'illustre la figure I.II.2

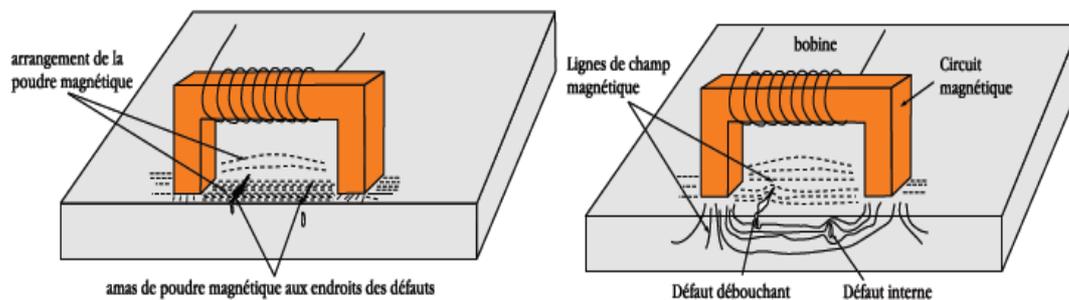


Figure I.II.2 : Principe de la magnétoscopie

### 2.3.2 Les avantages de la magnétoscopie

- ✚ Simplicité d'utilisation et d'application ;
- ✚ Quantitative ;
- ✚ Peut-être automatisé, en dehors de visionnement.

### 2.3.3 Les inconvénients de la magnétoscopie

- ✚ Réservé aux matériaux ferromagnétiques ;
- ✚ Réservé aux défauts de surface ou près de la surface.

## 2.4 Radiographie

### 2.4.1 Introduction à la radiographie

Le principe de la radiographie est le même que pour le domaine médical. La méthode met à profit l'absorption par la matière des rayonnements électromagnétiques ionisants.

L'examen de la structure ou de l'état interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon  $X$ , ou  $\gamma$ ) et à recueillir le rayonnement résiduel non absorbé sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la figure I.II.3.

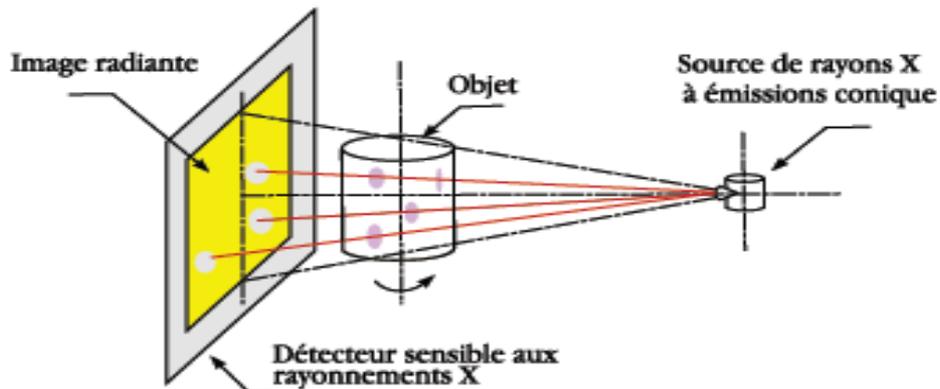


Figure I.II.3 : Principe de Radiographie

### **2.4.2 Avantages de la radiographie**

- ✚ L'information est présentée graphiquement ;
- ✚ Un dossier permanent est fourni, qui peut être consulté à un moment et le lieu éloigné de l'essai ;
- ✚ Utile pour les coupes fines ;
- ✚ Sensibilité déclarés pour chaque film ;
- ✚ Adapté à n'importe quel matériau.

### **2.4.3 Inconvénients de la radiographie**

- ✚ En général, une incapacité à faire face aux sections épaisses ;
- ✚ Danger pour la santé possible ;
- ✚ Nécessité de diriger le faisceau avec précision les défauts bidimensionnels ;
- ✚ Le traitement du film et des dispositifs de visualisation sont nécessaires, tout comme une exposition composée ;
- ✚ Ne convient pas pour l'automatisation, à moins que le système intègre la radioscopie avec un intensificateur d'image ou d'autres appareils électroniques ;
- ✚ Ne convient pas aux défauts de surface ;
- ✚ Pas d'indication de la profondeur d'un défaut en dessous de la surface.

## **2.5 Ultrasons**

### **2.5.1 Introduction au Ultrasons**

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce).

Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises (Figure I.II.4).

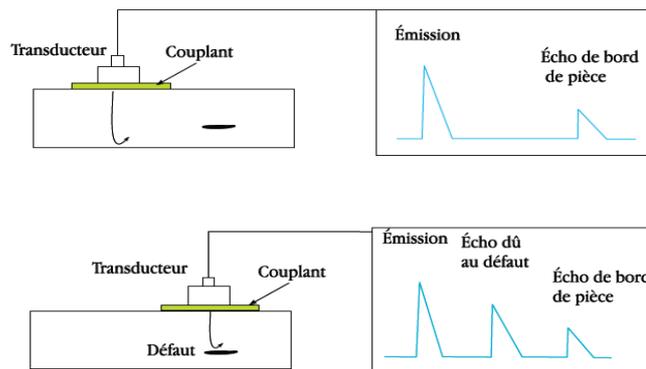


Figure I.II.4 : Principe des ultrasons

Le contact entre le transducteur et la cible n'est jamais parfait ; il existe une couche d'air les séparant. La quasi-totalité de l'énergie émise par le transducteur à l'interface air-matériau ne pénètre pas à l'intérieur du matériau. Il y a ainsi nécessité de déposer un couplant (eau, huile par exemple) entre le transducteur et le matériau.

### 2.5.2 Les avantages des ultrasons

- ✚ L'épaisseur et la longueur jusqu'à 30 m peuvent être testées ;
- ✚ Position, taille et type de défaut peut être déterminé ;
- ✚ Les résultats des tests instantanés ;
- ✚ Portable ;
- ✚ Extrêmement sensible, si nécessaire ;
- ✚ Capable d'être entièrement automatisé ;
- ✚ L'accès à un seul côté nécessaire ;
- ✚ Pas de consommable.

### 2.5.3 Les inconvénients des ultrasons

- ✚ Aucun enregistrement permanent à moins que l'un des tests plus sophistiqués résultats et des systèmes de collecte de données est utilisé ;
- ✚ L'opérateur peut décider si l'éprouvette est défectueux ;
- ✚ Les indications doivent être interprétées ;
- ✚ Degré considérable de compétences nécessaires pour obtenir l'information la plus complète du test ;
- ✚ Sections très mince peut s'avérer difficile.

## 2.6 Thermographie

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces observées. Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple). Les discontinuités dans la pièce

se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique.

## **2.7 Courants de Foucault :**

Comme cette technique fera l'objet de notre étude, nous avons consacré sa description à part dans le paragraphe qui suit pour donner plus de précisions et de définitions.

# **3 CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT**

## **3.1 Origine des courants de Foucault (CF)**

Il est connu que le phénomène d'induction électromagnétique génère des courants induit dans un fil conducteur (bobine ou solénoïde) lorsque celui-ci est soumis à un flux magnétique variable.

Rappelons qu'une variation de flux magnétique peut être obtenue, soit par déplacement du fil conducteur dans un champ magnétique (aimant), soit grâce à l'utilisation d'un champ magnétique variable à l'aide d'une bobine alimentée par un courant électrique alternatif par exemple.

Ce même phénomène d'induction électromagnétique est observé lorsqu'on remplace le fil conducteur par une pièce massive conductrice de l'électricité. Dans ce cas, les courants induits dans la pièce portent le nom de COURANT DE FOUCAULT.

Ces courants de Foucault induits dans la pièce circulent suivant des trajectoires telles qu'ils s'opposent à la variation du flux inducteur. Ainsi, si on place une bobine inductrice parcourue par un courant alternatif  $i$ , perpendiculairement à la surface d'une pièce massive, les courants de Foucault  $IC$  vont circuler préférentiellement suivant des trajectoires parallèles à la surface de la pièce. Si la même bobine inductrice est placée parallèlement à la surface de la pièce, les courants de Foucault  $IC$  vont suivre préférentiellement des trajectoires perpendiculaires à la surface de la pièce.

En règle générale, on retiendra que les courants de Foucault circulent dans des plans parallèles aux spires de la bobine inductrice. Notons par ailleurs, que les courants de Foucault vont provoquer un échauffement de la pièce par effet joule. Dans certaines applications (cas des transformateurs par exemple) cet effet est nuisible car il correspond à une perte d'énergie. De façon à réduire le courant de Foucault, on réalise alors la carcasse des transformateurs à l'aide d'un feuilletage constitué d'un empilement de tôles perpendiculaires aux lignes de courants de Foucault, séparées par un vernis isolent. Un tel feuilletage s'oppose donc à la circulation des courants de Foucault.

## **3.2 Le principe des CND par CF**

On appelle courants de Foucault (CF) ou courants induits les courants électriques créés dans un objet conducteur, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique dans lequel est plongé l'objet, soit par déplacement de cet objet dans un champ magnétique constant. Ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851.

Pour appliquer la technique de CND par CF, une bobine (appelée émetteur ou excitateur) parcourue par un courant alternatif est placée au voisinage de la pièce conductrice testée. Des courants de Foucault se développent dans la pièce en formant des boucles. Ces courants ont la même fréquence que le courant émetteur et génèrent un champ magnétique induit qui s'ajoute au champ émetteur. Un défaut dans la pièce dévierait la circulation des courants de Foucault et modifierait donc le champ magnétique résultant. La variation du champ magnétique est détectée à l'aide d'une bobine ou d'un capteur de champ magnétique. Un choix particulier est d'utiliser la bobine émettrice comme élément de mesure de la variation du champ résultant.

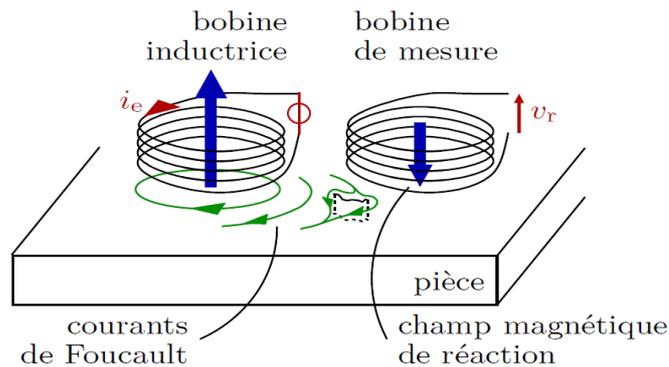


Figure I.II.5 : Principe des courants de Foucault

### 3.3 Avantages du CND par courants de Foucault

#### ✚ La simplicité

Le principal avantage des sondes à CF est leur facilité de mise en œuvre. Le contrôle est réalisé sans contact, et par conséquent sans utilisation de couplant. Le signal CF est obtenu directement et instantanément.

#### ✚ L'intégration

La nature électrique du signal CF mesuré permet aussi de bénéficier fortement des avancées récentes au niveau de l'intégration des composants électroniques, en termes de réduction de volume comme d'augmentation des performances. Le signal CF est en effet directement utilisable pour d'éventuels traitements électroniques analogiques, suivis d'une numérisation et de traitements numériques ou informatiques. Cela permet d'envisager des appareils de contrôle à la fois plus petits, plus légers et plus rapides.

#### ✚ Le coût

Un dispositif CF très simple est une unique bobine avec un générateur, un voltmètre et un ampèremètre. Il s'agit d'un dispositif très bon marché, qui même en augmentant la complexité de la technologie ou de l'instrumentation (utilisation de multiplexeur, de détection synchrone, de capteurs de haute technologie), reste abordable et ne demande pas un investissement primordial trop important.

### **3.4 Limites du CND par courants de Foucault**

#### **✚ La non-linéarité**

Une forte non-linéarité entre la géométrie des défauts situés dans la pièce à inspecter et la réponse obtenue avec une sonde CF. L'analyse des signaux produits est donc relativement complexe et l'opérateur doit être habitué à cette technique pour être efficace, c'est-à-dire réalisant un contrôle rapide et fiable.

#### **✚ La résolution**

Un défaut ponctuel de dimensions micrométriques dévie toutes les lignes de courants qui s'approchent de lui. Si l'émetteur fait une surface de l'ordre du millimètre carré, les courants induits parcourent une surface au moins égale voire plus grande que celle-ci. Par conséquent, le défaut micrométrique correspond à une réponse qui s'étend sur plusieurs millimètres carrés, ce qui a pour conséquence de détériorer nettement la résolution spatiale d'une sonde à courant de Foucault.

#### **✚ L'effet de peau**

La décroissance exponentielle sur l'amplitude des courants localisés à une faible profondeur. Ce phénomène, appelé effet de peau, a pour conséquence la difficulté voire l'impossibilité de détecter un défaut situé à une distance très supérieure à l'épaisseur de peau  $\delta$ . En effet, les courants induits ont une amplitude inférieure à **95%** de l'amplitude maximale au-delà d'une profondeur supérieure à **3  $\delta$** .

#### **✚ Le positionnement**

L'induction des courants de Foucault est fonction du couplage entre la sonde et la pièce. Si celui-ci varie au cours de la mesure ou n'est pas celui attendu, la mesure sera faussée. Un décollement ou une inclinaison de la sonde par rapport à la surface de la pièce sont les deux principaux problèmes de positionnement rencontrés, qui conduisent à une variation parasite de l'impédance mesurée]. En particulier, le contrôle des surfaces non planes peut ainsi poser problème si la sonde ne se conforme pas à la surface.

