



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industrielle

Spécialité : Maintenance, Fiabilité et Qualité.

Thème

**ETUDE DE L'ADHERENCE D'UNE COUCHE MINCE
SUR SUBSTRA EN MATERIAU DUCTILE**

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom : HAMLAOUI

Prénom : BELKACEM

Nom : SEKKOURI

Prénom : ABDELMADJID

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme ABDI GHZEIL	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	Président
Mer ADJELOUA ABDELAZIZ	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadreur
Mer ACHACHE HABIB	MCA	IMSI-Univ. D'Oran2	Examineur

Année universitaire : 2021/2022.

REMERCIEMENT

En premier lieu, nous remercions notre Dieu qui nous a donné la santé, la volonté, le courage ainsi que la conscience pour que nous puissions réussir cette formation.

Nous tenons à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique de l'institut de maintenance et de sécurité industrielle, les intervenants professionnels ainsi que les responsables de la formation MFQ.

Nous tenons à remercier tout particulièrement et à témoigner toute notre reconnaissance à notre encadrant, **Mer. ADJELOUA ABDELAZIZ** pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de cette période, sachant répondre à toutes nos interrogations, sans oublier son participation au cheminement de ce mémoire.

Nous remercions le président de jury **Mme. ABDI GHZEIL** qui a acceptée de présider le jury de soutenance.

Nous remercions **Mer. ACHACHE HABIB** qui a accepté d'examiner ce travail de recherche et d'avoir accepté la participation au jury.

Nous remercions **Mer. MEDDAH HASSAN** qui a contribué à la réalisation de ce travail.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, aux professeurs qui ont contribué à ma formation.

Dédicace



Je dédie ce mémoire à :

Tous ceux qui se sont donné toutes les peines et les sacrifices,

Pour me voir réussir dans la vie.

*Les deux personnes les plus chères à mon cœur, **Ma Mère** et **Mon Père**,*

qui m'ont apporté soutien et confort tout au long de mes études.

*Mes frères **Mohammed cherif**, **ilyes** et Mes sœurs **H, A, C***

*Et la famille **HAMLAOUI** et **HAMIDI***

*Mon binôme « **Abdelmadjid** » et sa famille « **SEKKOURI** »*

*Mes collègues du Promo **MfQ***

*Ma deuxième famille de club **Master Minds Club** (Hackathon)*

*Mes collègue **arbitres d'Oran**, tous les entraîneurs et formateurs*

Mes amis dans les camps d'été et les jeux méditerranéens Oran 2022

Tous mes amis que j'aime et que j'estime.

Tous mes amis sans exception.

Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant toutes

mes années d'études.

HAMLAOUI Belkacem

DEDICACE

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH tout puissant de nous avoir donné la force, la santé, le courage et la patience pour la réalisation de ce travail.

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents mon Père, ma mère qui ont sacrifié les plus belles années de leur vie pour me voir un jour réussir et pour leur soutien morale et l'encouragement durant toute ma vie.

Je dédie à toute ma famille en particuliers mes deux frères OUSSAMA, MOUHAMED et ma chère sœur.

Je dédie aussi mes meilleurs camarades, DEGHEMICHE ADBELHALIM, TAYEB OMAR, NETTAH AMINE et BENZIANE ROUMAÏSSA.

Mes chers amis: G. DJAMEL, T. MED ILYES, H. SIFEDDINE.

Mes dédicaces à ma famille et mes proches pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces années.



SEKKOURI ABDELMADJID

Table des matières

Introduction général	1
Chapitre I : Traitement des revêtements et les alliages d'aluminium	3
I. Introduction	4
I.1 Surface	5
I.1.1 Propriétés des surfaces	5
I.1.1.1 Propriétés physiques	7
I.1.1.2 Propriétés chimiques	7
I.1.1.3 Propriétés mécaniques	7
I.1.1.4 Propriétés métallurgiques	7
I.1.1.5 Propriétés géométriques	7
I.2 Traitement de surface	8
I.2.1 Le traitement chimique	8
I.2.2 Le traitement électrochimique	9
I.2.3 Le traitement mécanique	9
I.2.4 Choix de traitement	9
I.2.5 Domaines d'application de traitement de surface	11
I.3 Techniques de traitement de surface	11
I.3.1 Traitement de surface par voie humide	11
I.3.2 Traitement de surface par voie sèche	11
I.3.3 Traitements par transformation structurale	12
I.3.4 Traitement de surface par conversion	12
I.3.5 Traitement de surface par diffusion	12
I.4 Alliages d'aluminium	12
I.4.1 Propriété de l'aluminium pur	13
I.4.2 Les différents alliages d'aluminium	14
I.4.2.1 Alliages d'aluminium sans durcissement structural	14
a) Série 1000 : (99% Al au moins)	14
b) Série 3000 : (Al-Mn)	14
c) Série 5000 : (Al-Mg)	14
I.4.2.2 Alliages d'aluminium à durcissement structural	15
a) Série 2000 : (Al-Cu et Al-Cu-Mg)	15
b) Série 6000 : (Al-Mg-Si)	15
c) Série 7000 : (Al-Zn)	15

Chapitre II : Technique de projection thermique	17
II. Introduction	18
II.1 Projection thermique	19
II.1.1 Principe général	19
II.1.2 Les applications actuelles	20
II.1.3 Méthode d'élaboration de revêtement	21
II.1.3.1 Par métallurgie des poudres	21
II.1.3.2 L'assemblage par thermo compression	22
II.1.3.3 Par projection thermique	22
II.1.4 Les différentes méthodes de projection	23
II.1.4.1 la projection plasma	24
II.1.4.1.1 Le plasma	24
II.1.4.1.2 Le principe de la projection plasma	24
II.1.4.1.3 Les différents procédés de projection plasma	25
II.1.4.2 Projection à la flamme conventionnelle	25
II.1.4.3 la projection HVOF	26
II.1.4.3.1 Le principe de la projection HVOF	26
II.1.4.3.2 Les principales caractéristiques mécaniques des revêtements obtenus par projection HVOF	27
II.1.5 Principaux paramètres de la projection thermique	27
II.2 Préparation de la surface des substrats	27
II.2.1 Les opérations de préparation de surface	28
II.2.1.1 Nettoyage de la surface	28
II.2.1.2 Sablage	28
II.2.1.3 Préchauffage du substrat	29
II.3 Les matériaux de revêtement	30
II.3.1 Céramiques (Composite Alumine (Al₂O₃)-Titane (TiO₂))	30
II.3.1.1 Composition chimique	30
II.3.1.2 Propriétés	30
II.3.1.3 Domaines d'application	31
II.3.2 Métalliques	31
II.3.2.1 Alliage de Nickel (NiCrBSi)	31
II.3.2.2 Composition chimique	31
II.3.2.3 Propriétés	31
II.3.2.4 Domaines d'application	32

II.3.3 Acier inox (316L)	32
II.3.3.1 Composition chimique.....	32
II.3.3.2 Propriétés	32
II.3.3.3 Domaines d'application.....	33
Chapitre III : L'adhérence des revêtements et les méthodes d'essais	34
III. Introduction	35
III.1 L'adhésion et l'adhérence	37
III.2 Adhérence d'une interface	38
III.2.1 Tests d'adhérence	39
III.2.1.1 Tests purement mécanique	39
III.2.1.1.1 Test de flexion à 4 points.....	39
III.2.1.1.2 Essai de gonflement.....	40
III.2.1.1.3 Essai d'indentation.....	40
a) L'indentation sur l'interface.....	40
b) L'indentation normale.....	41
III.2.1.1.4 Le scratch test.....	42
III.2.1.1.5 Test de pelage.....	43
III.2.1.2 Tests non-mécanique.....	44
III.2.1.2.1 Essai de choc au laser.....	44
III.2.1.2.2 Essai d'émission acoustique.....	45
Chapitre IV : Technique de projection thermique	47
IV. Introduction.....	48
IV.1 Modèle géométrique et numérique.....	48
IV.2 Maillage du modèle.....	50
IV.3 Effet d'angle.....	51
IV.4 Effet d'épaisseur.....	54
IV.5 Effet de matériau.....	58
Conclusion générale	63
Références bibliographique	64

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Les différentes classes d'alliages d'aluminium.	13
Tableau 1.2: Exemples d'alliages d'aluminium à durcissement structural.	16
Tableau 2.1: Exemples d'applications de la projection thermique.	20
Tableau 2.2: Compositions chimiques de l'alliage NiCrBSi.	31
Tableau 2.3: Composition chimique de l'acier inoxydable 316 L.	32
Tableau 2.4: Propriétés mécaniques et thermiques de l'acier inoxydable 316 L.	33
Tableau 4.1: Modèle géométrique.	49
Tableau 4.2: Propriétés mécanique des matériaux.	50
Tableau 4.3: Informations sur maillage.	50

Liste des figures

Figure 2.1 : Propriétés spécifiques de surface.	6
Figure 2.2 : Surface industrielle.	7
Figure 2.3 : Anoblissement d'une surface et de ses propriétés fonctionnelles.	8
Figure 2.4 : choix d'un traitement de surface.	10
Figure 2.1 : Classification des procédés de traitement de surface.	18
Figure 2.2 : Principe fondamental de la projection thermique.	19
Figure 2.3 : Schéma de coupe d'un dépôt.	20
Figure 2.4 : Les étapes nécessaire au frittage naturel de biomatériaux.	22
Figure 2.5 : Schéma simplifié le principe de projection thermique.	23
Figure 2.6 : Schéma de principe d'une torche à plasma d'après.	24
Figure 2.7 : Principe de la projection à la flamme conventionnelle.	25
Figure 2.8 : Schéma d'un pistolet HVOF.	26
Figure 2.9 : Représentation schématique des zones affectées d'une surface.	28
Figure 2.10 : Représentation de l'accrochage mécanique : (a) Morphologie de la surface et (b) Ancrage des particules sur la surface.	28
Figure 3.1 : Test de flexion 4 points.	39
Figure 3.2 : Test de gonflement.	40
Figure 3.3 : Test d'indentation sur l'interface.	41
Figure 3.4: Test d'indentation normale.	42
Figure 3.5: le scratch test.	43
Figure 3.6 : Test de pelage.	44
Figure 3.7 : Essai de choc au laser.	45
Figure 3.8 : Essai de l'émission acoustique.	46
Figure 4.1 : Maillage typique du modèle film/substrat.	51

