

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère De L'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique
Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Génie mécanique

Thème

**Influence de l'érosion sur les grilles d'aubes
d'un compresseur axial d'une turbine à gaz**

Proposé par :
Mr. Djamel BOUHALI
Directeur Général de
GE-Energy

Dirigé par :
Mr. M.BEN BRAIKA

Etudié par :
SEKSAF Med Rafik

PROMOTION

Juin 2013

10 Avenue Hassen Badi, B.P.182, El-Harrach, Alger.

ملخص:

العمل المقدم في هذه الدراسة النهائية للمشروع هو تحليل تآكل للشفرة لرفوف توربينات الغاز المحورية الضاغطة بفعل حبيبات الرمل ونرى آثارها على أداء الجهاز، ثم محاولة إيجاد حل لزيادة العمر الافتراضي للشبكة وتطبيق مواد طلاء لمنع التآكل. هذا الطلاء عبارة عن طبقة متجانسة من نيتريد التيتانيوم (القصدير) أو طلاء متعدد الطبقات ومع ذلك، البيانات من الدراسات من طلاء متعدد الطبقات يمكن أن يكون لها نتائج متناقضة على ما يبدو بسبب تشكيلة واسعة من أنظمة الطلاء وطلاء أبنية.

كلمات مفتاحية: توربينات الغاز، ضاغط، تآكل، طلاء.

Résumé :

Le travail présenté dans le cadre de ce projet de fin d'étude, est d'analyser le phénomène d'érosion sur les grilles d'aubes d'un compresseur axial d'une machine de turbine à gaz et de voir ces effets sur les performances de la machine, ensuite d'essayer de trouver une solution pour augmenter la durée de vie de la grille par application des revêtements et des matériaux pour combattre l'érosion. Ces revêtements sont soit d'une couche monolithique ou bien des multicouches de nitrure de titane (TiN). Cependant, les données des études de revêtement multicouche peuvent présenter les résultats apparemment contradictoires en raison de la grande diversité des systèmes de revêtement et architectures des revêtements étudiés.

Mots clés : Turbine à gaz, compresseur, érosion, revêtement.

Abstract:

The work presented in this final project is study of the sand erosion of the blade racks axial machine gas turbine compressor and see the effects on the performance of the machine, then try to find a solution to increase the lifetime of the grid and try to apply coating materials to prevent erosion. These layers are monolithic or multilayer coating of titanium nitride (TiN). However, data from studies of multilayer coating can have the seemingly contradictory results because of the wide variety of coating systems and architectures coatings studied

Keywords: gas turbine, compressor, erosion coating.

Dédicaces

Chaleureusement je dédie ce modeste travail

A l'âme de mon cher père et à celui de ma chère grand-mère

A ma chère mère pour son amour et les sacrifices sans limites qu'elle a consenties pour que je réussisse

A ma chère tante Horia pour son encouragement et son soutien durant toutes les années pour avoir mon titre d'ingénieur.

A mon frère et mes sœurs

A toute la familleSEKSAF

A Amina LAKEHAL pour son encouragement et son soutien dans la société GE

A mes amis et camarades d'études

A toutes les personnes qui me connaissent de près ou de loin...

Remerciements

Je remercie DIEU tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et le pouvoir de réaliser ce modeste travail.

Je remercie aussi ma famille, à qui revient la gloire de m'avoir éduqué, encouragé et soutenu.

Mes sincères remerciements vont à mon promoteur Mr.Mohamed BEN BRAIKA, et Le directeur de Général Electricénergie Mr.Djamel BOUHALI d'avoir dirigé et conseillé durant mon travail.

Je remercie également les membres du jury, qui ont accepté de discuter et d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et qui n'ont pas manqué de me prodiguer leur aide pendant mes années d'études.

Un grand merci et je précise bien un grand merci pour Amina LAKEHAL qui est une Sales Manager chez GE, et c'est grâce à elle que j'ai abordé ce Modestesujet, elle m'a facilité la tâche dans la société durant mon travail.

Par la même occasion, je remercie vivement tous ceux qui ont participé au bon déroulement de mon stage par leur soutien et conseils, je cite en particulier :

Monsieur Younes KECHIR, ingénieur chez GE, Monsieur Mohamed BOUNEDJAR, Lead ingénieur cher GE, sans oublier Amine THAMI, Abdelilah CHAHBI, Lyes, Djouadi, et tous les collèguesde la centrale de HassiRmel ou bien la centrale de Boufarik.

Je remercie enfin tous mes amis et camarades de promotion,je cite en particulier :Oussama, Youcef, Mohamed, Abdelberainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la bonne réalisation de ce modeste travail.

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale.....	15
I.1 Introduction	17
I.2 Classification des turbines à gaz	18
I.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	18
I.4 Description de la turbine à gaz	19
I.4.1 Le système d'aspiration	19
I.4.2 Section compresseur.....	20
I.4.3 Section Combustion	21
I.4.4 Section turbine.....	22
a) Corps de turbine	22
b) Tuyère 1er étage	22
c) Tuyères 2ème étage.....	22
d) Roues de turbine.....	23
I.4.5 La section échappement.....	23
a) Plenum d'échappement.....	24
b) Caisson d'échappement.....	24
I.5 Etude théorique de la turbine à gaz.....	24
I.5.1 Turbine à gaz à cycle simple.....	24
a) Cycle de Brayton	24
b) Cycle thermodynamique d'une turbine à gaz.....	24
c) Etude du cycle réel.....	26
II.1 Analyse bidimensionnel d'un étage de compresseur axial.....	29
II.2 Diagramme de vitesse pour un étage de compresseur axial.....	29
II.3 Analyse thermodynamique d'un étage de compresseur axial	31
II.4 Perte d'énergie dans un étage compresseur	32
II.5 Caractérisation des Triangles de Vitesses :	32
II.5.a Le coefficient de débit.....	32
II.5.b Degré de réaction	32
II.5.c Le coefficient de charge	33
III.1 INTRODUCTION	35
III.2 Mécanique de l'érosion.....	35
III.3 L'Erosion des matériaux ductiles	36
III.4 Erosion des matériaux fragiles.....	38

III.5 Facteurs influençant l'érosion.....	43
III.5.a vitesse critique	43
III.5.b Angle d'impact	44
III.5.c Taille de l'érodant.....	45
III.5.d La concentrations de l'Erodant	46
III.5.e La forme de l'Erodant	47
III.5.f Dureté du matériau cible et érodent.....	49
III.6 L'effet de l'érosion sur les grilles d'aubes	50
IV.1 INTRODUCTION.....	53
IV.2 Le ressuage	53
IV.2.1 Mise en œuvre.....	54
a) Condition d'application.....	54
b) Préparation	54
c) Délais préliminaire (15 à 20 min.).....	54
d) Sécurité	54
IV.2.2 Avantages et inconvénients.....	54
IV.3 Le courant de Foucault	55
IV.4 Inspection visuelle à distance (RVI)	56
Vidéo et image Boroscopique	56
IV.4.1 Objectifs et des attentes.....	56
IV.4.2 Évaluation des dommages.....	57
IV.4.3 Aubes et stators de compresseurs	57
Informations générales sur le site	57
Photos de l'inspection.....	58
V.1 Introduction	63
V.2 Matériaux résistants à l'érosion	63
V.2.1 Le nitrure de titane (TiN)	64
V.2.2 Nitrure de chrome (CrN).....	64
V.2.3 Carbures/nitrures tertiaires et quaternaires	64
V.2.4 Diamond like Carbon (DLC).....	66
V.2.5 Discussion	66
V.3 Propriétés des revêtements multicouches.....	66
V.3.1 Microscopies optique	67
V.3.1.a Coupe transversale morphologique	67
V.3.1.b Épaisseur du revêtement.....	68
V.3.2 Microscopie électronique à balayage (MEB).....	69

V.3.3 Nombre de Dureté moyenne de Vickers (VHN).....	71
V.3.4 Résistance à la rupture	73
V.3.5 Analyse des contraintes par diffraction des rayons X	74
V.3.6 Rugosité	75
V.3.7 Cicatrice de l'érosion multicouche	76
V.3.8 Comparaison aux propriétés de revêtement.....	78
V.4 Propriétés des revêtements de couche intermédiaire.....	78
V.4.1 Durabilité	78
V.4.2 Perte de masse	79
V.5 Analyse détaillée de l'érosion des revêtements multicouches	81
V.5.1 Tests d'érosion avec Erodant Alumina.....	82
V.5.2 Tests d'érosion avec Erodent Quartz.....	83
V.5.3 Tests d'érosion avec Erodent de verre	84
V.6 L'érosion des revêtements de couche intermédiaire.....	86
V.6.1 Tests d'érosion avec Erodant Alumina	86
V.6.2 tests d'érosion avec Erodant de verre	88
V.6.3 Résumé de revêtement intermédiaire	90
V.7 Revêtement utilisé par General Electric	91
Conclusion.....	93
BIBLIOGRAPHIE	94

TABLE DES FIGURES

Figure I.4 :Le compresseur axial de la turbine.

Figure I.5 :L'extraction de l'air du dixième étage.

Figure I.6 :La chambre de combustion.

Figure I.7 :La distribution de l'air dans la chambre de combustion.

Figure I.8 :Tuyère 1^{er} étage.

Figure I.9 :Tuyères 2^{ème} étage.

Figure I.10 :Roues de turbine.

Figure I.11 :Schéma simple d'un circuit ouvert de turbine à gaz.

Figure I.12 :Diagramme P-V et T-S de Cycle de Brayton.

Figure I.13 : La relation entre η et r .

Figure I.14 :Diagramme T-s pour un cycle réel sans pertes de pression

Figure I.15 :Influence de la température ambiante sur les performances de la turbine

Figure I.16 : Puissance utile de la turbine à gaz par rapport à l'altitude d'installation.

Figure I.16 :Influence de l'humidité relative.

Figure II.1 :Etage de compresseur axial.

Figure II.2 : Triangle de vitesse pour un étage de compresseur axial.

Figure II.3 :Diagramme de Mollier pour un étage de compresseur axial.

Figure II.4 :Asymétrie des diagrammes de vitesse pour des réactions plus ou moins de 50%.

Figure II.5 :Caractéristique simplifiée d'un étage de compresseur en mode Hors-design.

Figure II.6 :Augmentation de pression dans un étage.

Figure II.7 :Nomenclature utilisée pour caractériser une grille d'aubes.

Figure II.8 :Forces et vitesses d'un étage de grille d'aube.

Figure II.9 :La figure montre la force de portance L et de traînée D exercée sur la lame.

Figure II.10 : Les forces axiales et tangentielles exercées par la durée de l'unité d'une Pale sur le fluide.

Figure II.11 :Evolution du rendement d'une grille de compresseur avec l'angle de l'écoulement moyen.

Figure III.1 :Représentation de particules tranchante d'un matériau ductile [5] de Finnie.

Figure III.2 :Croquis de déformation ductile et la formation des plaquettes. Modifié à partir Levy, à la page 21 [54].

Figure III.3 : Taux d'érosion relative en fonction de l'angle d'incidence pour les matériaux fragiles et ductiles. Inspiré par Levy [54].

Figure III.4 : Influence du spin sur le mécanisme de rupture ductile [28].

Figure III.5 :La formation de fissures latérales dans un matériau cassant. Adapté d'Errico .21

Figure III.6 :Les étapes de la rupture fragile [21].

Figure III.7 :Schéma d'un demi-espace symétrique montrant les zones de tension et de compression d'un site d'impact. Adapté de Fischer-Cripps et al. [57].

Figure III.7 :Schéma d'états de contraintes et de fissures dans un matériau fragile après l'impact [54].

Figure III.8 :Variation du taux d'érosion des couchés et non couchés Inconel 718 avec un angle d'impact: $T = 538^{\circ} \text{C}$, $V = 305 \text{ m/s}$, 20g masse chromite .1

Figure III.10 :Représentation des vitesses minimale et maximale érosion critiques.

Figure III.11:Superposition des distributions de taille des particules erodant.

Figure III.12: Images MEB montrant le grain 240 (56 microns) d'éroder alumine angulaire.

Figure III.13: Images MEB montrant l'éroder quartz broyé.

Figure III.14: Images MEB montrant le n° 13 (63 microns) perle de verre éroder.

Figure III.15 Les particules de sable pénètrent vers la gauche et frappent l'aube de compresseur / turbine à différents angles. Adapté de Tabakoff.28

Figure III.16. Des dommages sur le bord d'un acier inoxydable (AM355) premier blisk étage du compresseur due à l'érosion de particules solides. GE série T-700 blisk n° de série GWHTFANG.

Figure V.1: Dureté de TiAlN en fonction de la stœchiométrie [123].

Figure V.2 :Les structures cristallines de (gauche) nitrure de titane (structure de NaCl)

Figure V.3: Images microscopiques optiques transversale en coupe du noyau (Ti N / Ti) revêtements multicouches déposé sur du verre (en haut) et AM355 substrats (en bas).

Figure V.4 : Images MEB des sections polies de 2L1.25v%

Figure V.5 : Images MEB des sections polies de 2L1.25v% déposés sur verre a) 20.000 x et b) 40,000 x grossissement.

Figure V.6 : Image MEB des sections polies de 2L1.25v% déposé sur du verre (en haut) et AM355 (en bas) à un grossissement de 2500x.

Figure V.7 : Images MEB des sections polies (2L1.25v%)

Figure V.8 : Images MEB des revêtements multicouches à un grossissement de 8000X.

Les images sont de (a) TiN / Ti, (b) TiN / Zr, (c) t en / Hf, et (d) TiN / Nb des revêtements multicouches.

Figure V.9 : Superposition des valeurs de dureté Vickers de la 50 grammes et 200 grammes de charges avec des barres d'erreur de déviation standard.

Figure V.10 : Microdureté Vickers en fonction du matériau de revêtement pour tiret charges de 50, 100 et 200 grammes.

Figure V.11 : Ténacité de cinq revêtements sélectionnés.

Figure V.12 : Résumé des XRD mesures de contraintes résiduelles sur le (TiN) [422] pic en utilisant un module d'élasticité de 425 GPa [141] et $\nu = 0,25$. Les barres d'erreur sont l'incertitude de régression.

Figure V.13: Rugosité de surface moyenne arithmétique des neuf principaux TiN / Ti revêtements multicouches déposée sur AM355 acier.

Figure V.14 : Moyenne surface résumé de rugosité arithmétique des neuf échantillons de carottes déposé sur du silicium.

Figure V.15a: l'image macroscopique micropuce usure cicatrice de TiN / Ti 8L5v% revêtement sur AM355

Figure V.15b: l'image macroscopique coalescence usure cicatrice de TiN / Ti

Figure V17 : Perte de masse pour le TiN/M revêtements érodées par 204 um perles de verre à 75 m / s.

Figure V18 : Perte de masse cumulative pour le TiN/M revêtements érodées par 56 um

d'alumine à 75 m/s.

Figure V19 :Perte de masse pour les 5% vol revêtements de ratio érodées par le quartz broyé à 180 m / s. La perte de masse du substrat nu est tracée à titre de comparaison.

Figure V20: Perte de masse de l'érosion de 25 g (dose unique) de 56 microns d'alumine angulaire en fonction de la configuration de la couche et la vitesse des particules.

Figure V21 :Perte de masse cumulée de 56 microns d'alumine angulaire à 75 m / s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Figure V22 : Perte de masse cumulée à partir de 138 microns d'alumine angulaire à 75 m/s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Figure V23 : Perte de masse cumulée à partir de 138 microns d'alumine angulaire à 180 m/s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Figure V24 : Perte de masse cumulée de 279 microns quartz broyé à 150 m/s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Figure V25 : Perte de masse cumulée de 279 microns quartz broyé à 180 m/s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Figure V26 : Perte de masse cumulée de 63 billes de verre de quelques microns à 180m/s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Figure V27 : Perte de masse cumulée de 240 microns de perles de verre à 180 m / s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Figure V28 : Perte de masse cumulée de 483 microns de billes de verre à 180 m / s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Figure V29: Perte de masse cumulée de 56 microns d'alumine angulaire à 75 m / s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Figure V30 : Perte de masse cumulée de 56 microns d'alumine angulaire à 180 m/s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Figure V31 : Perte de masse cumulée de 63 billes de verre de quelques microns à 180 m/s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Figure V32 :Perte de masse cumulée à partir de 204 sphères de verre de quelques

microns à 75 m / s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Figure V33: Perte de masse cumulée à partir de 204 sphères de verre de quelques microns à 180 m / s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Figure V34 : Perte de masse cumulée à partir de 483 sphères de verre de quelques microns à 75 m / s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Figure V35 : Perte de masse cumulée à partir de 483 sphères de verre de quelques microns à 180 m / s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

TABLE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Les attributs des particules Erodant.

Tableau V.1: Propriétés des matériaux en vrac de certains carbures et nitrures [118].

Tableau V.2: Identification de l'échantillon (ID) et conception d'architecture multicouche

Tableau V.3: Description sommaire des caractéristiques microstructurales des différents revêtements de base.

Tableau V.4: Analyse statistique de l'épaisseur totale du revêtement de neuf échantillons à l'aide de Clemex.

Tableau V.5: Résumé des propriétés physiques des 9 principaux revêtements.

Tableau V.6: valeurs de durabilité de l'érosion

Tableau V.7: valeurs de durabilité de l'érosion de TiN/M revêtements de perles de verre et érodent alumine à 75 m/s.

Tableau V.8: Érosion durabilité des revêtements de couches intermédiaires contre érodent à 180 m/s.

Tableau V.9: Érosion durabilité des revêtements de couches intermédiaires contre érodent à 75 m/s.

Tableau V.10: Taux d'érosion des couches intercalaires contre erodant à 75 m/s.

NOMENCLATURE

IGV :Inlet guide Vanes

CR : compresseur d'air

CC : chambre de combustion

CH : charge

TU : turbine

TE1 : turbine d'entraînement du compresseur

TE2 : turbine d'entraînement de la charge

W : Travail

Q : Chaleur [kJ/kg]

h :L'enthalpie [kJ/kg]

c_p :La chaleur spécifique à pression constante[J/mole.K]

c_v :La chaleur spécifique à volume constante[J/mole.K]

T : Température[K]

η :Le rendement du cycle idéal

r : Rapport de compression

ρ :Masse volumique[Kg/m³]

V_i : Vitesse absolue [m/s].

V_a : vitesse axiale [m/s].

W_i : vitesse relative[m/s].

φ : Le coefficient de débit.

R :Le degré de réaction

ψ : Le coefficient de charge

C_f : Coefficient de force tangentielle

L : Force de portance[N]

D : forces de traînée[N]

C_D :Coefficient de portance

C_L :Coefficient de traînée

P_m :Force maximale [N]

σ_{max} :Contraintes de compression maximale

v : Module d'élasticité du substrat

KIC :Ténacité à la rupture.

F :La probabilité de défaillance.

E^* : est le module d'élasticité réduite [GPa]

E : module d'élasticité de la particule [GPa]

N : module d'élasticité du substrat [GPa]

σ_{t-max} : Contrainte de traction maximale [N/mm²]

r : est le rayon de la particule en retrait [mm]

a : est le rayon de contact [mm]

Introduction Générale

Pendant le fonctionnement de moteurs d'avions, et plus particulièrement lors de l'atterrissage et le décollage, de grandes quantités de particules dures sont entraînées avec l'air nécessaire à la combustion. Ces particules impactent sur les surfaces métalliques du moteur, qui peuvent s'éroder ou devenir considérablement déformées. Ces écarts par rapport à la géométrie des pales idéales réduisent le rendement du moteur, augmentent la consommation de carburant et peuvent provoquer l'arrêt du moteur de fonctionner à des niveaux nécessaires pour maintenir le vol.

L'érosion est un terme qui renvoie à l'élimination lente du matériau par des moyens mécaniques, dans ce cas, il y a plusieurs impacts de particules dures. L'Air, ingéré dans les moteurs à turbine tournant à des vitesses élevées, contient souvent des particules étrangères comme du sable ou de la poussière. Ce travail se concentre sur l'érosion des premiers étages des aubes de compresseurs. En raison de l'impact de particules de sable à grande vitesse, l'érosion des particules est un problème dont souffrent concepteurs, exploitants et mainteneurs de nombreuses années. Comme les véhicules sont déployés dans des conditions désertiques, les considérations d'érosion deviennent de plus en plus importantes avec l'augmentation des vitesses de l'air, les pièces de moteur deviennent plus minces. Lorsque soumis à l'érosion, les moteurs d'avion perdent de leur efficacité, leur puissance est diminuée, l'augmentation de la consommation de carburant augmente, les vibrations s'accroissent et les durées de vie deviennent plus courtes.

Une solution commune pour traiter des dommages aux composants du moteur est d'appliquer une couche monolithique de nitrure de titane (TiN). Une recherche Très limité du domaine public a été menée pour étudier les revêtements durs multicouches pour résister à l'érosion. Ces études ont souvent abouti à des résultats apparemment contradictoires. Ce mémoire examine si la conception de revêtements multicouches peut améliorer les performances de l'érosion, et si oui, quels sont les mécanismes qui conduisent à cette augmentation de la performance. L'objectif de ce travail est donc de répondre à l'érosion des particules dures en concevant des revêtements multicouches ou des revêtements de couche intermédiaire avec une meilleure résistance à l'érosion.

Pour présenter notre mémoire, nous avons choisi de l'exposer en plusieurs chapitres :

Un premier chapitre consacré aux généralités sur les turbines à gaz et à quelques notions sur un étage de compresseur axial.

Le deuxième chapitre est une étude détaillée sur l'érosion, les facteurs influençant l'érosion et ses effets sur les grilles d'aubes.

Un troisième chapitre présente les différentes techniques utilisées pour inspecter l'érosion dans une machine.

Enfin, le quatrième chapitre traite des matériaux et les revêtements utilisés pour combattre l'érosion.

Nous terminerons par une conclusion.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES TURBINES A GAZ

I.1 Introduction

La turbine à gaz est une machine rotative qui pressurise de l'air, le mélange à un combustible et le brûle dans des chambres de combustion. Les gaz ainsi produits sont détendus au niveau des aubes d'une turbine.

Actuellement toutes les grandes turbines à gaz sont du type à écoulement axial. Au moment du démarrage les turbines à gaz sont actionnées par un moteur, une turbine à détente ou autre moyen.

I.2 Classification des turbines à gaz

Les turbines à gaz à cycle simple sont classées en cinq catégories :

- Turbines à gaz Terrestres.
- Moteur d'avion dérivative turbines à gaz ou aérodérivatives.
- Turbines à gaz industriel.
- Petites turbines à gaz.
- Micro-turbines à gaz.

L'objectif pour lequel, on utilise la turbine à gaz définit le type qu'on doit choisir. Dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi mono-arbre. Elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité). Un deuxième type, englobe les turbines à deux arbres (bi-arbres); elles ont l'avantage d'entraîner des appareils à charges variables (pompes, compresseur, ...). Elles se composent de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine, la deuxième est liée à la charge.

Une turbine à gaz à deux arbres est généralement employée pour l'entraînement de charges mécaniques, par exemple un compresseur centrifuge.

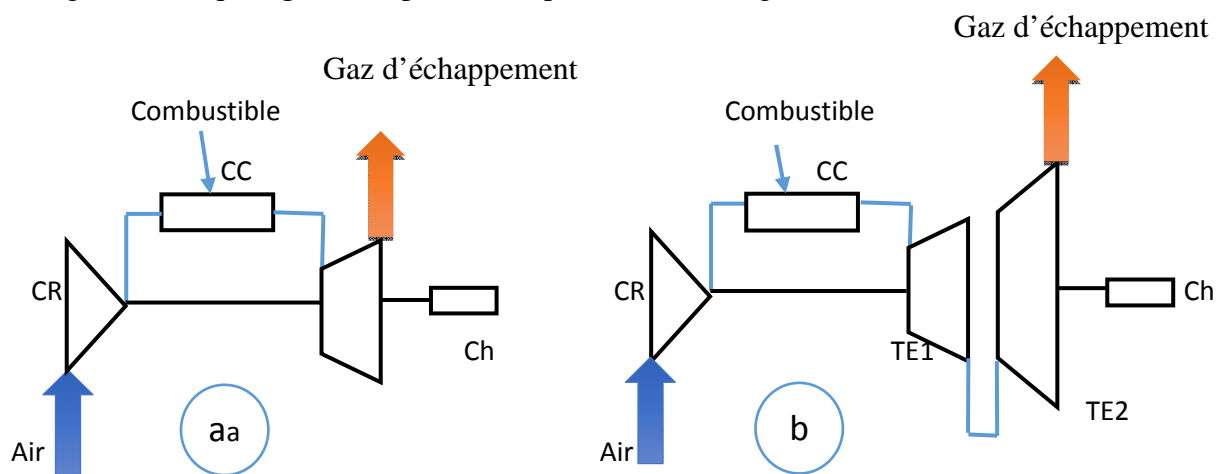


Figure I.1 Turbine à gaz : a)- à un arbre. b)- à deux arbres.

I.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante :

- elle extrait de l'air du milieu environnant.
- elle le comprime à une pression plus élevée.
- elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant

le combustible dans une chambre de combustion.

- elle achemine l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre ; ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement et, de l'autre côté, à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine.

- elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression.

I.4 Description de la turbine à gaz

Dans le cas le plus simple une turbine à gaz est constituée par un filtre d'entrée d'air, un compresseur, une chambre de combustion, une turbine de détente et le système d'échappement vers l'atmosphère.

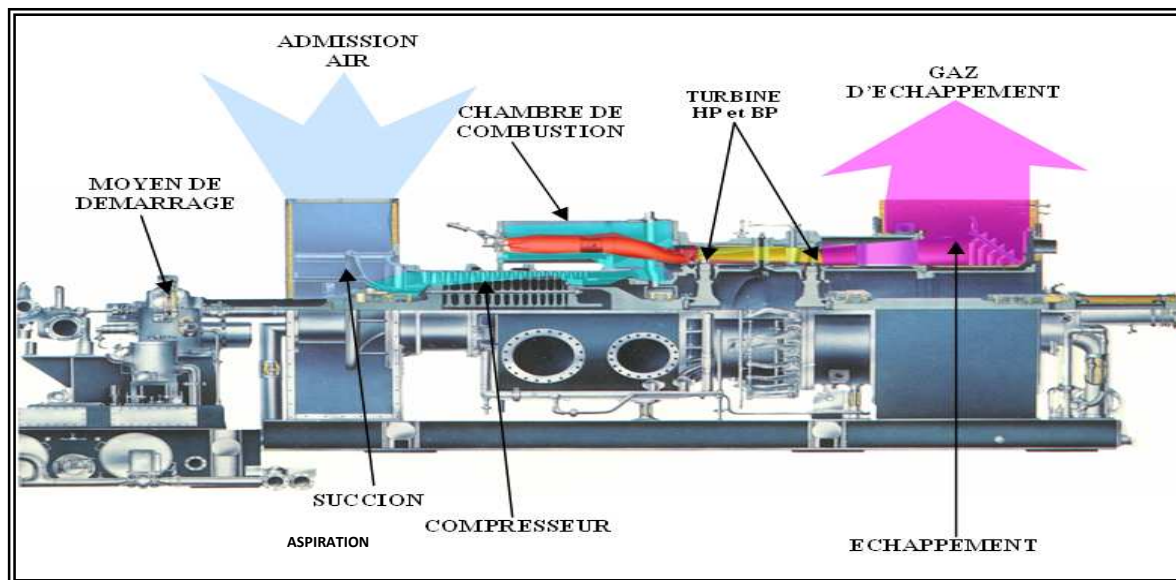


Figure I.2 Description de la turbine à gaz.

I.4.1 Le système d'aspiration

La turbine à gaz consomme une grande quantité d'air pour la combustion et le refroidissement des pièces internes. Cet air doit être filtré pour éviter la pénétration des particules qui peuvent avec le temps éroder les ailettes des rotors et stators du compresseur d'air et entraîner des pertes de performance dues aux pertes de charge au niveau du compresseur axial.

Les particules de saleté peuvent aussi colmater les orifices et passages de l'air utilisé pour le refroidissement des différentes pièces de la turbine. L'aspiration de la turbine est une enceinte, ou compartiment, qui abrite les filtres et relie au caisson d'admission de la turbine. Ce système composé d'un filtre d'air, un silencieux, un coude, des variations de section des tuyauteries. Installées en amont de la bride d'aspiration du compresseur.

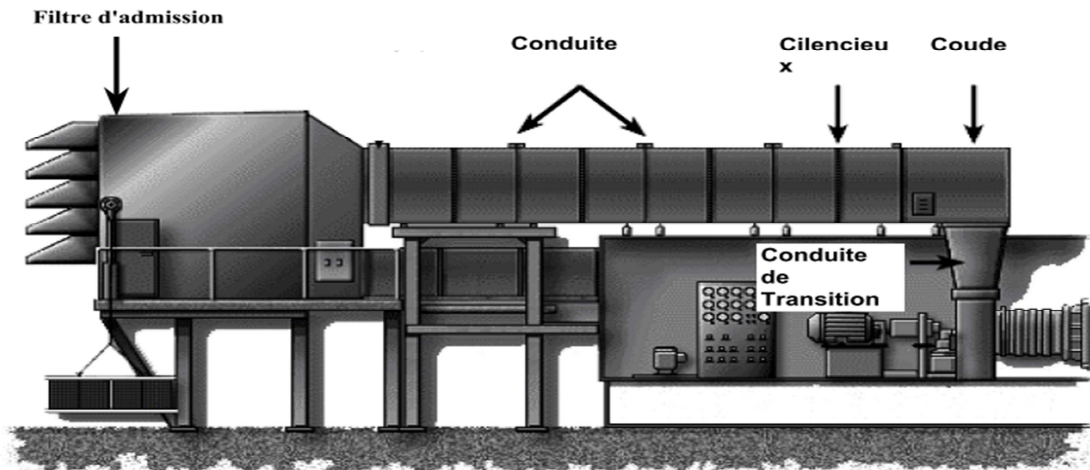


Figure 0I.3 Représentation du compartiment d'admission

I.4.2 Section compresseur

Le compresseur est du type axial à un nombre précis d'étages. Le choix de ce type de compresseur dépend du fait que ce compresseur produit des débits d'airs élevés, nécessaires pour obtenir des valeurs élevées de puissance utile avec des dimensions réduites.

Du côté de l'admission du compresseur, il y a des aubes orientables IGV, dont le but primaire est de diriger l'air fourni par le système d'aspiration vers le premier étage des aubes du rotor. Une autre fonction importante des IGV est d'assurer un comportement fluiddynamique correct du compresseur sous différents régimes transitoires de fonctionnement (par exemple, pendant le démarrage et l'arrêt). Du côté refoulement du compresseur il existe également une rangée d'aubes orientables (EGV, Exhaust Guide Vanes), qui jouent le rôle de diffuseur pour récupérer le maximum d'énergie cinétique du fluide sous forme de pression avant son arrivée dans la chambre de combustion.

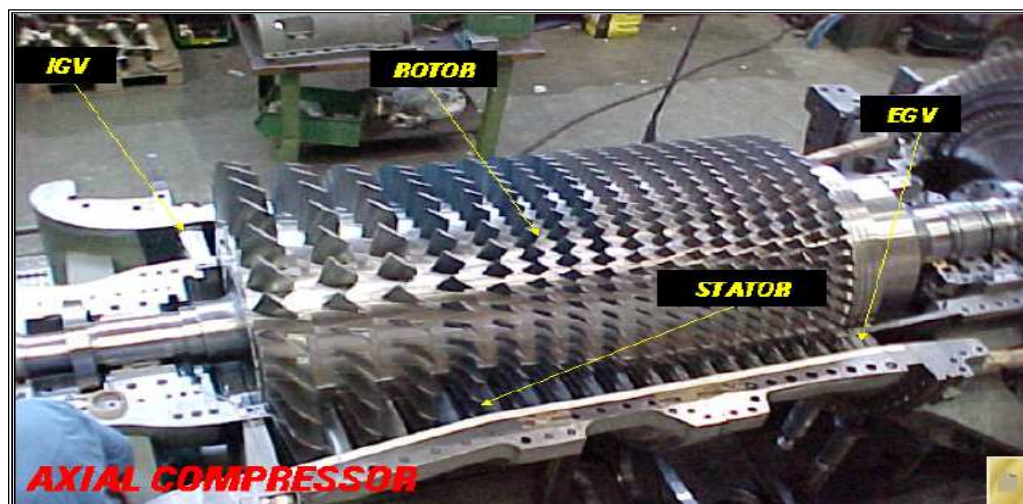


Figure I.4 Le compresseur axial de la turbine.

