

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

UNIVERSITE BLIDA 1

**Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales**  
Département de Construction

MEMOIRE

**Pour l'obtention du diplôme**  
**MASTER Aéronautique**

*Option : structure Avions*

**Caractérisation du phénomène de fatigue  
au niveau des ailettes de compresseur HP  
d'un réacteur CFM56-7B**

**Présenté par :**

❖ Mlle. RAMDANI Salima

**Dirigé par :**

➤ Mr ABDESSELAM Aomar : **promoteur**

Blida promotion 2015

## Résumé

Les aubes de compresseur sont des pièces soumises, en plus de l'environnement agressif, à des contraintes thermiques et mécaniques très fortes développant ainsi des phénomènes d'endommagement.

Par ailleurs, elles sont également soumises au processus d'érosion qui est un phénomène surfacique associé à un enlèvement de matière causé par des impacts répétés de particules solides sur le matériau.

L'objectif de ce travail est axé sur la caractérisation et l'identification des mécanismes d'endommagement s'opérant simultanément dans le faciès d'usure de l'ailette compresseur HP du réacteur CFM56-7B d'une part et de modélisé une aube afin de voir la dispersion de contraintes sous chargement.

En se basant sur les morphologies spécifiques que présentent le faciès d'usure et de rupture, des corrélations ont pu être établies, et une compétition entre plusieurs modes d'endommagement a été mise en évidence.

## Abstract

The blades of compressor are subjected parts, in addition to the aggressive environment, with thermal stresses and mechanical very strong thus developing phenomena of damage.

In addition, they are also subjected to the process of erosion which is a surface phenomenon associated with a removal of matter caused by impacts repeated of solid particles on material.

The objective of this work is centered on the characterization and the identification of the damage mechanisms taking place simultaneously in the facies of wear of the wing engine HP compressor CFM56-7B on the one hand and of modelled a blades in order to see the dispersion of constraints under loading.

By basing on specific morphologies that present the facies of wear and rupture, of the correlations could be established and a competition between several damaging modes was highlighted.

شفرات الضاغط هي أجزاء الموضوع، بالإضافة إلى البيئة العدوانية، في ضغوط عالية جدا الحرارية والميكانيكية وبالتالي تطوير الظواهر الضرر.

وعلاوة على ذلك، فإنها تخضع ل عملية التآكل الذي هو ظاهرة السطح المرتبطة إزالة المواد الناتجة عن التأثيرات المتكررة من الجزيئات الصلبة على المواد أيضا.

والهدف من هذا العمل يركز على توصيف وتحديد آليات الضرر هي التي تعمل في وقت واحد في ارتداء ضاغط ريشة سحنة مفاعل HP CFM56-7B من ناحية، وعلى غرار فجر ترتيب dispersion لمعرفة المعوقات تحت الحمل.

على أساس الأشكال التضاريسية المحددة التي لديها ملابس وكسر سحنة، تم إنشاء الارتباطات، وتسلط الضوء على المنافسة بين العديد من الاقتصادات الأكثر تنوعا.

# REMERCIEMENT

Je remercie beaucoup mon Allah qui nous a donné la force de continuer.

Je tiens tout d'abord à remercier toutes les personnes ayant participé au travail

Pour réaliser mémoire :

*Ainsi, je me permets d'exprimer ici mes sincères reconnaissances à mon Promoteur Mr ABDESSLEM, et, qui ont proposé et dirigé ce travail, pour Leurs suivis et leurs conseils.*

*Nos sincères remerciements vont aussi à monsieur le président et Messieurs les membres du jury pour avoir expertisé notre travail et nous avoir honorés par leurs Présences. En fin, que tous ceux ou celles qui ont contribué de Près ou de loin à la réalisation de ce long travail ; trouvant ici l'expression de Nos remerciements les plus Sincères.*

*Et Je tiens particulièrement a remercié toute personne ayant participé au groupe De travail et qui mon accueilli pour mon stage de fin d'études à la base technique (H400) d'Air Algérie.*

*Merci à vous tous*



## *DÉDICACE*

*Je dédie ce modeste travail, aux êtres les Plus chers, et à qui je  
dois reconnaissance et dévouement et en qui je ne cesserai*

*De remercier À Savoir :*

*Mes parents, et ma sœur et tous les membres de ma famille.*

*A tous les Amis qui m'ont soutenu durant tout Mon cursus universitaire  
et Avec lesquels j'ai partagé des moments inoubliables.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin À l'élaboration de ce  
mémoire de fin d'études.*

*Enfin à vous qui prenez la peine de lire Ce mémoire.*

## TABLE DES MATIERES

Résumé

Remerciement

Dédicaces

Table des matières

Liste des figures

Nomenclature

INTRODUCTION

Liste des figures

Nomenclature

**CHAPITER I : Etudes bibliographiques.....18**

**CHAPITER II : introduction à la fatigue des structures**

II.1. Introduction .....33

II.2.definition de la fatigue .....33

II.3. Caractérisation de l'endurance des matériaux .....35

II.4. Discussion sur la limite de fatigue .....37

II.5. Endommagement .....40

    II.5.1. Endommagement et rupture .....42

    II.5.2 La mécanique de l'endommagement .....43

        II.5.2.1. (a) Rupture fragile .....45

        II.5.2.1. (b) Rupture ductile .....45

        II.5.2.1.2.rupture par fissuration progressive .....46

            II.5.2.1.2. (a).rupture en fluage ..... 46

            II.5.2.1.2. (b).rupture en fatigue..... 47

II.6. Les différentes formes d'usure .....48

## CHAPITRE III : USURE PAR EROSION

III- USURE PAR EROSION .....	49
III.1- Sollicitation environnementales .....	50
III.2- théorie de l'érosion .....	50
III.3- Mécanismes de l'érosion par des particules solides .....	51
III.6. Effet d'érosion sur le comportement du matériau .....	58

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALES ET MODELISATION

IV- ETUDE EXPERIMENTALES ET MODELISATION .....	59
--	----

<b>Partie A :</b>	<b>PIECES ETUDIÉES.....</b>	<b>59</b>
-------------------	-----------------------------	-----------

IV.A.1- Ailettes compresseur HP.....	
--------------------------------------	--

<b>Partie B :</b>	<b>1-</b>
CARACTERISATION.....	<b>62</b>

IV.B.2 Contrôle non destructifs (CND) .....	62
---	----

IV.B.2.1- préparation et nettoyage préalable.....	63
---	----

IV.B.2.2- Inspection sur table.....	63
-------------------------------------	----

IV.B.3- contrôle par Ressuage.....	63
------------------------------------	----

IV.B.4- Courant de Foucault.....	64
----------------------------------	----

IV.B.5- Contrôle dimensionnelle.....	65
--------------------------------------	----

IV.B.6- Analyse de la composition chimique.....	65
---	----

IV.B.8- Caractérisation de la dureté et de la micro-dureté.....	67
---	----

## CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATION

V.1- Caractérisation du matériau de base.....	70
---	----

V.2- Caractérisation macroscopique du facies d'usure.....	75
---	----

V.3- Caractérisation microscopique des facies d'usure.....	81
--	----

V.4- simulation numérique avec COSMOS/M et validation des résultats .....	78
--	----

CONCLUSION GENERALE.....	94
--------------------------	----

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	97
--------------------------------	----

## Liste des Figures

<b>Figure I.1</b> : graphe représentant le taux de chargement en fonction de nombres de cycle. ....	23
<b>Figure I.2</b> : fissuration au niveau de bride horizontale de cloison étanche arrière de pylône (au niveau du moteur).....	24
<b>Figure I.3</b> : fissuration de fatigue au niveau du rotor .....	
<b>Figure. I. 4</b> : corrosion au niveau de la cloison	
<b>Figure I.5.a</b> volume d'influence sur une éprouvette entaillé .....	24
<b>Figure I.5.b</b> : Entaille par électroérosion .....	24
.....	
.....	
<b>Figure II.1</b> : principale zone de la courbe de Wöhler .....	25
<b>Figure II.2</b> : phénomène d'accommodation .....	33
<b>Figure II.3</b> phénomène rochet .....	33
<b>Figure II.4</b> : phénomène d'adaptation .....	33
<b>Figure II.5</b> : diagramme de Haig différentes représentation de la courbe AB .....	39
<b>Figure II.6</b> : diagramme de Haig, représentation de Gerb, Goodmane, soderbergh .....	39
<b>Figure II.7</b> : endommagement d'un turboréacteur .....	41
<b>Figure II.8</b> : modes de ruptures .....	42
<b>Figure II.9</b> : faciès de rupture fragile .....	43
<b>Figure II.10</b> : Aspect rupture ductile .....	44
<b>Figure II.11.a</b> : exemple de rupture fragile dans les métaux.....	45
<b>Figure II.11.b</b> Endommagement en fluage.....	45
.....	
<b>Figure III.1</b> : mécanismes de l'usure par érosion .....	49
<b>Figure III.2</b> : courbe de dépendance typique de l'érosion selon l'angle d'impact des particules .....	51
<b>Figure III.3</b> effet de la vitesse d'impacts de particules sur le taux de l'érosion des matériaux fragile et ductile .....	52

<b>Figure III.4</b> Erosion en fonction de l'angle d'incidence des particules .....	54
<b>Figure III.5</b> Effet de la vitesse d'impact sur l'usure érosive .....	54
<b>Figure III.6 :</b> Effet de fluide sur l'angle d'impact .....	55
<b>Figure III.7 :</b> Effet des conditions de flux sur l'érosion .....	56
<b>Figure III.8 :</b> Définition de la forme des particules .....	57
<b>Figure III.9 :</b> <b>micrographie</b> d'un A12017A grenailé.....	58
<b>Figure IV.1:</b> <b>high</b> pressur compressor .....	61
<b>Figure IV.2. :</b> L'ailette du 8 <sup>ème</sup> et 9 étage Fe1.....	61
<b>Figure IV.3 :</b> Ailettes de compresseur HP du 6, 7,8,9 étage érodé	
<b>Figure IV.4.a :</b> Echantillon découpé de l'ailette du 6 <sup>ème</sup> étage Fe1.....	61
<b>Figure IV.4.b :</b> Echantillon découpé de l'ailette du 7 <sup>ème</sup> étage Fe1.....	62
<b>Figure IV.4.c :</b> Echantillon découpé de l'ailette du 8 <sup>ème</sup> étage Fe2.....	62
<b>Figure IV.4.d :</b> Echantillon découpé de l'ailette du 9 étage Fe2.....	62
<b>Figure IV.5 :</b> Inspection avec loupe sous lumière blanche .....	63
<b>Figure IV.4</b> Etapes du ressuage : <b>(a)</b> Immersion dans le produit fluorescent, <b>(b)</b> Rinçage des échantillons, <b>(c)</b> Application du révélateur, <b>(d)</b> Visualisation sous lumière UV .....	64
<b>Figure IV.5</b> Inspection par courant de Foucault .....	64
<b>Figure IV.6</b> projecteur de profil .....	48
<b>Figure IV.7 (a)</b> Scriber, <b>(b)</b> l'utilisation du Scriber sur nos ailettes .....	49
<b>Figure IV.8</b> Principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage (MEB).....	51
<b>Figure IV.9</b> Mesure dureté sur les ailettes avec en appareil de Rockwell .....	52
<b>Figure IV.10</b> Schéma du principe de l'essai Vickers .....	53
<b>Figure V.1</b> Micrographie du matériau de base de l'ailette compresseur .....	56
<b>Figure V.2</b> Micrographie MEB de la zone saine (ailette compresseur) .....	56
<b>Figure V.3</b> Le spectre de diffraction des RX .....	57
<b>Figure V.4</b> Images des empreintes de micro-dureté dans la micrographie du matériau de base	58
<b>Figure V.5.a</b> Faciès d'usure de l'ailette du 6 <sup>ème</sup> étage .....	60
<b>Figure V.5.b</b> Faciès d'usure de l'ailette du 7 <sup>ème</sup> étage .....	60
<b>Figure V.5.c</b> Faciès d'usure de l'ailette du 8 <sup>ème</sup> étage .....	60
<b>Figure V.5.d</b> Faciès d'usure de l'ailette du 9 <sup>ème</sup> étage .....	60
<b>Figure V.6.a</b> Micrographie par MEB des grains de sables de Désert Algérien .....	61
<b>Figure V.6.b</b> Granulométrie des grains de sables de Désert Algérien .....	61
<b>Figure V.6</b> Projection de profil de l'ailette du 6 <sup>ème</sup> , 7 <sup>ème</sup> , 8 <sup>ème</sup> et 9 <sup>ème</sup> étage .....	65
<b>Figure V.7</b> Mesure des rayures de l'ailette avec un Scriber .....	65
<b>Figure V.8</b> Point d'application de la mesure de dureté Rockwell sur les ailettes .....	67

<b>Figure V.9</b> Profil de dureté Rockwell des ailettes des quarts étages .....	68
<b>Figure V.10-</b> Emplacement des caractérisations micrographiques sur la surface des ailettes étudiées .....	69
<b>Figure V.11</b> Aspect macrographique da la surface d'usure de 9 <sup>ème</sup> étage .....	72
<b>Figure V.12</b> Caractérisation MEB de la zone endommagée parl'érosion abrasive dans du 9 <sup>ème</sup> étage .....	72
<b>Figure V.13</b> Caractérisations morphologiques du film protecteur situé : (a) à l'interface matériau sain, (b) à l'interface zone érodée : usure par fatigue de surface ...	73
<b>Figure V.14</b> Caractérisation métallographique par MEB de la surface érodée l'ailette du 8 <sup>ème</sup> étage : mise en évidence du phénomène fusion de surface .....	74
<b>Figure V.15 (a)</b> Profil des vitesses sur les ailettes, <b>(b)</b> Profil de pression et de température dans le compresseur .....	76
<b>Figure V.16</b> : ailette profilé.....	86
<b>Figure V.17</b> : partie supérieure de l'ailette étudiée.....	86
<b>Figure V.18</b> : les surfaces de la pièce étudiée.....	87
<b>Figure V.19</b> : Type des éléments de maillage.....	87
<b>Figure V.20</b> : la partie supérieure de la pièce avec maillage (9571noeds).....	88
<b>Figure V21</b> : raffinage du modèle.....	89
<b>Figure V22</b> : application de force de pression.....	90
<b>Figure V23</b> : déformation suivant z.....	92
<b>Figure V24</b> : résultats simulation cosmos/M maillage 9571points.....	93

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1 :</b>	Faciès	de	rupture	en	fatigue	.....36
<b>Tableau V 1</b>	<i>Résultats</i>	<i>de</i>	<i>la</i>	<i>composition</i>	<i>chimique</i>	<i>[3].....71</i>
<b>Tableau V 3 :</b>	<i>Résultats des essais de dureté Rockwell du matériau de base.....</i>					<i>73</i>
<b>Tableau V 4 :</b>	<i>Résultats essais de micro-dureté Vickers dans le grain et dans l'espace inter-</i>					<i>granulaire.....74</i>
<b>Tableau 5 V :</b>	<i>Profil de dureté Rockwell des quatre ailettes.....</i>					<i>75</i>

## NOMENCLATURE

### 1-Variables physiques :

- E : Contrainte (N).
- T : Températures (°C).
- $\lambda$  : Anticathode en cuivre (Å).
- F : sous charge constante (N).
- $\alpha$  : d'angle au sommet (°).
- d : diagonale de l'empreinte (mm).
- $d_1$  et  $d_2$  : diagonale du losange de l'empreinte (mm).
- $d_n$  : moyenne la diagonale (mm).
- HRC : Dureté Rockwell (R).
- $H_v$  : Dureté Vickers (L'indice de dureté) (R).
- g : accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ ).

### 2-Abréviations :

- 2D : deux dimension.
- 3D : trois dimension.
- FAA : Fédéral Aviation Administration.
- DGAC : Générale de l'Aviation Civile.
- ASA : l'European Aviation Safety Agency.
- JARS : la joint Aviation Requirements.
- FADEC : régulation électronique pleine autorité.
- SAC : Annulaire (simple).
- DAC : duelle et optionnelle.
- CBP : Compresseur à Basse Pression (LPC Low Pression Compressor).

CHP : Compresseur à Haute Pression (HPC High Pression Compressor).

TBP : Turbine à Basse pression (LPT Low Pression Turbine).

THP : Turbine à Haute pression (HPT High Pression Turbine).

MEB : Microscopie électronique à balayage.

DENT : une rupture qui peut être provoquée par choc.

FOD : objet externe ou un débris d'un autre composants.

KCP : faible ténacité).

Hp : dureté de la particule.

Ht : dureté du matériau cible.

CND : Contrôle non destructifs.

UV : Inspection sous une lumière.

CREDEG : centre de recherche et de Développement de l'Electricité et du Gaz Filiale Sonelgaz.

MEB Le microscope électronique à balayage.

EDS dispersion d'énergie.

TPC (*Topologically compact phases*) : de contraste foncé et forme irrégulière.

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis les débuts de l'histoire de l'aéronautique l'homme n'a cessé de chercher de meilleures performances pour améliorer le facteur le plus important des réacteurs « leur fiabilité » lors du service. Cela signifie qu'il doit être exempt de tous les défauts possibles (choix du matériau, choix du traitement, choix de la mise en œuvre...). En effet les turboréacteurs sont des machines de conception très complexes, dont les organes doivent supporter des sollicitations thermiques, mécaniques et vibratoires intenses et répondent à de fortes contraintes d'exploitation, en particulier les aubes.

Ce sont les aubes qui conditionnent le rendement du réacteur. De ce fait, la modélisation de l'endommagement et la prévision correcte de leurs durées de vie constituent un axe de recherche principal.

Les aubes du compresseur sont des pièces soumises, en plus de l'environnement agressif, à des contraintes thermiques et mécaniques très fortes (température élevée, pression importante, vitesse de rotation élevée) développant ainsi des phénomènes d'endommagement.

Par ailleurs, elles sont également soumises au processus d'érosion qui est un phénomène surfacique associé à un enlèvement de matière causé par des impacts répétés de particules solides sur le matériau.

La rupture et l'érosion des pièces sont des phénomènes complexes. La rupture dépend de la nature du matériau (composition, structure et morphologie), de la température, du mode de sollicitation (traction, flexion, fatigue,...) et de la vitesse d'application des contraintes. Quant au phénomène d'érosion, il dépend directement de la forme, masse, vitesse des particules, dureté et ténacité du matériau.

Lorsqu'une pièce est endommagée, on doit apporter la réponse à deux questions principales : d'une part définir les modes et vitesse d'endommagement, et d'autre part déterminer l'origine de l'endommagement (son dimensionnement, défaut métallurgique, défaut de fabrication ...). L'examen du comment est une approche essentielle à la compréhension du phénomène de détérioration.

L'objectif de ce travail est axé sur la caractérisation et l'identification des mécanismes d'endommagement s'opérant simultanément dans le faciès d'usure des ailettes compresseur HP du réacteur CFM56-7B d'une part et aussi de modéliser la pièce de notre étude.

Cet objectif sera atteint à travers un ensemble d'analyses qui seront concentrées essentiellement sur la détermination des caractéristiques propres du matériau (composition chimique, morphologie, et structure cristalline) et la caractérisation macro et microscopique du faciès de rupture et d'usure et à l'appui d'une simulation sur cosmos/M.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Tout d'abord, une première partie bibliographique qui présente de façon succincte des généralités concernant l'évolution de phénomène de fatigue des structures aéronautiques ainsi que les différents modes de rupture par fatigue et d'usure avec une attention très particulière pour l'érosion.

Nous entamons le deuxième chapitre, par une partie consacrée à la présentation des matériaux étudiés ainsi qu'à la description des différentes techniques de caractérisations employées au cours de cette étude et une petite introduction sur notre simulation.

Nous présentons dans le dernier chapitre nos principaux résultats et leurs interprétations. En se basant sur les morphologies spécifiques que présentent les faciès d'usure et de rupture, des corrélations ont pu être établies, et une compétition entre plusieurs modes d'endommagement a été mise en évidence.

Enfin une conclusion générale dans laquelle nous mettons en évidence les points essentiels de la présente étude.

# **CHAPITRE I**

## **Recherches bibliographiques**

La pression économique impose, pour une meilleure rentabilité des constructions et des équipements, une plus grande maîtrise des marges de sécurité. La fatigue représente toujours un mode de ruine fondamental des structures avec la particularité d'être sournois puisque les défaillances sont la conséquence d'une accumulation de l'endommagement dans le temps, souvent sans signe extérieur observable.

La plupart des méthodes de calcul de la résistance en fatigue des structures sont déterministes (prévision binaire : oui ou non). Elles ne permettent pas de vraiment quantifier le risque.

Ceci est principalement dû au fait qu'un critère de fatigue n'intègre pas la dispersion des résultats d'essais de fatigue, une approche probabiliste est donc nécessaire.

C'est une des raisons pour laquelle les codes de dimensionnement s'orientent actuellement vers des formulations semi-probabilistes.

Le mot fatigue vient d'un mot latin fatigare qui signifie 'tiredness' en anglais. Ce terme est utilisé fréquemment en science de l'ingénierie pour montrer l'endommagement, la fissuration et la rupture des matériaux sous une sollicitation mécanique cyclique. Cette définition a été adoptée et affichée en 1964 par une Organisation Internationale de standardisation à Genève. Les calculs de dimensionnement et de justification de la structure en endurance, ainsi les Actions de suivi des avions en service, sont fondés sur deux approches complémentaires.

Suivi des avions en service : Les résultats de ces analyses et des essais de fatigue, combinés avec les possibilités des

Contrôles non destructifs et les moyens de suivi de l'endommagement des structures : (heures De vol, accéléro-compteurs, équipement ou système dédié) débouchent sur un programme

D'inspection structural : première inspection puis périodicité des inspections.

### **En aéronautique :**

Les premiers temps ,La fatigue dans les produits métalliques a été un problème depuis le début de l'aviation moderne.

## **De Havilland D.H.106 'Comet 1'**

Le Comet fut le premier avion à réaction à être exploité commercialement.

Le premier vol du prototype eut lieu à Hatfield le 27 juillet 1949, et le comet avait au moins 3 ans d'avance sur ses concurrents (plus rapide et volant plus haut)

Mais avec la propulsion à réaction beaucoup d'autres innovations ont été installées sur le comet, dont l'utilisation d'une cabine pressurisée importante.

**De Havilland** a conçu la cabine passagers a résisté à des pressions supérieures a celles exigées par les règlements de navigabilité, et a entrepris des tests en chargements cycliques sur une section a l'avant de la cabine.

Cependant, la cellule d'essai a été une nouvelle fois soumise à un chargement à charge extrême avant de débiter l'essai en fatigue.

Le 10 janvier 1954, **Yoke Peter** se désintégra a une altitude voisine de 30000ft et s'écrasa au large de la mer méditerranée vers l'île d'Elbe, occasionnant la perte de tous les passagers et de l'équipage.

La flotte des comet a été retiré, et beaucoup de modifications majeures ont été entreprises sur l'avion.

Pour la conception des avions commerciaux, la prévention des ruptures en fatigue non prévues a conduit à la mise en place de la notion de concept « Fail Safe »

**Fail Safe** : la structure est conçue pour continuer a transféré les efforts après la rupture d'une pièce donnée, de manière à ce que la structure soit saine malgré une rupture locale. la vitesse de propagation de la fissure n'est pas contrôlée, mais il est nécessaire de détecter le moment où la fissure apparaît par l'intermédiaire d'inspections périodiques.

Des réparations sont alors requises pour maintenir le caractère fail safe de la structure.

\_Bien que cette exigence consistant à concevoir des structures redondantes induisent une augmentation importante de la masse, le concept fail safe est une alternative au critère de désigne safe life.

## General Dynamics F-111 :

En décembre 1969, un bombardier United States Air Force (USAF) F-111 avec approximativement 100 heures de vol s'écrasa à Nellis AFB, Nevada, alors qu'il tenait une manœuvre continue à 4,0g.

L'avion était conçu en 1962, suivant le concept safe life, et une durée de vie en fatigue de 1600 heures de vols avait été démontrée sur une cellule d'essai complète en fatigue, ce qui indiquait que l'avion aurait du pouvoir être utilisé sans encombre pendant au moins 4000 heures (en considérant un facteur de sécurité SF=4).

La cause du crash était un défaut de fabrication non détecté au niveau d'une ferrure pivot à l'aile gauche, en D6A1 acier haute résistance.

Cet incident déclencha un changement radical des critères de conception des structures aéronautiques pour cet avion l'USAF.

⇒ L'accident montra que le concept de design "safe life" ne pouvait pas prendre en compte des défauts initiaux de fabrication dans les pièces structurales.

⇒ MIL-A-83444 'Airplane Damage Tolerance Requirement', impose que les structures soient conçues pour supporter ses défauts de fabrication, et qu'un programme d'inspection non destructif soit prévu pour détecter ses défauts sur l'avion alors en service.

Après les études sur la flotte mondiale des 707-300, mené à la suite des accidents du 14 mai 1977 de freighter de Dar Air services (immatriculé-BEBP) s'écrasant en approche de Lusaka international Airport en Zambie tuant les six occupants.

\_ Suite à cet incident, il était évident que le concept "faile safe" ne constituait pas une solution complète pour traiter le problème de fatigue dans les structures, pour cela une nouvelle méthode appelé « **Damage Tolerance** » était adopté.

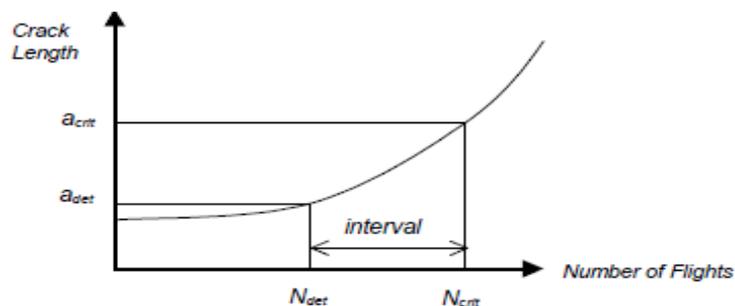
Cette méthode dite Damage Tolérance permet au concepteur de démontrer par calcul que les défauts pré-existants ne se propageront pas jusqu'à la rupture entre deux inspections, la première de ses inspections étant supposé être réalisée lorsque le défaut atteint le seuil (threshold) de détectabilité.