Material	Flaw Type						
	Surface Cracks & Flaws	Sub-Surface Cracks & Flaws	Internal Flaws & Discontinuities	Lack of Bond or Lack of Fusion	Non-Metallic Inclusions - Slag, Porosity	Material Quality	Laminations, Thickness Measurement
Ferrous Forgings & Stampings	M.T.	M.T. U.T.	R.T. U.T.		R.T. U.T.		U.T.
Ferrous Raw Materials & Rolled Products	M.T.	M.T. U.T.	U.T.		M.T. U.T.		U.T.
Ferrous Tube & Pipe	M.T. E.T.	M.T. U.T.	U.T.	U.T.	M.T. U.T.		U.T.
Ferrous Welds	M.T. U.T.	U.T.	R.T. U.T.	R.T. U.T.	R.T. U.T.		U.T.
Steel Castings	M.T.	M.T. U.T.	R.T. U.T.		R.T. U.T.		U.T.
Iron Castings	M.T.	U.T. E.T.	U.T.		R.T. U.T.	U.T.	U.T.
Non-Ferrous Components & Materials	P.T. E.T.		R.T. U.T.	U.T.	P.T. U.T.		U.T.
Ferrous Components Finished	M.T.	U.T. E.T.	R.T. U.T.	U.T.	M.T. U.T.		U.T.
Non-Ferrous Components Finished	P.T. E.T.	U.T. E.T.	R.T. U.T.		U.T. E.T.		U.T.
Aircraft Ferrous Components	R.T. M.T. E.T.	M.T. U.T.	R.T. U.T.	U.T.	M.T. U.T.		U.T.
Aircraft Non-Ferrous Components	R.T. P.T. E.T.	R.T. U.T.	R.T. U.T.	U.T.	P.T. U.T.		U.T.

R.T. - X or Gamma Radiography      M.T. - Magnetic Particle Inspection  
 P.T. - Dye Penetrant                      U.T. - Ultrasonic  
 E.T. - Eddy Current

Tableau I.II.1 : Application des méthodes CND

#### **4 CONCLUSION**

Ce deuxième chapitre de la partie théorique a introduit le principe de fonctionnement du contrôle non destructif et les besoins aéronautiques croissants qui ont provoqué le rapide développement de ce domaine de recherche. L'intérêt est de pouvoir vérifier le fonctionnement correct des parties critiques d'un système sans en altérer les propriétés physiques. En particulier, nous avons présenté avec plus de détails les courants de Foucault qui sont l'objet d'étude de notre mémoire.

Nous avons accentué notre étude par une description des avantages et les limites de chaque technique de CND dont le tableau I.II.1 récapitule convenablement le choix de l'une de ces techniques.

Ainsi, nous entamerons la deuxième partie de notre mémoire, qui est la partie pratique, scindée aussi en deux chapitres.

## 1 INTRODUCTION

Les procédés de contrôle non destructif CND par courant de Foucault utilisent des appareils couvrant les applications de contrôle statiques et dynamiques en basses, moyennes et hautes fréquences d'essais.

Ils permettent la détection de défauts de surface et sous-cutanés, la recherche de corrosion, la mesure de conductivité, la mesure d'épaisseur de revêtement, les criques. Pour arriver à déceler ces défauts, il est primordial de comprendre le principe de fonctionnement de l'appareillage de CND par CF.

## 2 RAPPEL DU PRINCIPE DE MESURE

Nous avons vu qu'un capteur est caractérisé par son impédance électrique à vide (dans l'air)  $Z_0$  donnée par :

$$Z_0 = j.X_0 = j.L_0.\omega$$

Lorsque ce même capteur est placé en contact ou à proximité d'un conducteur métallique, sous l'effet d'induction-électromagnétique, il apparaît des courants de Foucault dans le matériau. Ce phénomène conduit à une variation de l'impédance électrique de la bobine, qui est alors donnée par  $Z$  :

$$Z = R + j.X = R + j.L.\omega$$

Si maintenant un défaut est présent au sein de la pièce à contrôler, ce défaut perturbe la circulation des courants de Foucault.

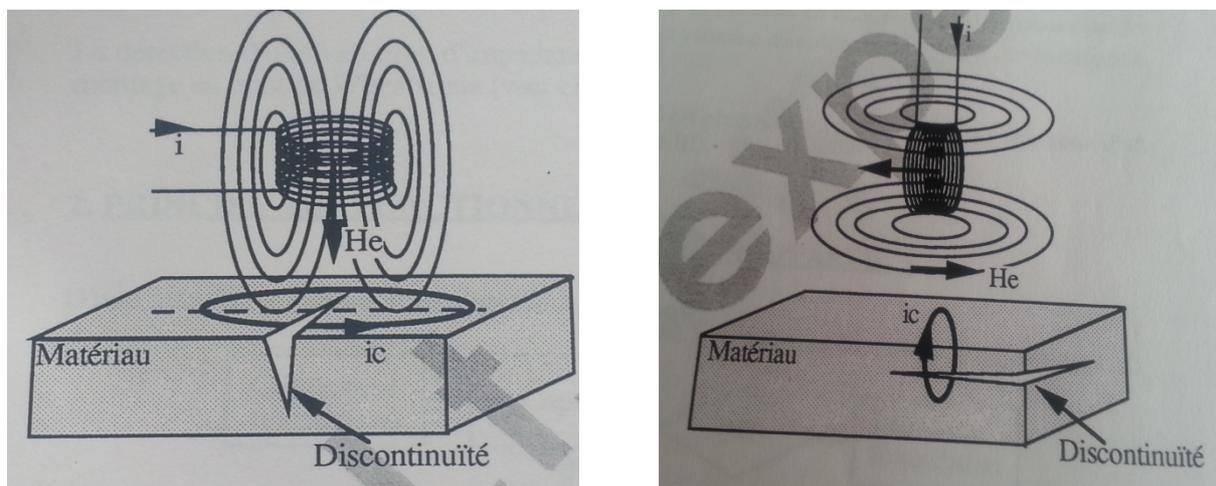


FIG II – I – 1 Présence de défaut provoque une discontinuité des CF

Cela se traduit également par une variation  $\Delta Z$  de l'impédance électrique  $Z$  de la bobine.

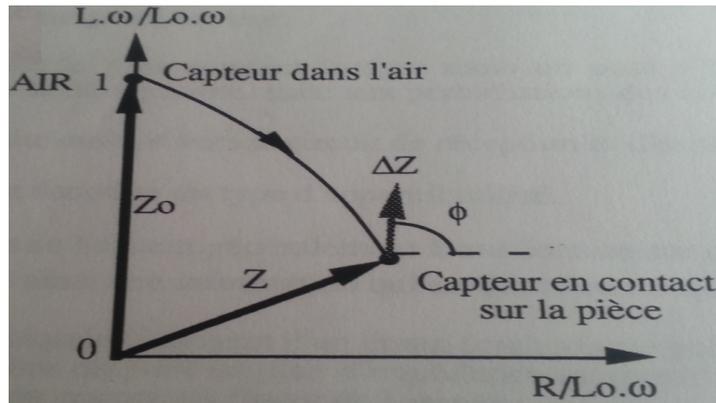


FIG II – I – 2 VARIATION de DZ

Nous avons vu que cette variation d'impédance  $\Delta Z$  peut être représentée sur le plan d'impédance normé par un déplacement du point fonctionnement. Rappelons que la direction de déplacement du point de fonctionnement dans le plan d'impédance normé dépend de la nature du défaut ou paramètre qui a perturbé la circulation des courants de Foucault.

Le principe de la mesure consiste donc à détecter ou à mesurer toute variation d'impédance électrique  $\Delta Z$  de l'impédance  $Z$  du capteur qui est associé à la présence d'un défaut.

Précisons maintenant que les appareils permettent une analyse plus ou moins poussée de la variation  $\Delta Z$ . Certains appareils ne donnent qu'une information qui est fonction du module (c'est-à-dire l'amplitude)  $\Delta Z$  de la variation d'impédance  $\Delta Z$ .

D'autres appareils autorisent une analyse plus poussée, en donnant des informations sur le module  $\Delta Z$ , mais aussi sur la phase  $\theta$  de la variation d'impédance  $\Delta Z$  (c'est-à-dire la direction du déplacement du point de fonctionnement). La détection d'une variation d'impédance  $\Delta Z$  est généralement assurée grâce à l'utilisation d'un montage en pont de Wheatstone.

### 3 APPAREILLAGE

#### 3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN APPAREIL

D'une manière générale, tout appareil à courant de Foucault peut être schématisés comme suit :

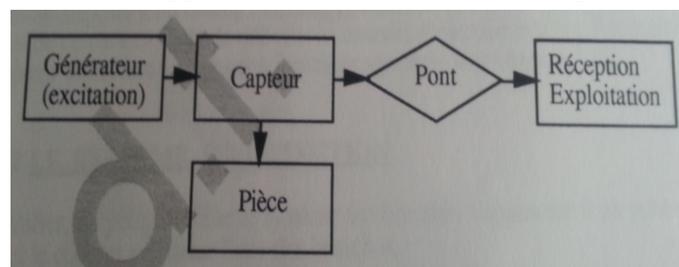


FIG II – I – 3 schématisation de l'appareil courant Foucault

L'excitation est assurée par un générateur électrique délivrent un courant sinusoïdal de fréquence donnée dans le bobinage du capteur. Le système de détection est le plus souvent intégré dans un pont d'impédance (pont de Wheatstone) dont on mesure le déséquilibre, suite

aux perturbations des courants de Foucault. Ce signal de mesure est ensuite envoyé vers le circuit de réception et d'exploitation.

L'exploitation des signaux est fonction du type d'appareil utilisé. Les appareils les plus simples se limitent généralement à une lecture sur cadran à aiguille, ou à affichage numérique, donnant ainsi une information qui est fonction de  $|\Delta Z|$  uniquement.

D'autres appareils plus sophistiqués disposent d'un écran (cathodique par exemple) permettant une visualisation du déséquilibre du pont en plan d'impédance (souvent noté XY), en fonction du temps (souvent noté Y(t)), ou encore en figure de Lissajou.

Ces divers modes de représentation du signal seront développés ultérieurement.

### 3.1.1 LE GÉNÉRATEUR

Le système d'excitation ou générateur comprend généralement deux parties :

- ✚ Un OSCILLATEUR dont la fonction est de générer une tension sinusoïdale de référence, et dont la fréquence est fixe ou réglable (souvent continument).
- ✚ Un AMPLIFICATEUR, encore appelé AMPLIFICATEUR D'INJECTION dont la fonction est de délivrer une puissance suffisante pour l'excitation du capteur.

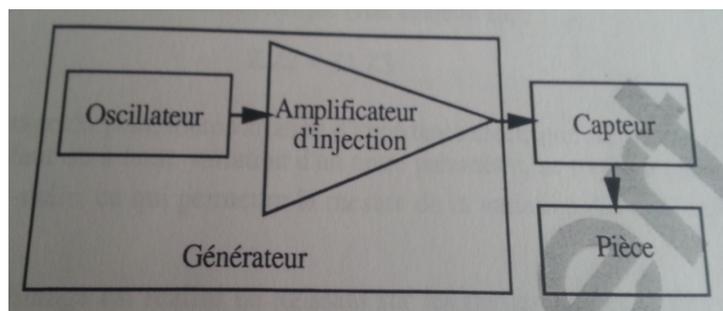


FIG II – I – 4 LE GÉNÉRATEUR

Certains générateurs travaillent à courant constant (générateur de courant), d'autres travaillent à tension constante (générateur de tension). Précisons qu'il est plus simple de réaliser un générateur de tension, qu'un générateur de courant.

C'est pourquoi, en règle générale, les appareils travaillent avec un générateur de tension, notamment dans le cas des appareils qui travaillent à haute fréquence ( $F > 1$  kHz), à basse fréquence, et principalement pour le contrôle de pièces ferromagnétiques ou il est nécessaire de disposer d'un champ magnétique d'excitation  $H_e$  élevé, le générateur utilisé est un générateur de courant capable de délivrer un courant d'injection intense. Rappelons que dans ce cas, le capteur utilisé est un capteur à fonction séparées.

### 3.1.2 LE SYSTEME DE DETECTION

Pour simplifier, on peut dire que le système de détection s'apparente à un pont de Wheatstone dans lequel le capteur constitue l'une des branches. Les figures suivantes donnent quelques exemples de montages possibles :

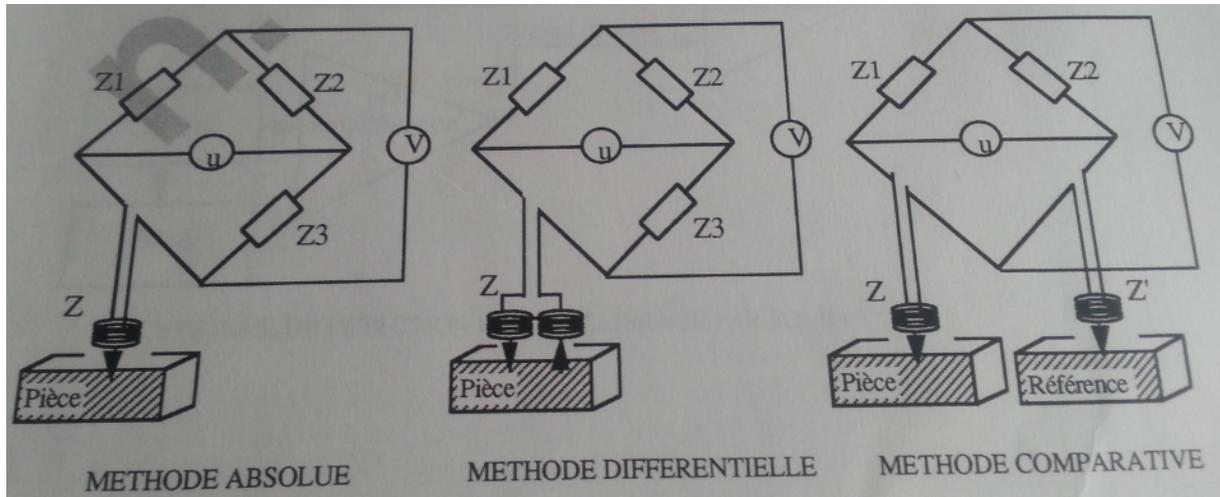


FIG II – I – 5 LE SYSTEME DE DETECTION

#### EQUILIBRAGE OU ZERO :

Notons qu'avant tout contrôle, il est nécessaire de procéder à l'EQUILIBRAGE du pont. On dit encore que l'on fait le ZERO. L'équilibrage consiste à ajuster les valeurs des impédances du pont en fonction de l'impédance  $Z$  du capteur (en contact sur la pièce) pour que la tension  $U$  soit nulle. Rappelons que cette condition est réalisée lorsque :

$$Z.Z2 = Z1.Z3$$

Ainsi, après équilibrage du pont, toute variation d'impédance électrique  $\Delta Z$  de la bobine, liée à la présence d'un défaut ou à toute variation d'un autre paramètre, se traduira par l'apparition d'une tension  $U$  non-nulle, ce qui permettra la mesure de la variation  $\Delta Z$  de l'impédance du capteur. Précisons que l'équilibrage est réalisé en agissant sur les parties réelles et imaginaires des impédances électriques constituant le pont.