Le compresseur sert également à fournir une source d'air nécessaire, par l'extraction d'air du dixième étage et au refoulement, pour refroidir les parois des directrices, des aubes et des disques de la turbine, auxquelles on accède par l'intermédiaire de canaux aménagés à cet effet

Le passage des gaz chauds du système de combustion à l'admission de la turbine traverse les pièces de transition qui transforment les écoulements du gaz de chacune des chambres de combustion en un courant annulaire continu adapté à l'admission de l'anneau de la directrice du premier étage.

Au début, le processus de combustion est déclenché par les deux bougies d'allumage. Des tubes à feu croisé relient les 12 chambres et permettent à la flamme de la chambre mise à feu de se propager dans les autres chambres non mises à feu de part et d'autre. Une fois déclenchée, la combustion continue sans interruption, aussi longtemps que les conditions d'alimentation en combustible et en air de combustion sont maintenues.

I.4.4 Section turbine

La section turbine est la partie où les gaz chauds venant de la section combustion sont convertis en énergie mécanique. Cette section comprend les éléments suivants :

a) Corps de turbine

C'est l'élément structurel principal de la turbine car il contient tous les organes qui constituent la voie d'écoulement des gaz depuis les chambres de combustion à travers les roues jusqu'à l'échappement.

b) Tuyère 1ère étage

Les gaz chauds à haute pression quittant les chambres de combustion passent par une pièce de transition et sont dirigés vers les aubes de la roue HP via la tuyère 1ère étage. La tuyère comprend les segments d'aube directrice montés dans une bague de retenue, soutenue dans la veine des gaz chauds par un dispositif de fixation.

Les tuyères sont soumises à des températures très élevées ce qui nécessite leur fabrication à partir d'alliages spéciaux, elles sont aussi refroidies avec de l'air de combustion.

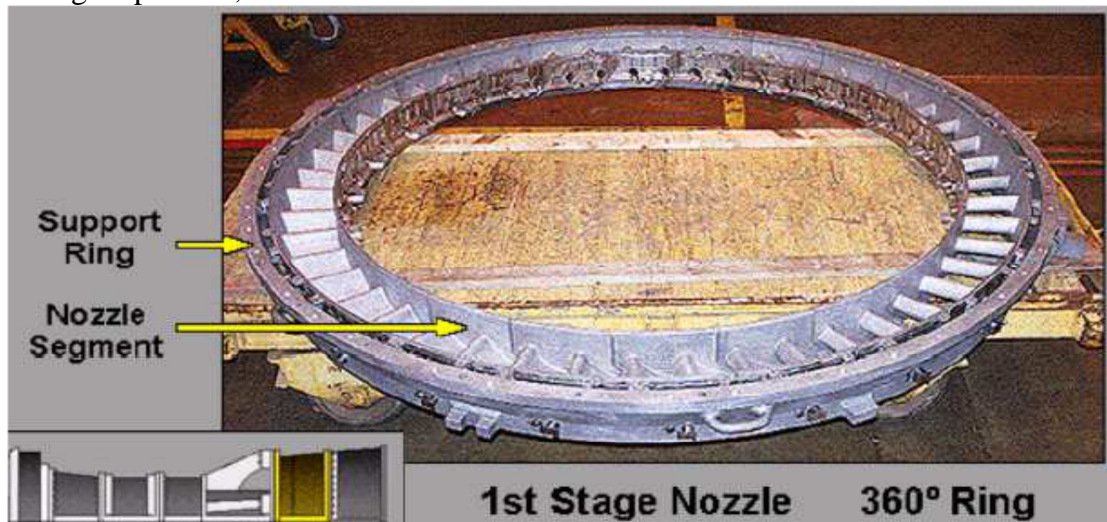


Figure I.8 tuyère 1ère étage

c) Tuyères 2ème étage

La tuyère du second étage se compose d'aubes formant une directrice à angles variables dans l'espace circulaire de la veine des gaz chauds. Elle est insérée juste avant la

roue BP. cesaubes peuvent être variées en même temps grâce à un mécanisme qui comporte une bague de commande qui tourne sous l'action d'un cylindre hydraulique.

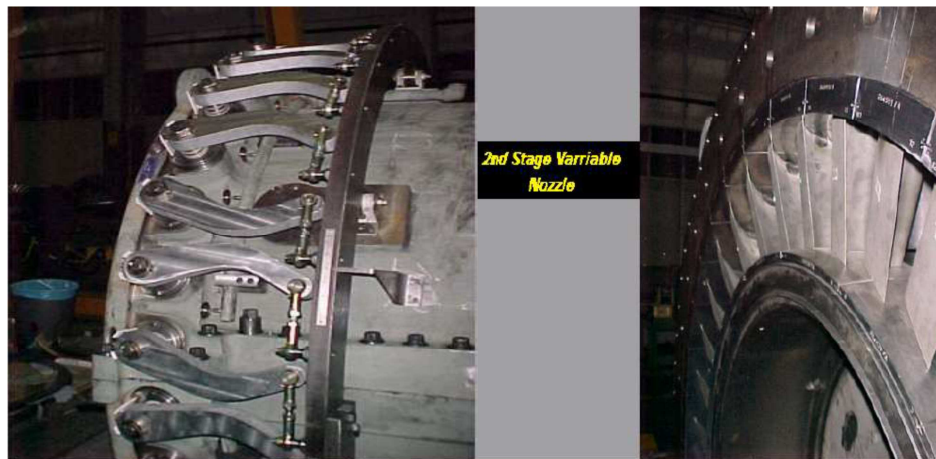


Figure I.9 tuyères 2ème étage

d) Roues de turbine

La turbine comprend 2 roues :

- La roue de turbine HP qui entraîne le compresseur axial et qui est directement boulonnée sur le demi-arbre arrière du rotor du compresseur de manière à former un rotor haute pression.
 - La roue de turbine BP qui entraîne la charge (compresseur centrifuge) et qui est directement boulonnée sur un arbre pour former le rotor de turbine basse pression.
- Les 2 roues sont positionnées en ligne dans la turbine, mais sont mécaniquement indépendantes l'une de l'autre. Elles ont des aubes à queues longues coulées avec précision, et sont refroidies par l'air extrait du 10ème étage et par l'air de fuite d'étanchéité HP. Le volume de gaz augmente quand sa pression diminue en traversant la roue de turbine HP. Pour cela les pâles ou ailettes de la roue BP sont plus grandes que celles de la roue HP.



Figure I.10 Roues de turbine

Cette section comprend aussi le diaphragme et l'étanchéité air et la veine des gaz entre les divers étages pour faciliter l'entretien, toutes les pièces du stator peuvent être fondus en deux dans le sens horizontal.

I.4.5 La section échappement

La section échappement se compose essentiellement du plenum ou cadre d'échappement ainsi que le caisson d'échappement.

a) Plenum d'échappement

C'est une structure rectangulaire en forme de boîte dans laquelle les gaz d'échappement de la turbine sont évacués avant d'être conduits aux silencieux et ensuite libérés dans l'atmosphère. Situé à l'extrémité arrière de la base de la turbine il loge le châssis d'échappement le diffuseur et les aubes de la turbine.

Il supporte aussi les paliers 3 et 4, la tuyauterie d'alimentation et de retour d'huile et la tuyauterie d'air de refroidissement et d'étanchéité. En service les gaz d'échappement provenant de la turbine sont déchargés dans le diffuseur et passent à travers des aubes qui dirigent ces gaz vers la bache d'échappement.

b) Caisson d'échappement

C'est une structure rectangulaire en forme de boîte dans laquelle les gaz d'échappement de la turbine sont déchargés puis libérés vers atmosphère. Il comporte le cadre d'échappement et les silencieux. Le plenum et le caisson d'échappement sont reliés par des joints de dilatation. La conception de l'échappement est devenue assez complexe afin de minimiser le bruit au maximum. La cheminée doit être assez élevée pour permettre un refroidissement progressif des fumées et le dégagement de celle-ci dans des endroits sécurisés.

I.5 Etude théorique de la turbine à gaz

I.5.1 Turbine à gaz à cycle simple

a) Cycle de Brayton

Les centrales de turbines à gaz peuvent travailler avec un cycle à pression constante (cycle de Joule ou de Brayton) ou un cycle à volume constant (cycle d'Atkinson) [2]. Pour un but d'analyse théorique du cycle, on suppose que la centrale de turbine à gaz fonctionne avec un circuit fermé, bien que dans la pratique le cycle de Joule soit utilisé également à une station d'un circuit ouvert comme la montre la figure ci-dessous.

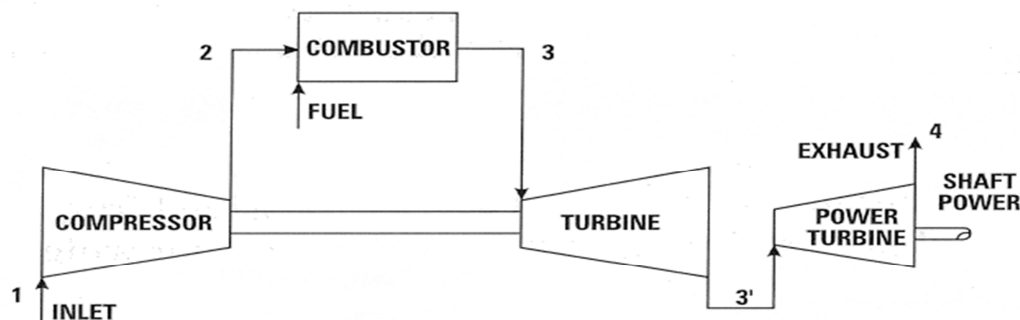


Figure I.11 Schéma simple d'un circuit ouvert de turbine à gaz.

b) Cycle thermodynamique d'une turbine à gaz

Dans le cycle idéal (de Joule ou de Brayton) les processus : la compression (1-2) et la détente (3-4) se produisent dans le compresseur et la turbine sont supposés isentropiques. La chaleur additionnée (2-3) dans la chambre de combustion et le rejet (4-1) se produisent à pression constante.

D'autres hypothèses pour le cycle idéal de Brayton sont comme suit [1-2]:

1. Les pertes de pression dans les échangeurs de chaleur et les passages reliant les équipements sont négligeables.
2. Le fluide de fonctionnement est un gaz parfait.
3. L'efficacité des échangeurs de chaleur est 100%.

Le cycle idéal de Brayton dans les diagrammes P-v et T-s est montré sur la figure I.12.

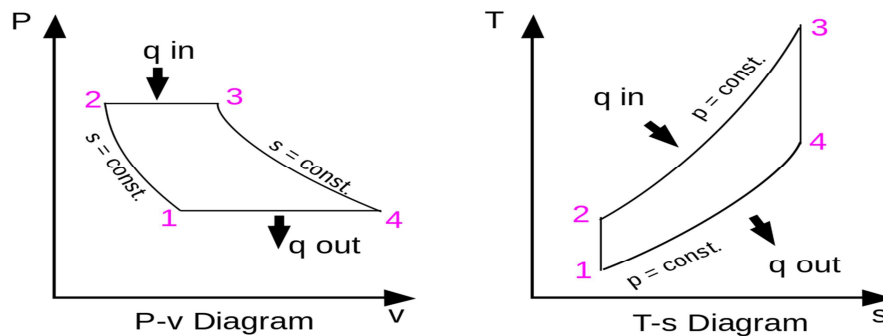


Figure I.12 Diagramme P-V et T-S de Cycle de Brayton

Les travaux spécifiques de compression et de détente et la chaleur fournie ont comme expressions :

$$W_{12} = -(h_2 - h_1) = -c_p(T_2 - T_1)$$

$$Q_{23} = (h_3 - h_2) = c_p(T_3 - T_2)$$

$$W_{34} = (h_3 - h_4) = c_p(T_3 - T_4)$$

Le rendement du cycle est

$$\eta = \frac{\text{Travail net}}{\text{Chaleur fournie}} = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

Utilisant les relations isentropiques

$$\frac{T_2}{T_1} = r^{(\gamma-1)/\gamma} = \frac{T_3}{T_4}$$

Avec r est le rapport de compression $P_2/P_1 = r = P_3/P_4$

Le rendement du cycle devient

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \text{Avec } \gamma = 1.4 \text{ pour l'air.}$$

Le rendement du cycle dépend le rapport de compression et la nature du gaz.

La figure si dessous montre la relation entre η et r telle-que le fluide circulant est l'air ($\gamma = 1.4$).

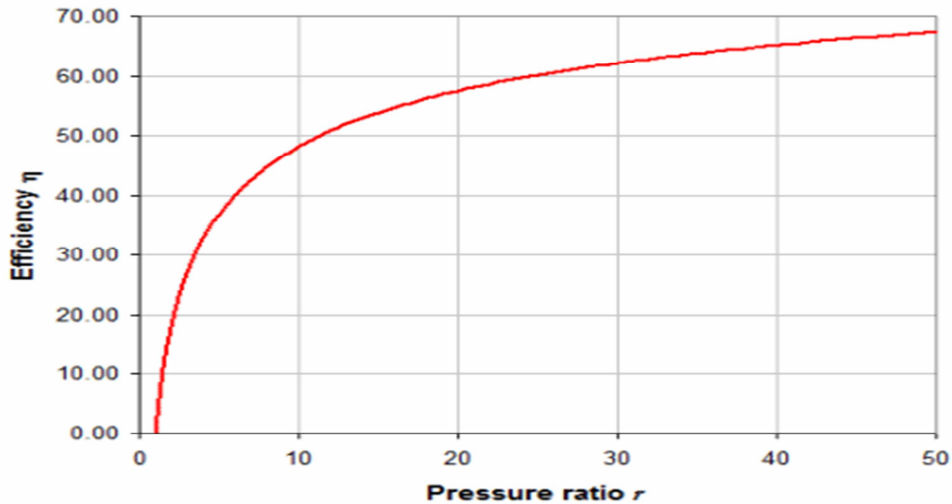


Figure I.13 la relation entre η et r .

Par contre le travail net fourni à l'arbre est

$$W = W_t - W_c = c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)$$

On peut écrire comme suit

$$\frac{W}{c_p T_1} = t \left(1 - \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) - \left(r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

Avec $t = T_3/T_1$

c) Etude du cycle réel

Dans le cycle réel à pression constante le travail dans le compresseur et la turbine est adiabatique au lieu d'isentropique comme montré à la figure si dessous.

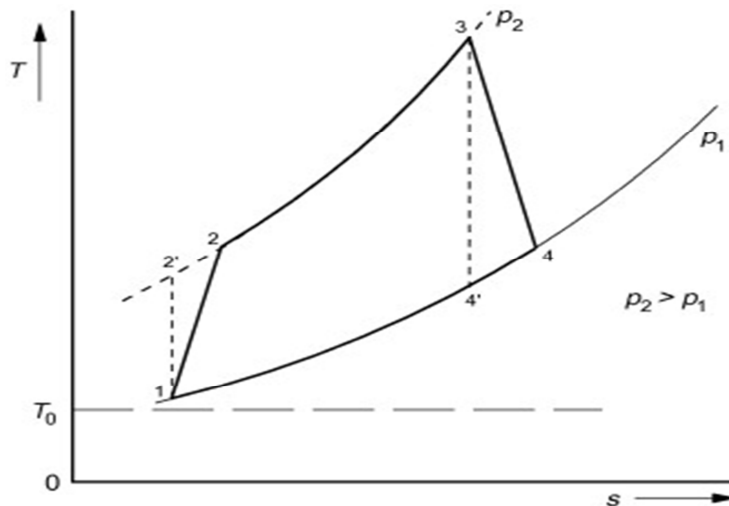


Figure I.14 Diagramme T-s pour un cycle réel sans pertes de pression

Les rendements de compression et de détente sont d'après [1]:

$$\eta_c = \frac{W'}{W} = \frac{\Delta h_0'}{\Delta h_0}$$

$$\eta_c = \frac{T_{02}' - T_{01}}{T_{02} - T_{01}}$$

$$\eta_t = \frac{W}{W'} = \frac{T_{03} - T_{04}}{T_{03}' - T_{04}'}$$

D'où

$$T_{02} - T_{01} = \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]$$

$$T_{03} - T_{04} = \eta_t T_{03} \left[1 - \left(\frac{1}{P_{03}/P_{04}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]$$

En absence des pertes de pression les rapports idéaux de pression et de température pour le compresseur et la turbine sont les même qu'avant.

Les valeurs réelles du travail de turbine et du compresseur sont indiquées par:

$$W_t = c_p(T_{03} - T_{04}) = t \eta_t c_p T_{01} \left(1 - \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right)$$

$$W_c = c_p(T_{02} - T_{01}) = \frac{c_p}{\eta_c} T_{01} (r^{(\gamma-1)/\gamma} - 1)$$

Le travail net est donnée par

$$W = W_t - W_c = \frac{1}{\eta_c} c_p T_{01} \left(1 - \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \cdot (\alpha - r^{(\gamma-1)/\gamma})$$

Avec: $\alpha = t \eta_t \eta_c$

La chaleur spécifique fournie dans la chambre de combustion est exprimée par :

$$Q = c_p(T_{03} - T_{02}) = \frac{1}{\eta_c} c_p T_{01} \left\{ (t - 1) \eta_c - \left(r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right\}$$

Le rapport des équations nous donne le rendement thermique réel de l'installation:

$$\eta_{th} = \frac{\left(1 - \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) (\alpha - r^{(\gamma-1)/\gamma})}{(t - 1) \eta_c - \left(r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}$$

CHAPITRE II

ETUDE d'un ETAGE

De

COMPRESSEUR AXIAL

II.1 Analyse bidimensionnel d'un étage de compresseur axial

L'analyse présentée dans ce chapitre est simplifiée en supposant que l'écoulement est bidimensionnel. Et on adoptant les hypothèses suivantes :

- les forces de pesanteur sont négligeables.
- la compression est isentropique .
- le fluide se comporte comme un gaz parfait.
- Densité constante.

Donc nous posons que :

$$\text{Pour le rotor } \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{\Delta p_R}{\rho}$$

$$\text{Pour le stator } \int_2^3 \frac{dp}{\rho} = \frac{\Delta p_S}{\rho}$$

Où Δp_R et Δp_S représentent respectivement l'augmentation de pression à travers le rotor et le stator. Cette approche peut être justifiée si la hauteur de la lame est faible par rapport au rayon moyen. Encore, le flux est supposé être invariant dans la direction circonférentielle.

Un étage de compresseur est défini comme une rangée de pales de rotor suivie d'une rangée d'aubes de stator.

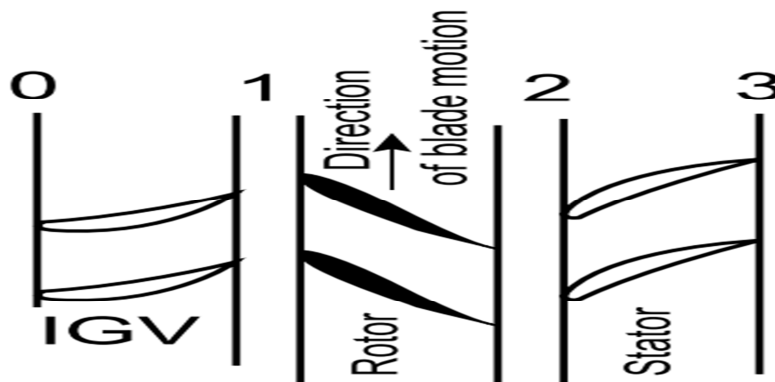


Figure II.1 Etage de compresseur axial

La figure II.1 montre certaines des lames du premier étage.

Les pales de rotor (noir) sont fixées sur le tambour de rotor et les pales de stator sont fixées à l'enveloppe extérieure.

Les aubes en amont de la première rangée de rotor sont des aubes de guidage d'entrée. Leur fonction est tout à fait différente des autres rangées d'aubes depuis, en dirigeant le flux loin de la direction axiale, ils agissent pour accélérer le flux plutôt que de diffuser. Fonctionnellement, des aubes de guidage d'entrée sont les mêmes que les buses de turbine; ils augmentent l'énergie cinétique de l'écoulement, au détriment de l'énergie de pression.

II.2 Diagramme de vitesse pour un étage de compresseur axial

À l'entrée d'un étage (section 1) le fluide a une vitesse absolue V_1 qui est identique à la vitesse absolue V_3 de l'étage précédent. En soustrayant vectoriellement la vitesse d'entraînement U , on obtient la vitesse relative W_1 à l'entrée du rotor. L'angle que cette

vitesse relative fait avec la tangente au squelette de l'aube rotorique doit être suffisamment limité de façon à ce que le fluide ne décroche pas.

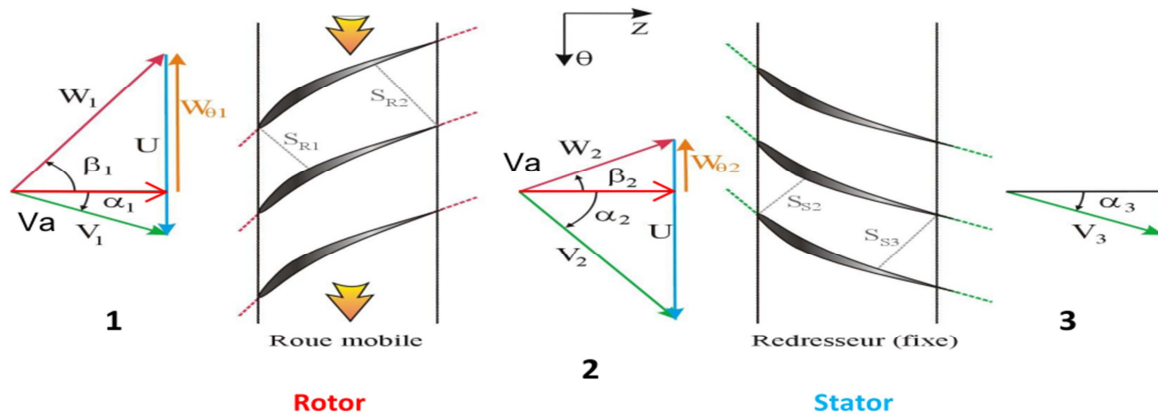


Figure II.2 triangle de vitesse pour un étage de compresseur axial

Nous distinguons les sections suivantes perpendiculaires à l'axe :

- 0 : entrée du distributeur.
- 1 : entrée d'un rotor.
- 2 : sortie d'un rotor, entrée d'un stator.
- 3 : sortie d'un stator.

Les vitesses et les angles d'écoulement sont notés comme suit :

- V_a : vitesse axiale.
- V : vitesse absolu.
- W : vitesse relative.
- U : vitesse d'entraînement.
- α : Angle entre la vitesse absolue et la direction axiale.
- β : Angle entre la vitesse relative et la direction axiale.

Une augmentation de pression du fluide à travers le rotor impose que la vitesse relative soit déviée vers la direction axiale si bien que, vu la constante axiale de la vitesse, $W_2 < W_1$. Par application de l'équation de l'énergie cinétique dans un espace relatif, on obtient [4]:

$$\frac{W_2^2 - W_1^2}{2} = - \frac{\Delta p_R}{\rho}$$

Si W_2 est connue, la vitesse absolue V_2 à la sortie du rotor peut être obtenue par sommation vectorielle des vitesses relatives et d'entraînement. Le stator transforme une partie de l'énergie cinétique liée à la vitesse V_2 en énergie de pression. C'est donc pour la même raison que pour le rotor que le vecteur vitesse doit être dévié par les aubes vers la direction axial. L'équation ci-dessous permet de déduire que si la pression augmente alors la vitesse doit diminuer :

$$\frac{V_3^2 - V_2^2}{2} = - \frac{\Delta p_S}{\rho}$$

Par le choix de la forme de l'aubage statorique il est possible de déterminer la vitesse absolue à la sortie de l'étage. Ainsi que déjà mentionné, on veillera à ce que cette vitesse V_3 soit égale, tant en grandeur qu'en direction, à la vitesse absolue d'entrée V_1 . En d'autre terme nous admettrons toujours que :

$$V_3 = V_1 \text{ et } \alpha_3 = \alpha_1$$

II.3 Analyse thermodynamique d'un étage de compresseur axial

En combinant les équations d'énergie et de la quantité de mouvement en régime permanent et en supposant un écoulement adiabatique à travers l'étage, Le travail spécifique produit par le rotor sur le fluide sera :

$$\Delta W = \dot{W}_p / \dot{m} = h_{02} - h_{01} = U (C_{y2} - C_{y1}). \quad (2-1)$$

On a l'enthalpie totale de stagnation reste constante à travers le rotor ; car pour toutes les turbomachines axiales ($h_{0rel} = h + W^2/2$)

Donc :

$$h_1 + W_1^2/2 = h_2 + W_2^2/2 \quad (2-2)$$

Ce résultat restera valable tant que les lignes de courant ne subissent aucun déplacement radial à travers le rotor ($U_1 = U_2$)

L'enthalpie totale reste constante à travers le stator, on a donc :

$$h_2 + C_2^2/2 = h_3 + C_3^2/2 \quad (2-3)$$

La compression complète est représentée sur le diagramme de Mollier dans la figure ci-contre. Diagramme qui a été généralisé pour tenir compte des irréversibilités.

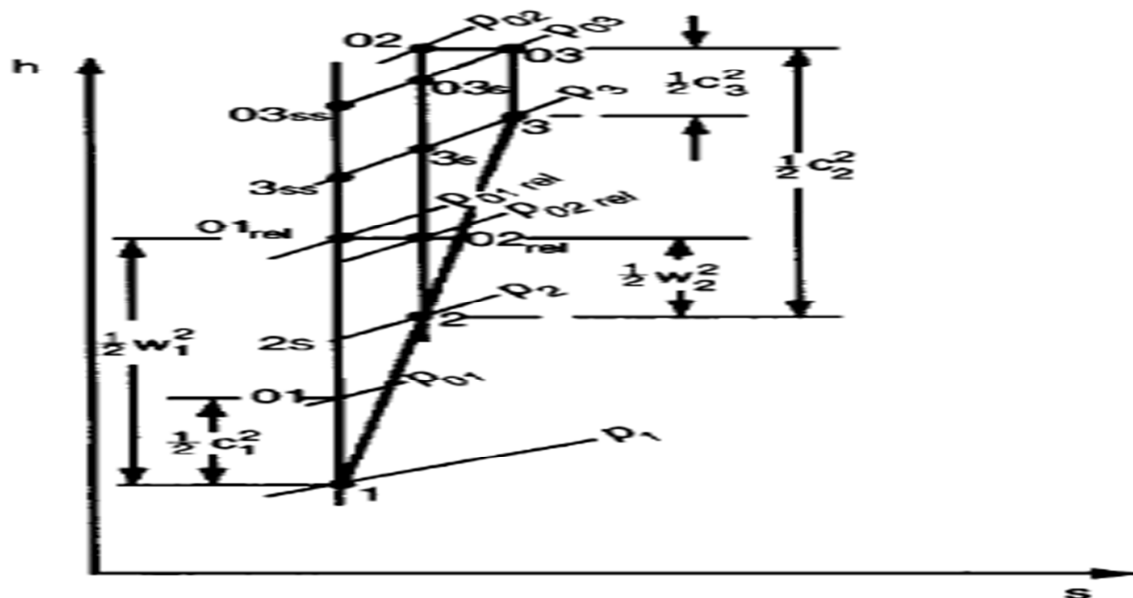


Figure II.3 : Diagramme de Mollier pour un étage de compresseur axial

II.4 Perte d'énergie dans un étage compresseur

Des équations. (2.1) et (2.3), le travail réel effectué par le rotor sur la masse de l'unité de fluide est $\Delta W = h_{03} - h_{01}$. Le travail réversible ou minimum requis pour atteindre la même pression de stagnation finale que le processus réel est [2] :

$$\Delta W_{min} = (h_2 - h_{2s}) - (h_3 - h_{3s})$$

Avec

$$h_3 - h_{3s} = (p_{02} - p_{03}) / \rho = (1/\rho) \Delta p_{0S}$$

$$h_2 - h_{2s} = (p_{01rel} - p_{02rel}) / \rho = (1/\rho) \Delta p_{0R}$$

Le rendement total à total d'un étage est :

$$\eta_{tt} = \frac{\Delta W_{min}}{\Delta W} = 1 - \frac{\Delta p_{0S} + \Delta p_{0R}}{\rho(h_{03} - h_{01})}$$

II.5 Caractérisation des Triangles de Vitesses :

Pour effectuer l'analyse d'un étage, on emploie trois coefficients adimensionnels qui permettent la caractérisation des triangles de vitesse. Ces coefficients sont : le coefficient de charge, le coefficient de débit et le degré de réaction.

II.5.a Le coefficient de débit.

Le coefficient de débit ϕ est un paramètre directement proportionnel à la vitesse axiale et il est une mesure du débit massique et de la dimension de l'étage.

$$\phi = C_x / U$$

II.5.b Degré de réaction

Pour le cas de l'écoulement incompressible et réversible, il est permis de définir le degré de la réaction, comme le rapport de l'élévation de la pression statique dans le rotor à l'augmentation de la pression statique dans un étage.

$$R = (p_2 - p_1) / (p_3 - p_1)$$

Si le débit est à la fois compressible et irréversible une définition plus générale de R telle que R est le rapport de l'élévation d'enthalpie statique du rotor à l'augmentation d'enthalpie statique dans un étage.

$$R = (h_2 - h_1) / (h_3 - h_1)$$

Une expression utile pour le degré de réaction peut être trouvée en termes des angles de sortie à partir de chaque rangée de pales dans un étage.

$$R = \frac{1}{2} + (\tan \beta_2 - \tan \alpha_1) c_x / (2U) \quad \text{II.5}$$

II.5.c Le coefficient de charge

Le coefficient de charge est un autre paramètre important de la conception d'un compresseur et est celle qui affecte fortement les performances hors-conception. Elle est définie par [2]:

$$\psi = \frac{h_{03} - h_{01}}{U^2} = 1 - \phi(\tan \alpha_1 + \tan \beta_2)$$

Contrairement à la quantité $(\tan \alpha_1 + \tan \beta_2)$, qui est en premier approximation constante, les coefficients d'écoulement et de charge d'étage ont une forte dépendance vis-à-vis des conditions de fonctionnement. La relation entre ψ et ϕ , qui est également appelée caractéristique d'étage, est linéaire et peut être représentée graphiquement pour différentes valeurs de $t = (\tan \alpha_1 + \tan \beta_2)$. Plus les angles α_1 et β_2 sont élevés, plus la pente de la caractéristique d'étage est négative. Une grande valeur de t signifie que la valeur de ψ dans le point design est petit.

CHAPITRE III

ETUDE sur L'EROSION

III.1 INTRODUCTION

L'abrasion est certainement l'un des principaux modes d'usure auxquels l'industrie doit faire face et se rencontre dans les travaux miniers, le terrassement, le traitement des minerais, l'industrie chimique, la céramique, l'agriculture, la fonderie, les industries sidérurgiques, les briquèteries, les centrales énergétiques et bien d'autres industries de base. Le coût annuel de remplacement des pièces soumises à l'usure par abrasion qui représente 50% de l'usure en général, constitue pour beaucoup d'industries une dépense importante estimée à 3 % du PIB français (CETIM INF. N°141).

Afin d'établir une méthodologie permettant d'étudier le comportement à l'abrasion des matériaux, on a essayé de classer les types d'usure abrasive en trois grandes catégories se différenciant par les caractéristiques de l'abrasif et les conditions de service.

Une classification dynamique d'Avery distingue selon le niveau de sollicitation :

- l'érosion ou l'abrasion sous faibles contraintes :

- faibles contraintes ou faible concentration des contraintes.
- chocs accidentels de faibles intensités.