Figure 4.2 : Contour des Contrainte Von Misses en fonction angle Θ .	52
Figure 4.3 : Contour des Déformations plastiques en fonction Θ .	53
Figure 4.4 : Contour des contraintes de cisaillement τ_{xy} en fonction Θ .	54
Figure 4.5 : Répartition des contraintes Von Mises pour différent épaisseur h.	55
Figure 4.6 : Evolution des contraintes équivalente max en fonction charge appliqué pour différent épaisseur h.	55
Figure 4.7 : Variation des contraintes équivalentes en fonction de h.	56
Figure 4.8 : Contour des déformations plastiques en différent h et $\theta=30^\circ$.	57
Figure 4.9 : Courbe déformation plastique en fonction de h.	57
Figure 4.10 : Contour des contraintes de cisaillement τ_{xy} en différent h avec $\theta=30^\circ$.	58
Figure 4.11 : Figure 4.11: Répartition des contraintes Von Mises pour différent matériaux.	59
Figure 4.12 : Evolution des contraintes équivalente max en fonction charge appliqué pour différents matériaux.	59
Figure 4.13 : Répartition des déformations plastiques pour différent alliage d'aluminium.	60
Figure 4.14 : Contour des contraintes de cisaillement τ_{xy} pour différent alliage d'aluminium.	61

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale :

L'utilisation des revêtements dans les applications industrielles tend à augmenter depuis plusieurs années, et cela dans toutes les industries : automobile, aéronautique, spatiale, marine, ferroviaire, médicale et nucléaire. Les performances en termes de gain massique, de propriétés mécaniques et de fabrication offrent de nombreuses possibilités d'applications, parfois très complexes.

Les activités de recherche propres à ces matériaux (qui ont la particularité d'être constitué de deux matériaux homogène isotrope ou non) sont également très présentes dans les laboratoires du monde entier non seulement pour permettre de mieux comprendre le comportement des structures des bimatériaux mais aussi étudier les fissures et les ruptures interfaciales à travers de nombreux thèmes d'études, dans le but d'optimiser leur utilisation et leur adéquation avec l'application industrielle.

L'endommagement de la structure film/substrat nécessite une étude particulière puisqu'elle est caractérisée par un assemblage de deux matériaux, aux propriétés mécaniques, physiques et thermiques presque identiques ou radicalement différentes. De plus, la présence de l'interface constitue non seulement une discontinuité de ces propriétés, mais aussi une source d'initiation de fissures. Or, ces variations de propriétés pourraient générer une concentration de contraintes et donc être à l'origine d'un endommagement de la structure film/substrat. Néanmoins, la performance de ces propriétés est limitée lorsque le champ de contrainte au voisinage de l'interface est suffisant pour produire une décohésion locale entre les deux matériaux assemblés

Ce travail a été réalisé afin d'étudier par la méthode des éléments finis l'endommagement des structure film/substrat de type métal/métal.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique des surfaces et de leur traitement, ainsi qu'à une description des différents types d'alliages d'aluminium, et plus précisément des alliages 2024(LY12), 6061 et 7075, qui se caractérisent par leurs propriétés mécaniques différentes.

Le second chapitre décrit en détail les méthodes et techniques de revêtement de surfaces par projection thermique.

Dans le chapitre 3 sont présentés les différents tests d'adhérence destructifs en passant en revue le test de pelage, les tests de décollement par gonflement, par indentation, d'une part, et

Introduction générale

d'autre part les tests non destructifs par la méthode ultrasonore, les émissions acoustiques, par choc laser... pour contrôler la résistance de l'interface revêtement/substrat.

Le chapitre 4 est une étude paramétrique du pelage en utilisant le code de calcul SOLIDWORKS pour analyser numériquement la quantification de l'endommagement de la couche mince pour trois différents alliages d'aluminium.

CHAPITRE I :
Traitement de surface et les alliages
d'aluminium

Chapitre I : Traitement de surface et les alliages d'aluminium

I. Introduction :

Les pièces mécaniques sont généralement soumises à plusieurs types de contraintes au cours de leur cycle de vie telles que la fatigue, l'usure, l'usure, etc. Dans la grande majorité des cas, sa surface est une partie importante car c'est la plus vulnérable à ce type de problème. [1]

En métallurgie, le traitement de surface est une étape importante, voire critique. Sans ce procédé, il est pratiquement impossible de créer des objets métalliques, qu'ils soient de type standard ou sur mesure. Plus brièvement, cela consiste à modifier l'aspect de la surface du métal de manière à lui conférer des propriétés particulières adaptées aux conditions d'utilisation requises. Ils peuvent en effet apporter des améliorations à la pièce au niveau des propriétés mécaniques souhaitées par l'utilisateur. Il convient de préciser que le traitement de surface vise également à modifier les propriétés mécaniques et physiques du métal (résistance à la corrosion, résistance à la corrosion, soudabilité, oxydation résistance et conductivité électrique) étant les plus importantes. [2]

Sur cette problématique, les traitements de surface ont suscité un grand intérêt tant au niveau industriel qu'au niveau de la recherche académique. Divers traitements ont été développés p Parmi les différents procédés de traitements de surface, il est possible de distinguer quatre familles : les traitements de transformation structurale d'origine mécanique Ou thermique, les traitements de diffusion ou thermochimiques, les traitements de conversion et les revêtements.

Dans ces derniers et en général, les traitements de surface sont tous des procédés mécaniques, chimiques, électrochimiques ou physiques Le traitement de surface passe par différentes étapes dont le nettoyage et la préparation de surface.

Chapitre I : Traitement de surface et les alliages d'aluminium

I.1 Surface :

Il existe différentes façons d'appréhender les surfaces, par exemple en termes d'échelle ou de propreté. Mais on peut aussi distinguer les surfaces modèles des surfaces industrielles, donc réelles. Les caractéristiques correspondantes ne seront pas nécessairement les mêmes. Si le physicien du solide va s'intéresser à la structure électronique des atomes de surface et observer celle-ci à l'échelle nanométrique, l'ingénieur et le technicien vont regarder la surface comme une empreinte de l'outil qui a permis de l'obtenir ou de la conditionner. L'échelle de l'observation ne sera pas la même : de nanométrique voire microscopique dans le premier cas, elle sera méso- et le plus souvent macroscopique dans le second.

Quelle que soit la discipline, la surface est communément définie comme la partie ou la limite externe d'un solide. Compte tenu du fait que tout matériau est généralement utilisé dans un environnement donné (air, gaz, milieu aqueux, phase condensée, lubrifiant, etc.), la surface doit être considérée comme une interface : solide – gaz, solide – liquide, voire solide – solide. Dans ce contexte, compte tenu des profils de composition ou de caractéristiques dans la zone voisine de la surface, on introduit même la notion d'interphase, ce qui permet d'introduire celle de propriétés adaptatives (gradient d'indices de réfraction par exemple).

I.1.1 Propriétés des surfaces :

Dans une majorité de cas, dès que se pose le problème de l'optimisation des propriétés d'un matériau, métallique ou non, il apparaît que les phénomènes de surface jouent un rôle déterminant dans cette démarche. Quelques exemples industriels permettent d'illustrer cette forte influence : économie de matière et respect de l'environnement par le choix de matériaux à résistance accrue vis-à-vis des agressions subies en service, optimisation des propriétés catalytiques des surfaces impliquées dans les procédés du génie chimique, réduction du frottement et de l'usure dans la transmission de puissance utilisée dans l'industrie du transport, biocompatibilité et résistance à l'usure des biomatériaux prothétiques, structure et propriétés des interfaces dans les constituants actifs et passifs de la microélectronique.

De nombreux phénomènes métallurgiques sont liés à un rôle déterminant des surfaces, on peut citer à titre indicatif :

- En élaboration, le processus de solidification, la croissance cristalline, le frittage et la réalisation d'un dépôt.

Chapitre I : Traitement de surface et les alliages d'aluminium

- En évaluation des propriétés d'usage, les modes de fissuration et de rupture en fatigue mécanique ou thermique, la résistance à l'érosion et à la cavitation, la résistance mécanique et son évolution avec la température, l'aptitude à l'usinage avec ou sans enlèvement de copeaux, le comportement au frottement et à l'usure, l'adhérence et l'aptitude au collage, l'influence de la lubrification.
- En réactivité physico-chimique, la corrosion et l'oxydation, la coloration et l'aspect, la catalyse, les processus de recristallisation, de transformation de phases et de coalescence, la liaison céramique métal ou polymère métal, la biocompatibilité.
- En évaluation des propriétés physiques, le pouvoir réflecteur et la résistance de contact, la conduction thermique ou électrique.

Tous ces critères spécifiques des surfaces liés aux propriétés de mise en œuvre et d'usage des matériaux peuvent être représentés schématiquement sur la figure 1.1.

La surface est effectivement une discontinuité dans l'arrangement des atomes d'un solide, ce qui lui confère une énergie supérieure à celle du volume; il en résulte une grande réactivité des atomes et un réarrangement de leur distribution, avec formation de figures géométriques comme par exemple les striations qui apparaissent dans les premiers stades de l'oxydation, des ségrégations d'éléments résiduels ou d'additions mineures qui vont migrer du volume vers la surface, comme par exemple l'étain qui peut perturber les phénomènes diffusionnels liés à un traitement thermo-chimique comme la cémentation ou la carbonitruration. La notion de surface est donc par essence pluridisciplinaire; elle concerne le mécanicien, le chimiste, le physicien et le métallurgiste. Seule, une approche globale permet d'aboutir à une description complète d'une surface et d'appréhender l'ensemble de ses propriétés fonctionnelles. [3]

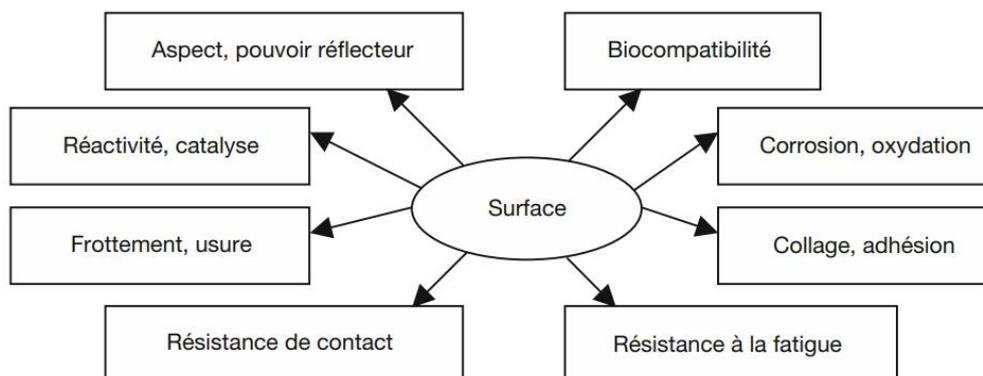


Figure 1.1 : Propriétés spécifiques de surface. [3]

I.1.1.1 Propriétés physiques :

- Conductivité thermique.
- Pouvoir réflecteur.