C'est pourquoi certains appareils comprennent deux réglages notés R et X. Suivant les appareils, l'équilibrage peut être réalisé manuellement ou automatiquement.

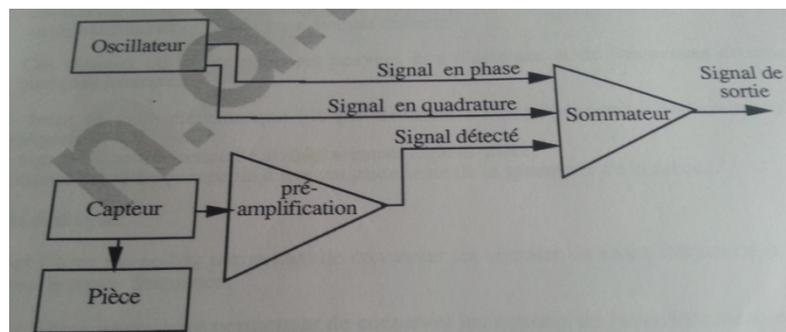


FIG II – I – 6 LE SYSTEME DE DETECTION ET D'EQUILIBRAGE PAR SOMMATEUR

### 3.1.3 LE SYSTÈME DE RÉCEPTION ET D'EXPLOITATION

Le système de réception et d'exploitation de la tension  $U$  apparaissant aux bornes du pont (ou du signal de sortie du SOMMATEUR) comprend les principales fonctions suivantes :

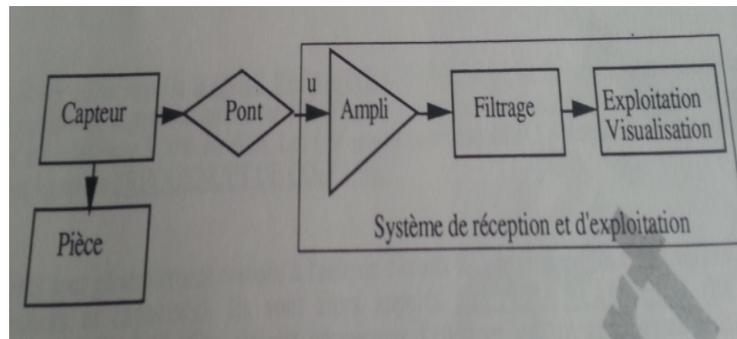


FIG II – I – 7 Le système de réception

#### 3.1.3.1 AMPLIFICATION

Le signal de sortie  $U$  du système de détection est amplifié. L'amplification doit être telle qu'elle :

- ✚ Ne produit pas de distorsion, c'est-à-dire de déformation du signal ;
- ✚ Ne modifie pas la phase du signal ;
- ✚ Ne génère pas de bruit, surtout lorsqu'on travaille à gain élevé.

**Remarque :** on dit qu'un signal a subi une distorsion, lorsqu'après amplification, le signal de sortie n'est pas une reproduction linéaire du signal d'entrée.

#### 3.1.3.2 FILTRAGE

Un filtrage est souvent nécessaire pour supprimer tout signal ou bruit parasites venant s'ajouter au signal détecté et rendant son analyse difficile. Ces signaux ou bruits parasites peuvent être d'origines et de fréquences diverses. Citons quelques exemples :

- ✚ Bruit parasite électronique (du par exemple à l'amplification). C'est un signal de haute fréquence,
- ✚ Signal basse fréquence lié au déplacement capteur-pièce,
- ✚ Signal basse fréquence lié à une variation lente de la géométrie de la pièce...

On distingue :

- ✚ Les filtres passé-bas permettant de conserver les signaux de basse fréquence et de supprimer ceux de haute fréquence,
- ✚ Les filtres passé-haut permettant de conserver les signaux de haute fréquence et de supprimer ceux de basse fréquence,

- Les filtres passé-bande permettant de conserver les signaux de fréquence moyenne et de supprimer ceux de haute et basse fréquence. En règle générale, lorsque ce type de filtre est utilisé, sa bande passante à 3dB est réglée entre  $F/2$  et  $2F$ , si  $F$  est la fréquence de travail.

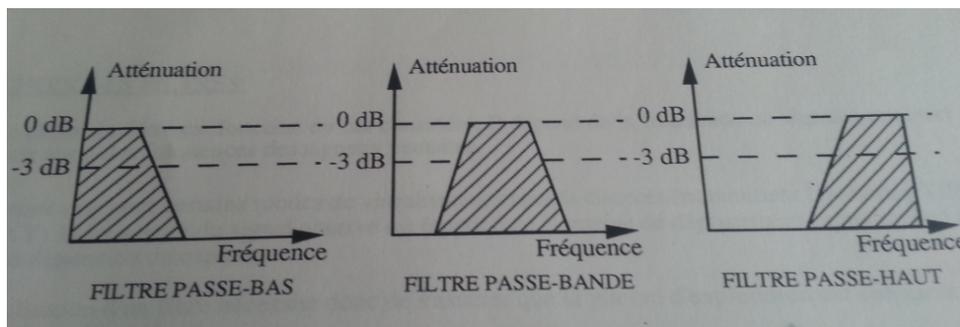


FIG II – I – 8 Les filtres

Rappelons qu'on appelle **BANDE PASSANTE** à -3dB la plage de fréquence dans laquelle l'atténuation du signal est inférieure à 3dB, c'est-à-dire que l'atténuation de l'amplitude du signal est inférieure à 30% environ. Les fréquences pour lesquelles l'atténuation est égale à 3dB sont appelées **FREQUENCES DE COUPURE**.

Les filtres sont généralement réalisés à l'aide de circuit RC (résistances et capacités) ou LC (inductance et capacités). Ils sont alors appelés **DIFFERENCIATEUR** (RC) et **INTEGRATEUR** (LC). Ces circuits permettent d'atténuer les signaux basses et hautes fréquences respectivement.

La figure suivante donne quelques exemples d'utilisation de filtres :

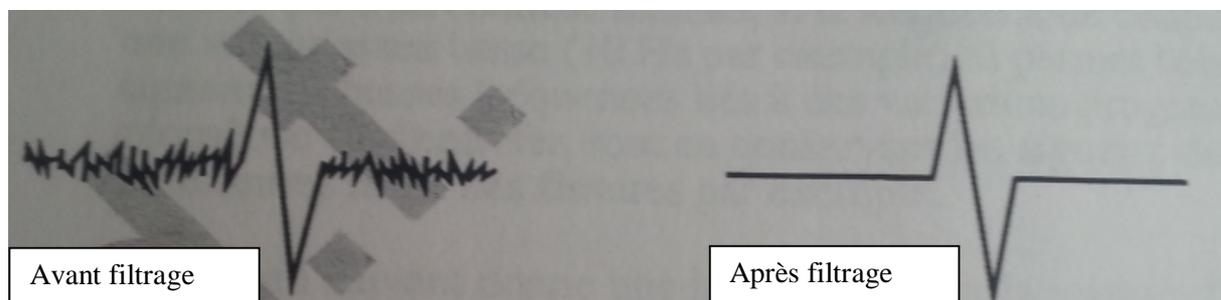


FIG II – I – 9 EFFET D'UN FILTRE PASSE-BAS  
POUR SUPPRESSION D'UN BRUIT HAUTE FREQUENCE

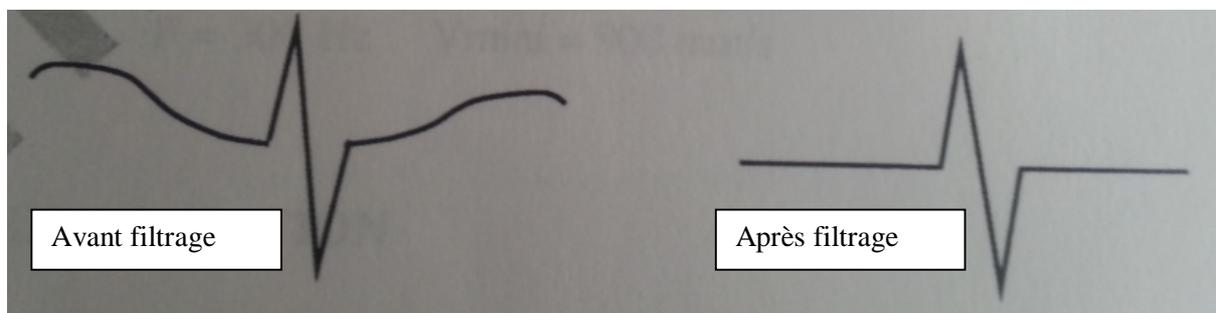


FIG II – I – 10 EFFET D'UN FILTRE PASSE-HAUTE  
POUR SUPPRESSION D'UN BRUIT BASSE-FREQUENCE

Lors d'un contrôle par courant de Foucault, le filtre utilisé doit être choisi de façon à obtenir un signal à analyser le plus pur possible. Il doit être choisi et fixé pendant l'étalonnage. Et ne doit pas être modifié par la suite.

Notons que l'utilisation d'un filtre risque de conduire à une modification de la phase du signal.

### **CHOIX DES FILTRES :**

Le choix du filtre est fonction du cas considéré. Il dépend de la fréquence du signal à analyser mais aussi des fréquences des signaux parasites.

Notons que pour certains modes de visualisation exposés ci-après (notamment les modes Y ( $\theta$ ) et XY), la fréquence du signal observé est fonction de la vitesse de déplacement capteur/pièce et de la dimension du capteur.

L'utilisation d'un filtre nécessite donc de s'assurer que la vitesse d'exploitation est constante et adaptée au filtre choisi.

Les utilisations préconisées des filtres sont généralement les suivantes :

- ✚ Filtre passe-bas : contrôle manuel pour l'élimination de bruit parasite à fréquence élevé (Bruit électronique par exemple).

Le tableau suivant donne une information sur la vitesse d'exploitation maximale autorisée en fonction de la fréquence de coupure choisie (pour une sonde dont la largeur d'action est d'environ 1 mm) :

- F = 3 Hz                      V maxi = 6 mm/s
- F = 30 Hz                     V maxi = 60 mm/s
- F = 300 Hz                   V maxi = 600 mm/s

- ✚ Filtre passe-bande : Contrôle à l'aide de sonde rotative.

Ce filtre doit être choisi en fonction de la vitesse de rotation de la sonde du diamètre de la bobine utilisée. Ainsi que du diamètre du corps de la sonde est grand, plus la fréquence centrale de la bande passante du filtre doit être élevée.

- ✚ Filtre passe-haut : Contrôle par sonde rotative ou contrôle manuel.

Dans le cas d'un contrôle manuel, si la fréquence de coupure est réglée à une valeur assez basse (10 Hz par exemple), il permet l'élimination de signaux de basses fréquences liés à des variations progressives de géométrie ou d'entrefer, tout en conservant les signaux de fréquences supérieures liés à des fissures par exemple.

Le tableau suivant donne une information sur la vitesse d'exploitation minimale autorisée en fonction de la fréquence de coupure choisie (pour une sonde dont la largeur d'action est d'environ 1 mm) :

- F = 3 Hz                      V mini = 10 mm/s
- F = 10 Hz                    V mini = 30 mm/s
- F = 30 Hz                    V mini = 60 mm/s
- F = 300 Hz                  V mini = 900 mm/s

### 3.1.3.3 EXPLOITATION

Le rôle du circuit d'exploitation est de remonter à la variation d'impédance électrique  $\Delta Z$  du capteur, à partir de la simple connaissance de la tension U après amplification et filtrage. En effet, la tension U apparaissant aux bornes du pont est proportionnelle à la variation  $\Delta Z$  de l'impédance électrique du capteur.

#### A/ Visualisation en fonction du temps Y(t)

Ce mode de visualisation consiste à représenter sur l'écran de l'appareil (écran cathodique par exemple), l'amplitude de la tension U en fonction du temps t.

Ceci est réalisé en envoyant la tension U amplifiée et filtrée sur la voie Y de l'écran. La voie X est alimentée par une tension en dent de scie (qui est une fonction linéaire du temps t), de même fréquence que la tension V délivrée par le générateur.