- l'abrasion sous fortes contraintes (abrasion au meulage) :

- fortes contraintes et forte concentration de contraintes, chocs éventuels d'intensité limitée.

- l'abrasion sous très fortes contraintes (gougeage) :

- fortes à très fortes contraintes et très forte concentration de contraintes.
- chocs éventuels d'intensité élevée (gouging abrasion).

Quelquefois, plusieurs types d'abrasion apparaissent ensemble, mais en général il est possible de déterminer le genre dominant. Ce fait est particulièrement important car un matériau peut convenir pour un type d'abrasion et être contre-indiqué pour les autres. De plus, dans de nombreux cas, d'autres facteurs, par exemple des chocs ou la corrosion, peuvent également intervenir en service.

Dans cette étude, on s'intéresse sur l'érosion ou l'abrasion sous faible contraintes

III.2 Mécanique de l'érosion

L'érosion des particules solides se produit lorsque les particules solides transportées par un flux de liquide ou de gaz empiètent / Impactent contre un matériau cible provoquant la déformation de la matière, se fracturer ou éliminer complètement [4]. Pour comprendre la nature de l'érosion, Hutchings [4] a clairement identifié les différentes forces agissant sur une particule quand il est en contact avec une surface solide. Ces forces sont présentées dans la figure III.1. Les particules solides sont entraînées dans un milieu liquide qui coulerait soumis à la résistance qu'exerce le fluide en écoulement, les forces gravitationnelles, les forces de contact dues à des particules environnantes qui interagissent les uns avec les autres et la force la plus dominante de l'ensemble est la force de contact exercée par la surface.

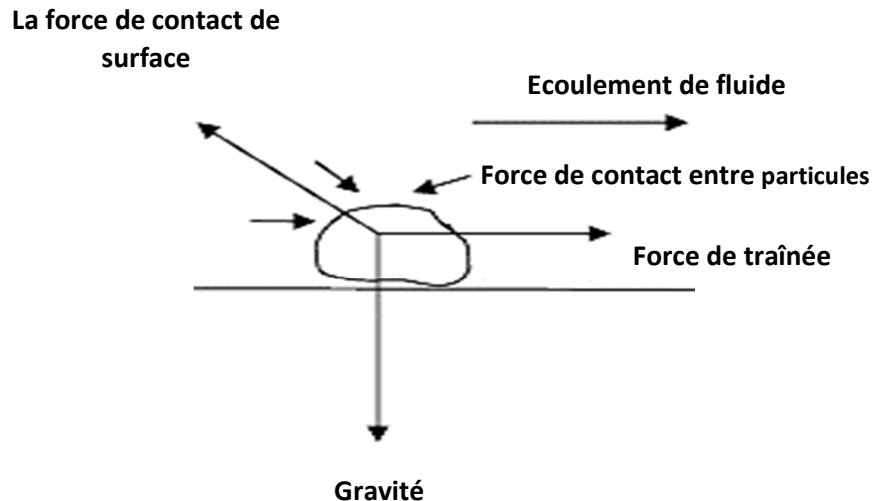


Figure III.1 Les forces agissant sur une particule en contact avec une surface solide.

Des études fondamentales sur les mécanismes d'érosion sont apparues largement après le développement du modèle de Finnie [5] d'érosion dans la seconde moitié du dernier siècle. Il a identifié clairement les mécanismes d'enlèvement de matière pour matériau ductile et matériau fragile. Un excellent aperçu complet de la mécanique de l'érosion de la couche unique a été écrit par Levy [7]. Il a couvert la mécanique de la rupture des matériaux ductiles et fragiles.

III.3L'Erosion des matériaux ductiles

Les matériaux ductiles se déforment plastiquement à des contraintes élevées sous les impacts de haute énergie absorbées. Deux mécanismes de déformation au cours de l'érosion ductile sont bien connus: déformation ductile brut et le micro-usinage.

Lorsque des matériaux ductiles sont soumis à une charge, Une bande de glissement se développent sur les plans de la contrainte de cisaillement critique maximale.

La déformation ductile brut (micro-bouturage) est le type le plus commun de l'érosion ductile et se produit quand une particule incidente forme un cratère et pousse une lèvre de matériau au-dessus de la surface. La lèvre de la matière a maintenant une plus grande exposition aux particules nominales impactant. [7].

Pour les matériaux qui ne sont pas durs, le matériau finit par devenir si déformé, qu'il est peu attaché et est enlevé par des impacts de cisaillements ultérieurs. La figure III.2 décrit l'impact d'une particule marquée sur une surface ductile. L'érosion ductile nécessite un moment normal à la surface pour que la particule puisse l'enfoncer dans la surface jusqu'à une profondeur y_t . Un moment tangentielle est également nécessaire pour éliminer une longue bande des matériaux sur la distance x_t .

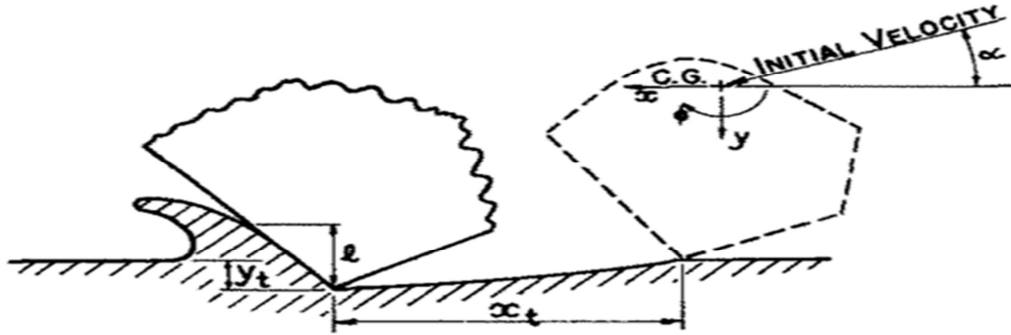


Figure III.2 Représentation des particules tranchantes d'un matériau ductile de Finnie[5].

Pour les matériaux durs de façon significative, les contraintes et les lèvres des matériaux mettent en place parallèlement au plan d'impact des particules. La plaque de matériau durci est fragilisée, et est interrompue par un impact ultérieur. Ce processus, connu sous le nom la formation des plaquettes, est illustrée dans la Figure III.3

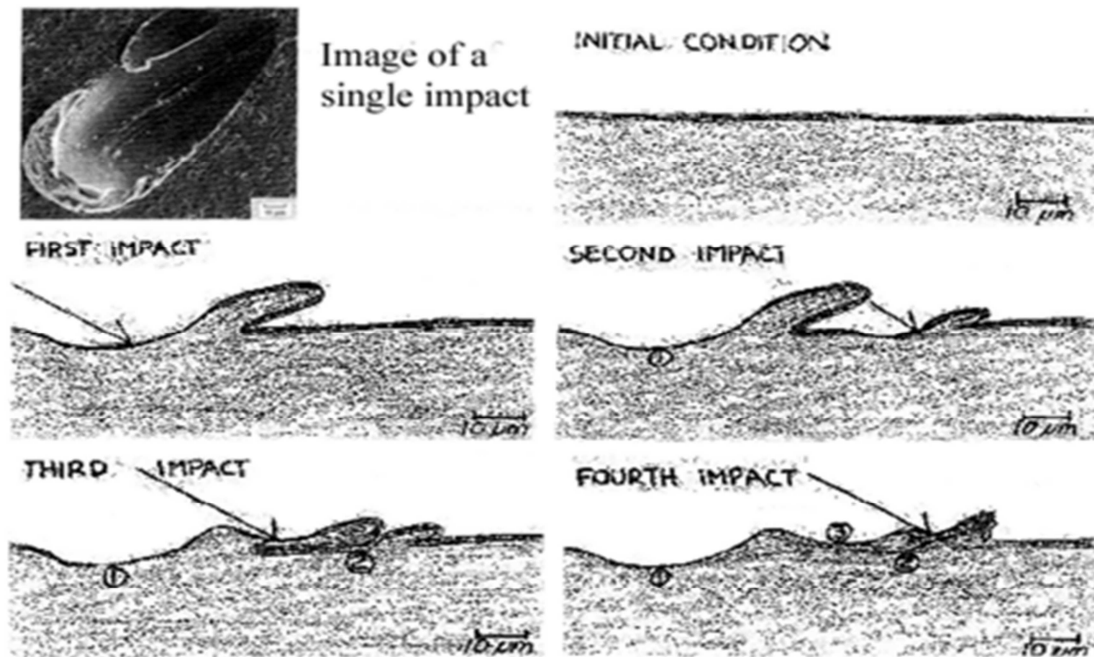


Figure III.3 Croquis de déformation ductile et la formation des plaquettes.

Les taux d'érosion sont généralement calculés comme la masse de la perte de matière par rapport à la masse totale des répercussions des particules de sable. Pour les métaux ductiles, tels que le titane et alliages d'aluminium, le taux d'érosion maximale le plus élevée a été déterminé et à se produire lorsque des particules frappent la surface à des angles compris entre 20° et 30°[8,9]. Dans une expérience faite par D'Alessio et Nagy en utilisant l'alliage de titane, [8,10] le taux d'érosion maximale en fonction de l'angle d'incidence α , est en bonne corrélation avec une équation développée par Finnie:

$$Q = \frac{mV^2}{P\Psi K} \left(\sin \left(2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2(\alpha) \right) \right); \quad \tan(\alpha) < \frac{K}{6}$$

$$Q = \frac{mV^2}{P\psi K} (\cos^2(\alpha));$$

$$\tan(\alpha) > \frac{K}{6}$$

Où,

Q: volume de matière enlevée par un seul grain

m: masse de la particule (g)

p: profondeur de l'empreinte (mm),

ψ : déformation plastique supposée constante,

K: rapport entre la force normale et la force tangentielle de contact de l'impact

V: vitesse d'impact (m / sec)

α : angle d'incidence (degrés)

Le micro-usinage est beaucoup plus rare, et ne se produit que dans un ensemble donné de conditions, le facteur le plus crucial étant un spin arrière [11]. La surface de la particule doit se déplacer plus rapidement que la vitesse du centre de gravité pour entraîner la matière vers le haut et loin de la surface, comme le montre la figure III.4. Ce mécanisme supprime une longue bande superficielle de matériaux avec un seul impact, très semblable à l'usinage par un tour ou une fraiseuse, d'où le terme «micro-usinage».

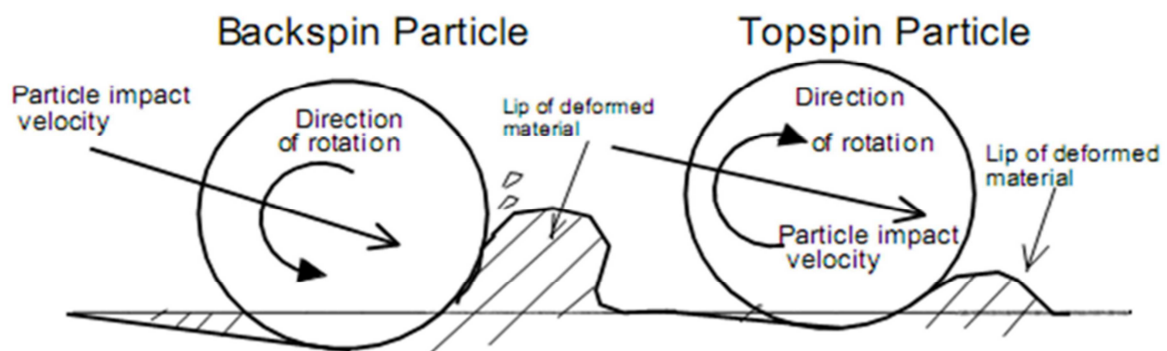


Figure III.4: influence du spin sur le mécanisme de rupture ductile [11].

Le micro-bouturage et le micro-usinagesont tous deux touchéspar les propriétés élastiques et plastiques combinées. Les propriétés qui sont en corrélation préférable de résistance à l'érosion des matériaux ductiles sont contraintes d'écoulement plastique et la dureté. Les matériaux avec contrainte haute d'écoulement plastique absorbent davantage plus d'énergie lorsqu'ils cèdent de la matièreet ont moins de volume affecté par un seul impact.

III.4Erosion des matériaux fragiles

Dans les matériaux avec les valeurs de module de Young élevé, comme la plupart des céramiques, la déformation plastique n'est plus un modèle d'érosion valide. Dans ces matériaux contre l'érosion de rupture fragile, une particule incidente peut entraîner un très petit cratère entouré d'un champ de déformation d'Hertz. Si la force d'impact est assez grande, les fissures latéraux peuvent se produire comme le montre la Figure III.5Après avoir

suffisamment de fissures qui ont été formées et à la propagation de la fissure ultérieure, les fissures à coalescence résultant dans l'érosion des matériaux fragiles comme matériau cassant et provoquent des micro-copeaux.

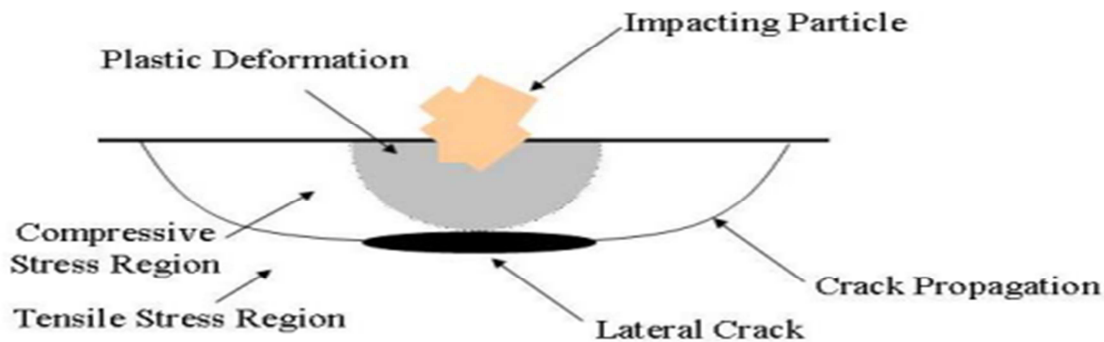


Figure III.5. La formation de fissures latérales dans un matériau cassant. Adapté d'Errico.[21]

Levy [7] a proposé que pour des matériaux monolithiques, la rupture fragile est due à la fissuration répétée. Dans la figure III.6, Gachon et al. [12] décrit comment, après chocs successifs sur un revêtement de tungstène multicouche (nitrure / tungstène) sur un substrat (Ti-6Al-4V), des fissures ont commencé à se croiser et desserrer les morceaux de matière à la surface. Gachon et al. Décrivent également lorsque, à très grande vitesse, l'ensemble d'un revêtement (WN / W) sous le point d'impact peut être éliminé par un seul impact.

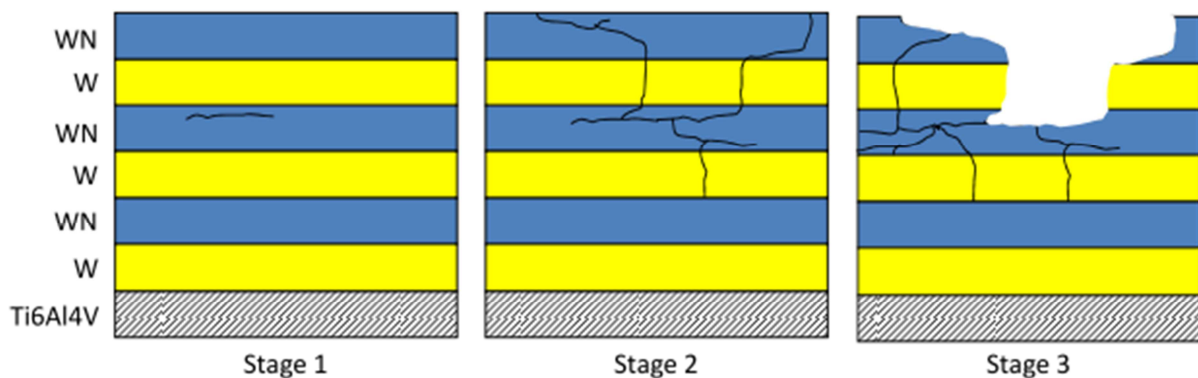


Figure III.6 Les étapes de la rupture fragile.

Le contact mécanique pour des objets sphériques élastiques a été décrit par Hertz [13] à la fin du 19e siècle. La nature des fissures de forme conique formée par contact sphérique a été prédite par la traction maximale et des contraintes de cisaillement. Fischer-Cripps [14] résume ce travail pour montrer que la compression maximale et des contraintes de traction engendrées par un choc d'une sphère élastique sur une surface plane qui pourrait être décrite par l'équation. III.3 et III.4, respectivement, où E^* est le module d'élasticité réduite $R1$ est le rayon de la sphère, et P est la force de l'impact.

$$\sigma_{max} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{6PE^*2}{r_1^2} \right)^{\frac{1}{3}} \dots \dots \dots \text{III.3}$$

$$\sigma_{t-max} = \frac{1}{3} (1 - 2\nu) \sigma_{max} \dots \dots \dots \text{III.4}$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \dots \text{III.5}$$

E et ν, sont le module d'élasticité de la particule et le substrat. Une représentation de la traction et les contraintes résiduelles sont fournies sur la figure III.7.

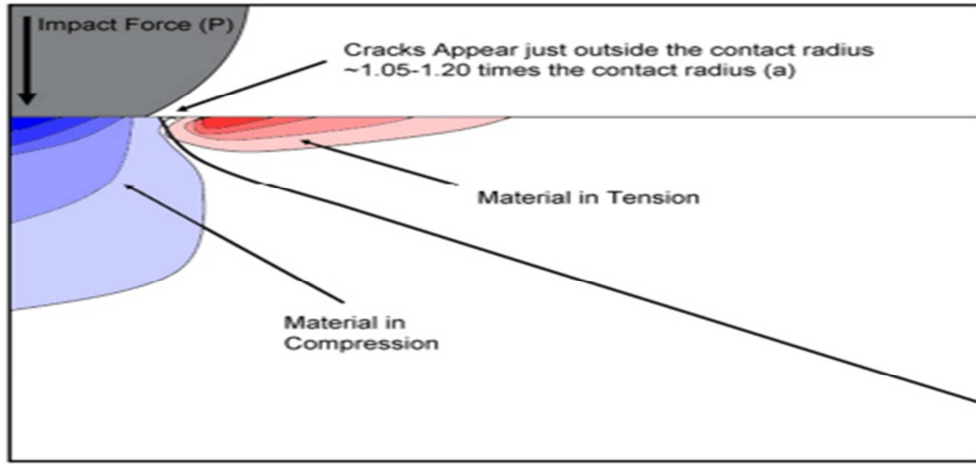


Figure III.7 Schéma d'un demi-espace symétrique montrant les zones de tension et de compression d'un site d'impact.

Fischer-Cripps et al. [14] ont montré, dans la figure III.7, que lorsqu'il est contacté par un sphérique pénétrateur, la matière dure se dévie la normale au contact, conformément à l'équation III.6 à l'intérieur de la zone de contact et III.7 en dehors de la surface de contact.

$$u_z = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{3}{2} P_m \frac{\pi}{4a} (2a^2 - r^2) \text{III.6}$$

$$u_z = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{3}{2} P_m \frac{\pi}{2a} \left[(2a^2 - r^2) \sin^{-1} \frac{a}{r} + r^2 \frac{a}{r} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \right] \text{III.7}$$

Comme avec les déviations, les contraintes sont une fonction définie par la position cylindrique (r, θ, z) où Eq. III.8, III.9, et III.10 décrivent les contraintes dans chaque sens.

Il convient de noter qu'en raison de la nature du contact, seules les contraintes radiales existent en dehors de la zone de contact. Cependant, les contraintes de traction élevées sont justes à l'extérieur de la zone de contact et les contraintes de compression les plus élevées sont en dessous de la zone de contact.

$$\frac{\sigma_z}{P_m} = \begin{cases} -\frac{3}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right)^{1/2}, & r < a \\ 0, & r > a \end{cases} \text{III.8}$$

$$\frac{\sigma_r}{P_m} = \begin{cases} \frac{1-2\nu}{2} \frac{a^2}{r^2} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{3/2} \right] - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}, & r < a \\ \frac{1-2\nu}{2} \frac{a^2}{r^2}, & r > a \end{cases} \text{III.9}$$

$$\sigma_\theta = \begin{cases} -\sigma_r, & r < a \\ 0, & r > a \end{cases} \text{III.10}$$

Comme la surface autour de l'emplacement de l'impact dévie en réponse à la compression, la tension est générée juste à l'extérieur de la zone de contact. Alors que les contraintes, σ , générées par un impact de compression sont en grande partie, des contraintes de traction sont également générées à proximité de la zone de contact, comme indiqué dans la Figure III.7. Ces contraintes de traction sont habituellement une force limitant pour la plupart des matériaux céramiques.

La contrainte de traction maximale générée est directement liée à la contrainte de compression maximale, comme indiqué dans les équations III.3 et III.4 respectivement. Pour un matériau céramique, avec un rapport de Poisson de 0.25, la contrainte de traction maximale est seulement un sixième de la contrainte de compression maximale.

Toutefois, en raison des asymétries des enveloppes de rupture de matériaux céramiques, le matériau chutera en raison de la traction et des contraintes de cisaillement plutôt que des contraintes de compression.

Alors que les contraintes de surface sont importantes pour l'initiation des fissures, Ces informations sont fournies en coordonnées cylindriques dans les équations. III.11 à III.14.

$$\frac{\sigma_r}{P_m} = \frac{3}{2} \left\{ \frac{1-2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2} \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \right] + \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2} + \frac{z}{\sqrt{u}} \left[u \frac{1-\nu}{a^2 + u} + (1 + \nu) \frac{\sqrt{u}}{a} \tan^{-1} \left(\frac{a}{\sqrt{u}} \right) - 2 \right] \right\} \text{III.11}$$

$$\frac{\sigma_\theta}{P_m} = -\frac{3}{2} \left\{ \frac{1-2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2} \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \right] + \frac{z}{\sqrt{u}} \left[1 + \nu + u \frac{1-\nu}{a^2 + u} + (1 + \nu) \frac{\sqrt{u}}{a} \tan^{-1} \left(\frac{a}{\sqrt{u}} \right) \right] \right\} \text{III.12}$$

$$\frac{\sigma_z}{P_m} = -\frac{3}{2} \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2} \text{III.13}$$

$$\frac{\tau_{rz}}{P_m} = -\frac{3}{2} \left(\frac{r z^2}{u^2 + a^2 z^2} \right) \left(\frac{a^2 \sqrt{u}}{u + a^3} \right) \text{III.14}$$

Et les contraintes principales sont montrées dans l'équation. III.15 à III.17.

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_r + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_r + \sigma_z}{2} \right)^2 + \tau_{rz}^2} \text{III.15}$$

$$\sigma_2 = \sigma_\theta \text{III.16}$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} [\sigma_1 - \sigma_3] \text{III.17}$$

Pour le matériau considéré, la ténacité à la rupture, K_{IC} détermine le niveau de contrainte nécessaire pour propager un défaut préexistant.

La résistance à la rupture est liée au module d'élasticité du matériau, ainsi que l'énergie de propagation de fissure, CPG, comme représenté dans l'équation. III.18 pour les contraintes planes.

$$K_{IC} = \sqrt{E G_{IC}} \text{III.18}$$

La rupture fragile de la céramique se produit à faibles contraintes en traction que la compression. Le mode I d'intensité de contrainte est défini dans Eq. III.19, où σ est la contrainte de champ lointain et «a» est la moitié de la longueur de la fissure.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \text{ III.19}$$

Deux grands types de fissures résultent du contact et impacts normale à la surface énergétique.

La figure III.8 illustre les différents types de fissures résultant d'impacts. La fissure est surtout connue par fissuration radiales, ou d'un cône. Ces résultats de la traction engendrée des craquages juste en dehors de la zone de contact de la dépression locale de la surface.

Les fissures se propagent radialement vers l'extérieur à partir du lieu de l'impact de leur croissance vers le bas dans le revêtement, suivant approximativement la trajectoire de la contrainte principale σ_1 .

Le second type de fissure est la fissure latérale, ou l'anneau, ce qui se produit parallèlement à la surface mais au plus profond dans la matière. Ces fissures résultent de la relaxation de contrainte suivi par la suppression de la force initiale. Levy affirme que la présence et l'intersection de fissures latérales combinées et le cône peut entraîner la suppression de volumes importants de matière. Un seul impact est généralement insuffisant pour enlever de la matière, mais après de nombreux impacts, les fissures se croisent jusqu'à sections du revêtement et sont facilement éliminées. [5, 14, 15].

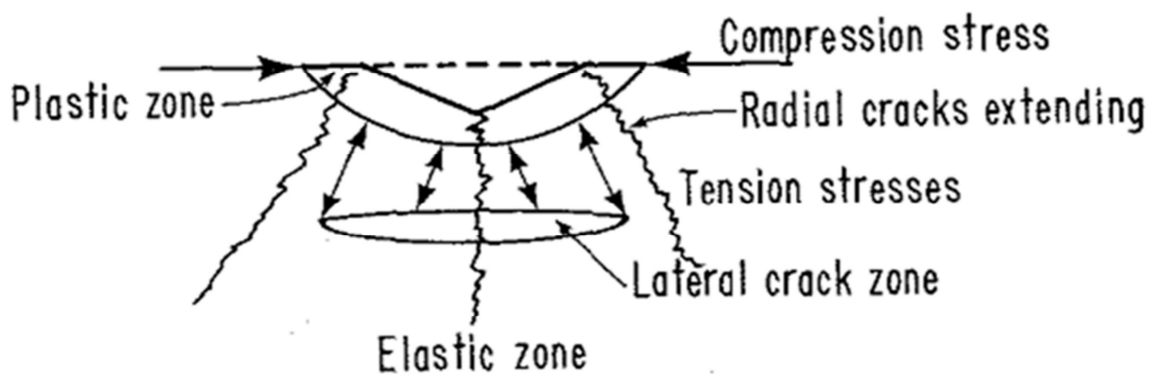


Figure III.8 Schéma d'états de contraintes et de fissures dans un matériau fragile après l'impact [54].

L'érosion par déformation

En considérant le choc d'une particule élastique sur un plan élastique-plastique, BITTER a établi que la vitesse maximale V_m , à laquelle le choc est encore élastique, obéit à la relation :

$$V_m = \frac{\pi^2}{2\sqrt{10}} \sigma^{5/2} \cdot \frac{1}{\sqrt{d}} \left[\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \right]^2 \text{ III.20}$$

Où σ = contrainte élastique-limite. Cette valeur est comprise entre 1,59 et 3,2 fois la limite élastique; pour une vitesse pas trop élevée, on peut adopter le coefficient 1,59

d = densité de la particule

E_1, E_2 = module d'Young de la particule et du plan

μ_1, μ_2 = coefficient de Poisson de la particule et du plan.

La première hypothèse n'est vraie que pour un matériau purement élastique, mais si on considère le processus d'érosion comme un état stationnaire, les constantes élastiques de la

couche superficielle très déformée ne varie plus guère au cours d'une déformation supplémentaire.

Dans le cas d'une particule anguleuse, BITTER démontre que l'on peut admettre que la particule a une densité apparente plus élevée.

Quand la vitesse V de la particule est plus grande que V_m , l'excès d'énergie $1/2 m(V - V_m)^2$ produit une déformation plastique. Si n particules de masse totale m heurtent la surface sous un angle α , le transfert d'énergie à la couche superficielle sera :

$$Q = \frac{1}{2} .m (V \sin \alpha - V_m)^2 \text{III.21}$$

et si ε est la quantité d'énergie nécessaire pour enlever une unité de volume de matière par déformation, l'érosion par déformation W_D peut s'écrire :

$$W_D = \frac{1/2 .m (V \sin \alpha - V_m)^2}{\varepsilon} \text{III.21}$$

Pour les matériaux fragiles, le principal facteur est le taux d'érosion est liée à la quantité d'énergie transférée dans la collision de particules surface. Transfert d'énergie maximale devrait se produire à 90 degrés, et en conséquence, les expériences de la littérature confirment que les taux d'érosion sont les plus élevés à 90 degrés pour matériaux fragile, [16].

III.5 Facteurs influençant l'érosion

Il existe de nombreux paramètres qui influent sur l'érosion, et certains de ces paramètres sont énumérés dans le tableau III.1. Il y a quatre grands groupes de facteurs influençant l'érosion. Ces quatre grands groupes sont les propriétés des érodant, les caractéristiques du matériau cible, des caractéristiques du fluide et de l'état d'écoulement. Cette section examinera certains de ces facteurs clés qui influencent l'érosion.

Tableau III.1 Facteurs influençant l'érosion

Erodant	Caractéristiques des matériaux	Caractéristiques des fluides	Condition d'écoulement
Dureté	Dureté	Viscosité	Vitesse d'écoulement
Taille	Facteur de rugosité	Température	Angle d'impact
Forme	Ductilité	Densité	Trajectoire d'écoulement
Masse	Rugosité de surface		Interaction des particules
Concentration	Microstructure		

III.5.1 Vitesse critique

Pour les revêtements en céramique, Rutherford et al. ont découvert qu'il n'y avait pas une, mais deux vitesses d'impact critiques. La première était une vitesse critique minimale en dessous de laquelle la matière absorbée un impact élastique, et pas d'érosion a été observée. La nouvelle découverte est une vitesse critique maximale, au-dessus de laquelle le taux d'érosion n'a pas augmenté, puisque l'impact retire l'ensemble du revêtement en dessous de la zone d'impact. Cette corrélation entre les mailles du filet de cône à partir d'un seul impact

d'atteindre le substrat. Les effets caractéristiques de la vitesse des particules sur l'érosion sont théoriquement illustrés dans la Figure III.10.

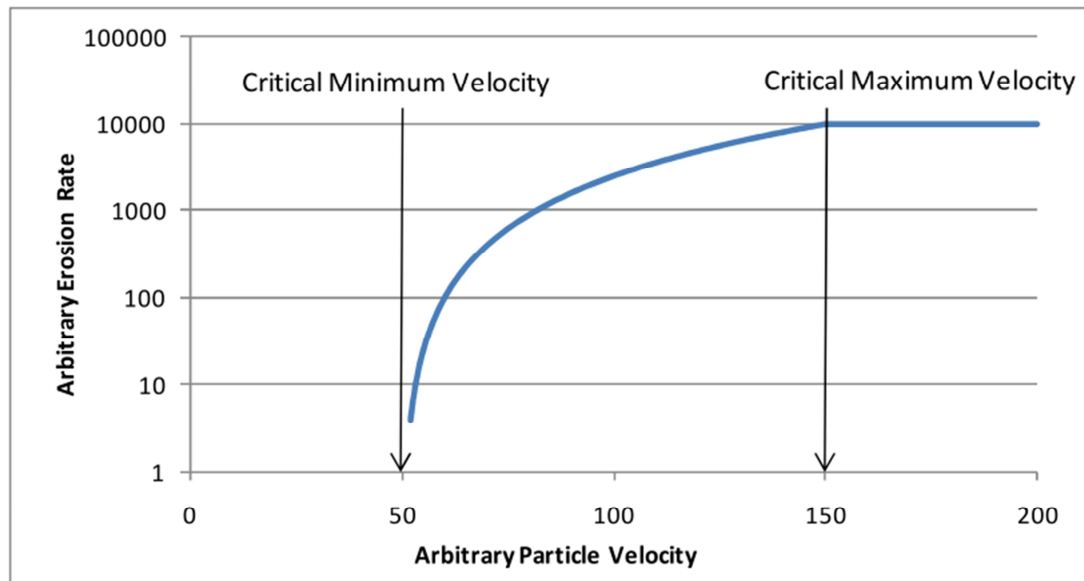


Figure III.8 Représentation des vitesses minimale et maximale érosion critiques.

III.5.b Angle d'impact

L'angle d'impact de l'érosion des particules solides se réfère à l'angle par rapport à laquelle la particule frappe la cible. C'est un facteur important dans la modélisation de l'érosion des particules solides comme cela détermine la nature du mécanisme de l'érosion. Pour la plupart des matériaux ductiles, l'érosion maximale se produit à un angle d'impact, α , d'environ 20-30 degrés, par contre pour les matériaux fragiles, l'érosion se produit à angle d'impact d'environ 90°, comme le montre la Figure III.9.