I.1.1.2 Propriétés chimiques :

- Réactivité.

I.1.1.3 Propriétés mécaniques :

- Dureté.
- Ténacité.
- Coefficient de frottement.
- Contraintes résiduelles.

I.1.1.4 Propriétés métallurgiques :

- Structure cristallographique.
- Taille de grain.
- Texture.
- Inclusion, porosité.

I.1.1.5 Propriétés géométriques :

- Rugosité.

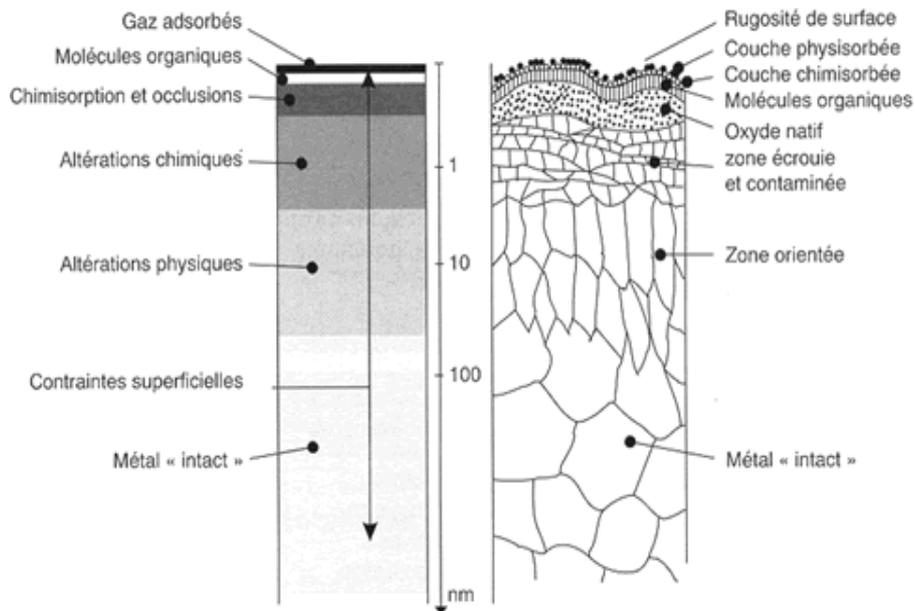


Figure 1.2 : Surface industrielle. [4]

Chapitre I : Traitement de surface et les alliages d'aluminium

I.2 Traitement de surface :

Un traitement de surface ou un traitement thermique est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisations données.

De ce fait, le but de traiter les matériaux est d'améliorer ou modifier les propriétés mécaniques et physiques d'une pièce (conductibilité électrique, résistance à l'usure ou au frottement...), de maîtriser sa performance (résistance à la corrosion, solidité), et d'améliorer son aspect externe. Le traitement d'un matériau permet d'augmenter la durée de vie d'un produit. [5]

Depuis quelques années, les techniques de traitement de surface sont l'objet d'une extraordinaire évolution. Une surface étant faite pour satisfaire des propriétés d'emploi donnée, on est souvent amené à pratiquer des traitements pour anoblir la surface et lui conférer une fonctionnalité spécifique comme le montre la figure 1.3. [6]

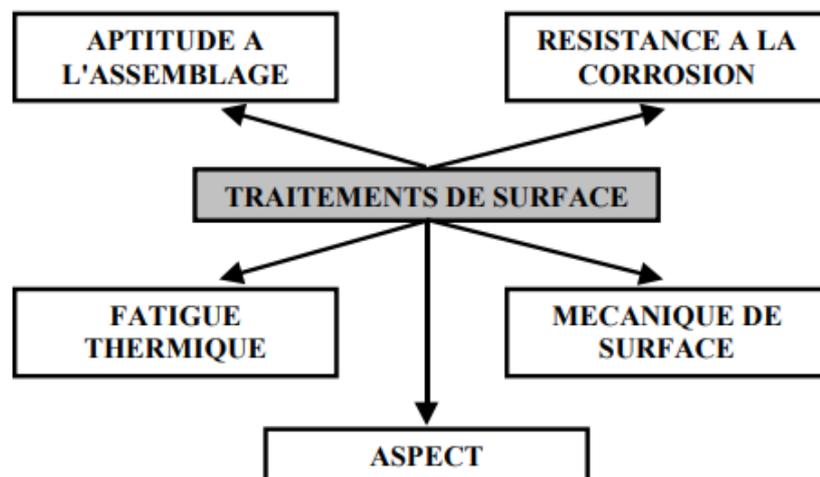


Figure 1.3 : Anoblissement d'une surface et de ses propriétés fonctionnelles. [6]

I.2.1 Le traitement chimique :

Le traitement des objets par voie chimique est très utilisé dans l'industrie. Qu'elles soient acides, basiques, oxydantes ou réductrices, les attaques chimiques vont permettre le décapage des objets métalliques compatibles avec les produits chimiques de traitement. On introduit généralement les objets à décaper dans des bains chimiques à recirculation à chaud ou à froid. Les objets sont ensuite rincés à l'eau dans des cuves ou par jets d'eau. Traitement de la rouille : Ainsi, les objets en fer subissent l'agression de la rouille qui désagrège avec le temps

Chapitre I : Traitement de surface et les alliages d'aluminium

complètement le matériau. Les traitements à l'acide phosphorique vont permettre de décomposer les oxydes en phosphates de fer en créant au passage une couche protectrice qui se dépose en surface.

I.2.2 Le traitement électrochimique :

Le traitement électrochimique est utilisé pour le dépôt de métaux sur des surfaces métalliques comme une argenture ou un cadmiage électrolytique ou bien pour accélérer la décontamination chimique ou radioactive des surfaces métalliques. Le traitement électrochimique s'effectue en général dans une cuve remplie d'électrolyte dans laquelle une réaction d'oxydation-réduction a lieu. En général, l'élément métallique à traiter et la cuve elle-même jouent le rôle d'électrodes entre lesquelles passe un courant électrique. La décontamination de radionucléides par voie électrochimique est une voie permettant d'éliminer rapidement et efficacement la radioactivité de pièces métalliques contaminées.

I.2.3 Le traitement mécanique :

Le traitement mécanique est utilisé pour décaper les objets métalliques d'une peinture écaillée ou de la rouille. Le principe est l'application d'une pression à la surface de l'objet métallique provoquant une déformation par impact. Grenailage : On utilise notamment des procédés de grenailage par voie sèche ou humide pour éliminer les déchets ou les contaminants sous la contrainte d'une force mécanique. Le traitement de surface d'un objet en acier qui se déroule en général dans une cabine appropriée consiste à envoyer de la grenaille de fer dans un courant d'air ou d'eau sur l'objet. L'air ou l'eau est ensuite recyclé après filtration et/ou traitement particulier. Autres techniques : Outre les technologies de grenailage, on peut citer les techniques de choc laser, de galetage ou de martelage, qui génèrent des déformations plastiques à la surface des matériaux. [7]

I.2.4 Choix de traitement :

Les traitements de surface d'objets sont très pratiqués dans l'industrie. Que ce soit pour la maintenance des surfaces de matériaux usés, la décoration, la déposition de métaux ou la décontamination chimique ou radioactive des objets métalliques, différents types de traitement de surface existent et sont utilisés selon la nature de l'objet et l'objectif recherché.