Le circuit d'exploitation correspondant à ce mode de visualisation se résume de la manière suivante :

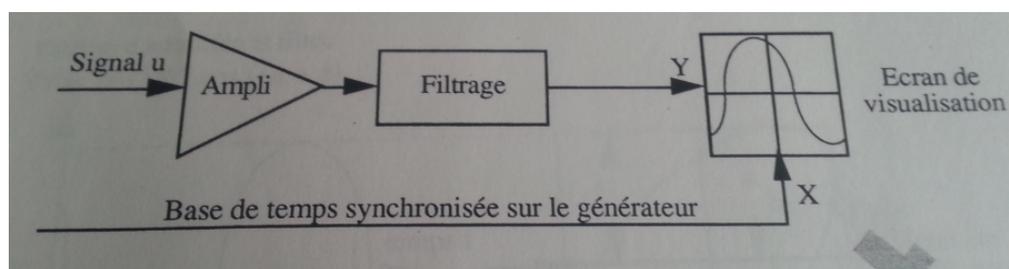


FIG II – I – 11 Le circuit d'exploitation

#### Remarque :

Dans le cas du contrôle automatique d'alésage à l'aide de sonde rotative, on utilise fréquemment une représentation du signal qui est également appelée Y(t).

Notons que dans ce cas, le réglage de la base de temps est très différent de ce qui vient d'être exposé. La base de temps n'est plus directement synchronisée sur le générateur, mais est synchronisée sur le mouvement de rotation de la sonde.

La longueur de l'axe X de l'écran ne correspond plus alors à une période  $T=1/F$  du signal délivré par le générateur, mais correspond au temps nécessaire au capteur pour effectuer une rotation complète ( $2\pi$  ou  $360^\circ$ ).

Ce mode de visualisation mériterait donc plutôt l'appellation Y( $\theta$ ), où  $\theta$  représente la position angulaire de sonde dans l'alésage.

## **B/ Visualisation en plan d'impédance XY**

Pour ce mode de visualisation, l'objectif du circuit d'exploitation est de permettre une visualisation de la variation d'impédance  $\Delta Z$  dans le plan d'impédance.

Ceci peut être réalisé en utilisant divers types de circuits. Les principaux circuits utilisés dans les appareils à courant de Foucault sont :

- ✚ La détection par échantillonnage (la plus souvent utilisée) ;
- ✚ La détection synchrone (encore appelée détection par multiplication).

Les principes de fonctionnement de ces circuits d'exploitation sont relativement complexes, et nous ne les développerons pas ici. Après exploitation, les tensions  $U_p$  et  $U_q$  sont envoyées sur les voies X et Y de l'écran de visualisation (écran cathodique par exemple), permettant ainsi une visualisation en plan d'impédance (les voies X et Y représentent respectivement les parties réelle et imaginaire du plan d'impédance).

En absence de défaut, le pont de Wheatstone étant équilibré, la tension  $U$  est nulle. Ceci se traduit par un point apparaissant au centre de l'écran. En cas de déséquilibre du pont, on observe un déplacement du point sur l'écran.

### **3.2 REGLAGE ET ETALONNAGE DES APPAREILS**

Pour un contrôle donné, après avoir déterminé le type de capteur à utiliser et la fréquence de travail, il convient de procéder aux réglages de l'appareil.

Les principaux réglages, qui doivent être impérativement réalisés, sont généralement effectués dans l'ordre suivant ((si l'appareil utilisé offre la possibilité de les effectuer) :

- ✚ Adaptation des impédances électriques de l'appareil et du capteur équipé de son câble,
- ✚ Réglage de la fréquence ;
- ✚ Réglage des filtres ;
- ✚ Réglage de l'équilibrage ou zéro (encore appelé compensation) ;
- ✚ Réglage de l'amplification (ou gain, parfois appelée sensibilité) ;
- ✚ Réglage de la phase (parfois appelée rotation de phase ou lift-off) ;
- ✚ Réglage du seuil de détection et des alarmes.

#### **Remarque :**

Certains appareils sont équipés d'une fonction permettant d'assurer une dilatation de l'échelle de l'axe Y par rapport celle de l'axe X sur l'écran de visualisation. Cette fonction correspond à une amplification séparée de l'une des composantes X et Y du signal, et est appelée gain X, gain Y, ou gain XY. Cette fonction est essentiellement utilisée pour une optimisation de

l'analyse des signaux, notamment pour mieux discriminer les signaux de défauts des autres signaux éventuels.

## **CHOIX DE LA FREQUENCE DE CONTRÔLE**

Le choix de la fréquence de contrôle est souvent fonction du cas de contrôle considéré, ainsi que des objectifs de ce contrôle. Les principaux objectifs sont les suivants :

### **1<sup>er</sup> objectif : Profondeur de pénétration suffisante pour assurer la détection des défauts :**

Le premier impératif à respecter est de s'assurer que la profondeur de pénétration des courants de Foucault est suffisante pour détecter les défauts là où ils risquent de se trouver.

### **2<sup>ème</sup> objectif : Discrimination du signal de défaut parmi d'autres signaux :**

Le deuxième objectif généralement recherché est d'être capable de facilement discriminer le signal du défaut recherché d'autres signaux correspondants à d'autres paramètres (variation d'entrefer par exemple...).

### **3<sup>ème</sup> objectif : Détermination de la profondeur d'un défaut :**

Dans certains cas d'application (contrôle des barres et tubes notamment), on peut être amené à vouloir déterminer la profondeur d'un défaut.

### **REMARQUE IMPORTANTE :**

Les calculs théoriques ne permettent que d'évaluer la fréquence de contrôle à utiliser. Dans tous les cas, cette valeur théorique doit être vérifiée expérimentalement.

## **3.2.1 ETALONNAGE**

Le réglage de l'appareil est une phase primordiale pour une bonne exécution du contrôle. Le réglage de l'amplification (gain) est notamment d'une grande importance puisque la sanction du contrôle est fonction de l'amplitude du signal détectée par rapport au seuil pré-réglé.

Le réglage de l'appareil doit donc impérativement être réalisé à l'aide de pièces de référence encore appelées ETALONS. Cette phase est donc appelée ETALONNAGE.

Les étalons utilisés doivent être en tous points comparables aux contrôlées. Ils doivent notamment :

- ✚ Etre de même nature (matériau identique) ;
- ✚ Avoir subi les mêmes traitements thermomécaniques ;
- ✚ Avoir la même géométrie (dimension, épaisseur, forme.....).

Que les pièces à contrôler.

De plus les étalons doivent comporter des défauts réels ou simulés. Ces défauts étalons doivent être tels que :

- ✚ Leur forme (défaut volumique, ou fin) ;
- ✚ Leur dimension ;
- ✚ Leur position dans la pièce (orientation, profondeur...).

Soient le plus représentatif possible des défauts recherchés.

#### 4 CONCLUSION

Un appareil de contrôle non destructif par courants de Foucault. Il peut être utilisé pour la détection de défauts dans les structures ou les pièces métalliques, ou pour mesurer les propriétés physiques et géométriques des pièces. Le principe de fonctionnement des courants de Foucault est le suivant : l'appareil injecte un courant alternatif dans une bobine incorporée dans une sonde. Le champ magnétique généré par la bobine pénètre dans l'objet contrôlé (appelé cible) et y crée des courants induits (courants de Foucault). Les propriétés de ces courants dépendent de celles de la cible. Ils agissent ainsi comme des sondes virtuelles introduites à l'intérieur de la celle-ci. Un ensemble de bobines de détection également incorporées dans la sonde mesurent le champ magnétique secondaire créé par les courants induits. L'analyse de ce champ permet de déterminer différents paramètres de la cible : épaisseur, forme, conductivité électrique, perméabilité magnétique, distance, etc. Lorsqu'il y a des défauts dans la cible, ces défauts perturbent la trajectoire des courants induits et modifient la distribution du champ magnétique local aux alentours de la cible. Il est donc possible de détecter la présence des défauts et de déterminer leur gravité par un examen de la distribution du champ magnétique local. Comprendre le principe de fonctionnement de l'appareillage des contrôles non destructif par courants de Foucault permettra l'analyse exacte des signaux donc la précision sur le défaut.

Ainsi ce procédé de contrôle lié à l'appareillage servira de base au deuxième chapitre consacré à la mise en œuvre expérimentale des inspections à courants de Foucault.

## 1 INTRODUCTION

Pour mener à bien notre étude sur l'application des courants de Foucault en maintenance aéronautique, nous avons jugé utile d'une mise en œuvre expérimentale. La méthode expérimentale est une démarche scientifique qui consiste à tester par des expériences répétées la validité d'une hypothèse en obtenant des données nouvelles, qualitatives ou quantitatives, conformes ou non à l'hypothèse initiale. L'expérience scientifique se distingue de l'expérience empirique en ce qu'elle exige un protocole conçu à partir d'une hypothèse. Le travail consiste à en premier lieu à faire des inspections sur des jantes avion avec une prospection diversifiés.

Notre choix s'est penché sur l'inspection en haute fréquence, le rototest et le wheelscan.

Pour ce faire, notre méthodologie de recherche consiste à faire des méthodes d'inspection allant du stade du choix du matériel (appareil utilisée), jusqu'à trouver le type du défaut, par la rédaction d'une instruction de contrôle pour chaque modèle de pièce sur laquelle nous entamons notre expertise.

## 2 INSTRUCTION DE CONTROLE

La rédaction d'une instruction de contrôle décrivant les phases d'une expertise, subdivisée en trois étapes dans la méthode proposée et permettra de respecter une suite logique des opérations.

### 2.1 Objet de contrôle

Le stade de contrôle est très important car c'est lui qui va définir la nature des défauts à rechercher, la méthode et la technique utilisée pour réaliser le contrôle, et les caractéristique de la pièce (la matière, les protections éventuelles, le traitement thermique...).

Cette phase est liée directement au stade de contrôle, elle déterminera le type de défauts pouvant être détectés pendant le contrôle, il sera possible donc de trouver (des criques de fatigue, de la corrosion, des rayures ou autres).

A ne pas oublier que les rayures et les chocs pourraient être détectés pendant l'inspection visuelle (première action du contrôle CND).

### 2.2 Préparation avant inspection et calibration

Il est important de faire l'état de tout le matériel nécessaire à la réalisation du contrôle : type d'appareil, Connexion secteur, Câble, Palpeur, Cale étalon ... à ajouter l'état des ingrédients nécessaires pour la réalisation du contrôle :

Téflon, règle plastique, crayon gras, loupe, chiffon propre et non pelucheux, solvant dégraissant, etc.

Il est ensuite nécessaire de donner une attention particulière à la vérification de la pièce et de l'environnement du contrôle (préparation du poste du travail, nettoyage des surfaces à inspecter).

La calibration des appareils, arrive en dernier lieu : qui peut être dissociée en deux parties maitresses : Le pré réglage et L'étalonnage.

- ✚ Le pré réglage de l'appareil s'effectue à l'aide des touches d'accès directs. C'est l'affichage des paramètres, il est préférable de les donner sous forme de tableau.
- ✚ L'étalonnage est réalisé avec la cale étalon, Il définit le réglage de l'entrefer et de l'amplitude du défaut étalon.

### **2.3 Mode opératoire et analyse des signaux**

C'est le déroulement du contrôle et c'est la phase la plus critique, elle consiste à donner le résultat final de l'inspection en analysant les signaux pouvant apparaitre sur l'écran et donner le type de défauts, leur cotation et même leur orientation.

## **3 OBJET DE CONTROLE AVEC LA TECHNIQUE CF**

La technique de contrôle par courants de Foucault est une méthode de Contrôle Non Destructif (CND) fondée sur la circulation de courants induits dans un matériau conducteur. En anglais, cette technique est dénommée Eddy current Testing (ET). L'application de cette technique en maintenance aéronautique s'effectue déjà sur le principe des gammes de fréquence :

- ✚ HF (Hautes Fréquences) ;
- ✚ BF (Basses Fréquences).

Nous citons à titres d'exemple les applications possibles pour arriver à

- ✚ Mesure de conductivité ;
- ✚ Recherche de criques de surface par hautes fréquences ;
- ✚ Recherche de défauts dans les alésages par sondes tournantes ;
- ✚ Recherche de défauts sous-jacents en basses fréquences ;
- ✚ Recherche de corrosion.

## **4 LA MISE EN OEUVRE EXPERIMENTALE DE L'INSPECTION :**

### **4.1 Le contrôle haute fréquence sur des jantes avion**

#### **✚ Objet de contrôle**

L'objet du contrôle est de réaliser des inspections en haute fréquence sur des jantes avion, tout en respectons une gamme de travail définie selon les normes NTM.

#### **✚ Préparation avant inspection et calibration**

L'équipement utilisé est le PHASEC 2S

Nettoyage des jantes à contrôler suivant les produits approuvés par le constructeur :

- ✚ Solvant dégraissant (SUPER BEE 300 LG) ;
- ✚ Solvant Alcool Methylique.

Nous sommes arrivés à fixer les paramètres suivant le tableau indiqué ci-dessous :

FREQ	V1 500kHz	< Mode >	Abs 1Voi	P-HAUT	DC	X-POS	1 0
PHASE	V1 267°.0	Affich.	XY	P-BAS	100 Hz	Y-POS	1 0
AMPLI	V1 48.0 dB	Vue	Vo 1	Gain	Entr +20dB	ALARM	ON
RAP. X:Y	1 X- 10.0dB	Persistence	0.5sec	Charg.	Bal 120µH	BOITE	sonore

Tableau II-II.1: Paramètres d'étalonnage

Pour l'étalonnage de l'appareil, la cale étalon approprié est selon la Figure II-II.1 suivante :

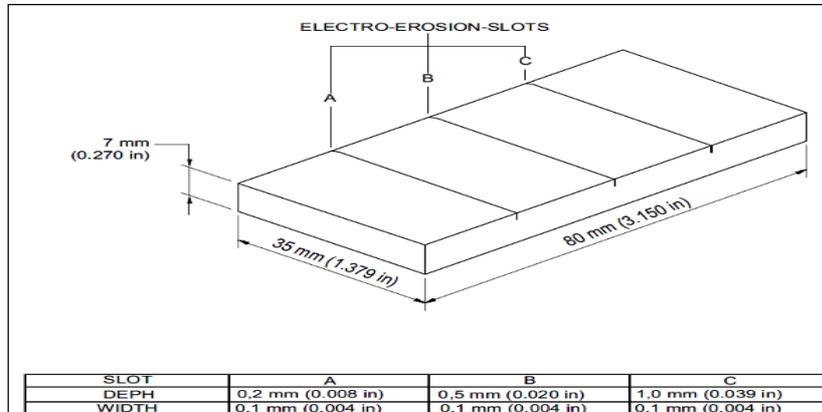


Figure II-II.1 : Bloc de calibration en haute fréquence

Alors l'opération d'étalonnage s'est effectuée de la manière suivante :

- ✚ La mise de la sonde en l'air ;
- ✚ Le bouton équilibrage est mis sur NULL ;
- ✚ Après la mise de la sonde en contact sur une partie saine de l'étalon, le bouton LIFT OFF est actionné ;
- ✚ Positionnement de la sonde sur le défaut 0.5 mm ;
- ✚ A l'aide du gain, nous avons régler le signal de manière à obtenir une déviation de 40% du repère.