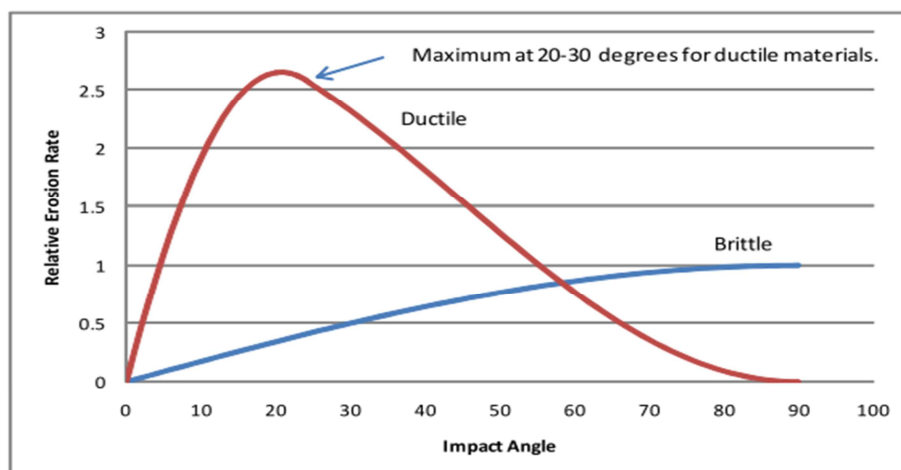


Figure III.9: taux d'érosion relative en fonction de l'angle d'incidence pour les matériaux fragiles et ductiles.

III.5.c Taille de l'érodant

L'un des nombreux facteurs qui contribuent à la difficulté de prévoir l'érosion est l'effet de la taille des particules. Lynn et al. [26] et Clark et Hartwich [27] qui ont effectué des expériences d'érosion en utilisant un large éventail de tailles des particules, ont observé que l'efficacité de collision des particules a diminué avec la diminution de la taille des particules.

Ils ont défini l'efficacité de collision, η comme "Rapport du nombre de particules frappant une unité d'aire de la surface par unité de temps (r_c) pour le nombre de particules contenue dans le volume de suspension balayée par cette zone par unité de temps (r_0)" [26,27].

$$\eta = \frac{r_c}{r_0}$$

La figure III.10 montre un graphique de la hausse du taux d'érosion avec la dimension particulaire. La figure III.11 illustre le schéma des flux de suspension des particules et de la différence de l'efficacité de collision (η) avec la taille des particules. Les grosses particules subissent moins de retard avant l'impact en raison de leur forte inertie. Par conséquent, leur efficacité de collision sera proche de l'unité. D'autre part, les particules plus petites seraient plus susceptibles de retard avant l'impact. Par conséquent, leur efficacité de collision et l'énergie cinétique dissipée après l'impact sera plus faible, entraînant une diminution du taux d'érosion.

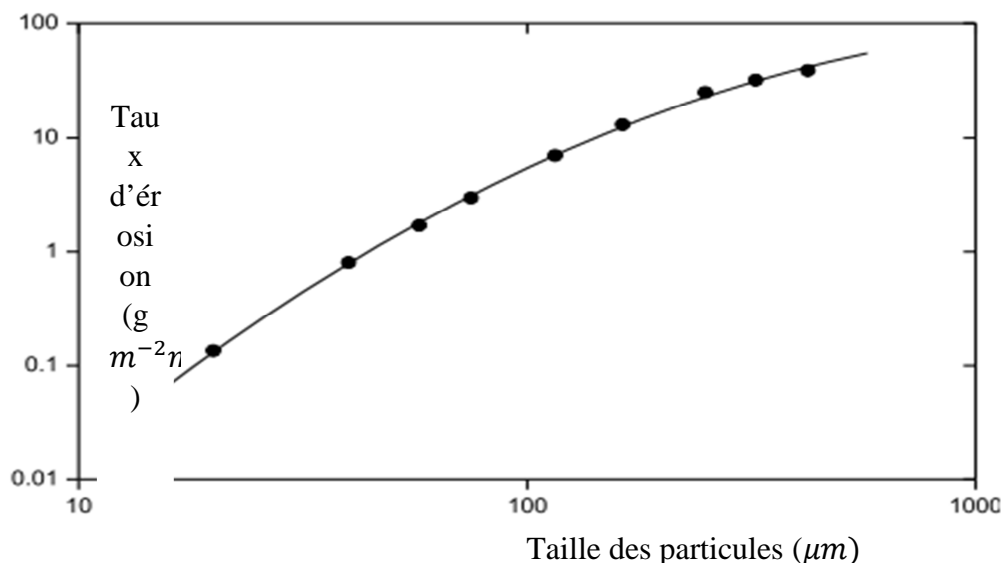


Figure III.10 la variation du taux d'érosion avec la dimension des particulaires pour acier P110 à 1,2% en poids. de suspension SiC de 18,7 m s⁻¹ vitesse nominale de test dans un pot testeur de suspension

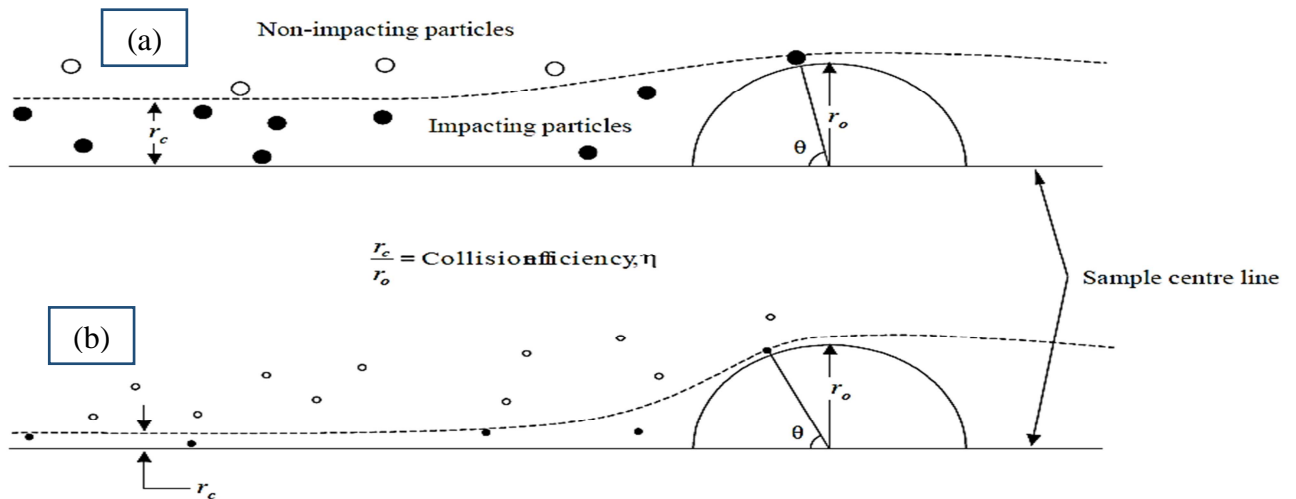


Figure III.11 Différence d'écoulement autour d'une éprouvette cylindrique de la taille des particules, l'angle d'érosion θ périphérique est indiqué pour les deux schémas

(a) Le rendement élevé de collision, η (b) la faible Le rendement de collision, η

III.5.d La concentrations de l'Erodant

Une simple hypothèse serait que l'augmentation de la concentration des érodants augmenterait le taux d'érosion, comme il n'y a plus de particules venant frapper le matériau cible [4]. Cependant, en réalité cette relation est un peu plus complexe.

Turenne et al. ont montré que, en augmentant la concentration de sable, l'efficacité de l'érosion diminue en fonction de la loi de puissance de la concentration de sable dans la suspension. Ils ont justifié leurs résultats avec l'explication qu'une augmentation de la concentration de sable donnerait lieu à la quantité de particules rebondissent à la surface, protégeant donc la surface des particules incidentes.

Cela conduit aussi à une plus grande interaction particule-particule réduisant le nombre de particules affectant la surface. La figure III.12 présente un graphique de la concentration massique de l'efficacité de l'érosion W/C par rapport au sable. Où W est la perte de poids en mg et C , est la fraction de la masse de sable. Cette explication sur la collision effective inférieure en raison du grand nombre de particules "inertage", ne signifie pas toutefois que, pour que cela se produise, il y aurait une concentration de sable critique où ce phénomène pourrait jouer un rôle important en influençant l'érosion.

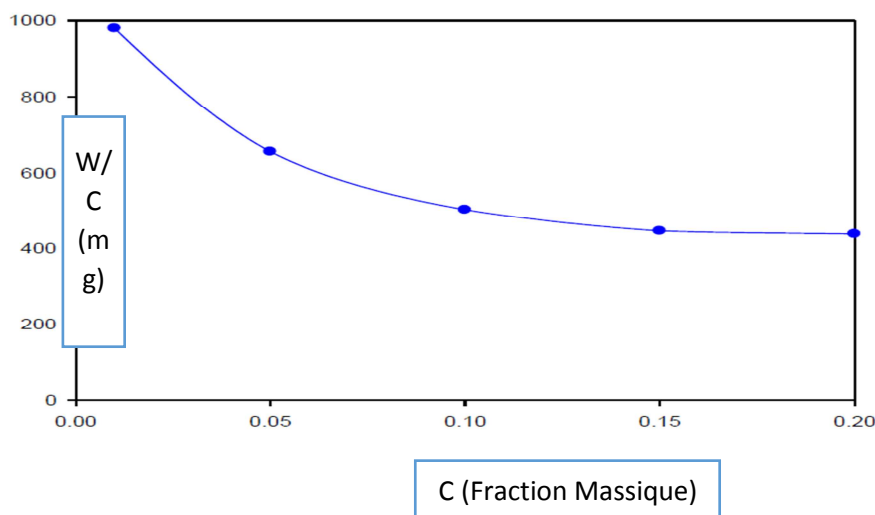


Figure III.12 L'efficacité de l'érosion (W / C) en fonction de la concentration de la masse de sable (%)

III.5.e La forme de l'Erodant

La forme d'érodant est considérée comme un autre paramètre important dans la description du mécanisme de l'érosion des particules solides. Le mécanisme de coupe est le plus efficace en particules angulaires, tandis que le labour et la déformation est le mécanisme le plus dominant en particules sphériques. Particules angulaires ont tendance à produire des cratères tranchants et profonds dans le matériau de la cible qui forment les lèvres extrudées plus facilement, tandis que les particules sphériques ont tendance à produire des cratères plus arrondis et peu profonds [4]. Il est cependant difficile de déterminer l'angle de la forme des particules; donc les particules sont souvent décrites comme anguleuses ou arrondis. Stachowiak a démontré que l'angularité des particules provoque une augmentation de l'abrasion et des taux d'érosion. Le paramètre de Spike (SP) utilisée par Stachowiak de définir l'angularité des particules représente la limite de particules par un ensemble de triangles.

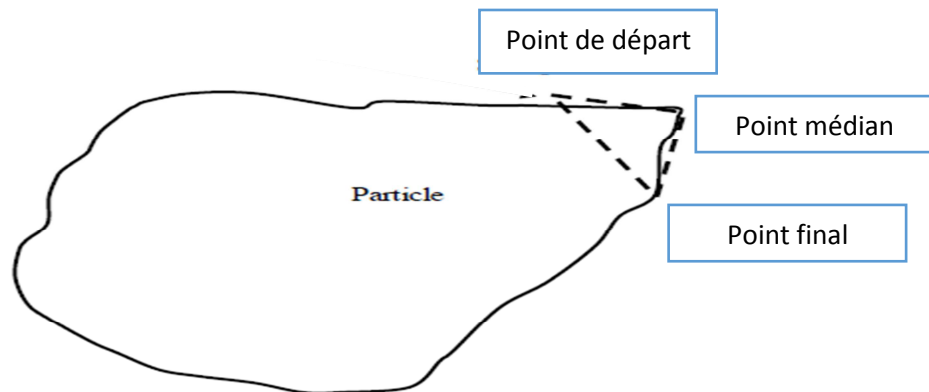


Figure III.13 Schéma illustrant le paramètre Pointe (SP) pour définir l'angularité des particules.

Les figures montrent des images Microscopie Electronique à Balayage (MEB) de tous les érodants. Elles sont présentées dans la Figure III.14 à la Figure III.16.

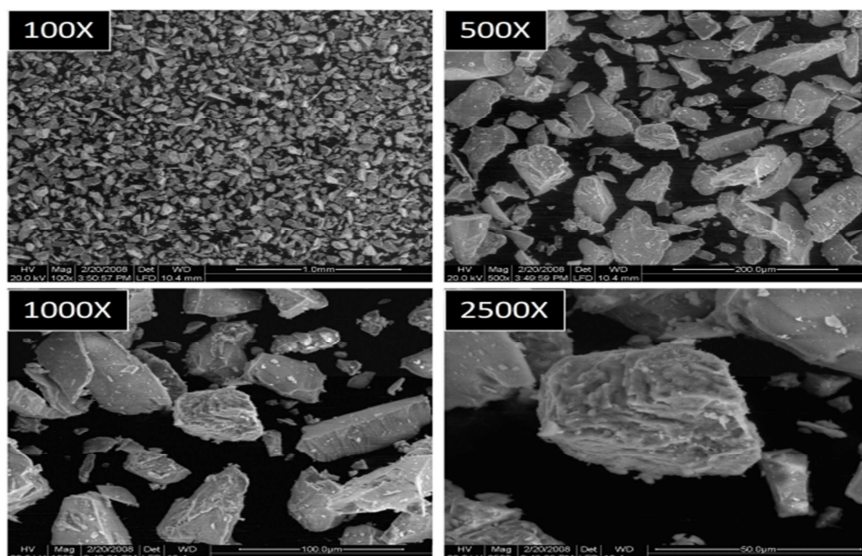


Figure III.14: Images MEB montrant le grain 240 (56 microns) de érodant alumine angulaire.

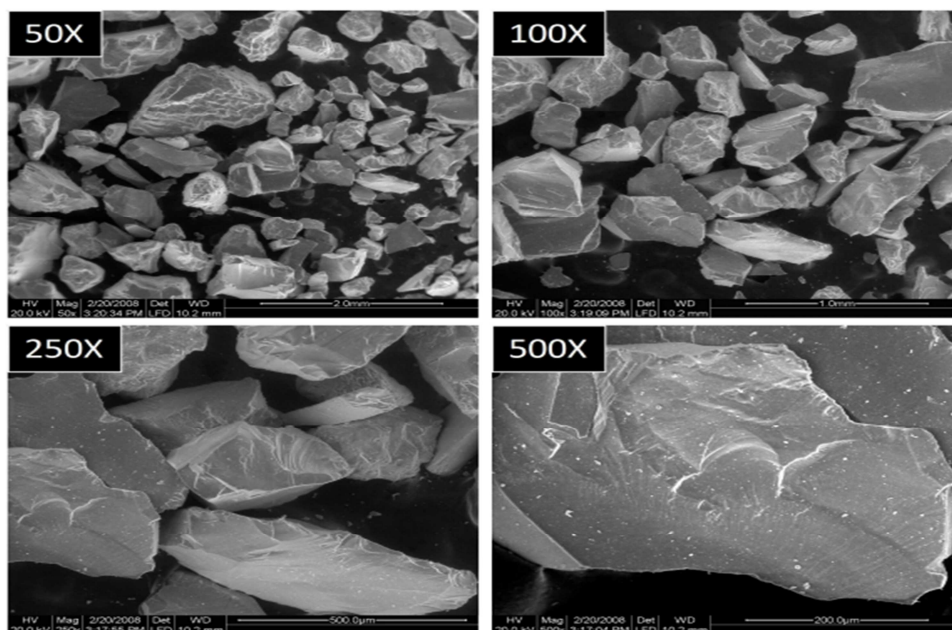


Figure III.15: Images MEB montrant l'érodent quartz broyé.

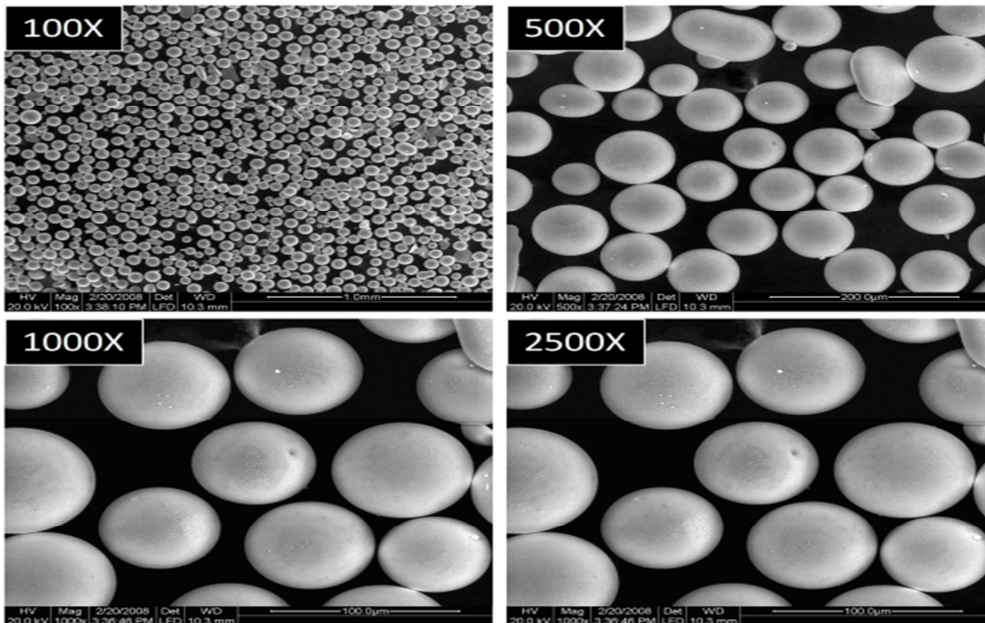


Figure III.16: Images MEB montrant le n ° 13 (63 microns) perle de verre éroder.

III.5.f Dureté du matériau cible et éroder

La dureté d'une particule joue un rôle important dans l'érosion de particules solides. Les particules ayant une dureté inférieure à celle du matériau de la cible provoqué une usure moindre par rapport aux particules qui sont nettement plus difficile. Le taux d'usure est sensible au rapport de la dureté H_a de l'abrasif à dureté de la surface H_s . Ce mécanisme s'explique en examinant le contact d'une particule éroder sur une surface.

En supposant un matériau de surface s'écoule plastiquement, écoulement plastique substantielle aura lieu à la surface lorsque la pression de contact moyenne plus de trois fois de sa limite d'élasticité uni-axiale. Par conséquent, un ratio minimum de dureté relative de l'éroder de matériau cible est nécessaire pour produire de l'usure. Il a été observé expérimentalement que les particules abrasives de toute forme causeront un grattage plastique seulement si $H_a / H_s > 1,2$. Ceci est illustré dans la figure III.17.

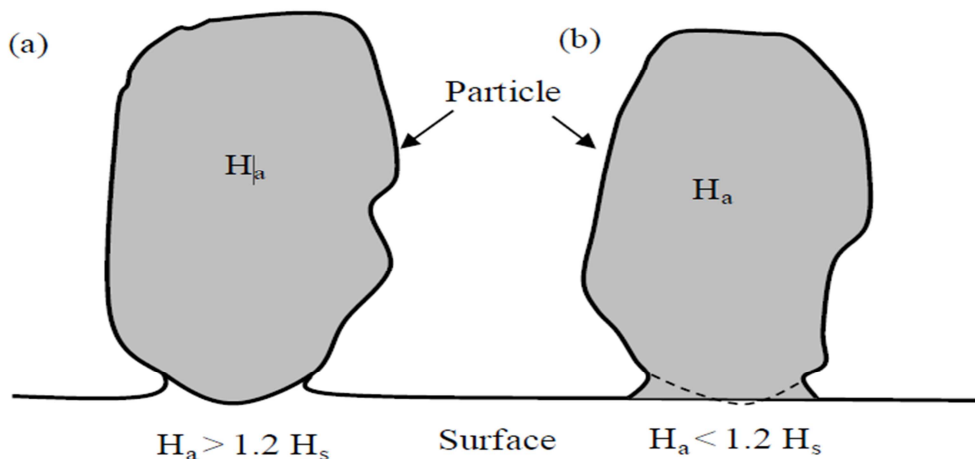


Figure III.17 Diagramme montrant le contact entre une particule sous une charge normale et une surface plane.

(a) Lorsque H_a est supérieur à $\sim 1,2 H_s$ la particule tire la surface

(b) Lorsque H_a est inférieure à $\sim 1,2 H_s$ écoulement plastique H_s se produire dans la particule

III.6 L'effet de l'érosion sur les grilles d'aubes

L'angle d'impact pour les particules de sable dans un moteur à turbine peut se produire sur toute la plage de 0° à 90° comme illustré à la figure III.18. La large gamme d'angles d'impact des aubes et moteur turbine particulièrement vulnérables à l'érosion puisque la plupart des matériaux d'ingénierie échouent soit avec le mécanisme de micro-usinage mentionné précédemment pour l'érosion à angle élevé de matériaux fragiles ou le mécanisme de déformation plastique de faible angle qui est typique des matériaux ductiles.



Figure III.18 Les particules de sable pénètrent vers la gauche et frappent l'aube de compresseur / turbine à différents angles. Adapté de Tabakoff.28

Pour la métallurgie des moteurs à turbine, les mécanismes de déformation plastique conduit à une rugosité significative des bords avant et arrière des aubes qui se traduit par une baisse des performances et l'efficacité du moteur. Des dommages sur le bord d'une première bliskétage du compresseur d'un General Electric (GE) moteur de série T-700 est illustré à la figure III.19. Le dommage est le résultat d'une combinaison de l'érosion (déformation plastique) et un impact important de particules qui résultent de la déformation observée du bord d'attaque. Cette blisk particulier est usiné à partir d'un GE exclusive en acier inoxydable similaire à AM355 (UNS35500). La composition de l'AM355 est donnée dans le tableau III.2. AM355 a été choisi comme matériau de substrat primaire pour tous les essais de revêtement.



Figure III.19. Des dommages sur le bord d'un acier inoxydable (AM355) premier blisk étage du compresseur due à l'érosion de particules solides. GE série T-700 blisk n ° de série GWHTFANG.

Tableau III.2: Composition de l'AM355 en acier inoxydable.

Elément	Atomique%
Fe	73.70 to 80.14
Cr	15.00 to 16.00
Ni	4.00 to 5.00
Mo	2.50 to 3.25
Mn	0.50 to 1.25
Si	0.50
C	0.10 to 0.15
N	0.07 to 0.13
P	0.04
S	0.03

CHAPITRE IV

METHODES D'INSPECTION

IV.1 INTRODUCTION

Les essais non destructifs (NDT) sont un type spécialisé de travail qui remplit un rôle critique dans les industries manufacturières et de construction. L'industrie regroupe des techniciens hautement spécialisés qui utilisent des équipements et des techniques sophistiquées pour évaluer les régions qui sont difficiles ou impossible à évaluer à l'œil nu.

Les techniciens inspectent des chaudières, des cuves, de la tuyauterie, des matériaux de construction, des processus de fabrication et jonction et ils évaluent l'intégrité des structures soudées pour en assurer l'opération sécuritaire et efficace conformément aux codes sévères gouvernementaux et aux normes strictes de l'industrie.

Les entrepreneurs en essais non-destructifs offrent des services d'inspection à des clients œuvrant dans la fabrication, la construction ou l'entretien de:

- usines de tuyaux, pipelines
- raffineries de pétrole, usines et terminaux d'huile et de gaz
- usines de pâtes et papier
- usines de production et de transformation de produits chimiques
- mines
- avions
- centrales thermiques et nucléaires
- réservoirs de stockage et autres installations connexes

IV.2 Le ressuage

Le ressuage est utilisé pour déceler les défauts de surface de matériaux ferreux et non-ferreux. Une teinture pénétrante est appliquée sur la surface d'un objet et laissée pour une période brève pour permettre à l'action capillaire l'attire à tout défaut de surface. On applique alors un révélateur et les défauts peuvent être observés par le technicien.

Ce processus est simple, versatile et économique. Il peut être amélioré par l'utilisation de teintures très colorées ou fluorescentes. Le seul inconvénient est que l'on ne peut déceler que les défauts de surface.

Ce genre d'inspection est utilisé pour les mêmes types d'applications que l'examen magnétoscopique mais aussi sur des matériaux non-ferromagnétiques de même que sur des alliages et l'acier inoxydable. Ces autres utilisations incluent:

- l'inspection annuelle des appareils de levage pour les hélicoptères de lutte contre les feux de forêt;
- le contrôle de la qualité des soudures des pièces en acier inoxydable dans les usines de tuyaux.



Figure IV.1 Le ressuage sur différent place dans la turbine à gaz

IV.2.1 Mise en œuvre

a) Condition d'application

Matériaux non poreux.
 Sans revêtement ni corrosion.
 Géométrie peu limitative

b) Préparation

Surface propre et sèche.
 Meulage légère parfois nécessaire.

c) Délais préliminaire (15 à 20 min.)

Séchage après nettoyage et lavage
 Aspiration par capillarité (pénétrant et révélateur)

d) Sécurité

Les produits à base de solvants sont toxiques, inflammables, corrosifs.

IV.2.2 Avantages et inconvénients

- Examens simple, relativement rapide, peu coûteux.
- Applicable à tous matériaux non-poreux.
- Applicable à des géométries complexes.
- Limitation aux défauts suffisamment ouverts en surface.
- Très bonne performance de détection.
- Risque d'indications parasites.
- Très bonnes performance de localisation et dimensionnement en longueur (limitées à la surface accessible)
- Incapacité de dimensionnement en profondeur.

- Danger des solvants toxiques, corrosifs, inflammables.
- Pas d'enregistrement (sauf photos ou vidéo)

IV.3 Le courant de Foucault

La technique d'inspection par courant de Foucault est utilisée pour des matériaux non-magnétiques ou peu magnétiques tels le laiton, le cuivre et l'acier inoxydable pour déceler des fissures, mesurer l'épaisseur du matériau, mesurer l'épaisseur d'un revêtement, mesurer la conductivité pour identifier le matériau, détecter le dommage causé par la chaleur, déterminer la profondeur de cémentation, l'usure de la selle, l'usure en cratère, les fissures transversales, gonflements causés par le gel, les crevasses, les creux et le contrôle a surveillance du traitement thermique. Ceci fait que le courant de Foucault est un outil utile pour déceler le dommage causé par la corrosion ou tout autre dommage qui cause l'amincissement des revêtements des avions ainsi qu'à l'intérieur des tuyaux des échangeurs thermiques et des tubes vaporisateurs. La méthode de courant de Foucault est excellente pour déceler les défauts de surface ou proche de la surface, est sensible aux fissures et autres défauts et requiert peu de préparation de la pièce à inspecter. Son usage est restreint aux matériaux conducteurs avec une surface accessible à la sonde. L'inspection par courant de Foucault est utilisée dans:

- les usines d'automobiles,
- les raffineries,
- la climatisation et
- les trous de rivet dans les avions.



Sondes courants de Foucault multiéléments uniques de GE augmenter la couverture tout en l'amélioration de la probabilité de détection des géométries complexes, tels que rotor de turbine.

Pour notre étude on utilise dans la majorité des cas l'inspection visuel à distance car :

- les dommages de pointe peuvent être importants avant de grave dommages dus aux vibrations.
- Le RVI permet d'examiner rapidement l'état d'aube de compresseur pour l'évaluation par des experts dans des endroits éloignés.

IV.4 Inspection visuelle à distance (RVI)

La RVI est une technique d'inspection rentable utilisée pour capturer des vues en temps réel et des images de vidéos à l'intérieur tels que des tubes, tuyaux, machines tournantes, moteurs, échangeurs de chaleur, tours de plateau, les navires pierres réfractaires et les structures fermées. La RVI peut être une technique complémentaire idéale à d'autres disciplines de contrôle non destructif et est fréquemment utilisée comme méthode d'inspection primaire ou initiale pour trouver la corrosion localisée et l'érosion.

Vidéo et image Boroscopique

A l'aide d'un Boroscope, il nous permet de donner une gamme des images et vidéos Boroscopiques technologiquement avancé, tout conçu pour la facilité d'utilisation tout en offrant des images et vidéos d'une qualité inégalée.

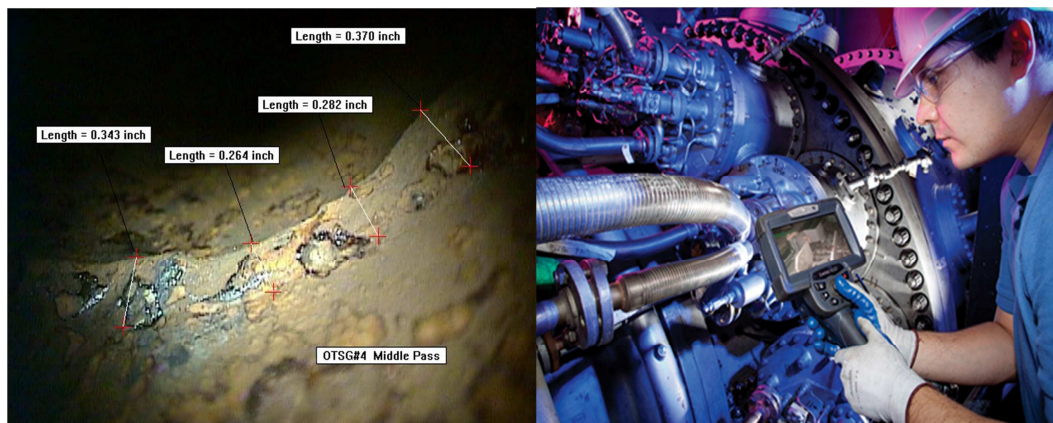


Image vidéo à l'aide d'endoscope montre plus de détails

IV.4.1 Objectifs et des attentes

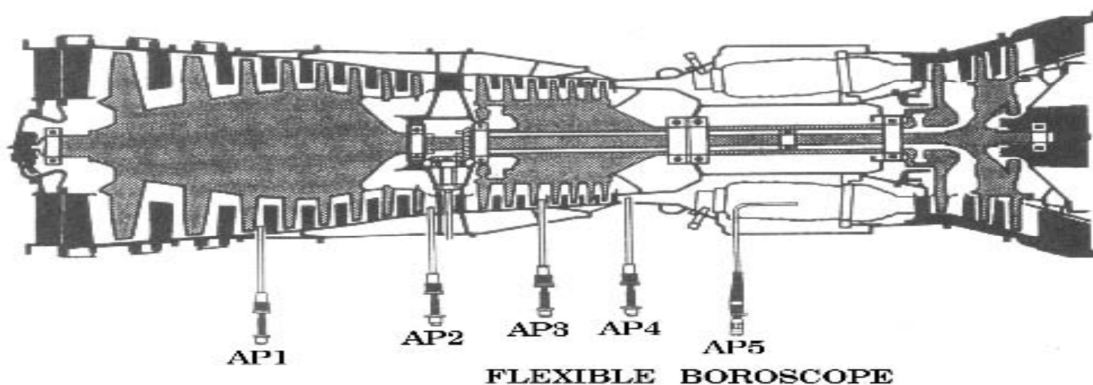
Tout comme un appareil photo, un endoscope ou un Boroscope est un instrument d'optique constitué d'une lentille d'objectif, une série de lentilles de relais, et une lentille d'oculaire 1. En outre, un système d'éclairage est également prévu.

Alors qu'une inspection Boroscopique peut (et doit) être faite sur une base régulière, il est plus efficace quand il est utilisé pour confirmer un problème mis en évidence soit par l'analyse des vibrations ou d'analyse de la performance du chemin des gaz.