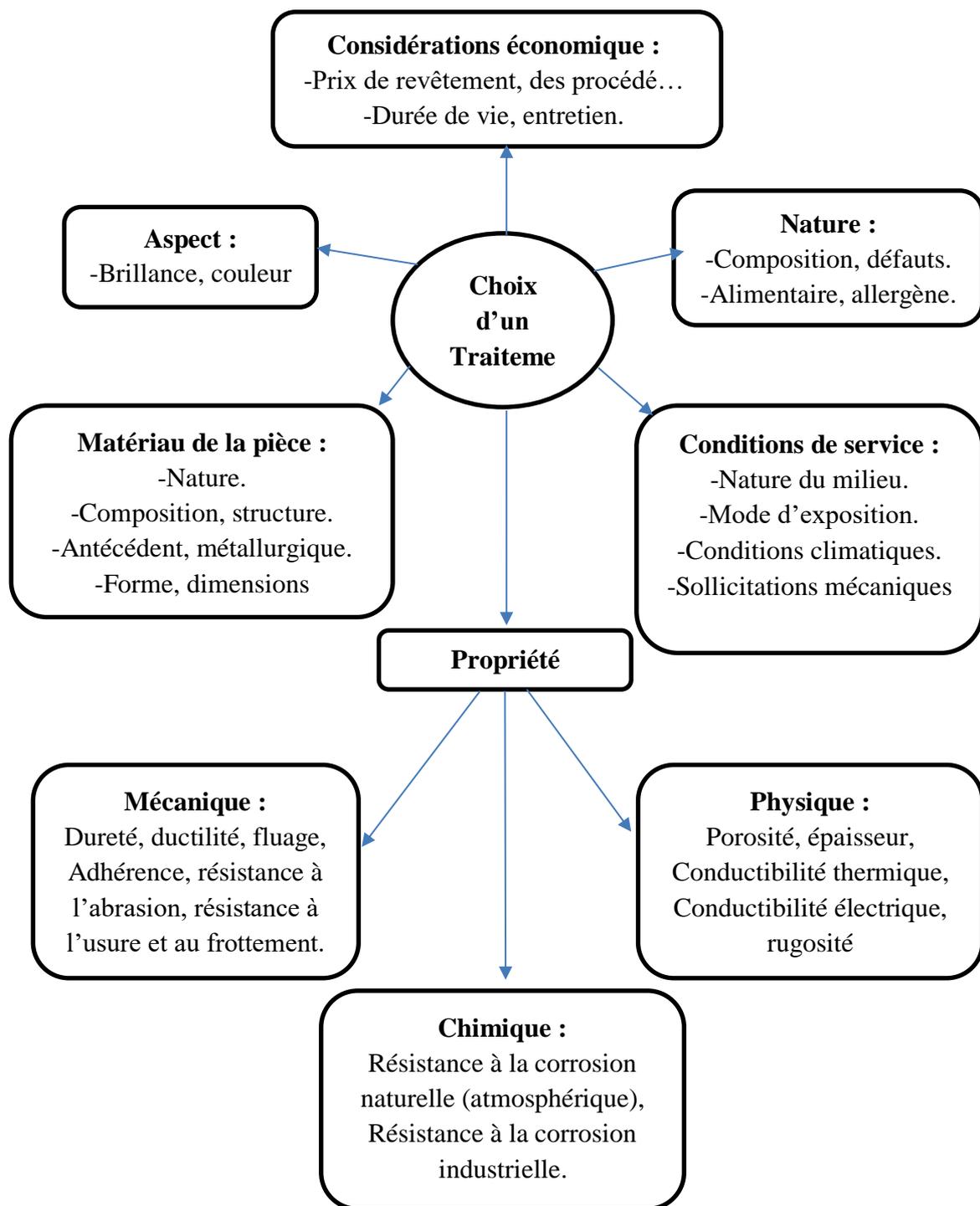


Figure 1.4 : choix d'un traitement de surface. [4]

I.2.5 Domaines d'application de traitement de surface :

- Frottement (glissement et anti-glissement), résistance à l'abrasion, à l'usure.
- Barrière thermique, conductivité thermique, résistivité électrique.
- Anti-corrosion.
- Anti adhérence.
- Multicouches, gradients.
- Matériaux composites, implantation de composés fragiles dans la matrice de dépôt.
- Abradables.
- Rechargement de dépôt.
- Mise en forme de pièce.

Quelques applications industrielles :

- Freins et embrayages de moteurs électriques.
- Segment du voitures ou camions.
- Prothèses médicales.
- Barrières thermiques dans des chambres de combustions, sur des pistons.
- Remplacement des chemises dans les cylindres d'un moteur automobiles.
- Etc... [8]

I.3 Techniques de traitement de surface :

I.3.1 Traitement de surface par voie humide :

Dans cette catégorie on va distinguer les revêtements obtenus par :

- Electrolyse.
- Dépôts chimiques.
- Dépôts par immersion dans un métal fondu.
- Peinture par électrophorèse.
- Vernis et peintures.

I.3.2 Traitement de surface par voie sèche :

- Dépôts par immersion condensation en lit fluidisés de polymères chauffés.
- Dépôts chimiques en phase vapeur CVD (ChemicalVaporDeposition).
- Dépôts physiques en phase vapeur PVD (PhysicalVaporDeposition).

- Les vernis pour applications tribologiques.
- Dépôts par **projection thermique**.

I.3.3 Traitements par transformation structurale:

- Durcissement par trempe après chauffage superficiel.
- Refusions des alliages.
- Traitements mécaniques destinés à développer écrouissage et contraintes élastiques de compression.
- Traitements par impact.

I.3.4 Traitement de surface par conversion :

- Oxydation anodique.
- Sulfuration.
- Phosphatation.

I.3.5 Traitement de surface par diffusion :

- Diffusion de métaux.
- Diffusion de métalloïdes. [9]

I.4 Alliages d'aluminium:

Les propriétés mécaniques d'un matériau décrivent sa réponse aux charges appliquées. Pour de nombreuses applications, il est essentiel de supporter une charge ou de résister à un impact sans fléchir excessivement ou sans subir de rupture. De ce fait, les propriétés mécaniques représentent souvent un coefficient critique dans le choix de matériaux.

L'aluminium est un élément métallique parmi les métaux les plus abondants dans la croûte terrestre, très léger avec un poids de 2,7 kg/m³, environ un tiers de celui de l'acier. En modifiant la composition de ses alliages et par divers traitements thermiques et mécaniques, il est utilisé dans différents domaines selon la demande exigée.

A l'état naturel, l'aluminium génère un revêtement protecteur d'oxyde lui permettant de résister à la corrosion. Différents types de traitements de surface tels que l'anodisation, peinture peuvent encore améliorer cette propriété. Il est aussi un excellent conducteur de chaleur et d'électricité qui est presque deux fois aussi bon que le cuivre.

Chapitre I : Traitement de surface et les alliages d'aluminium

Aussi, il est un bon réflecteur de la lumière visible, ainsi que de la chaleur, est ductile et a un faible point de fusion. Dans un état fondu, il peut être traité de différentes manières.

En outre, le métal lui-même est non toxique et ne libère pas de goût ou d'arôme ce qui le rend idéal pour le conditionnement des produits sensibles tels que la nourriture ou les produits pharmaceutiques. Il est recyclable sans dégradation de ses qualités, sa refonte nécessite peu d'énergie, seulement environ 5 pour cent de l'énergie requise pour produire le métal primaire est nécessaire dans le processus de recyclage. [10]

I.4.1 Propriété de l'aluminium pur :

L'aluminium pur possède une structure cristalline cubique à face centre (CFC). Les propriétés physiques sont présentées ci-dessus. [11]

- Paramètre de maille : 0.405 nm à 298°K.
- Masse volumique à 25°C : 2698.7 kg/m³.
- Point de fusion : 660°C.
- Coefficient de dilatation moyen entre 20 et 300°C : $2.55 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.
- Retrait volumique : 5.6% en cours de solidification.
- Capacité thermique massique à 20 °C : $c = 950 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Conductivité thermique à 20 °C : $\lambda = 217.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Résistivité électrique à 20 °C : $\rho = 2.63 \mu\Omega \text{ cm}$.

L'aluminium peut être utilisé à différents degrés de pureté ou sous forme d'alliages, avec la plupart des métaux (cuivre, manganèse, magnésium, silicium, zinc, etc.).

Séries	Alliage correspondant
1xxx	Aluminium pur (>99%)
2xxx	Aluminium / Cuivre
3xxx	Aluminium / Manganèse
4xxx	Aluminium / Silicium
5xxx	Aluminium / Silicium
6xxx	Aluminium / Magnésium / Silicium
7xxx	Aluminium / Zinc
8xxx	Autres alliages d'aluminium

Tableau 1.1 : Les différentes classes d'alliages d'aluminium.

I.4.2 Les différents alliages d'aluminium :

Les alliages d'aluminium sont appelés aussi les alliages corroyés, c'est-à-dire mis en forme par déformation à chaud. Ces alliages sont divisés en deux catégories, à savoir :

- Non trempant : qui ne peuvent subir aucun durcissement structural.
- Trempant: à durcissement structurel.

Le durcissement structural est un procédé thermique qui permet d'avoir une répartition optimale des précipités et comporte trois stades :

- Mise en solution à haute température de l'élément d'addition.
- Trempe : baisse rapide de la température jusqu'à la température ambiante, en vue d'obtenir une solution solide sursaturée.
- Vieillissement à une température inférieure à celle du solvus, en vue de favoriser un retour partiel vers les conditions d'équilibre et d'obtenir ainsi les propriétés mécaniques visées.

I.4.2.1 Alliages d'aluminium sans durcissement structural :

a) Série 1000 : (99% Al au moins)

- Propriétés faibles à l'état recuit écrouissage.
- Mise en forme par déformation plastique à froid.
- Excellente tenue en atmosphère humide et marine.
- Grande conductibilité électrique et thermique.
- Excellente tenue aux très basses températures.

b) Série 3000 : (Al-Mn)

- Très facile à déformer.
- Bonne résistance à la corrosion.
- Facilement soudable
- Remplacent l'aluminium non allié de la série 1000 quand on veut des meilleures propriétés mécaniques.

c) Série 5000 : (Al-Mg)

Un séjour prolongé à la température ambiante ou à une température un peu plus élevée provoque une précipitation de Mg_2Al_3 aux joints de grains, ce qui a des conséquences néfastes

Chapitre I : Traitement de surface et les alliages d'aluminium

sur la résistance à la corrosion. Pour pallier cette tendance, on soumet les alliages à un écrouissage suivi d'un recuit de stabilisation.

- Grande aptitude aux transformations à chaude et à froid.
- Excellente soudabilité.
- Très bonne résistance à la corrosion (on peut le monter encore plus par anodisation)
- Grande qualité de leurs états de surface après polissage et anodisation.

I.4.1.2 Alliages d'aluminium à durcissement structural :

a) Série 2000 : (Al-Cu et Al-Cu-Mg)

- Durcissement dû à la précipitation de formes transitoires des composés d'équilibre CuAl_2 et CuMgAl_2 .
- Excellentes propriétés mécaniques (descendent pour les zones adjacentes aux cordons de soudure).
- En rajoutant Fe + Ni, nous obtenons une précipitation de Al_9FeNi qui nous donne une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C (fabrication des moteurs à turbine et structures d'avions supersoniques).
- À l'état trempé et vieilli, on a une résistance médiocre à la corrosion.

b) Série 6000 : (Al-Mg-Si)

- Normalement on a un rapport massique $\text{Mg/Si}=1.73$, si on a un excès de silicium on augmente les propriétés mécaniques, mais on diminue la résistance à la corrosion.
- En rajoutant Mn + Cr on augmente la résistance mécanique, la ténacité, et on affine la taille des grains.
- En rajoutant Cu ($< 0.5\%$) on monte les propriétés mécaniques.
- Excellente aptitude à la mise en forme à chaud.
- Bonne soudabilité.
- Excellente résistance à la corrosion.

c) Série 7000 : (Al-Zn)

- Propriétés mécaniques les plus élevées (après traitement thermique).
- Cu ($< 2\%$) durcit les alliages, descendre rempabilité, soudabilité et ténacité.
- Cr ($< 0.3\%$) : on augmente leur résistance à la corrosion sous tension.
- Faible résistance à chaud.