### **Mode opératoire et analyse des signaux**

Il est à noter que chaque zone à inspecter est indiquée dans le NTM ou CMM, cette zone est définie comme " area to inspect " (voir annexe 6). Il est toujours demandé de positionner la sonde Positionner la sonde sur une partie de la pièce à contrôler et d'effectuer une compensation automatique Z.

Ensuite d'entamer les deux balayages dans deux directions perpendiculaires (voir figures indiquée ci-dessous) pour assurer une inspection optimale :

Nous avons procéder à l'inspection des jantes de la façon suivante :

#### Blending area of the **bead seat**– Voir la Figure II-II.2



Figure II-II.2: **BEAD SEAT AREA** with scanning direction (twice at 90°) to cover the whole possible cracks directions

#### Blending area of the vent holes (manual HF ET both sides and between **VENT HOLE**) – voir Figure II-II.3:

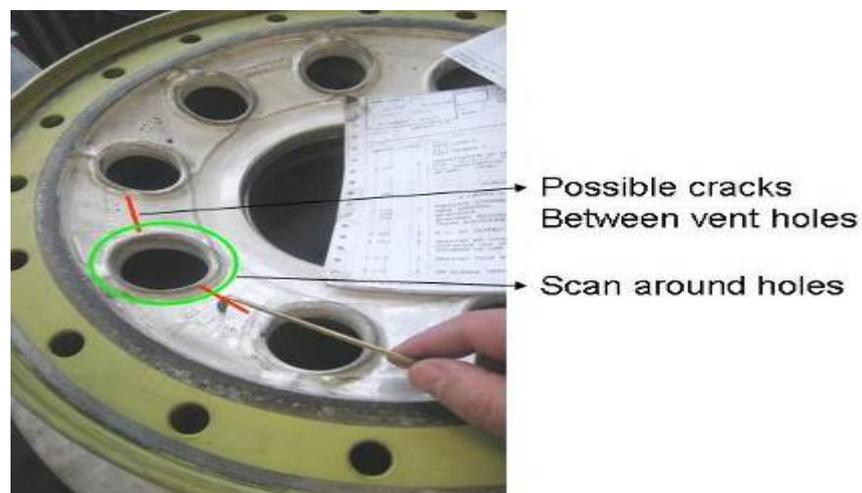


Figure II-II.3: Possible cracks around air **VENT HOLE** (in red)

✚ Bores for the half-wheel attachment **bolts** – voir Figure II-II.4



Figure II-II.4: Inspection du demi attaché de la jante avec boulons

✚ Spot facing of the bolt **washers** on the half-wheels– Figure II-II.5



Figure II-II.5 Area of the bolt washers (scan circularly and radially to cover all possible cracks directions)

✚ **Drive** block areas – voir Figure II-II.6

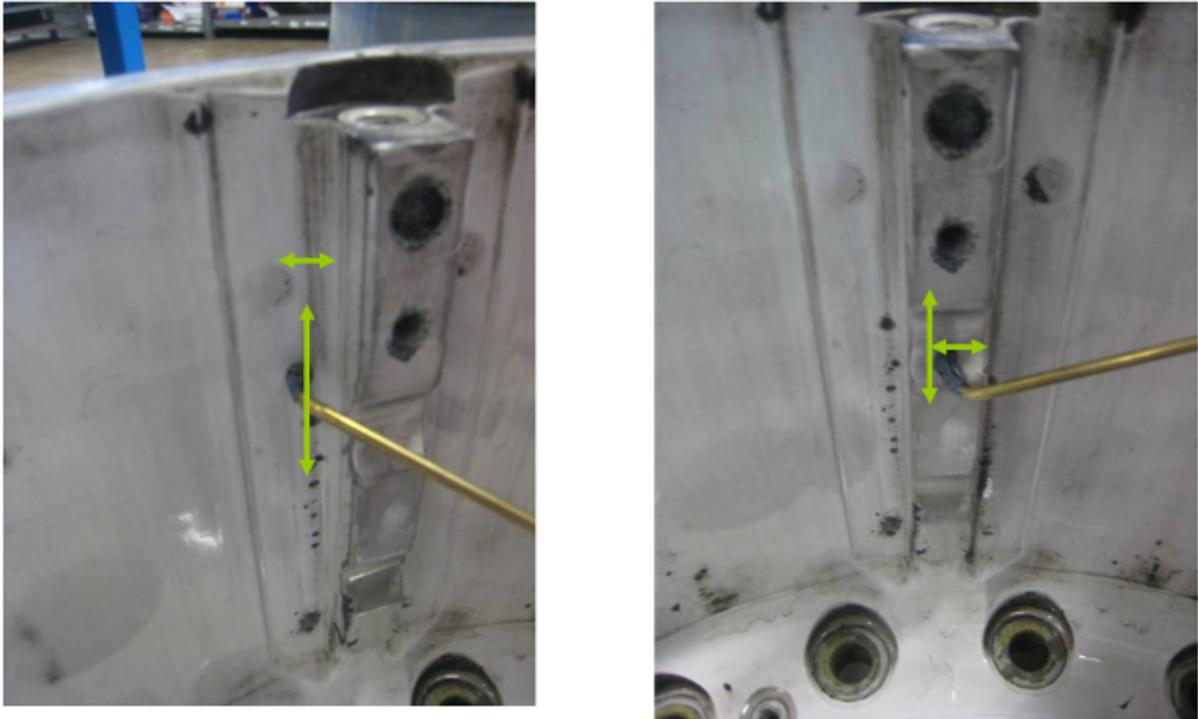


Figure II-II.6 Scan area around **drive key** areas

Le relevé des indications a été pris en considération la présence d'un signal de défaut, le schéma suivant (Figure II-II.7) montre les positions correspondantes à la cotation de la longueur :

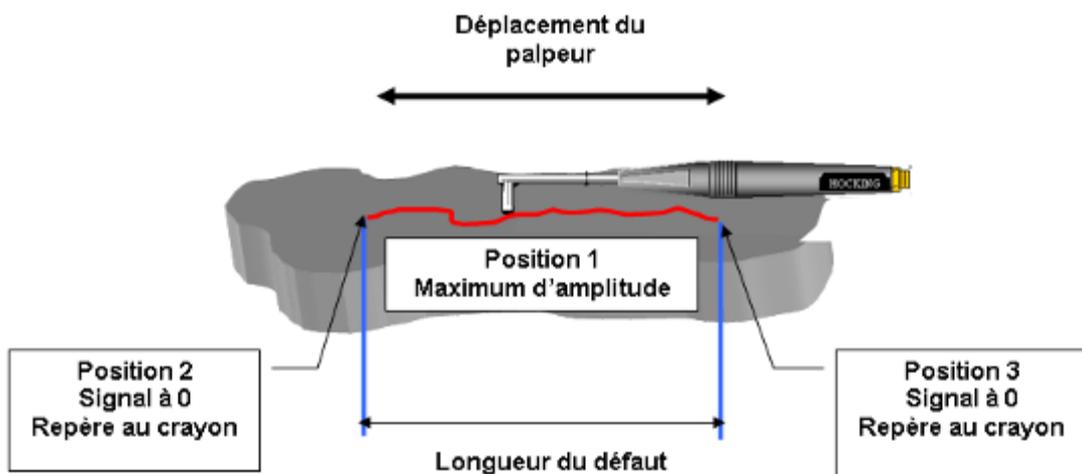


Figure II-II.7 Position du défaut

✚ la position 1 correspond au maximum d'amplitude du signal de défaut.

✚ La position 2 correspond à la fin du signal de défaut.

Faire un repère au crayon sur la pièce.

✚ La position 3 correspond à la fin du signal de défaut.

Faire un repère au crayon sur la pièce et mesurer ainsi la longueur entre 3 et 2.

#### 4.2 Le contrôle ROTOTEST sur des jantes avion

##### ✚ Objet de contrôle :

L'objet de contrôle est de réaliser des inspection sur jante avion en appliquant le principe du rototest selon des gammes de travail définie par le groupe d'ingenieur BT d'air algerie (voir exemple de gamme en annexe 9) .

##### ✚ Préparation avant inspection et calibration

Nous avons pris l'un des équipements à courants de Foucault "Eddy Current Testing" avec option Rototest et plusieurs diamètres de sondes internes disponibles au département NDT d'air Algérie (voir annexe 4), et nous avons calibré cet appareil de la manière suivante :

<u>FREQUENCE</u>	<u>AMPLIFICATION</u>	<u>FILTRES</u>	<u>PHASE</u>
500 kHz	Préamp :25 dB	Lopass :1.0 kHz	$\varphi$ :228°
Ampli 100%A	Main Ampli :18 dB	Hipass:650 Hz	
	Spread Y : 12 dB		

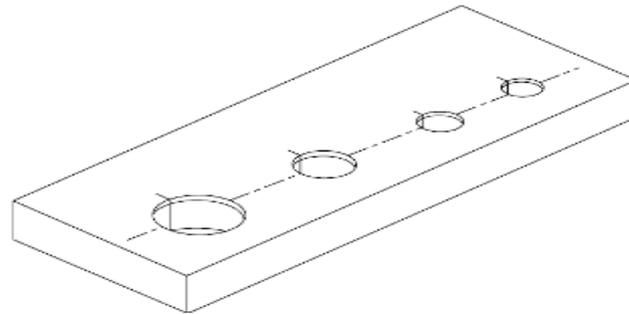
Tableau II-II.2 : Paramètres d'étalonnage pour ROTOTEST :

Après le réglage des filtres réalisé selon le tableau de l'annexe 5, nous visualisons l'écran de la figure suivante pour la représentation Y – X et Y – t.



Figure II-II.8 Ecran typique pendant la calibration du rototest

La cale étalon utilisée pour l'étalonnage de l'appareil, est définie dans la Figure II-II.9 : des exemples de ces cales étalons sont donnés à l'annexe



SLOTS	
DEPTH	0,5 mm (0.020 in)
WIDTH	0,1 mm (0.004 in)

Figure II-II.9 Bloc de calibration Rototest

Ainsi l'opération d'étalonnage s'est effectuée de la manière suivante :

- ✚ La mise de la sonde en l'air ;
- ✚ Le bouton équilibrage est mis sur NULL ;
- ✚ Après la mise de la sonde en contact sur une partie saine de l'étalon, le bouton LIFT OFF est actionné ;
- ✚ Positionnement de la sonde sur le défaut 0.5 mm ;
- ✚ A l'aide du gain, nous avons régler le signal de manière à obtenir une déviation de 40% du repère.

A ce stade, la calibration n'est pas correcte qu'après surveillance du rapport signal bruit qui devra être au moins 4 pour une bonne détectabilité, que en cas de besoin l'ajustement des filtres doit être effectué (voir Figure II-II.10).

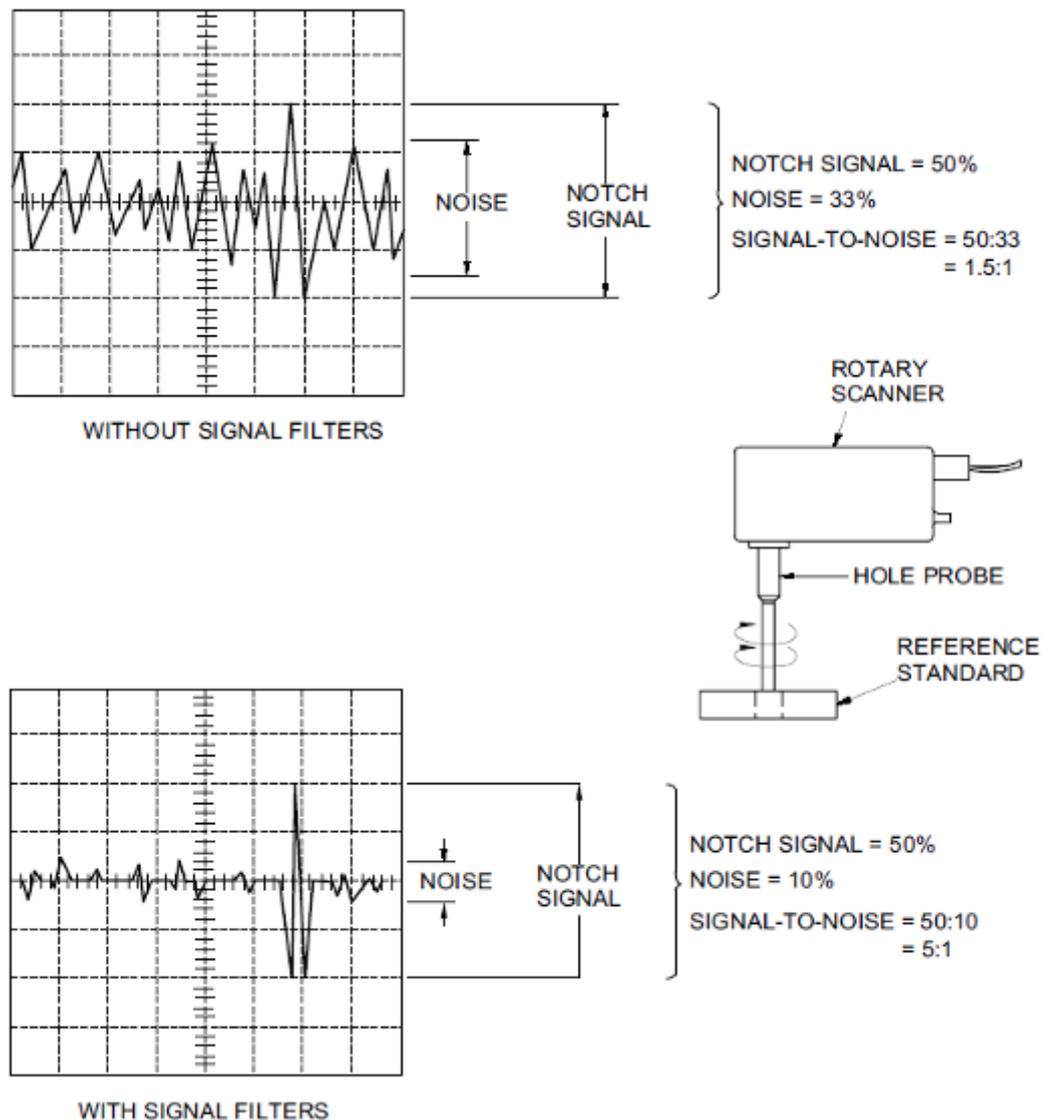


Figure II-II.10 Vérification du rapport Signal Bruit sur le bloc étalon en rototest