Le concept Damage Tolerance a été introduit dans les réglementations de navigabilités pour les nouveaux avions en 1978.

Des inspections de tolérance aux dommages supplémentaires et des modifications structurelles furent introduites par la suite par lors des programmes de maintenance pour les avions déjà existants.

### **Damage Tolerance (tolérances aux dommages) :**

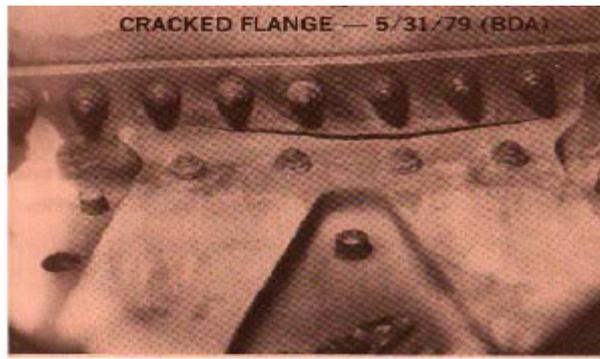
La structure doit être conçu pour garantir que pour un défaut de fatigue de corrosion ou accidentel survenant au cours de la vie opérationnelle de l'avion, la structure restante puisse résister à un chargement raisonnable sans occasionné une rupture ou une déformation excessive de la structure, ceci jusqu'à ce que le défaut soit détecté.



**Figure I.1** : graphe représentant le taux de chargement en fonction de nombres de cycle.

### **Et maintenant quelques recherches liés au notre travail :**

⇒ **Le 25 mai 1979 : un Douglas DC10- 10- N22** exploité par américaine Airlines s'écrasa à Chicago après que le moteur gauche ainsi que le mat soit détaché de la voilure alors que l'avion soit en phase de décollage après 19780 heures de vol. Des inspections sur le reste de la flotte révélèrent que 8 autres avions de deux compagnies été fissuré dans la même zone.

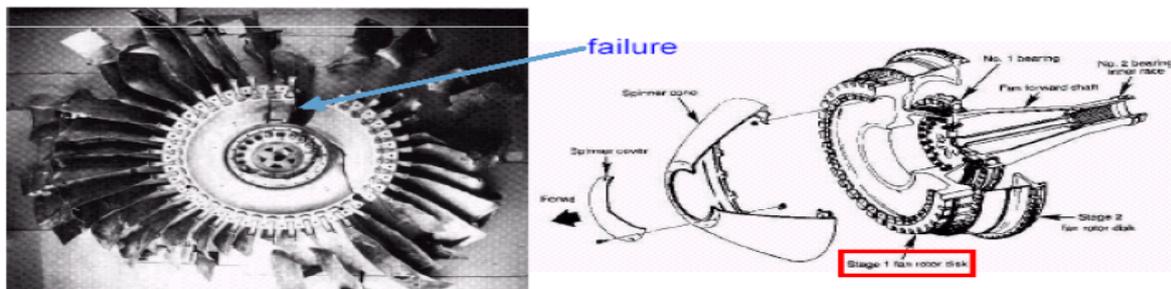


**Figure I.2 :** fissuration au niveau de bride horizontale de cloison étanche arrière de pylône( au niveau du moteur)

**Les expertises approfondies menées après l'accident ont révélé un comportement générale « Damage tolerant ».**

⇒ **Le 19 juillet 1989** le **Douglas DC10-10 N 118** exploité par **United Airlines** s'est écrasé en approche de l'aéroport de **Sioux city** après la perte du moteur de que pendant la phase de croisière. La séparation, fragmentation et l'éjection de plusieurs pièces du premier étage d'un Rotor fan du moteur conduisit à la perte de trois systèmes hydrauliques.

La raison était une rupture structurale causé par une fissure de fatigue ayant causé la perte des systèmes.



**Figure I.3 :** fissuration de fatigue au niveau du rotor.

⇒ **En juin 2001** une décompression violente en vol sur un **PIA MSN 144** été causé par une rupture de la cloison pressurisé arrière.

Le **MSN 144** (vieux de 20 ans à l'époque) a perdu la partie inférieure de la cloison étanche .les inspections effectué sur les autres **PIA** ont révélé des défauts critiques de corrosion pour le **MSN 098**, ainsi que des défauts similaires sur le **MSN 26**.

Ainsi les vrais raison de l'endommagement c'est qu'il n'y a pas eu de traitement adéquat de la corrosion effectué par les opérateurs.



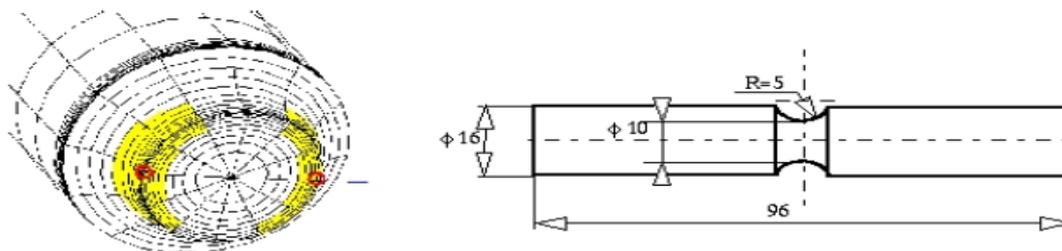
**Figure I.4** : corrosion au niveau de cloison.

Des précautions de lors de la conception doivent être prise en phase de design en fonction de l'expérience acquise sur les interventions effectuées en service et suite à la campagne d'essais en laboratoire, ceci afin d'assuré une tenue maximum à la corrosion (choix de matériaux, résistant à la corrosion et traitement préventif adéquats, concept spécifiques évitant les moisissures tel que trous de drainage revêtements hydrofuges).

Malgré tout ceci, la corrosion peut apparaitre sous certaines conditions climatiques (chaleur, humidité, environnement marin,...), et avec l'action d'un déversement accidentel de fluide, d'une atmosphère iodée, de poussières,...

Pour ces raisons, une maintenance régulière basée une des inspections programmé est effectué pour maintenir le niveau de corrosion à un stade acceptable.

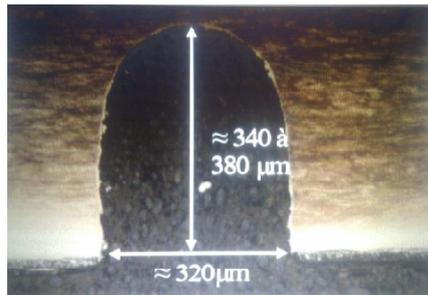
**En 2004** le docteur Thomas DELAHAY a travaillé sur les éprouvettes en alliage de titane en Ti6Al4V comme le montre sur cette **figure**



**Figure I.5** : Volume d'influence sur une éprouvette entaillée ( $K_t$  flexion=1,3) chargée en flexion plane à sa limite d'endurance.

⇒ En 2009 V. PERIERa, L. DIENGa, L. GAILLETa, S. FOUVRYb sont des professeurs en Ecole Centrale de Lyon (ECL), ils ont travaillé sur un fil de câble de haubanage (câble du Génie Civil sont soumis à des sollicitations qui conduisent à deux principales causes de dégradation : la fatigue et la corrosion.) sont s'intéresse à la propagation d'une fissure dans un fil d'acier entaillé soumis à la fatigue.

L'étude expérimentale a été réalisée sur des fils d'acier cylindriques de diamètre 5,4 mm  
Comme montre sur la **Figure I.6**



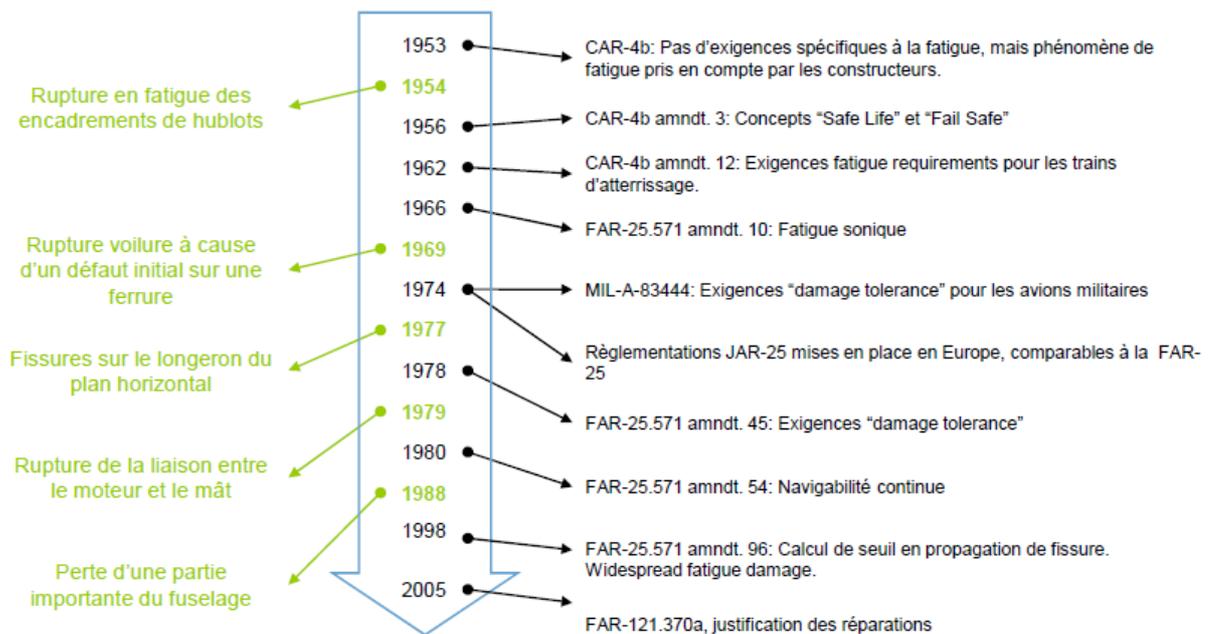
**Figure 1.6.** Entaille par électroérosion.

28 essais de fatigue sur fil entaillé ont été réalisés. Sur un graphique de courbe théorique de la loi de Paris, on constate une certaine dispersion des résultats, cette dispersion est inhérente au phénomène de fatigue ainsi qu'à l'hétérogénéité du matériau.

Au vu des résultats expérimentaux, ils sont arrivés à déduire que dans les conditions d'essais retenues, les fils d'acier tréfilé obéissent à la loi de Paris.

### **Evolution de la Réglementation et de la Maintenance :**

Les accidents ont piloté les évolutions des règles de design, des programmes de maintenance ainsi que la réglementation.



\_Autorisé les propagations lentes des fissures, Et avoir des capacités d'arrêt de fissures et de tolérance aux dommages de grande taille.

\_Etre accessibles et propices aux inspections.

### **Exigences générales en conception, Certification et maintenance :**

#### Autorités de navigabilité :

⇒ Etats Unis :

- Federal Aviation Administration (FAA), et le règlement de navigabilité est le Federal Aviation Regulations (FAR).

⇒ Europe :

- Joint Aviation Authorities (JAA) – avec plusieurs volume de réglementations communes, connues sous la joint Aviation Requirements (JARs).
- Aujourd'hui remplacé par l'European Aviation Safety Agency (EASA), les JARS sont remplacés les certifications spécifications (CS)

### Exigences Réglementaires :

⇒ Les exigences réglementaires sur la fatigue et tolérance aux dommages pour les structures sont regroupées dans les CS25.571 (quasi identique à la FAR25.571), qui sont :

1\_ L'évaluation de la tenue, le design de détail et la fabrication doivent prouver qu'une rupture dite catastrophique (due à la fatigue, la corrosion ou à un endommagement accidentel) sera évité tout au long de la vie opérationnelle de l'avion.

2\_ L'évaluation de la tolérance aux dommages doit inclure la détermination des sites probables et des modes de ruptures (due à la fatigue, la corrosion ou à un endommagement accidentel).

Cette détermination devra être effectuée par calculs, étayée par des essais de certification et (si disponible) un retour d'expérience...

3\_ Des dommages multiples dans des zones soumises à des sollicitations en fatigue doivent être évalués si ce type de défaut est susceptible d'intervenir. L'analyse doit intégrer des chargements cycliques et statiques, le tout étayés par une campagne d'essai.

3\_ L'étendue d'un dommage pour l'évaluation de la résistance résiduelle à tout moment de la vie de l'avion doit être cohérente avec la longueur minimum détectable, le calcul de la résistance résiduelle doit montrer que la structure restante est capable de résister à un chargement statique à charge limite.

#### ⇒ **Coefficient de sécurité en fatigue :**

L'ensemble des justifications de la résistance à la fatigue doit permettre de définir une durée de vie en utilisation. Entre la durée  $n$  en utilisation et la durée de vie  $N$  démontrée par essais, Prendre un coefficient de sécurité  $N / n = 5$ , pour une pièce vitale non inspectable d'un avion Ne possédant aucun moyen de contrôle des charges en utilisation.

En dehors de ce cas, le coefficient de sécurité peut être réduit en accord avec le Service D'Etat qualifié. Ce coefficient est destiné à couvrir l'incertitude due aux écarts entre les Résultats d'essais et le comportement d'un avion réel. Ces écarts sont dus notamment, à la Fabrication, à l'environnement, à la maintenance et aux charges rencontrées en utilisation.

La fiche 04/91/STPA/EG/DR du 8 février 1991 précise les conditions d'application des Résultats d'essais de fatigue ; elle prend en compte les aspects fatigue et tolérances aux Dommages.

Pour les structures non inspectables, le principe de justification repose sur la notion de vie Sûre ; un coefficient de dispersion important est appliqué sur la durée de vie démontrée en Essai pour définir une vie jugée sûre, pendant laquelle on est raisonnablement certain qu'un Dommage catastrophique ne se produira pas.

L'étude de la fatigue des matériaux fait l'objet, aujourd'hui encore, de nombreux travaux de recherche, pour les métaux essentiellement. Le problème physique de la fatigue est lié à la micro géométrie de la surface du matériau et à sa structure atomique même, et donc à sa composition chimique.

# CHAPITRE II



## II. Fatigue des structures :

### Introduction :

La question ardue à laquelle le constructeur d'aéronefs doit répondre est celle du compromis nécessaire entre les exigences économiques (durée de vie la plus élevée possible, masse structurale la plus basse possible), les exigences techniques (disponibilité et performances intrinsèques des matériaux, technologie, mise en œuvre, dessin, etc.) et les exigences réglementaires (tenue d'une structure aux charges extrêmes, maintien de la navigabilité...).

Les structures aéronautiques sont soumises, lorsqu'elles sont en service, à des sollicitations fluctuant au cours du temps. Citons pour exemples la pressurisation du fuselage, les manœuvres du pilote, les turbulences atmosphériques... L'expérience montre que la répétition de cycles d'effort modifie et dégrade les propriétés des matériaux et peut conduire, à terme, à la rupture de pièces. Ce phénomène est couramment appelé « **fatigue** » ou « **endommagement par fatigue** ».

La prise en compte du phénomène de fatigue doit se faire dès la conception des structures.

Mécanismes de base de la fatigue peuvent être décrits au travers de différents modèles d'estimation de durée de vie. Les modèles et concepts présentés sont pour certains relativement anciens mais ils sont encore aujourd'hui très utilisés par les ingénieurs notamment pour les phases de pré dimensionnement.

Le choix de bons matériaux revêt une importance toute particulière. On a cru pendant longtemps qu'il fallait, avant tout, rechercher des matériaux possédant une résistance à la déformation la plus élevée possible. Puis, progressivement, dans de nombreux cas, on a dû s'employer à rechercher des matériaux présentant un meilleur compromis entre leur résistance et leur ténacité ou, de façon plus générale, leur ductilité. Par ailleurs, sur dimensionner n'est pas non plus une bonne solution.

### II.2. Définition de la fatigue :

La **fatigue** est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau. En général, ce phénomène peut entraîner la formation des fissures et éventuellement la rupture probable de la structure.

Sous chargement d'amplitude constante, il est généralement admis que les matériaux métalliques possèdent une limite de fatigue, c'est-à-dire qu'il existe un niveau de contrainte en dessous duquel aucun endommagement macroscopique de fatigue n'apparaîtra au bout d'un nombre de cycles très grand (infini en théorie).

La capacité de résistance à la fatigue des pièces définit ce qu'on appelle la *limite d'endurance*. Dans la pratique, la fatigue des matériaux est abordée de deux façons différentes, à savoir : le relevé de courbes de Wöhler et la mesure de la vitesse de fissuration. La première de ces

méthodes est la plus utilisée, car elle permet de déterminer une limite d'endurance en dessous de laquelle le matériau est, en principe, à l'abri des ruptures de fatigue.

Néanmoins, les expériences industrielles montrent que dans des pièces en service, il peut exister des défauts, à partir desquels un défaut peut se propager et provoquer la ruine de la pièce, même si la contrainte appliquée est inférieure à la limite d'endurance dans en va en parler par la suite.

La fatigue est respectivement qualifiée en général «**d'oligocyclique**» ou «**de polycyclique**» représenté sur la courbe de Wöhler.

### II.3. Caractérisation de l'endurance des matériaux :

L'essai de fatigue le plus simple consiste à soumettre chaque éprouvette " lisse ou entaillée " ou pièces soudées à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude maximale et de fréquence constantes, et à noter le nombre de cycles  $N_r$  au bout duquel la rupture se produit. On reporte ce nombre  $N_r$ , en général sur une échelle logarithmique, en fonction de la contrainte maximale des cycles. A chaque éprouvette correspond un point du plan ( $\sigma$ ;  $N$ ) et, à partir d'un lot d'éprouvettes soumises à des contraintes maximales différentes, on obtient une courbe nommée courbe de Wöhler ou courbe S-N (Stress- Number of cycles). Cette courbe peut en général être décomposée en trois zones (fig. 1) :

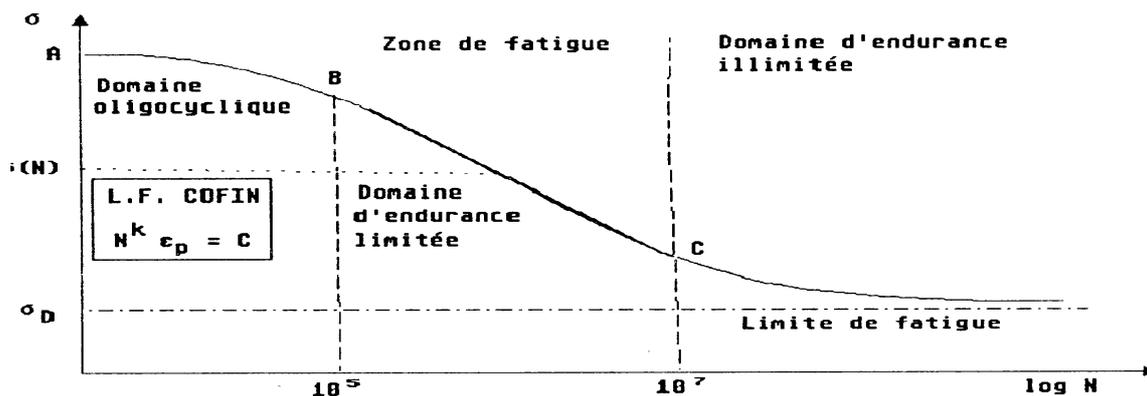
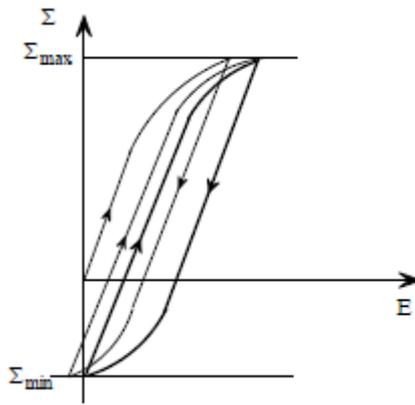


Figure II.1 : Principales zones de la courbe de Wöhler

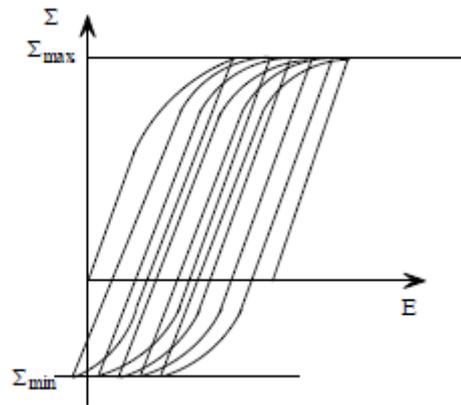
❖ **La zone AB, dite oligocyclique**, qui correspond aux contraintes les plus grandes, supérieures à la limite d'élasticité macroscopique du matériau. La rupture survient après un très petit nombre de cycles variant généralement de  $1/4$  de cycle à environ  $10^4$  à  $10^5$  cycles. Dans cette zone, on observe très rapidement une déformation plastique importante suivie d'une rupture de l'éprouvette.

L'éprouvette atteint généralement un état d'accommodation plastique ou un rochet élastoplastique :

- ▶ L'accommodation plastique se produit lorsque la réponse de l'éprouvette devient périodique, c'est à dire la déformation plastique devient périodique, un cycle d'hystérésis élastoplastique se produit.
- ▶ Le rochet se produit lorsque la réponse de l'éprouvette n'atteint jamais un état périodique, la déformation plastique croît sans cesse, ce qui va provoquer la ruine de la structure en un nombre de cycles relativement très faible.



**Figure II.2:** - Accommodation



**Figure II.3:**– Rochet

Dans cette zone, la rupture survient après un petit nombre d'alternances et est précédée d'une déformation plastique notable. Par suite de l'amplitude de la contrainte maximale, chaque cycle d'effort entraîne une déformation plastique d'ensemble accompagnée le plus souvent soit d'un durcissement notable, soit d'un adoucissement du métal. La déformation plastique  $E^p$  peut être souvent reliée au nombre de cycles à la rupture par une relation simple de la forme (loi de Manson-Coffin) :

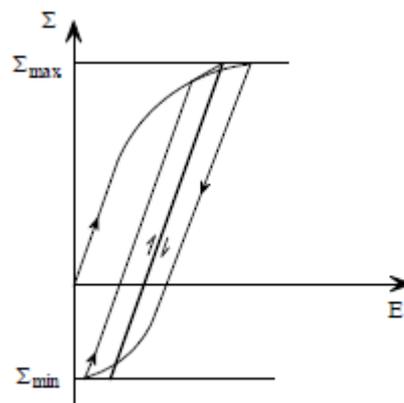
$$N^k E^p = C$$

Où l'exposant  $k$  est voisin de 5 pour les métaux courants (aciers, alliages légers).

❖ **La zone BC, dite zone de fatigue ou d'endurance limitée**, où la rupture est atteinte après un nombre de cycles compris approximativement entre  $10^4$  et  $10^6$  à  $10^7$ . La rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble, mesurable. La réponse de l'éprouvette atteint dans ce cas un régime adapté élastique.

L'adaptation élastique est un état où la réponse de l'éprouvette devient purement élastique, il peut y avoir de la déformation plastique durant les premiers cycles, mais au bout d'un certain nombre de cycles, elle reste constante (Cette zone peut être considérée comme linéaire en échelle semi-logarithmique) ; l'état final cependant dépend de l'état initial de la structure.

\$



**Figure II.4 :** – Adaptation

C'est le domaine dans lequel travaillent la plupart des structures qui pour diverses raisons, doivent avoir des masses et des volumes impérativement réduits (cas des structures aéronautiques ou automobiles ou nucléaires). Il existe de très nombreuses relations mathématiques reliant  $S$  et  $N$  dans ce domaine.

❖ **La zone CD, dite zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité**, où  $D$  est un point pour les métaux ferreux qui est à «l'infini».

La courbe de Wöhler présente généralement une variation de pente plus ou moins marquée autour de  $10^6$  à  $10^7$  cycles supérieurs à la durée de vie envisagée pour la pièce suivie d'une zone (CD) où la courbe tend vers une limite asymptotique parallèle à l'axe des  $N$ . En delà de cette valeur limite de notée  $\Sigma_i$ .

$\sigma_D$ , il n'y a jamais rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué.

$\sigma_D$ , Est nommée *limite de fatigue ou limite d'endurance*. Cette limite peut ne pas exister ou être mal définie pour certains matériaux (aciers à haute résistance, métaux non ferreux). Les grandes durées de vie concernent le domaine de la fatigue polycyclique.

Les courbes de Wöhler et la notion de limite de fatigue et d'endurance sont établies pour un niveau de contrainte moyenne donnée. Il est donc construit plusieurs courbes.

### Représentation analytique de la courbe de Wöhler :

Plusieurs expressions analytiques ont été proposées pour représenter les courbes de Wöhler, dans les domaines d'endurance limitée ou illimitée lorsqu'elles sont connues pour un matériau ou une pièce donnée.

La courbe de Wöhler est en général tracée dans des axes semi-logarithmiques ( $\log N; \Sigma$ ) dans lesquels elle présente une partie approximativement linéaire (autour d'un point d'inflexion) variable suivant le matériau (BC) suivie d'une asymptote à la droite  $\Sigma = \sigma_D$ .

Parmi toutes les formules qui relient la contrainte alternée appliquée en essai  $\Sigma_a$  au nombre de cycles à rupture  $N_r$  et à la limite de fatigue  $\sigma_D$ , nous ne retiendrons que celles qui représentent le mieux les résultats d'essais de fatigue à savoir :

#### **Formule de Wöhler (1870)**

$$\Sigma_a = a - b \log N_r \quad \text{avec } 0 < a ; 0 < b$$

Cette relation ne décrit pas la totalité de la courbe puisque  $\Sigma_a$  ne tend pas vers une limite  $\sigma_D$  lorsque  $N \rightarrow \infty$ . Elle ne représente que la partie BC.

*Formule de Basquin (1910), Formule de Stromeyer (1914), Formule de Weibull (1949), Formule de Bastenaire*

## **II.4. Discussion sur la limite de fatigue :**

La courbe SN donne lieu à plusieurs règles de dimensionnement à la fatigue dont la justesse est contredite par les résultats obtenus en fatigue gigacyclique ( $10^9$  cycles).

La normalisation internationale présente la courbe SN comme étant hyperbolique pour les aciers et quasi-hyperbolique pour les autres alliages.