Chapitre I : Traitement de surface et les alliages d'aluminium

Le tableau suivant donne quelques nuances d'alliages d'aluminium à durcissement structural :

Type d'alliages	Nuances
2000 (Al-Cu)	2014, 2017, 2117, 2024, 2124, 2618
7000 (Al-Zn)	7075, 7175, 7475, 7049, 7050, 7150
6000 (Al-Mg-Si)	6013, 6061, 6081, 6181

Tableau 1.2 : Exemples d'alliages d'aluminium à durcissement structural.

CHAPITRE II :
Technique de projection thermique

Chapitre II : Technique de projection thermique.

II Introduction :

La projection thermique est une technologie, développée par Schoop et Guenther en 1917 pour élaborer des dépôts métalliques de zinc en utilisant comme source de chaleur une flamme oxyacétylénique. Cependant, son impact technologique ne s'est manifesté qu'à partir de la deuxième moitié du XXème siècle, avec la deuxième guerre mondiale et le développement de l'industrie aéronautique qui ont entraîné le perfectionnement de cette technique puis l'apparition de technologies plus évoluées comme le D.-GUN™ et la projection plasma utilisant un arc électrique [12].

En 1962 et 1973, la recherche technique de la projection thermique se renforce, et en 1973 se développe la projection thermique plasma sous vide partiel. Dans les années 1980 et 1990, avec le développement des technologies HVOF (High Velocity Oxy Fuel Flame) et HVAF (High Velocity Air Fuel Flame), les applications industrielles ont fait de grands progrès, notamment dans l'aéronautique, l'aviation, le militaire et la défense, l'énergie, la pétrochimie, l'acier, le textile, l'agriculture et les industries médicales. La plupart de ces revêtements sont utilisés pour protéger les composants du moteur (environ 64%), les outils de coupe (17%) et la protection contre l'usure (14,6%) [13].

Beaucoup de procédés sont disponibles pour la production des revêtements d'épaisseur variable. En fonction de la technique adaptée, les revêtements peuvent être élaborés par voie humide ou sèche.

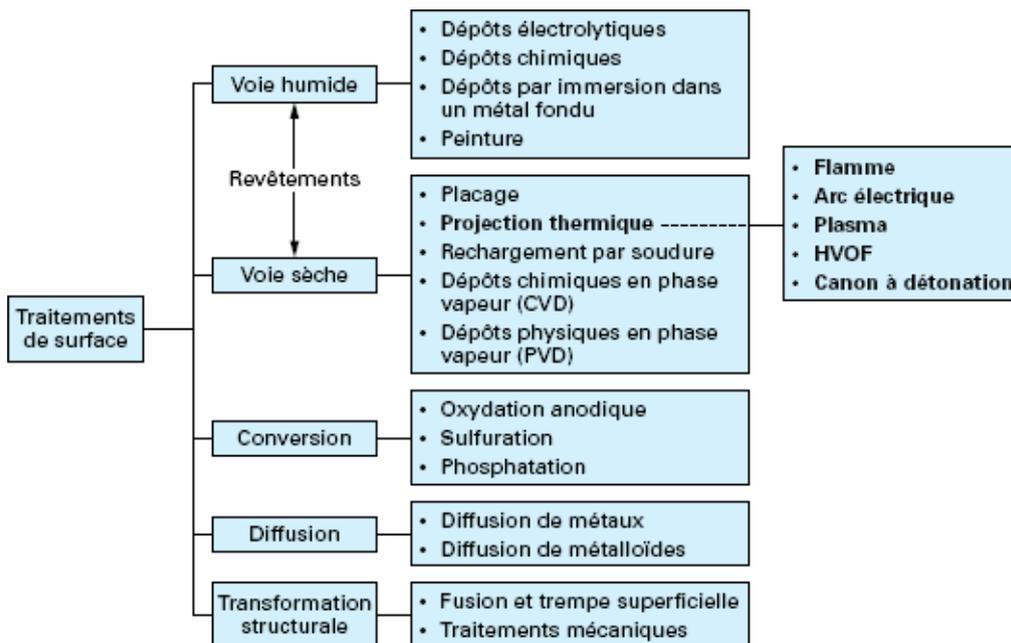


Figure 2.1 : Classification des procédés de traitement de surface. [14]

Chapitre II : Technique de projection thermique.

II.1 Projection thermique :

II.1.1 Principe général :

La projection thermique est un procédé qui consiste à projeter un matériau, fondu ou ramolli par une source de chaleur, sur une surface à revêtir sur laquelle il se solidifie après écrasement. Le matériau d'apport peut être, à l'état initial, sous forme de poudre, de fil ou de baguette. Le principe fondamental de la projection thermique est présenté. Un gaz vecteur permet la pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir.

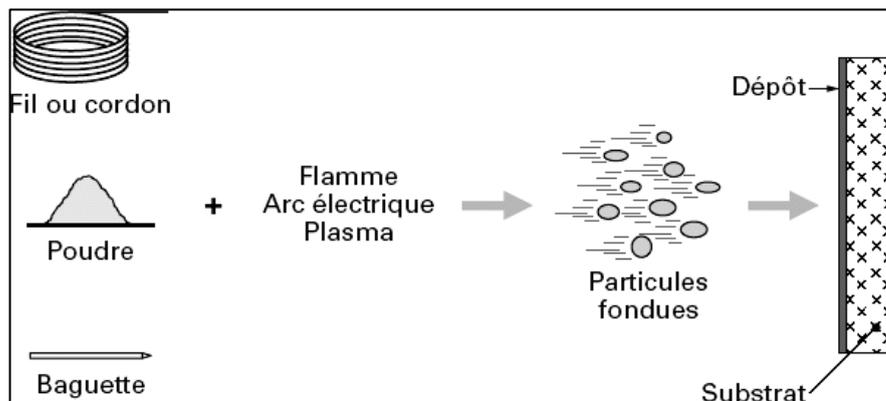


Figure 2.2 : Principe fondamental de la projection thermique. [15]

Les revêtements obtenus par projection thermique permettent de protéger ou modifier le comportement d'un matériau à revêtir. De nombreuses industries dans le monde utilisent la projection thermique pour de nombreuses applications à savoir la restauration et la réparation; la protection contre la corrosion; diverses formes d'usure telles que l'abrasion et l'érosion; l'isolation thermique; l'oxydation; les conducteurs électriques ou isolateurs; la décoration et autres [16].

Parmi les principaux procédés de la projection thermique, nous pouvons citer la projection plasma atmosphérique, la projection à la flamme conventionnelle (poudre) et la projection à la flamme supersonique (HVOF).

La formation d'un dépôt résulte de la combinaison du phénomène d'écrasement et de solidification rapide de particules fondues sur le substrat et du balayage de la surface à traiter. La réaction chimique des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleur avec le substrat affectent les propriétés du dépôt, et en particulier le taux de porosité, le taux d'impureté, les contraintes résiduelles et la structure métallurgique.

Chapitre II : Technique de projection thermique.

Le taux de porosité peut varier de 1 à 25 % suivant les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes, des particules infondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur séjour trop court dans la source de chaleur). La coupe d'un dépôt est présentée schématiquement. On remarque la structure en lamelles caractéristique des revêtements obtenus par projection.

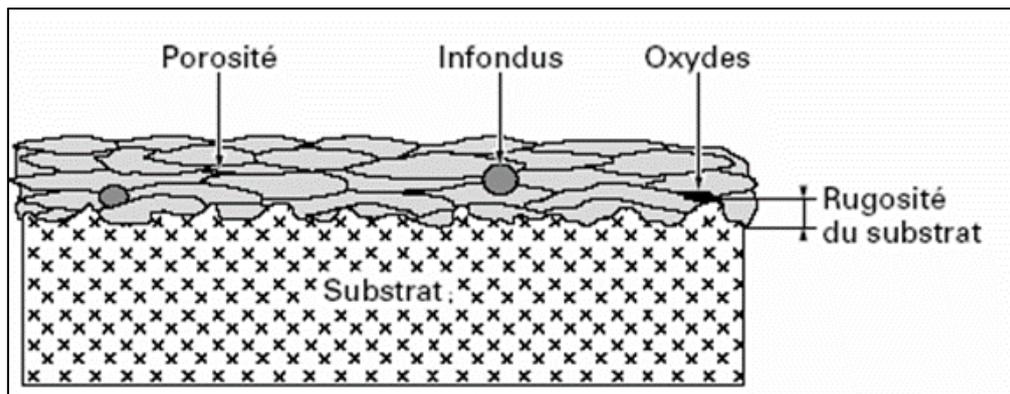


Figure 2.3 : Schéma de coupe d'un dépôt. [15]

II.1.2 Les applications actuelles :

Aujourd'hui, les objectifs des industriels sont essentiellement la réduction des coûts et l'amélioration des performances. Les applications sont diverses et variées. Le Tableau 2.1 donne quelques exemples d'applications et de matériaux utilisés dans le secteur de la projection thermique. [17]

	Exemple de pièce	Exemple de matériau projeté
Barrière thermique	Réacteur	ZrO ₂ – X (APS)
Réparation	Axe, arbre, carter	Sous-couche + matériau de base (FS)
Résistance à la corrosion	Cuve	316 L (HVOF), NiCrAlY, NiCr
Résistance à l'usure	Arbre, aubes de turbine	WC-Co-Cr (HVOF), Al ₂ O ₃ (PS)
Gain de poids	Chemise de moteur	Acier sur un alliage d'aluminium (APS, TWEA)
Biocompatibilité	Prothèse	Hydroxyapatite sur TiAl ₆ V ₄ (APS)

Tableau 2.1: Exemples d'applications de la projection thermique. [17]

Chapitre II : Technique de projection thermique.