#### **Mode opératoire et analyse des signaux**

De la même manière que précédemment, nous avons pris les précautions pour positionner la sonde, définir les zones à inspecter et après étude et analyse nous sommes arrivés à conclure que les signaux pouvant apparaître sur l'écran sont définis comme ci-dessous :

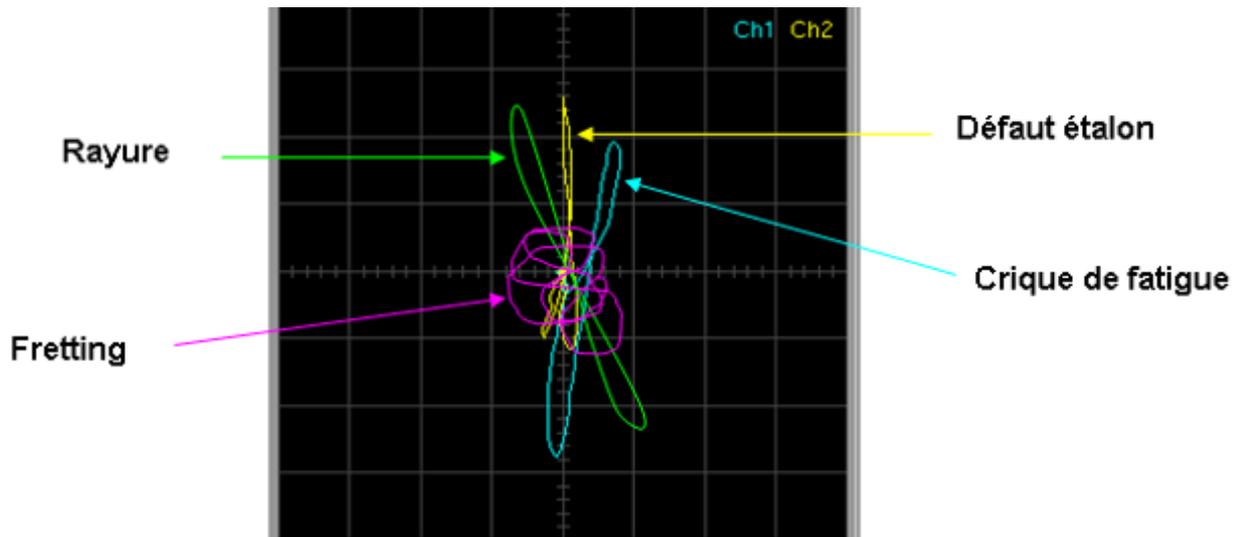


Figure II-II.11 Défauts typiques observés sur l'écran lors des inspections

Aussi, il à noter que la position dans l'alésage d'une indication est obtenue suivant l'analyse proposée par la Figure II-II.12 et Figure II-II.13 :

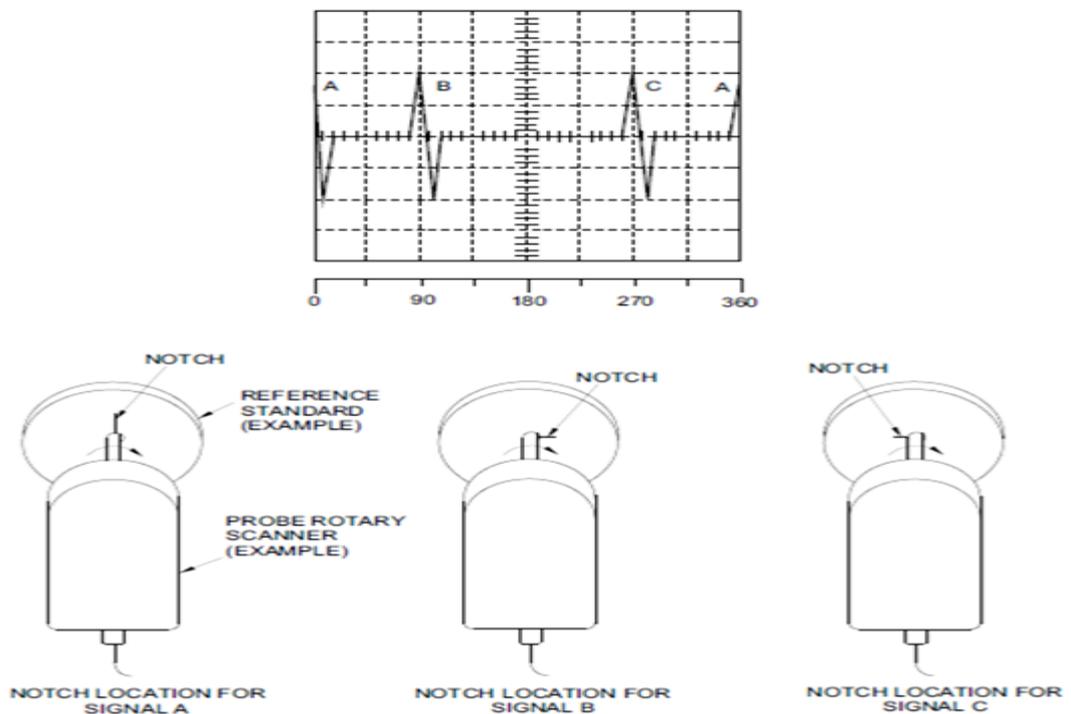


Figure II-II.12 Analyse de la position du défaut sur l'écran (mode Y - T)

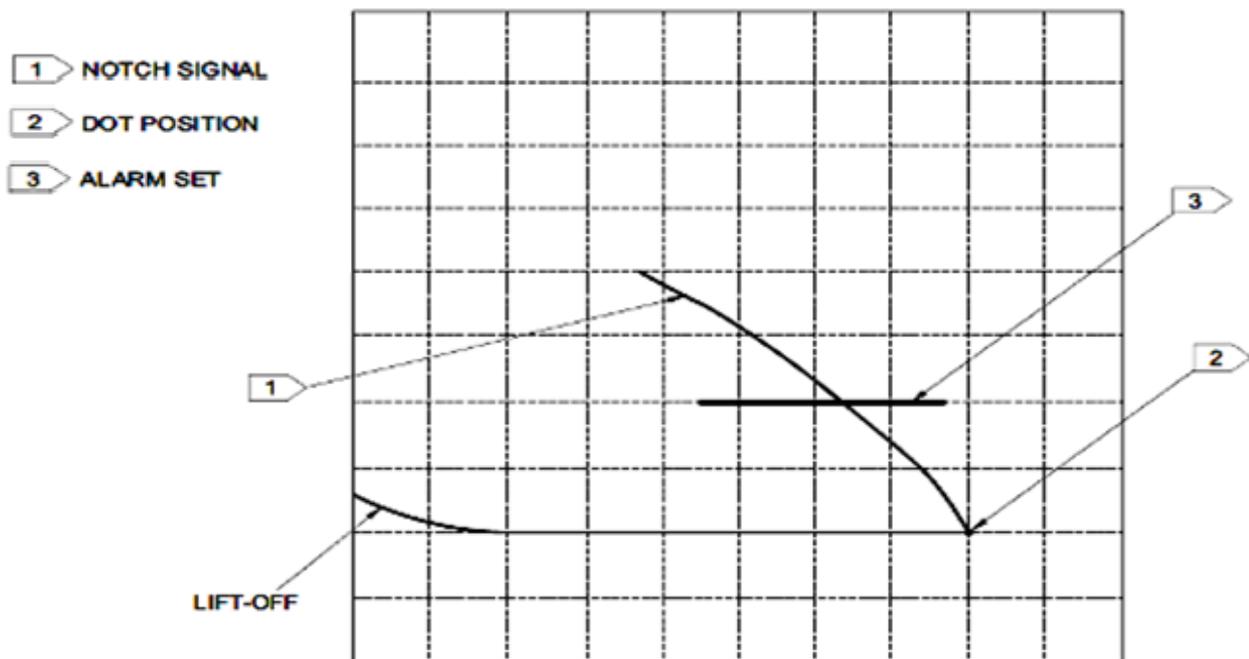


Figure II-II.13 Positions des Défauts typiques observés sur l'écran lors des inspections

#### 4.3 Le contrôle Wheelscan sur jantes avion

##### Objet de contrôle

L'objet est de contrôler les jantes avion par l'utilisation d'un équipement WHEELSCAN HOCKING GE équipé d'une sonde (protégée par téflon) et d'un calibre interne, cet équipement permet de réaliser un scan d'une manière automatique (voir annexe 1).



Figure II-II.14: Roue Calibre B767-300 utilisée comme contrôle de performance journalier.

### **Préparation avant inspection et calibration**

La préparation du poste de travail tout en respectant les consignes de sécurité, ainsi le nettoyage la ou les pièces à contrôler afin de contrôler et réaliser le plan de maintenance prévu par le constructeur (voir annexe 3)

L'étalonnage s'est effectué avec l'affichage des suivants :

- ✚ Métal : Aluminium, Freq 200 KHz, Gain 51 dB, Phase 357, Filter IN, Alarm 80, FlawScan

Ensuite, nous avons effectué la vérification du signal de l'entaille 0.5 mm de référence

METAL	ALUMINIUM	DATE	...24-11-2011...
FREQ	200 kHz	AIRCRAFT	..B.767/300...
GAIN	51.0 dB	WHEEL TYPE	..T.P...
PHASE	354.7	INNER ( )	OUTER (x)
FILTER	IN	SERIAL NUMBER	..2834...
ALARM	80	COMMENTS	.....
FlawScan		...CRACK	.....

Figure II-II.15 Impression des paramètres d'étalonnage

La cale étalon utilisé pour l'étalonnage de l'appareil est représentée dans la Fig suivante :

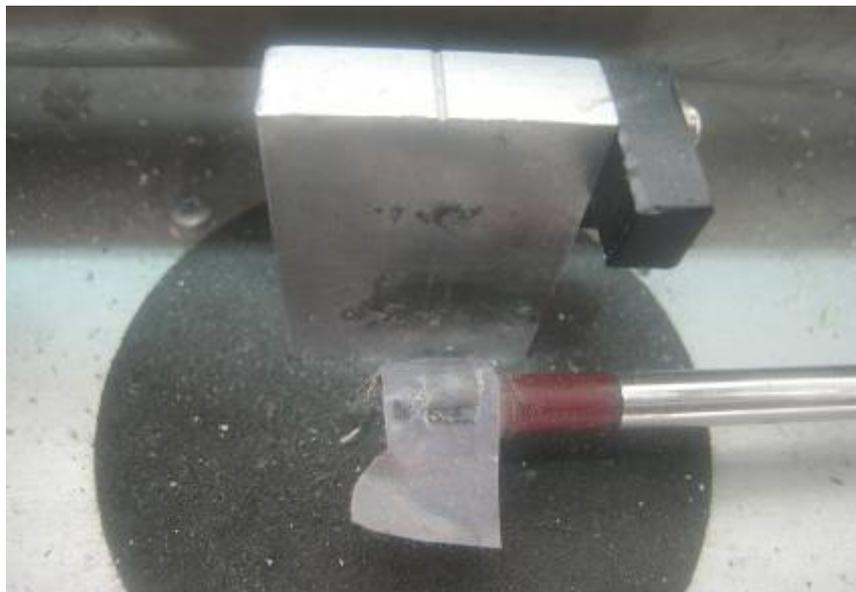


Figure II-II.16 Bloc de calibration wheelscan ( Alu Notch de 0.5 mm) - sonde 1.5 MHz

### **Mode opératoire et analyse des signaux**

Après le positionner de la jante correctement sur la partie rotative de la machine Wheelscan. et avoir rentrer les paramètres définis pendant la calibration et la hauteur de la jante à inspecter. nous avons entamer notre inspection dont le relevé des indications vont apparaître sur le PRINT comme une série de lignes verticales qui vont dépasser le seuil d'alarme. Si le mode FlawStop est actif, alors la machine s'arrête automatique un quart de tour après la crique.

