

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE

073108  
62

Projet de fin d'étude en vue de l'obtention  
Du Diplôme des Etudes Universitaires Appliquées (D, E, U, A) en aéronautique

OPTION : STRUCTURE

THEME

ETUDE DE LA PROPAGATION  
D'UNE FISSURE D'UNE AILETTE TURBINE  
DU REACTEUR CFM 56 -7B ET SA REPARATION



Rédigé par :  
Mlle BEN MANSOUR NASSIMA

Dirigé par:  
Mr.. BENOMAR Abdelkader  
Mr. AZZAZEN Mohamed

2007/2008





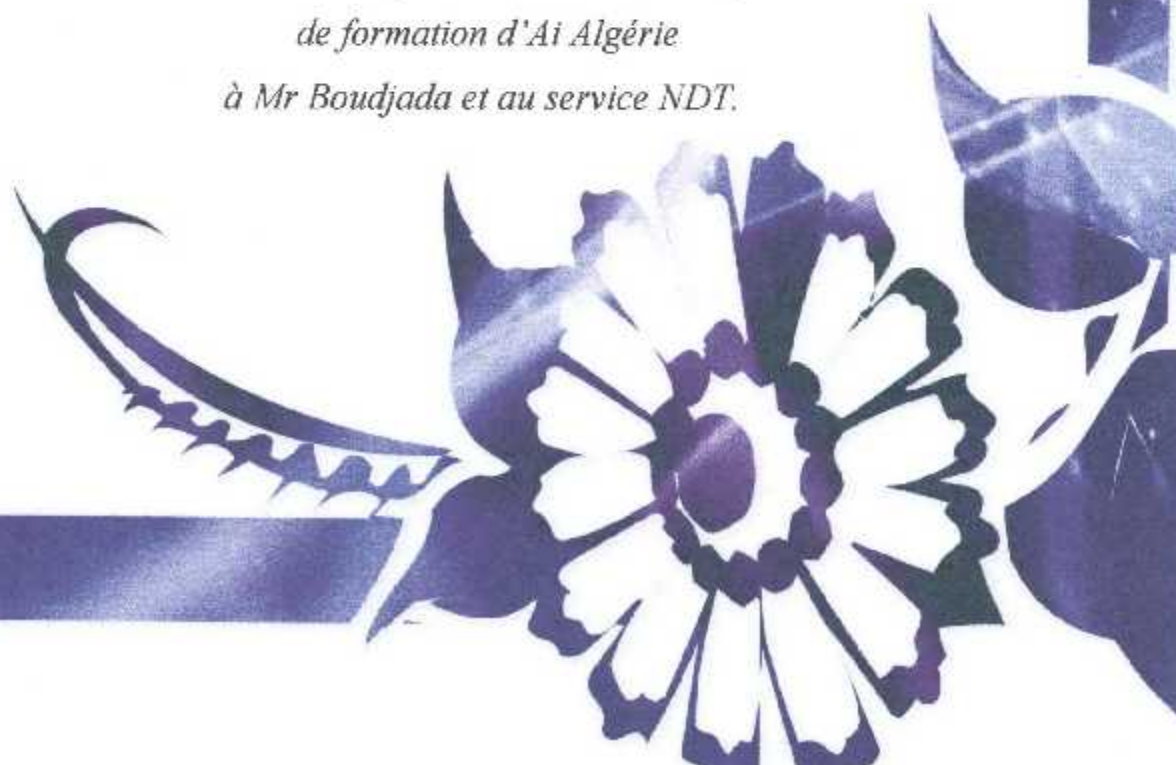
# Remerciements

*Une occasion m'est offerte pour exprimer à tous  
Ceux qui ont bien veillé à la réalisation de ce  
De ce modeste travail.*

*Tout d'abord, je remercie Dieu le tout Puissant qui ma aidé à  
Accomplir ce travail.*

*Mes sincères remerciements à mon promoteur Mr BENOMAR,  
instructeur au niveau du centre de formation  
d' AIR Algérie, pour m'avoir dirigé  
soutenu e encouragé durant la période de mon stage pour réaliser  
ce mémoire de fin d'études. Je remercie vivement mon encadreur  
Mr AZAZEN, enseignant à l'université SAAD DAHLEB de Blida  
d'avoir corrigé ce travail.*

*Je tins à remercier le personnel administratif de centre  
de formation d' Ai Algérie  
à Mr Boudjada et au service NDT.*



INTRODUCTION	1
<b>CHAPITRE I</b>	
I.1. GENERALITES SUR LES AVION B737 ET LE MOTEUR CFM56-7B	3
I.1.1.Presentation du Boeing 737	3
I.1.2.Dimensions	3
I.1.3.Differents modèles du Boing737	5
I.1.4. Les caractéristiques du Boeing 737-800	6
I.1.5.Principaus accidents de Boeing 737	7
I.2.LE REACTUR CFM 56-7B	10
I.2.1.Description générale	10
I.2.2.Caractéristiques principales	12
I.2.3.Les modules	13
I.2.3.1. Module Fan and Booster	13
I.2.3.2. Module core	14
I.2.3.3. Module turbine basse pression	14
I.2.4.Boite d'entraînement des accessoires	15
I.2.5.Cappotages	16
I.2.6.Stations	17
<b>CHAPITRE II</b>	
II.1.Mecanique de la rupture	19
II.1.1.Introduction	19
II.1.2.Definition de la mécanique de la rupture (MDR)	19
II.1.3.Notion sur la mécanique de la rupture	20
II.1.4.Domaine de validité et d'emploi	21
II.1.5.Modes de sollicitation (mode d'ouverture des fissures)	21
II.2.Contrôle non destructif	23
II.2.1.Introduction	23
II.2.2.Domain d'expertise	23

---

II.2.3.Les différents méthode d'inspection	24
II.2.3.1.Ressuage	24
II.2.3.1.1.Principe de la méthode	24
II.2.3.1.2.Principe de la phase de la révélation	24
II.2.3.1.3.Domaine d'application	25
II.2.3.1.4.Avantage et inconvénients de la méthode	25
II.2.3.2.Magnétoscopie	26
II.2.3.2.1.introduction	26
II.2.3.2.2. Principe de la méthode	26
II.2.3.2.3.Magnétisation	27
II.2.3.2.3.a.Magnétisation direct	27
II.2.3.2.3.b.Magnétisation indirecte (par passage de courant)	27
II.2.3.2.4.Démagnétisation	28
II.2.3.2.5.Domaine d'application	28
II.2.3.2.6.Avantages et inconvénients de la méthode	28
II.2.3.3.Radiographie	30
II.2.3.3.1.princip de la méthode	30
II.2.3.3.2. Domaine d'application	31
II.2.3.3.3.Avantages et inconvénients de la méthode	31
II.2.3.4.Courant de Foucault	32
II.2.3.4.1.Principe du contrôle par courant Foucault	32
II.2.3.4.2. Domaine d'application	33
II.2.3.4.3.Avantages et inconvénients de la méthode	33
II.2.3.5.Ultrasons	35
II.2.3.5.1.Introduction	35
II.2.3.5.2.Génération des ultrasons	35
II.2.3.5.3. Principe de la méthode	35

---



II.2.3.5.4. Définition d'un palpeur	36
II.2.3.5.5. Zone morte ou zone de silence	36
II.2.3.5.6. Différentes techniques de mise en œuvre	37
II.2.3.5.7. Domaine d'application	37
II.2.3.5.8. Avantages et inconvénients de la méthode	38
II.3. Conclusion	39
<b>CHAPITRE III</b>	
III.1. Introduction	40
III.2. Rôle du turbin	40
III.3. Condition de fonctionnement des turbines	41
III.3.1. Contraintes mécaniques	41
III.3.2. Contraintes thermiques	42
III.3.3. Contraintes chimiques	42
III.4. Réalisation des turbines	43
III.4.1. Diffuseur de turbine ou stator	43
III.4.2. La Turbine	43
III.4.3. Turbine haute pression	46
III.4.4. Procédure de désassemblage	47
III.4.5. Procédure de nettoyage	48
III.4.6. Procédure d'inspection	48
III.4.7. Inspection du stator	50
III.4.8. Inspection du rotor	52
<b>CONCLUSION</b>	<b>59</b>

---

## **LISTE DES FIGURES:**

### **CHAPITRE I:**

- Fig. 1: principal dimension and areas  
Fig 2: les variantes  
Fig 3: CFM International Organization  
Fig 4:CFM56-7B  
Fig 5: Fan section  
Fig 6: Modula design  
Fig. 7: Engin adynamique station

### **CHAPITRE II:**

- Fig. 8:Aéronef subissant une inspection non destructif  
Fig. 9:Principe de la méthode de ressuage  
Fig. 10 : Principe de la méthode de Magnétoscopie  
Fig. 11 : Principe de la méthode de Radiographie  
Fig. 12 : Matériel radiographie de l'institut de recherche en aéronautique  
Fig. 13 : Schéma du principe du contrôle courant de Foucault  
Fig. 14 : Matériel automatisé pour contrôle en temps réel par courants de Foucault  
Fig. 15 : Principe de la méthode des Ultrasons  
Fig. 16: Contrôle aux ultrasons d'une station spatiale dans la cuve immersion

### **CHAPITRE III:**

- Fig. 17: Condition monitoring  
Fig. 18: HP Turbine NOZLE SE GMENTS  
Fig. 19:criques diagonal les entre la ligne A et B  
Fig. 20: STATOREFig. 21: HP Turbine blade  
Fig. 22:Crique radial sur la partie concave dans les lignes 6et7
-

## **INTRODUCTION :**

Peu après la seconde guerre mondiale, les premiers avions à réaction commerciaux, subirent des explosions en vol. Ces catastrophes provenaient de la propagation de fissure de fatigue dans le fuselage à partir d'hublots les sollicitations cycliques.

Dans ce cas étaient les variations de pression différentielle entre les appareils et l'extérieur. La demande d'études sur la propagation de la fissure de fatigue devient alors pressante.

Les contraintes cycliques dans les parois risquant de provoquer la propagation de fissure pouvant entraîner l'explosion des réacteurs au cas où les fissures atteindraient une taille critique.

Au niveau des installations technique de la compagnie AIR ALGERIE, plus précisément dans la section contrôle technique le personnel, veille à contrôler chaque organe de l'avion.

Durant le contrôle technique de chaque pièce le personnel se réfèrent aux manuels établis par le constructeur.

Les instructions sont :

Comment inspecter les pièces valeurs limite de défaut de chaque partie de la pièce.

L'objet de mon travail est d'étudier la propagation des défauts des ailettes turbine haute pression.

Pour cela mon travail comporte trois (03) chapitres.

Le premier chapitre traite la présentation de l'avion B737 ainsi que la présentation du moteur CFM56-7B.

Le second chapitre classe les différentes procédés de contrôle non destructif.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la propagation d'une fissure d'une ailette turbine haute pression.

Finalement on a clôturé notre travail par une conclusion général.



**GENERALITES SUR  
LES AVIONS B737  
ET LE MOTEUR CFM56 - 7B**

## CHAPITRE I

### GENERALITES SR LES AVIONS B737 ET LE MOTEUR CFM65-7B

#### I.1.PRESENTATION DU BOEING 737 :

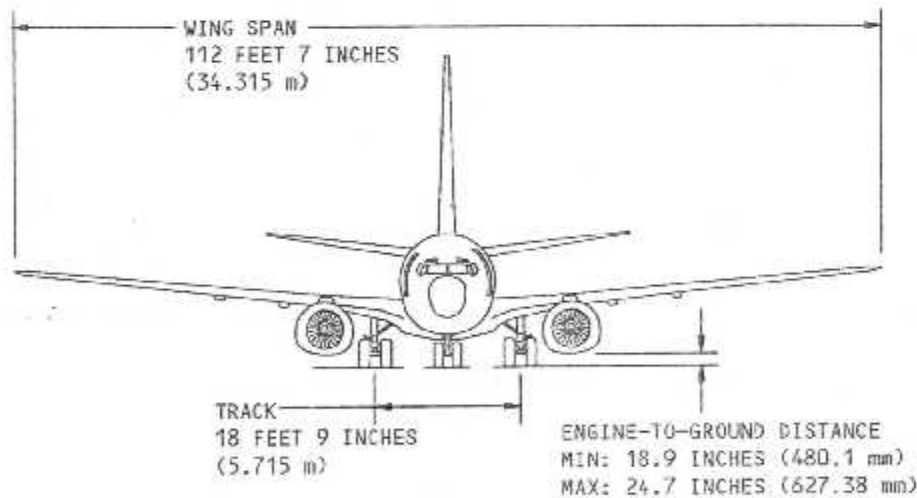
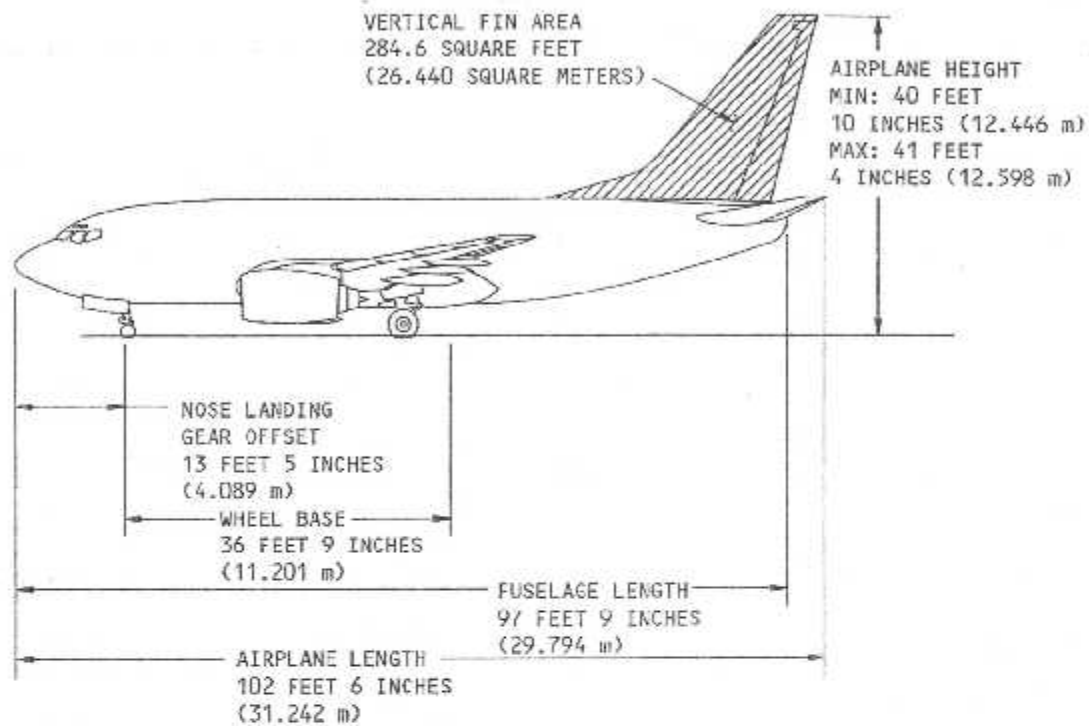
Le **BOEING 737** est un avion de ligne Le B737 est un avion court ou moyen-courrier. Il s'agit d'un biréacteur (deux moteurs, un sous chaque aile). Il effectua son premier vol le 9 avril 1967.