II.1.3 Méthode d'élaboration de revêtement :

II.1.3.1 Par métallurgie des poudres :

Parmi les procédés de mise en forme de pièces industrielles en bimatériaux ou en multilatéraux, la métallurgie des poudres autorise une haute cadence de production avec une faible perte de matière première. De nombreuses techniques thermomécaniques de mise en forme des poudres et d'élaboration de matériaux massifs consolidés sont également disponibles. Il convient de citer la compression et le frittage, la compaction isostatique à chaud, le moulage par injection ou la fusion laser. Parmi ces techniques, L'élaboration de composants multi-matériaux par le procédé associant la compression à froid et le frittage par chauffage en four permet de minimiser le nombre d'étapes de conception afin de combiner des propriétés complémentaires.

Ces deux étapes, mise en forme par compression puis frittage, ont toutes les deux des influences sur les caractéristiques finales des matériaux et plus globalement sur la qualité de la pièce envisagée. La mise en forme a pour objectif, comme son nom l'indique, de donner une forme à la poudre en comprimant un matériau initialement pulvérulent à des pressions suffisamment importantes pour déformer plastiquement les grains afin d'aboutir à un milieu poreux cohésif. Si la nature de la poudre ne permet pas d'atteindre un comportement cohésif entre les grains sous l'effet d'un niveau de pression (par exemple pour des poudres dures comme les céramiques ou les carbures de tungstène), l'ajout d'un liant est alors nécessaire.

A l'issue de cette étape de mise en forme, la pièce dite « à vert », est mécaniquement très fragile. Afin d'obtenir les caractéristiques finales de service par un effet de consolidation des matériaux « à vert », la phase de frittage a pour fonction de souder les grains entre eux en chauffant la pièce à hautes températures. Les températures et temps de frittage sont des variables dépendantes très naturellement des propriétés physico-chimiques de la poudre considérée. Elles dépendent aussi des caractéristiques du comprimé à vert et notamment de la densité moyenne atteinte en fin de compression. Lors de cette dernière phase de frittage, des déformations permanentes de type retrait et voilage vont se développer sur la géométrie issue de la phase de compression. Ces déformations activées lors de la phase de frittage dépendent de la composition chimique de la poudre, elles impliquent parfois une calibration ou une reprise d'usinage sur de faibles épaisseurs afin d'atteindre les préconisations géométriques fixées pour la pièce. [18]

Chapitre II : Technique de projection thermique.

La réalisation classique de ce type de matériau passe généralement par plusieurs étapes de fabrication : l'élaboration des deux matériaux, l'assemblage, l'usinage ... L'utilisation de la métallurgie des poudres permet de diminuer les temps et les coûts d'usinage. Les pièces peuvent ainsi être fabriquées en quelques étapes : Co-compression des poudres dans la forme souhaitée. Cofrittage puis rectification des pièces.

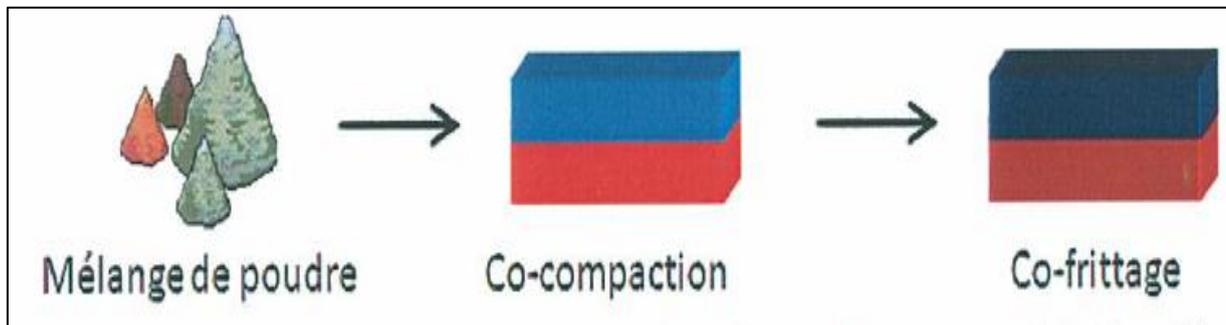


Figure 2.4 : Les étapes nécessaires au frittage naturel de biomatériaux. [18]

II.1.3.2 L'assemblage par thermo compression :

La thermocompression est la technique la plus simple pour former une interface entre deux matériaux hétérogènes. Comme son nom l'indique, les deux matériaux sont assemblés sous l'action simultanée de la température et de la pression, sans qu'aucune phase liquide ne se forme.

Les mécanismes de formation de l'interface lors d'un assemblage par thermocompression sont proches de ceux impliqués lors d'un frittage sous charge. En effet, lors de la mise en contact des matériaux, l'effet de la pression et de la température font apparaître un réseau de pores interconnectés qui se combleront principalement par déformation plastique et fluage du métal. Le cas échéant, la formation d'une interphase par réaction chimique entre les deux composés peut avoir lieu. Dans le cas du système alumine / aluminium, il n'y a pas de réaction chimique. [15]

II.1.3.3 Par projection thermique:

Le principe consiste à projeter à l'aide d'un gaz vecteur un matériau dit d'apport chauffé à haute température sur un matériau support pour en modifier ses propriétés (Figure 2.5). En s'agglomérant, les particules forment le revêtement. Les liaisons sont purement mécaniques. L'épaisseur du revêtement est comprise entre 50 microns et quelques millimètres.

La technique de projection thermique est utilisée dans : la boulonnerie, pompes, robinetterie, centrales hydrauliques/nucléaires, brasseries, industrie agroalimentaire, aéronautique, naval, ferroviaire, automobile et matériel chirurgical/dentaire. [18]

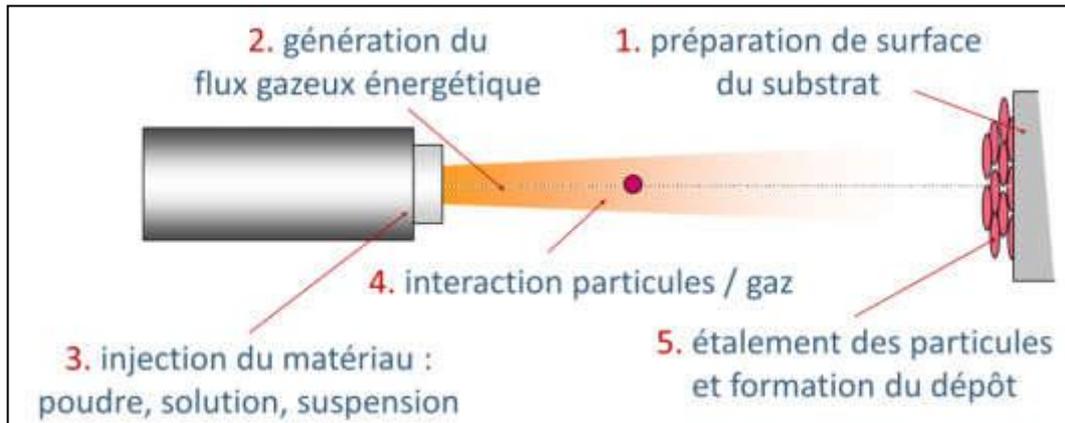


Figure 2.5 : Schéma simplifié le principe de projection thermique. [18]

II.1.4 Les différentes méthodes de projection :

On peut recenser cinq grands procédés de projection thermique :

- La projection à la flamme utilise l'énergie calorifique provenant de la combustion d'un gaz, généralement oxyacétylénique, générant une température de l'ordre de 3000°C. Les particules sont projetées avec une vitesse moyenne de 40 m/s. Les revêtements obtenus ont une adhérence inférieure à 40 MPa et un taux de porosité compris entre 10 et 20 %.
- La projection à l'arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils conducteurs électriques consommables, un jet d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et projetant sur le substrat. Les revêtements obtenus ont une adhérence inférieure à 40 MPa et un taux de porosité compris entre 5 et 10 %.
- La projection hypersonique à tir discontinu. Cette technique consiste à introduire le matériau d'apport (sous forme de poudre) dans un tube appelé canon à détonation et même temps que le gaz de combustion (oxygène, acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de 8 allumages par seconde. Le régime de projection est donc discontinu. Ce type d'installation permet d'obtenir des revêtements avec un taux de porosité inférieur à 2 % et une adhérence supérieure à 60 MPa et jusqu'à 100 MPa.
- La projection plasma.
- La projection HVOF. [17]

Chapitre II : Technique de projection thermique.

Parmi les principaux procédés de la projection thermique, nous pouvons citer la projection plasma atmosphérique, la projection à la flamme conventionnelle (poudre) et la projection à la flamme supersonique (HVOF).

II.1.4.1 la projection plasma :

II.1.4.1.1 Le plasma :

Le plasma est un milieu ionisé, constitué d'un mélange d'ions, d'électrons et d'espèces neutres, excités ou non. Plus de 99 % de la matière de l'univers existe à l'état de plasma.