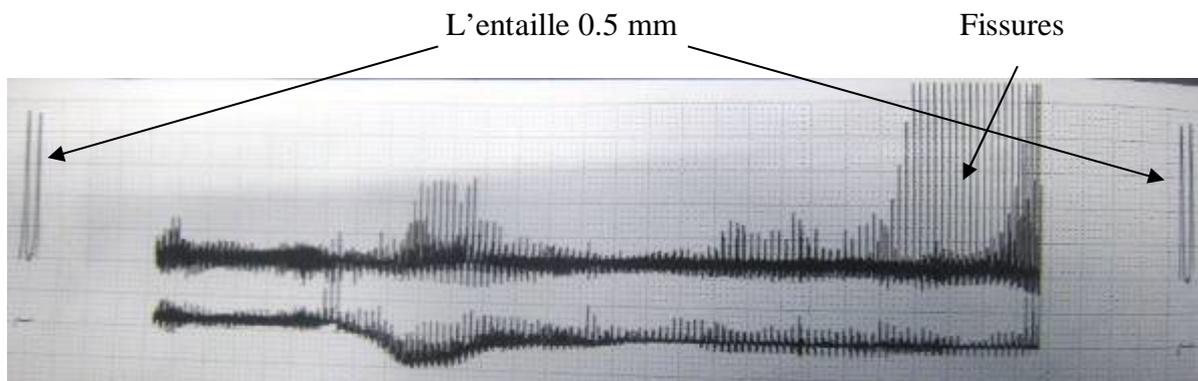


Figure II-II.17 constatacion des fissures

## **5 CONCLUSION**

Etant donné l'inspection établit à partir des documents constructeurs et des normes de contrôle non destructif, ainsi sur des recommandations des contrôleurs qualifiés et certifiés, nous pouvons tirer les renseignements suivants :

- +** Les calculs théoriques pour la conception des avions et la réparation des dommages ne sont jamais suffisants pour assurer un écart suffisant pour la sécurité de l'avion ;
- +** Les pratiques basées sur les calculs empiriques et le retour d'expérience après exploitation des avions constituent un référentiel non négligeable pour une amélioration de la conception des avions civils et la réparation des dommages ;
- +** Le perpétuel progrès réalisé dans la recherche des contrôles non destructifs appliqués en domaine aéronautique, nous impose d'être toujours à l'écoute des nouveautés dans la construction technologique.

---

**ANNEXE 1 – APPAREIL WHEELSCAN AU DEPARTEMENT NDT A AIR  
ALGERIE**

---



## ANNEXE 2 –APPAREI WHEELSCAN SPECIFICATIONS TECHNIQUES

### Specifications:

#### Safe Inspections

Any inspection must be safe for the operator and for the component being inspected. The WheelScan 5 uses the unique SLIC device (Secure Lift, Inertial Centring) to lift and centre the wheel. This ensures that the component cannot be 'clamped-up' eccentrically, a risk at high RPM.

The unit is also designed so that all control interfaces are located on the front of the unit, which removes the requirement to lean over the inspection area.

Furthermore, the equipment is not vulnerable to damage by wheels being positioned for inspection as all instrumentation is safely below roller height.

#### Probe

Absolute probe system. Probes are as standard 6 or 9.5 mm diameter with a choice of frequencies from 100 k, 200 k (standard), 500 k and 1.5 MHz. Other diameters and frequencies are available on request.

#### Component Size

Scan Height	415 mm (16.3 inches)
Diameter Range	0-865 mm (35.5 inches)
Max Weight	250 kg (114 lbs)

#### Lift Ram Stroke

250 mm (9.8 inches)

#### Operator Interface

IP 67 protection.

#### Electro-luminescent display

(320°x240 pixel), rotary control for parameter setting. Push buttons for commonly used functions. Emergency Stop.

#### Eddy Current Functionality

Uses well proven Phasec 2d Eddy Current unit. In addition to the very accurate WheelScan 5 test, this provides the option of Conductivity, Rotary Bolt hole inspection and Dual Frequency modes, amongst others.

#### Probe Motion Speed

The probe X/Y motion will travel at up to 150 mm/s<sup>-1</sup> (6"/second) for the motion to and from the wheel.

#### Wheel handling

Roller table and 215 mm (8.5") stroke lift ram with position encoder locates SLIC adaptor on hub.

#### SLIC

The Secure Lift Inertial Centring (SLIC) adaptor is an automatic centring can that grips securely on the wheel hub. 70 to 230 mm (2 7/8" - 9") hub internal diameters accepted. Note smaller wheels may be gripped on the rim.

#### Inspection Speeds

Surface inspection speed is 2 ms<sup>-1</sup> (78 inches/second) maximum (limited to 120 rpm). Scan helix may be set in 0.1 mm (4 mil) steps from 0 to 25 mm (1 inch).

#### Scan Direction

Bottom to top or top to bottom

#### AutoTrak Plus

Ensures the probe maintains a constant pressure normal to the wheel surface whilst scanning parallel to the surface at the required helix.

#### Data Recording

57 mm wide thermal chart (optional) or paper less recording and review system.

#### Data Storage

Unlimited capacity for test parameter storage. Storage of data recorded during test (paper less recording).

#### Options

Electrical conductivity, Rotary probe.

#### Outputs

Standard RS 232 via 5 way Lemo

#### PC Connectivity

Ethernet 10/100

#### Maintenance

The unit has a modular construction for easy exchange of parts. Major wear parts are sealed units for maximum longevity. XY mechanism has expected life in excess of 10,000 kilometres (Built in prompts for routine maintenance.)

#### Weight

250 kg (550 lbs) or heavier dependant on accessories.

#### Frame

Welded steel tube

#### Dimensions

914 x 870 x 800 mm (36 x 34 x 31 1/2 inches)

#### Power

90 to 264 VAC, 47 - 63 Hz, 350 watts

Important note. This product is covered by one or more patents.

## ANNEXE 3 - PLAN DE MAINTENANCE DU WHEELSCAN HOCKING

# HOCKING

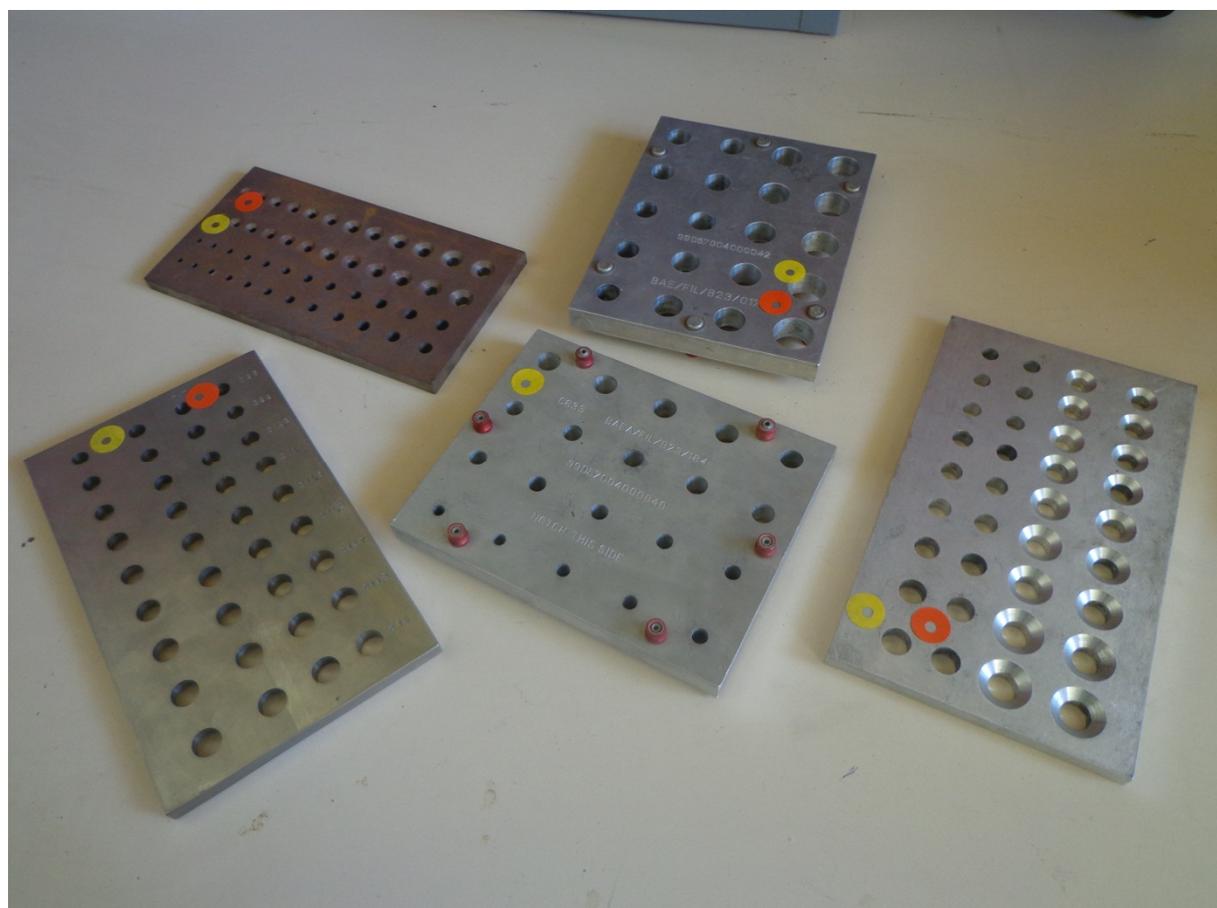
## WheelScan Mk IV – Preventative maintenance

### Guidelines

1. All hardware in WheelScan Mk IV is METRIC and the proper tools must be used. The set screws mentioned in this document are Allen head. Crosshead screws are 'supadriv' [not Phillips]
2. Extreme care must be taken when panels have been removed since moving parts and/or live parts can be exposed. All routine servicing must be done with power removed from the machine.
3. Many quality systems will require regular re-calibration, contact your supplier for details.

Frequency	Description	Procedure
Daily	Probe tape	Check condition of PTFE tape on probe and replace if necessary. Performance and probe life will be reduced if protective tape is allowed to deteriorate.
	Probe park position	Check probe parks between rollers, is parallel to rollers and does not touch the base.
	General cleanliness	Ensure Lift-Ram and exposed parts of probe movement assembly are clean and in good condition. Clear any accumulated debris from rollers and surfaces, especially from around bearings.  Ensure that there is no excessive or unusual movement on Ram or probe movement assembly.
	Probe	Rotate probe ¼ turn to prevent uneven wear.
Monthly	Wheel Lift-Ram and X-Y assembly	Set Wheel lift height to 200mm approx. Set probe Start height to 350mm approx. Raise Ram. Press Start button, when probe reaches set height hit emergency stop button and unplug AC power.  Remove back panel, this will expose the X, Y, drive and wheel lift mechanisms.  Apply a small amount of light Moly grease with a low pressure grease gun via grease nipples in vertical "Y" bearing block (2 off nipples) and in the horizontal "X" bearing blocks (4 off one in each bearing block on the underside) and also sparingly to both lead-screws.  Apply light oil to wheel lift shaft above lower and upper bronze bearings.  Replace panels and reapply power. Press END.  For safety reasons do not run WheelScan without covers fitted. The panels have grounding leads which must be re-attached when the panels are replaced.
6 monthly	Lift Ram	When servicing Lift-Ram, as above, check that the 5 screws securing the clamp that connects the ram to the lift shaft are tight.
	WheelScan E thermal print head	Clean thermal head using cotton bud and alcohol
Annually	WheelScan E Batteries	Replace. Good batteries may be re-used, but it is normally cheaper to replace them than to test old batteries.
	Probe heights at start and stop points	Check probe reaches correct start and stop heights. Measurements may be made during a routine wheel test. Measure from top of rollers to centre of probe tip.
	'set-up' block	Check for wear on the 'set-up' (cal) block. Replace if worn.
	Probe head assembly	Check that the lamps on the front of the probe head light when the tip of the probe is deflected by about 3mm (1/8") in the corresponding horizontal and vertical directions.  <b>Note:-</b> if the probe action becomes too sloppy or tight in the probe head assembly, the head assembly should be returned to HOCKING NDI or one of the recognized service agents for adjustment. It is not recommended that any maintenance should be attempted by the user. Under normal use the head is unlikely to require adjustment for at least 2 years of normal usage.