Boroscopie la turbine à gaz permettrait d'identifier la zone du problème. Vibrations dans le compresseur peut être le signe d'une aube de compresseur défectueux ou déséquilibre créé par contaminant s'écaillant un profil aérodynamique. La grille d'aubes ou partie de la grille se détruit, ou des contaminants lâchés pourraient être influencés sur l'efficacité du compresseur. Une inspection Boroscopique fournira la direction soit d'augmenter l'effort de lavage à eau, la révision de l'appareil, ou bien poursuit l'appareil en marche.

IV.4.2 Évaluation des dommages

Pour plus de commodité dans l'évaluation de l'état des moteurs, certains constructeurs ont installé des ports de Boroscopique dans des endroits stratégiques tout au long de leurs moteurs. Figure ci-dessous est une représentation schématique d'une turbine à gaz avec l'emplacement typique des ports Boroscopique indiqués. Cependant, les fabricants ne sont pas conformes à l'emplacement des orifices du borescope sur différents types de moteurs et modèles. Par conséquent, un inspecteur doit utiliser chaque ouverture disponible ou, dans certains cas, des ouvertures qui sont facilement créées en retirant un composant de moteur (tels que des injecteurs de carburant, la pression ou de la température des sondes, etc.)



Coupe schématique de l'aéro-dérivé FT8 Turbine à gaz avec l'emplacement des ports de Boroscopique indiqué.

IV.4.3 Aubes et stators de compresseurs

Sauf pour certaines turbines à gaz dérivées de l'aéronautique, des ports de boroscopique sont rarement fournis dans la section compresseur de la turbine à gaz. Toutefois, les aubes directrices d'entrée de compresseur et de premières aubes de compresseur d'étage sont accessibles par le compartiment d'air pur, immédiatement en amont de la turbine à gaz. Pour un examen approfondi, un boroscopique peut être inséré à travers les aubes directrices d'entrée et toutes les premières lames de scène inspectées lorsque le rotor de compresseur est activé. Une inspection borescopique faite à centrale de Naama, par le groupe de GE. Montre les différents vues de compresseur dans différents étages.

Informations générales sur le site

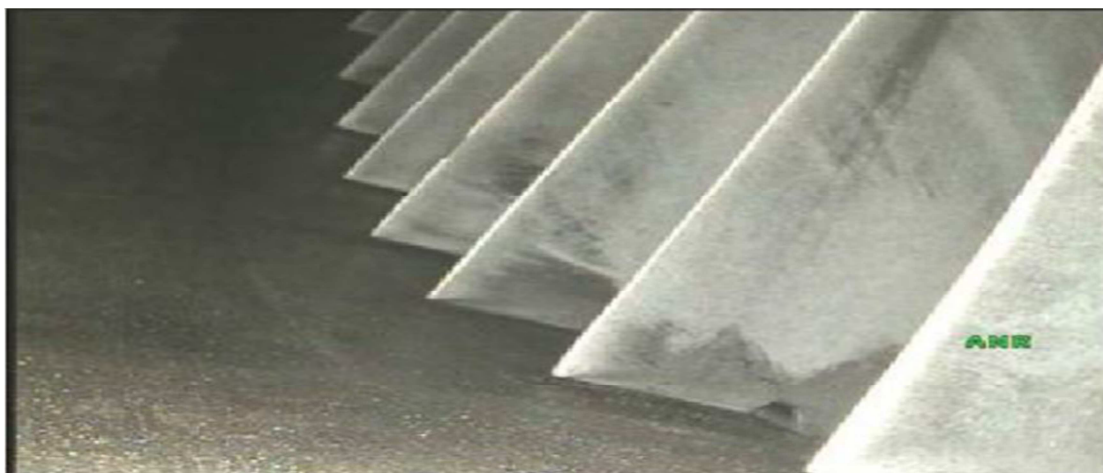
Numéro de série	
Client	SONALGAZ SPE
Site	Naama
Emplacement	ALGERIE
Numéro de l'unité	GT1
Inspecteur	
Représentant GE	
Heures de mise en marche	3,570.9
Démarrages (mises en marche)	700
Disjonctions	70
Date	11/8/2012

Modèle de l'équipement	MS5001P
No. I&LES Charge	
No. Customer Charge	
Type d'arrêt (Outage)	Programmé
Unité lavée a l'eau ?	Non
Unité tournée ?	Non

Photos de l'inspection



Section/Etage	Aube directrice
Composant	Inlet (Entrée)
Emplacement	Bord avant
Sous emplacement	Côté de l'aspiration
Observation	Typique
Type de mesure	
# Emplacement pièce	
Remarques	Les Aubes Directrices D'entrée (IGVs) contiennent des dépôts gris et noirs.



Section/Etage	Aube directrice
Composant	Inlet (Entrée)

Emplacement	Bord avant
Sous emplacement	Côté de la pression
Observation	Typique
Type de mesure	
# Emplacement pièce	
Remarques	Les Aubes Directrices D'entrée (IGVs) contiennent des dépôts gris et noirs.



Section/Etage	Compresseur 00
Composant	Rotor
Emplacement	Bord avant
Sous emplacement	Côté de l'aspiration
Observation	Typique
Type de mesure	
# Emplacement pièce	
Remarques	Contiennent des dépôts gris et noirs. Leger frottement observé contre le carter.



Section/Etage	Compresseur 00
Composant	Rotor
Emplacement	Bord avant
Sous emplacement	Côté de pression
Observation	Typique
Type de mesure	
# Emplacement pièce	
Remarques	Contiennent des dépôts gris et noirs. Aucun défaut observé.



Section/Etage	Compresseur 04
Composant	Stator
Emplacement	Bord avant
Sous emplacement	Côté de l'aspiration
Observation	Typique
Type de mesure	
# Emplacement pièce	

Remarques	Les aubes contiennent des dépôts gris et beiges.
-----------	--



Section/Etage	Compresseur 04
Composant	Stator
Emplacement	Bord avant
Sous emplacement	Côté de la pression
Observation	FOD (Dommage par corps étranger)
Type de mesure	
# Emplacement pièce	Position de Six heures
Remarques	De légers impacts ont été observés.

CHAPITRE V

ETUDES DES DEFERENTS REVETEMENTS

V.1 Introduction

Fonctionnellement les revêtements classés ont été utilisés pour maximiser les performances dans les secteurs de l'outillage et de l'automobile. L'abondante littérature sur les revêtements résistants à l'usure fournit une base pour des améliorations significatives dans le développement, la performance et l'optimisation des systèmes de revêtement avancés résistant à l'érosion.

Les matériaux céramiques sont de plus en plus utilisés dans des applications structurales, et une meilleure compréhension des matériaux céramiques / systèmes de revêtement, de la mécanique d'érosion, la structure du revêtement, et la conception continuera à être de la plus haute importance. Les revêtements multicouches sont généralement fabriqués par dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) [17-18].

V.2 Matériaux résistants à l'érosion

Dans le domaine des matériaux durs, les borures, les carbures et les nitrures sont d'un intérêt particulier. Les matériaux très étudiés pour la résistance à l'érosion comprennent les nitrures et les carbures interstitiels et covalents. Les éléments Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, et W forment des nitrures interstitiels. B, Al, Si, P, Ga, In et Tl former des nitrures covalents, et sont très tolérants aux offres d'azote et métal, permettant une large gamme de stœchiométries [18].

Parmi ces matériaux, TiN, VN, ZrN, NbN, HfN, TaN, BN, AlN, Si₃N₄ sont définis comme des matériaux réfractaires, car ils ont des points de fusion au-dessus de 1800°C avec des stabilités chimiques. Alors que des aubes de compresseur ne sont généralement pas soumises à ces grandes températures. Données sur les propriétés des matériaux sont fournis dans le tableau V.1.

Tableau V.1: propriétés des matériaux en vrac de certains carbures et les nitrures.

matériaux	Phase	Structure	symétrie	Module de Young	module de cisaillement	Module vrac	coefficient de Poisson	Dureté(GPa)	Density(g/cc)
TiN		FCC	Fm3m	251				18-21	5,4
TiC		FCC	Fm3m	410-510	186	240-390	0,191	28-35	4,91
<i>TiB₂</i>		Hex		480-563	400			15-45	4.52
ZrN		FCC	Fm3m	397				15	7.32
ZrC		FCC	Fm3m	350-440	172	207	0.191	25.5	6.59
HfN		FCC	Fm3m					16.3	13.8
HfC		FCC	Fm3m	350-510	193	241	0.18	26.1	12.67
<i>Cr₇C₃</i>		Hex	Pnma	15.5-24.5				10-18	6.97

Cr_3C_2		Ortho	Pnma	15.5-24.5				10-18	6.74
AlN		Hex	F43m	315			0.25	12	3.16
Si_3N_4		Hex	P31C	260-330			0.23-0.27	16-18	
Si_3N_4		Hex	P63/m	260-330				16-18	
SiC		Hex		475	192	96.6	0.142	24.5-28.2	3.211
SiC		Cubic		475	192	96.6	0.142	24.5-28.2	3.214
BN		Hex	cF8	46.9-73.5				82-83.7	19.2-29.1
BN		Cubic		650				29.89-43.12	3.48
B_4C		Rhomb		290-430	165-200	190-250	0.18	27.4-34.3	2.52
WC		Hex	P6m2	620-720	262		0.18	500-600	15.8

V.2.1 Le nitrure de titane (TiN)

Le système de matériau le plus largement reconnu pour la résistance à l'érosion est le nitrure de titane. Cela est facilement appliqué à l'aide de placage ionique réactif, le dépôt chimique en phase vapeur, pulvérisation cathodique, d'un arc cathodique, et du dépôt physique en phase vapeur faisceau d'électrons (EB-PVD). Il a une dureté élevée, relativement et une bonne résistance à la fracture ($K_{IC} = 5 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$) et une stabilité chimique, et est un revêtement populaire en raison de sa couleur d'or de décoration.

Comme un nitrure interstitiel, TiN présente une structure cubique Fm3m à stœchiométrie 1:1. La stœchiométrie de la phase cubique pour δ -TiN varie de TiN0.6 à TiN1.1. Son degré élevé de liaison covalente rend le matériau chimiquement et thermiquement stable, ainsi que d'une excellente barrière de diffusion. Le nitrure de titane a une température de fusion de 2950 °C, s'oxyde à l'air supérieure à plus de 600 °C, a une faible raideur de 251 GPa (pour un matériau réfractaire) et la plage de dureté de 18 à 21 GPa (~ 1500-2000 VHN). Cette combinaison et d'autres propriétés (telles que la ténacité) conduisent à une bonne résistance aux chocs.

V.2.2 Nitrure de chrome (CrN)

Les matériaux avec une meilleure résistance à la corrosion que le nitrure de titane comprennent TiAlN, CrN, et TiCrN [8]. L'avantage chimique est dû à la formation d'un oxyde de protection de haute qualité.

Les revêtements CrN sont utilisés dans des environnements qui sont soumis à la fois l'érosion et la corrosion. Swadzba [19,21] a révélé que CrN est beaucoup plus résistant à la corrosion par piqûres que le TiN et il a suggéré que CrN était l'avenir de l'érosion et l'usure des revêtements résistants. Il ne fait aucun doute que le nitrure de chrome binaire aura un rôle permanent dans la protection contre la corrosion, mais il n'a pas été prouvé pour être aussi efficace que le nitrure de titane dans la protection contre l'érosion. Cependant, combinée à des systèmes ternaires TiCrN et AlCrN pourrait offrir une solution à la fois.

V.2.3 Carbures/nitrures tertiaires et quaternaires

Les matériaux Ti, Zr, Hf, Nb et Ta peut être déposée de façon réactive à l'aide de la pulvérisation cathodique à magnétron pour former binaires, les nitrures et les carbures tertiaire

et quaternaire [21]. TiAlN, TiZrN et TiCrN sont tous difficiles à l'érosion et les matériaux résistants à la corrosion.

Parmi ceux-ci, le composé résistant à l'érosion tertiaire le plus étudié est le titane-aluminium-nitride. La plupart des revêtements contenant de l'aluminium profitent de la mobilité élevée atomique de l'aluminium et dans des milieux oxydants, l'aluminium migre vers la surface où il forme une couche protectrice d'alumine Al_2O_3 fournissant une résistance à l'oxydation à haute température.

Ward [21] a étudié la dureté et la structure de TiAlN, TiZrN et TiCrN. La dureté de TiZrN était semblable à celle du nitrure de titane, tandis que les duretés des composants TiCrN et TiAlN étaient nettement inférieures à celle de (TiN). Paldey et Deevi ont découvert un pic dans la dureté de TiAlN lorsque l'Al a de concentration de 50% en moles, comme montré à la figure V.1 qui correspond à la transition entre une structure de cristal de NaCl à une structure de cristaux de ZnS [19, 21] représenté sur la figure V.2. Ils ont constaté que TiAlN peut être plus difficile que (TiN).

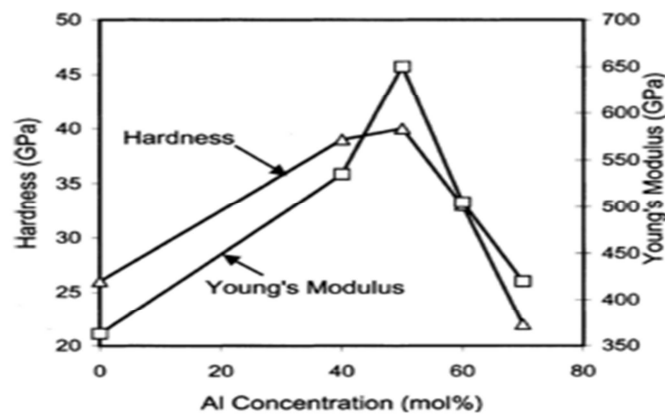


Figure V.1: Dureté de TiAlN en fonction de la stoechiométrie [123].

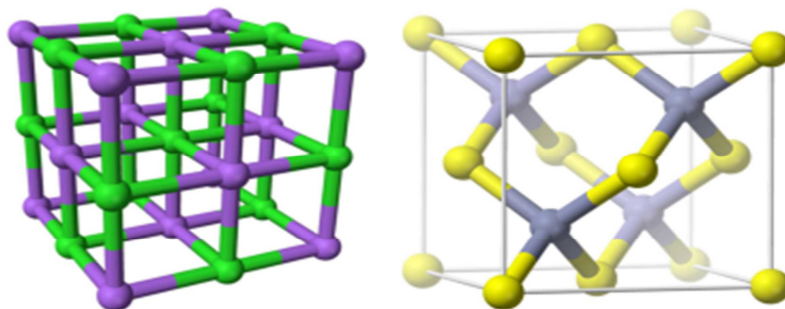


Figure V.2. Les structures cristallines de (gauche) nitrure de titane (structure de NaCl), où les ions d'azote grandes sont pourpres et les ions titane petits sont verts. Sur la droite, est le nitrure d'aluminium (structure de blende) où le jaune est l'azote et le gris est en aluminium.

Hevenquist et Yang ont montré que (TiAlN) a de bien meilleures performances de l'érosion que (TiN) en raison de la combinaison d'une grande dureté et la ténacité. (TiAlN) est un revêtement d'une dureté assez élevée et une structure à grains fins exposées presque au même ordre de grandeur moins que l'érosion (TiN).

V.2.4 Diamond like Carbon (DLC)

Un autre revêtement qui peut avoir une bonne résistance à l'érosion est un diamant DLC. Kulikovzky et al. [22] ont déposé plusieurs diamants comme revêtements d'une dureté allant de 6,1 à 18,8 GPa en raison d'une très large gamme d'épaisseurs de revêtement, et un module d'Young allant de 9,4 à 98,1 GPa. Un résultat notable est la forte élasticité de charge de pénétrateur (77% -98%). Les revêtements résilients pourraient être très utiles comme matériaux résistants aux chocs.

Bois a montré que le diamant DLC avait une performance supérieure sur un large éventail d'autres matériaux dans les tests d'érosion de boue. Diamant DLC, cependant, ne fonctionne pas aussi bien. Les tests de bois inclus revêtements avec une large gamme d'épaisseur. Le diamant DLC n'était que de 3 microns d'épaisseur, alors que de nombreux revêtements étaient de 100 à 1000 microns d'épaisseur. Bien que cela empêche les comparaisons directes, il est clair que le diamant-comme les revêtements de carbone valent examen sérieux. Heinrich [22] a montré que les revêtements diamant DLC étaient supérieurs aux revêtements TiAlN sous l'impact normal.

V.2.5 Discussion

Les matériaux de revêtement le plus couramment étudié pour particules résistance à l'érosion sur les composants de l'aérospatiale est le nitrure de titane, car il est facilement déposé par un large éventail de méthodes de dépôt de revêtement et a une bonne combinaison de dureté, la résistance et la stabilité chimique. Alors que d'autres matériaux ont été évalués, aucune preuve sur le potentiel commercial que les systèmes à base de nitrure.

V.3 Propriétés des revêtements multicouches

Afin de décrire les dépôts de façon unique, un système d'identification d'échantillon (ID) est indiqué dans le tableau V.2. Cette notation de ($\{ \# \}$ de couches) L ($\{ \}$ fraction volumique intercalaire) (v%), sera désignée uniquement les échantillons d'érosion.

Tableau V.2: Identification de l'échantillon (ID) et conception d'architecture multicouche.

ID	nombre de passages	Épaisseur totale	Nombre total de couche	Fraction du volume Ti	Épaisseur de la couche de liaison	Épaisseur de la couche dure	Épaisseur de couche intermédiaire
2L1.25v%	B20070122	25 μ m	2	1,25%	0,31 μ m	24,69 μ m	N/A
2L5v%	B20070206	25 μ m	2	5%	1,25 μ m	23,75 μ m	N/A
2L25v%	B20070124	25 μ m	2	25%	6,25 μ m	18,75 μ m	N/A
8L1.25v%	B20070208	25 μ m	8	1,25%	0,5 μ m	6,07 μ m	0,08 μ m
8L5v%	B20070205	25 μ m	8	5%	0,5 μ m	5,89 μ m	0,31 μ m
8L25v%	B20070209	25 μ m	8	25%	0,5 μ m	4,90 μ m	1,63 μ m
32L1.25v%	B20070130	25 μ m	32	1,25	0,5 μ m	1,51 μ m	0,02 μ m
32L5v%	B20070207	25 μ m	32	5%	0,5 μ m	1,46 μ m	0,08 μ m
32L25v%	B20070201	25 μ m	32	25%	0,5 μ m	1,17 μ m	0,39 μ m

V.3.1 Microscopies optique

La caractérisation optique était nécessaire pour confirmer la structure des couches de revêtements multicouches (TiN/Ti). Comme l'azote est trop léger pour être détecté par les électrons ainsi rétrodiffusés à la microscopie électronique à balayage (MEB), il existe peu de contraste entre le titane et le nitrure.

V.3.1.a Coupe transversale morphologique

Les sections polies du noyau des échantillons multicouches (TiN/Ti) ont été analysées à l'aide de la microscopie optique et sont présentées dans la figure V.3. Ces revêtements ont tous été déposés dans des conditions de dépôt similaires, mais avec différentes fractions de volume et de combinaisons d'épaisseur de titane et de nitrure de titane.

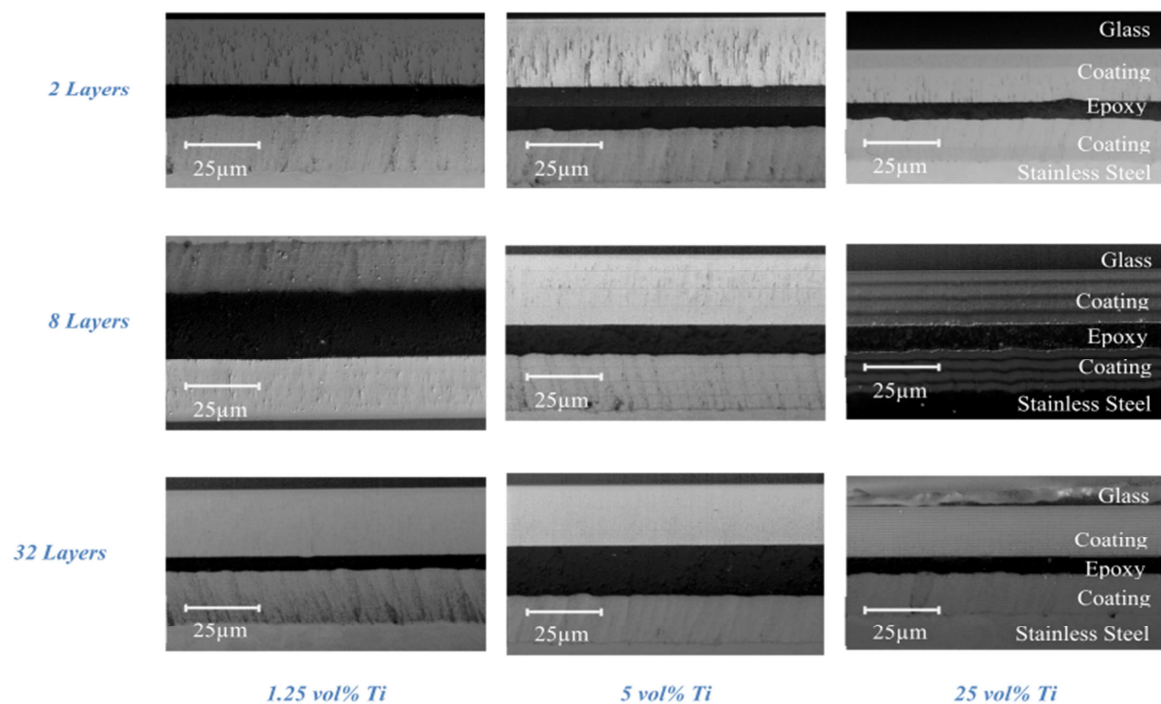


Figure V.3: Images microscopiques optiques transversale en coupe du noyau (Ti N / Ti) revêtements multicouches déposé sur du verre (en haut) et AM355 substrats (en bas).

Un résumé de la microstructure du revêtement est présenté au tableau V.3. Tous les revêtements semblent avoir des caractéristiques de la zone T (selon la structure de la zone Thornton).

La nature colonnaire des revêtements déposés sur les substrats AM355 ne semble pas être affectée de façon significative par le nombre de couches. En revanche, la nature des revêtements en colonne déposés sur les substrats de verre semble être très fortement dépendante du nombre de couches dans le revêtement. Comme le nombre de couches augmente, les colonnes deviennent beaucoup plus fines. Cela est dû à la ré-germination et la croissance, qui n'est pas aussi évident avec les substrats d'acier inoxydable en raison de la rugosité élevée de la surface initiale. Il n'y a pas de corrélation entre le volume substantiel de titane et de la nature du revêtement en forme de colonne.

Tableau V.3: Description sommaire des caractéristiques microstructurales des différents revêtements de base. La nature colonne de la microstructure a été classé aucun, léger, doux ou modéré. La porosité a été qualitativement classé aucun, léger, modéré, élevé ou sévère.

Vol&Titanium	colonne AM355	colonne Silicon	porosité AM355	porosité Silicon
2L1,25v%	Modéré	légère	élevé	doux
2L5v%	forte	Modéré	Modéré	sévère
2L25v%	forte	Modéré	élevé	doux
8L1,25v%	légère	légère	Modéré	Modéré
8L5v%	forte	Modéré	doux	doux
8L25v%	forte	légère	légère	légère
32L1,25v%	forte	Modéré	doux	légère
32L5v%	forte	légère	légère	doux
32L25v%	forte	Non	légère	Non

V.3.1.b Épaisseur du revêtement

Le tableau V.4 présente les épaisseurs des revêtements optiquement mesurées pour les noyaux des revêtements multicouches (TiN/Ti). Les valeurs moyennes minimales et épaisseur sont une préoccupation majeure du point de vue de la conception afin de mieux évaluer et de prédire vie du revêtement. Ces valeurs sont également d'une importance capitale du point de vue de l'essai de l'érosion, car ils seront un facteur clé dans l'échec de revêtement initial ainsi que la durabilité moyenne. La résolution de procédure indiquée est la taille de chaque pixel à 1000x.

Tableau V.4: Analyse statistique de l'épaisseur totale du revêtement de neuf échantillons à l'aide de Clemex.

Vol&Titanium	L'épaisseur		Déviation		résolution des processus(μm)
	moyenne(μm)	standard(μm)	Minimum(μm)	Maximum(μm)	
2L1,25v%	19,7	0,207	18,3	19,90	0,104
2L5v%	19,5	0,315	18,1	19,80	0,104
2L25v%	25,2	0,115	24,7	25,6	0,104
8L1,25v%	19	0,06	18,8	19,1	0,104
8L5v%	26,3	0,079	26,1	26,5	0,104
8L25v%	25	0,202	23,9	25,7	0,104
32L1,25v%	24,3	0,069	24,1	24,7	0,104
32L5v%	23	0,29	22,2	23,4	0,104
32L25v%	19,9	0,129	19	20,4	0,104

L'épaisseur des revêtements de base ne varie pas beaucoup, à l'exception des revêtements de titane(25% en volume). Le taux de dépôt du titane est inférieure à calculée à partir des dépôts de référence et, par conséquent, les revêtements avec (25%) de titane ne sont pas aussi épais que prévu. Cette diminution de l'épaisseur probablement eu un impact mineur sur la dureté mesurée à des charges élevées ainsi que la durabilité à l'érosion du revêtement.

V.3.2 Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie optique offre un bon contraste entre les matériaux, la microscopie électronique offre plus fort grossissement et la profondeur de champ, ce qui fournit une meilleure résolution de la microstructure.

La figure V.4 montre des images MEB des sections polies (2L1.25v %). L'échantillon déposé sur un substrat de l'(AM355) présente de très grandes colonnes qui ont été nucléées à l'interface du substrat de revêtement. Il ya une petite quantité de porosité près de l'interface (revêtement/AM355), indiqué par la flèche. Cette porosité est le résultat de la rugosité du de la surface de substrat et est transporté à une certaine distance bien loin del'épaisseur du revêtement.

Les colonnes de la couche déposée sur le verre ont été augmentées indépendamment de la surface lisse. Les images à fort grossissement de la figure V.4 indiquent que les colonnes sont environ un demi à un micron de large.

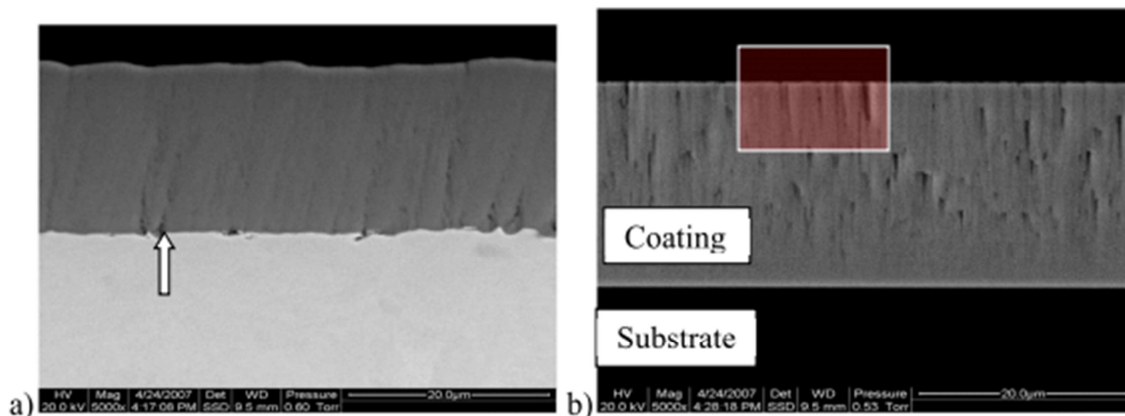


Figure V.4 Images MEB des sections polies de 2L1.25v% déposés sur :

a) AM355 et b) le verre à un grossissement de 5000x.

La flèche indique la porosité due à la rugosité à l'interface revêtement/substrat. Il semble y avoir quelques objets de polissage sur les revêtements 2L1.25v (%) qui étaient déposés sur les substrats de verre qui est indicatif de la colonne retiré. La figure V.5 est une inspection, au plus fort grossissement de la zone indiquée dans la figure V.5.b.

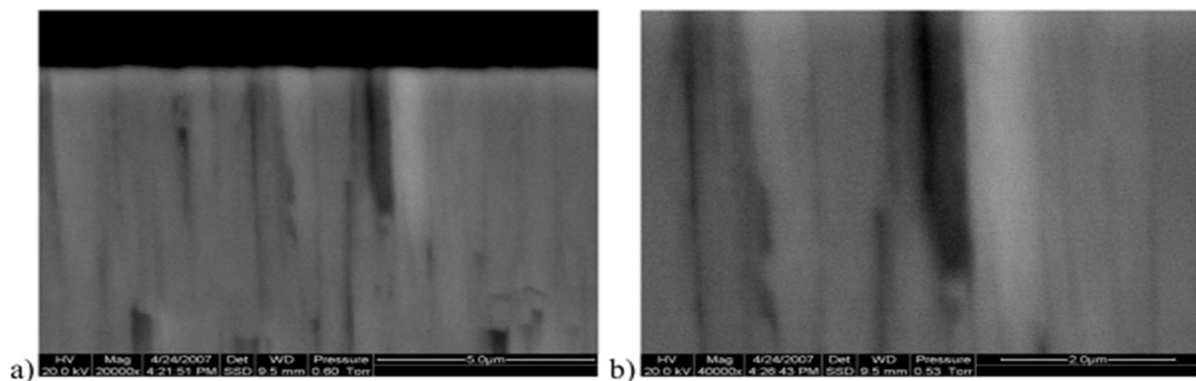


Figure V.5 images MEB des sections polies de 2L1.25v% déposés sur verre a) 20.000 x et b) 40,000 x grossissement.

La figure V.6 et la Figure V.7 montre des images MEB des échantillons de section transversale (2L25v%). Ils ont des colonnes moins prononcées que 2L1.25v%. Ceci est dû à la couche de titane ayant moins de croissance colonnaire, comme le dépôt est à une température supérieure homologue pour le titane de son nitrure (0,28 contre 0,16). Les images d'agrandissement supérieur de la Figure V.7 indiquent que la rugosité de la surface supérieure de l'AM355 contribue aux grandes colonnes à l'intérieur de la microstructure du revêtement.

Substrat de verre
 Revêtement
 Epoxy
 Revêtement
 Substrat en acier inoxydable

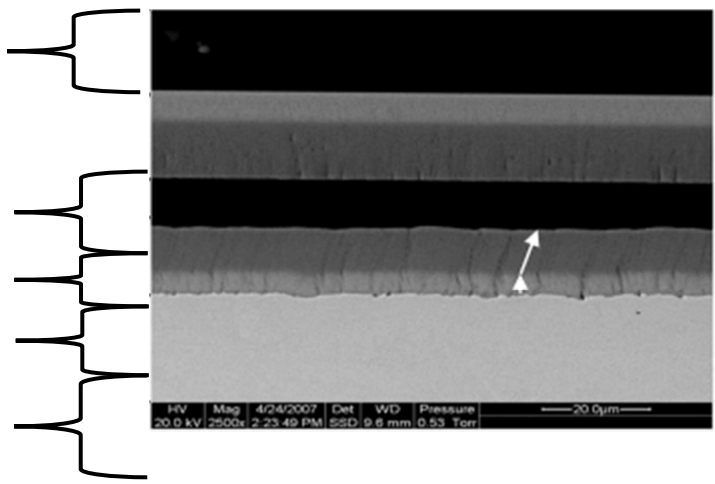


Figure V.6 image MEB des sections polies de 2L1.25v% déposé sur du verre (en haut) et AM355 (en bas) à un grossissement de 2500x. Les deux flèches indiquent le changement inhabituel dans le sens de la croissance.

Il existe également un changement notable de la directivité de la croissance du revêtement au passage (TiN) à partir de titane. On constate un changement distinct de la croissance d'une colonne verticale, à une croissance à un angle oblique. Cela peut être dû à différentes températures homologues.