II.1.4.1.2 Le principe de la projection plasma :

Une torche de projection plasma est constituée de deux électrodes : une cathode conique placée à l'intérieur d'une anode cylindrique formant une buse. Un gaz inerte (habituellement de l'argon, éventuellement associé avec de l'hydrogène ou de l'hélium) circule entre les deux électrodes où il est ionisé pour former un plasma. Le matériau à projeter est introduit dans le jet de plasma ainsi créé. Le refroidissement des électrodes est assuré par de l'eau sous pression pour éviter leur échauffement et leur destruction. [19]

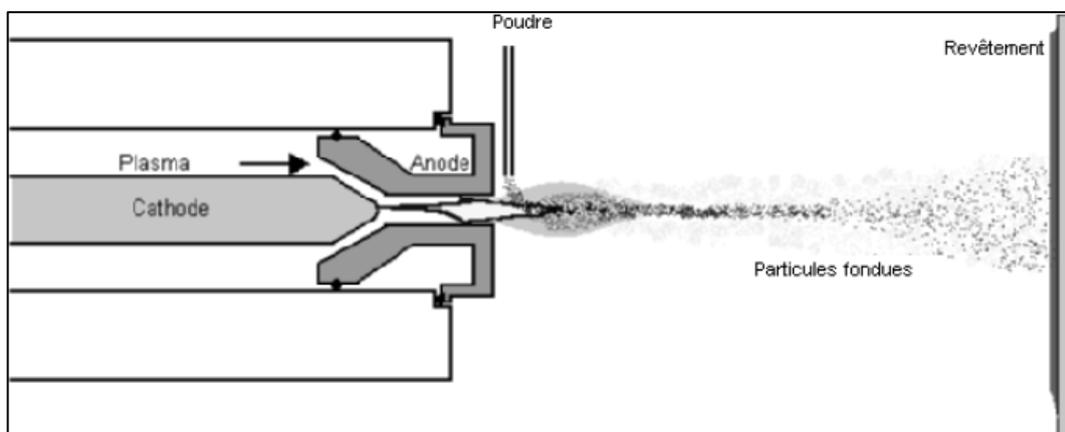


Figure 2.6 : Schéma de principe d'une torche à plasma d'après. [19]

La température du jet de plasma généré, nettement supérieure à celles des autres procédés de projection thermique, permet de projeter une large variété de matériaux. Elle peut aller jusqu'à 12 000°C. La seule condition est qu'il doit exister un écart d'au moins 300°C entre la température de fusion et celle d'évaporation ou de dissociation du matériau. Malheureusement ces températures élevées favorisent la formation d'oxyde avec le matériau projeté

Les particules percutent le substrat dans un état de fusion avancée, à des vitesses importantes, de l'ordre de quelques centaines de mètres par seconde. Elles s'écrasent sur le substrat

Chapitre II : Technique de projection thermique.

et refroidissent très rapidement, puis s'empilent les unes sur les autres réalisant ainsi progressivement un dépôt de plusieurs dizaines de microns à quelques centimètres d'épaisseur.

Plus de soixante paramètres peuvent influencer sur la structure et les propriétés du revêtement [20]. Les paramètres comme l'intensité de courant, les débits ou les compositions des gaz peuvent être contrôlés tandis que de la tension des électrodes, l'efficacité du refroidissement ou l'usure des électrodes.

II.1.4.1.3 Les différents procédés de projection plasma :

Il existe un grand nombre de techniques de projection plasma. On recense, de façon non-exhaustive, les procédés présentés ci-dessous :

- A.P.S: Atmospheric plasma spraying (projection atmosphérique).
- V.P.S: Vacuum plasma spraying (sous vide).
- R.P.S: Reactive plasma spraying (sous atmosphère réactive ; par exemple, en présence d'azote pour nitrurer un matériau).
- I.P.S: Inert plasma spraying (quand l'atmosphère est contrôlée, par exemple, l'air est remplacé par un gaz neutre).
- H.P.P.S: High pressure plasma spraying (en présence d'une légère augmentation de pression pour favoriser le transfert de chaleur).

II.1.4.2 Projection à la flamme conventionnelle :

Il s'agit du procédé le plus simple de tous les procédés de la projection thermique. Il consiste à utiliser une réaction chimique de combustion d'un carburant avec l'oxygène. La poudre est injectée dans le jet de flamme. Celle-ci est fondue et entraînée par le flux gazeux jusqu'à la pièce à revêtir [21].

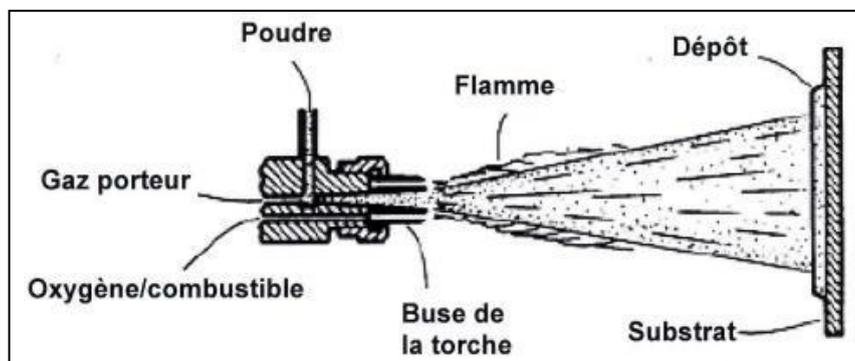


Figure 2.7 : Principe de la projection à la flamme conventionnelle [21]

Chapitre II : Technique de projection thermique.

La vitesse des particules est relativement faible et l'adhérence des dépôts est généralement inférieure à celle du processus de projection à la flamme haute vitesse. Les revêtements obtenus par cette technique contiennent une porosité importante et un taux d'oxydes élevé. Parmi les avantages des pistolets de projection flamme poudre par rapport à celui de projection flammefil c'est que cette technique est liée à la plus grande variété de revêtements disponibles vu que la plupart des matériaux sont disponibles sous forme de poudres. Cette technique est seulement limitée par les matériaux possédant une température de fusion supérieure à celle de la flamme ou par les matériaux qui se décomposent à la chaleur. Même les revêtements de polymères peuvent aussi être projetés par cette technique. [22].

II.1.4.3 Projection HVOF :

II.1.4.3.1 Principe de la projection HVOF :

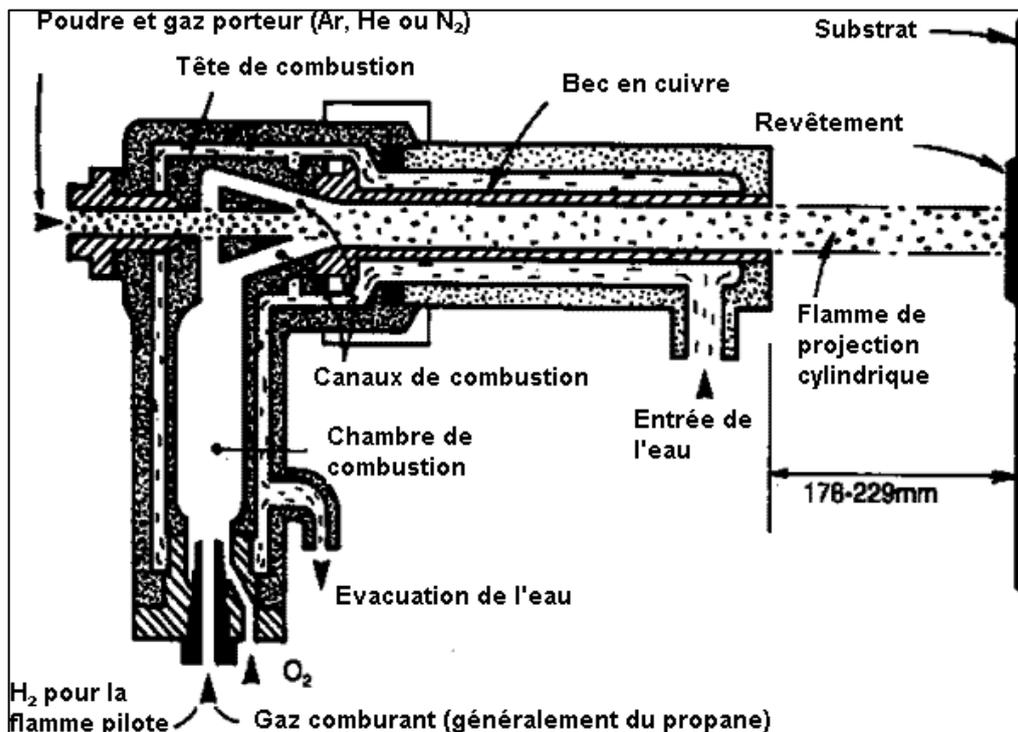


Figure 2.8 : Schéma d'un pistolet HVOF. [23]

Développée dès la fin des années 70, la technique de projection HVOF (de l'anglais *high velocity oxy-fuel*) produit une flamme hypersonique par la combustion d'hydrocarbures avec de l'oxygène sous grande pression. Les hydrocarbures utilisés sont, entre autres, l'acétylène, le kérosène, le propane et le propylène. Ils sont mélangés à de l'oxygène avant d'être brûlés dans la chambre de combustion à la sortie de laquelle, la poudre sera généralement injectée. La température de la flamme ainsi formée peut atteindre plus de 3000°C et sa vitesse de sortie est d'environ 2000 m/s [24].

Chapitre II : Technique de projection thermique.

II.1.4.3.2 Les principales caractéristiques mécaniques des revêtements obtenus par projection HVOF :

Ce mode de projection permet d'élaborer des revêtements durs particulièrement intéressants dans le cadre des applications tribologiques. En développant une grande énergie cinétique, ce procédé permet de réaliser des revêtements présentant un faible taux de porosité (inférieur à 1 %) et une grande adhérence (proche voire supérieure à 100 MPa).

II.1.5 Principaux paramètres de la projection thermique :

Les paramètres de projection thermique sont nombreux. Ces paramètres influent sur la qualité finale du revêtement obtenu. Parmi ces paramètres, il y a ceux qui sont liés à la torche, au substrat, aux natures et débits des gaz et aussi à la composition et la morphologie du matériau à déposer.

II.2 Préparation de la surface des substrats :

La préparation de la surface est une étape incontournable avant de procéder à la projection thermique. En effet, le mode principal d'adhérence de ces revêtements est l'ancrage mécanique à la surface [21].

Toutefois, une surface industrielle peut présenter un film superficiel pouvant affecter les propriétés du dépôt et causer plusieurs phénomènes de dégradation à savoir l'usure et la corrosion [25]. Cela impose la réalisation d'une série d'opérations successives indispensables avant la projection thermique à savoir :

- Le nettoyage par dégraissage pour débarrasser la surface de toute contamination.
- Le sablage nécessaire pour créer une certaine rugosité pour l'ancrage des particules.
- Le nettoyage complémentaire au sablage pour éliminer les particules incluses par cette opération.
- Le préchauffage du substrat qui est une étape obligatoire dans certains cas avant la projection thermique.