C'est, en 2004, avion le plus vendu au monde, avec un total de plus de 1200 Boeing 737 de troisième génération vendus dans le monde entier, et plus de 4300 au total.

#### I.1.2 .DIMENSIONS :

Les principales dimensions du BOEING737sont :

- Longueur = 39,5m
- Envergure = 34,5m
- Hauteur = 12,6m
- Empattement = 15,6m
- Voie = 5,7m



Principal Dimensions and Areas



### I.3. Différents modèles du Boeing 737 :

Il existe 9 modèles du B737 répartis en trois générations. Les modèles *originaux* sont les B737-100 et B737-200. Les classiques sont le B737-300, le B737-400 et B 737-500. Enfin, la nouvelle génération comporte le B 737-600, le B 737-700, le B 737-800 et le 737-900.

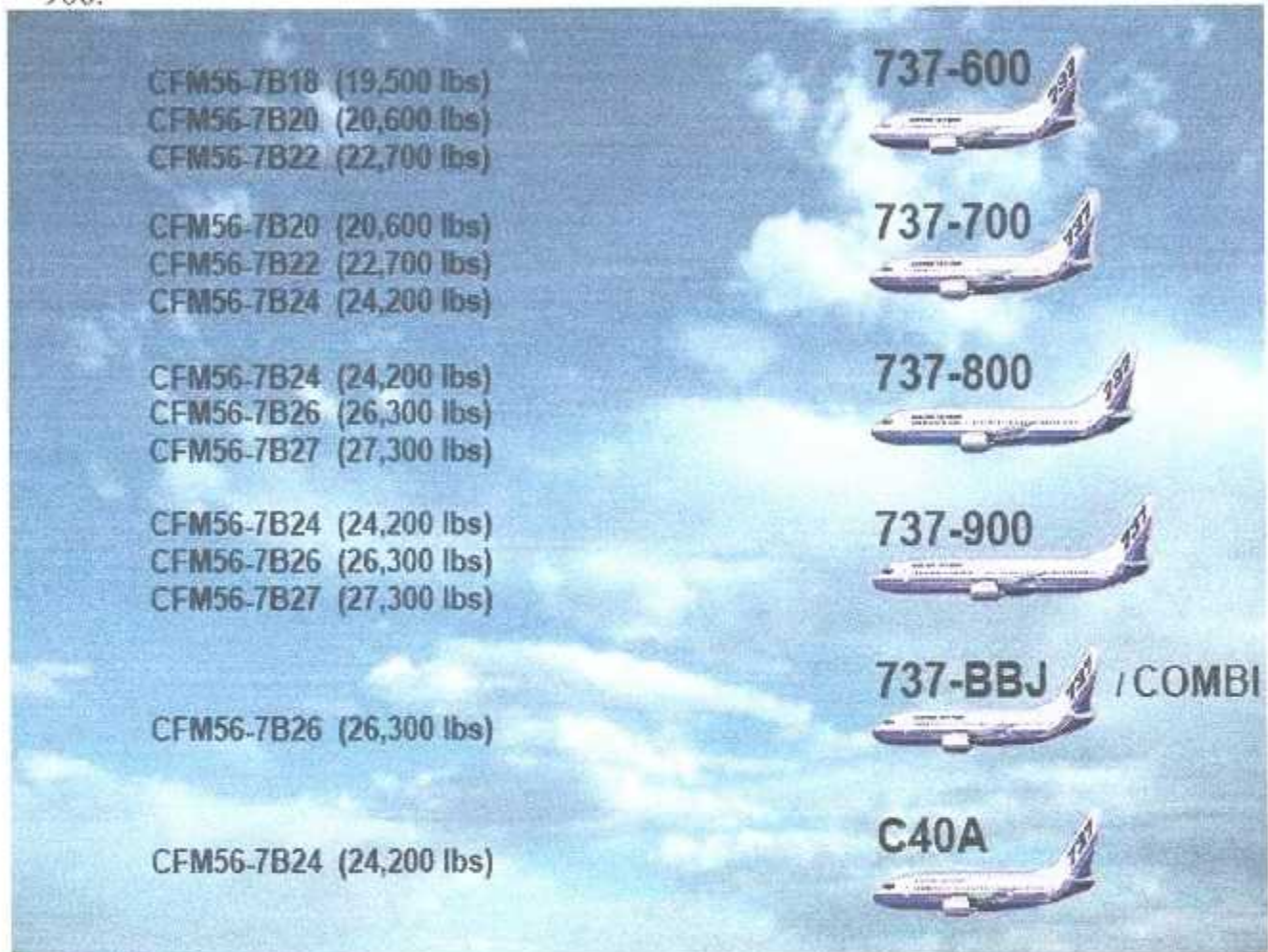


Figure 1.2 : Les différents modèles du Boeing 737

#### I.3.1. Le Boeing 737-100 :

Le modèle B737-100 est la première génération, motorisée par des réacteurs Pratt & Whitney JT8D (1144 ont été produits). L'avion partage 60% de sa cellule avec le Boeing 727, y compris les moteurs de même type (3 sur le B727) ; tout ceci dans le but de limiter les coûts de recherche et de production. Il a été lancé par la compagnie Lufthansa en 1964 et entra en service en 1968. Un total de 30 appareils a été construit et livré.

**1.3.2. Le Boeing737-200 :**

Cette version est une extension du B737-100 ciblant le marché des USA. United Airlines en est le premier acquéreur .Il est lancé en 1965 et entre en service en 1968. Il est ensuite mis à jour en tant que 737-200 Advanced qui devient la version standard de production.

**1.3.3. Les Boeing737-300, B737-400 et B737-500 :**

Le modèle des avion des avions B737-300, B737-400 et B737-500 appartient à la deuxième génération « classique »( conception début des années 1980). Ces avions sont équipées de réacteur CFM56-3 plus moderne et plus économiques(1990 exemplaires ont été produits) .

**1.3.4. Les Boeing737-600, B737-700 et B737-800 et B737-900:**

Ce modèle des avion appartient à la nouvelle génération (B737NG) équipée de réacteurs CFM56-7B et d'un cockpit ultramoderne entièrement numérique. Déjà plus de 1200 appareils de cette génération ont été produits.

Selon des responsables d'Airbus, Boeing prévoyait de lancer, à la fin 2007, une nouvelle famille de moyen-courrier pour remplacer les B737-600/700/800/900 qui reprendra des technologies développées pour le B777-200LR et le B787.

***Les caractéristiques du Boeing 737-800 :***

• Capacité (passagers)	162-215
• Cargo (volume)	44m3
• Longueur	39,5m
• Envergure	35,8m
• Hauteur	15,5m
• Masse maximum au décollage	79010kg



- Vitesse de croisière mach0, 785
- Vitesse maximum mach0, 82
- Rayon maximal en charge 5665km
- Capacité kérosène 26020l

### *1.1. Principaux accidents de Boeing737 :*

-3 mars 1991, un Boeing737 d'Uni Ted Flight, vol 585, s'écrase suite à une perte de contrôle de l'appareil, tuant tous les passagers et membres d'équipage.

-8 septembre 1994, Un Boeing 737-300 d'US Air, vol 427, décolle de Chicago O'hare Aéroport en route pour Pittsburgh, Pennsylvanie. À 19h03, le pilote perd le contrôle de l'appareil, les 127 passagers et 5 membres d'équipage meurent dans l'accident.

Les causes de ces deux accidents (vol 585 et vol427) ne seront expliquées que 4ans et demi plus tard suite à un nouveau incident similaire intervenu le 06 juin 1996 sur le vol 517 de la compagnie Eastwind Airlines. Il s'agit de la plus longue enquête de l'histoire de l'aviation civile.

-06 mars 2003, Un Boeing 737-200 d'Air Algérie s'écrase à Tamanrasset, faisant102 morts dont plusieurs Français, est 1 survivant.

-08 juillet 2003, Un Boeing 737-200 de Sudan Airways s'écrase dans un vol intérieur.

On ne retrouve qu'un seul survivant parmi les 117passagers.

-03janvier 2004, le B737-300 de la compagnie charter égyptienne Flash Airlines s'enfonce dans le Mer Rouge peu après son décollage de charme el-Cheikh. 148 personnes, en grande majorité des touristes français, meurent dans l'accident.

---



-03 février 2005, Un 737-200 d'une compagnie privée afghane s'écrase dans la région de Kaboul, tuant ses 1074 occupants.

- 14 août 2005, le vol Hélios Airways 522 de la compagnie chypriote Hélios Airways s'est écrasé avec 115 Passagers à son bord, dont 48 enfants et 06 membres d'équipage. En provenance de Larnaka (Chypre) et à destination de Brno (République tchèque), l'appareil s'est écrasé sur une zone non habitée à Varna va, à 40 Kilomètre d'Athènes en Grèce. Il n'y a aucun survivant.

-20 octobre 2005 : Il se confirmerait qu'à la suite d'une intervention technique, la vanne de pressurisation est restée en position manuelle, donc ouverte. Durant la montée (dépressurisée), l'équipage n'aurait pas clairement identifié l'alarme «cabine altitude» en la confondant avec l'alarme de configuration décollage (dont ils n'ont pas tenu compte puisqu'ils étaient déjà en vol.

-23 août 2005, un Boeing 737-200 de la TANS Peru s'écrasé peu avant l'atterrissage à Pucallpa en Pérou, tuant 40 de ses 98 passagers.

-05 septembre 2005 un 737-200 de la compagnie indonésienne Mandala Airlines s'écrase peu après le décollage sur une zone habitée de la ville Medan dans l'île de Sumatra. Le bilan est lourd : 101 des 117 occupants de l'avion et 47 victimes au sol.

-22 octobre 2005, un Boeing 737-800 de la compagnie Bellview Airlines (Nigéria) S'écrase trois minutes après son décollage de Lagos, près de Ota. Ce vol en direction d'Abuja transportait 116 passagers, aucun survivant.

-29 septembre 2006, un Boeing 737-800 de la compagnie Brésilienne Gol disparaît des écrans radar, suite à une collision avec un Embraer Legacy 600 (avion d'affaires à réaction, capacité de 16 personne) durant le vol 1907 entre Manaus et Brasilia. 155 personnes (dont 149 passagers) étaient à bord. Aucune ne survit au crash. Aucun des 7 occupants du Legacy 600 ne fût blessé.

-01<sup>er</sup> janvier 2007, un Boeing 737-400 de la compagnie indonésienne Adam AIR, vol 574, disparaît avec 102 personnes à bord.

---

-07 mars 2007, un Boeing 737-400 de la compagnie indonésienne Garuda indonésien rate son atterrissage sur une des pistes de l'aéroport de Yogyakarta, dans l'île de Java. Selon la compagnie aérienne, le bilan est de 22 morts et 108 blessés sur les 140 passagers que comptait le vol. Il semblerait que la vitesse trop élevée lors de l'atterrissage soit à l'origine de l'accident.

-05 mai 2007, un Boeing 737-800 de la compagnie Kenya Airways dont on avait perdu la trace après son décollage au Cameroun, s'écrase. L'appareil transportait 106 passagers et 08 membres d'équipage, en plus du pilote. Il effectuait la liaison entre Abidjan, en côte d'Ivoire et la capitale du Kenya, Nairobi, avec escale dans la ville camerounaise de Douala.

-20 août 2007, un Boeing 737-800 de la compagnie chinoise China Airlines voit un de ses deux réacteurs prendre feu quelques instants après son arrivé au parking à l'aéroport de Naha (Japon). Les 157 passagers et 08 membres d'équipage sont sains et saufs.

-03 janvier 2008 un Boeing 737-400 de la compagnie Marocaine Löw cost Atlas Blue filiale de Royal Air Maroc est sorti de piste lors son atterrissage à l'aéroport de Deauville St Gatien en France ; il semblerait que la vitesse trop élevée lors de l'atterrissage, aggravé par une présence de verglas en fin de piste, soit à l'origine de l'accident. Les 168 passagers et les 05 membres d'équipages en sont sortis indemnes.

-21 mars 2008 un Boeing 737 de la compagnie Anglaise rayai en provenance de l'aéroport Charleroi a fait une sortie de piste sur l'aéroport de Limges. Cet accident serait dû au mauvais temps à l'arrivée, notamment au verglas et au vent fort au moment de l'atterrissage. Il y a eu 06 blessés légers.

## I.5.LE REACTEUR CFM 56-7B :

### I.5.1.Description générale :

Le CFM 56-7B est un moteur qui a été développé à partir d'un programme qui date de 1974, issue d'une fusion de deux sociétés occupant une place importante à l'échelle mondiale.

Donc, le CFM 56-7B est issue de la coopération de SNECMA et GENERAL ELECTRIC. SNECMA étant une société nationale d'étude & construction de moteur aéronautique, qui tient 50 % de projet, et l'autre 50% est effectué par GENERAL Electric ou la nomination du CF moteur est un acronyme qui est issue de son appellation suite à son moteur CF 6 (COMPRESOR FAN).