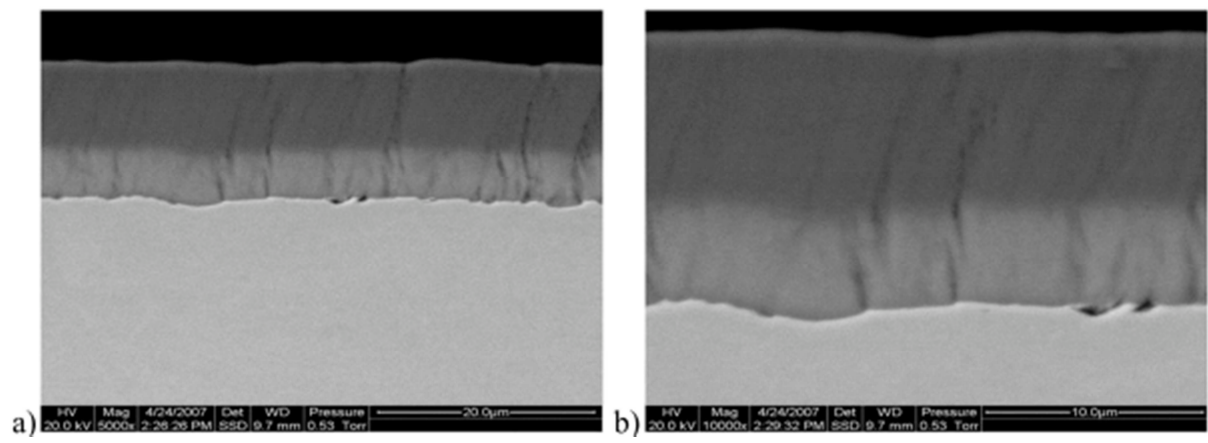


Figure V.7 Images MEB des sections polies (2L1.25v%) déposée sur l'AM355 à
 a)) un grossissement de 2500x
 b) un grossissement de 5000x.

La figure V.8 montre la microscopie électronique à balayage (MEB images) des quatre revêtements intercalaire au même grossissement, de la tension d'accélération et le contraste. Les intercalaires sont visibles pour chaque matériau, avec un faible contraste des intercalaires

Ti contre l'(TiN). En forme de colonne (TiN) nucléée à la substrat de (AM355) rugueux et propagé à travers tous les matériaux de couche intercalaire avec une certaine porosité au niveau des interfaces, ce qui correspond à un (Zone T) la morphologie de revêtement, sur la base des modèles de la zone de structure de Thornton. Bien que l'objectif était d'augmenter de 25 μm d'épaisseur de revêtement (Ti N / M), les valeurs finales étaient $21,87 \pm 0,03 \mu\text{m}$ de TiN / Ti, $20,96 \pm 0,05 \mu\text{m}$ pour Ti (N / Hf), $18,99 \pm 0,04 \mu\text{m}$ pour TiN / Zr, et $16,31 \pm 0,02 \mu\text{m}$ pour (Ti N / Nb). Les plus mince (Ti N / Zr) et les revêtements TiN / NB devrait artificiellement diminuer la durée de vie de ces revêtements. L'épaisseur de la couche intercalaire pour Ti était de $394 \pm 93 \text{ nm}$, Zr était de $186 \pm 25 \text{ nm}$, Hf était de $363 \pm 19 \text{ nm}$, et Nb était de $182 \pm 24 \text{ nm}$. L'épaisseur de la cible était de 310 nm .

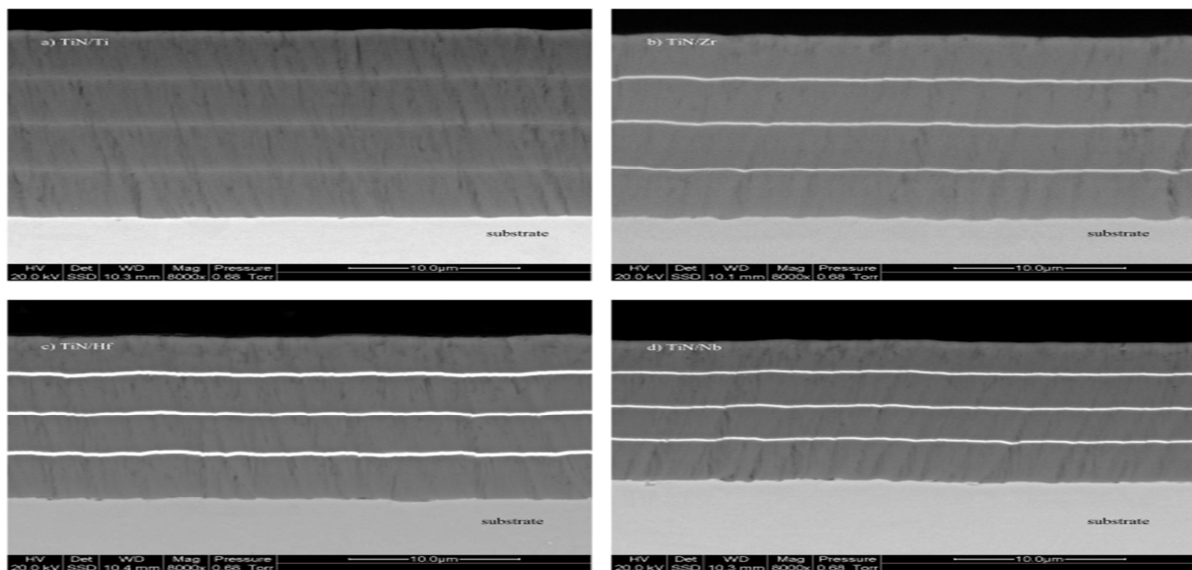


Figure V.8 Images MEB des revêtements multicouches à un grossissement de 8000X. Les images sont de (a) TiN / Ti, (b) TiN / Zr, (c) TiN / Hf, et (d) TiN / Nb des revêtements multicouches.

V.3.3 Nombre de Dureté moyenne de Vickers (VHN)

La Figure V.9 montre le VHN des échantillons à la fois pour 50 grammes et 200 grammes charge de l'indentation. La fraction volumique de 1,25% et de 5% montrent des tendances similaires. La grande charge de renforcement (200 g) de mieux interroge la dureté du substrat et la couche de liaison. Par conséquent, le VHN de la charge de 200 g est un composite du revêtement et de substrat.

Les revêtements monolithiques de Ti de 25% montrent une baisse de la dureté quand l'augmentation de la charge à 200 grammes. C'est parce que le pénétrateur a pénétré dans une grande partie du nitrure et dévier la couche de liaison de titane.

Les multicouches en titane de 25% ont montré peu de différence entre les valeurs moyennes de VHN de 50 g à 200 g, que les couches sont si minces, et qu'ils reflètent déjà la dureté du composite de titane et de nitrure de titane. En pénétrant plus profondément dans le revêtement, la dureté mesurée diminue légèrement.

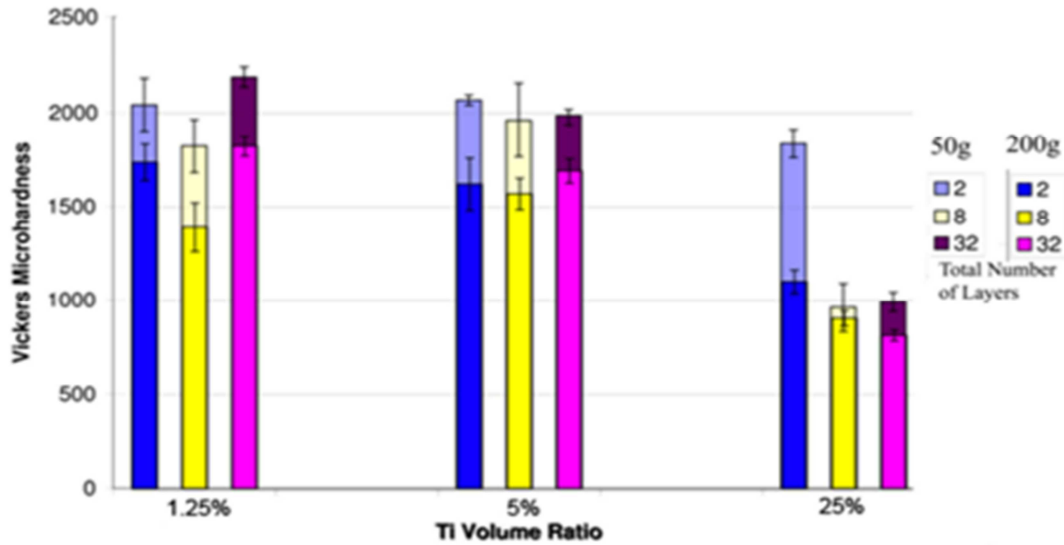


Figure V.9 superposition des valeurs de dureté Vickers de la 50 grammes et 200 grammes de charges avec des barres d'erreur de déviation standard.

Ce test de dureté a été la première indication d'un problème avec le revêtement 8L1.25v%. La $VHN_{0.050}$ pour 8L1.25v% était 1390, ce qui était assez faible pour TiN. Cela suggère que les problèmes de traitement a conduit à une mauvaise performance du revêtement.

Le nombre de dureté moyennede Vickers des couches intercalaireen fonction du matériau et de la charge est présenté dans la figure V.10. A titre de comparaison, la dureté des métaux de couche intercalaire tel que déposé (nominalement 12-20 μ m) a été mesurée à une charge de 50 grammes. A 200 grammes de charges, le tiret profondeurs correspondait à environ un quart de pénétration des revêtements multicouches; Par conséquent, ces résultats peuvent être influencés de manière significative par la présence des interfaces entre les couches.

Puisque, tous les revêtements présentent certains ou importante fissuration à 300 grammes de charges, Le numéro de la dureté de la moyenne de Vickers était invalide à 300 g de charge et n'a pas été présenté dans la Figure V.10.

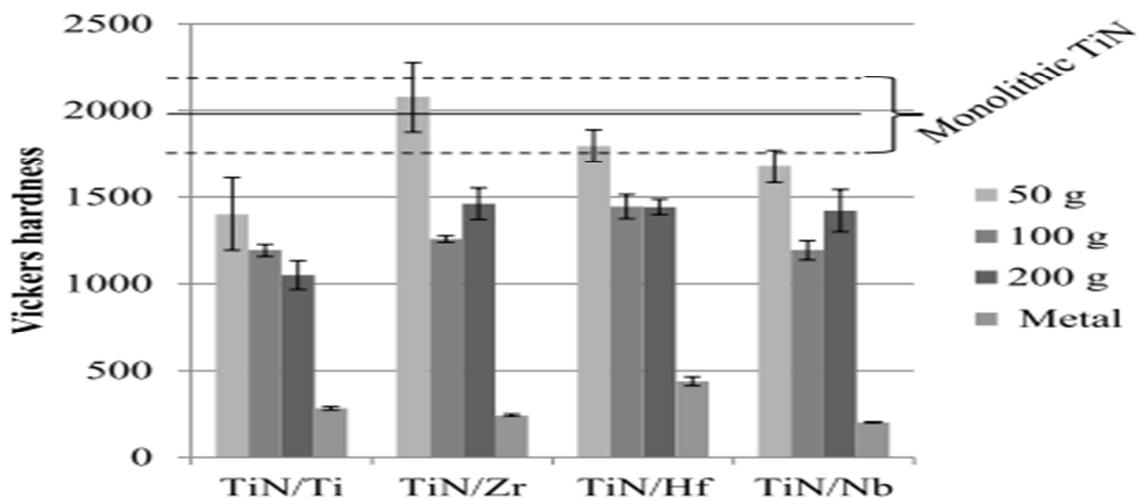


Figure V.10 Micro-dureté Vickers en fonction du matériau de revêtement pour le tiret charges de 50, 100, et 200 grammes.

Bien qu'il soit le revêtement le plus épais, le revêtement TiN/Ti avait la plus faible dureté de toutes les charges, qui a été prévu que le titane présente la plus faible limite d'élasticité des matériaux de couches.

Cette faible VHN50 (1400 ± 210) a suggéré que la surface serait déviée significativement au contact de particules érosives initiales. La conformité apparente était prévue de réduire les forces de contact hertziennes locales et améliorer les performances contre les grosses particules rondes.

Les revêtements de TiN/Nb ont le deuxième plus bas VHN dans toutes les charges 1678 ± 93 à 50 g 1192 ± 57 à 100 g, et 1422 ± 121 à 200 g. Il y a eu une augmentation intéressante de la dureté de la charge de 200 g qui a été également noté dans les revêtements TiN/Zr, qui pourraient être dus au pénétrateur interagir avec interfaces des couches.

Le VHN50 du revêtement multicouche TiN/Zr (2078 ± 202) est semblable à celle du revêtement monolithique TiN. Ceci indiquait que peu ou pas d'addition de conformité a été fourni par le zirconium à la charge la plus faible en raison de la couche intercalaire mince et haute limite d'élasticité. Comme la charge portée à 100 g, la valeur de dureté de Vickers de l'ensemble des couches a diminué, mais pas de plus de la diminution relative de multicouche de TiN/Zr: de 2078 ± 202 à 1259 ± 19 VHN. Il s'agissait d'une combinaison nuisible, puisque le système de revêtement fournira une contrainte de contact initial élevé, tandis que les couches ductiles intercalaires seront déviées significativement de la force augmentée.

La dureté du revêtement de TiN/HF est comprise entre celui des revêtements de TiN/Nb et de TiN/Zr. Il y a eu une baisse significative de la dureté à 50 g (1796 ± 93) vers 1445 ± 70 à 100 g. Toutefois, lorsque la charge augmente à 200 g, la dureté n'a pas diminué comme le revêtement de TiN/Ti ou augmentation comme le TiN/Zr ou revêtements TiN/Nb. Le VHN200 de 1442 ± 43 était statistiquement identique à la VHN100.

V.3.4 Résistance à la rupture

La ténacité des principaux revêtements multicouches TiN/Ti a été mesurée via les techniques d'indentation. À partir des données initiales de fracture, générées par la longueur de la fissure optiquement mesurée, les données indiquaient que la ténacité augmente avec l'augmentation du nombre de couches pour les revêtements de 1,25% en volume.

Toutefois, lorsqu'il est analysé au microscope, les branches des fissures ont été trouvées à être plus grandes que celles observées optiquement, et la ténacité à la rupture diminue de façon monotone avec l'augmentation du nombre de couches et encore plus vite avec l'augmentation du volume de fraction de titane, comme le montre la Figure V.11.

Cette ténacité à la rupture ne doit pas être considérée comme une mesure de la dureté du matériau, mais une mesure de la robustesse du système contre les charges nettes.

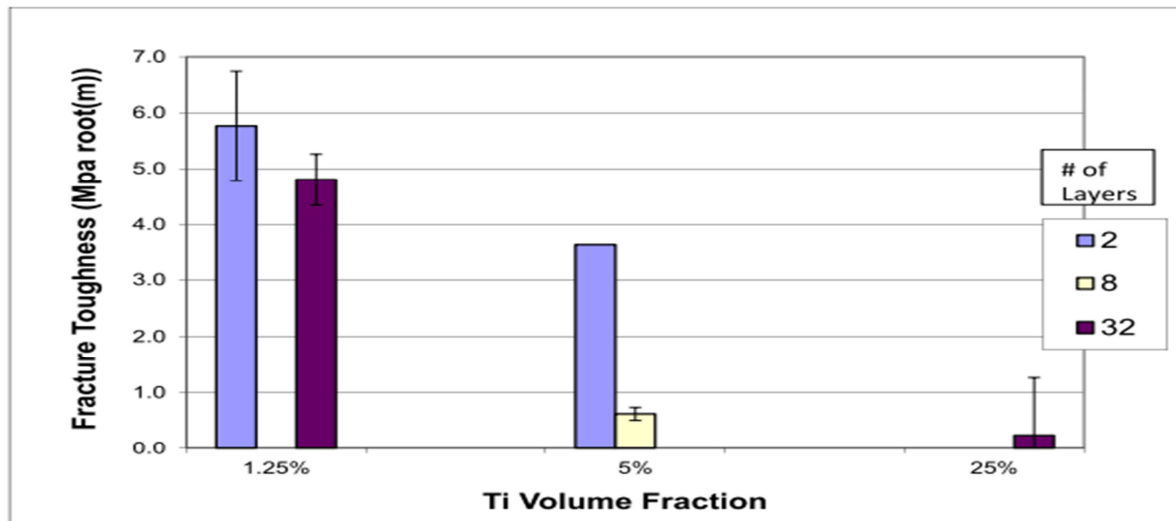


Figure V.11 Ténacité des revêtements sélectionnés.

V.3.5 Analyse des contraintes par diffraction des rayons X

L'analyse des contraintes résiduelles a été réalisée selon la méthode de Psi-squared [24].

La figure V.12 montre qu'il n'y a pas de corrélation définitive entre les contraintes résiduelles de compression dans les couches (TiN) et de la conception de la couche, ce qui est nouveau inattendu. Il y a une diminution inexplicable de la contrainte résiduelle de la couche 2 et 32 1,25% en volume et 25% en volume de revêtements. Ce furent les derniers revêtements déposés et exposés qualitativement faible adhérence. Si certain décollement a été observé, ce qui pourrait expliquer la faible contrainte de compression ainsi que la mauvaise performance de l'érosion.

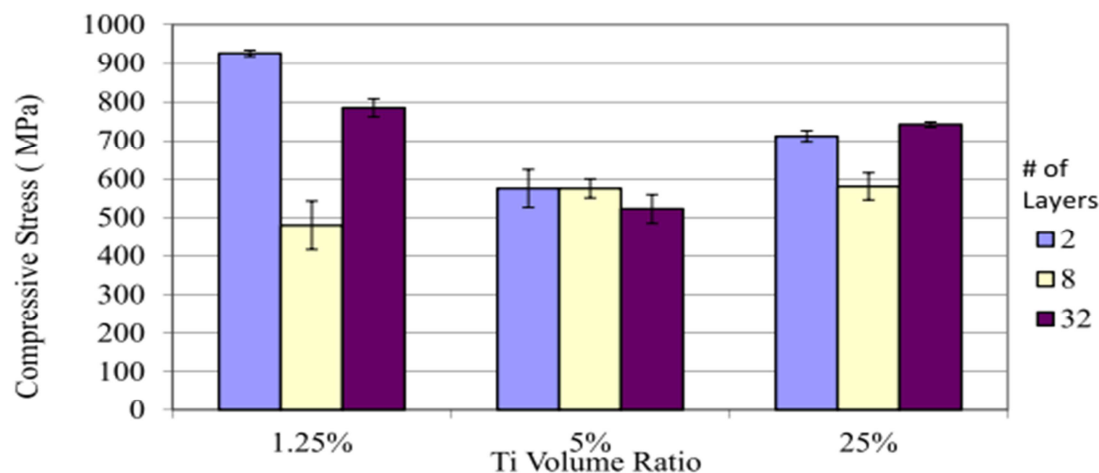


Figure V.12 Résumé des XRD mesures de contraintes résiduelles sur le (TiN) pic en utilisant un module d'élasticité de 425 GPa [141] et $\nu = 0,25$. Les barres d'erreur sont l'incertitude de régression.

V.3.6 Rugosité

La rugosité arithmétique moyenne de surface Ra, des revêtements déposés sur les substrats d'AM355 ne semblent pas avoir de grandes différences en tant que facteur de la conception du revêtement, comme le montre la Figure V.13. Il ya une petite augmentation de la rugosité du revêtement de la couche 2 avec le titane de 25%.

Les valeurs de rugosité d'environ 0,20 à 0,25 μm a été fortement influencée par la rugosité initiale ($0,139 \pm 0,019 \mu\text{m}$) du substrat de l'AM355 en acier inoxydable non revêtu.

Le revêtement le plus notable a été le revêtement monolithique avec 5% de titane, qui a montré une grande dispersion de la rugosité sur l'AM355 (Figure V.13) et des valeurs très élevées pour la rugosité sur silicium (figure V.14). Cette mesure de la rugosité élevée de la surface est le résultat du flambage de la surface à petite échelle survenu mois après le dépôt initial. Il n'y avait pas suffisamment de revêtement non fissuré disponibles pour obtenir une évaluation précise de la rugosité de la surface réelle.

En raison de la relaxation des contraintes, cet échantillon a également eu très faible contrainte de compression résiduelle mesurée et très faible performance dans le coefficient de tests de restitution.

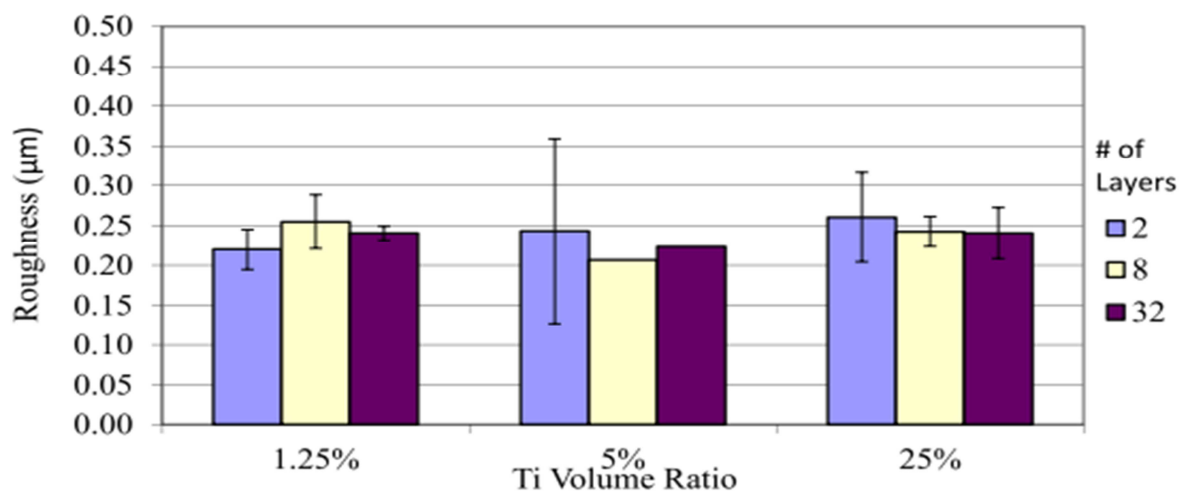


Figure V.13: rugosité de surface moyenne arithmétique des neuf principaux TiN / Ti revêtements multicouches déposée sur AM355 acier.

Le deuxième constat est que la teneur en titane n'a eu aucun effet discernable sur la rugosité de revêtement des revêtements déposés sur silicium. Il a été conclu que, bien que le titane puisse accélérer la croissance concurrentielle des colonnes existantes, il n'a pas engagé de croissance colonnaire plus vite que le nitrure de titane.

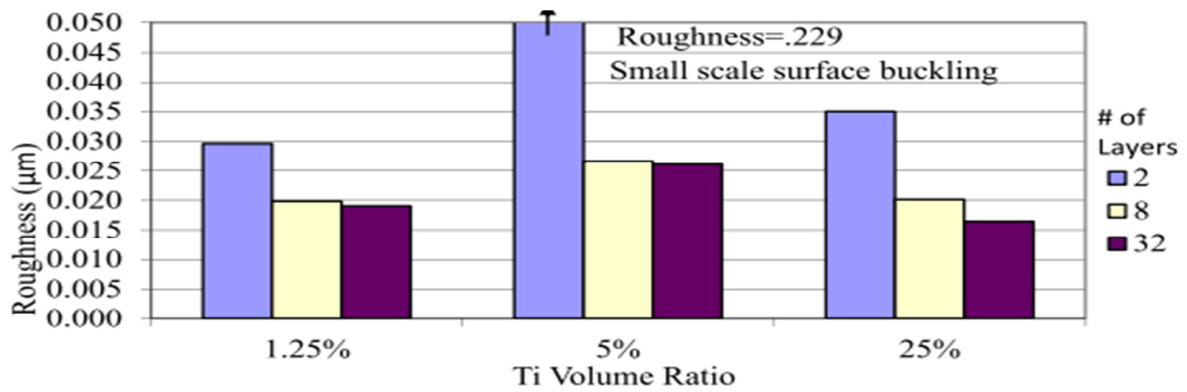


Figure V.14 moyenne surface résumé de rugosité arithmétique des neuf échantillons de carottes déposé sur du silicium.

D'après la figure V.14, il existe une forte corrélation entre le nombre de couches dans le revêtement et la rugosité de surface sur des substrats de silicium. Les revêtements monolithiques ont clairement beaucoup plus grande rugosité que les revêtements multicouches. Cela correspond à l'augmentation de la croissance colonnaire pour les revêtements. On croit que les couches interrompent la croissance colonnaire et peuvent initier la nucléation. Cet effet n'a pas été observé sur l'AM355 que le substrat existant avait une plus grande rugosité que les intercalaires pourraient surmonter. Il ya une augmentation faible, mais inexplicée de la rugosité des revêtements de la couche 8.

V.3.7 Cicatrice de l'érosion multicouche

Les cicatrices d'érosion de quartz et de l'alumine ont de nombreuses caractéristiques facettes pointus, indiquant un mécanisme micro-puce (figure V.15a). En revanche, les cicatrices d'érosion de perles de verre ont été caractérisées par la suppression des zones circulaires discrets, ce qui suggère que la coalescence des fissures et enlèvement de matière subséquente était le mécanisme de défaillance d'usure dominant (figure V.15b).

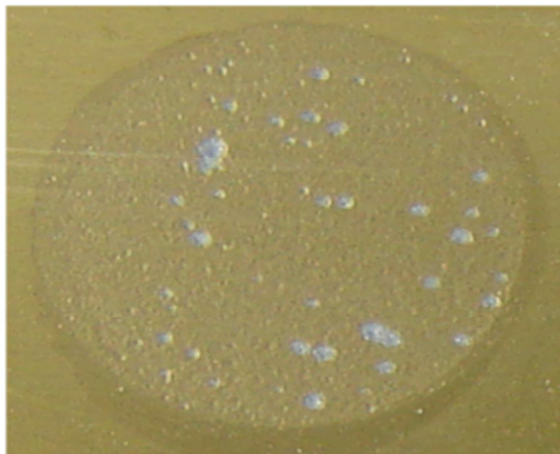
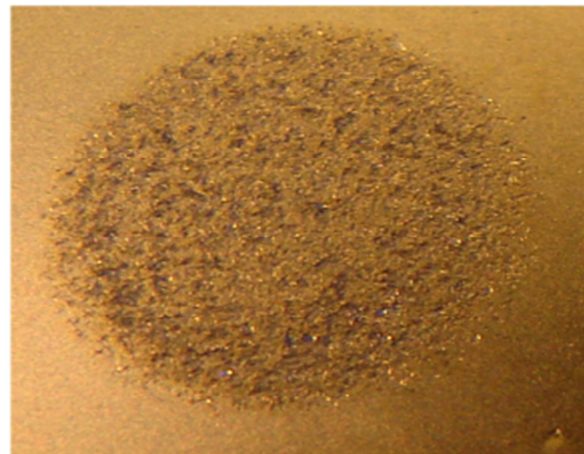


Figure V.15a: l'image macroscopique micro-puce usure cicatrice de TiN / Ti 8L5v% revêtement sur AM355 substrat qui est érodé par 56 alumine µm de diamètre particules.



Diamètre de Scar nominale est de 0,64 cm.

Figure V.15b: l'image macroscopique coalescence usure cicatrice de TiN / Ti 8L5v% revêtement

**sur AM355 substrat qui a été érodée de
63 um de diamètre perle de verre à 180
m / s. Diamètre de Scar nominale est de
0,64 cm.**

V.3.8 Comparaison aux propriétés de revêtement

Cette section traite du lien entre les variables de revêtement et les résultats de l'érosion. Par corrélation des propriétés du revêtement et des conditions de dépôt par rapport aux résultats de l'érosion, nous pouvons examiner les propriétés qui ont le plus d'effet. Tant la durabilité de l'érosion et le taux d'érosion ont été comparés aux propriétés physiques, car ils ne sont pas nécessairement identiques. En outre, comme ces performances d'érosion ont un tel éventail et les performances peuvent varier considérablement avec de petits changements dans les propriétés des matériaux, la valeur logarithmique de la vitesse d'érosion sera également par rapport aux propriétés physiques, qui sont résumées dans le tableau V.5.

Tableau V.5: Résumé des propriétés physiques des principaux revêtements.

TiN:Ti	unités	2 Couches			8 Couches			32 Couches		
		Titanium Vol%			Titanium Vol%			Titanium Vol%		
		1,25%	5%	25%	1,25%	5%	25%	1,25%	5%	25%
L'épaisseur du revêtement	Micron	23,9	25	19,5	23,1	26,3	19,7	25,2	23,6	18,8
Taux de déposition	Micron/heure	3,9	4,29	4,52	3,9	4,58	4,32	4,42	4,13	4,37
Ti:N		0,928	0,946	0,939	0,938	0,957	0,974	0,918	0,934	0,932
paramètre de maille	Angstrom	4,249	4,245	4,247	4,248	4,247	4,244	4,249	4,254	4,248
FWHM Taille des grains	Angstrom	66	64	64	65	64	67	72	65	60
[422]contrainte	Mpa	926	575	712	480	575	581	784	522	742
1er C.O.R		0,243	0,261	0,178	0,252	0,253	0,265	0,219	0,196	0,24
2eme C.O.R		0,0336	0,0434	0,0458	0,0351	0,0334	0,0477	0,0398	0,0282	0,0329
Rugosité sur AM355	Micron	0,22	0,243	0,261	0,255	0,207	0,243	0,241	0,223	0,241
Rugosité sur Silicon	Micron	0,0296	0,2291	0,035	0,0199	0,0266	0,0202	0,019	0,0261	0,0165
HV50	Mpa	2041	2067	1836	1823	1960	961	2185	1986	990
HV200	Mpa	1740	1623	1102	1393	1572	907	1826	1694	817
HV1000	Mpa	1371	779	935	1216	1141	828	1245	1035	718
Kic	Mpa \sqrt{m}	5,36	2,78	4,66		1,37	3,38	8,78	1,33	1,83

V.4 Propriétés des revêtements de couche intermédiaire

V.4.1 Durabilité

Alors que le taux d'érosion cumulative est un paramètre utile pour les matériaux en vrac, la durabilité du revêtement (quantité d'érodent requis pour la perte de 50% de la surface) est une meilleure description de la performance de l'érosion des revêtements. Des revêtements et des conditions étudiées, une valeur de durabilité vont de moins de 25 g à 7000 g d'érodent pour provoquer la rupture (> 50% de perte de surface). Le tableau V.6 présente les valeurs de durabilité des revêtements de couches intermédiaires pour billes de verre et des érosives d'alumine à 180 m / s. Les données ont une faible résolution que de nombreux revêtements ont échoué après le premier 25 g minimum. Où revêtements ont survécu plus d'un essai, les

revêtements TiN/Nb donné les meilleurs résultats, suivie par les revêtements multicouches TiN/Ti. Comme ces tests étaient trop agressifs pour les revêtements multicouches, la vitesse a été réduite à 75 m / s pour les essais ultérieurs.

Tableau V.6 : Valeurs de durabilité de l'érosion (grammes d'éroderent nécessaire pour provoquer > 50% de la perte de surface du revêtement) pour les TiN/M revêtements multicouches pour perles de verre et érodant alumine à 180 m / s. Une valeur de 25 g indique un échec après une seule exposition.

Type d'éroderent	Taille(μm)	TiN/Ti(g)	TiN/Zr(g)	TiN/Hf(g)	TiN/Nb(g)
#4 perles de verre	481	25	25	25	25
#7 perles de verre	204	25	25	25	50
#13 perles de verre	63	75	25	25	100
240 grains d'alumine	56	50	25	25	50

Le tableau V.7 présente les valeurs de durabilité pour les revêtements multicouches de TiN/M exposés à 75 m/s. Contre les billes de verre, les revêtements multicouches TiN/Nb fournit la meilleure performance d'érosion pour plusieurs ordres de grandeur. Le grand changement d'amplitude indiquée soit:

1) d'un éventuel changement de mécanisme de défaillance ou 2) que la contrainte de contact pour 75m/s de billes de verre était en dessous d'un seuil critique pour la conception multicouche de TiN/Nb, et peu souvent des impacts à haute énergie dépassent le seuil critique d'endommager le revêtement. La vitesses critiques minimales est bien connue et a été étudiée plus en détail par Rutherford [18]. Le module élevé du niobium peut être offrir un appui supérieur de la couche de TiN ci-dessous.