De cette hypothèse, il est admis que, au-delà de  $10^7$  cycles, la durée de vie en fatigue tend vers l'infini. Il est admis, de plus, que la valeur asymptotique de la contrainte cyclique correspondant à  $10^7$  cycles devient une limite de fatigue, cette dernière étant déterminée par une approche statistique fondée sur une répartition log-normale de la dispersion,

Seconde hypothèse peu crédible au regard des résultats de fatigue gigacyclique. Faute d'avoir pu exploiter correctement les très grandes durées de vie de l'ordre du milliard de cycles, des spéculations hasardeuses ont été utilisées à partir du calcul d'un écart type, sur une population de résultats trop restreinte.

« *There is no infinite fatigue life in metallic materials* » (Bathias, 1999).

Il a été montré que dans certains cas, la différence de la résistance à la fatigue peut décroître de 100 voire même de 200 MPa, entre  $10^6$  et  $10^9$  cycles à la rupture et que le concept de limite infinie de fatigue n'est donc pas correct. Sous ces conditions, une limite de fatigue définie grâce à une analyse statistique entre  $10^6$  et  $10^7$  cycles ne peut pas garantir une durée de vie à la fatigue infinie.

Compte tenu de l'allongement de la durée d'utilisation et de la sécurité des équipements tels que, les avions, les compresseurs, les turbines, les automobiles, les rails des voies de chemin de fer, qui sont soumis à des chargements cycliques ou à des vibrations, durant leur service, pouvant atteindre  $10^6$  cycles, il est très important de pouvoir déterminer une limite d'endurance sûre pour  $10^9$  cycles (Bathias, 1999).

### **II.4.1. Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue :**

L'examen attentif de toute rupture de pièces est une opération d'une grande importance dans le développement d'un produit. Pour l'observateur averti, de lui montrer les causes de rupture, donc envisager les remèdes à appliquer pour que cet état de fait soit supprimé :

#### **II.4.1.1. Faciès de fatigue à l'examen optique :**

Sur la section de la rupture, on observe à l'œil et à la loupe un nombre de caractéristiques :

- Présence de deux zones distinctes d'importance variable selon l'amplitude des contraintes et la nature du matériau :
- La rupture brutale avec faciès à grains ou à nerfs.
- La fissure de surface avec une surface lisse.
- L'examen permet de déterminer aussi la nature des sollicitations (tableau 1)

Type de sollicitation	Contrainte nom. élevée			Contrainte nom. Faible		
	Concentration de contrainte					
	Nulla	Faible	élevée	Nulla	Faible	élevée
Traction-traction Ou Traction-compression						
Flexion plane Ondulée						
Flexion plane Alternée						
Flexion rotative						
Torsion						

**Tableau1.1 :** Faciès de rupture en fatigue

#### II.4.1.2 Faciès de fatigue à l'examen microscopique :

Le microscope électronique à balayage (**MEB**) présente l'avantage de permettre un examen direct avec une gamme large et continue de grossissements et sous des orientations qui peuvent varier dans de larges limites, l'observation est complètement différente de celle observée optiquement :

- **Rupture Brutale (finale) :**

a- *Fragile*      b- *Ductile*

#### II.4.2 Facteurs de l'endurance des pièces :

On peut dire, pour simplifier, que l'endurance d'une pièce ou d'un élément de structure est la résultante de plusieurs phénomènes compétitifs :

- D'une part, l'endommagement progressif du métal par suite de l'existence des concentrations des contraintes, qui entraîne des déformations plastiques.

- D'autre part, l'adaptation, c'est à dire la modification du régime des contraintes internes par relaxation consécutive à la déformation plastique localisée.

- Les facteurs qui agissent sur la fatigue sont très nombreux et on peut les classer en catégories :

### **. Paramètres d'ordre métallurgique :**

On peut classer dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure cristallographique), à son élaboration et à sa mise en forme (inclusions, défauts...), ainsi qu'aux traitements thermiques (structure métallographique et caractéristiques mécaniques) subis par les pièces.

#### ***Taille des grains***

Les structures à grains fins présentent une meilleure tenue en fatigue que les structures à gros grains.

#### ***. Orientation du fibrage par rapport à la direction des efforts***

L'orientation générale des grains (fibrage) confère au matériau une anisotropie plus ou moins marquée. Les caractéristiques statiques et la tenue en fatigue seront meilleures dans le sens long du fibrage que dans les autres sens.

#### ***Traitement thermique***

Suivant que le traitement thermique provoque un adoucissement ou un durcissement du matériau, la tenue en fatigue sera diminuée ou augmentée. De plus, le traitement thermique peut modifier la taille des grains.

#### ***Santé métallurgique de l'alliage***

Les défauts métallurgiques (lacunes, défauts interstitiels, précipités, inclusions) peuvent être à l'origine de l'endommagement par fatigue. Par incompatibilité des déformations, ils provoquent des concentrations de contraintes locales. L'abatement de durée de vie dépendra de leurs quantités, taille, nature, répartition, orientation par rapport aux efforts.

### **. Paramètres d'ordre mécanique et géométrique**

#### ***Nature du chargement :***

L'influence de ces facteurs intervient par la dimension des pièces (effet d'échelle) et surtout par leurs formes (effet d'entaille et coefficient de concentration des contraintes) :

Le chargement peut être monotone ou variable (et même aléatoire, spectre). Dans le cas des chargements monotones les paramètres prépondérants sont :

- ▶ la forme du signal : un signal de type carré est plus pénalisant que celui de type sinusoïdal;
- ▶ le rapport  $R$  (rapport entre la valeur minimale et la valeur maximale du chargement) : à contrainte maximale constante, si  $R$  augmente, la durée de vie augmente;

Dans le cas des chargements variables, les paramètres prépondérants sont :

- ▶ la présence de surcharges : la répétition périodique d'une surcharge peut retarder la propagation de fissures;

► l'ordre d'apparition des cycles.

### ***Qualité de l'usinage***

Généralement, l'endommagement par fatigue apparaît en premier lieu à la surface des pièces. La prise en compte des deux aspects suivants améliore la tenue en fatigue :

► l'aspect micro géométrie de la surface : un mauvais usinage provoque en surface des microreliefs susceptibles d'augmenter localement le niveau de contrainte ; l'amorçage des fissures en surface est donc retardé lorsque la rugosité est faible ;

### **Environnement**

Un milieu agressif (températures élevées, milieux corrosifs...) aggrave le phénomène de fatigue. Il apparaît des phénomènes nouveaux comme le fluage ou la corrosion. Leur action est liée au temps d'exposition :

- ***Influence de la température*** : La limite d'élastique et la résistance à la traction diminuant lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance.

- ***Fatigue sous corrosion*** : On rencontre très fréquemment la fatigue-corrosion sur des pièces travaillant dans des conditions assez peu agressives en apparence, à titre d'exemple, les eaux saumâtres ou salées, les divers milieux acides.

### **Facteurs de sollicitation :**

. - ***Nature des efforts*** : Pour une même éprouvette, essayée sous une même amplitude de la contrainte périodique, à la même fréquence et à la même température, les gradients de contraintes à travers la section la plus chargée seront différents selon la nature des efforts appliqués. Pour des efforts axiaux, traction ou compression les contraintes sont uniformes dans la section, tandis qu'en flexion ou en torsion elle sont maximales en surface et nulles au centre, sur la fibre neutre.

les contraintes résiduelles peuvent aggraver dangereusement les valeurs des contraintes, inversement des précontraintes de compression permettent d'augmenter le taux de travail admissible.

#### **- Influence de la contrainte moyenne :**

Le tracé des courbes de Wöhler est en général effectué en soumettant des éprouvettes à des efforts sinusoïdaux (traction/compression, torsion...) à moyenne nulle. Lorsque les essais de fatigue sont réalisés à contrainte moyenne  $\sum_m$  non nulle et constante, l'expérience montre que la durée de vie de l'éprouvette est modifiée, en particulier quand cette contrainte moyenne est relativement grande par rapport à la contrainte alternée. Une contrainte de traction diminue de façon importante la durée de vie, une contrainte de compression (jusqu'à un certain niveau) l'augmente très faiblement

La limite d'endurance  $\sigma_D$  est aussi modifiée par la superposition d'une contrainte moyenne non nulle. Certains auteurs ont cherché à représenter l'ensemble de ces limites d'endurance sur différents diagrammes qui ont pris le nom de diagrammes d'endurance. Une présentation détaillée des diagrammes les plus utilisés peut être trouvée dans (Brand, 1992). Nous les rappellerons ici très succinctement.

### Diagramme de Haig :

Sur ce diagramme, l'amplitude de contrainte  $\Sigma_a$  est portée en fonction de la contrainte moyenne  $\Sigma_m$  à laquelle a été réalisé l'essai de fatigue (fig.7). Deux points particuliers sont à considérer :

► le point A qui représente la limite d'endurance  $\sigma_D$  en sollicitation purement alternée

► le point B qui représente le comportement limite du matériau pour une contrainte alternée nulle. Ce point correspond donc à la contrainte de rupture du matériau au cours d'un essai statique.

L'ensemble des limites d'endurance observées pour diverses valeurs de la contrainte moyenne se place alors sur la courbe AB ajustée en fonction des résultats d'essais.

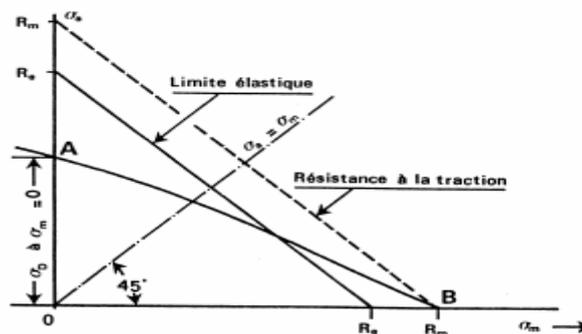


Figure II.5 : diagramme de Haig

Différentes représentations de la courbe AB sont possibles (fig.8)

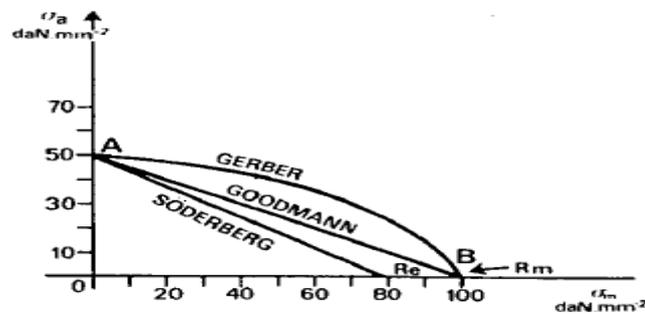


Figure II.6 : Diagramme de Haig. Représentation

de Gerbe, Goodman et Soderbergh,

$$\Sigma_a = \sigma_D \left( 1 - \frac{\Sigma_m}{\sigma_u} \right)$$

• La droite de GOODMAN :

$$\Sigma_a = \sigma_D \left( 1 - \left( \frac{\Sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 \right)$$

• La parabole de GERBER :

$$\Sigma_a = \sigma_D \left( 1 - \frac{\Sigma_m}{\sigma_y} \right)$$

• La droite de SÖDERBERG :

- La relation elliptique :

$$\Sigma_a = \sigma_D \sqrt{1 - \left(\frac{\Sigma_m}{\sigma_u}\right)^2}$$

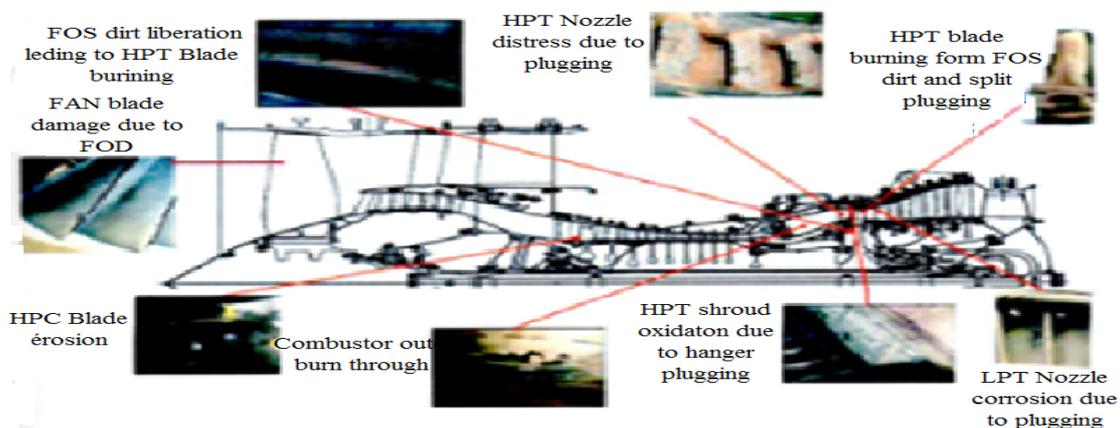
Ces diagrammes permettent de trouver l'amplitude de la contrainte purement alternée qui causera le dommage identique à un chargement cyclique à contrainte moyenne non nulle.

## II.5. Endommagement :

### Définition :

L'endommagement est l'apparition dans un matériau de dommages causés par l'usure ou une attaque physique ou chimique. Il conduit à une dégradation de ses capacités physiques pouvant conduire à la rupture. A mesure que les événements physiques se succèdent, la capacité d'un système physique à les supporter diminue et le dommage subi augmente. Le dommage, ou le niveau d'endommagement, est un nombre qui caractérise le degré d'avancement de la dégradation qui précède une défaillance. Historiquement cette notion a été introduite lors de l'étude de la fatigue des matériaux. Les défaillances sont dans ce cas des ruptures (traction, torsion, flexion, etc.). Une défaillance est un dysfonctionnement dont l'origine et la nature sont bien déterminés, comme par exemple la rupture d'une pièce ou l'usure d'une région particulière d'une surface. Une même pièce peut avoir plusieurs défaillances. Pour un système complexe, les défaillances sont celles de chacune de ses pièces ainsi que celles associées à l'assemblage des diverses parties. Nous verrons plus loin qu'on peut aussi définir le dommage causé par un événement : c'est la contribution de cet événement au dommage de la défaillance considérée. Les principes de Miner qui seront exposés permettent de mesurer et d'additionner les dommages. Un système complexe a en général de nombreuses défaillances envisageables. L'endommagement d'un système doit donc être caractérisé par plusieurs dommages, plusieurs nombres, un pour chaque défaillance considérée.

Le schéma ci-dessous montre la variété des endommagements que peuvent subir les différents composants d'un turboréacteur



**Figure II.7 :** Les endommagements d'un turboréacteur

Les composants objets de cette étude (ailettes compresseur) sont elles aussi soumises à des contraintes diverses engendrant des dommages comme :

- The DENT (une rupture qui peut être provoquée par choc « FOD : objet externe ou un débris d'un autre composants » ;
- De l'érosion causée par le sable ou toute autre particule contenue dans l'air.

### **II.5.1 Endommagement et rupture :**

La mesure des dommages par les physiciens a d'abord été développée à partir de l'étude de la fatigue des matériaux. Les propriétés des aciers étaient bien caractérisées. On savait mesurer en particulier la contrainte de rupture et le seuil d'élasticité.

#### **Endommagement et mécanique de la rupture :**

Lorsqu'une pièce est soumise à des efforts d'origines variées, il existe des limites, en contraintes ou en déformations, qu'elle ne doit pas dépasser, sous peine d'endommager le matériau et de provoquer sa rupture. Suivant que l'on s'intéresse à la dégradation du matériau d'un point de vue micromécanique ou macro-mécanique, deux approches peuvent être utilisées:

### **II.5.2 La mécanique de l'endommagement :**

Dans un solide, l'endommagement se déclenche lorsque, au niveau microscopique, il se produit une apparition de microvides et de microfissures. Ces altérations microscopiques ont une influence sur les caractéristiques thermomécaniques du matériau à l'échelle macroscopique.

Pour les sciences de l'ingénieur, une modélisation macroscopique devient donc nécessaire pour permettre de rendre compte de ces processus de détérioration. Bien entendu, il a été constaté qu'il était difficile de prendre en compte, dans un seul modèle, tous les mécanismes observés. De ce fait, un choix est donc nécessaire pour privilégier la description d'un phénomène au détriment d'un autre pour des besoins de conception.

Parmi les approches existantes, les modèles microscopiques tentent de décrire le comportement du matériau à partir d'observations à une échelle fine.

Un passage micro-macro s'avère alors nécessaire afin de transmettre l'influence de ces phénomènes sur le comportement global à l'échelle de la structure. Les approches macroscopiques sont quant à elles issues d'observations globales. Elles permettent de décrire l'influence des phénomènes locaux sur le comportement à l'échelle du volume représentatif du matériau. Cette façon d'aborder le problème n'est plus valable, et il faut alors utiliser la mécanique de la rupture.

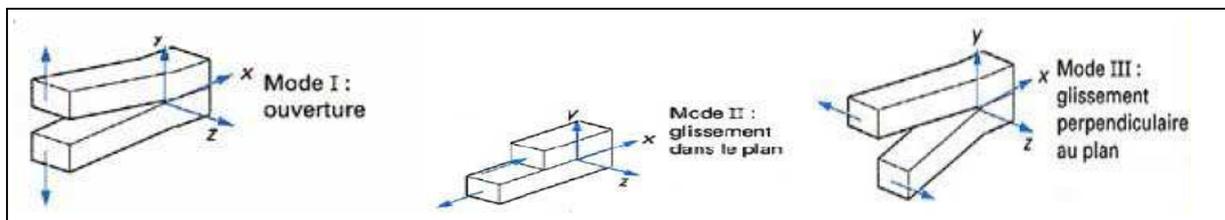
La **mécanique de la rupture** tend à définir une propriété du matériau qui peut se traduire par sa résistance à la rupture fragile (*fracture*). Car si les structures sont calculées pour que les contraintes nominales ne dépassent pas, en règle générale, la limite d'élasticité du matériau et soient donc par voie de conséquence à l'abri de la ruine par rupture de type ductile ; elles ne sont pas systématiquement à l'abri d'une ruine par rupture de type fragile que ce soit à partir d'une fissure préexistante à la mise en service ou créée en service par fatigue .

### II.5.2.1. Mode et Types de rupture :

#### Modes de ruptures :

A nos jours, la modélisation complète du comportement de la pièce pose encore des problèmes, surtout en présence de la fissuration. Plusieurs modèles locaux ou non, basés sur la mécanique de la rupture ou la mécanique d'endommagement ont été proposés.

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants :



**Figure II.8:** Modes de rupture

De manière générale, une fissure se propage dans un matériau sous une combinaison de contraintes dans les trois modes de fissure.

- Mode I : mode d'ouverture ;
- Mode II : mode de cisaillement plan ;
- Mode III : mode de cisaillement anti-plan.

\* Le mode I est le plus dangereux pour l'extension d'une fissure ; cependant, une fois amorcée et pour des sollicitations mixtes ou des géométries complexes, la fissure a tendance à bifurquer, et reste donc rarement rectiligne (2D) ou plane (3D).

#### Type de rupture :

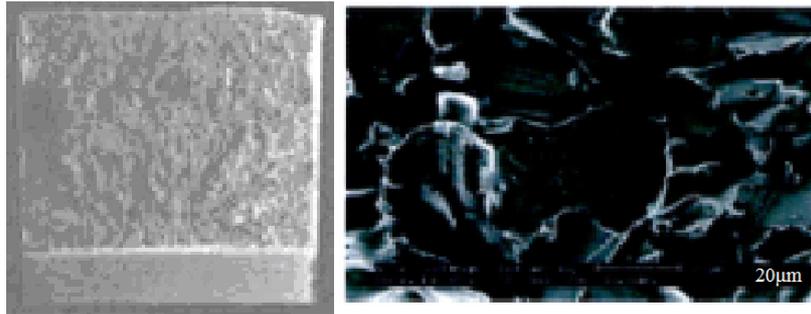
- Rupture par fissuration rapide : ductile, semi-fragile, fragile ;
- Rupture par fissuration progressive :
  - Sous sollicitation statique : corrosion sous contrainte, fluage, ... ;
  - Sous sollicitation cyclique : fatigue mécanique, fatigue thermique ;
  - Sous sollicitation complexes : fatigue-corrosion, fatigue-fluage, ....

### II.5.2.1.1. Rupture par fissuration rapide (Types élémentaires de rupture) :

#### II.5.2.1.a. Rupture fragile :

Ce type de rupture se manifeste au niveau des liaisons intra-atomiques sans déformation plastique macroscopique. Il intervient lorsque l'énergie de déformation locale due aux sollicitations extérieures devient égale à l'énergie nécessaire de décohésion atomique.

Dans ce type de rupture, la propagation très rapide de fissure, la consommation d'énergie très faible, et les défauts et accidents géométriques jouent un rôle essentiel dans l'amorçage de la rupture.



**Figure II.9** :Faciès de rupture fragile.

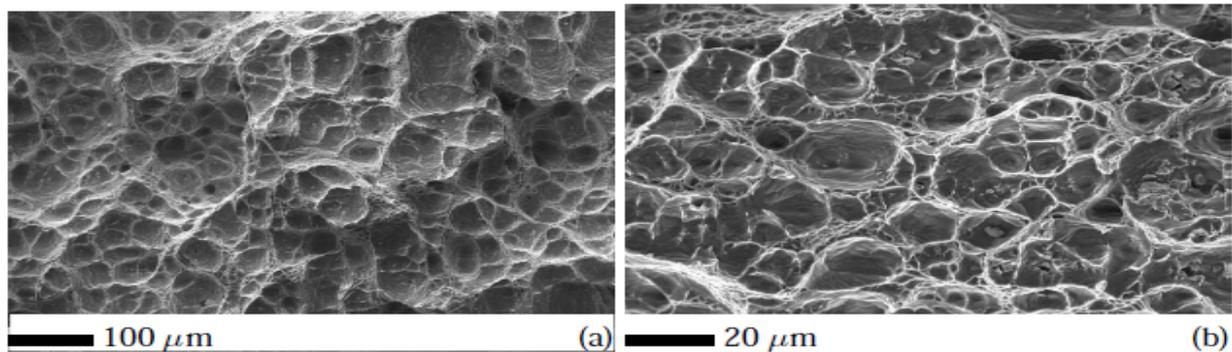
#### II.5.2.1.b. Rupture ductile :

Ce type de rupture, se manifeste essentiellement par la présence des inclusions ou précipités. La rupture résulte de la naissance des cavités, l'allongement de ces cavités dans le sens de déformation et coalescence de celles-ci par striction ou cisaillement qui conduisent à la rupture finale.

Les défauts responsables de l'amorçage dans la rupture ductile sont :

- Eléments d'addition dans les alliages,
- Inclusions,
- Précipités (par traitement thermique),
- Les joints de grain (points triples).

A l'échelle macroscopique, on voit des microreliefs appelés cupules qui sont définis comme des cavités s'allongeant dans le sens de la déformation puis se réunissant par striction ou cisaillement pour produire la rupture. Un autre aspect pourrait être observé qui ressemble à celui du "bois pourri".



**Figure II.10 :** Aspect rupture ductile  
 (a) acier X100, (b) alliage d'aluminium 2024.

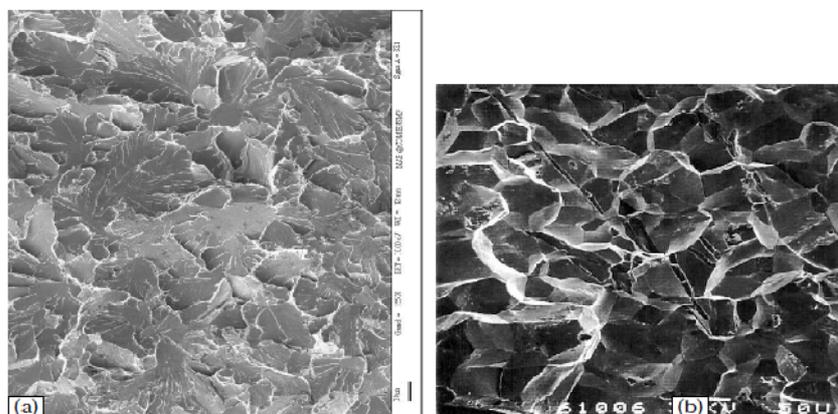
### II.5.2.1 Rupture par fissuration progressive :

#### II.5.2.1.2.(a). Rupture en fluage :

La rupture en fluage est observée dans de nombreux matériaux dès que la température est assez élevée. Lorsqu'on applique pendant un certain temps une contrainte d'amplitude constante à un métal qui était porté à une température élevée.

La contrainte met les dislocations en mouvement, lorsqu'elles se multiplient et interagissent les une avec les autres, leurs déplacements se trouvent de plus en plus limités, jusqu'à la cessation de la déformation plastique, c'est le phénomène de consolidation. La température par contre, a pour effet d'augmenter la mobilité des dislocations, et favorise en outre les mécanismes de restauration, par l'annihilation de dislocation de signe opposés, c'est le phénomène d'adoucissement.

La (**Figure II.11**) illustre les modes d'endommagement dans un acier austénitique et dans une céramique réfractaire.



**Figure II.11:** Exemples de rupture fragile dans les métaux  
 (a) rupture en clivage (intra-granulaire), (b) rupture inter-granulaire.

### II.5.2.1.2. (b).Rupture en fatigue :

Le faciès macroscopique est généralement lisse. L'observation du faciès microscopique peut révéler des *stries de fatigue* (figure 19.a, 20.b). Chaque strie correspond à l'avancée de la fissure durant un cycle. L'observation des stries permet donc de remonter à la vitesse de fissuration macroscopique.

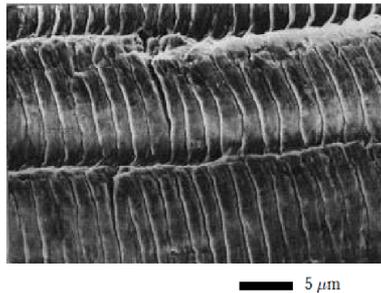


Figure II.1 2-a : Stries de fatigue.