(CFMCompressor Fan Motors)





Le moteur CFM56-7B est un turbo fan double corps, à écoulement axial avec un taux de dilution élevé, il est court et léger, et d'une conception entièrement modulaire pour faciliter sa maintenance. Ce moteur, dernier-né de la famille des CFM56, occupe une position commerciale très sûre dans le marché aéronautique. Il a été choisi par Boeing comme source unique pour motoriser ses Boeing 737 Série 600, 700, 800, 900, COMBJ-BBJ (Boeing Business Jet), C40A (Version Militaire). Son rôle est de fournir la poussée à l'avion et la puissance aux systèmes avion suivant :

Electrique

Hydraulique

Pneumatique

Ce moteur a bénéficié d'une démarche de conception intégrée, associant les aspects techniques et les besoins des clients. Le couple CFMI /Boeing a notamment sollicité les compagnies clients très en avant dans le processus de conception afin de pouvoir leur donner satisfaction sur un maximum de points. Le moteur issu de cette coopération présente de bonnes caractéristiques.

Sa turbine haute pression dotée d'aubes mono cristallines en alliage de Nickel, permet au CFM56-7B des avancées notables sur le CFM56-3 :

Une température de fonctionnement plus basse avec des marges EGT (température de sortie des gaz) plus élevées pour une meilleure longévité du moteur sous l'aile.

Une consommation spécifique de carburant réduite de plus de 8%

<b>SNECMA</b>	<b>GENERAL ELECTRIC</b>
<b>FAN</b>	<b>Core</b>
<b>AGB = GEAR BOX</b>	<b>HPT = Turbine haute pression</b>
<b>LPT = Turbine basse pression</b>	<b>C-C = Chambre de combustion</b>
<b>HPC = Compresseur haute pression</b>	

Ce moteur occupe une position commerciale très sûre dans le marché

D'aéronautique, il équipe Les avions BOEING 737, série 600-700-800-900, BBJ

**II.2.2.CARACTERISTIQUES PRINCIPALES :**

<b>Modèle</b>	<b>CFM56-7B</b>
<b>Poussée Pounds</b>	<b>18000 à 27300</b>
<b>Diamètre du Fan (1,55mètre)</b>	<b>61 inch</b>
<b>Poids du moteur à vide (2358Kg)</b>	<b>5257 Pounds</b>
<b>Masse de la nacelle complète (Moteur+Capots)</b>	<b>3300Kg.</b>
<b>Longueur</b>	<b>2,50mètre.</b>
<b>Mach</b>	<b>0,8</b>
<b>N1 max</b>	<b>5380 RPM (105%)</b>
<b>Taux de compression</b>	<b>32</b>
<b>Débit d'air au décollage</b>	<b>385 Kg/h</b>
<b>Vitesse moyenne d'éjection Des gaz (décollage)</b>	<b>295 m/s</b>
<b>Consommation spécifique</b>	<b>0,59 à 35Kft.(0,59 Kg De carburant par Kgf de poussée et par</b>
<b>Taux de dilution</b>	<b>5.6/1</b>
<b>Générateur électrique</b>	<b>90 KVA</b>
<b>Pneumatique</b>	<b>Limité à 45 PSI</b>
<b>Limite de démarrage de l'EGT</b>	<b>725° C</b>
<b>EGT maximum</b>	<b>950° C</b>

### ***1.5.3. Les modules :***

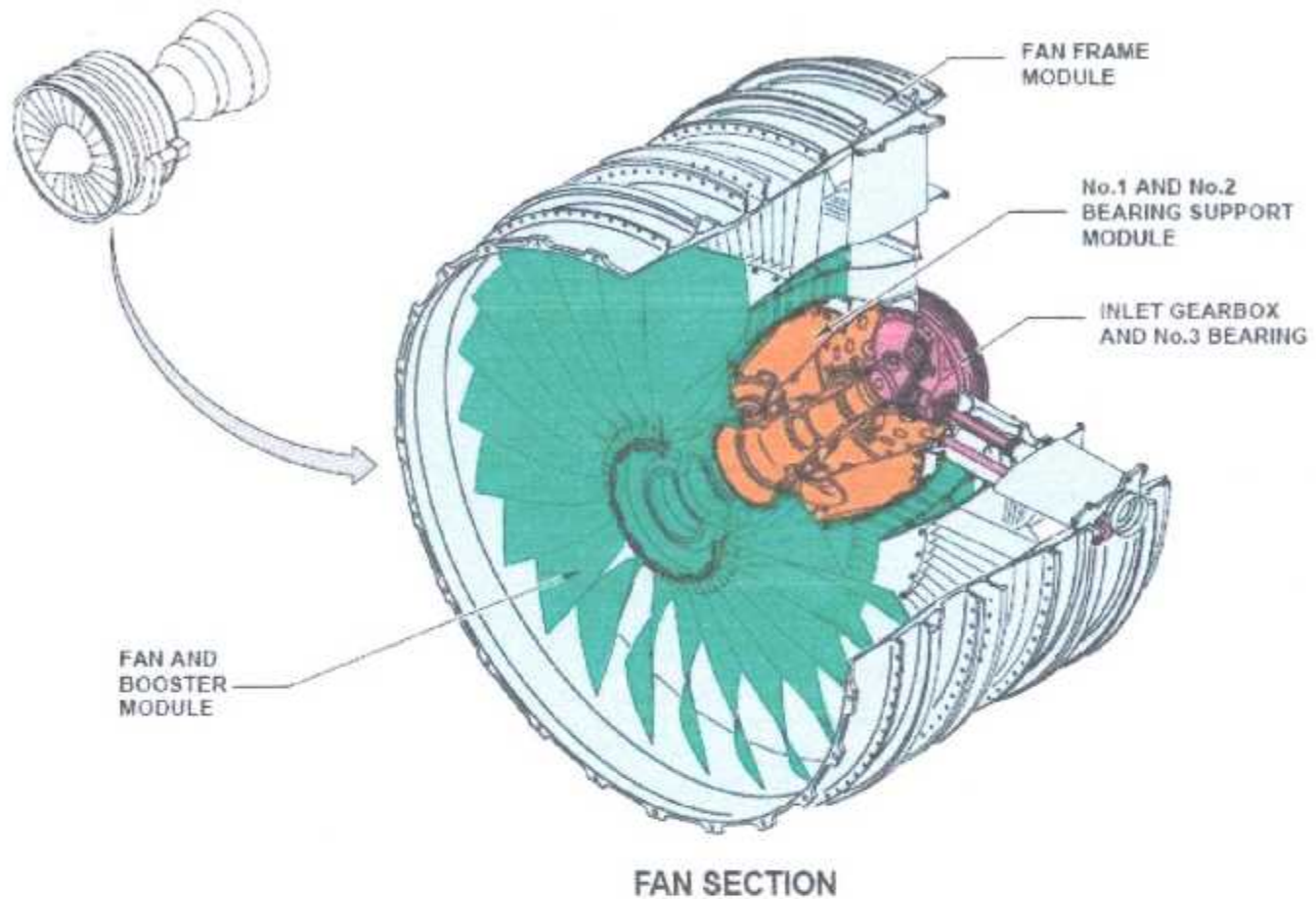
Le réacteur CFM 56-7B équipant le B737-800 NG, est un moteur double flux double corps et à taux de dilution élevé. Le CFM56-7B est composé de trois (03) modules :

#### **1.5.3.1. Module Fan and Booster:**

Ce module est constitué d'un fan de 24 ailettes en titane et 03 étages compresseurs basse pression, le FAN à lui seul engendre le flux secondaire.

---





### I.5.3.2. Module Core :

Le module core est constitué de :

Neuf (09) étages compresseurs haut pression.

Une (01) chambre de combustion annulaire équipée de vingt (20) injecteurs et deux allumeurs.

Une (01) turbine haute pression à un étage. La turbine haute pression entraîne la compresseur haute pression et la boîte d'entraînement des accessoires.

L'ensemble turbine haute pression et compresseur haute pression est appelé attelage haute pression ou N2, il est supporté par trois roulements.

### I.5.3.3. Module Turbine basse pression :

Ce module est constitué de quatre (04) étages. Il entraîne le FAN et le compresseur basse pression. L'ensemble turbine basse pression, FAN et compresseur basse pression est appelé attelage basse pression ou N1, il est supporté par trois (03) roulements.

**1.5.4.Boite d'entraînement des accessoires:**

L'attelage haut pression entraîne la boîte d'entraînement des accessoires, elle reçoit le mouvement par l'intermédiaire d'une boîte de transfert. Les différents accessoires qui équipent la boîte sont :

**A/La face avant :**

Pompe hydraulique

IDG

Le démarreur pneumatique

Tachymètre N2

Alternateur EEC

**B/La face arrière :**

Pompe carburant

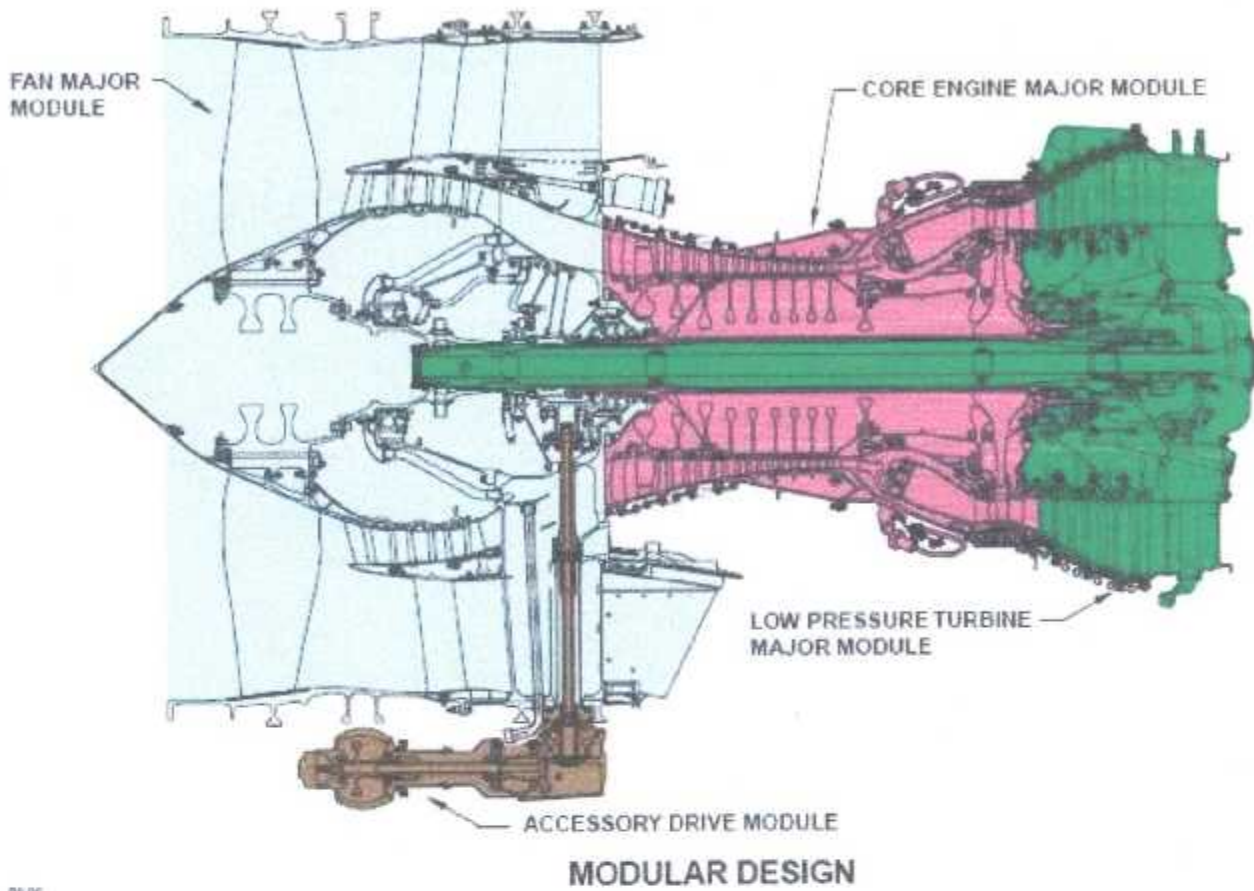
Régulateur principal carburant (IIMU)

Bloc pompes d'huile

-filtre de récupération d'huile

-Echangeur principal huile/carburant

-Servo réchauffeur carburant



### 1.5.5. Capotages :

Le réacteur CFM56-7B a deux (02) capots :

- Capot fan.
- Capot reverse.