Tableau V.7: valeurs de durabilité de l'érosion de TiN/M revêtements de perles de verre et éroderent alumine à 75 m / s.

Type d'éroderent	Taille(μm)	TiN/Ti(g)	TiN/Zr(g)	TiN/Hf(g)	TiN/Nb(g)
#4 perles de verre	481	500	75	500	7000
#7 perles de verre	204	300	100	500	800
240 grains d'alumine	56	1200	400	400	800

Le revêtement TiN/Zr a effectué le pire pour chaque condition d'essai. Un changement majeur dans la performance multicouche a été noté contre l'éroderent d'alumine. Le revêtement de TiN/Ti a duré notamment plus longue que les autres revêtements sous cette condition, mais le TiN/Nb revêtement toujours obtenu de bons résultats en dépit d'être le plus mince revêtement TiN/M.

V.4.2 Perte de masse

La perte de masse cumulée en fonction de la dose est présenté pour les revêtements (TiN / M) dans la figure V16 pour les éroderent de perle de verre de 204 μm à 75 m / s. La perte de masse était très variable. Ce comportement pour le TiN/Zr et TiN/Ti suggère qu'une fois une couche a commencé à échouer, elle a échoué rapidement. Le revêtement multicouche TiN/Nb résisté à plusieurs expositions après perforation initiale (75 g première de l'exposition) tout en étant le plus mince revêtement multicouche. Après une dose de 500 g, il y avait une perte notable de la masse à chaque exposition d'éroderent au billes de verre. Comme le revêtement était partiellement perforé (~ 5%), le substrat a subi une érosion mineure continue. En revanche,

lorsque les revêtements (TiN/Zr) ont commencé à se détruire, le substrat sera presque exposé aux impacts des particules. Cette mauvaise performance peut être due à la faible rigidité du zirconium fournissant un appui insuffisant de la couche de TiN ci-dessous. Les résultats d'érosion pour les billes de verre grandes et petites à 75 m/s suivis des tendances similaires.

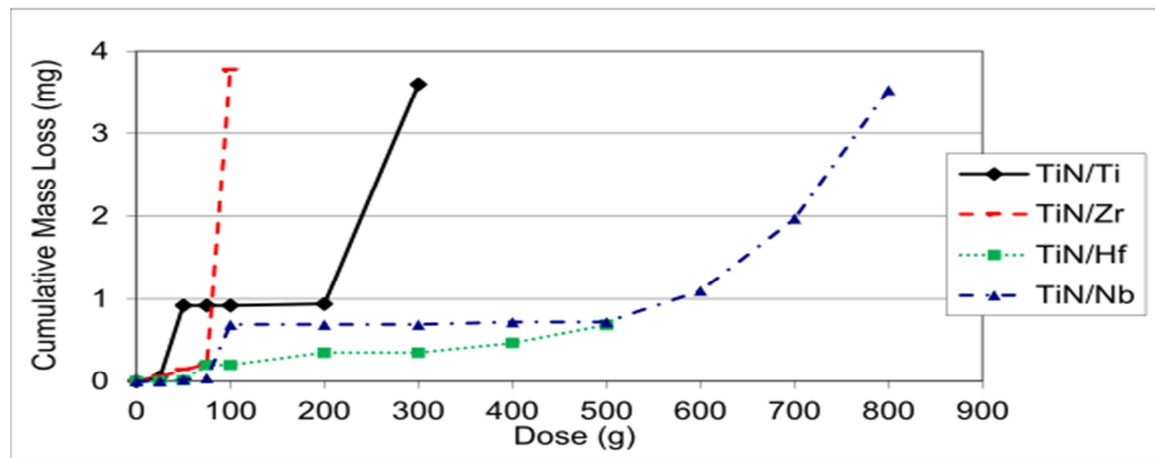


Figure V16 Perte de masse pour le TiN/M revêtements érodés par 204 µm perles de verre à 75 m/s.

La Figure V17 montre une perte de masse cumulée fonction de la dose pour les revêtements TiN/M érodé en utilisant des particules d'alumine angulaires de 56 µm à 75 m/s. Contrairement à la figure V17, la perte de masse pour tous les revêtements était continu, indiquant un mécanisme de rupture micro-puce plutôt que d'un mécanisme de rupture de couche par couche. Le revêtement de TiN/Ti considéré le meilleur contre l'érodant d'alumine de 56 µm à 75 m/s, suivi du TiN/Nb, TiN/Hf, et TiN/Zr.

D'un grand intérêt, les revêtements avec la plus grande dureté avaient la plus mauvaise performance contre les particules d'alumine pour les conditions d'érosion étudiée. Cela correspond aux conclusions de Tilly [23], que la contrainte de contact instantané augmente avec $E^4/5$ de la ligne de contact, mettant en évidence l'influence importante de la conformité du revêtement sur la performance de l'érosion.

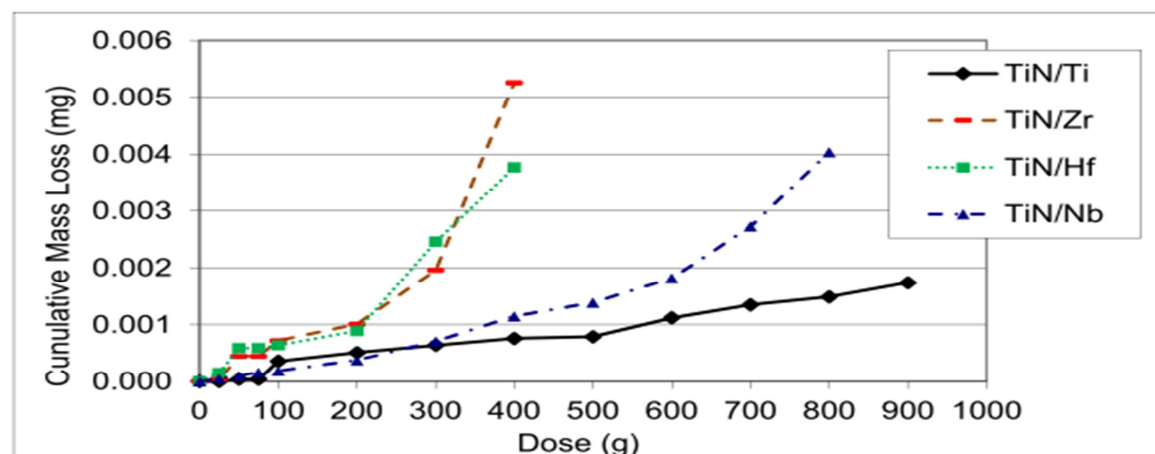


Figure V17 perte de masse cumulée pour le TiN/M revêtements érodés par 56 µm d'alumine à 75 m/s.

Comme les revêtements étaient généralement perforés dans la seconde moitié de leur vie (telle que définie par la perte de surface de 50%), le taux d'érosion cumulée au cours de la première moitié de la vie (en termes de dose cumulative) est présenté dans le tableau V.7. Ces données saisissent les performances de l'érosion du revêtement plutôt que d'un mélange de revêtement et de substrat. Le revêtement TiN/Zr fournit la meilleure performance tôt dans la vie contre les perles en verre # 4 et # 13, mais à faible durabilité (quantité d'érodant requis pour la perte de 50% de la surface). Les revêtements de TiN/Zr ne présentaient pas de perte de masse mesurable pour les premières expositions, comme le montre la figure V18, et puis a subi une défaillance catastrophique soudaine.

Tableau V.7: taux d'érosion cumulative (mg de perte de masse par kg de érodant) pour la première moitié de la vie pour (TiN / M) revêtements chiffres faibles indiquent des performances élevées.

Type d'érodent	Taille (μm)	TiN/Ti(g)	TiN/Zr(g)	TiN/Hf(g)	TiN/Nb(g)
#4 perles de verre	481	0,3	0	2,55	0,49
#7 perles de verre	204	9,2	2,8	1,75	1,8
#13 perles de verre	63	1,03	0,33	1,31	0,8
240 grains d'alumine	56	1,87	5,05	4,45	2,88

V.5 Analyse détaillée de l'érosion des revêtements multicouches

Une perte de masse typique en fonction de dose est présentée en figure V18, pour les revêtements (TiN/Ti) (5% vol), avec 2 (monolithique), 8 et 32 couches et comparées avec les données du substrat nu. Trois régions ont été observées :

Dans la **Région I**, pas ou peu de matériel a été retiré, ce qui correspond à la nucléation des dégâts. **Région II**, au-delà de 100 g d'érodant pour cet exemple, a été indiqué l'érosion de l'état quasi-stable, et était le plus évident pour le quartz broyé à 180 m/s. **Région III** représente une contribution mixte de l'érosion du revêtement et l'érosion du substrat. Lorsque le revêtement a été entièrement retiré, la **Région IV** (non représenté dans la figure V18) a commencé, ce qui correspond au taux d'érosion de l'état d'équilibre finale du substrat.

La durée de leurs régions respectives dépendrait de l'architecture du revêtement de la conception, les propriétés des matériaux et des conditions d'érosion.

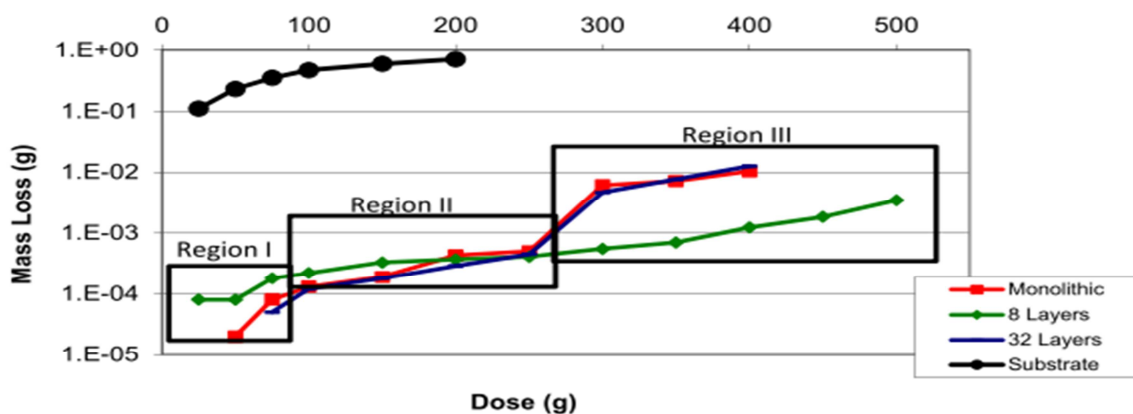


Figure V18 Perte de masse pour les 5%vol revêtements de ratios érodés par le quartz broyé à 180 m/s. La perte de masse du substrat nu est tracée à titre de comparaison.

Pour les conditions indiquées dans la figure V18, l'exemple de la couche huit présentait aucune interruption perceptible entre la Région II et Région III. Comme la Région II à III n'a pas été marquée par une inflexion du taux de perte de masse, la durabilité du revêtement était le principal paramètre souligné.

V.5.1 Tests d'érosion avec Erodant Alumina

Grâce à sa capacité de coupe et le nombre de particules par gramme, on s'attendait à l'alumine de 50 microns d'être le plus agressif contre le substrat. Cependant, comme la quantité d'effort d'impact augmente fortement avec la taille des particules, les grandes particules d'alumine devraient causer plus de dommages aux revêtements résistants à l'érosion.

Figure V19 montre que, pour 25g d'oxyde d'aluminium angulaire (56µm), les revêtements monolithiques offraient la meilleure protection contre l'érosion jusqu'à des vitesses de particules de (180m/s). Cependant, le revêtement de 8L5v% réalise approximativement la même protection que le revêtement monolithique. Ceci a suggéré que l'épaisseur de la couche supérieure du revêtement est le principal facteur de la résistance contre le micro-usinage. Si le revêtement de 8L1.25v% a subi une mauvaise adhérence, il se serait détaché et la même chose pour le revêtement monolithique.

Le revêtement 32L25v% est réalisé très mal car il a des couches minces de TiN. La perte de masse suivie est quasi identique à celle du substrat, il y a aussi la perte de masse initiale du revêtement (~ 5mg). Les deux 8L1.25v% et 8L25v% également une performance très médiocre dans ce test. On s'attendait à ce que la performance de revêtement de la couche huit serait entre les revêtements de couche monolithique et 32. Par conséquent, certains problèmes de traitement ont peut-être nui à la performance de ces deux revêtements.

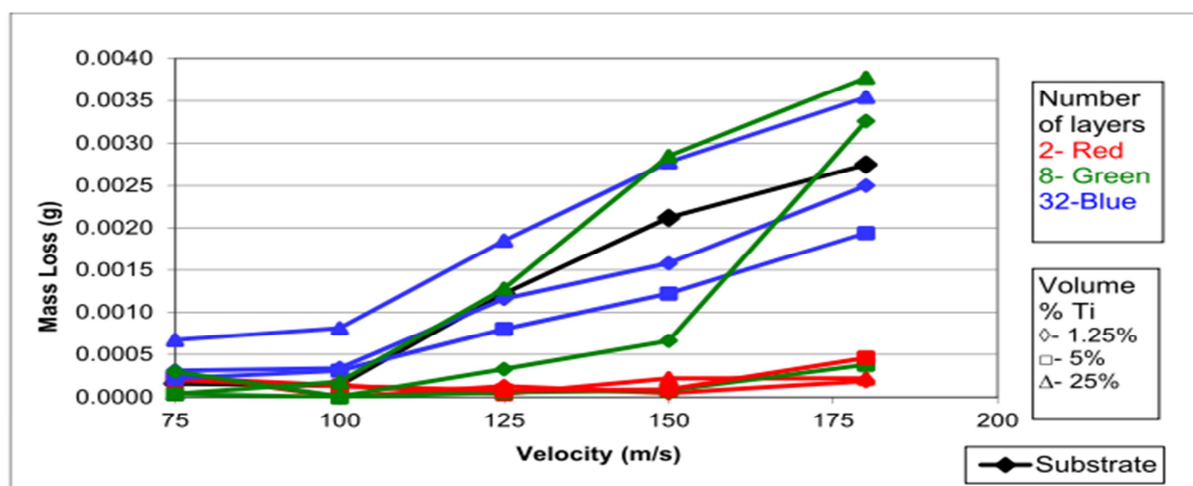


Figure V19: perte de masse de l'érosion de 25 g (dose unique) de 56 microns d'alumine angulaire en fonction de la configuration de la couche et la vitesse des particules.

Figure V20 représente la perte de masse cumulée des revêtements soumis à 56µm d'alumine à 75 m/s. Il convient de noter que la terminaison de ligne indique que plus de la moitié ou plus de la surface du substrat a été exposée. Le 8L5v% de titane et les revêtements monolithiques sont plutôt bien comportés. La différence de performance entre les revêtements

monolithiques et les 8L5v% de revêtements était minimale. Il s'agissait d'un test très agressif à cause de la vitesse la plus élevée de particules, de l'angularité et de la plus petite taille des particules. Les résultats de l'érosion des échantillons à 180 m/s sont présentés dans la figure V20 et sont compatibles avec les résultats de l'érosion à 75 m/s montrés dans la figure V19.

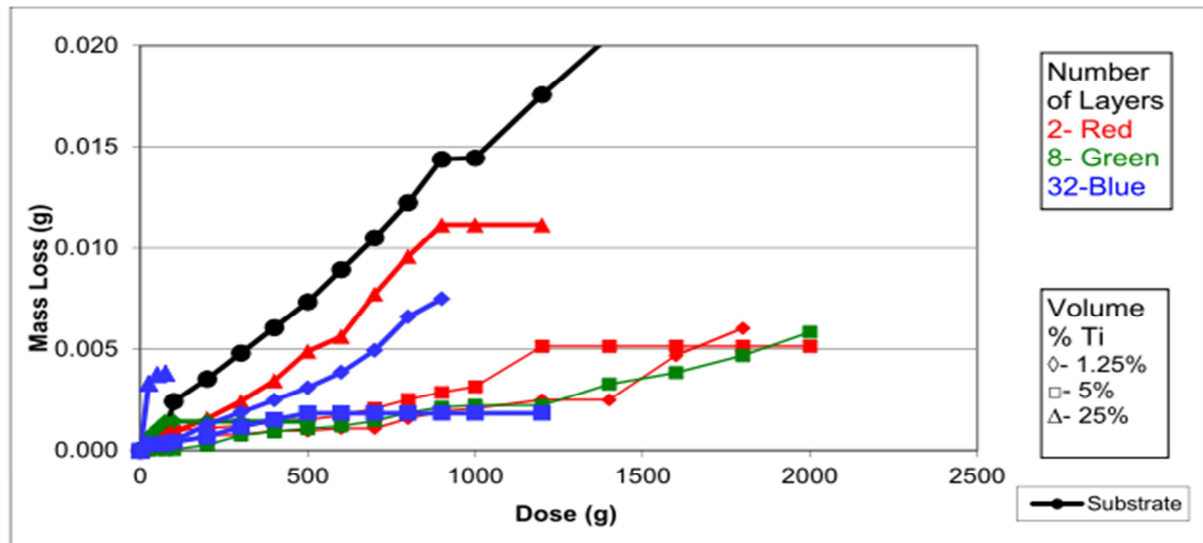


Figure V20 perte de masse cumulée de 56 microns d'alumine angulaire à 75 m / s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

V.5.2 Tests d'érosion avec Erodent Quartz

Les échantillons multicouches de TiN/Ti ont également été présentés au quartz broyé comme matériau érodant, avec des valeurs de duretés comprises entre celles de l'alumine et des billes de verre. Le quartz est beaucoup plus friable que l'alumine.

Les revêtements ont été évalués à 150 m/s pour la durabilité, comme le montre la Figure V21. La résistance à l'érosion diminue avec le nombre de couches pour les 5% en volume de revêtements. Comme dans le cas d'alumine, ce qui indique que l'addition de couches diminue l'épaisseur de la couche dure et la résistance à l'écaillage.

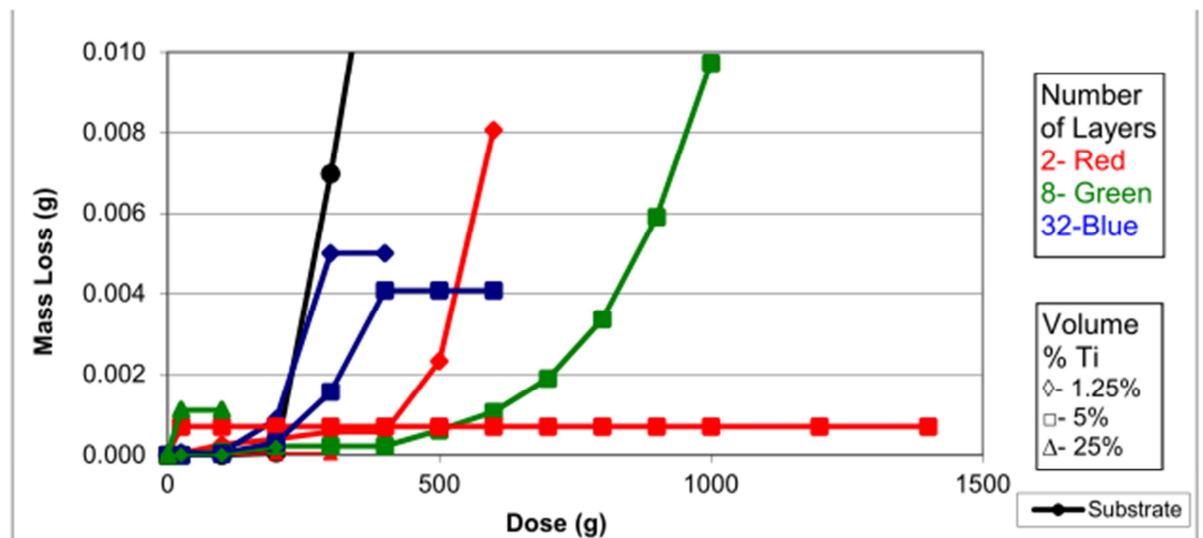


Figure V21 perte de masse cumulée de 279 microns quartz broyé à 150 m/s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Les résultats de 180 m/s la vitesse des particules sont présentés dans la figure V22. Le vol 5% du revêtement de titane offrir la meilleure résistance à l'érosion, tandis que la deuxième série la plus performante de revêtements étaient les revêtements 1.25VL' érodant quartz semble se comporter davantage comme l'alumine, indiquant que le rendement dépend plus de l'angularité des particules à la dureté.

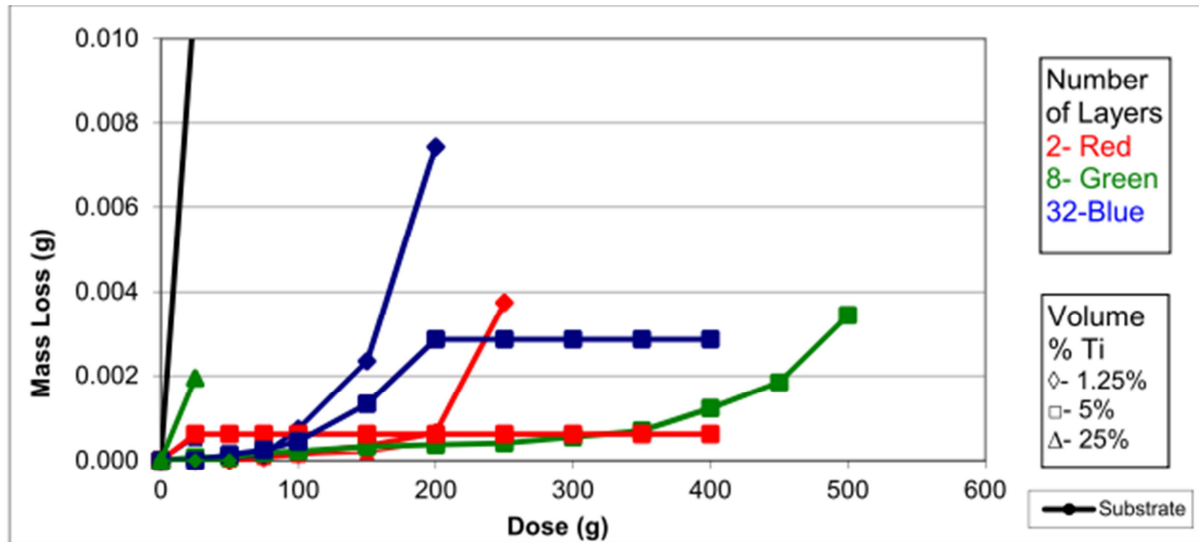


Figure V22 perte de masse cumulée de 279 microns quartz broyé à 180 m/s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Pour les essais avec quartz, les meilleurs revêtements contenaient tous 5% en volume de titane, ce qui indique que le respect d'une conception doit être un facteur de la dureté et de l'angularité des particules incidentes. Il est possible que la conception à huit couches soit la structure optimale et a offert la meilleure tolérance aux dommages.

V.5.3 Tests d'érosion avec Erodant de verre

La figure V23 illustre les différences entre les matériaux de l'érodant ronds et angulaires.

La couche de revêtement 32 a montré la plus grande résistance contre les petites perles de verre (63 microns) à 180 m/s. Cela indique des revêtements multicouches qui peuvent surpasser fortement des revêtements monocouches sous certaines conditions.

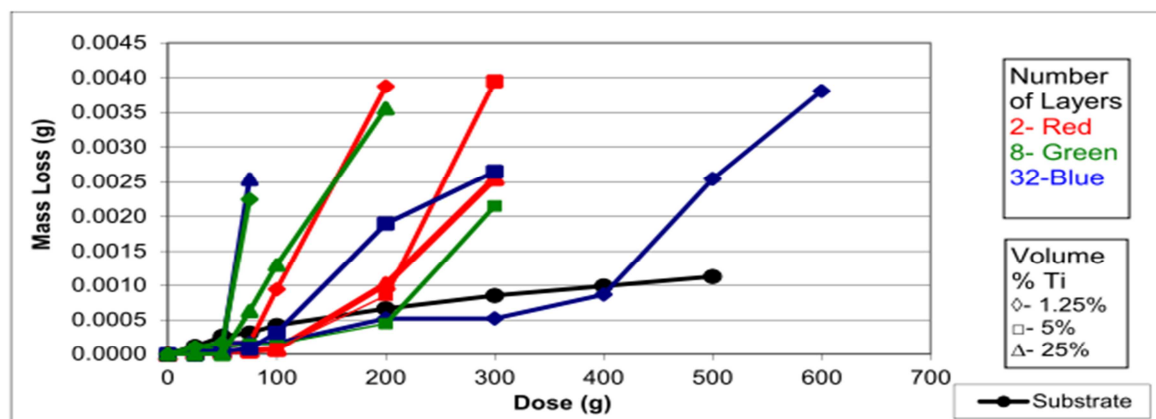


Figure V23 perte de masse cumulée de 63 billes de verre de quelques microns à 180 m / s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Les résultats d'érosion de la figure V24 pour 240 microns de perle de verre d'éroderont indiquent l'importance du respect dans la conception du revêtement. Avec les perles de verre de taille moyenne, les trois meilleurs revêtements performants en 25 vol% de titane et avait 2, 32 et 8 couches, respectivement. Les perles de verre sont pas nettes et n'ont pas réduit l'échantillon, ce qui réduit la nécessité pour les revêtements extrêmement durs. Cela permet à l'application d'ajouter du titane pour réduire la force d'impact maximale, ce qui empêche l'apparition de fissures et, éventuellement, propagation, améliorant ainsi la résistance à l'érosion. Comme la montre la Figure V24, les résultats du test d'érosion de la 483 microns perle de verre à 180 m/s offert une très forte preuve de l'importance du respect de revêtement et la conception à tolérance de dommages. Les trois premiers revêtements performants avaient 25vol% de titane. Toutefois, dans ce cas, la performance est une fonction forte et claire du nombre de couches dans le revêtement. La couche 32de revêtement des performances d'érosion a été plus de quatre fois celui du meilleur revêtement monolithique. Les résultats de ce test offrent la preuve la plus frappante de la tolérance aux dommages d'une conception multicouche.

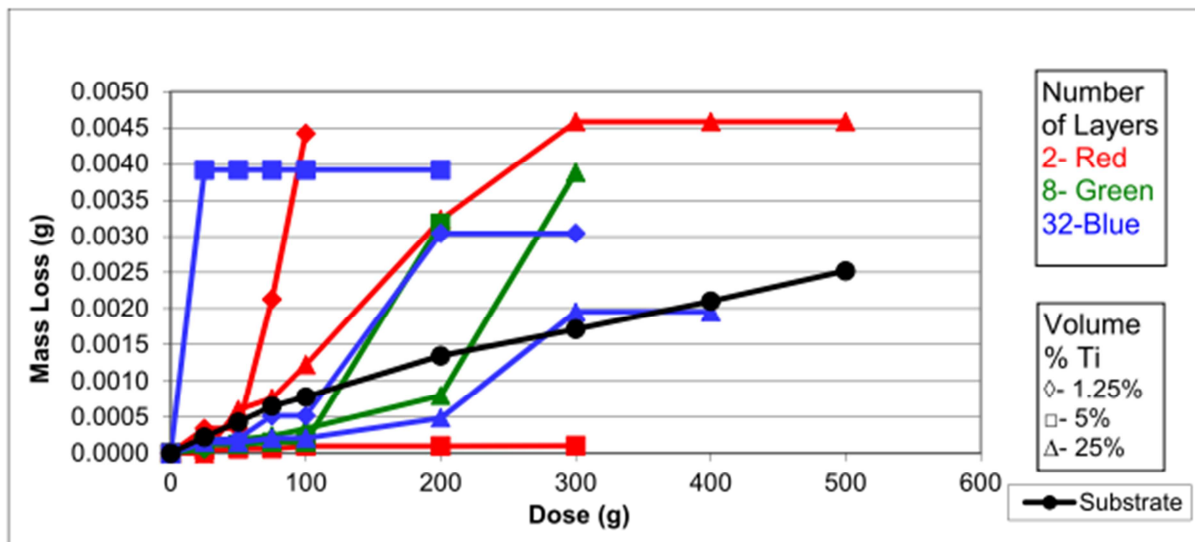


Figure V24 perte de masse cumulée de 240 microns de perles de verre à 180 m / s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

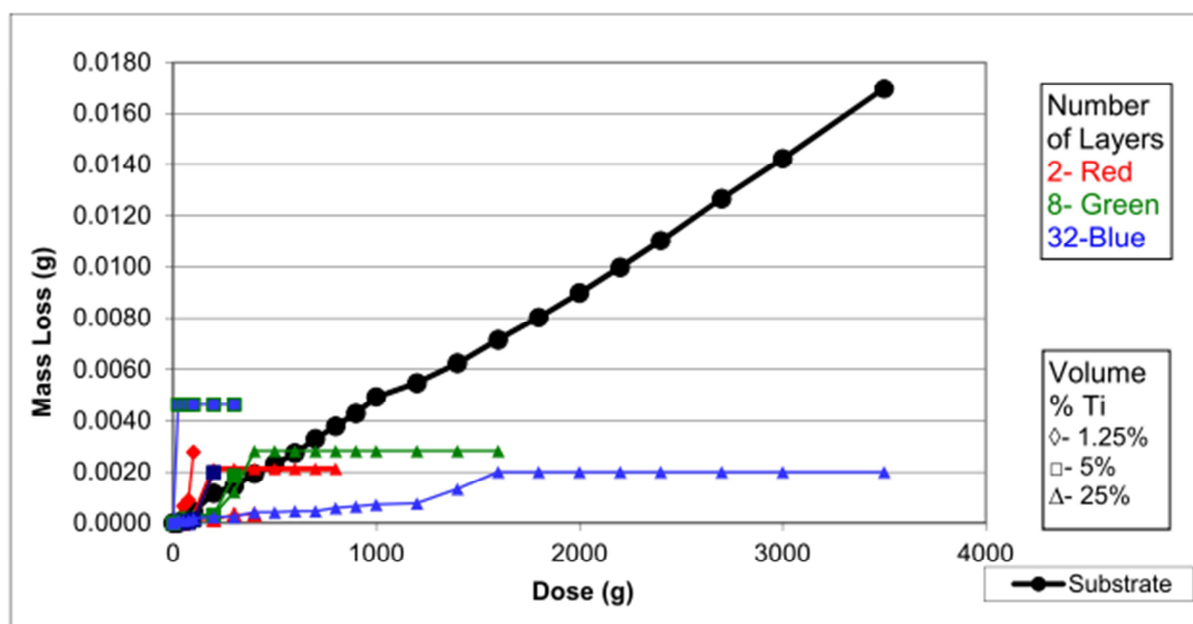


Figure V25 perte de masse cumulée de 483 microns de billes de verre à 180 m / s en fonction de la configuration de la couche et de la dose.

Le test d'érosion de billes de verre est un excellent exemple pour présenter la nature du dommage dans les revêtements multicouches et la réduction des contraintes dues à l'augmentation de la conformité.

La durabilité d'érosion augmente généralement avec le nombre de couches ainsi que le pourcentage en volume de titane. Cet effet était plus évident dans ce test particulier lorsque l'énergie d'impact est la plus élevée. Un revêtement à une seule couche ne peut absorber l'énergie de ces grosses particules venant frapper à grande vitesse.

Une autre constatation importante est que les revêtements ne sont pas trop épais pour transférer l'effort à travers l'épaisseur du revêtement, le revêtement monolithique avec la couche de liaison la plus épaisse offre des performances significatives sur le revêtement monolithique avec la couche de liaison mince.

V.6 L'érosion des revêtements de couche intermédiaire

Les revêtements avec différentes couches intermédiaires souples (comme le Ti, Zr, Hf, Nb) tous avaient une épaisseur cible de $25\mu\text{m}$. Afin d'éliminer les effets de la conception de la couche, tous les revêtements ont été déposés avec huit couches au total, avec 5% de la fraction volumique, et d'une couche de titane de $0,5\mu\text{m}$ de liaison. Sur la base des résultats précédents des principaux revêtements multicouches TiN/Ti, le revêtement de huit couches avec 5% de fraction volumique de titane a montré de bonnes performances dans la plupart des tests, ce qui indique que cela peut être proche de la conception optimale.