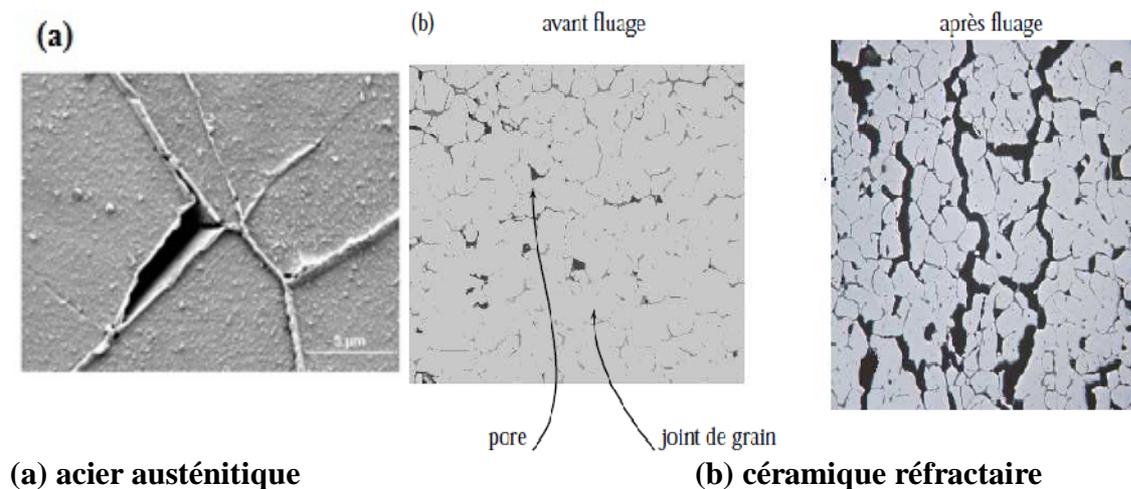


Figure II.1 3-b : Endommagement en fluage

### II.6.Types d'usure :

On distingue plusieurs types d'usure, auxquels la tribologie s'intéresse :

- usure par adhésion (arrachement de matériaux adhérents l'un à l'autre) ;
- usure par abrasion ou érosion, où des particules extérieures, par frottements ou chocs, ôtent de la matière en surface ;
- usure par fatigue, due à l'action répétée de contraintes à la surface, typiquement des pressions ou chocs ;

- usure par tribocorrosion.

### II.6.1. Les différentes formes d'usure :

La vie d'un mécanisme comporte normalement trois phases : rodage, vie utile, vieillesse. L'usure est rapide en début de rodage et pendant la vieillesse.

- L'**abrasion** est due à une des pièces qui lime l'autre ou à un troisième corps plus dur que les deux pièces. Ici plus encore qu'ailleurs il faut éliminer les débris d'usure.
- L'**adhésion** vient de la solubilité mutuelle des matériaux des pièces. La rupture adhésive des jonctions donne lieu à une usure douce, la rupture cohésive à une usure sévère pouvant aboutir au grippage.
- La **corrosion** est due à des phénomènes chimiques et non au frottement, mais elle interagit avec ce dernier.
- La **corrosion de contact** ronge les surfaces soumises à de petits déplacements tangentiels, à une vitesse exponentielle si le milieu est oxydant.
- Les **sur contraintes** sont dues au passage d'un frotteur trop chargé ou à des efforts de frottement trop élevés. On peut trouver des fissures de tension derrière le frotteur, un fluage par compression devant ce dernier ou des déformations profondes par cisaillement.
- La **fatigue** provoque des piqûres superficielles ou un écaillage par endommagement progressif en profondeur.
- L'**érosion** est une perte de matière par des impacts de particules en suspension dans un fluide.
- L'**érosion par cavitation** correspond à un arrachement de matière engendré par l'effet cumulatif des ondes de choc provoquées par l'implosion brutale de bulles de vapeur sur une paroi ou à son voisinage immédiat. Elle ne se produit que dans les zones où se trouve un liquide en dépression (col Venturi, sur vitesse locale due au contournement d'un aubage, ...).
- La **fatigue thermique** est due à des échauffements et refroidissements brutaux et répétés.

# CHAPITRE III



### III- USURE PAR EROSION

#### Définition :

Le terme érosion est généralement utilisé pour décrire la dégradation engendrée par l'écoulement ou l'impact d'un fluide à la surface d'un matériau. Selon la nature du fluide et le type d'écoulement, il est possible de distinguer plusieurs modes d'usure comme : l'érosion par particules solides, l'érosion par la circulation d'un fluide, l'érosion par goutte d'eau, l'érosion abrasion et l'érosion-cavitation

#### III.1- Sollicitation environnementales :

##### Les mécanismes de l'érosion par impact de particules solides :

Dans l'étude bibliographique développée dans le premier chapitre on a abordé les travaux les plus intéressants menés sur ce sujet depuis les années 1950, et les modèles plus ou moins élaborés qui ont été établis. Mais si une meilleure connaissance des mécanismes d'enlèvement de matière a conduit à quelques solutions, la grande diversité des approches et des remèdes proposés montre que le problème reste très ouvert. En outre, cette étude a permis d'isoler et de définir sur un certain nombre de paramètres prépondérants, ainsi que leur domaine d'existence.

Des fissures de fatigue peuvent également s'initier **sous la surface** du matériau en raison de l'impact répété de particules. Ces **fissures** entraîneront un détachement de matière **sous la forme** de flocons. Enfin\_ la formation de minces plaquettes est favorisée par l'impact répété de particules arrondies frappant **la** surface avec un angle d'incidence élevé.

#### III.2- théorie de l'érosion :

C'est la dégradation par perte de poids d'un matériau sous l'impact de particules abrasives véhiculées par un fluide. A moins que le fluide ne soit inerte vis-à-vis du matériau, on devra parler d'érosion-corrosion.

Le phénomène peut avoir lieu à température ambiante : on connaît, par exemple, l'action du sable entraîné par le vent sur les rochers. On a constaté que la coiffe en plastique de RADARS embarqués sur les avions de chasse se faisait éroder par les gouttelettes de brouillard ou de pluie. On rencontre des problèmes d'érosion à l'intérieur des conduits de gaz par des particules de métal qui se détachent de la paroi au moment de la mise en forme des canalisations.

A partir du moment où l'on se trouve à haute température (au-delà de 600°C) la corrosion et l'oxydation, négligeables à l'ambiante, peuvent jouer un grand rôle, dont on connaît encore mal l'importance. Quelques exemples permettront de fixer les idées. Dans un réacteur d'avion, les aubes de turbines sont corrodées par les gaz de combustion du carburant et dans le même temps des particules de sable sont aspirées par le compresseur et viennent éroder les surfaces. Dans les installations de gazéification de charbon, des gaz chauds (600°C) et corrosifs (SH<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>...) circulent à des vitesses de l'ordre de 5m/sec et sont chargés de particules abrasives.

On assiste aux mêmes dégradations dans les installations de traitement d'ordures ménagères où la combustion de matières plastiques dégage des vapeurs chargées en chlore et en fluor.

Cette liste n'est pas limitative, elle permet cependant de mesurer l'importance de ce mode de dégradation.

### III.3- Mécanismes de l'érosion par des particules solides :

#### Les différentes approches de l'érosion par impact de particules :

Malgré des approches différentes, la plupart des auteurs ayant travaillé sur ce sujet s'accordent pour distinguer deux comportements principaux, correspondant à deux types de matériaux, à savoir un comportement ductile typique de la plupart des cibles métalliques et un comportement fragile typique des verres, céramiques et matériaux durs.

Pour faciliter la compréhension du phénomène d'érosion, les différents mécanismes d'usure seront d'abord décrits en fonction du comportement (ductile ou fragile) du matériau utilisé.

Nous nous attacherons donc, dans ce chapitre à rappeler les différentes approches, à caractériser ces deux comportements fragiles et ductiles ainsi que les mécanismes d'enlèvement de matière qui leur sont attachés, et à signaler les différents paramètres qui ont été mis en évidence dans de nombreux travaux.

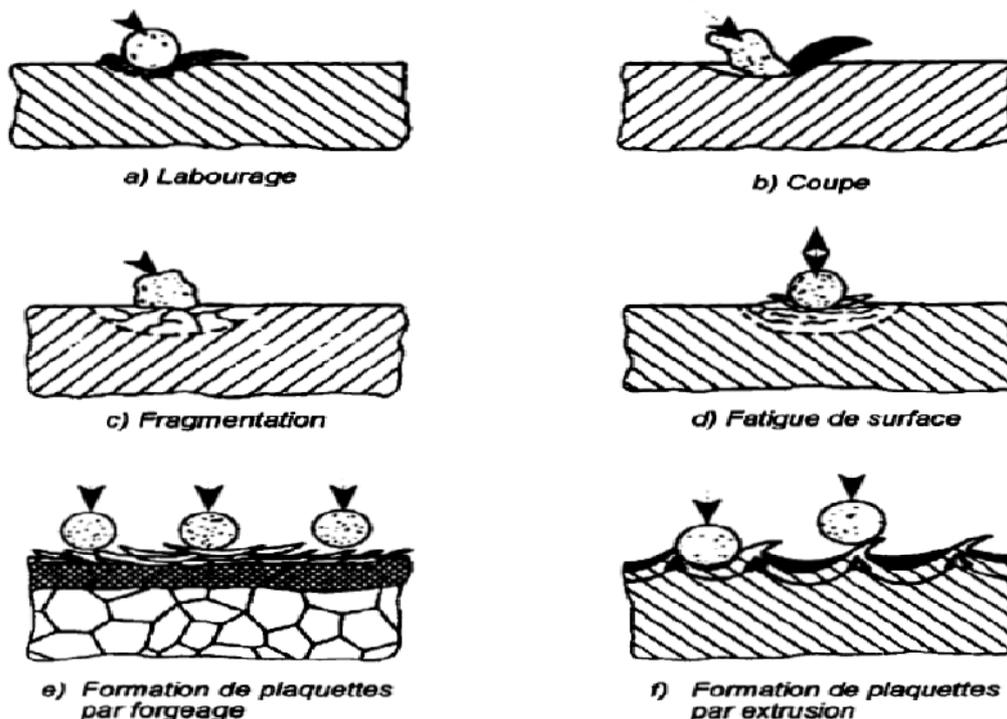


Figure III.1 : Mécanisme de l'usure par érosion

#### a) Comportement ductile :

Une déformation plastique permanente, accompagnée généralement d'un durcissement du matériau, suit la déformation élastique (alliages métalliques).

Lorsqu'une seule particule dure frappe un matériau ductile, elle pénètre la surface de façon à Déformer ou déchirer le matériau. Ces deux phénomènes sont à l'origine des mécanismes de labourage et de coupe.

Selon la forme, l'orientation, la vitesse et surtout l'angle d'impact des particules, la surface du matériau aura différents comportements. Dans certains cas, elle pourra s'accommoder à l'impact par une déformation élastique de la matière. Par contre, si la déformation est trop importante, un déplacement permanent de la matière s'effectue autour du point d'impact.

Pour un angle d'incidence de 90°, la déformation se traduit par la création d'un Ourlet autour du point d'impact sans entraîner une perte de matière.

Cependant, pour un angle d'incidence plus faible, une Lèvre se forme à l'extrémité du cratère formé par la particule (figure 1a). Avec des particules arrondies, ces lèvres ne se détachent habituellement pas de la surface sous l'effet d'un seul impact. La perte de matière est plutôt le résultat d'un labourage par plusieurs particules (figure 1.f). Les débris se détachent lors sous la forme de plaquettes.

Par contre, pour des particules plus angulaires et possédantes une meilleure emprise sur la surface, la coupe du matériau devient plus importante.

Pour les matériaux ductiles, un maximum d'érosion a lieu pour un angle d'impact d'environ 20° alors qu'à incidence normale. L'érosion est beaucoup plus faible. Ce comportement est connu depuis longtemps et différentes théories ont été élaborées pour expliquer ce phénomène.

Parmi les premières théories quantitatives du processus d'érosion, il y a celle de **Finnie**, développée en 1958. Dans sa théorie, les particules agissent comme un outil de coupe et, selon leur angle d'attaque avec la surface, deux mécanismes sont possibles :

- Pour un angle d'attaque inférieur à l'angle critique  $\alpha_0$ , les particules ne font qu'entailler légèrement la surface.
- Pour un angle supérieur à  $\alpha_0$  les particules s'enfoncent et s'arrêtent à la surface du matériau, engendrant aucune perte de matière.

Cette théorie, qui *est* toujours utiliser, prévoit bien un maximum d'érosion pour un angle d'incidence de 20° mais sous-estime l'érosion à incidence normale.

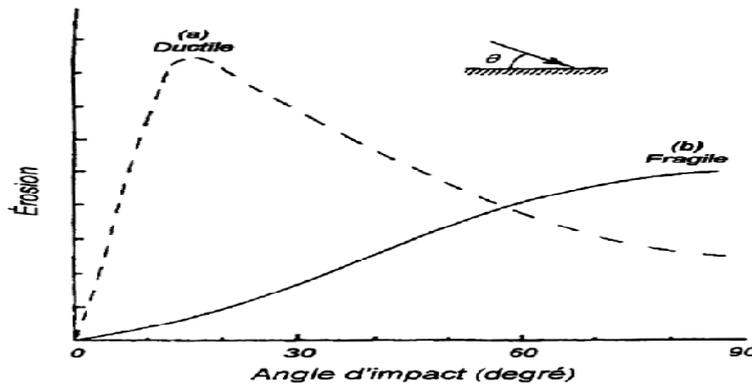
**Hutchings** propose également une expression simple basée sur la force de contact s'exerçant entre une particule et la surface. L'équation qu'il propose est très similaire à celle d'Archard pour décrire l'usure abrasive.

La perte de matière est proportionnelle à la densité du matériau érodé ( $\rho$ ) ainsi que la masse ( $m$ ) et au carré de la vitesse ( $U$ ) des particules.

Tout comme pour l'abrasion, la perte de masse est inversement proportionnelle à la dureté ( $H$ ) du matériau érodé. Le coefficient d'usure érosive ( $K_{er}$ ) correspond dors à la fraction de matière enlevée lors de l'impact.

$$M_{er} = K_{er} \rho \frac{m U^2}{2H}$$

Cette équation met en évidence les principaux facteurs influençant l'usure érosive des matériaux ductiles, mais néglige certains aspect comme l'effet de l'angle d'impact sur le taux d'usure. Une fonction spéciale  $f(\Theta)$  peut s'ajouter à l'expression précédente afin de prévoir plus efficacement l'érosion sous un angle d'incidence inférieur à 90°.



**Figure III.2:** Courbes de dépendance typiques de l'érosion selon l'angle d'impact des particules (a) Matériau ductile. (b) Matériau fragile

#### **b) Comportement fragile :**

Le matériau ne présentant pas de domaine plastique, la rupture se produit alors que les déformations sont élastiques (le verre, la fonte, le béton, les céramiques, les polymères thermodurcissables chargés).

Face à l'érosion, les matériaux fragiles ont un comportement bien différent des matériaux ductiles. D'abord, le mécanisme d'enlèvement de la matière ne sont pas les mêmes. En principe, les matériaux fragiles ne se déforment pas plastiquement, ils se fissurent et se fragmentent sous l'effet des contraintes de tension élevées (figure 1.d) L'intensité de ces contraintes est en fonction de la composante verticale de la vitesse de la particule à l'impact ( $U \sin(\alpha)$ ). Cela signifie que les contraintes de tension et, par le fait même, l'érosion du matériau, augmentent avec l'angle d'incidence des particules.

### **III.4- Facteurs affectant l'érosion d'un matériau :**

#### **III.4.1. Propriété du matériau érodé :**

Comme il a été mentionné précédemment, plusieurs propriétés du matériau cible peuvent affecter d'une façon ou d'une autre la résistance à l'érosion. La dureté, la ténacité, la capacité de durcissement par travail à froid et la capacité de déformation sont toutes des propriétés importantes, mais dont l'effet sur l'érosion est parfois mal connu. Néanmoins, de nombreuses études ont permis d'évaluer l'impact général de ces propriétés sur la résistance à l'érosion d'un matériau.

Selon les travaux de Finnie. La résistance à l'érosion des métaux purs augmente en relation linéaire avec la dureté du métal. Cependant, cet effet positif de la dureté devient moins important pour un angle d'impact élevé. À incidence normale, une augmentation de dureté peut même diminuer la résistance à l'érosion d'un matériau.

Une corrélation entre la dureté et la résistance à l'érosion des alliages et des céramiques est encore plus difficile à déterminer. L'usure érosive serait plutôt inversement proportionnelle à la dureté dynamique du matériau, qui correspond à la pression de contact moyenne lors d'un impact à grande vitesse. Cette dureté n'est pas égale à celle que l'on mesure avec un appareil conventionnel de dureté (statique), car elle implique un taux de déformation élevé et une augmentation locale de la température causée par la déformation plastique.

Pour résister à ce taux de déformation élevé, le matériau doit avoir une bonne capacité de déformation. Dans ce sens, Foley et Levy. Ont montré qu'il était possible d'améliorer la résistance à l'érosion des aciers en augmentant leur ductilité. Cette dernière propriété, combinée avec la capacité de durcissement du matériau, détermine le nombre d'impacts requis pour engendrer la formation d'un débris. En conséquence, un matériau de faible dureté, qui possède une grande capacité de déformation et de durcissement, peut présenter une résistance à l'érosion supérieure à celle d'un matériau plus dur.

Il n'existe pas de règle permettant de connaître quelle propriété doit être privilégiée pour bénéficier d'une bonne résistance à l'érosion Par contre, il est possible d'identifier la nature du mécanisme d'érosion dominant en calculant la valeur du coefficient suivant :

$$\frac{1}{r} \left( \frac{K_c}{H} \right)^2$$

Ce coefficient est fonction du rayon des particules érosives (r) ainsi que de la fragilité du matériau cible (rapport H/K<sub>c</sub>). Pour une valeur faible, la réponse du matériau est dominée par la fragmentation d'ors que pour une valeur élevée, une déformation plastique importante est à prévoir.

#### III.4.2. Les conditions d'écoulement des particules :

La vitesse des particules lors de l'impact constitue l'un des paramètres les plus influents sur le taux d'érosion d'un matériau. Les métaux et les céramiques n'ont pas la même réponse face à une variation de vitesse, mais une loi empirique peut être utilisée pour représenter l'effet de cette variable

$$\text{Taux d'usure} = kU^R$$

Dans cette équation, k est une constante et n, l'exposant affecté à la vitesse. Ce dernier dépend du matériau cible et des conditions d'érosion. Pour les métaux, la valeur de n se situe habituellement entre 2,0 et 2,5 alors que pour les céramiques, elle est de 2,5 à 3,0. La figure illustre cette relation entre le taux d'érosion et la vitesse des particules pour des matériaux Niles et ductiles.

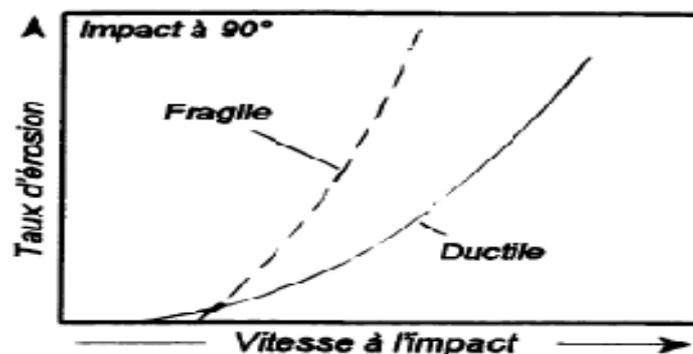


Figure III.3: Effet de la vitesse d'impact des particules

sur le taux d'érosion des matériaux fragile et ductile

### **III.4.3. Paramètres du processus d'érosion des surfaces du matériau :**

Plusieurs facteurs différencient les types de mécanisme d'érosion et contrôlent le moyen d'érosion. Ils peuvent être regroupés en trois catégories distincts et associés aux :

- Conditions d'exploitation : le temps d'exposition, la vitesse, l'accélération, l'angle d'impact, le moyen du débit ou la concentration, le flux et la température.
- Particules érodantes (sable ou gouttelettes de liquides) : la taille, la forme, la dureté et la matière.
- Matériaux cibles : Composition chimique, propriétés mécaniques, dureté et surface morphologique.

### **III.4.4. Facteurs associés aux conditions d'exploitation :**

La vitesse, l'angle d'impact et la concentration des particules sont les paramètres les plus importants parmi tous les autres facteurs, et applicables à tous les types de composants où l'érosion se produit. Ces termes apparaissent dans la plupart des modèles d'érosion.

#### **a) Temps d'exposition :**

Le taux d'érosion augmente en fonction du temps d'exposition, jusqu'à une valeur constante.

#### **b) Angle d'impact :**

L'angle d'impact est défini comme l'angle entre la surface érodée et la trajectoire des particules, juste avant l'impact :

- Lorsque les particules sont en mouvement parallèle à la surface, l'angle d'impact est presque  $0^\circ$  et seulement une légère érosion peut avoir lieu ;
- Lorsque les particules se déplacent selon la normale à la surface, l'angle d'impact est de  $90^\circ$ .

Pour les matériaux fragiles et ductiles, leur comportement d'érosion est différent selon l'angle d'impact. Les matériaux ductiles ont une érosion sévère à faible angle d'impact.

Leur Érosion maximale est observée entre  $10^\circ$  et  $30^\circ$ . La faible érosion est observée autour de la normale d'impact.

Le comportement à l'érosion d'un matériau ductile est similaire au frottement dans le cas de très petits angles d'impact. Pour les matériaux fragiles. Plus les matériaux fragiles, plus l'angle d'impact augmente, plus l'érosion est grande et sa valeur maximale se trouve à  $90^\circ$ .

L'érosion peut être désignée en deux modes : mode ductile, dans les cas où l'érosion maximale est à faible angle d'impact. A l'inverse le mode fragile, l'érosion est maximale  $90^\circ$ , indépendamment du type de matériau ductile ou fragile.

La (figure 10) illustre la variation de l'érosion des matériaux fragiles et ductiles pour différents angles d'impact. Elle donne l'érosion maximale des matériaux ductiles et fragiles.

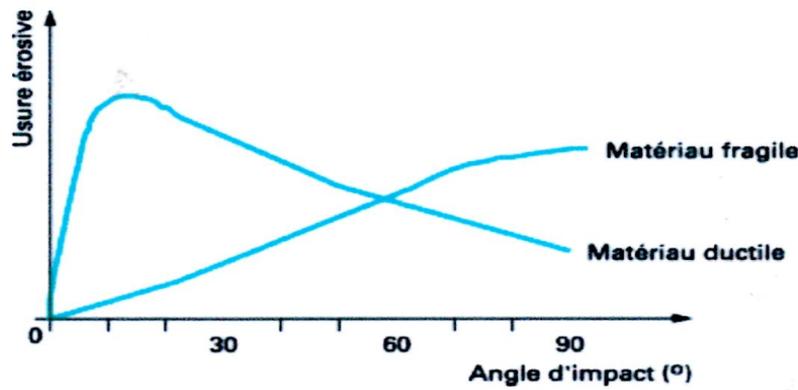


Figure III.4: Érosion en fonction de l'angle d'incidence des particules.

### III.4.5. Vitesse des particules érodantes :

Dans la pratique, l'endommagement du matériau dû à la déformation plastique et à la coupe se produit simultanément. Ces mécanismes d'endommagement dépendent ensemble de la vitesse, appelée "seuil de la vitesse" ou vitesse critique, les particules ne peuvent dériver dans la surface à cause des frottements, et l'action de découpe n'a pas lieu. Plus la vitesse augmente par rapport au seuil critique, plus les deux actions, déformation plastique et coupe, augmentent, ce qui amplifie considérablement l'érosion.

Les modes d'érosion varient en fonction de la vitesse des particules (figure 5). A basse vitesse, les particules n'ont pas assez d'énergie pour éroder le matériau par l'action de coupe, mais les effets de la déformation élastique ou de la fatigue peuvent être observés.

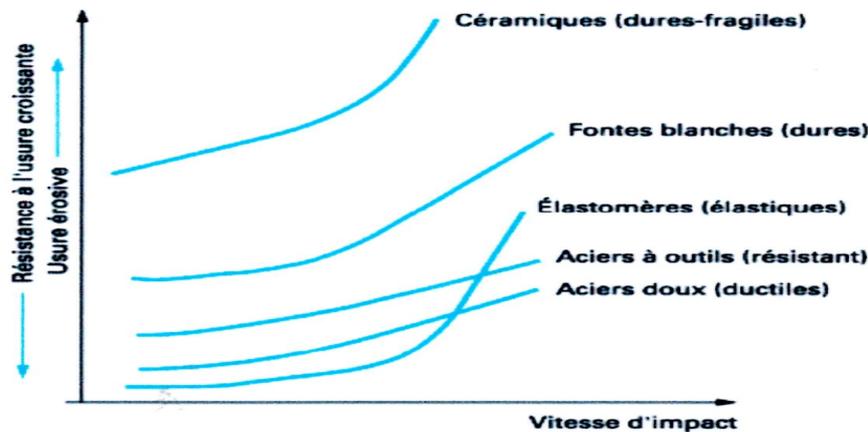


Figure III.5: Effet de la vitesse d'impact sur l'usure érosive.

### III.4.6. Température :

L'érosion est influencée par la variation de la température. A température élevée, la matière sera assouplie et l'érosion augmente. A 600°C, l'érosion d'un acier inoxydable ne varie pas d'une manière significative.

Il s'agit d'une température de ramollissement. Au-delà de cette température, l'érosion augmente rapidement.

### III.4.7. Influence du milieu (fluide) :

Les particules érosives sont transmises par les fluides tels que l'air, le gaz, l'huile hydraulique et pétrole. Les caractéristiques du fluide ont des effets importants sur l'érosion. Plusieurs facteurs affectent la configuration finale de l'érosion :

- Propriétés du fluide : densité, viscosité.
- Nature de l'écoulement : laminaire ou perturbé.
- Propriétés microscopiques : corrosivité, lubrification, refroidissement.

Le fluide visqueux impose une force sur les particules et influence l'érosion, en modifiant l'angle d'impact. La trajectoire des particules et l'effet de la viscosité sur l'angle d'impact est montré dans la (figure 6.a). L'effet du milieu érosif est évalué en termes « d'efficacité de collision », rapport entre les particules réelles qui frappent la surface, en absence du milieu érosif et nombre théorique des particules est affectée par le débit du fluide.

L'analyse globale de trajectoire des particules permet de déterminer le moyen exact de l'érosion et les positions des dégâts.

Lorsque la direction d'écoulement est parallèle à la surface, mais que l'écoulement est perturbé, l'érosion de la matière est plus élevée comparativement au flux laminaire.