**I.5.6. Les stations :**

- Station 0 : air ambiant
- Station 12 : entrée d'air

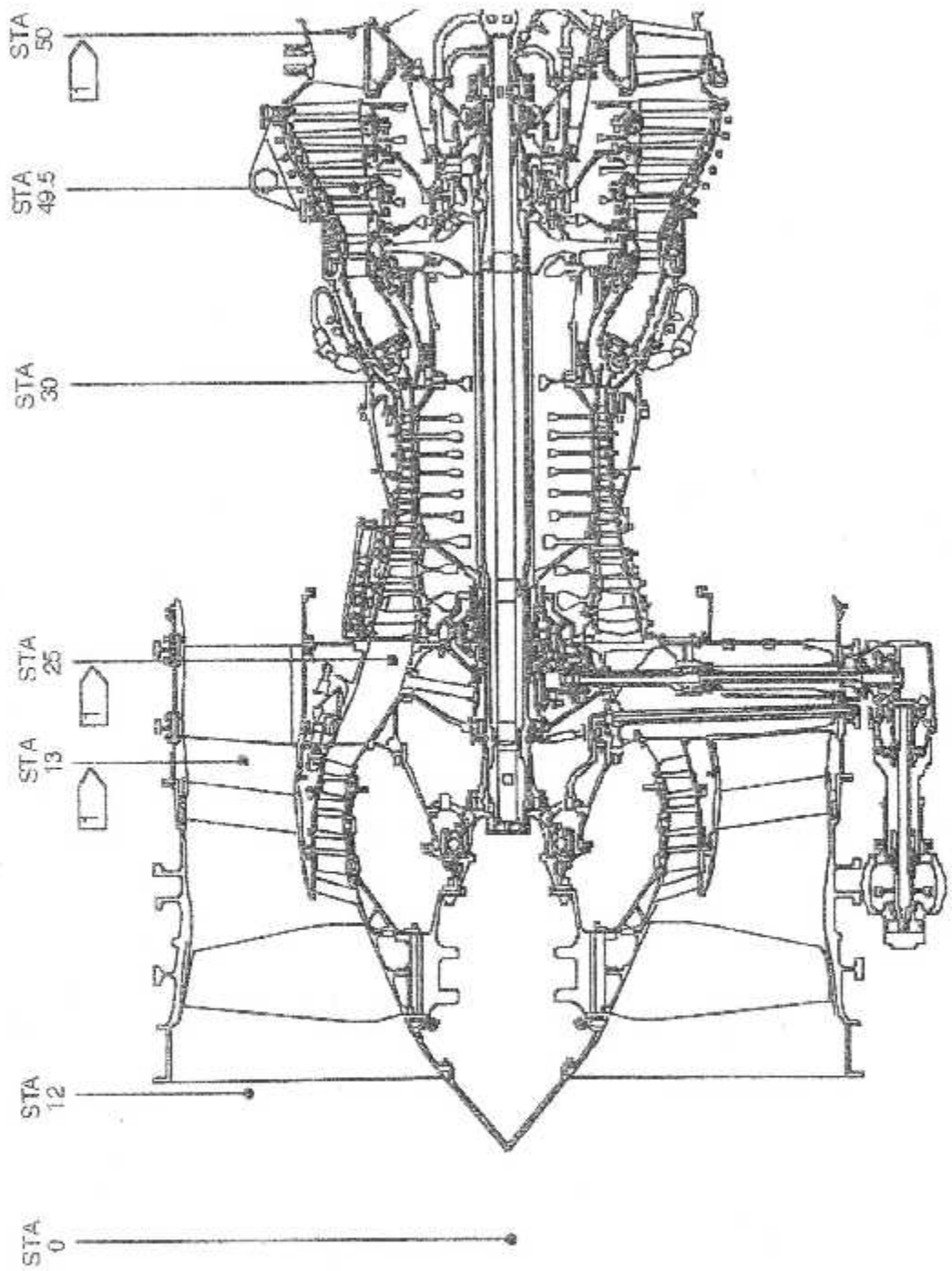
**A /Flux primaire :**

- Station 25 : entrée compresseur haute pression
- Station 30 : sortie compresseur haute pression
- Station 49 ,5 : sortie turbine basse pression

**B/Flux secondaire :**

- Station 12 : entrée FAN
- Station 13 : sortie stator FAN

CFM56-7B



ENGINE AERODYNAMIC STATIONS

**DIFFERENTES PROCEDURES  
DE CONTROLE  
NON DESTRUCTIF**



**CHAPITRE II****LES DIFFERENTES PROCEDURES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF****II.1.MECANIQUE DE LA RUPTUR:****II.1.1. Introduction :**

Tout industriel admet qu'une fabrication exempte d'imperfections est impossible à Réaliser. Comment définir un défaut avec une précision suffisante pour pouvoir L'introduire dans l'analyse de comportement de l'objet utilisé ? Comment établir des Nuances que l'on pourrait apporter à ce terme entre anomalie admissible, imperfection Nuisible, défectuosité nocive et défaut rédhibitoire ?

En effet, le défaut fait évoluer le produit vers un état de ruine. En présence de l'anomalie détectée, il est procédé à un calcul de sa taille critique et de sa vitesse de propagation

En pratique, toutes les pièces soumises à la fatigue contiennent des défauts, irrégularités de surface ou inclusions, qui provoquent des concentrations locales de Contraintes conduisant à la formation de micro – fissures.

L'origine de toute rupture est d'abord les fissures appelées criques dans le cas Particulier des chambres de combustion qui travaillent à haute température, dont il faut Connaître a priori les processus d'amorçage qui sont à l'origine de leur apparition.

Une crique est une fissure se produisant à chaud ou dont les causes d'amorçage existent à haute température, ce qui lie immédiatement leur domaine d'application à celui des matériaux réfractaires, en l'occurrence, celui des superalliages servant à la Fabrication des accessoires du turboréacteur.

**II.1.2. Définition de la mécanique de la rupture (MDR) :**

La mécanique de la rupture (MDR) se définit comme étant la science de l'étude Du comportement mécanique d'une structure avec ses défauts macroscopiques. Elle Permet de prévoir leur évolution jusqu'à la rupture complète de la structure qui est non Prévisible par l'usage d'un critère classique de la résistance des matériaux.

### II.1.3. Notion sur la mécanique de la rupture :

Dès 1920, Griffith montrait que la rupture d'un milieu élastique fragile pouvait être caractérisée par une variable appelée plus tard « taux de restitution d'énergie » dont la valeur critique, indépendante de la géométrie de la structure, était une caractéristique du matériau. Cette approche, qualifiée de globale, n'a été généralisée et formellement construite à partir de la thermodynamique des processus irréversibles qu'au cours des années 1970.

Elle montrait que les phénomènes essentiels se situent au voisinage du front de fissure. Ceci est dû à la forte concentration de contrainte qui existe à la pointe des fissures et que l'analyse élastique linéaire traduit par des singularités du champ de contraintes.

L'étude de ces singularités a conduit G.R. IRWIN, en 1956, à définir des facteurs d'intensité des contraintes, correspondant à des cinématiques particulières du mouvement des fissures. Ces paramètres semi-locaux sont largement utilisés pour étudier la rupture fragile ou la rupture par fatigue des milieux bidimensionnels.

La mécanique de la rupture, partant de la constatation que les ruptures résultent le plus souvent de la présence de défaut. Soit créé au cours de la fabrication, soit apparu par divers mécanismes de rupture. Pour établir une relation entre les contraintes appliquées, la dimension d'une fissure et la ténacité du matériau c'est à dire la résistance qu'il oppose à la propagation des fissures, il existe deux mécanismes de rupture :

- Mécanisme de rupture brutale à basse température. Ils appartiennent à 3

Catégories:

La rupture par clivage

Rupture ductile

Rupture inter granulaire.

- Mécanismes de rupture par fatigue, corrosion sous tension, fluage.

#### **II.1.4. Domaine de validité et d'emploi :**

La MDR est fondée sur une analyse élastique du champ des contraintes en petites déformations. Elle donne d'excellents résultats pour les matériaux élastiques fragiles comme les aciers à haute résistance, les verres, et dans une moindre mesure les bétons et les bois.

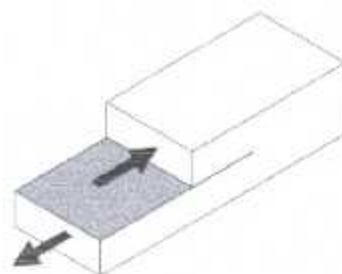
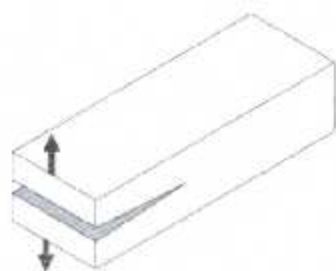
Avec l'intervention de la plasticité ou de la viscoplasticité, on entre dans le domaine de la mécanique non linéaire de la rupture. C'est le cas des matériaux ductiles comme les aciers à faible teneur en carbone, aciers inoxydables, certains alliages d'aluminium, et les polymères.

#### **II.1.5. Modes de sollicitations (mode d'ouverture des fissures) :**

Les fissures peuvent se propager suivant plusieurs modes car le mode de sollicitation du solide fissuré est toujours modélisé à partir de la résultante du chargement, par rapport au plan de l'entaille ou de la fissure. La MDR distingue trois modes :

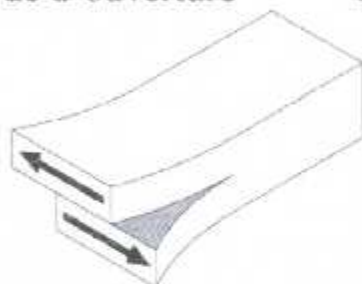
---





**Mode 1 :** Mode d'ouverture plan)

**Mode 2 :** Mode cisaillement plan (Glissement



**Mode 3 :** Mode anti-plan  
(Glissement anti-plan)

Dans le cas d'un chargement uni axial, la propagation des fissures dépend ou se fait en mode 1, lorsque la contrainte de traction principale est perpendiculaire à la fissure, On a affaire au mode 2 lorsque une contrainte de cisaillement simple est appliquée le long du plan de la fissure, il y a combinaison de deux modes (mode mixte) lorsque les deux conditions précédentes sont remplies.

## II.2. CONROLE NON DESTRUCTIF:

### II.2.1. Introduction :

Le contrôle non destructif (CND) offre des services d'inspection faisant appel à Des installations à la fine pointe de la technologie selon des projets de recherche et de Développement concerté.

### II.2.2 Domaines d'expertise :

- ❖ Détection non destructive et mesure des défauts ou des dommages dans les matériaux métalliques et composites, le soudage, les joints collés et les Composants aérospatiaux
- ❖ Caractérisation des matériaux (conductivité, modules d'élasticité, adhérence et mesure de l'épaisseur)
- ❖ Caractérisation par transducteur et établissement de profils par faisceau
- ❖ Traitement de signaux et d'images, fusion des données et reconnaissance des formes pour l'automatisation des inspections non destructives
- ❖ Balayage en surface et topographie visant à détecter des déformations, des Perturbations, la répartition des contraintes, la corrosion, les criques, sont destinés À des examens judiciaires
- ❖ Recherche sur la corrosion
- ❖ Analyse d'efforts et des contraintes expérimentales complètes
- ❖ Analyse de fiabilité
- ❖ Prédiction de la durée de vie fondée sur la tolérance aux dommages
- ❖ Calculs des intervalles d'inspection sécuritaires



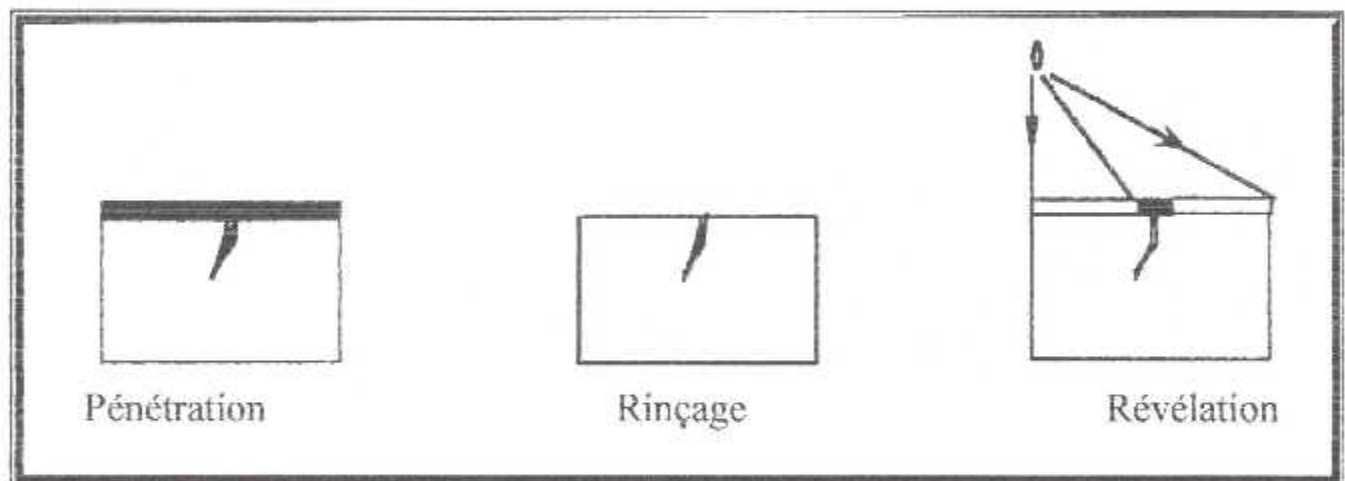
*Figure. II. 1. Aéronef subissant une inspection non destructive*

### II.2.3. Les différentes méthodes d'inspection :

#### II.2.3.1. Ressuage :

##### II.2.3.1.1. Principe de la méthode :

Cette méthode consiste à soumettre d'abord la pièce, pendant un certain temps, à l'action d'un produit appelé pénétrant qui rentre dans les fissures de la surface; Parfaitement dégraissée, grâce à des phénomènes de diffusion et d'absorption. Après le Temps de pénétration, l'excès de pénétrant est éliminé par rinçage à l'eau. Ensuite, il faut Sécher la pièce et lui appliquer un produit révélateur qui attire le liquide d'imprégnation Retenue dans la fissure. La remontée obéit aux lois de la diffusion par capillarité. En attirant le pénétrant, le révélateur donne une indication renforcée des défauts sous les rayon ultraviolet.



*Figure. II. 2. Principe de la méthode de Ressuage*

##### II.2.3.1.2. Principe de la phase de révélation :

Le révélateur est constitué de poudre micronisée qui forme en surface de la pièce à contrôler un milieu poreux. Les interstices entre les grains forment un réseau de « capillaires » dans toutes les directions. Le ressuage du pénétrant dans le révélateur sera meilleur si les grains de révélateur sont de faibles dimensions.



### II.2.3.1.3. Domaine d'application :

Cette méthode est utilisée sur les produits finis ou en cours d'utilisation lorsque le niveau de sollicitations mécaniques est important. C'est dans le secteur de pointe où la sécurité joue un rôle important, que la méthode trouve son plein épanouissement : à titre d'exemple, la révision des moteurs dans les compagnies aériennes ou le contrôle des Soudures de tuyauterie primaire dans les centrales nucléaires.

Il est possible d'établir des procédures de bonne exécution, adaptées aux matériaux contrôlés et à la nature des imperfections recherchées grâce :

- ❖ à la définition des étalons, pièce de nuance rigoureusement contrôlée et Comportant des fissures artificielles.
- ❖ à la définition d'un indice de sensibilité à partir des étalons.
- ❖ au chiffrage des résultats et d'étude de l'influence des divers paramètres à partir De l'indice de sensibilité.