V.6.1 Tests d'érosion avec Erodant Alumina

Les revêtements contenant Ti, Zr, Hf, Nb et couches intermédiaires souples ont été érodés à $56\mu\text{m}$ d'alumine à deux vitesses différentes des particules (75 et 180 m/s) à 90° d'angle d'impact. Comme le montre la figure V26, à la vitesse inférieure, le revêtement le plus

performant était TiN/Ti suivi par le revêtement TiN/Nb. Cette performance a été attribuée au faible rendement et la résistance à la rupture, et la plus haute rigidité des matériaux de la couche intermédiaire évaluée.

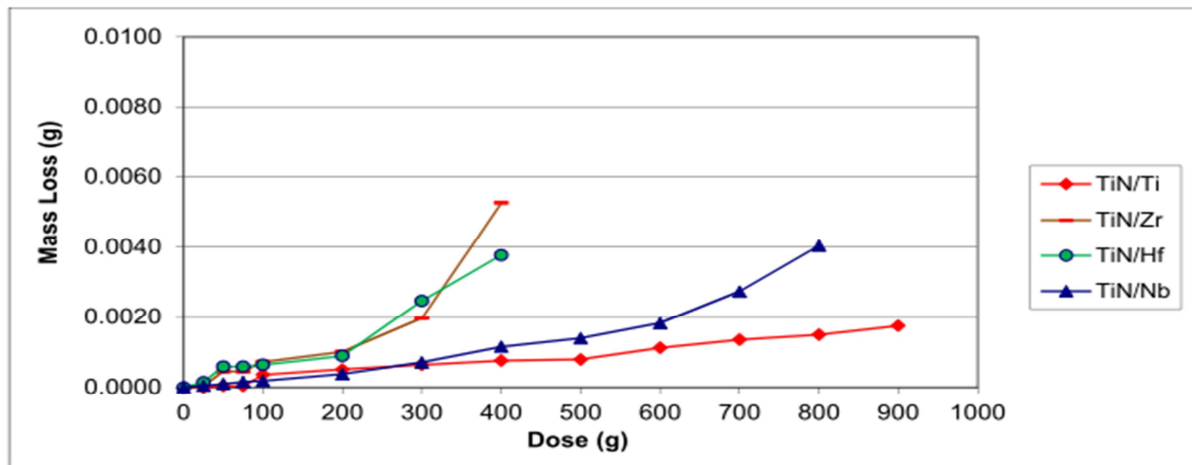


Figure V26: perte de masse cumulée de 56 microns d'alumine angulaire à 75 m/s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Le titane a eu la plus haute ductilité et le niobium avait le plus haut module de masse. Cela signifie que le titane se déforme de manière significative avant qu'il se détruise. Le module élevé de masse signifie que le niobium va absorber plus d'énergie résultant de la déformation. Bien que le revêtement TiN/Ti est surclassé le revêtement TiN/Nb, la marge est faible. Comme le TiN/Ti était de 22% plus épaisse que la couche de TiN/Nb, il est raisonnable de croire qu'une épaisseur de revêtement TiN/Nb égale peut-être rencontré ou dépassé les performances du revêtement TiN/Ti.

Comme la force d'impact a augmenté, le module de masse élevé de niobium devait fournir plus de soutien pour les couches de TiN que les métaux de la couche intermédiaire en Hf, Zr, Ti, et de retarder ainsi l'échec des couches dures.

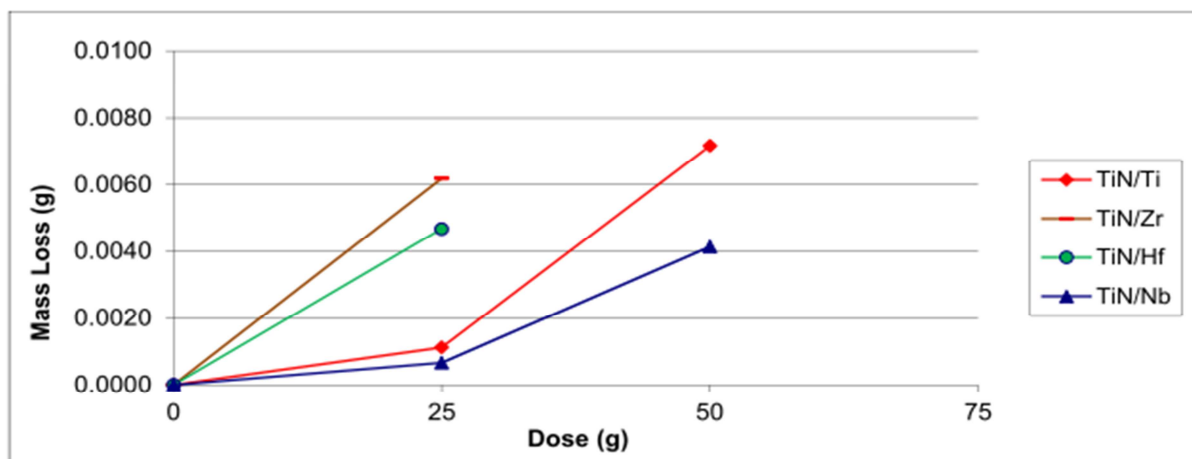


Figure V27 perte de masse cumulée de 56 microns d'alumine angulaire à 180 m/s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

V.6.2 tests d'érosion avec Erodant de verre

La figure V28 montre les résultats de l'érosion pour les petites billes de verre(63 um). La même tendance a été observée comme avec le test de l'érosion à grande vitesse d'alumine.

Le revêtement TiN/Ti a un taux d'érosion supérieure à celle du substrat, analogue au revêtementTiN/Ti de base. C'est un excellent exemple de revêtements durs qui ne fournissent pas une performance optimale de l'érosion.

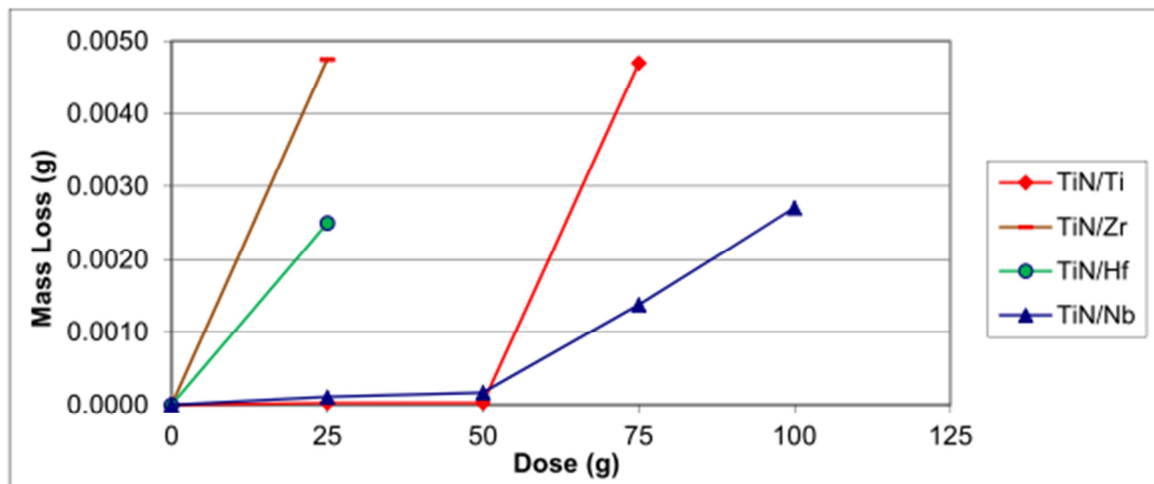


Figure V28 perte de masse cumulée de 63 billes de verre de quelques microns à 180 m / s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Figure V29 montre les résultats de performance pour le test d'érosion pour perles de verre de 204micron et montre la même tendance que le test de l'érosion à grande vitesse d'alumine. Le revêtementTiN/ Nb est superposé sur le revêtement TiN/Ti et les deux étaient bien mieux que le TiN/Hf et revêtements TiN/Zr.

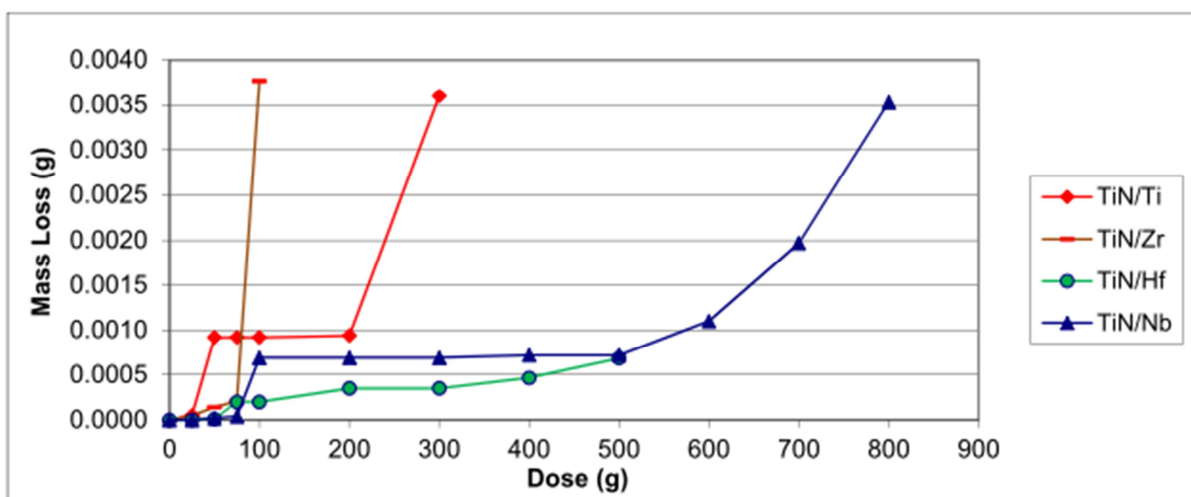


Figure V29 perte de masse cumulée à partir de 204 sphères de verre de quelques microns à 75 m / s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Comme la taille des particules augmente, l'écart entre le TiN/Nb et d'autres revêtements a augmenté, comme le montre la Figure V30. Le TiN/Nb à environ trois fois la

performance de l'érosion du revêtement TiN/Ti contre les perles de verre de $204\mu\text{m}$ à 180 m/s , qui est un test extrêmement agressif pour un revêtement dur.

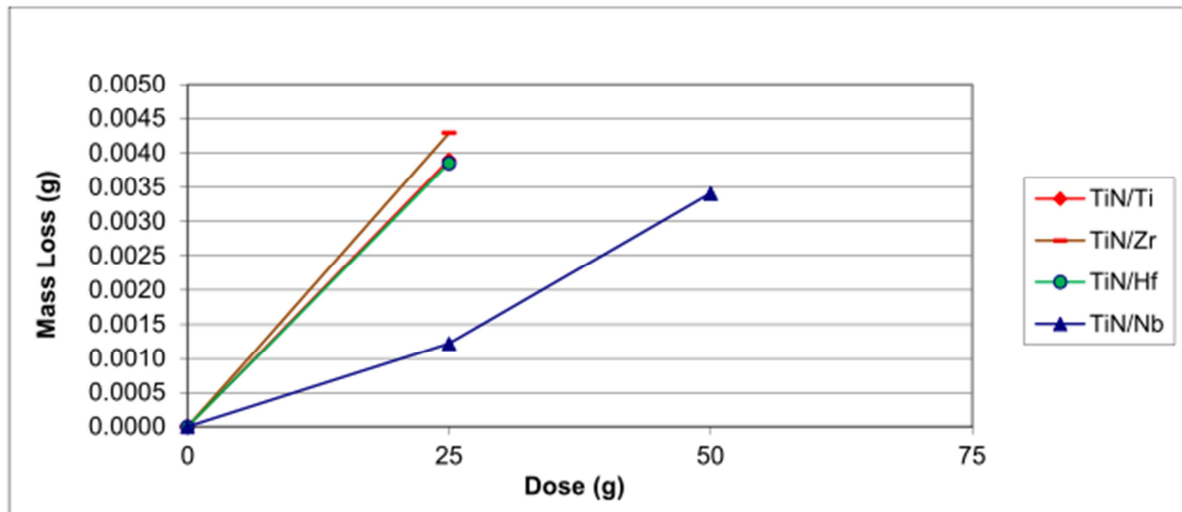


Figure V30: perte de masse cumulée à partir de 204 sphères de verre de quelques microns à 180 m/s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

La figure V31 montre que, contre les plus grandes particules de perles de verre ($483\text{ }\mu\text{m}$), le revêtement TiN/Nb offre une performance extrême qui augmente au cours de tous les autres revêtements. Le revêtement de TiN / Ti résiste à 500 g d'érodant tandis que le revêtement TiN / Nb résiste à 7000 g d'érodant avant la défaillance, de mieux qu'une augmentation dix fois plus que les performances sur tout autre revêtement de la couche intermédiaire.

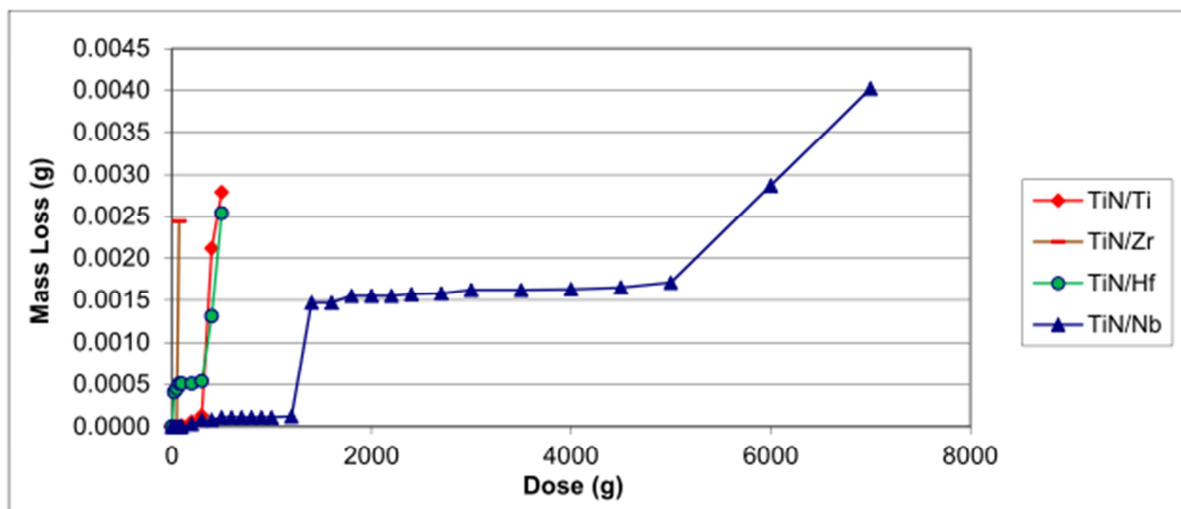


Figure V31: perte de masse cumulée à partir de 483 sphères de verre de quelques microns à 75 m/s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

Figure V32 présente les résultats de la plus agressive des tests d'érosion de perles de verre. Tous les revêtements ont échoué après le premier test. Le revêtement de TiN/Nb offert le plus de résistance, suivie par le revêtement de TiN/Ti. Ce test d'érosion a causé un grenailage

important du substrat, dans la mesure où le revêtement autour du point d'impact de TiN/Zr a également été détruit.

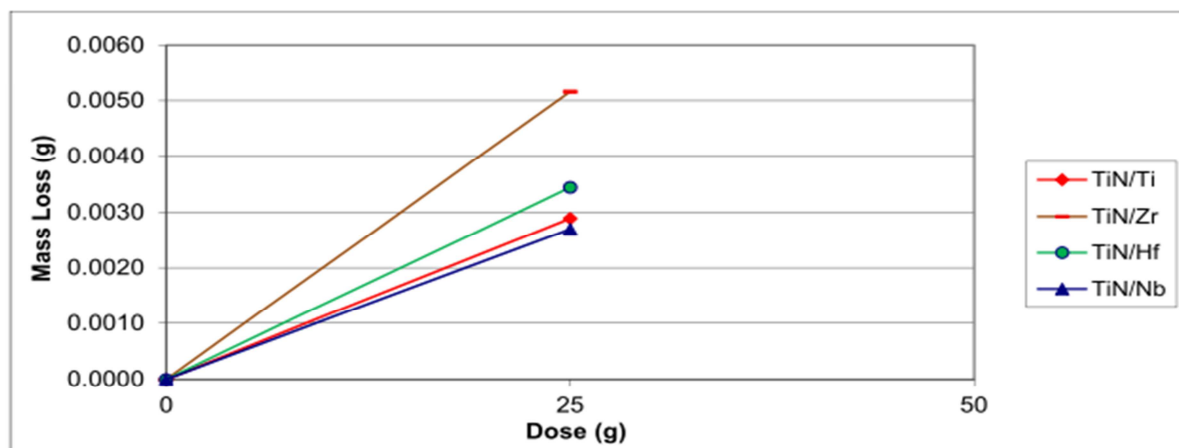


Figure V32 perte de masse cumulée à partir de 483 sphères de verre de quelques microns à 180 m / s en fonction du matériau de la couche intermédiaire et de la dose.

V.6.3 Résumé de revêtement intermédiaire

La durabilité des revêtements de couches intermédiaire est présentée dans le tableau V.8 pour les particules érodent à 180 m/s et dans le tableau V.9 pour les particules érodant à 75 m/s. Les revêtements ont échoué rapidement lorsqu'ils sont exposés à des particules à 180 m/s; donc pas de taux d'érosion fiable n'a pu être calculés. Tableau V.10 présente le taux d'érosion dans la première moitié de la vie pour les revêtements exposés à des particules à 75 m/s de vitesse.

Tableau V.8: Érosion durabilité des revêtements de couches intermédiaires contre érodents à 180 m / s

Type d'érodent	Taille(μm)	TiN/Ti(g)	TiN/Zr(g)	TiN/Hf(g)	TiN/Nb(g)
#4 perles de verre	481	25	25	25	25
#7 perles de verre	204	25	25	25	50
#13 perles de verre	63	75	25	25	100
240 grains d'alumine	56	50	25	25	50

Tableau V.9: Érosion durabilité des revêtements de couches intermédiaires contre érodent à 75 m / s.

Type d'érodent	Taille(μm)	TiN/Ti(g)	TiN/Zr(g)	TiN/Hf(g)	TiN/Nb(g)
#4 perles de verre	481	500	75	500	7000
#7 perles de verre	204	300	100	500	800
240 grain d'alumine	56	1200	400	400	800

Tableau V.10: Taux d'érosion des couches intercalaires contre érodents à 75 m/s.

Type d'érodent	Taille(μm)	TiN/Ti(g)	TiN/Zr(g)	TiN/Hf(g)	TiN/Nb(g)
#4 perles de verre	481	0,3	0	2,55	0,49
#7 perles de verre	204	9,2	2,8	1,75	1,8
#13 perles de verre	63	1,03	0,33	1,31	0,8
240 grain d'alumine	56	1,87	5,05	4,45	2,88

V.7 Revêtement utilisé par General Electric

L'aubages du compresseur est constitué, par forgeage, extrusion ou usinage. Toute la production des aubes, jusqu'à récemment, ont été fabriqués à partir de type 403 ou 403 Cb (tous deux à Cr 12) aciers inoxydable. Durant les années 1980, un nouveau matériau de compresseur de lame, GTD-450, un acier trempé inoxydable précipitations, martensitique, a été introduit dans la production de pointe et machines développé, comme indiqué dans le tableau V.11.

Composent	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	Cb	V	C	B	Ta
bucket													
U500	18,5	BAL	18,5	–	–	4	3	3	–	–	0,07	0,006	–
RENE 77(U700)	15	BAL	17	–	–	5,3	3,4	4,25	–	–	0,07	0,02	–
IN738	16	BAL	8,3	0,2	2,6	1,75	3,4	3,4	0,9	–	0,1	0,001	1,75
GTD111	14	BAL	9,5	–	3,8	1,5	4,9	3	–	–	0,1	0,01	2,8
tuyères													
X40	25	10	BAL	1	8	–	–	–	–	–	0,5	0,01	–
X45	25	10	BAL	1	8	–	–	–	–	–	0,25	0,01	–
FSX414	28	10	BAL	1	7	–	–	–	–	–	0,25	0,01	–
N155	21	20	20	BAL	2,5	3	–	–	–	–	0,2	–	–
GTD-222	22,5	BAL	19	–	2	2,3	1,2	0,8	–	0,1	0,01	1	–
chambres de combustion													
SS309	23	13	–	BAL	–	–	–	–	–	–	0,1	–	–
HAST X	22	BAL	1,5	1,9	0,7	9	–	–	–	–	0,07	0,005	–
N-263	20	BAL	20	0,4	–	6	2,1	0,4	–	–	0,06	–	–
HA-188	22	22	BAL	1,5	14	–	–	–	–	–	0,05	0,01	–
Roues de turbine													
Alliage 718	19	BAL	–	18,5	–	3	0,9	0,5	5,1	–	0,03	–	–
Alliage 706	16	BAL	–	37	–	–	1,8	–	2,9	–	0,03	–	–
Cr-Mo-V	1	0,5	–	BAL	–	1,25	–	–	–	0,3	0,3	–	–
A286	15	25	–	BAL	–	1,2	2	0,3	–	0,3	0,08	0,006	–
M152	12	2,5	–	BAL	–	1,7	–	–	–	0,3	0,12	–	–
Aubes de compresseur													
AISI 403	12	–	–	BAL	–	–	–	–	–	–	0,11	–	–
AISI 403+Cb	12	–	–	BAL	–	–	–	–	0,2	–	0,15	–	–
GTD-450	15,5	6,3	–	BAL	–	0,8	–	–	–	–	0,03	–	–

Ce matériau permet d'accroître la résistance à la traction, sans sacrifier la résistance à la corrosion. Des augmentations substantielles de la fatigue à cycle élevé et résistance à la fatigue corrosion sont également atteintes à ce matériau, par rapport au type 403.

Résistance à la corrosion est également atteinte en raison de sa forte concentration de chrome et de molybdène.

La corrosion de compresseurs résultats de l'humidité contenant des sels et d'acides collecte sur l'aubage. Pendant le fonctionnement, l'humidité peut être présente à cause de la pluie, l'utilisation de refroidisseurs à évaporation ou de condensation résultant de l'air humide accéléré à l'entrée du compresseur.

L'humidité peut être présente dans le compresseur pendant le fonctionnement entre l'étage 5 et l'étage 8, où elle devient en général assez chaude pour éviter la condensation.

Généralement, le temps de service de ces machines varie de 20.000 à 60.000 heures. GE a adopté revêtement NiCd pour une utilisation dans les applications sélectionnées, et plus tard pour toutes les aubes de compresseur dans les étages "humides" (normalement jusqu'à étage 8). Toutefois, en raison des récentes exigences de l'EPA, plus strictes, ce revêtement a été remplacé par un nouveau GE développé et le revêtement breveté appelé GECC-1.

Ce nouveau revêtement de pâte d'aluminium a une couche supérieure de protection en céramique qui fournit une meilleure résistance à l'érosion.

(Voir Figure V33.) Ce revêtement a accumulé plus de 100.000 heures de domaintester et a montré à être égale ou supérieure à celle des revêtements d'aluminium en suspension classiques en protection contre la corrosion et sensiblement meilleure résistance à l'érosion. Ce revêtement a été appliqué par GE Services de commerces comme revêtement de rénovation depuis plusieurs années et est maintenant appliqué à toutes les nouvelles unités.

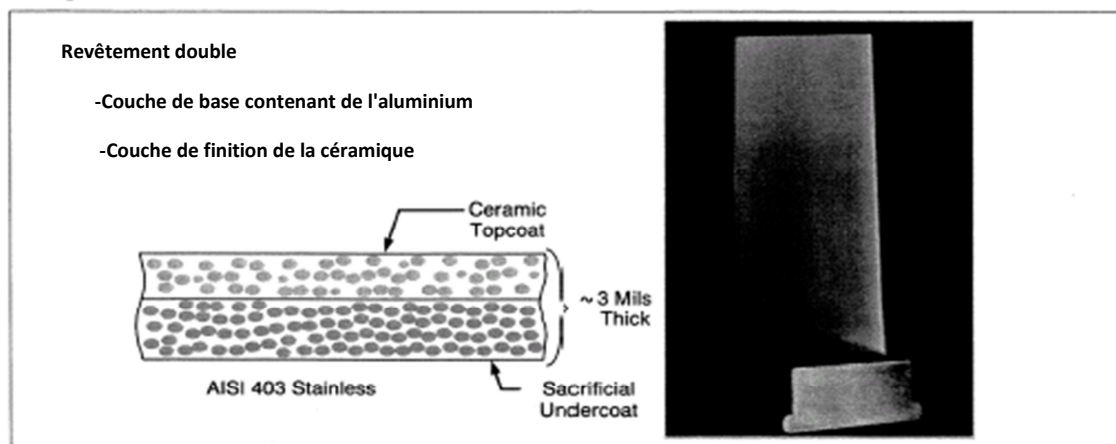


Figure V33 Revêtement GECC-1

Tous les IGV et les trois premiers étages de rotation et aubes fixes du compresseur seront fabriqués à partir du matériau GTD-450, les cinq prochains étages avec du GTD-450 pour les machines de catégorie F, et avec du GECC-1 enduit avec les matériaux AISI 403 ou Cb403 pour les autres machines. Le reste de l'aubage sera avec de l'AISI 403 ou Cb403. Ce changement permettra aux machines de GE d'avoir une meilleure résistance à la corrosion, une bonne protection contre l'érosion et l'élimination du cadmium à partir de l'environnement.

Conclusion

Le travail présenté dans le cadre de cette étude étant de minimiser les effets de l'érosion comme (les piqûres et la dégradation des métaux ...). L'érosion peut concerner les matériaux ductiles et les matériaux fragiles. Nous avons étudié les propriétés de l'érosion ainsi que les différents érodants comme l'alumine, le quartz et la perle de verre. Pour inspecter l'érosion dans une turbine à gaz, on utilise l'inspection Borescopique, qui est une inspection à distance qui permet d'avoir des images et des vidéos concernant l'état de la machine.

La solution adaptée était de poser des revêtements résistants à l'érosion, ceux-ci peuvent être des revêtements multicouches ou monolithiques. Nous avons présenté leurs propriétés comme, la dureté, la durabilité, la perte de masse et autres. Nous avons aussi comparé les différents revêtements tels les nitrures de titane et de chrome avec d'autres matériaux non revêtus.

Il existe d'autres solutions, que nous n'avons pas présentées, pour combattre l'érosion. Parmi ces solutions, il y a le lavage online et le lavage offline qui présente des bons résultats contre l'érosion diminuant le taux d'érosion et permettant aussi d'augmenter les performances de la machine, seulement ces derniers présentent de mauvais effets comme l'encrassement qui peut provoquer la dégradation des performances de la machine. Il y a aussi comme solution, celle de changer la forme aérodynamique des aubes qui peut aussi minimiser les effets d'érosion.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H.Cohen, G.F.C.Rogers, H.H.Saravanamuttoo. Gas Turbine Theory. 4th EDITION, Longman, London, 1996.
- [2] S.L. Dixon, "Fluid Mechanics, Thermodynamics of turbomachinery ", 3rd Edition Pergamon press oxford (New York, Toronto, Sydney, Frankfurt), 1978.
- [3] AFFAIRE N.P. : SONATRACH SRGA2LOCALITE':ALGERIE "Manuel de formation pour la conduite et l'entretien".
- [4] Turbocompresseurs axiaux, chapitre III. Cours dispensé par monsieur BENNOUR Hocine au département de génie mécanique à l'ENP en 2011-2012.
- [4] I.M.Hutchings. 'Tribology. Friction and wear of engineering materials' Edward Arnold, UK(1992)
- [5] Finnie. Erosion of Surfaces by solid particles. WEAR 1960 V.3 p. 87-103.
- [6] Bellman(R) & LEVY (A). 1981 "Erosion mechanisms in ductile metals". WEAR, V70, p1-27.
- [7] Levy, A., Solid Particle Erosion and Erosion-Corrosion of Materials. Newbury, Ohio: ASM International, 1995.
- [8] G. a. D. N. D'Alessio, "Performance of Erosion Resistant Coatings for Compressor Airfoils," *Journal of the Canadian Ceramic Society*, 63 [No. 1] 59-63 (1994).
- [9] A. V. Levy, "Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials "pp. 220. ASM International, Materials Park, OH (1995).
- [10] I. Finnie, "Erosion of surfaces by solid particles: Oberflächenerosion durch feste Teilchen," *Wear*, 3 [2] 87-103 (1960).
- [11]. Deng, T., M.S. Bingley, and M.S.A. Bradley, The influence of particle rotation on the solid particle erosion rate of metals. *Wear*, 2004. 256(11-12): pp. 1037-1049.
- [12] G. E. D'Errico, S. Bugliosi, and D. Cuppini, "Performance of ceramics in erosion tests by solid particle impingement," *Journal of Materials Processing Technology*, 64 [1-3] 85-92 (1997).
- [13]. Hertz, H., Ueber die Berührungelastischer Körper (On Contact Between Elastic Bodies). *Gesammelte Werke (Collected Works)*. Vol. 1. 1895, Leipzig, Germany.
- [14]. Fischer-Cripps, A., Introduction to Contact Mechanics. Mechanical Engineering Series, ed. F. Ling and E.F. Gloyna. 2000, New York, New York: Springer-Verlag.
- [15]. Wood, R.J.K., The sand erosion performance of coatings. *Materials and Design*, 1999. 20(4): pp. 179-191.

- [16] W. Tabakoff, "Erosion resistance of superalloys and different coatings exposed to particulate flows at high temperature," *Surface and Coatings Technology*, **120-121** 542-47 (1999).
- [17]. Friesen, T., J. Haupt, W. Gissler, and A.B.a.P.B. Barna, Ultrahard coatings from Ti-BN multilayers and by co-sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 1991. 48: pp. 169-174.
- [18]. Silva, F.J.G., A.J.S. Fernandes, F.M. Costa, A.P.M. Baptista, and E. Pereira, Unstressed PACVD diamond films on steel pre-coated with a composite multilayer. *Surface and Coatings Technology*, 2005. 191(1): pp. 102-107.
- [19]. Pierson, H.O. *Handbook of Refractory Carbides and Nitrides*. 1996, Westwood, NJ: Noyes Publications.
- [20]. Swadzba, L., A. Maciejny, B. Formanek, P. Liberski, P. Podolski, B. Mendala, H. Gabriel, and A. Poznanska, Influences of coatings obtained of PVD on the properties of aircraft compressor blades. *Surface and Coatings Technology*, 1996. 78: pp. 137-143.
- [21]. Ward, L.P., K.N. Strafford, C. Subramanian, and T.P. Wilks, Observations on the structure, hardness and adhesion properties of a selection of multicomponent refractory element nitride coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996. 56(1-4): pp. 375-384.
- [22]. Kulikovzky, V.Y., F. Fendrych, L. Jastrabik, D. Chvostova, L. Soukup, J. Pridal, and F. Franc, *The mechanical and tribological properties of magnetron sputtered Ti-C:H coatings*. *Surface and Coatings Technology*, 1998. **102**: pp. 81-89.
- [23]. Tilly, G.P., Erosion caused by airborne particles. *Wear*, 1969. 14(1): pp. 63-79.
- [24]. Prevéy, P.S., ed. *X-Ray Diffraction Residual Stress Techniques*. ASM Handbook. Vol. 10, *Materials Characterization*. 1986, Lambda Research, Inc: Materials Park, OH.
- [25]. Chai, H. and B.R. Lawn, Cracking in brittle laminates from concentrated loads. *Acta Materialia*, 2002. 50: pp. 2613-2625.
- [26].
R.S. Lynn, K.K. Wong and H.M. Clark, 'On the particle size effect in slurry erosion', *Wear*, 149, (1991), 55-71
- [27] H. M. Clark and R. B. Hartwich, 'A re-examination of the 'particle size effect' in slurry erosion', *Wear*, 248, (2001), 147-161