Dans l'écoulement perturbé, la plupart des particules ont la probabilité d'entrer en contact avec la surface et de frapper plusieurs fois cette surface. En écoulement laminaire, les particules essayeront de suivre le courant et peuvent éviter la surface, et donc réduire l'érosion.

Lorsque l'écoulement du fluide est orienté perpendiculairement à la surface, l'érosion, pour les flux laminaires, sera plus élevée qu'en écoulement perturbé (figure 6.b).

Les petites additions d'un lubrifiant dans un milieu liquide assurent le refroidissement au cours d'impact des particules, tout en limitant le changement dans les propriétés du matériau. Par conséquent, l'érosion est significativement réduite.

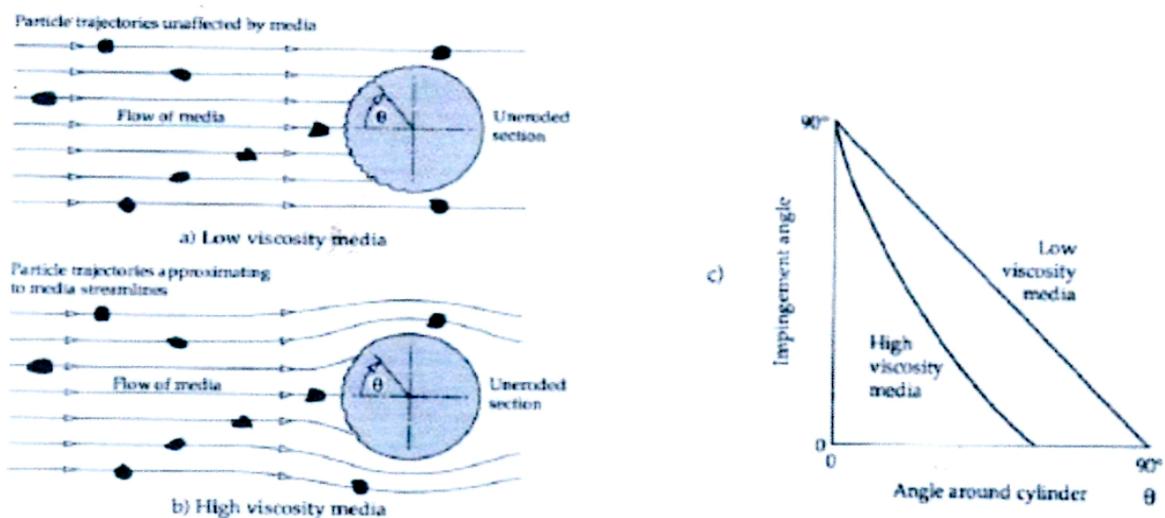
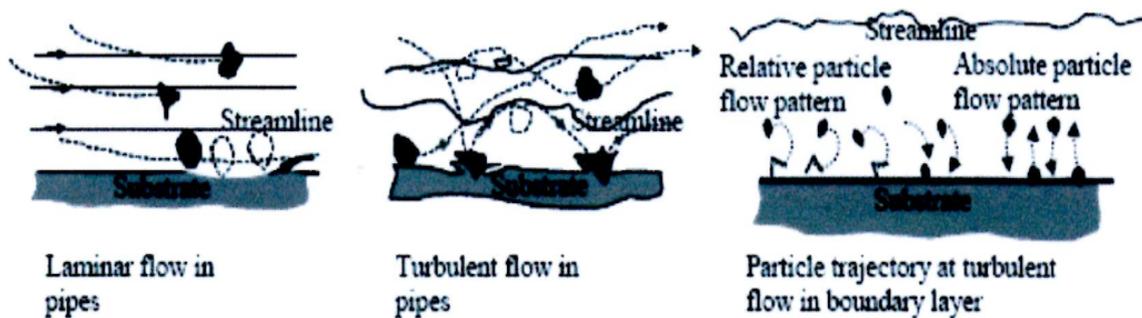


Figure III.6.a : Effet du fluide sur l'angle d'impact.



**Figure III.6.b :** Effet des conditions du flux sur l'érosion.

### III.5. Facteurs associés à particules érosives :

Le moyen et le mécanisme d'érosion peuvent se modifier en fonction des caractéristiques des particules. Les caractéristiques peuvent rester identiques à celles d'origine, ou changer en fonction des conditions du fonctionnement. La connaissance des caractéristiques des particules est très importante pour estimer, réduire et prévenir l'érosion. Certaines des caractéristiques et leurs effets sont discutés ici.

#### III.5.1. Taille des particules

La taille des particules peut être caractérisée essentiellement par les principaux paramètres : la masse et la longueur. Pour une vitesse donnée, l'énergie cinétique des particules est directement proportionnelle à la masse. La masse des particules sphériques est proportionnelle au (Diamètre).

L'érosion dépend de la dureté, le cas des petites particules. Pour les grosses particules, elle dépend de la ténacité du matériau.

#### III.5.2. Forme des particules

La forme des particules est aussi l'un des facteurs importants qu'est l'érosion, mais les études sont limitées à la relation entre l'érosion et la forme des particules. A côté de cette érosion, la forme des particules érosives est intéressante en raison de son influence sur la force de cisaillement, sur la densité, sur la perméabilité, sur la compressibilité et sur la capacité de transport des sédiments.

Généralement, la forme des particules est décrite qualitativement comme un cercle, un triangle ou un demi-cercle basée sur l'observation visuelle. Les formes de base trouvées dans la nature sont aiguës et complexes, et en peuvent être décrites en termes mathématiques simples (figure 7). La forme des particules est un bon indicateur du processus d'érosion, exemple les formes irrégulières, avec un profil aigu, augmentent l'érosion, tandis que les particules rondes avec bords émoussés le retardent.

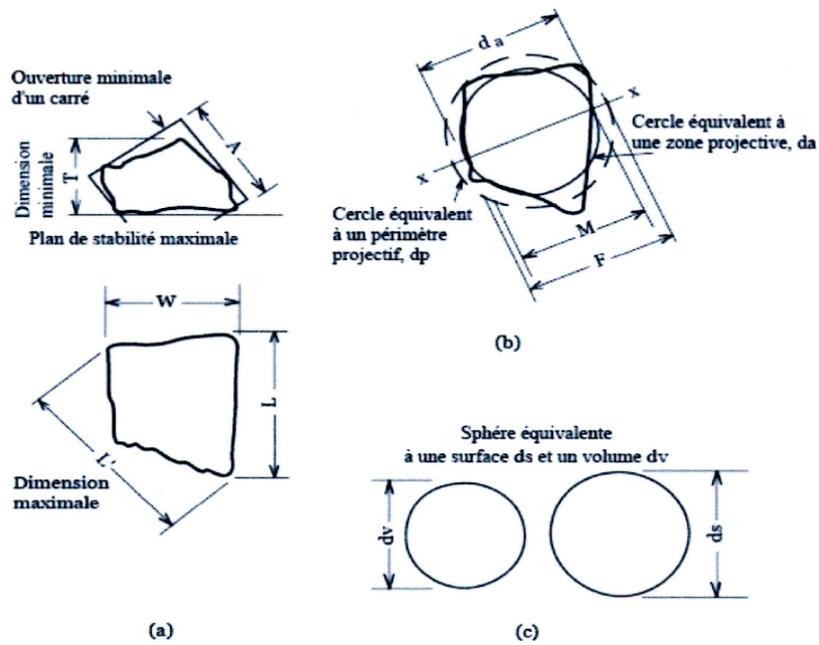


Figure III.7: Définition de la forme des particules.

### III.5.3. Dureté

La dureté est une propriété physique d'un matériau. A titre comparatif, on peut citer quelques matériaux possédant des duretés différentes.

Les matériaux tels que les métaux, les alliages, les céramiques et les polymères, utilisés dans différentes applications, sont exposés à l'environnement érosif. Les caractéristiques de ces matériaux ont une forte influence sur l'érosion. La composition chimique, l'élasticité, la dureté la morphologie de surface sont quelques-uns des paramètres principaux du matériau cible qui affectent l'érosion.

### 4.5.4. Influence des défauts sur le processus d'érosion

Les défauts du matériau tels les trous et les fissures et leur espacement moyen causent un changement des modes d'érosion. Si les particules impactant sont fines, seulement quelques sites impactés coïncideront avec le défaut. La particule impactant crée, juste sous le point d'impact, une zone de champ de contraintes presque égale à la taille des particules. En absence de défauts, la déformation plastique du matériau cible est faible et prédominante.

D'autre part l'érosion pourrait être due à une rupture fragile lorsqu'une grosse particule frappe le point du défaut. La formation de fissures et leur propagation, dans un matériau fragile, est un processus rapide.

### III.5. Effet d'érosion sur le comportement du matériau :

#### Effet sur l'état de surface :

Le principe même du grenailage laisse présager une importante rugosité (figure8). En effet, ce dernier agit par une multitude d'indentation qui augmentera la rugosité de la face impactée. Bien qu'il présente l'avantage de permettre d'effacer les traces antérieures d'usinage, l'impact par des particules solides augmente souvent la rugosité des surfaces étudiées. Cet aspect est en rapport direct avec la nature du couple matériau cible/sable. En effet, pour des matériaux dits durs (dont la dureté est supérieure à celle du sable), nous aurons plutôt un effet de surface favorable avec un éventuel gommage, sans avoir de traces significatives de grenailage. L'effet néfaste apparaît surtout pour les matériaux doux. Dans ce cas, les indentations seront profondes.

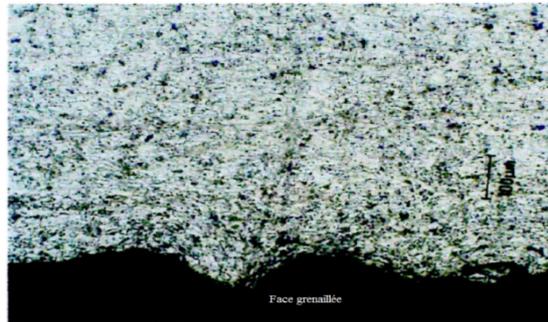


Figure III.8: Micrographie d'un Al2017A grenailé.

#### Modification de la microstructure :

Le grenailage agit sur la microstructure des couches superficielles. En effet, l'érouissage provoqué modifie la densité des dislocations ou peut même générer de nouvelles microstructures : apparition de martensite d'érouissage  $\alpha$  dans le cas des aciers inoxydables métastables ou de nano-structures. Des mesures de profils de micro-dureté ou d'élargissement des pics de diffraction confirment ce fait, en comparant les états traités et non traités. Ceci dit, il est nécessaire de rappeler que le grenailage peut également adoucir la microstructure par l'annihilation des structures de dislocation (cas des aciers très durs).

# CHAPITRE IV



Dans ce chapitre, nous allons aborder principalement deux volets, objets de notre étude expérimentale, à savoir le type de pièces étudiées et leurs caractérisations par les différentes techniques utilisées sur la base technique (H400) d'air Algérie avec l'aéroport Houari Boumediene Alger.

L'objectif de ce chapitre est de détailler les caractéristiques et le principe d'analyse de ces techniques des ailettes de compresseur HP CFM56-7B.

## **Partie A : PIÈCES ETUDIÉES :**

### **IV.A.1 Ailettes compresseur HP :**

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux d'ailettes de réacteurs équipant les avions, il s'agit :

- Ailettes de compresseur issues du réacteur CFM56-7B

Afin de pouvoir les caractériser nous allons donc en faire des échantillons selon les analyses à effectuer.

Le compresseur sert à fournir la quantité maximale d'air sous pression qui puisse être chauffée dans l'espace limite de la chambre à combustion. Dans le cas d'un compresseur axial, il est composé d'un disque entouré de petites ailes appelées ailettes (blades). En tournant, les ailettes aspirent l'air. Un aspirateur ménager fonctionne de la même manière. Le compresseur devra également fournir la quantité d'air suffisante pour :

- A. Refroidir les parties les plus chaudes du moteur.
- B. Pressuriser les joints d'étanchéité
- C. Les servitudes de l'avion (dégivrage, pressurisation, etc.)

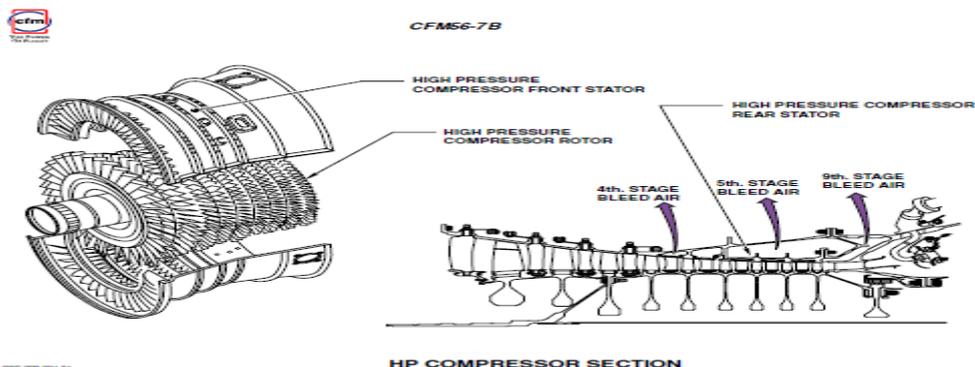
Le taux de compression de compresseur est lié à sa vitesse de rotation et au nombre d'étages qu'il comporte.

Conçus de la même manière, les compresseur basses et hautes pressions se différencient par la taille de leurs aubes et par leur vitesse de rotation.

Un compresseur axial se compose d'une suite d'étages axiaux disposés en série chacun comprenant une roue à aubes mobile rotor et d'un stator à aubes redresseur, tous ces étages sont calculés pour adapter parfaitement leurs conditions de fonctionnement à celles des étages en amont et en aval.

L'aubage mobile rotor est constitué d'un disque circulaire sur lequel sont fixées des aubes (ailettes) et tourne devant l'aubage fixe redresseur.

L'envergure des ailettes varie le long de l'écoulement pour compenser les variations de la masse volumique du fluide et pour conserver à la vitesse débitante axiale une valeur constante.

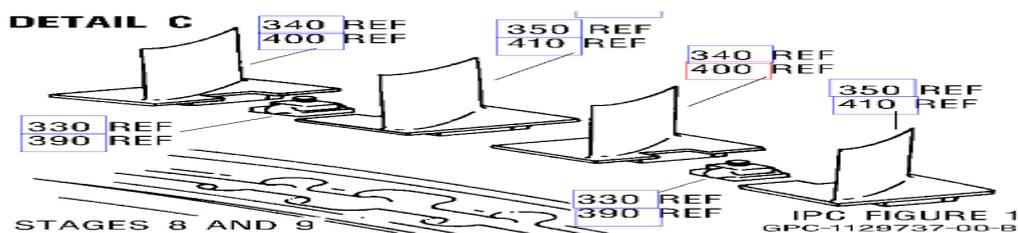


**Figure IV.1** : high pressure compressor.

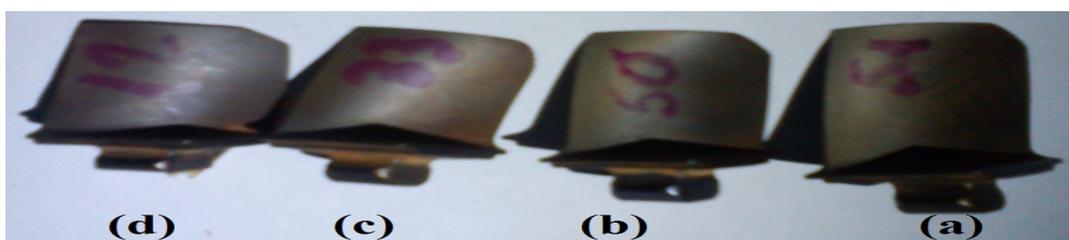
#### IV.A.1.1- présentation ailettes compresseur HP :

Ces ailettes ont une petite dimension comparant à celle de l'ailette Fan, elles sont revêtues avec un carbure de tungstène au niveau de la moitié supérieure.

C'est des ailettes du 6<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup>, et 9<sup>ème</sup> étage ayant subi le phénomène d'usure par érosion. Leurs surfaces d'usure présentées (figure2,3,4), ne présentent pas un aspect similaire en tout point.



**Figure IV.2:** ailettes du 8et 9 ème étage



**Figure IV.3:** Ailettes compresseur HP érodés :

(a) Ailette du 6<sup>ème</sup> étage, (b) Ailette du 7<sup>ème</sup> étage, (c) Ailette du 8<sup>ème</sup> étage, (d) Ailette du 9<sup>ème</sup> étage.

#### IV.A.1.2- préparation des échantillons :

Comme précédemment (aillette compresseur), nous avons découpé et préparé des échantillons de la partie saine de l'aillette, destinés aux caractérisations du matériau de base : composition chimique, microstructure, diffraction des RX ainsi que les essais de micro-dureté.

Pour ce type d'aillette, on s'est intéressé à la caractérisation du faciès d'usure. Les échantillons ont été découpés en fonction de l'emplacement de l'aillette comme indiqué (figure 4) à noter que ce type d'échantillon destiné aux caractérisations morphologiques n'a subi aucune préparation au préalable (ni polissage ni attaque chimique).



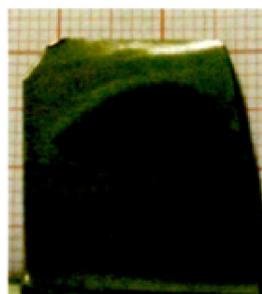
**Figure IV.4.a** Echantillon découpé de l'aillette du 6<sup>ème</sup> étage.



**Figure IV.4.b** Echantillon découpé de l'aillette du 7<sup>ème</sup> étage.



**Figure IV.4.c** Echantillon découpé de l'aillette du 8<sup>ème</sup> étage.



**Figure IV.4.d** Echantillon découpé de l'aillette du 9<sup>ème</sup> étage.

#### **Partie B : CARACTERISATION :**

La caractérisation des pièces endommagées a pour but de faire connaître les mécanismes d'endommagement, afin de répondre à deux questions :

- Comment l'endommagement a-t-il eu lieu (mécanique) ?
- Et pourquoi avons-nous eu un endommagement (cause) ?

Pour ces raisons, la caractérisation de nos échantillons a été menée à différentes échelles macroscopique et microscopique.

#### **IV.B.2 Contrôle non destructifs (CND) :**

Ces techniques ont pour but de détecter la présence de défauts au sein des structures sans avoir à pratiquer des tests qui entraînent l'endommagement des pièces. Elles sont généralement essentielles pour le suivi en service. Ces contrôles sont particulièrement utilisés

dans les secteurs sensibles à la sécurité comme l'industrie aéronautique, l'industrie navale, l'énergie.

Au cours de ce travail, trois approches expérimentales ont été exploitées afin de contrôler nos types d'ailette compresseur HP. Il s'agit de l'examen par courants de Foucault, et ressuage.

#### **IV.B.2.1- préparation et nettoyage préalable :**

Les contaminants tels que rouille, la graisse ou la peinture doivent être enlevés, en utilisant des méthodes mécanique ou chimique, ou par la combinaison des deux méthodes. Un nettoyage préalable doit garantir une surface exempte résidu, ce qui permet aux pénétrants d'entrer sans aucune discontinuité.

Nos ailettes ont été nettoyées chimiquement suivant le protocole :

- Emersion dans un bain de solvant de dégraissage non chloré « Ardrex 185 »
- Rinçage à l'eau chaude
- Séchage à l'air

#### **IV.B.2.2- Inspection sur table :**

Cette inspection consiste à examiner visuellement la pièce à l'aide d'une loupe sous une lumière blanche. L'inspection visuelle directe des pièces peut se révéler un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface, et surtout la révélation des hétérogénéités locales et superficielles de type tâches, rayures... . Ces révélations sont considérées comme défauts d'aspect rédhibitoires pour des produits pour lesquels le paramètre qualité de surface est important.



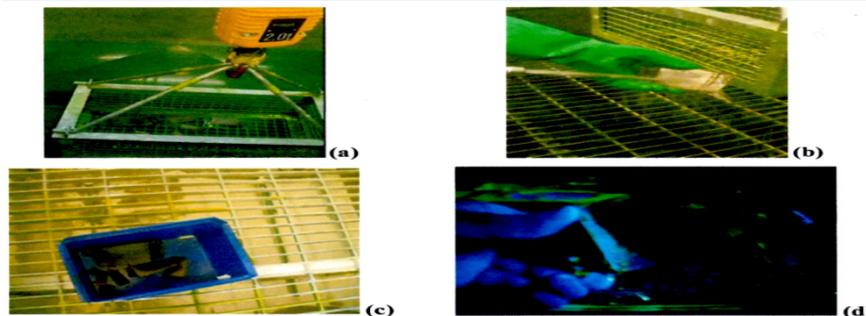
**Figure IV.5 :** *Inspection avec loupe sous lumière blanche.*

#### **IV.B.3- contrôle par Ressuage :**

Le ressuage est un moyen de recherche des défauts de surface qui consiste à améliorer les possibilités de détection visuelle en tirant profit des propriétés de tensions superficielles des fissures. Les phases successives du contrôle par ressuage que nous avons appliqué sont les suivantes (figure 7) :

- Emersion des ailettes dans un bain constitué d'un produit fluorescent appelé pénétrant (ZYGLO ZL-27A), pendant 15 à 20mn,

- Elimination de l'excès de pénétrant par rinçage,
- Séchage dans une étuve maintenue à 55°C,
- Application d'un révélateur uniformément sur la surface examinée. La détection est améliorée à la fois par le contraste de couleurs entre pénétrant et révélateur et par le fait que la diffusion du pénétrant dans le révélateur élargit considérablement l'aspect du défaut. (ZYGLO ZP 4B DRY),
- Inspection sous une lumière UV.

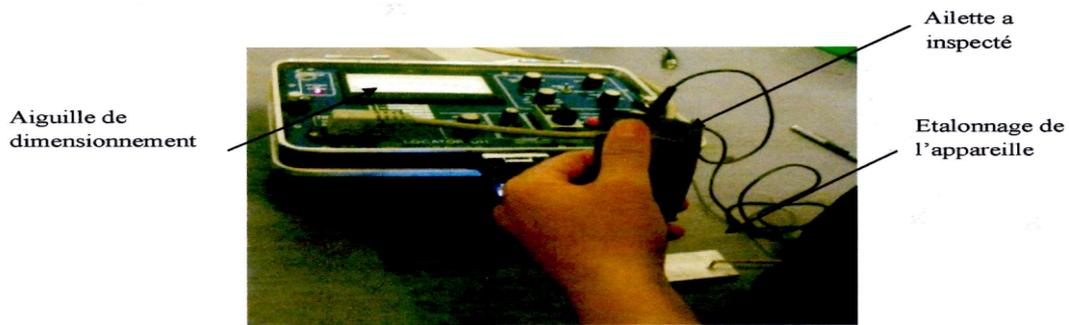


**Figure IV.6 :** *Etapes du ressuage :*  
 (a) *Immersion dans le produit fluorescent, (b) Rinçage des échantillons,*  
 (c) *Application du révélateur, (d) Visualisation sous lumière UV.*

#### **IV.B.4- Courant de Foucault :**

Le courant de Foucault est une méthode qui s'applique à tous les matériaux conducteurs. Le principe consiste à créer dans ces matériaux, des courants induits par un champ magnétique qui est variable dans le temps, grâce à un capteur.

Ces courants induits, sont donc appelés courants de Foucault. Leur distribution et leur répartition dépendent de plusieurs paramètres (champ magnétique d'excitation, géométrie de la structure, ses caractéristiques de conductivité électrique...). Ces courants induits circulent localement dans le matériau, et la présence d'une anomalie dans la pièce contrôlée perturbe la circulation des courants de Foucault. On recueille des signaux de variation qui donnent la nature de l'anomalie et sa dimension volumique (figure 8).



**Figure IV.7 :** *Inspection par courant de Foucault.*

#### **IV.B.5- Contrôle dimensionnelle :**

##### **IV.B.5.1- projecteur de profil :**

Pour le contrôle des ailettes compresseur HP (6<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup>, 9<sup>ème</sup> étage), nous avons utilisé un projecteur de profil type Springfield Vermont. Ce projecteur est utilisé pour des opérations de mesure et contrôle qualité. Son principe consiste à projeter une image de profil agrandie d'une zone caractéristique de la pièce sur un écran (figure 9).



**Figure IV.8:** *projecteur de profil.*

##### **IV.B.5.2- contrôle par le Scriber :**

Le Scriber est un outil manuel utilisé généralement sur les roulements pour détecter et mesurer les défauts de surfaces tel que les rayures et les éraflures (figure 10).

Son principe consiste à faire passer sur la surface à inspecter un outil qui contient à son extrémité une bille (figure 10). La présence de rayures de dimension inférieure ou égale à celui de la bille est détectée par le coincement du passage de l'outil. Le choix du diamètre de la bille se fait généralement par une première approche visuelle.



**(a)**



**(b)**

**Figure IV.9(a)** *Scriber, (b) l'utilisation du Scriber sur nos ailettes.*

#### **IV.B.6- Analyse de la composition chimique :**

Nous avons effectué une analyse de la composition chimique de chacune des pièces étudiées afin d'identifier les nuances des matériaux objet de cette étude. L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire CND du CREDEG (centre de recherche et de Développement de l'Electricité et du Gaz Filiale Sonelgaz), à l'aide d'un spectromètre d'émission à étincelle de type : « METAL LAB 75/80 j MV ». Le principe de l'analyse est basé sur l'irradiation des échantillons par une source électrique qui va fournir suffisamment d'énergie pour permettre aux atomes des niveaux d'énergies élevés de passer à des niveaux d'énergies plus basses. Ce déplacement est accompagné d'émission de photons (lumière), reçu par un capteur, qui transmet ces données à un logiciel pour traitement.