### II.2.3.1.4. Avantages et inconvénients de la méthode :

#### Avantages

- ❖ Elle peut être effectuée sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux, de géométrie et de dimensions quelconques
- ❖ Bonne sensibilité de détection des défauts avec appréciation de leur longueur (la sensibilité de détection des défauts dépend de l'acuité visuelle et du seuil différentiel de contraste de l'opérateur, de l'état de surface et de la qualité du Nettoyage de la pièce.
- ❖ **L'ordre de grandeur de la sensibilité de détection d'une fissure est de longueur minimale 0,5 mm, et une largeur de 10µm.**
- ❖ autorisant l'examen de la totalité de la surface de la pièce (l'orientation des Défauts est sans influence).

**Inconvénients :**

- ❖ Les défauts doivent être débouchant et non obstrués (par de la graisse, la peinture, l'oxyde, la calamine, ou des contraintes résiduelles de compression); donc il est nécessaire d'effectuer un dégraissage et un décapage préalable soigné.
- ❖ Les défauts détectés sont surfaciques et non pas à l'intérieur du matériau.
- ❖ Les opérateurs doivent posséder une grande expérience.
- ❖ Hygiène et sécurité : utilisation de lumière ultraviolette, stockage et élimination de produits chimiques dont certains sont inflammables.

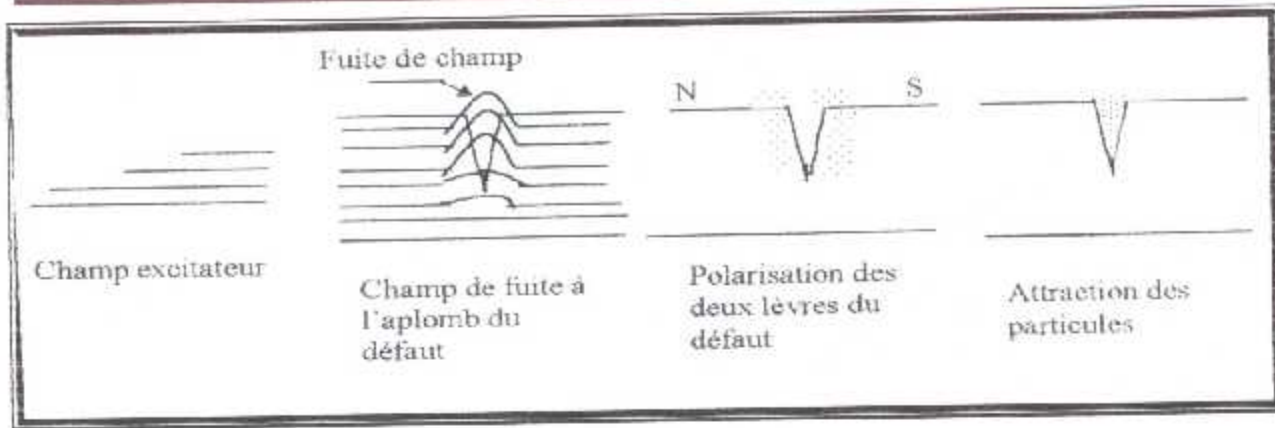
**II.2.3.2. Magnétoscopie :****II.2.3.2.1. Introduction :**

A l'instar du ressuage, la magnétoscopie, qui ne s'applique qu'aux pièces Ferromagnétiques, complète l'examen visuel. Souvent les imperfections de surface, Surtout lorsqu'il s'agit de solution de continuité, restent. Peu visibles au ressuage malgré Tout le soin apporté : elles sont trop fermées.

Lorsque le ressuage est insuffisant à cause des défauts qui peuvent être à l'intérieur du matériau, on a recours à la magnétoscopie sous ses différentes formes :  
Passage de courant.

**II.2.3.2.2. Principe de la méthode :**

L'examen magnétoscopique consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie. Les défauts superficiels provoquent à leur endroit des fuites de champs magnétiques qui sont mises en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. Le champ magnétique crée un centre de graviter pour la pièce et les particules sont attirées par ce champ gravitationnel. L'image magnétique obtenue est observée dans des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé.



*Figure.II. 3. Principe de la méthode de Magnétoscopie*

### II.2.3.2.3. Magnétisation :

#### II.2.3.2.3.a. Magnétisation directe :

Un champ magnétique qui produit un champ dont les lignes, sont en général parallèles à la direction longitudinale de la pièce, champ particulièrement apte à détecter les défauts transversaux.

#### II.2.3.2.3.b.Méthode indirecte (par passage de courant) :

Elle produit un champ dont les lignes sont des révolutions autour de l'axe de la pièce et qui convient pour mettre en évidence les défauts longitudinaux. Le courant passe alors par la totalité de la pièce lorsque les électrodes sont placées à ses extrémités et si les dimensions le permettent. Dans le cas des pièces contrôlées en défilement, seule une partie de la pièce est parcourue par le courant, les électrodes étant réalisées au moyen de galets roulant la pièce.

Dans le cas des pièces de grandes dimensions la magnétisation peut se faire par des pièces de touches de dimensions suffisantes pour laisser passer l'intensité de courant nécessaire à la magnétisation. Cette méthode est commode, elle est utilisée par exemple pour le contrôle des soudures. La difficulté de la méthode réside dans la qualité incertaine de contact, en présence de calamines ou d'irrégularités de surface. Il peut se produire des magnétisations insuffisantes ou des surintensités locales, parfois nocives.



#### II.2.3.2.4. Démagnétisation :

Après arrêt de la magnétisation, les matériaux ferromagnétiques conservent une magnétisation rémanente, en l'absence de tout champ, plus ou moins importante en fonction de la nuance et du traitement thermique. Ce magnétisme rémanent peut être une gêne pour l'utilisation ultérieure des pièces : en usinage, avec des copeaux qui restent collés sur les pièces, au soudage à l'arc, par déviation de l'arc, en aéronautique, on est donc amené dans un certain nombre de cas à démagnétiser les pièces. La méthode de désaimantation consiste à faire passer la pièce dans un champ alternatif décroissant s'arrêtant à un champ nul, induction nulle. La pièce est placée dans une bobine soumise à un tel champ ou, plus couramment, la pièce passe dans un tunnel de désaimantation constitué par une bobine traversée par un courant de 50KHz. Le déplacement doit être suffisamment lent jusqu'à environ un mètre de la bobine.

#### II.2.3.2.5. Domaine d'application :

La magnétoscopie est imposée pour la recherche des défauts en surface tels que : Souillures, porosités, retassures, fissures et inclusions. Elle est appliquée sur les pièces en acier moulées, forgées exactement sur les congés de raccordement, naissances de bossage et tubulures, les aubes et les chanfreins pour soudures. Elle est appliquée aussi sur les tôles et les tubes en acier ainsi que les joints en acier allié et surtout entre les différentes passes de soudage.

#### II.2.3.2.6. Avantages et inconvénients de la méthode :

##### Avantages :

- ❖ La méthode est relativement simple de mise en oeuvre.
- ❖ Elle permet une localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous adjacents (à 2 mm maximum), et une appréciation de leur longueur.
- ❖ Elle n'est pas coûteuse.
- ❖ Les défauts peuvent être matés ou obstrués.
- ❖ Rapidité relative d'obtention des résultats.
- ❖ Bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculaires au champ.

**Inconvénients :**

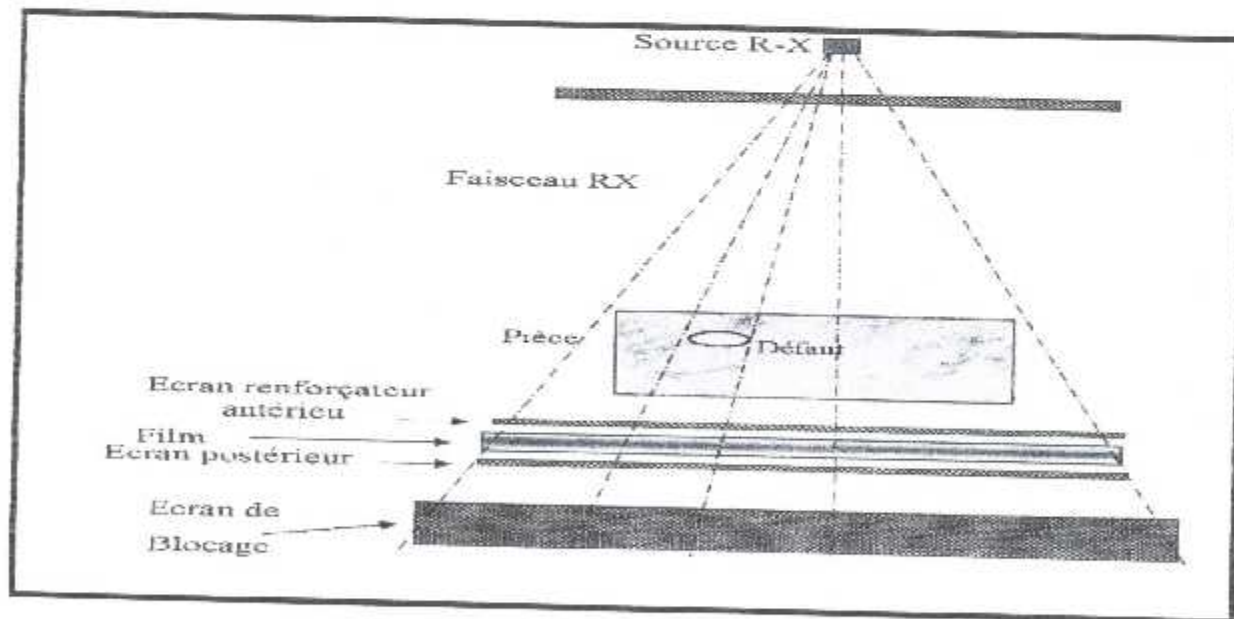
- ❖ La méthode ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques et la sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des Lignes d'induction.
- ❖ Une désaimantation des pièces après contrôle est nécessaire et obligatoire pour les pièces exposées à un environnement sévère.
- ❖ Impossibilité de détecter des défauts en profondeur ( $> 2$  mm de profondeur).
- ❖ Les opérateurs doivent être formés et expérimentés
- ❖ Risque d'interprétation d'images fallacieuses (sur filetage de vis par exemple)
- ❖ Risque de micro fissuration sur certains aciers sensibles.
- ❖ Limitation du contrôle pour les grandes dimensions de pièces.

### II.2.3.3. Radiographie :

#### II.2.3.3.1. Principe de la méthode :

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale. Elle consiste à faire traverser la pièce par un faisceau de rayon X et à irradier un film placé derrière la pièce.

La mise en évidence des défauts est assurée par une variation de densité optique sur le radiogramme (film radiographique irradié et développé), suite aux différences d'absorption des R-X entre une zone saine et une zone défectueuse. Cette méthode est applicable sur tous matériaux et permet de mettre en évidence des défauts internes. La détection de ces défauts sera d'autant plus aisée que l'orientation des défauts est parallèle au faisceau de rayons X.



*Figure.II. 4. Principe de la méthode de radiographie*



### II.2.3.3.2. Domaines d'application

C'est la méthode la plus difficile à employer mais dont les résultats spectaculaires élargissent les domaines d'application de la radiographie industrielle. Elle est utilisée dans la chirurgie, dans l'art et en génie civil mais plus dans les secteurs de l'industrie.

Dans des unités de production, des produits sont tributaires de la radiologie industrielle; par mis eux, citons : l'aéronautique, la construction navale, l'industrie chimique ou Pétrolière, les centrales productrices d'électricité (hydraulique, thermiques à flamme ou nucléaires), les plates-formes de forage, la construction automobile, les pipelines, les Matériaux composites, charpentes métalliques et les ancrages des téléphériques.

### II.2.3.3.3. Avantages et inconvénients de la méthode :

#### Avantages :

- ❖ Détection surfacique ou volumique dans tous les matériaux.
- ❖ Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier Variant de quelques micromètres à 600 mm
- ❖ Dimensionnement et identification possibles des défauts.
- ❖ Sensibilité de détection des défauts très élevée pour certaines techniques (Appareils générateurs de rayons X à micro foyer et pièces minces).
- ❖ Conservation possible des radiogrammes plusieurs dizaines d'années (archivage).
- ❖ Transportabilité (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de Radiographie gamma portatifs d'environ 20 kg, possibilité de radiographier jusqu'à 80 mm d'acier avec l'Iridium 192).

#### Inconvénients :

- ❖ La sensibilité de détection des défauts dépend des dimensions de la source et de son énergie, de la position et de l'orientation des défauts dans la pièce, de L'épaisseur de la pièce, et de la sensibilité du film.
- ❖ Difficulté de localiser les défauts en profondeur (> 80mm).
- ❖ Coûts de fonctionnement élevés (sources de rayonnement, entretien du matériel, Films radiographiques, contrôles obligatoires, et radioprotection).
- ❖ L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite une formation Des opérateurs de niveau élevé ainsi qu'une grande expérience.



Figure.II. 5. Matériel radiographique de l'institut de recherche en aéronautique (IRA).

#### II.2.3.4. Courant de Foucault :

##### II.2.3.4.1. Principe du contrôle par courant de Foucault :

Des courants en opposition de phases sont induits dans deux sections voisines du produit à contrôler (conducteur). En l'absence de défauts, en regard des deux bobines d'excitation, le système est équilibré.

La présence d'un défaut en regard des bobines modifie la répartition des courants induits et provoque un déséquilibre du système.

L'œil observe sur l'écran de visualisation une signature caractéristique du signal de déséquilibre au passage du défaut dans la bobine. Un capteur est caractérisé par son Impédance électrique à vide (dans l'air).