## ANNEXE 4 – APPAREIL ROTOTEST ET LES CALES ETALONS ASSOCIES



## ANNEXE 5 - REGLAGE DES FILTRES – valeurs théoriques

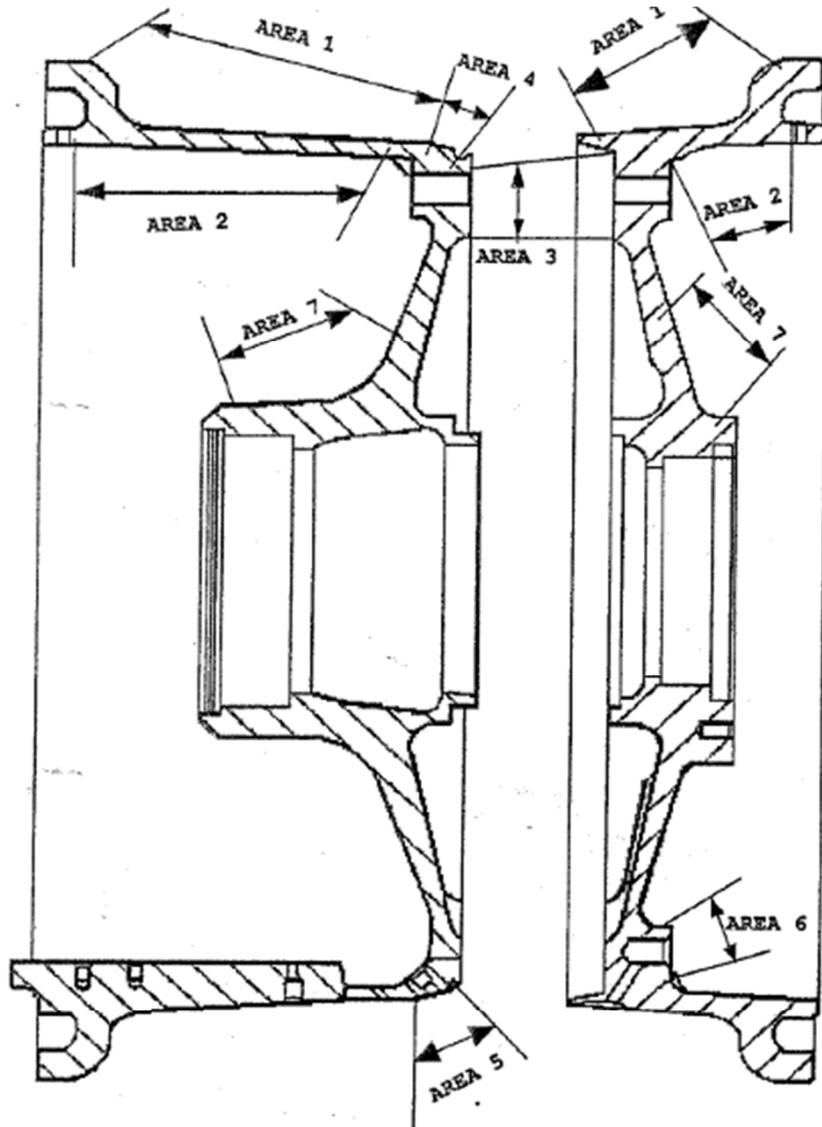
### Réglage filtres en rototest selon diamètres et vitesses de rotation

**Passé Haut** = Diamètre sonde x vitesse de rotation x 0,043 (Ex 10 x 2000 x 0,043 = 860 Hz)

**Passé Bas** = Passé Haut x 1,5 (Ex : 860 Hz x 1,5 = 1290 Hz)

Vitesse →	1000	1500	2000	2500	2800	3000
	HP / LP	HP / LP	HP / LP	HP / LP	MR3 MF	HP / LP
2,97	128 / 192	192 / 287	255 / 383	319 / 479	358 / 536	383 / 575
3,46	149 / 223	223 / 335	298 / 446	372 / 558	417 / 625	446 / 670
3,85	166 / 248	248 / 372	331 / 497	414 / 621	464 / 695	497 / 745
4,28	184 / 276	276 / 414	368 / 552	460 / 690	515 / 773	552 / 828
4,60	198 / 297	297 / 445	396 / 593	495 / 742	554 / 831	593 / 890
4,95	213 / 319	319 / 479	426 / 639	532 / 798	596 / 894	639 / 958
5,43	233 / 350	350 / 525	467 / 700	584 / 876	654 / 981	700 / 1051
5,80	249 / 374	374 / 561	499 / 748	624 / 935	698 / 1047	748 / 1122
6,25	269 / 403	403 / 605	538 / 806	672 / 1008	753 / 1129	806 / 1209
6,62	285 / 427	427 / 640	569 / 854	712 / 1067	797 / 1196	854 / 1281
7,03	302 / 453	453 / 680	605 / 907	756 / 1134	846 / 1270	907 / 1360
7,44	320 / 480	480 / 720	640 / 960	800 / 1200	896 / 1344	960 / 1440
7,80	335 / 503	503 / 755	671 / 1006	839 / 1258	939 / 1409	1006 / 1509
7,90	340 / 510	510 / 764	679 / 1019	849 / 1274	951 / 1427	1019 / 1529
8,20	353 / 529	529 / 793	705 / 1058	882 / 1322	987 / 1481	1058 / 1587
8,64	372 / 557	557 / 836	743 / 1115	929 / 1393	1040 / 1560	1115 / 1672
9,10	391 / 587	587 / 880	783 / 1174	978 / 1467	1096 / 1643	1174 / 1761
9,52	409 / 614	614 / 921	819 / 1228	1023 / 1535	1146 / 1719	1228 / 1842
10,00	430 / 645	645 / 968	860 / 1290	1075 / 1613	1204 / 1806	1290 / 1935
10,30	443 / 664	664 / 997	886 / 1329	1107 / 1661	1240 / 1860	1329 / 1993
11,00	473 / 710	710 / 1064	946 / 1419	1183 / 1774	1324 / 1987	1719 / 2129
11,40	490 / 735	735 / 1103	980 / 1471	1226 / 1838	1373 / 2059	1471 / 2206
12,20	525 / 787	787 / 1180	1049 / 1574	1312 / 1967	1469 / 2203	1574 / 2361
12,60	542 / 813	813 / 1219	1084 / 1625	1355 / 2032	1517 / 2276	1625 / 2438
13,45	578 / 868	868 / 1301	1157 / 1735	1446 / 2169	1619 / 2429	1735 / 2603
13,80	593 / 890	890 / 1335	1187 / 1780	1484 / 2225	1662 / 2492	1780 / 2670
13,95	600 / 900	900 / 1350	1200 / 1800	1500 / 2249	1680 / 2519	1800 / 2699
15,45	664 / 997	997 / 1495	1329 / 1993	1661 / 2491	1860 / 2790	1993 / 2990
17,48	752 / 1127	1127 / 1691	1503 / 2255	1879 / 2819	2105 / 3157	2255 / 3382
21,80	937 / 1406	1406 / 2109	1875 / 2812	2344 / 3515	2625 / 3937	2812 / 4218

## ANNEXE 6 - ZONES A INSPECTER POUR UNE JANTE



INBOARD WHEEL HALF

OUTBOARD WHEEL

area 1- bead seat radius

tubewell O.D. Inboard wheel

Outboard wheel

area 2- tubewell I.D. Inboard wheel

Outboard wheel

area 3- tie bolt holes + radius

area 4- packing ring groove

area 5- the thermal valve relief plug holes

area 6- the inflation valve hole

area 7- the hub to web radius

## ANNEXE 7 - LISTE DES ROUES AVEC LE CMM APPLICABLE

N°	DESIGNATION	MARQUE	P/N ROUE	P/N JANTE INT/EXT	GAMME	PROTOCOLE D'ENTRETIEN
01	Roue NG TP CHP	Honeywell	2612311-1	2612462-1 2613128-1	32-40/15	32-40/16/01F 32-40/16/02F
02	Roue NG TAV CHP	Honeywell	2607825-2	2608023-1 2608024-1 2612798-1 2612799-1	32-40/14	32-40/13/01F 32-40/13/02F
03	Roue B767 TP CHP	Honeywell	2608811-3/-5	2608910-2 2608912-2 2609428-2 2609493-2	32-43/31	32-43/31/01F 32-40/31/02F
04	Roue B767 TAV CHP	Honeywell	2606735-2	2609426-1 2609428-1 2606959-1 2606962-1	32-43/-36	32-43/32/01F 32-43/32/02F
05	Roue A330 TP CHP	Goodrich	3-1546	10-1608 10-1609	32-41-75/T	32-41/41/01F 32-41/41/02F
06	Roue A330 TAV CHP	Goodrich	3-1596	300-907 300-908	32-41-89/T	32-41/46/01F 32-41/46/02F
07	Roue ATR TP CHP	Meggitt	AHA1890	AH089965 AH089966	32-42/22	32-42/22/01F 32-42/23/02F
08	Roue ATR TAV CHP	Meggitt	AH54474	AH44107 AH44108	32-42/20	32-42/20/01F 32-42/20/02F
09	Roue L100-30/L382 TP CHP	Goodyear	9550616-1	9544011 9544239 5003247 9544009 9544238 5003245	32-40/50	CMM 32-40-02
10	Roue L100-30 TAV CHP	Goodyear	219A967-1	219A988 219A989 5003117 5003119	32-21/52	OVER HALL MANUEL

**ANNEXE 8 - LISTE DES SONDES A COURANTS DE FOUCAULT**

**LISTE DES SONDES COURANTS DE FOUCAULT**

N°	REFERENCES DES SONDES	REPERE
01	700P07A 1kHz-100kHz Reflection	1
02	700P11A 300-100kHz Reflection	2
03	700P24A 80Hz-60kHz Reflection	3
04	47P001	4
05	700P001 200Hz-200kHz	5
06	SPO 1071 Nortec 1kHz-10kHz	7
07	S/100kHz-500kHz/.25	8
08	S/500kHz-40kHz/.44	9
09	S/300Hz-10kHz/.62	10
10	P/500kHz-1MHz/A/0.0/4	11
11	PR/500kHz-2MHz/A/90.25 /6	12
12	P/4MHz-6MHz/D	13
13	P/1MHz-2MHz/A/90.03/6	14
14	P/4MHz-6MHz/A	15
15	P/500kHz-1MHz/A	16
16	P/2MHz-4MHz/D	17
17	P/2MHz-4MHz/A	18
18	P/50kHz-100kHz/A/90.25/6	19
19	P/100kHz-500kHz/A/90.03/6	20
20	MBB 51-2	35
21	MBB 500 3 SNFE	36
22	310P38	37
23	NEC 4099 RBR	38



La complexité grandissante des processus et des pièces avionnés, les exigences croissantes en termes de sûreté de fonctionnement ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces conduisent à mettre en place des contrôles de qualité de plus en plus poussés. L'utilisation des courants de Foucault (CF) permet un contrôle non destructif (CND) fiable, rapide et peu coûteux.

Sa simplicité, sa robustesse d'utilisation, et son caractère électromagnétique « sans contact » en font une technique très utilisée depuis plusieurs décennies.

Le travail présenté dans ce mémoire aborde donc, un cas précis mais de grande importance, il s'agit des courants de Foucault, très performants pour la détection des défauts (craque, corrosion,...) de faibles dimensions, mais qui devront à terme constituer souvent des amorces de plus grandes dimensions, doivent faire l'objet d'une attention particulière. Ces défauts sont créés en grande partie lors du fonctionnement des pièces, c'est-à-dire au moment de l'exploitation de l'aéronef. Leur détection avant la mise en service permet de prévenir leurs destructions donc éviter des dégâts énormes liés à l'immobilisation de l'avion ou même éviter d'engendrer des éventuels incidents.

Ce travail était bénéfique sur plusieurs aspects. Tout d'abord, sur l'aspect théorique, grâce à l'étude faite sur le contrôle non destructif après une recherche bibliographique très approfondies des ouvrages NDT et la consultation quotidienne de la documentation spécifique disponible à Air Algérie. Cette étude de recherche, nous a permis d'enrichir d'avantages nos connaissances aéronautiques.

Le deuxième aspect important du travail effectué dans cette thèse concerne la pratique : la mise à notre disposition de tous le matériel NDT d'une part ; dans le but d'exercer et de réaliser nos expériences pratiques, et l'aide précieuse du personnel NDT d'Air Algérie de l'autre part ; tous certifié niveau 2 COSAC COFREND, nous a permis d'acquérir des notions pratiques et de familiariser avec l'appareillage du contrôle CND.

C'est à ce niveau, que nous avons réalisé la recherche des défauts possibles et détectables sur jante avion et de les exposer au sein de ce mémoire : en utilisant l'approche ROTOTEST et WHEELSCAN, ce dernier nettement efficace en termes de fiabilité et rapidité.

En termes de perspectives, de multiples améliorations pourront être opérées, Il y aurait encore eu beaucoup à dire sur d'autres application concernant la structure avion, le moteur et les inspections appropriés à réaliser. Aussi nous aurions pu choisir d'autres axes d'études comme les autres techniques de CND (ressuage, Ultrason...), dont nous conseillons vivement les étudiants futurs de pencher sur ce domaine.

## REFERENCES

### Ouvrage :

1. BERTIN, M., FAROUX, J. P., « Electromagnétisme 2 », DUNOD université, paris 1979.
2. FAGET, J., « Electromagnétisme- relativité restreinte », Cours de physique, Vuibert, 1971.
3. R. Albanese et G. Rubinacci. «Formulation of eddy current problems». *IEE Proceedings*, Vol. 37, p. 16–22, 1990.
4. PURCELL, E.M., GUTHMANN, C., LALLEMAND P., « Électricité et magnétisme». BERCKLY : Cours de physique, Vol. II.
5. PAUL MCLNTIRE, « Non destructive testing handbook, American society for non destructive testing », Second Edition, Volume 4, electromagnetic Testing, editor 1986.
6. LANDOLT, D. « Mécanisme de corrosion. Corrosion et Chimie des Surfaces des Métaux », Suisse. 1993. Ed. Press Polytechniques et Universitaires.
7. Z. Badics, H. Komatsu, Y. Matsumoto, K. Aoki, et F. Nakayasu. «A Thin Sheet Finite Element Crack Model in Eddy Current NDE». *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 30, No. 5, pp. 3080–3083, 1994.
8. A. Bossavit et J. C. Vérité. «A mixed FEM-BIEM method to solve 3D eddy current problems». *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 18, No. 2, p. 431–435, 1982.

### Mémoires :

- **HAMMOUDA A**, «Etude et réalisation d'un mesureur de conductivité électrique par la méthode de contrôle non destructif par courants de Foucault assisté par ordinateur», Thèse d'ingénieur en électronique, USTB décembre 1997.
- **ZERGOUG.M**, «Elaboration d'un modèle simplifié par courants de Foucault», Thèse 3eme cycle, Université catholique de Louvain, Belgique 1986
- **BOUDJELLAL H**, «Evaluation Des structures aéronautiques par contrôle non destructif par courant de Foucault ». USDB mars 2005.

### Site Internet :

[www.ndt-expert.com](http://www.ndt-expert.com) consulté le 16 juin 2013 à 10H00

[www.cosac-ndt.com](http://www.cosac-ndt.com) consulté le 16 juin 2013 à 12h00

[www.insightNDT.com](http://www.insightNDT.com) consulté le 16 juin 2013 à 15h00

[www.cofrend.com](http://www.cofrend.com) consulté le 17 juin 2013 à 9h00

[www.aerocontact.com](http://www.aerocontact.com) consulté le 17 juin 2013 à 11h00

Autres :

Documents internes à AIR-ALGERIE.