#### **IV.B.6.1- Caractérisation microstructures :**

##### **IV.B.6.1.1- Préparation des échantillons :**

A l'exception des observations des faciès de rupture et d'usure qui se fait sans préparation préalable (découpage seulement), toutes les caractérisations en microscopie (optique et électronique à balayage) sont réalisées sur des échantillons ayant subi le protocole de préparation suivante :

- Enrobage a froid,
- Polissage mécanique sur des papiers abrasif de granulométrie décroissante (180, 320, 600, 800, 1000, et 1200),
- Polissage de finition sur papiers feutre recouverts d'une suspension d'alumine,
- Attaque chimique avec les réactifs qui dépendent de nature de l'échantillon :
  - Pour le Ti-6Al-4V on a utilisé de l'acide nitrique (45%  $\text{HNO}_3$ ), 45%  $\text{H}_2\text{O}$ , 10% HF, appliqué pendant 20 à 30s.
  - Pour l'inconel 718 on a utilisé une attaque composé de 50  $\text{cm}^3$  d'acide nitrique et 50  $\text{cm}^3$  d'acide acétique glacial.

##### **IV.B.6.1.2- Microscope optique :**

L'examen micrographique des échantillons s'est effectué à l'aide d'un microscope optique à réflexion type Karl Zeiss conduisant à des grossissements allant de 50 à 1000 fois la surface observée. Eclairant l'objet à travers l'objectif lui-même, l'échantillon doit pouvoir réfléchir la lumière « état miroir ». Le but de l'utilisation de cette technique est la mise en évidence de la morphologie de nos échantillons (nombre, contraste des phases), texture des grains (équi-axes, colonnaire ou mono-grain), présence de précipités et leurs disposition (inter ou intra-granulaire), et la présence ou non de fissures et de cavités ainsi que les usures.

##### **IV.B.6.1.3- Microscope électronique à balayage :**

Le microscope électronique à balayage (MEB) permet d'obtenir une image agrandie jusqu'à 100000 fois ou plus de l'échantillon. Les appareils utilisés pour notre étude sont de deux types JEOL 5800 et PHILIPS XL 30 FEG. Les images sont classiquement réalisées à

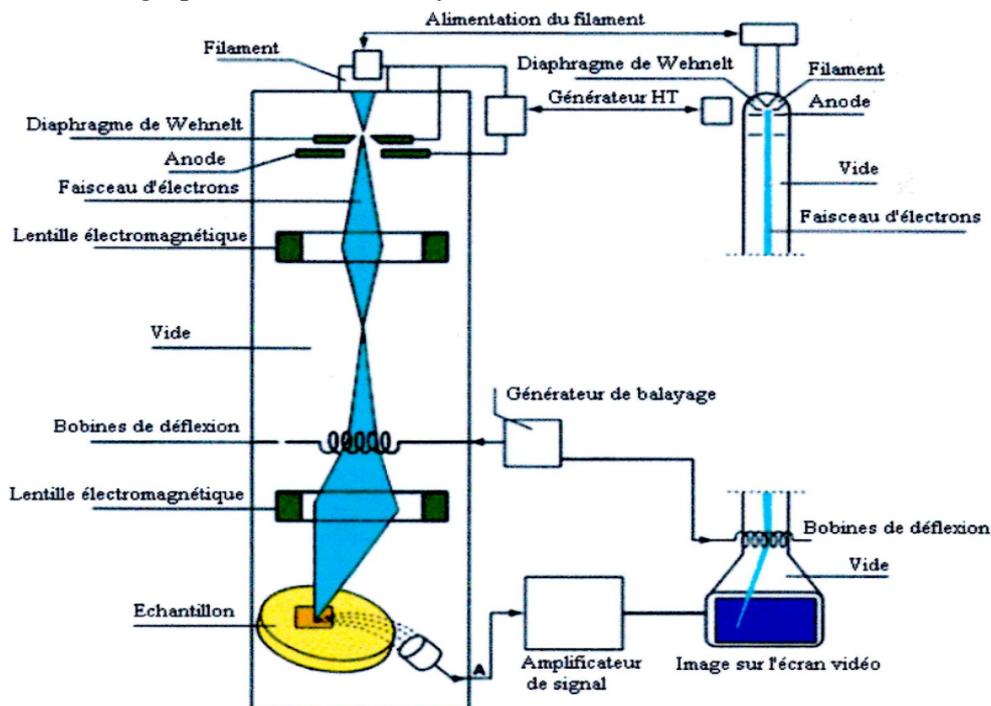
20kV. L'appareil offre la possibilité de faire des observations en utilisant les électrons secondaires (contraste topographique) ou les électrons rétro diffusés (contraste chimique). De plus, il est équipé d'un analyseur X à dispersion d'énergie (EDS), de marque EDAX, qui permet une analyse qualitative et semi-quantitative phases en présences de phases.

Le principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage (MEB) est schématisé sur la (Figure IV.10).

La microscopie électronique à balayage, dont le principe est illustré sur la figure.9, est une méthode expérimentale d'observation directe des aérosols de taille nanométrique.

Un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon qui génère en retour des électrons secondaires et rétrodiffusés, de basse énergie qui sont accélérés vers un détecteur d'électrons.

A chaque point d'impact correspond alors un courant électrique dont l'intensité dépend de la nature de l'échantillon émetteur d'électrons. L'enregistrement simultané de ces électrons permet la formation d'une image représentative de la topographie de surface de l'échantillon (électrons secondaires) et de la répartition des éléments (contraste de profondeur, avec les électrons rétrodiffusés). Il est ainsi possible, en balayant l'échantillon avec le faisceau, d'obtenir une cartographie de la zone balayée.



**Figure IV.10** Principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage (MEB).

Nous avons utilisé un microscope électronique à balayage JEOL JSM-6320F dont la tension d'accélération de travail est comprise entre 0,5 et 30 kV avec des résolutions de 1,2nm à 15 kV et 2,5 nm à 1 kV. Ce microscope permet d'atteindre des grossissements égaux à 650 000 en mode haute résolution. L'observation des échantillons est réalisée en plaçant le support de collecte (des membranes en polycarbonate) comportant de la suie sous le faisceau d'électrons.

#### IV.B.7- Caractérisation de la structure :

La diffraction des rayons X est l'une des méthodes les mieux adaptées à l'identification des phases en se basant sur leur empreinte cristallographique. L'indexation des spectres  $I=f(2\theta)$ , conduit à l'identification des phases en présence et calcul des paramètres de maille. L'évaluation des intensités des pics peut conduire au pourcentage volumique des phases en présence. Enfin, la largeur à mi-hauteur conduit à la mesure de la taille des grains. La caractérisation de nos échantillons a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre  $\theta$ - $2\theta$  à goniomètre vertical de marque PHILIPS PW1710 fonctionnant avec logiciel diffracte plus muni d'une anticathode en cuivre ( $\lambda=1,54 \text{ \AA}$ ). Le dépouillement du spectre est réalisé à l'aide des données bibliographiques relatives aux fiches ASTM des phases en présence.

#### **IV.B.8- Caractérisation de la dureté et de la micro-dureté :**

##### **IV.B.8.1- Dureté Rockwell (HRC) :**

L'essai de dureté caractérise la résistance qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps dur. Ainsi, pour des conditions expérimentales données. La dureté du matériau sera d'autant plus grande que la pénétration du corps sera faible. En général, l'essai de dureté consiste à créer une empreinte sur une pièce par un pénétrateur soumis à une force déterminée.

Pour nos caractérisations, l'appareil que nous avons utilisé est un duromètre universel de marque Kraut Kramer Branson (figure 11), non destructif dont le principe de fonctionnement repose sur la mesure de la hauteur de rebondissement d'une petite masse en acier dont l'extrémité est en diamant de forme arrondie. Cette dernière tombe dans un tube métallique, d'une hauteur fixe, frappe la surface de l'échantillon à caractériser, et rebondit plus haut que la pénétration est faible. La valeur de la dureté s'affiche sur un cardan électronique. L'utilisation de cette technique, nous a permis d'évaluer la dureté de nos ailettes compresseur tout en préservant leur état de surface.



**Figure IV.11** *Mesure dureté sur les ailettes avec en appareil de Rockwell.*

##### **IV.B.8.2- Micro-dureté VICKERS :**

L'essai consiste à appliquer, sous charge constante (F), à l'aide d'un pénétrateur en forme de pyramide à base carrée d'angle au sommet  $\alpha$  une valeur  $360^\circ$ .

La pyramide est en diamant ; on mesure la diagonale (d) de l'empreinte (faux carre) laissé par la pyramide après suppression de la charge (F).

La micro-dureté Vickers permet la réalisation de mesures de duretés à l'échelle microscopique s'intéressant à un nombre quelquefois très important de grains. Le volume de l'empreinte créée par la micro-dureté est à peu près un million de fois plus petit que celui d'un essai de micro-dureté. C'est un essai précis destiné en principe à définir les propriétés à l'intérieur des grains, soit de la matrice, soit de ses diverses phases et constituants.

Le principe d'un essai Vickers, illustré à la (figure 12), est basé sur la mesure de l'aire d'une empreinte après décharge, créé par un pénétrateur en diamant de forme pyramidale à base de losange, soumis à une charge et une vitesse d'application contrôlées.

L'appareil utilisé est un micro-duromètre de marque ZEISS, de charge variable de 10 à 1000 gf. La mesure des deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de l'empreinte carrée obtenue après l'essai, permet d'obtenir après moyenne la valeur «  $d_m$  » qui sera ensuite utilisée pour le calcul de la micro-dureté:

$$H_v = \text{Constante} \cdot \frac{(\text{Charge de l'essai})}{(\text{Aire de l'empreinte})} \quad \text{Constante} = \frac{1}{g} = \frac{1}{9.8066} = 0.102 \quad (1)$$

$$= 0.102 \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = 0.189 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

$$d_m = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$

Avec :

- $H_v$  : Dureté Vickers (L'indice de dureté) ;
- $d$  : diagonale de l'empreinte (mm) ;
- $d_1$  et  $d_2$  (mm) : diagonales du losange de l'empreinte ;
- $F$  : charge de l'essai (N) ;
- $g$  : accélération de la pesanteur.

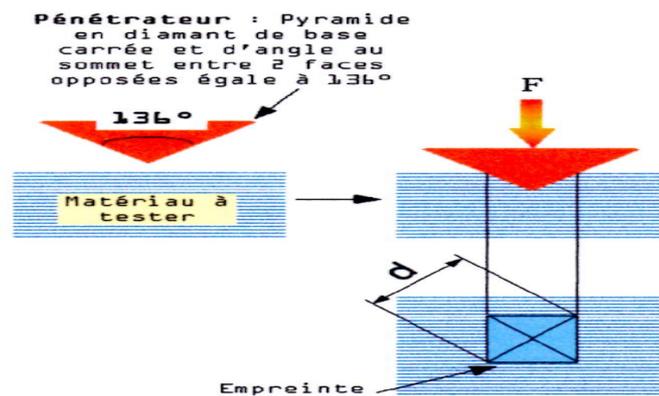
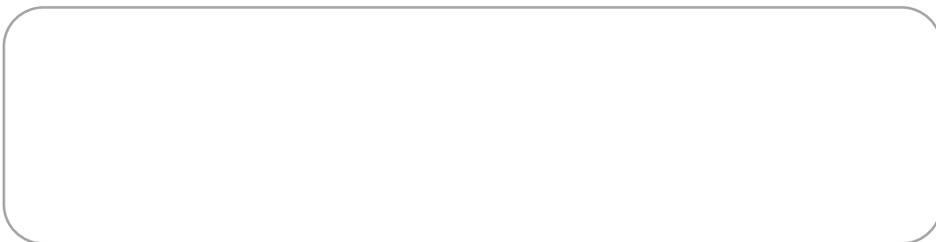


Figure IV.12 : Schéma du principe de l'essai Vickers.

# CHAPITRE V



## V. Résultats et interprétations :

La caractérisation des faciès de rupture et l'usure, permettent de détecter deux caractéristiques fondamentales : d'une part l'amorce des endommagements et d'autre part leur mode de propagation. Elle permet de remonter à la cause des endommagements : intensité et distribution réelles des contraintes et son uniformité métallurgique. Cette caractérisation fondamentale permet donc d'améliorer la conception, la réalisation et les conditions d'emploi des ensembles mécaniques.

L'objectif de notre travail est de formuler un diagnostic sur les types et mécanismes mis en jeu dans l'endommagement des ailettes équipant les turboréacteurs de moteur d'avions.

On s'est intéressé à la caractérisation de deux types de faciès : le faciès d'usure des ailettes compresseur. Par conséquent, ce chapitre sera divisé en deux volets qui s'articuleront autour de la caractérisation de ces faciès.

### V.1- Caractérisation du matériau de base :

#### V.1.1- Composition chimique :

Les résultats de l'analyse de composition chimique obtenue par spectrométrie d'émission à étincelle réalisée sur le matériau de base de ce type d'ailette sont présentés dans le tableau 1

Eléments	Ni%	Cr%	Fe%	Nb%	Mo%	Ti%	Al%	V%	Co%
%poids	55.661	18.803	18.022	4.324	1.421	0.646	0.387	0.250	0.144
Eléments	W%	Si%	Mn%	P%	S%	Cu%	C%	B%	
%poids	0.120	0.064	0.04	0.035	0.033	0.021	0.019	0.010	

**Tableau V 1** Résultats de la composition chimique [3].

La comparaison des valeurs expérimentales à celle des nuances proposées dans la bibliographie [6], a permis d'identifier notre alliage comme étant un superalliage multi-constitués à base de Ni de désignation AFNOR « *NC19FeNb* » ou L'Inconel 718.

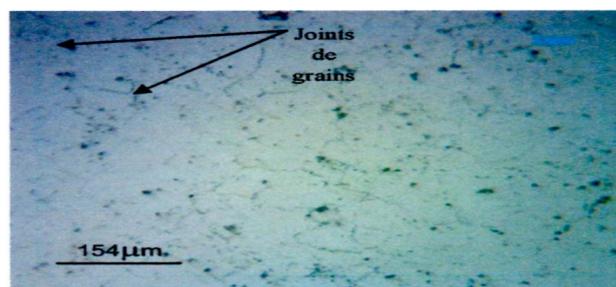
L'état traité est destiné pour fabriquer les pièces critiques telles que les disques dans un Moteur d'avion [cfm56].

Ce dernier a occupé la majeure partie du marché des superalliages à base nickel dans le domaine aéronautique. Cette industrialisation a permis à l'alliage 718 de devenir le superalliage le plus utilisé actuellement. La consommation de SNECMA Moteurs est comprise entre 500 et 1000 tonnes par ans.

### V.1.2- Microstructure :

La caractérisation de la partie saine de l'ailette, en lumière réfléchiée après attaque chimique (figure1) révèle une structure à grains de taille hétérogène avec présence de dépôt (précipités) ségrégué préférentiellement au niveau des joints de grains.

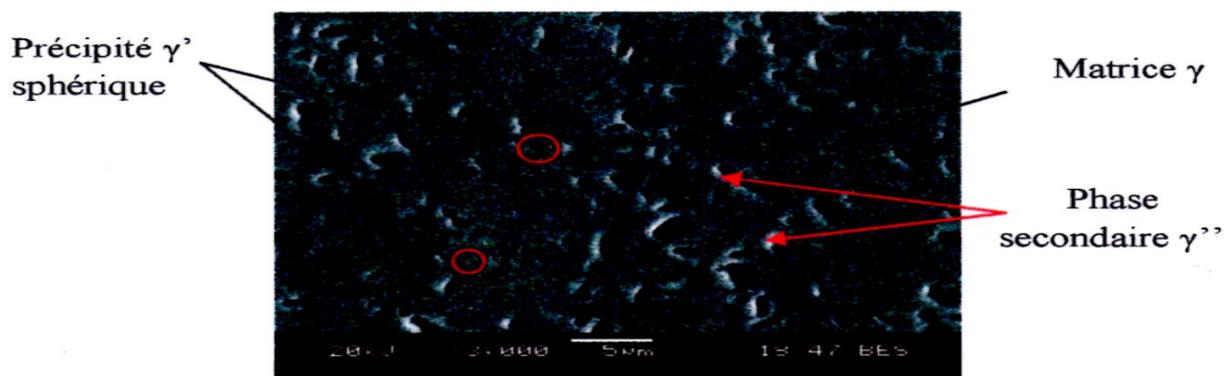
La localisation des précipités aux joints de grains est cohérente, car rappelons que dans le Processus de solidification, le liquide se solidifie en dernier est riche en élément soluté.



**Figure V.1** Micrographie du matériau de base de l'ailette compresseur

La micrographie (figure 2) réalisée par microscopie électronique à balayage révèle une structure métallurgique composée de plusieurs phases. Sur la base des données bibliographique, concernant la microstructure de ce type d'alliage

dans ce type d'alliage, la cristallisation des carbures de titane et de niobium au niveau des joints de grains est un phénomène connu . Ceci étant lié au fait que le titane et le niobium sont des éléments très carburières qui s'associent facilement au carbone présent dans l'alliage.



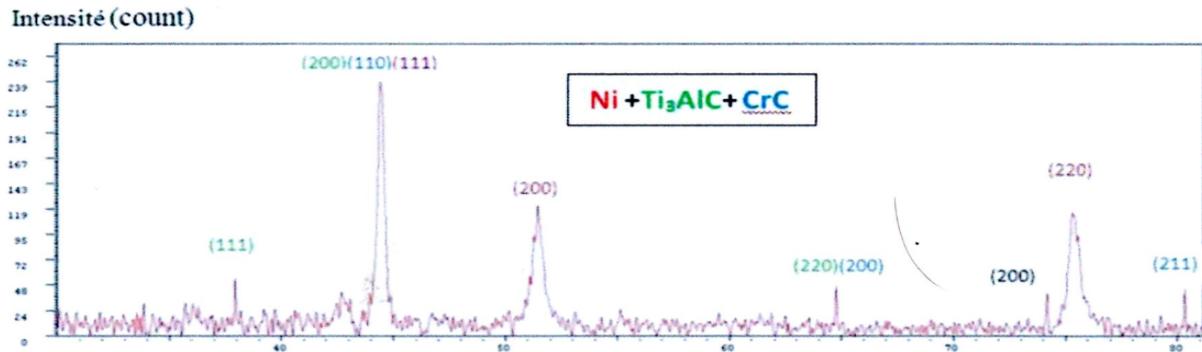
**Figure V.2** : Micrographie MEB de la zone saine (ailette compresseur).

- Matrice  $\gamma$  (phase grise) : dans le cas des alliages fer/nickel la phase  $\gamma$  est connue pour être stable pour des teneurs supérieures à 25 % Ni ;
- Précipités  $\gamma'$ , de contraste clair et forme sphérique ;

- Phases secondaire  $\gamma''$  (TPC : *Topologically compact phases*) de contraste foncé et forme irrégulière.

### V.13- Diffraction des rayons X :

Le dépouillement du spectre de diffraction de rayons X du matériau de base (figure I.3), révèle la présence des trois raies principale de la phase Ni.



**Figure V.3 :** Le spectre de diffraction des RX.

Les résultats de l'indexation du spectre de diffraction des RX du matériau de base sont regroupés dans le tableau 2

N° fiche ASTM	Elément	$d_{hkl}(\text{Å})$	$2\theta(^{\circ})$	$I/I_0$	Plan hkl
<b>70-1849</b>	Ni	2.03	44.422	100	(111)
		1.77	51.458	66.1	(200)
		1.26	76.337	50.7	(220)
<b>89-2282</b>	Ti <sub>3</sub> AlC	2.370	37.919	100	(111)
		2.030	44.422	65	(200)
		1.438	64.672	43	(220)
<b>65-0896</b>	CrC	2.03	44.422	100	(111)
		1.43	64.672	93	(220)
		1.19	80.320	64	(211)

**Tableau V 2 :** Résultats de la composition chimique [3].

## 2 Indexation des pics de la diffraction des RX [2].

En plus raies principales (111), (200) et (220) de la phase Ni, le spectre de l'échantillon présente également des pics de faible intensité à  $37.919^\circ$  ( $d=2.37\text{\AA}$ ),  $64.672^\circ$  ( $d=1.438\text{\AA}$ ) et  $80.32^\circ$  ( $d=1.19\text{\AA}$ ). L'indexation de ces raies peut donner lieu à plusieurs possibilités. Celles de la cristallisation des phases  $Ti_3AlC$  et/ou CrC nous semblent les plus cohérentes.

### V.1.3.1- Spectrométrie de rayons X :

L'étude par microscopie électronique nous a permis d'observer différents objets d'échelle nanométriques, comme les particules primaires et les agrégats de suie, mais aussi d'autres objets tels que des composés métalliques. Afin de connaître la nature des éléments chimiques présents, des analyses par spectrométrie de rayons X ont été effectuées. Le Tableau2 regroupe des résultats obtenus à l'aide de cette technique sur divers objets.

### V.1.4- Caractérisation de la dureté et de la micro-dureté :

Afin d'évaluer la dureté du matériau, nous avons effectué un essai de dureté Rockwell. Le tableau3 illustre les résultats des essais réalisés.

	Valeur HRC
1 <sup>er</sup> Point	42.0
2 <sup>ème</sup> Point	42.5
3 <sup>ème</sup> Point	45.0

Tableau V 3 : Résultats des essais de dureté Rockwell du matériau de base.

La valeur moyenne est de 43.16 HRC, cette dernière correspond à la valeur de la dureté théorique [1].

Par ailleurs, afin d'évaluer la micro-dureté des phases en présence dans la microstructure, nous avons réalisé sur un échantillon poli et attaqué chimiquement une série d'essai micro-dureté Vickers (figure 4).

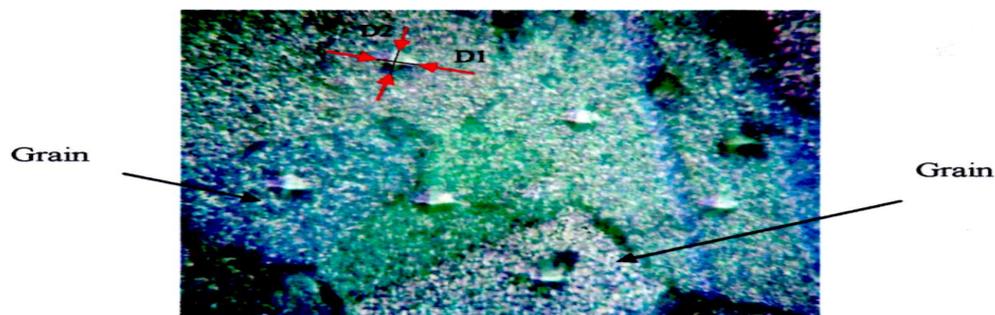


Figure V.4: Images des empreintes de micro-dureté dans la micrographie du matériau de base.

$d_m = (d_1 + d_2) / 2$	HV <sub>grain</sub>	$d_m = (d_1 + d_2) / 2$	HV <sub>Joint de grain</sub>
09.7	394	8.0	579
10.3	349	9.0	457
10.0	370	8.5	513
Valeur moyenne	371	Valeur moyenne	516.33

**Tableau V 4 :** Résultats essais de micro-dureté Vickers dans le grain et dans l'espace inter-granulaire.

La micro-dureté Vickers mesurée aux joints de grains (zone riches en précipités) est assez élevée et semble confirmer l'hypothèse de la cristallisation dans cet espace de particules dures (carbures).

## V.2- Caractérisation macroscopique du facies d'usure :

Dans cette partie nous nous intéressons aux contrôles macroscopiques des ailettes étudiées par contrôle visuel, ressuage et courant de Foucault.

### V.2.1- Inspection sur table :

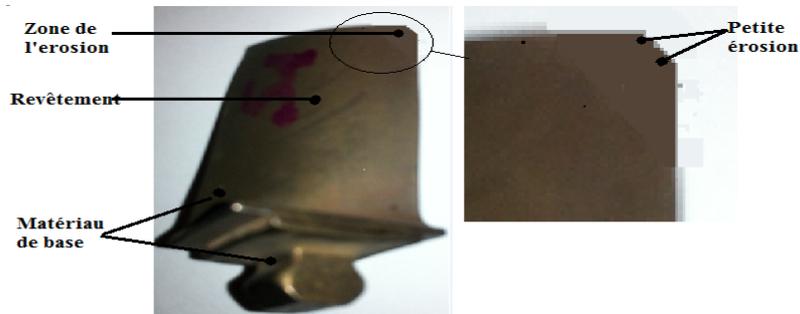
Nous avons abordé nos investigations dans un premier temps par contrôle visuel des surfaces des ailettes étudiées.

Un examen visuel de la surface des ailettes trois derniers étages 6<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup>, et 9<sup>ème</sup>, du compresseur HP (figure 5.a, 5.b, 5.c et 5.d) révèle une usure par érosion située préférentiellement dans la partie supérieure (côté tête) des ailettes. Une perte de matière conséquente qui se traduit par la disparation du film protecteur dans les parties les plus atteintes est constaté à l'œil nue.

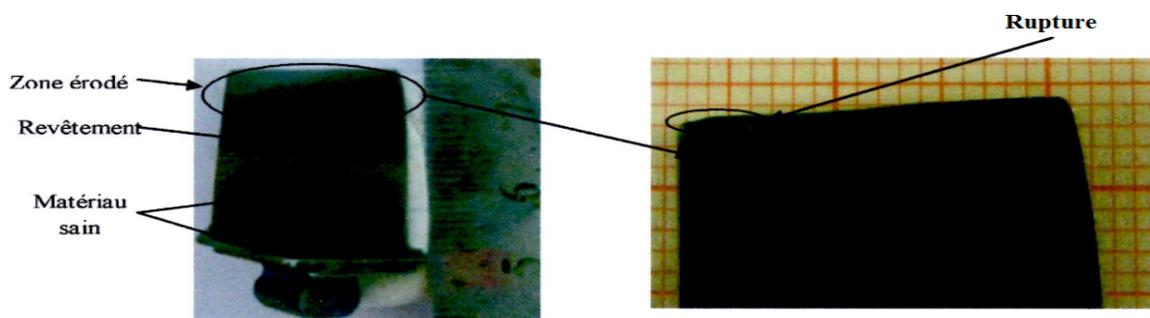
Les observations macroscopiques plus approfondies au moyen d'une loupe et sous, observations macroscopiques permettent d'affirmer que :

- ✓ L'ailette 6<sup>ème</sup> étage présente une petite érosion (figure 5.a) ;
- ✓ L'ailette 7<sup>ème</sup> étage présente une perte de matière, une légère rupture ainsi que le dénudement des parties censées être revêtues (figure 5.b) ;

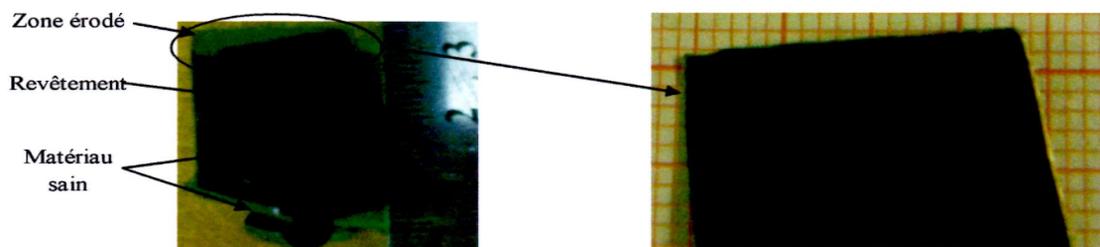
- ✓ L'ailette 8<sup>ème</sup> étage présente un faciès similaire à celui de l'ailette du 7<sup>ème</sup> étage, avec une usure plus prononcée (figure 5.c) ;
- ✓ L'ailette 9<sup>ème</sup> étage révèle en plus de la perte de matière, la présence de rayures qui ont pris naissance sur le bord d'attaque (figure 5.d).