Si maintenant un défaut est présent au sein de la pièce à contrôler, il perturbe la Circulation des courants de Foucault. Cela se traduit par une variation de l'impédance Électrique de la bobine

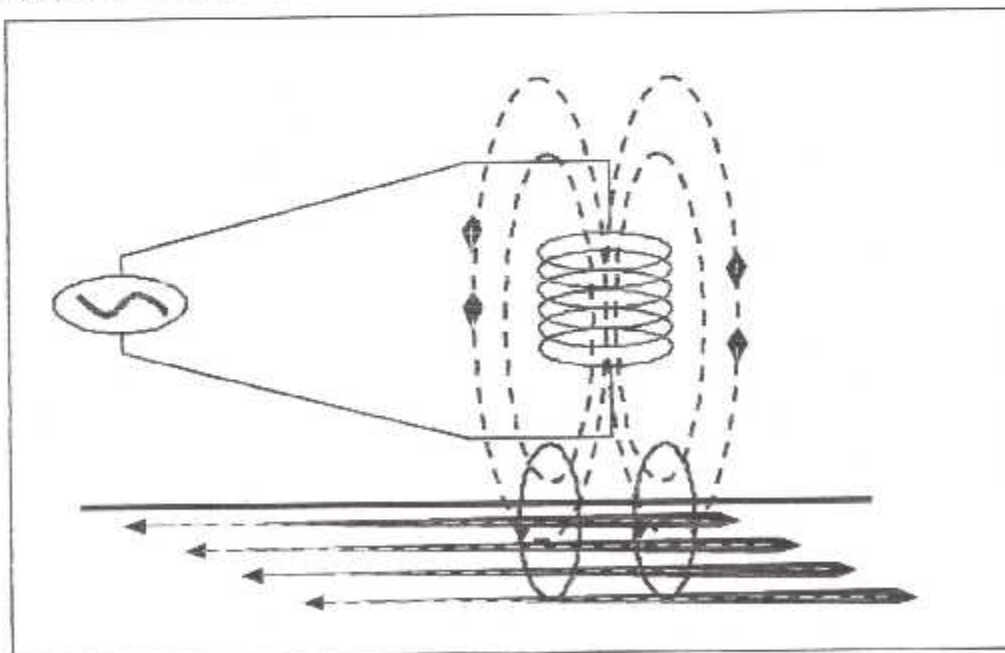


Figure.II. 6. Schéma du principe du contrôle par courant de Foucault



### II.2.3.4.2. Domaine d'application :

Le contrôle par courant de Foucault est applicable :

- ❖ aux matériaux ferromagnétiques ou paramagnétiques tels que les aciers austénitiques, les cupronickels, et les Alliages a base de Ni.
- ❖ au contrôle de tôles minces
- ❖ au contrôle de filetages males ou femelles
- ❖ au contrôle de revêtements
- ❖ au contrôle de traitements thermiques des surfaces
- ❖ au contrôle de matériaux composites comportant des fibres conductrices, de même le rôle fondamental des propriétés magnétiques des nuances contrôlées autorise une dernière application non destructive et le tri des matériaux.

### II.2.3.4.3. Avantages et inconvénients de la méthode

**Avantages :**

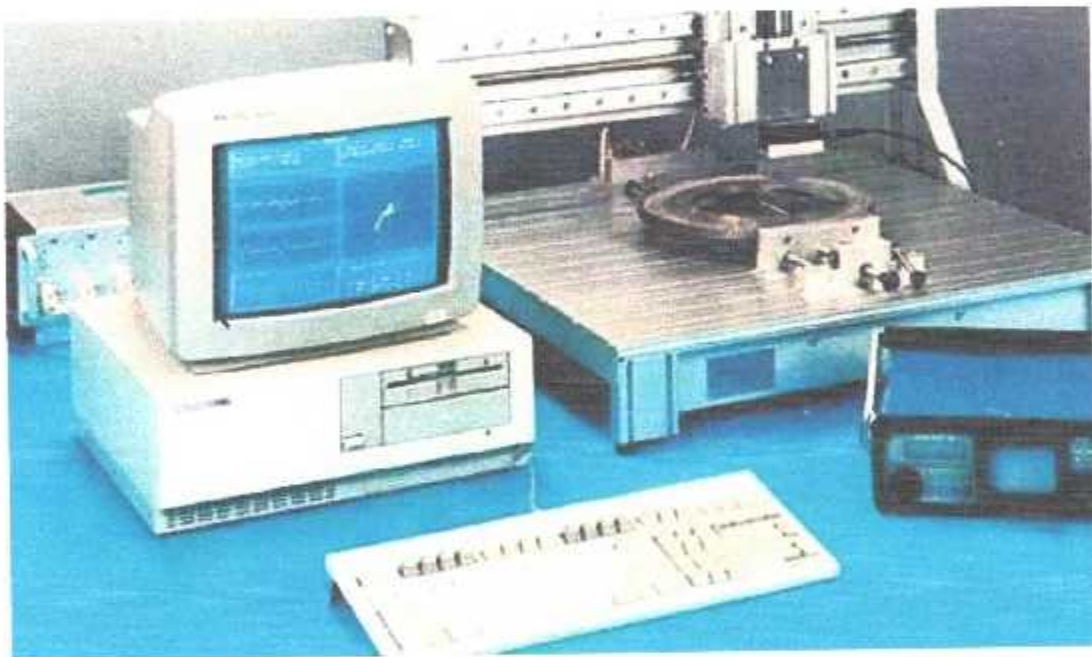
- ❖ Recherche de défauts situés à des profondeurs variables (de zéro à quelques mm)
- ❖ Les défauts peuvent être obstrués avec possibilité de contrôle automatique et en continu de pièces longues et profilées (tubes, barres, rubans, et feuillards).
- ❖ Permet d'effectuer des mesures dimensionnelles (profondeur de défaut, mesure d'épaisseur des revêtements non électro-conducteurs ou de conductivité très différente de celle du substrat).
- ❖ Permet le tri de pièces dont la conductivité électrique est différente (même alliage mais traitement thermique différent, nuances d'alliages mélangées accidentellement).
- ❖ Haute sensibilité de détection des défauts, une appréciation de la profondeur est possible ordre de grandeur de la sensibilité de détection d'une fissure (longueur minimale 0.2 mm, largeur 1 mm).
- ❖ Autorise des vitesses de défilement élevées, le capteur n'est pas nécessairement au contact de la pièce.
- ❖ Parfaitement adapté aux contrôles de maintenance (tubes de générateurs de vapeur, remontées mécaniques, ponts suspendus, et moteurs d'avions).



**Inconvénients :**

Les courants de Foucault sont mis un peu en marge des autres procédés CND pour les raisons suivantes :

- ❖ Méthode de contrôle ne s'appliquant qu'à des matériaux électro-conducteurs
- ❖ Difficile à mettre en oeuvre pour l'examen complet de pièces de formes complexes (nécessite de fabriquer des sondes spécifiques)
- ❖ Méthode de contrôle local peu adaptée à des balayages rapides de surfaces importantes
- ❖ L'interprétation des signaux est délicate et nécessite une formation spécifique des opérateurs de niveau élevé.



*Figure.II. 7. Matériel automatisé pour un contrôle en temps réel par courants de Foucault*

### **II.2.3.5. Ultrason :**

#### **II.2.3.5.1. Introduction :**

Les techniques aux ultrasons servent à détecter et à mesurer des défauts internes, mesurer l'épaisseur des composants en céramique et en composites et à inspecter des soudures et des collages.

#### **II.2.3.5.2. Génération des ultrasons :**

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques, elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu même et du type d'onde, plusieurs méthodes sont utilisées pour la génération des ondes ultrasonores, mais c'est l'utilisation des pastilles piézoélectriques, enfermées dans des boîtiers couramment appelés palpeurs, qui a permis le développement industriel des ultrasons

#### **II.2.3.5.3. Principe de la méthode :**

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission et la réflexion, avec un ou plusieurs traducteurs, de l'onde sur une solution de continuité. L'amplitude relative et la position des indications ultrasonores sont prises en compte

Les contrôles par réflexion sur l'anomalie peuvent être directs ou indirects avec l'émission et la réception confondues ou séparées. Les principaux types d'ondes utilisées appartiennent aux modes :

Longitudinal

Transversal

Leur propagation se fait perpendiculairement ou obliquement par rapport à la surface de contrôle. Le contrôle peut être manuel, automatique ou semi automatique; il peut se faire par contact, en immersion totale ou locale ou par d'autres moyens adaptés aux problèmes particuliers.



*Figure.II. 8. Principe de la méthode des ultrasons*

#### II.2.3.5.4. Définition d'un palpeur :

Il est constitué autour d'une pastille piézoélectrique (circulaire ou rectangulaire en Céramique) dont les faces sont métallisées de façon à réaliser deux électrodes auxquelles sont soudés les fils de connexion. Pour limiter les vibrations vers l'arrière du palpeur et leur durée, la pastille est posée sur un bloc amortisseur réalisé en matériau dense et très absorbant (exemple métal lourd ou sel métallique noyé dans une résine). L'ensemble de ces éléments et une bobine d'accorde sont placés dans un boîtier métallique complété par un connecteur électrique avec d'éventuels dispositifs de fixation du palpeur et une face de protection devant la pastille.

Cette face avant, joue un double rôle de protection contre les chocs mécaniques et d'étanchéité, Elle est réalisée dans des matériaux très variés (résine, carbures non métallisés).

#### II.2.3.5.5. Zone morte ou zone de silence :

En contrôlant par réflexion les échos des défauts situés à proximité de la surface peuvent se superposer à l'écho d'entrée dans la pièce. Ces échos ne sont alors plus détectables. On appelle zone morte, l'épaisseur de matériau en surface où la détection

des défauts est incertaine.

Un moyen pour réduire la zone morte est d'utiliser un transducteur très amorti. Les ultrasons subissent une atténuation qui est la somme de plusieurs facteurs :

**L'absorption** : elle est due aux frottements internes et à la conduction de chaleur. Elle augmente avec la fréquence.



**La diffusion :** les molécules renvoient les ultrasons dans toutes les directions, elle Augmente avec la fréquence ou la largeur des grains

**La divergence du faisceau :** l'énergie des ultrasons se trouve répartie dans un volume Plus grand.

Les ultrasons subissent également une atténuation liée aux variations d'impédance Acoustique aux interfaces.

#### II.2.3.5.6. Différentes techniques de mise en œuvre :

##### a) contrôle par contact :

Le traducteur est directement placé sur la pièce, la liaison acoustique est assurée Par un film d'agent de couplage qui est généralement de la graisse, une huile, une colle Cellulosique ou des gels spéciaux.

##### b) contrôle par immersion :

Cette méthode se développe pour pallier les inconvénients de la méthode de contrôle par contact. Le traducteur est situé à une distance précise de la pièce qui varie selon les dimensions de la pièce, le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau.

Il existe deux techniques qui ne diffèrent que par leurs mises en oeuvre :

- ❖ La méthode en immersion totale ou le traducteur et la pièce sont entièrement Immergés dans une cuve de contrôle.
- ❖ La méthode en immersion locale ou le traducteur et la partie de la pièce à Contrôler sont reliés entre eux par un volume de liquide, elle est employée lorsque La pièce ne peut pas être immergée complètement

#### II.2.3.5.7. Domaine d'application :

La méthode par transmission peut être utilisée pour :

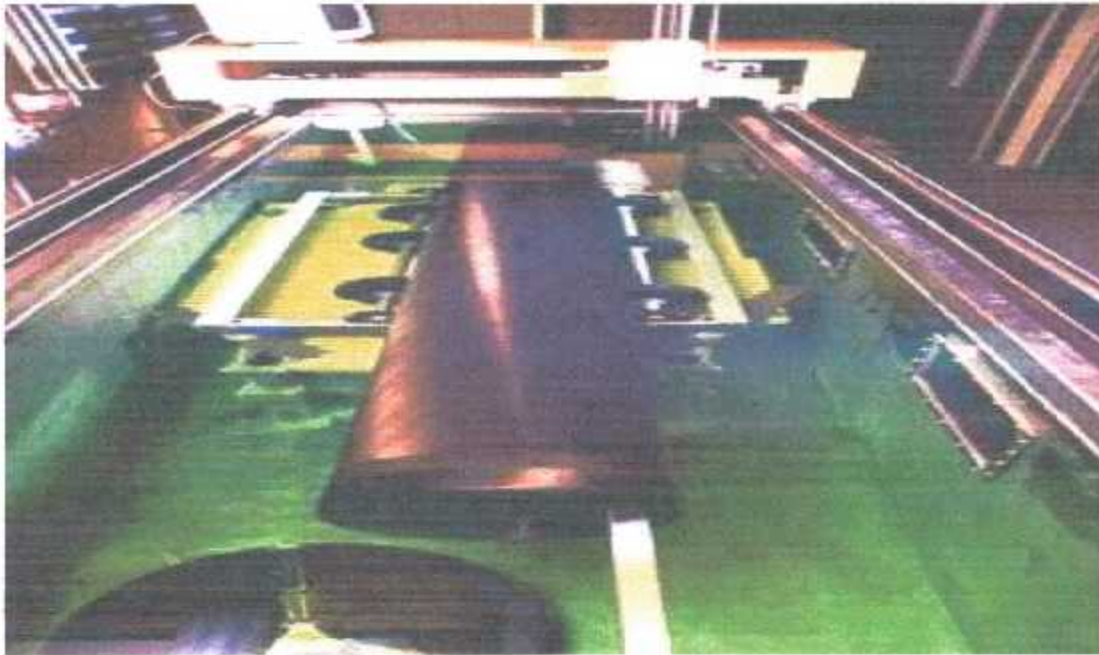
- ❖ La recherche d'anomalies internes dont la forme, les dimensions ou l'orientation Ne permet pas d'effectuer un contrôle par réflexion (fissures inclinées par rapport À la surface de contrôle.)
- ❖ Le contrôle des produits de faible épaisseur.
- ❖ Le contrôle des matériaux composites (matériaux monolithiques) : recherche de Délaminages, inclusion, absences de séparateur et contrôle de taux de porosité.

**II.2.3.5.8. Avantages et inconvénients de la méthode :****Avantages :**

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

**Inconvénients :**

- ❖ Méthode impliquant un très haut niveau de technicité.
- ❖ Sensible à la géométrie (forme, rugosité, zones mortes).
- ❖ Eblouissement sous la surface (zone de silence).
- ❖ Sensible aux effets structure / anisotropie.
- ❖ Soumis à un couplage pièce / traducteur.
- ❖ Nécessite absolument l'utilisation de bloc de référence difficile à fabriquer.
- ❖ Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.



*Figure.II. 9. Contrôle aux ultrasons d'une section du télémanipulateur d'une station Spatiale dans la cuve à immersion*

### **II.3. Conclusion :**

Le chapitre que nous venons de voir, nous a donné un bref aperçu sur la mécanique de la rupture et les différentes méthodes, techniques du contrôle non destructif. Par la Suite nous allons nous intéresser au contrôle par les ultrasons et plus précisément les Ultrasons par immersion qui sont le sujet de notre travail.



**ETUDE DE LA PROPAGATION  
D'UNE FISSURE D'UNE AILETTE  
TURBINE**

**CHAPITRE III :****ETUDE DA LA PROPAGATION D'UNE FISSUR D'UNE AILETT  
TURBINE****III.1.INTRODUCTION :**

Dans mon travail je me suis intéressée à la turbine haute pression du réacteur CFM 56-7B pour cela d'une part la description, la construction et les différentes contraintes de la turbine doivent être citées d'autre part les fissures, les déformations doivent être aussi citées.

**III.2.RÔLE DE LA TURBINE :**

Le rôle de la turbine est d'entraîner le compresseur, la boîte d'entraînement des accessoires. Pour se faire elle prélève une partie de l'énergie cinétique des gaz sortant de la chambre de combustion.

D'une façon générale , on trouve dans une turbine :

-Une partie fixe appelée **DISTRIBUTEUR DU TURBINE** ou **STATOR** dont les aubages convenablement disposés dirigent l'écoulement gazeux sur les aubes de la partie mobile.

Une roue mobile **LE ROTOR** solidaire du compresseur par un arbre commun et dont les aubes constituent la turbine proprement dite.

L'ensemble de ces deux parties forme un étage. Bien que

l'énergie nécessaire à l'entraînement du compresseur soit considérable, il est possible de l'obtenir avec un faible nombre d'étage de turbine (3 ou 4 au maximum) malgré les températures élevées de fonctionnement, un étage de turbine entraine facilement un compresseur à 7 ou 9 étages.

Fonctionnant à de grande vitesse périphérique et à des températures élevées la réalisation des turbines réclame un soin tout particulier et pose de sérieux problèmes, tant au point de vue résistance des matériaux que thermodynamique. En principe les aubages sont refroidis par une circulation interne d'air plus froid prélevé à la sortie du compresseur.

On peut distinguer deux sortes de turbines :

- La Turbine à action
- La Turbine à réaction

### **III.3. CONDITION DE FONCTIONNEMENT DES TURBINES :**

Le rendement du réacteur étant fonction de la température

T3 d'entrée turbine, cette dernière sera toujours maintenue le plus élevée possible (900 à 1200°C actuellement) ce qui fait que la turbine travaille continuellement dans des conditions extrêmement dures.

Les principales contraintes qu'elle subit sont de trois (03) sortes :

- Mécanique
- Thermique
- Chimique

#### **III.3.1. Contraintes mécaniques**

Du fait de leur vitesse de rotation élevée les aubes de turbine subissent des efforts considérables dus à la force centrifuge à titre d'exemple : une aube de 500gr ; dont le centre de gravité est à 25cm de l'axe de rotation subit, lorsque le réacteur tourne à 8400Tours/min effort approximatif de 11tonnes.

Les effets de la force centrifuge sont d'autant plus néfastes, qu'ils s'appliquent à des matériaux travaillant continuellement à haute température.

Dans de telles condition, dès que la température d'entrée et de sortie turbine dépasse le maximum fixe par le constructeur, le métal sollicite par des efforts centrifuges suffisants franchit très rapidement sa limite élastique et subit une déformation permanente dans le sens de l'allongement

Contraintes chimiques

Ce phénomène appelé FLUAGE dépend principalement :

- De la charge appliquée d'où limitation des vitesses périphériques
- De la température de fonctionnement
- De la durée de l'épreuve



Lorsqu'il est question de fluage on ne considère donc plus la limite de rupture à chaud, mais le temps pendant lequel le métal peut résister avant d'atteindre des déformations telles que les jeux de fonctionnement entre turbine et son carter ne dépasse les minima fixes.

Les courbes de fluage présentent en général trois parties :

- a) Une déformation primaire subie au début de la charge et de peu d'importance.
- b) Une déformation secondaire continue et à allure constante, déterminant la durée d'emploi de la pièce. Cette déformation sera sensiblement proportionnelle au temps d'utilisation si les températures de l'essai sont respectées.
- c) Une déformation tertiaire rapide précédente de peu la rupture. En utilisation cette partie de la courbe n'est jamais atteinte si les températures maxi fixées ne sont pas dépassées ou si en cas de dépassement elles sont immédiatement ramenées dans les normes, le seul moyen d'obtenir l'abaissement de température étant la réduction du régime.

### ***III.3.2. Contraintes thermiques :***

Ces contraintes sont dues à des différences importantes de température le long des aubes, elles se traduisent par des efforts au sein du matériau. On peut avoir 100°C de différence entre le pied et l'extrémité d'une ailette et 350°C entre le moyen et la jante du disque de turbine.

### ***III.3.3. Contrainte Chimique :***

Du fait des températures élevées il peut aussi se produire, si le carburant utilisé n'est pas parfaitement raffiné (présence de soufre ou de phosphore) de la réaction chimique avec le métal constituant les aubes. Ces combinaisons peuvent donner naissance à des produits de moindre résistance. C'est pourquoi certains métaux de très grandes résistances mécaniques sont éliminés du fait de leurs affinités pour ces deux corps. La teneur du soufre dans les essences aviation ne doit pas dépasser 0,03%.

### **III.4. REALISATION DES TURBINES :**

#### **III.4.1 Diffuseur de turbine ou stator :**

Il comprend des aubages fixes soit coulés, soit chaudronnés, maintenus entre deux anneaux, toutes ces parties étant réalisées en matériaux réfractaires.

Ces matériaux ne sont pas des aciers au carbone, mais des alliages comprenant un grand nombre de composants tels que :

- Du chrome, augmente la résistance à la corrosion et à l'oxydation.
- Du nickel, augmente la résistance à la corrosion diminue la fragilité.
- Du molybdène, augmente la résistance à la température élevées.
- De l'azote, stabilise l'alliage, diminue le fluage.
- Le manganèse, le silicium et cobalt sont aussi utilisés.

#### **III.4.2. la turbine :**

Elle comprend :

- Un disque en alliage réfractaire forgé, il est toujours refroidi par prélèvement d'air sur le compresseur principal, ceci dans le but d'évacuer les calories introduites par les ailettes.

Il importe en effet d'abaisser la température du disque pour permettre le graissage du palier arrière.

Ce disque subit d'autre part des contraintes de compression provenant de la dilatation, c'est pour les réduire en partie que les ailettes sont fréquemment montées avec un jeu à froid

- Les aubes de turbine-leur réalisation nécessite l'emploi d'alliage réfractaire, le plus utilisé étant le NIMONIC 80 ou 90. C'est un alliage à base de nickel et de chrome ne contenant pas de fer, il est forgeable mais jusqu'à ce jour il n'a pu encore être laminé, d'où obligation de réaliser des ailettes pleines d'un poids assez élève, après forgeage elles sont usinées au tour à reproduire



Actuellement des travaux sont en cours pour essayer de réaliser ailettes agglomérées obtenues par frittage. Le poids de pale entièrement métallique pourrait supporter les charges centrifuges élevées, les extrémités entièrement en céramique résisteraient très bien aux températures élevées

Etant donné l'importance des effets centrifuges la fixation des aubes à retenue plus particulièrement l'attention du constructeur, deux systèmes de montage sont généralement utilisés :

a) *Fixation en sapin* : Les aubes sont maintenues en place par matage de chaque coté du disque. Ce montage assure une bonne répartition des contraintes au niveau de la fixation, mais il nécessite un usinage très soigné.

b) *Fixation en peigne* : Avec goupille (ATAR-SNECMA) d'une réalisation beaucoup plus facile quelque soit les extrémités des aubes réunies par un anneau métallique ce dispositif diminue les possibilités de vibration. Les turbines avec anneau extérieur ont un poids faible que les autre, car ce montage permet d'avoir des pales de section plus mince, on améliore ainsi les caractéristiques de l'écoulement d'où augmentation du rendement de la turbine

Du fait des vitesses de rotation élevées, les aubes exigent un équilibrage parfait réalisé par paire, deux aubes diamétralement opposées étant assorties au même poids avant montage, cet équilibre statique étant achevé par rotation sur disque. Ensuite la turbine est soumise à un équilibre dynamique à différents régimes jusqu'à disparition complète des vibrations aux paliers.

La stratégie de maintenance du réacteur CFM56-7B obéit à des normes établies par le constructeur. Ces normes sont établies sous forme de protocole ou des cartes de travaux.

La maintenance du réacteur CFM56-7B se fait :

- A l'entretien en ligne
- En atelier



### ***A l'entretien en ligne***

L'inspection en ligne est une inspection suivant des protocoles et des fiches de travaux établies par le département ENGINEERING suivant le manuel de maintenance avion et le manuel moteur établis par les constructeurs avion et moteur ( avion BOEING moteur SNECMA )

Cette inspection consiste à faire des vérifications avant et après chaque vol suivant un compte rendu matériel établi par l'équipage navigant En cas d'anomalies le personnel de la maintenance intervient selon les fiches de travaux.

BOEING établit les inspections suivantes pour le BOEING 737-800 comme suit :

- INSPECTION JOURNALIERE
- INSPECTION HEBDOMADAIRE
- ½ CHECK A
- CHECK A
- CHECK C
- INSPECTION BOROSCOPIQUE

#### ***INSPECTION JOURNALIERE***

Cette inspection se fait chaque jour

#### ***INSPECTION HEBDOMADAIRE***

Cette inspection se fait chaque semaine

**½ CHECK A** Cette inspection se fait chaque 250 heures de vol avion

**CHECK A** Cette inspection se fait chaque 500 heures de vol avion

**CHECK C** Cette inspection se fait chaque 5000 heures de vol avion

#### ***INSPECTION BOROSCOPIQUE***

Cette inspection se fait chaque 400 cycles (un cycle = un décollage un atterrissage) elle se fait systématiquement en cas de mauvais fonctionnement du moteur (faibles performances ou EGT élevé)

## ***EN ATELIER***

L'inspection en atelier du moteur en atelier est régie par des protocoles je citerai :

- Protocole d'inspection complète
- Protocole d'inspection préliminaire
- Protocole d'assemblage
- Protocole de désassemblage
- Protocole d'inspection modulaire
- Protocole d'inspection boroscopique.

Pour l'étude de la fissure des ailettes turbine haute pression je commence par la description de la turbine haute pression

### ***III.4.4. Turbine haute pression***

La turbine haute pression du réacteur CFM56-7B est composée d'un (01) seul étage.

Elle comprend :

- 21 stators
- 96 Rotors

Les stators sont faits à base d'alliage de nickel, ils sont refroidis par l'air du 9<sup>ème</sup> étage compresseur haute pression afin d'augmenter leur durée de vie.

Le stator est composé de :

- Une plateforme intérieure
  - Une plateforme extérieure
  - Une flasque avant
  - Une flasque arrière
  - Un bord d'attaque
  - Un bord de fuite
  - Un intrados
  - Un extradados
  - Des orifices de refroidissement (à l'emplanture, au bord d'attaque et au bord de fuite)
-

Les rotors sont faits en alliage de nickel, ils sont refroidis par l'air de la compresseur basse pression afin d'augmenter leur durée de vie.

Le rotor est composé de :

- Un bord d'attaque
- Un bord de fuite
- Un intrados
- Un extrados
- Des orifices de refroidissement (à l'emplanture, au bord d'attaque et au bord de fuite)

L'inspection de la turbine se fait systématiquement en cas de détection de fissures, criques, déformations etc. suite à l'inspection boroscopique. Pour cela la procédure d'inspection se fera dans des étapes :

- Procédure de désassemblage
- Procédure de nettoyage
- Procédure d'inspection
- Procédure de réparation

### ***III.4.5.Procdure de desassemblage***

La procédure de désassemblage se fait selon le protocole.

La procédure de désassemblage se fait selon des travaux modulaires, le réacteur CFM56-7B est fait en trois modules :

- Module FAN ET BOOSTER
- MODULE CORE
- MODULE TURBINE BASSE PRESSION

Actuellement à AIR ALGERIE et plus précisément les interventions du types modulaires se font à l'étranger donc c'est la sous traitance.



### ***III.4.6.Procedure de nettoyage***

La procédure de nettoyage se fait selon le protocole

### ***III.4.7.Procedure d'inspection***

La procédure d'inspection se fait selon le protocole :

- TASK 72-00-200-806 F00 pour l'inspection boroscopique des stators de la turbine haute pression.
- TASK 72-00-200-807 F00 pour l'inspection boroscopique des rotors de la turbine haute pression.