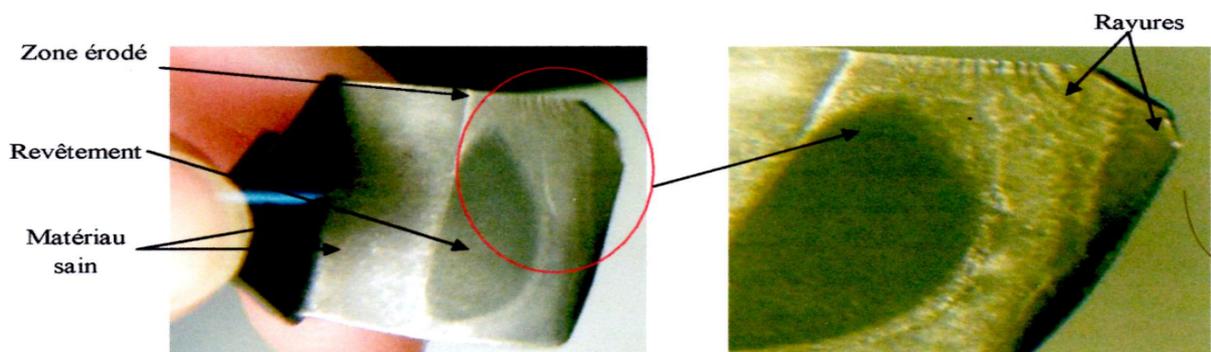
**Figure V.5.a** Faciès d'usure de l'ailette du 6<sup>ème</sup> étage.



**Figure V.5.b** Faciès d'usure de l'ailette du 7<sup>ème</sup> étage.



**Figure V.5.c** Faciès d'usure de l'ailette du 8<sup>ème</sup> étage.



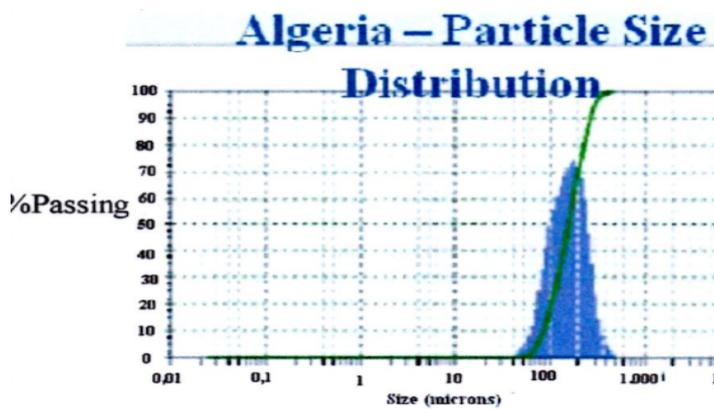
**Figure V.5.d** Faciès d'usure de l'ailette du 9<sup>ème</sup> étage.

Rappelons que ce type d'usure a été constaté sur les ailettes des moteurs d'avion qui assurent régulièrement les vols vers le sud Algérien. Par conséquent, nous déduisons que l'érosion mise en évidence est causée par la nature et la métrologie des grains de sable. Le

sable de Désert Algérien (figure 6.a) est constitué de plus de 90% de particules  $\text{SiO}_2$  présentant une granulométrie moyenne de 158 microns (figure 6.b) [3].



**Figure V.6.a** Micrographie par MEB des grains de sables de Désert Algérien [3].



**Figure V.6.b** Granulométrie des grains de sables de Désert Algérien [3].

### V.2.2- Contrôle dimensionnel :

Ce contrôle par l'utilisation d'un projecteur de profil, permet l'évaluation qualitative de la perte de matière. Dans notre cas, la comparaison des profils des ailettes érodées à celui des ailettes saines confirme les premières constantes faites par l'inspection sur table (paragraphe 6), à savoir :

- Une perte de matière très dure dans de l'ailette du 6<sup>ème</sup> étage (figure 5.a) ;
- Une légère perte de matière dans le cas de l'ailette du 7<sup>ème</sup> étage (figure 5.b) ;
- Une perte de matière plus ou moins importante dans le cas de l'ailette du 8<sup>ème</sup> étage (figure 5.c) ;
- Une perte de matière très accentuée sur le bord d'attaque, pour le cas de l'ailette du 9<sup>ème</sup> étage (figure 5.d) ;



**Figure V.7:** Projection de profil de l'ailette du 6<sup>ème</sup> ,7<sup>ème</sup> ,8<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> étage.

### Profils d'ailette de compresseurs :

L'approche moderne dans la conception de compresseur est d'employer des profils de lame conçus par le soi-disant méthode de distribution prescribed (PVD) de vitesse. Dans cette approche, le concepteur choisira une distribution de vitesse de surface de lame et une méthode informatique détermine la variation d'épaisseur et de courbure de profil aérodynamique exigée pour réaliser l'aérodynamique désirée. En dépit de ceci, beaucoup de conceptions de lame sont encore en service basées sur des profils géométriquement prescribed.

Les familles géométriques les plus utilisés généralement sont le Comité consultatif national américain pour l'aéronautique (NACA) 65 séries, les séries C britanniques, et la double lame circulaire (DCA) d'arc ou biconvexe.

### V.2.3- Dimensionnement des rayures par le Scriber :

Afin de mesurer la largeur des rayures visibles sur l'ailette du 9<sup>ème</sup> étage du compresseur HP, nous avons caractérisé manuellement la surface de l'ailette moyennant l'outil Scriber (figure7). Plusieurs tests avec différentes dimensions de bille (située à l'extrémité de l'outil) ont été utilisés sur les rayures. Le coincement de l'outil sur la surface de l'ailette a été détecté

pour une valeur du diamètre de la bille de 0.015 inch. Par conséquent, nous pouvons conclure que les rayures présentes sur la surface de l'ailette de 9<sup>ème</sup> étage du compresseur HP ont une largeur de 0.015 inch.



**Figure V.8 :** *Mesure des rayures de l'ailette avec un Scriber*

#### **V.2.4- Ressuage et courant de Foucault :**

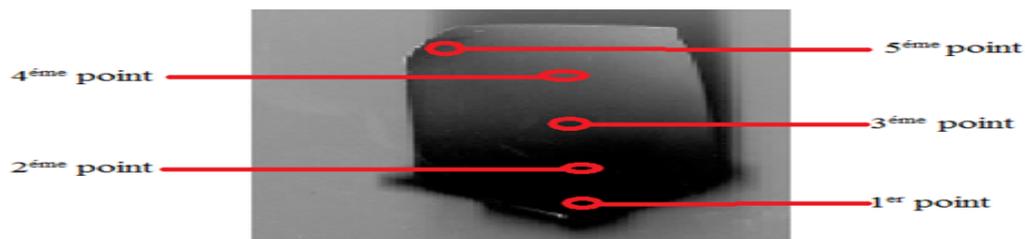
Après l'application du pénétrateur suivi de celle du révélateur, l'inspection par ressuage des ailettes étudiées n'a pas dévoilé de défauts.

De même, dans l'examen des ailettes par courant Foucault, aucun signal de défaut n'a été détecté sur l'appareil de mesure.

Sur la base de ces résultats, nous déduisons que hormis l'érosion, les ailettes ne présentent pas d'endommagement.

#### **V.2.5- Dureté :**

Afin d'évaluer le profil de dureté que présentent les ailettes érodées, cinq mesures de dureté Rockwell ont été réalisées, en démarrant de la base (partie saine) vers la tête des ailettes (partie érodées), comme indiqué sur la figure8.

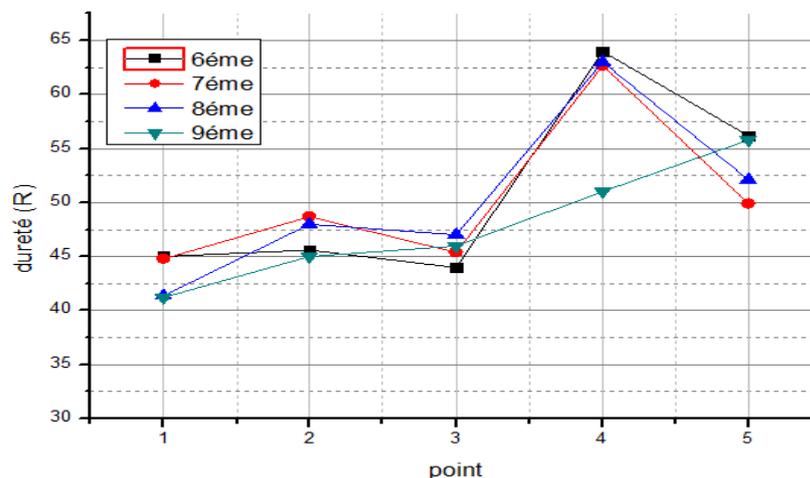


**Figure V.9:** *Point d'application de la mesure de dureté Rockwell sur les ailettes*

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau5, et l'évolution de la dureté en fonction de la position du point de mesure qu'on peut lier directement à la composition chimique est présentée figure8.

	1 <sup>er</sup> Point	2 <sup>ème</sup> Point	3 <sup>ème</sup> Point	4 <sup>ème</sup> Point	5 <sup>ème</sup> Point (HRC)
6 <sup>ème</sup>	45	45.6	44	64	56.2
7 <sup>ème</sup>	44.8	48.7	45.4	62.7	49.9
8 <sup>ème</sup>	41.4	48	47	63	52.1
9 <sup>ème</sup>	41.2	45	46	51	55.8

**Tableau 5 V:** Profil de dureté Rockwell des quatre ailettes étudiées



**Figure V.10 :** Profil de dureté Rockwell des ailettes des quarts étages.

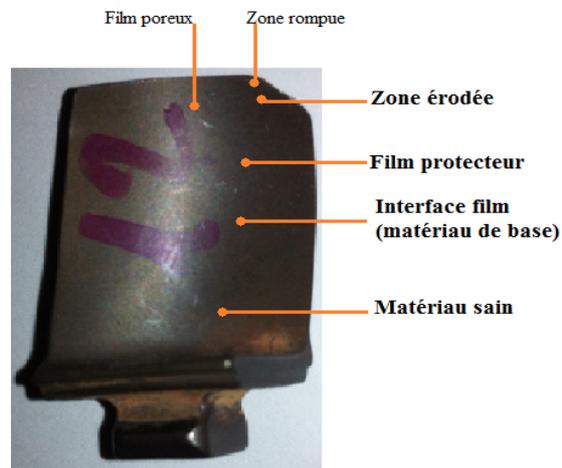
De cette évolution, ressort les constatations suivantes :

1. L'évolution de la dureté du pied vers la tête est globalement la même pour les ailettes des trois étages.
2. L'évolution de la dureté présente d'abord un palier (points 1, 2 et 3). Ce résultat est logique puisque ces points correspondent aux analyses réalisées sur l'ailette non revêtue.
3. L'évolution de la dureté présente un maximum qui correspond à l'analyse réalisée approximativement au centre de l'ailette (point 4). L'ailette dans ce cas est revêtue par le film carbure de tungstène, conçu et appliqué justement pour protéger l'ailette des endommagements due à l'érosion.
4. Enfin le dernier (point 5), présente une dureté qui se rapproche de celle des trois premiers points. Ce résultat est conforme aux observations microscopique qui en ce point révèlent l'érosion de l'ailette (matériau non revêtu). Dans le cas de l'ailette 7<sup>ème</sup>

étage, l'étendu de partie érodée est faible, ce qui explique la valeur élevée du point 5 qui est probablement situé à l'interface matériau érodé/matériau revêtu.

### V.3- Caractérisation microscopique des facies d'usure :

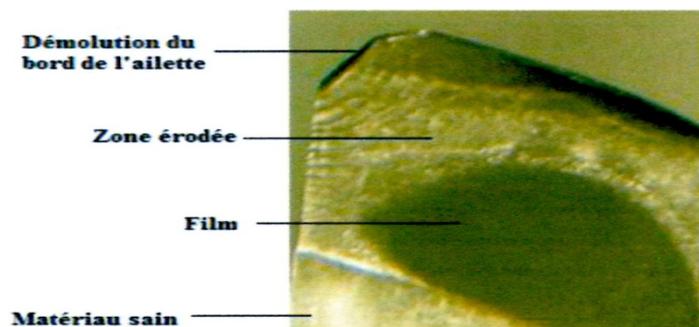
Les micrographies réalisées par microscopie électronique à balayage sur les surfaces des ailettes compresseur HP 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> étage présentent des morphologies similaires avec une usure plus prononcée dans le cas des ailettes du 8<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> étage. En fonction de l'emplacement de la caractérisation micrographique sur la surface de l'ailette (figure 3), trois types de morphologies ont été mise en évidence : partie rompue (de petite taille dans les ailettes du 6<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> étage), partie érodée et enfin présence de porosité dans le film protecteur situé du côté de la partie érodée. En fonction de ces morphologies, trois types de mécanismes d'érosion ont été mis en identifiés :



**Figure V.1 1-** Emplacement des caractérisations micrographiques sur la surface des ailettes étudiées.

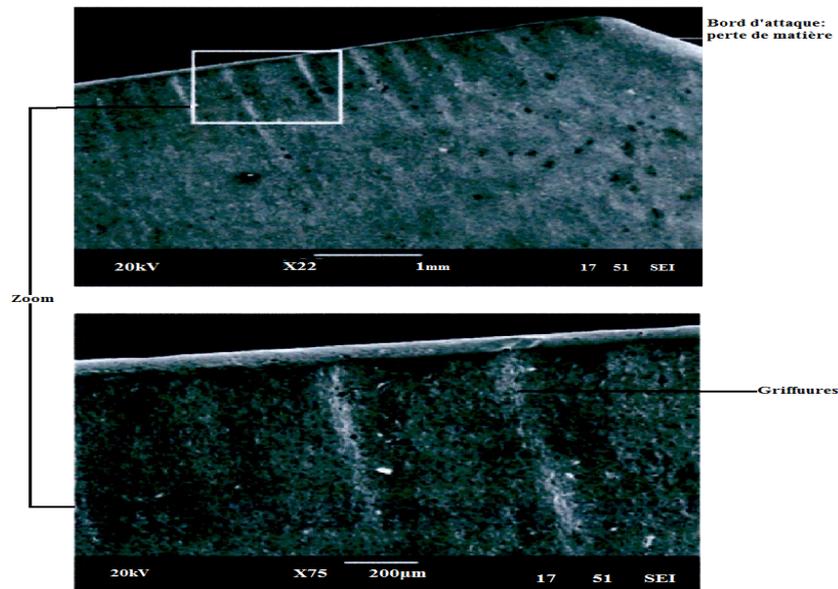
#### V.3.1 Mécanisme d'érosion abrasive :

Sur le bord d'attaque, on remarque sur nos ailettes la disparition d'une partie de la matière (**Figure V.11**), ce phénomène est encore plus prononcé dans le cas de l'ailette de 9<sup>ème</sup> étage (**Figure V.12**).



**Figure V.12 :** Aspect macrographique de la surface d'usure de 9<sup>ème</sup> étage.

D'après la bibliographie [6], ce type d'usure est régi par le mécanisme d'érosion abrasive. En effet, quand le sable abrasif frappe la surface, il roule ou glisse provoquant l'érosion par frottement ou par découpage. La matière est enlevée par démolition des bords aigus (cas de la partie rompue, figure3.1.b). Ce résultat est en accord parfait avec les observations réalisées par projection du profil.



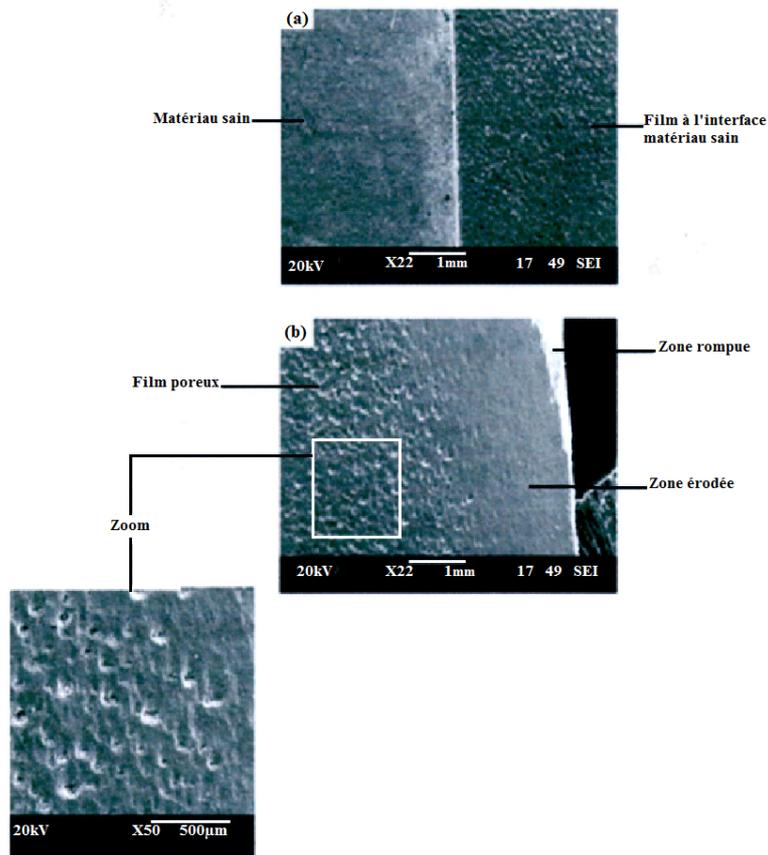
**Figure V.13 :**Caractérisation MEB de la zone endommagée par l'érosion abrasive dans du 9<sup>ème</sup> étage.

Par ailleurs, la matière peut être également enlevée par griffures en formant des cicatrices (figure11). Nous remarquons que ces griffures ont une forme angulaire centré autour du bord d'attaque cette forme peut être du à l'écoulement aérodynamique (écoulement d'air chargé de grain de sable).

### V.3.2- Fatigue de surface :

La comparaison à agrandissement identique morphologique du film producteur situé du côté du matériau sain à celle du film proche de la zone érodée, révèle une porosité assez prononcé dans le film du côté de la zone érodée (figure12). Cette porosité peut vraisemblablement être causée par les impacts répétés des grains de sable.

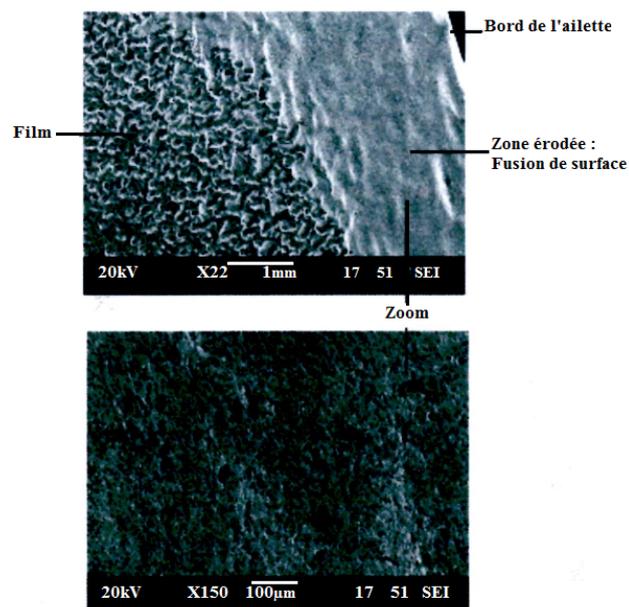
Ce mécanisme d'érosion peut s'identifier à l'usure par fatigue des surfaces roulées. En effet d'après la bibliographie [6], lorsque les particules frappent une surface avec un grand angle d'impact et une basse vitesse, la surface ne subit aucune déformation plastique. Cette surface est affaiblie par fatigue, et les particules se détachent de la surface après plusieurs impacts.



**Figure V.14 :** *Caractérisations morphologiques du film protecteur situé : (a) à l'interface matériau sain, (b) à l'interface zone érodée : usure par fatigue de surface.*

### V.3.3- Fusion de surface :

La topographie de la zone érodée peut être assimilée à un écoulement de matière. Cette morphologie spécifique est encore plus prononcée dans l'ailette du 8<sup>ème</sup> étage (figure 13). D'après la bibliographie [14], cet écoulement de matière a lieu pour de grandes déformations.

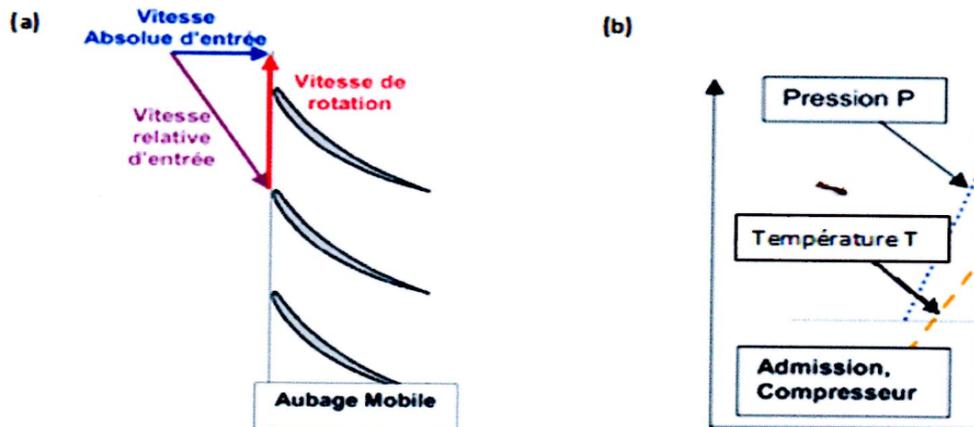


**Figure V.15 :** *Caractérisation métallographique par MEB de la surface érodée l'ailette du 8ème étage :*

Mise en évidence du phénomène fusion de surface.

### V.3.4- conclusion :

Sur la base des observations macroscopique et microscopique, nous pouvons conclure que l'effet de l'érosion va en augmentant du 6<sup>ème</sup> au 9<sup>ème</sup> étage. Ce résultat étant directement lié aux effets des sollicitations mécaniques, thermiques et de pression.



**Figure V.16** (a) Profil des vitesses sur les ailettes, (b) Profil de pression et de température dans le compresseur.

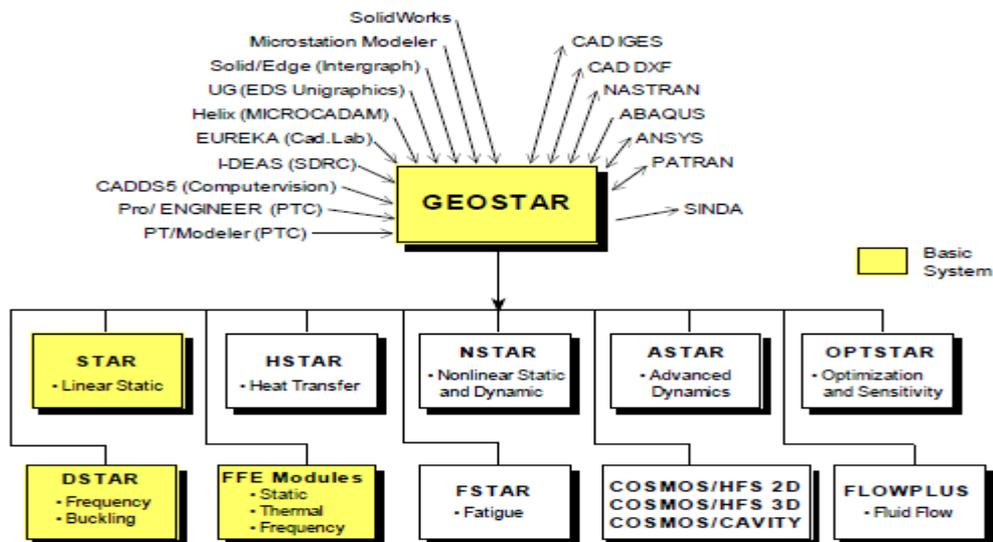
#### **V.4-simulation numérique avec COSMOS/M :**

L'utilisation d'outils de simulation numérique présente aujourd'hui une autre alternative très Économique. Elle permet d'étudier tous ces phénomènes dans un temps réduit. De plus la Simulation de phénomène étudié donne accès à des grandeurs inaccessibles par l'expérience, Comme la distribution de la température, la vitesse de déformation ou les contraintes dans la Pièce usinée et dans l'outil.

Bien qu'il y ait aujourd'hui plusieurs facteurs scientifiques et techniques (Algorithmes de Calcul, matériel informatique très puissant. . .) qui permettent d'avoir la possibilité de Développer des outils fiables de simulation de la coupe, les codes de calcul actuels restent Encore simplistes et incapables de donner des résultats précis. Un des problèmes vient du Manque d'une modélisation suffisamment fine des comportements des matériaux et du Comportement tribologique des interfaces caractérisant le contact outils-matière.

##### **V.4.1.Présentation de logiciel COSMOS/M :**

COSMOS/M est un système fini complet, modulaire, d'un seul bloc d'élément Développé par Structural Research et Analysis Corporation (SRAC) pour des PCs et des Postes de travail. Le programme inclut des modules pour résoudre des problèmes structuraux Statiques et dynamiques linéaires et non linéaires, en plus des problèmes de transfert de Chaleur, de caractéristiques aérodynamiques, d'électromagnétiques et d'optimisation. Les Modules pour des options spéciales d'analyse telles que la fatigue sont également disponibles. Le système est constamment développé et maintenu en employant des techniques du dernier Cri et des possibilités à jour de matériel [15].