Il est à noter que l'inspection boroscopique nécessite un appareillage spécial qui comprend :

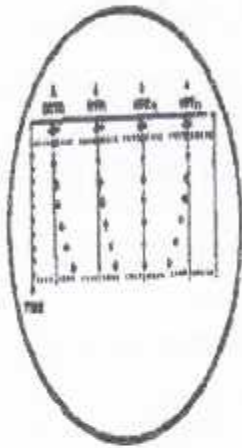
- Une unité électrique qui délivre 400 watts
- Un fibroscope rigide
- Un fibroscope flexible
- Un écran d'affichage

Pour faire le boroscope il faut :

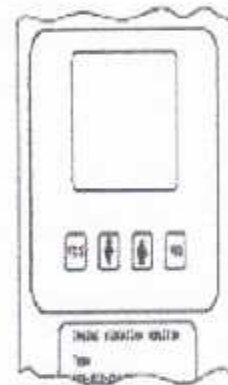
- 1- Avion au sol
- 2- Moteur à l'arrêt
- 3- Appliquer les consignes de sécurités telles que :
  - a- Mettre un placard ne pas démarrer le moteur
  - b- Tirer les disjoncteurs de la vanne de démarrage moteur
- 4- Ouvrir les bouchons des points de boroscope pour le stator et le rotor
- 5- Faire le boroscope des stators et des rotors pour cela une personne doit tourner le moteur à travers la boîte d'entraînement des accessoires avec un outil spécial
- 6- Les résultats du test de boroscope doivent être mentionnés sur le compte rendu inspection boroscopique par l'opérateur et signés par le contrôleur de la sous-direction assurance qualité

7- Il est noter que :

- a- Les fissures sur l'intrados, l'extrados, bord d'attaque, bord de fuite, Plate-forme leurs valeurs seront affichées sur l'écran du boroscope
- b- Les fissures au niveau de la racine de l'ailette leurs valeurs nécessitent un test contrôle non destructif pour déterminer les valeurs des fissures



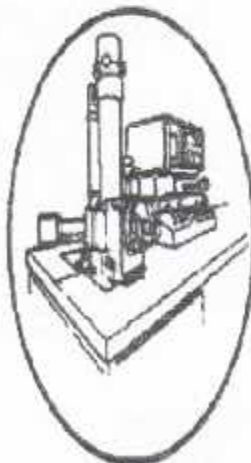
TREND MONITORING



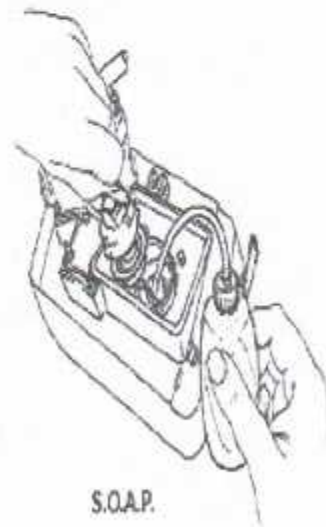
VIBRATION MONITORING



BORESCOPE INSPECTION



LUBE PARTICLE ANALYSIS



S.O.A.P.

CONDITION MONITORING

### ***III.4.8. Inspection du stator***

L'inspection du stator se fait comme suit :

#### ***Plateforme extérieure :***

La crique est permmissible sur la partie extérieure de la plateforme si elle ne dépasse pas 6,4 mm à partir du bord d'attaque.

#### ***Plateforme intérieure :***

La crique est permmissible sur la partie intérieure de la plateforme si elle ne dépasse pas 12,7 mm à partir du bord d'attaque.

#### ***Flasque avant :***

Aucune crique n'est tolérée

#### ***Flasque arrière :***

Aucune crique n'est tolérée

#### ***Bord d'attaque :***

La crique au niveau du bord d'attaque ne doit pas dépasser 1,8 mm de long. Deux (02) criques si elles ne dépassent pas 3,8 mm de long.

Figure III :



**BRULURES :**

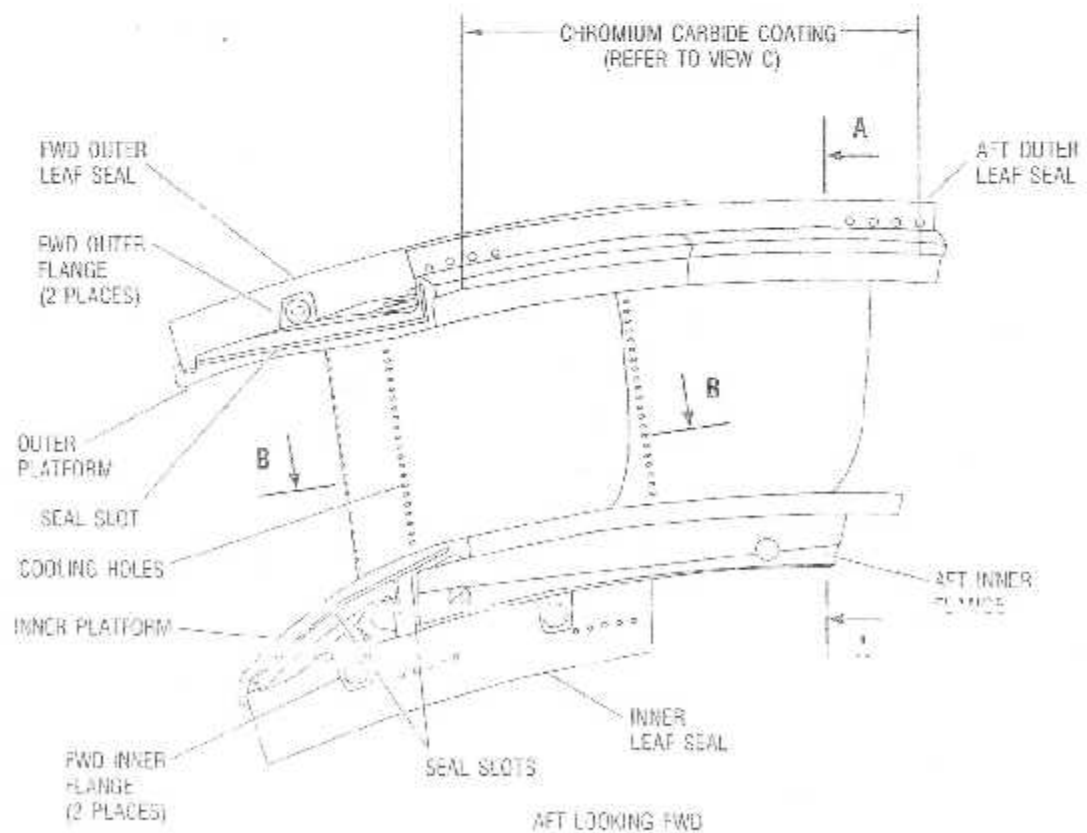
La surface totale des brûleurs ne doit pas dépasser  $0,6 \text{ cm}^2$

**CRIQUES LOCALISEES DANS LA LIGNE ARRIERE B :**

Les criques ne sont pas tolérées dans les lignes A et B.

**CRIQUES DIAGONALES ENTRE LA LIGNE A ET B :**

La crique ne doit pas dépasser  $0,5 \text{ mm}$



***ENTAILLES BOSSES ET RAYURES :***

Les tolérances 0,3 mm en profondeur et 3,81 mm en largeur

***REVETEMENT :***

Les tolérances du revêtement manquant :

- 3,8 mm à partir des plateformes
- 5,1 mm bord de fuite
- 1,5 mm des orifices de refroidissement

***SURFACE CONCAVE :***

Les tolérances des criques :

- 3,8 mm de longueur
- Un total de cinq (05) criques 31,8 mm
- Les criques radiales/axiales doivent être minimum 2,5 mm

***CRIQUE AXIALE :***

Les tolérances de la crique axiale

- 15,2 mm en longueur
- 0,3 mm en largeur

***III.4.9. Inspection du rotor :******INSPECTION DES ORIFICES DE REFROIDISSEMENT :***

L'inspection des orifices de refroidissement se fait selon la carte de travail 72-52-01-220-126 pour obturation.

Pour cela on branche une tuyauterie d'eau avec une pression minimum de 30 PSI au niveau de l'orifice de refroidissement à l'emplanture de l'ailette.

- On s'assure que l'eau sort librement sans bulles à travers les orifices de refroidissement du bord d'attaque et du bord de fuite

***BORD DE FUITE***

Les criques ne sont pas tolérées

Les criques radiales ne doivent pas dépasser 1,27 mm en longueur

***PLATEFORME :***

Les criques ne sont pas tolérées

***ENTAILLES OU RAYURE :***

L'entaille ou rayure ne doit pas dépasser 0,13 mm en profondeur et que le bord de fuite ne soit tordu.

***CRIQUE RADIALES :***

Les criques radiales commençant au sommet de l'ailette ne doivent pas dépasser :

- 3,18 mm en longueur
- 13 mm à partir du bord de fuite

Les criques radiales sur la partie concave ne doit pas dépasser 1,27 mm en longueur

***REVETEMENT MANQUANT :***

Le revêtement manquant ne doit dépasser dans deux zones

-7,62 mm en longueur



***-ENTAILLE OU RAYURE :***

La tolérance ne doit pas dépasser 0,38 mm en profondeur dans les zones A et B

La tolérance ne doit pas dépasser 0,25 mm en profondeur dans la zone C  
Aucune tolérance n'est permise à la racine du rayon .

La tolérance ne doit pas dépasser 0,5 mm en profondeur sur la surface supérieure et sur les côtés de la plateforme

***-OXYDATION ET EROSION :***

La tolérance ne doit pas dépasser 6,35 mm dans une zone

***-CRIQUE AXIALE :***

Elle n'est pas tolérée

***-ORIFICES DE REFROIDISSEMENT OBTURES :***

Aucune tolérance n'est permise

***-CRIQUE RADIALE SUR LA PARTIE CONCAVE DANS LES LIGNES 6 ET 7 :***

La tolérance ne doit pas dépasser pour trois criques se trouvant dans la zone A 1,27 mm en longueur

**-USURE CIRCONFERENTIELLE :**

La tolérance ne doit pas dépasser 0,25 mm en profondeur si l'usure n'atteint pas le rayon de la plateforme

**-USURE AXIALE :**

La tolérance ne doit pas dépasser 5 mm pour la dimension A.

**-PROCEDURE DE NETTOYAGE :**

La procédure de nettoyage est prescrite par le manuel moteur CFM56-7 B.

La procédure comprend trois (03) méthodes :

- Méthode A
- Méthode B
- Méthode C

Les méthodes de nettoyage A, B et C concernent les alliages à base de Nickel

**A/ Objet :**

Nettoyage des pièces en titane en utilisant l'ARDROX 185.

**B/ Recommandation :**

- Cette méthode ne peut pas être utilisé sur des pièces en alliage aluminium et titane ou à revêtement de chrome.
- Si la pièce est toujours sale ne jamais prolonger le temps d'immersion il faudra refaire la procédure.

**D / Procédure :**

- 1) Conditions opératoire T : 82° C- 88° C
- 2) Si la pièce est excessivement sale faire un pré nettoyage selon méthode 1 ou 3.
- 3) Immerger les pièces dans la solution d'ADROX 185 pour une durée de 10

- 4) Rinçage par aspersion puis par immersion à l'eau déminéralisée à température ambiante.
- 5) Rinçage par immersion à l'eau chaude déminéralisée à une température de  $93 \pm 10^{\circ}\text{C}$ .
- 6) Enlevez le surplus d'eau en utilisant un chiffon absorbant.
- 7) Séchez au bain séchoir à une température de  $93^{\circ}\text{C} \pm 10$  jusqu'à ce que la surface de la pièce atteigne la température du bain.
- 8) Inspectez la pièce visuellement pour s'assurer qu'elle soit bien propre avant de l'envoyer poursuivre son circuit, si la pièce est toujours sale refaire la procédure.

**A/ Objet :**

Dégraissage extérieur du moteur en utilisant un gel alcalin.

**B/ Reference:**

SPM (Standard Practices Manuel) 70-21-00 VI P 2A/2B

**C/ Recommandation :**

Obturer tous les orifices pour empêcher la pénétration du produit dans le moteur. Le spop2, ou le spop 3, remplacerait ce spop au cas ou le produit préconisé dans celui-ci n'est pas disponible.

**D/ Procédure :**

- 1- Dégraisser selon SPOP 209
- 2- Pulvériser le moteur de produit ARDROX 1900B sous forme de GEL. laissé agir pendant environ 10 a20 minutes.
- 3- Rincer a l'eau chaude déminéralisée.

**NB :**

Cette procédure est donnée pour information ce type de nettoyage n'est pas utilisé au centre révision moteur.



### ***PROCEDURE DE REPARATION***

La procédure de réparation du réacteur CFM56-7 B actuellement au niveau de la direction technique d'AIR ALGERIE se fait pour les ailettes FAN seulement par contre la réparation des ailettes turbine haute pression se fait à l'étranger.

## CONCLUSION

A l'issue de mon stage pratique au niveau des installations techniques de la compagnie nationale AIR ALGERIE j'ai pris connaissance :

- Du réacteur CFM56-7B
- Des différentes méthodes de contrôle non destructif
- Des différentes procédures de maintenance
- De la détermination des fissures
- De la procédure de réparation

Comme dans mon travail je me suis intéressée à la turbine haute pression. La turbine est un organe très important dans le moteur, c'est la turbine haute pression qui entraîne le compresseur haute pression et la boîte d'entraînement des accessoires. La turbine ne peut transformer l'énergie calorifique sortant de la chambre de combustion en énergie mécanique que si et seulement si :

- Les stators
- Les rotors
- Tous les composants de la turbine

Sont en bon état à savoir indemnes de toutes :

- Criques
- Déformations

L'inspection des ailettes de la turbine nécessite un équipement spécial à savoir le boroscope et le contrôle non destructif afin de déterminer l'état de la turbine. Cette inspection est judicieuse qui doit être faite par un personnel qualifié, très importante car on détermine l'état réel de turbine c'est-à-dire on détermine les fissures, les déformations etc. si elles sont dans les tolérances ou pas. Le bon fonctionnement du moteur dépend du bon état de la turbine. Il est à souligner l'importance des inspections de la turbine afin d'éviter des dégâts qui peuvent engendrer des accidents.

Ce stage pratique m'a permis de mettre mes connaissances théoriques en pratique, connaître le monde de la maintenance aéronautique et de me préparer au monde du travail.

## Bibliographie

1. CFM56-7B Line maintenance
2. Aircraft Maintenance Manuel Boeing 737-800
3. Illustrated PARTS Catalogue Boeing 737-800
4. Cours de mécanique de la rupture A.AHMED BENYAHIA
5. Procédures de nettoyage du manuel de maintenance (Carnet technique),
6. Procédure de réparation (Carnet technique),
7. Procédures de désassemblages (Carnet technique),
8. A. LAMBERT, J.RIVENEZ et G. WACHE, les contrôles non destructifs (généralité), AFNOR-CETIN ,1994.
9. JL.VIDAL, Magnétoscopie (niveau I), centre de formation de perfectionnement, bureau VIRITAS, juillet 1990.
- 10.JL.VIDAL, Magnétoscopie (NDT Expert), niveau II, bureau VIRITAS, 2002.
- 11.BLONDET, Ultrasons (NDT Expert), niveau II
- 12.Ultrasons (Carnet technique), impression SGS, Edition 05,1957.