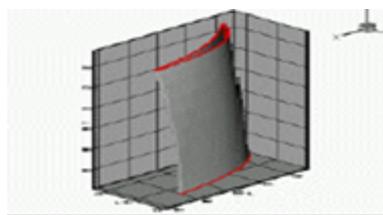
### Options prolongées d'analyse :

GEOSTAR fournit toutes les commandes nécessaires de définir et exécuter tous les types d'analyses disponibles dans le paquet de COSMOS/M.

### V.4.2.Modélisation :

Vous pouvez établir votre géométrie directement dans COSMOS/M ou vous pouvez employer le DAO de favori ou le système de modélisation plein et exportent la géométrie vers COSMOS.

La liste complète de COSMOS/M de commandes géométrie-connexes le rend possible à rapidement et exactement créent, modifient, énumèrent, suppriment, reprennent, sélectionnent et identifient les entités géométriques. Les entités géométriques dans GEOSTAR incluent des keypoints, des courbes, des surfaces, des volumes, des découpes, des régions, des polyèdres et des pièces. Ces entités peuvent être combinées et employées pour créer les modèles complexes.



**Figure V.16 : ailette profilé**

Dans notre étude on va s'intéressé a la modélisation de la partie supérieure de l'ailette (du 9 étage) qui encaisse le plus de contraintes et qui est la plus sensible (vu les résultats expérimentales trouvé) :



**Figure V.17 :** partie supérieure de l'ailette étudiée.

**Génération de maille (discrétisation par éléments fini):**

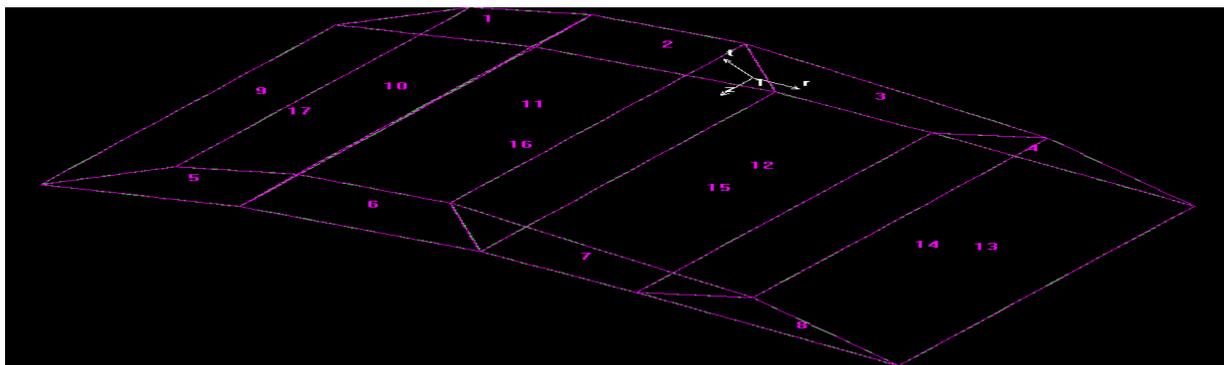
La génération de maille est des commandes traversantes simples et puissantes traitant une, deux, et modèles tridimensionnels. Les commandes de maillage actionnent les entités géométriques dessus prédéfinies pour créer une maille finie d'élément. Le degré de contrôle du processus de maillage est déterminé par l'utilisateur par une série de commandes. Des régions multi-reliées complexes, en particulier, peuvent être facilement engrenées utilisant les entités de découpe et de région. Les éléments 3D peuvent être produits l'expulsion, en balayant, en glissant ou en traînant les 2D éléments. En outre, le maillage de la surface 3D complexe et des géométries pleines est également possible utilisant les possibilités 3D de maillage automatiques puissantes de COSMOS/M. La densité de maille peut être entièrement commandée dans tout le modèle.

Pour simplifier plus loin la modélisation et le maillage des problèmes complexes, le dispositif « en esclavage » peut être employé pour engrener différentes parties du modèle séparément, Même utilisant différents types d'éléments au besoin, et puis les collent ensemble pour l'analyse.

**V.4.3. Evaluation de la simulation:**

COSMOS/M peut affiché les résultats d'analyse de façon claire et rapide sur le plan structurel, thermique, de l'usure, fluide ou magnétique, ainsi qu'en rapport avec toute autre application, ou les valeurs et les résultats sont associé à leurs éléments fini u nœuds respectifs.

**V.4.3.1. Le modèle étudié :**



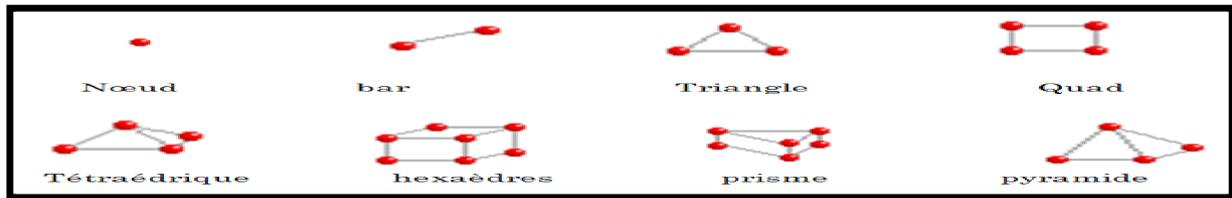
**Figure V.18 :** les surfaces de la pièce étudiée .

**V.4.3.2. Maillage de la pièce :**

**Choix du type de maillage :**

**Maillage structuré (quadra/hexa) :**

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à mono bloc ou multi bloc



**Figure V.19 :** Type des éléments de maillage.

Il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

➤ **inconvénients**

- Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de quelques types de maillage (Maillage non structuré).

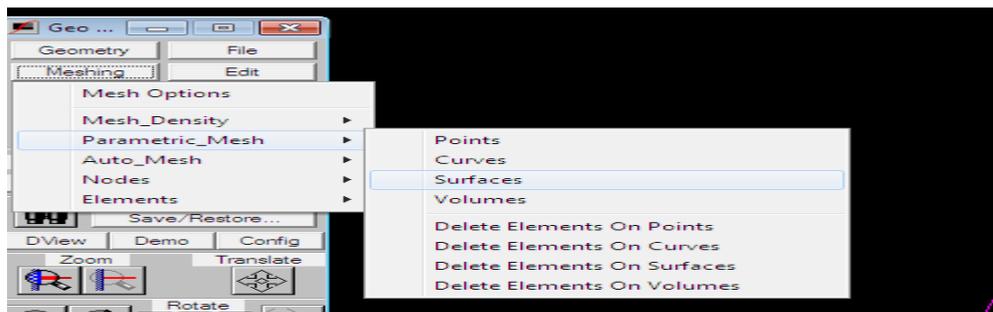
**Techniques de Génération du Maillage :**

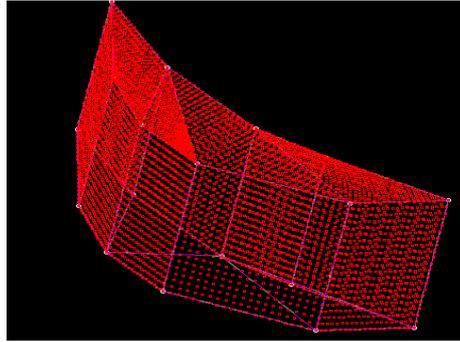
Pratiquement valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

Nous pouvant résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne Qualité des éléments.
- Assurer une bonne Résolution dans les régions à fort gradient.
- Assurer un bon Lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable)

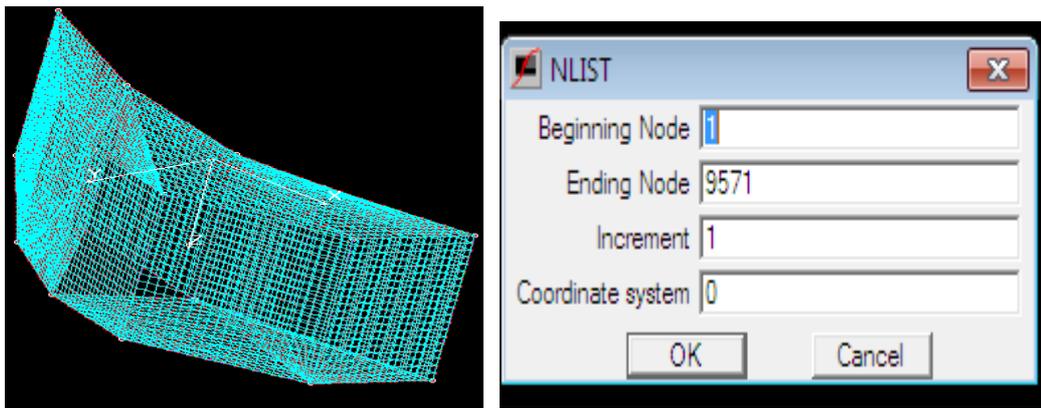
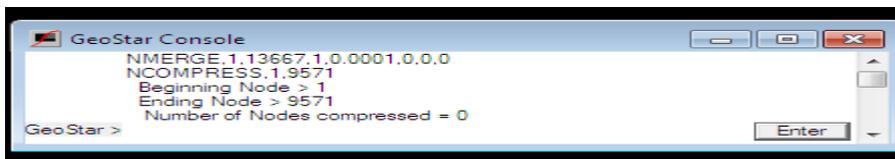
Dans notre étude en utilise un maillage quadratique (structuré) :





**Figure V.20** : la partie supérieure de la pièce avec maillage (9571noeds)

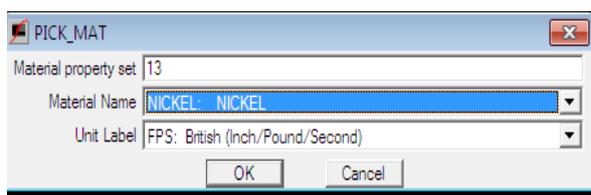
Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratique de lisser le maillage pour cela la commande suivante est importante pour raffiné notre modèle :



**Figure V21** : raffinage du modèle

#### V.4.3.3. Spécification des propriétés mécanique de matériaux :

La comparaison des valeurs expérimentales à celle des nuances proposées dans la bibliographie [6], a permis d'identifier notre alliage comme étant un superalliage multi-constitués de désignation Inconel 718 à base de Nickel avec 55.661% , on se servira donc de Nickel comme le matériaux principale dans notre études vu que c'est le matériaux principale de la composition de l'inconel718 et ses propriétés sont prises à partir de la bibliothèque de notre logiciel.



Label	Name	Temp/BH_Cr	Value
1	EX	0	2.400000e+010
1	NUXY	0	3.000000e-001
1	MPERM_R	0	1.000000e+000
2	NUXY	0	3.000000e-001
2	GXY	0	1.560000e+010
2	MPERM_R	0	1.000000e+000
9	NUXY	0	3.000000e-001
9	MPERM_R	0	1.000000e+000
A 10	EX	0	3.100000e+007
A 10	NUXY	0	3.100000e-001
A 10	GXY	0	1.100000e+007
A 10	ALPX	0	9.200000e-006
A 10	DENS	0	8.000000e-004
A 10	C	0	4.200000e+001
A 10	KX	0	5.800000e-004
A 10	MPERM_R	0	1.000000e+000

#### V.4.3.4.Applications des conditions aux limites (bondery conditions) :

Nous considérerons que l'extrémité de la pièce est liée à la structure, donc rigides et immobiles (encastrement de l'extrémité).

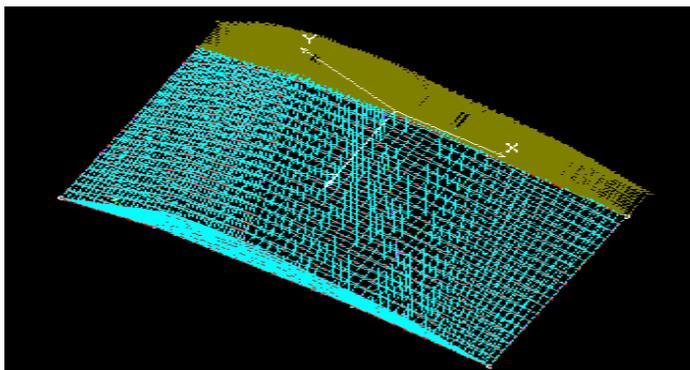
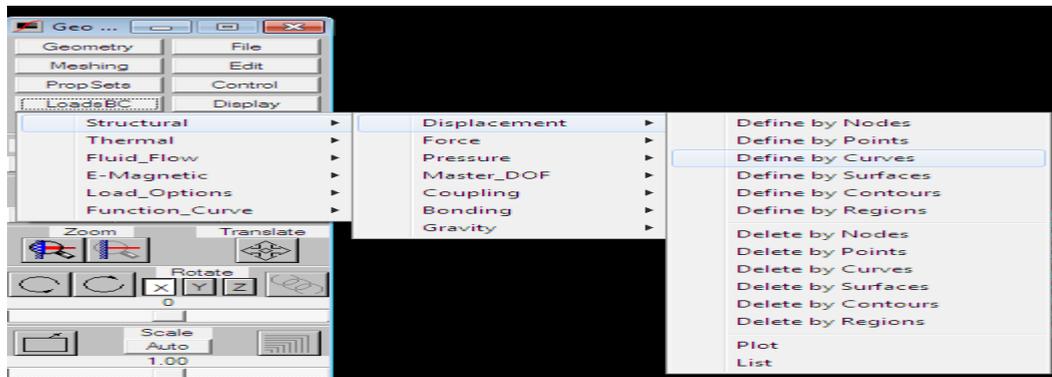


Figure V21 : application de conditions aux limites(encastrement)

#### V.4.3.5. Application des forces (pression) :

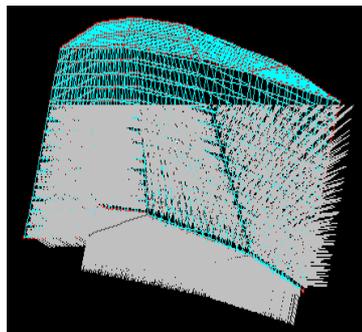
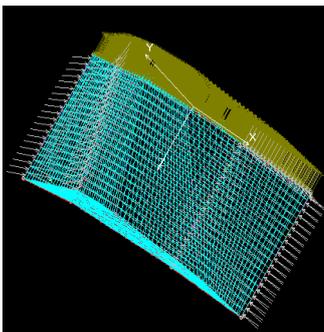
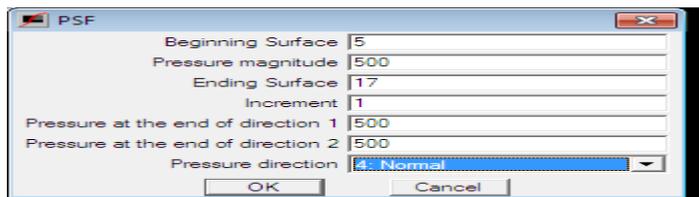
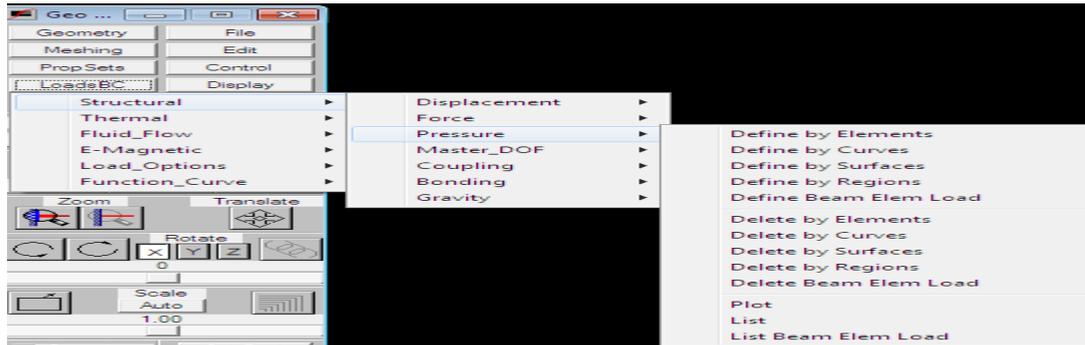
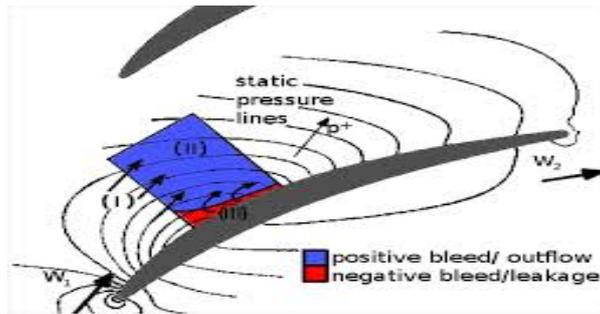
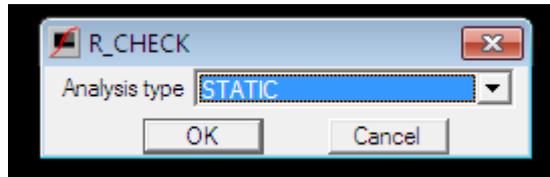


Figure V22 : application de force de pression

#### V.4.4.Analyse :

Nous considérerons des analyses linéaires de charge statique et de fréquence pour ce modèle. D'abord, l'analyse statique linéaire sera exécutée. Vous pouvez accéder à l'A\_STATIC (analyse > CHARGE STATIQUE > des options d'analyse statique) pour spécifier les détails de l'analyse et pour allumer les drapeaux nécessaires. Dans cet exemple toutes les valeurs par défaut seront employées ;

Panneau d'I.Geo : Analyse > CHARGE STATIQUE > analyse statique courue

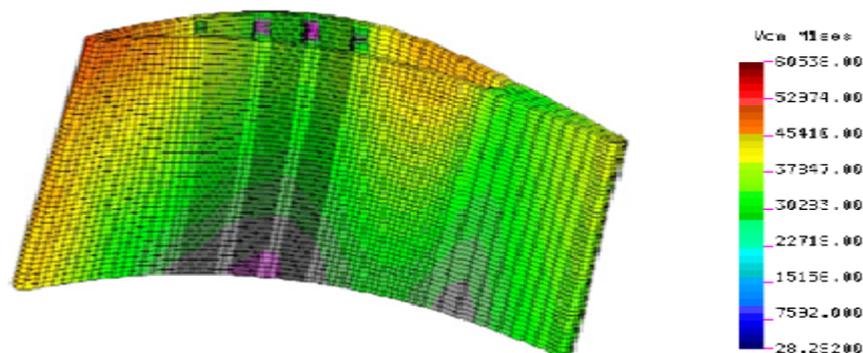


Maintenant, la configuration est terminée et le modèle est prêt pour l'analyse :

La commande R\_STATIC exécute l'analyse statique.

### Validation des résultats :

Résultats de visualisation d'effort(sous pression) :



**Figure V23** : déformation suivant z.

Il existe plusieurs zones rouges où la contrainte est la plus importante, il est possible de demander de localiser la contrainte la plus forte dans la pièce.

-L'évolution de la déformation du pied vers la tête est globalement la même pour les ailettes des trois étages.

-L'évolution de la déformation présente d'abord des stades du pied jusqu'à la tête Ce résultat est logique puisque la géométrie de la pièce (profile...) change de bas en haut ainsi la résistance au charge change.

-L'évolution de la déformation présente un maximum à la partie supérieure de la pièce qui correspond à l'analyse réalisée par l'expérimentale.

Ainsi le centre de l'ailette est aussi gravement touché vu mais L'ailette dans ce cas est revêtue par le film carbure de tungstène, conçu et appliqué justement pour protéger l'ailette des endommagements.

Ce résultat est conforme aux observations expérimentales qui en ces point révèlent un endommagement (érosion).

## CONCLUSION GENERALE

Le turboréacteur a permis aux avions de dépasser les 900 km/h. C'est un type de propulseur de moins en moins utilisé au profit du turbofan moins bruyant et plus économique donc mieux adapté aux avions de ligne notamment. Sous l'effet de différentes sollicitations, certains composants s'usent.

L'endommagement est l'apparition dans un matériau de dommages causés par l'usure ou une attaque physique ou chimique. Il conduit à une dégradation de ses capacités physiques pouvant conduire à la rupture ou à une simple usure.

Les différents composants d'un turboréacteur peuvent subir divers types d'endommagement. Parmi ces composants, les ailettes compresseur qui ont fait l'objet de cette étude, elles sont soumises à des contraintes diverses engendrant des dommages comme :

- The DENT (une rupture qui peut être provoquée par choc « FOD : objet externe ou un débris d'un autre composants » ;
- De l'érosion causée par le sable ou toute autre particule contenue dans l'air.

Notre étude a porté sur la caractérisation des pièces endommagées, qui a pour but de connaître les mécanismes d'endommagement, et de leur survenance à différentes échelles macroscopique et microscopique. Nous avons utilisé une méthode de contrôle non destructive, Il s'agit de l'examen par courants de Foucault, et ressuage. Ce travail nous a permis de formuler un diagnostic sur les types de mécanismes mis en jeu dans l'endommagement de deux types d'ailettes équipant les turboréacteurs de moteur d'avions.

Nous pouvons dire que les résultats que nous avons obtenus nous ont permis de constater l'évolution de l'érosion aux niveaux des ailettes, en fonction de différentes sollicitations, mécaniques et thermiques. On peut ajouter à cela les impacts des particules de sable qui sont concentrées sur une surface, induisant ainsi une usure plus importante.

Je peux dire que l'étude expérimentale m'a permis d'acquérir certaines connaissances au niveau de la base technique (H400) en plus j'ai eu l'occasion de faire certaines manipulations avec des instruments de mesures et effectuer des essais non destructifs. Le manque de temps ne m'a pas permis de faire plus d'expériences maintenance de turboréacteur.

la modélisation m'a permis de faire connaissance et d'acquérir une certaine manipulation d'un logiciel COSMOS/M performant utilisé dans le domaine de l'aéronautique pour valider mes résultats le manque de temps et de maîtrise ne m'a pas permis de faire plus d'analyses.

L'objectif qui a été fixé initialement lors de cette étude concerne :

- La caractérisation d'endommagement par fatigue plus spécialement face à l'érosion des ailettes compresseur HP du réacteur CFM56-7B.

Cet objectif est atteint à travers un ensemble d'actions concentrées essentiellement sur la détermination des caractéristiques propres du matériau (composition chimique, morphologie)

et la caractérisation microscopique du faciès d'usure et de rupture et une validation travers une petite modélisation sur une partie de la pièce.

Nos travaux ont permis de dégager un certain nombre de résultats, à savoir :

- Caractérisation des ailettes érodées du compresseur HP.
  - Après une analyse chimique on a obtenu l'identification d'un superalliage à base de nickel de désignation AFNOR NC<sub>19</sub>FeNb ;
  - La caractérisation microstructure a révélé une structure à grains de taille hétérogène avec présence de dépôt ségrégué au niveau des joints de grains ;
  - La diffraction des rayons X a révélé une phase principale qui est le nickel ainsi que la cristallisation des phases Ti<sub>3</sub>AlC et CrC ;
  - Les caractérisations macroscopique ont révélé une usure par érosion située dans la partie supérieure de l'ailette qui s'accroît du 6<sup>ème</sup> jusqu'au 9<sup>ème</sup> étage. Cette dernière ailette comporte également des rayures dont la largeur est estimée à 0,015 inch.
  
- Les caractérisations microscopiques ont révèlent :
  - Une perte de matière sur le bord d'attaque qui est due à une érosion abrasive ;
  - Une porosité importante signifiant une fatigue de la surface ;
  - Un écoulement de matière nous renseignant sur une fusion de surface.

### **Evolutions futures ? Grande capacités de tolérance aux dommages, interaction fatigue /corrosion composites (Expériences acquises à partir des accidents) :**

⇒ Domaine d'application de la fatigue et tolérance aux dommages en aéronautique.

\_Garantie d'une tenue à la fatigue suffisante pour diminuer la probabilité d'avoir des imprévus durant toute la vie de l'avion.

\_Etudes des chemins d'efforts multiples.

\_Etablir un programme d'inspections détaillé pour garantir que tout endommagement présent dans la structure ne se développera pas (sous chargement fatigue) jusqu'à atteindre sa limite.

⇒ Ceci signifie que les structures devraient :

\_Utiliser les matériaux les mieux appropriés en regard du concept.

\_Être pensées pour avoir une bonne endurance (attention aux spécificités géométriques).

\_ Etre conçues suivant le concept « fail-safe ».

Ce travail effectué, m'as permis de connaître et d'utiliser du matériels de recherche. Cette étude, entre autres m'as permis d'acquérir des connaissances en aéronautique et un savoir de recherche au niveau du laboratoire, en plus du travail en équipe.



## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Technical data documentations CFM56-7B turbofanengine, 2010/2011.
- [2] Guide technique de base d'Air Algérie 2012.
- [3] Expertise erosion CFM (Air Algérie) 2008.
- [4] Endommage du verre par impact de sable : évaluation du volume érodé, verre. Vol 9, n°3, 2003.
- [5] Wada and Watanbe, sand erosion in hydraulic machinery, 1995.
- [6] Engineering Tribology, Elsevier, Amsterdam, 1995.
- [7] Cavitation erosion mechanisms and quantitative evaluation based on erosion particles, Wear 249.
- [8] E. Bardal, Tapir, Trondheim (In Norwegian), 1985.
- [9] Technique de l'ingénieur.
- [10] Eroding particle characterization and the effect of particle size and shape on erosion, Wear (138) , 1990.
- [11] Influence combinée des contraintes résiduelles et de l'état de surface sur le comportement monotone et cyclique des matériaux composites à matrice métallique, thèse CNAM, 1994.
- [12] Guide des essais dureté [MODE D' EMPLOI pour FRANK DUROMETRE FRANKOSKOP 38532 1978].
- [13] Technique de l'ingénieur traitements des superalliages.
- [14] Thèse : Transport et stockage des débris problématique d'endommagement des pipes par érosion de sable et par hydrogène, présenté par Akram El Hussein, 2010.
- [15] cosmos usersGuide