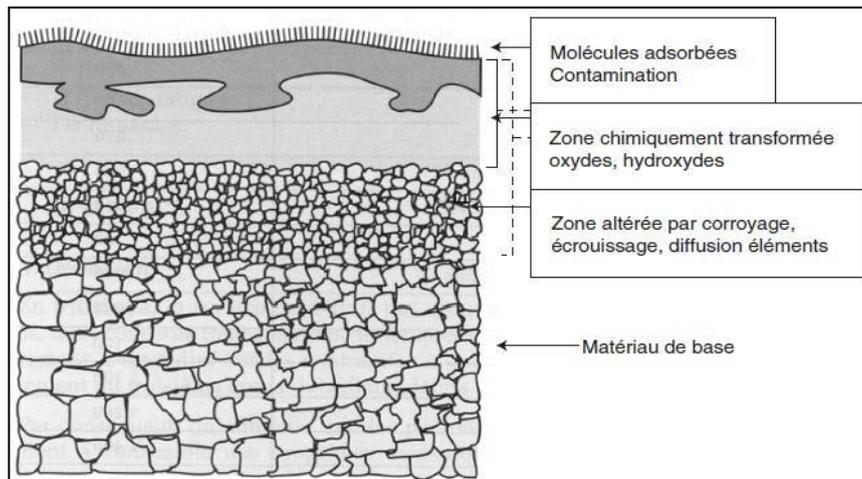


Figure 2.9 : Représentation schématique des zones affectées d'une surface. [25]

II.2.1 Les opérations de préparation de surface :

II.2.1.1 Nettoyage de la surface :

La surface du substrat doit être propre et exempte de toute matière contaminant (graisse, huile...) afin d'éviter les problèmes de détachement du revêtement [26]. Il s'agit alors d'une étape de dégraissage qui implique l'utilisation des dégraissants pouvant être des solvants (élimination des impuretés par dissolution), des produits alcalins (élimination des impuretés par saponification) ou des tensio-actifs (élimination des impuretés par émulsion) [27].

II.2.1.2 Sablage :

Après le nettoyage de la surface du substrat, il est nécessaire de procéder au sablage. D'une part, il permet de décaper la surface et d'éliminer le reste des contaminants. D'autre part, il crée une certaine rugosité à la surface et permet, par conséquent, aux particules fondues lors de la projection de venir s'ancrer dans ces irrégularités et réaliser ainsi un meilleur accrochage mécanique. En effet, les particules fondues suivent les contours des irrégularités, les serrent en se contractant à la solidification lors du refroidissement. [28] [29]

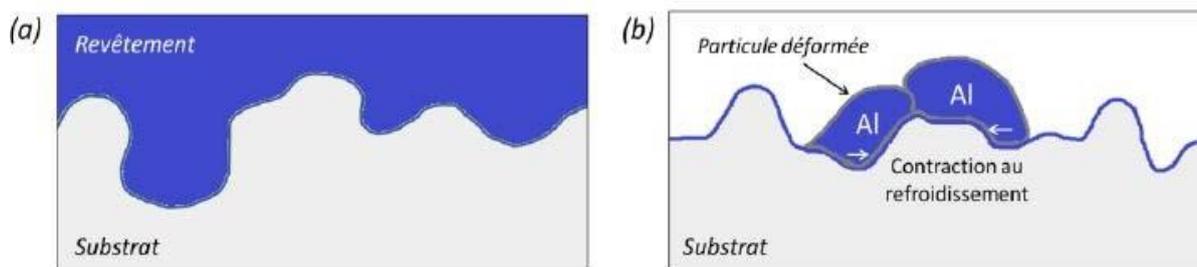


Figure 2.10: Représentation de l'accrochage mécanique : (a) Morphologie de la surface et (b) Ancrage des particules sur la surface. [28].

Chapitre II : Technique de projection thermique

L'opération de sablage s'effectue généralement en utilisant des particules d'abrasifs (alumine Al_2O_3 ou SiC , SiO_2). Ces dernières sont évacuées par l'air sous une pression définie et elles sont orientées vers le substrat. Sachant que plusieurs paramètres pouvant influencer la rugosité obtenue à savoir le diamètre des particules abrasives, la pression d'air et l'angle d'impact [29], ces paramètres doivent être optimisés afin de réussir cette opération.

Après le sablage, la surface doit être systématiquement nettoyée afin d'enlever les résidus de particules de sablage incrustées sur la surface et pouvant entraver l'adhérence.

Ainsi le sablage combiné au dégraissage permet, certes d'obtenir des surfaces propres présentant une topographie propice à l'adhérence des revêtements.

II.2.1.3 Préchauffage du substrat :

En projection thermique, des études antérieures montrent que la température du substrat représente l'un des facteurs les plus importants régissant les propriétés des revêtements pulvérisés. En effet, elle influe précisément la forme des particules écrasées qui deviennent circulaires et peu éclaboussées ce qui améliore la qualité du revêtement [30]. Ceci dépend essentiellement des propriétés thermiques des matériaux utilisés [31].

La conductivité thermique est notamment une propriété qui influe les phénomènes inter-faciaux. En effet, une bonne conductivité thermique augmente l'évacuation de l'énergie thermique sous forme de chaleur. L'augmentation de la température qui se produit à l'impact des particules est alors confinée à l'interface. Ce qui permet d'avoir plus d'interactions et de diffusion inter-faciale. Le préchauffage du substrat a été étudié et montré comme moyen d'amélioration des propriétés inter-faciales. Il permet de minimiser les phénomènes de trempage thermique et d'améliorer la mouillabilité du substrat [32].

Le préchauffage peut se faire alors à la flamme et appliqué à l'arrière du substrat afin d'éviter le risque de toute détérioration de surface et de contrôler facilement la température.

Il peut être aussi effectué à l'aide des résistances chauffantes. Toutefois, ces procédés ne peuvent pas être adaptés lorsqu'il s'agit d'une pièce épaisse ou constituée d'un matériau réfractaire. Donc, le préchauffage s'effectue le plus fréquemment à l'aide d'une torche de projection. Cette dernière sera censée faire des passes devant la surface du substrat permettant d'augmenter sa température sans projeter de la matière. Pour mieux contrôler et cibler la zone à traiter, le préchauffage par faisceaux lasers est une bonne technique pour le préchauffage

Chapitre II : Technique de projection thermique

grâce à leurs propriétés directives. En effet, il est possible d'obtenir différents états de surface en modifiant les caractéristiques du faisceau laser à savoir la forme, la durée, la fréquence, la longueur d'onde du rayonnement [33].

Il est même possible de produire une surface oxydée, par accumulation d'impacts laser, permettant d'améliorer l'adhérence des revêtements comme il a été montré dans plusieurs études [34].

II.3 Les matériaux de revêtement :

Le choix des matériaux de revêtements repose essentiellement sur l'application à laquelle ils sont destinés. Ce choix ne pourra être fait qu'après une étude détaillée de plusieurs paramètres à savoir la technique d'élaboration du revêtement ; la nature de la pièce à revêtir ; la nature du milieu environnant ; la nature, les dimensions, la composition et les différentes propriétés du matériau de revêtement [21].

Dans ce travail, nous nous intéressons à étudier cinq matériaux de revêtement différents destinés à être élaborés par la méthode de projection thermique et de peinture.

II.3.1 Céramiques (Composite Alumine (Al_2O_3) - Titane (TiO_2)) :

L'alumine (Al_2O_3) mélangée avec du titane (TiO_2) sont très largement utilisés comme matériaux de revêtement dans la projection plasma APS.

II.3.1.1 Composition chimique :

Ce composite céramique est essentiellement composé d' Al_2O_3 et de TiO_2 dont le pourcentage de titane peut être à : 3%, 13% et 40%. D'autres éléments peuvent être aussi présents dans cette composition à des pourcentages très faibles à savoir la silice (SiO_2), l'oxyde de fer (Fe_2O_3), l'oxyde de magnésium (MgO) et l'oxyde de calcium (CaO).

II.3.1.2 Propriétés :

Le composite Al_2O_3 - TiO_2 est un matériau intéressant permettant d'obtenir de bonnes propriétés physiques et mécaniques. Le titane est un matériau qui possède une meilleure résistance à l'usure, à la rupture et une meilleure dureté par rapport à l'alumine ; il peut être facilement pulvérisé thermiquement en raison de son point de fusion relativement bas, égal à 1855°C . Les revêtements à base d'alumine ou d'oxyde de titane sont assez poreux, une caractéristique qui peut être utile dans les environnements de travail difficiles [35].

Chapitre II : Technique de projection thermique

II.3.1.3 Domaines d'application :

Les revêtements à base d'alumine-oxyde de titane obtenus par des procédés de projection plasma sont en cours de développement pour une grande variété d'applications nécessitant la résistance à l'usure, à l'érosion et à la fissuration [36]. Ce type de revêtement est très utilisé dans le domaine d'isolation thermique, dans l'industrie nucléaire et aussi dans les prothèses et les implants dentaires.

II.3.2 Métalliques :

II.3.2.1 Alliage de Nickel (NiCrBSi) :

Le NiCrBSi est un alliage très largement utilisé comme matériau de revêtement élaboré par différentes techniques de la projection thermique.

II.3.2.2 Composition chimique :

L'alliage de NiCrBSi est un matériau très utilisé en projection thermique. Ce tableau présente quelques compositions chimiques adaptées par des études antérieures pour l'élaboration des revêtements fonctionnels en NiCrBSi.

Réf	Eléments	Cr	Fe	Si	B	C	Ni	O
[80]	(%)	14,80	3,70	4,28	3,21	0,73	reste	-
[81]	(%)	15	4	4,25	3	0,70	reste	-
[82]	(%)	12	4	4	2,70	0,60	reste	-
[83]	(%)	16,20	5,31	4,50	2,97	0,63	reste	-
[84]	(%)	15,16	3,87	4,65	3,19	0,76	reste	0,043

Tableau 2.2 : Compositions chimiques de l'alliage NiCrBSi.

II.3.2.3 Propriétés :

Le NiCrBSi est un alliage caractérisé essentiellement par ses propriétés auto-fondantes. La présence du Bore 'B' abaisse la température de fusion et contribue à la formation des phases dures, le Silicium 'Si' augmente les propriétés auto-fondantes. Le Chrome 'Cr' est responsable de la résistance à l'oxydation et à la corrosion du matériau à des températures élevées, dans les milieux alcalins particulièrement. Le carbone favorise la création des carbures qui permettent d'augmenter la dureté et la résistance à l'usure du revêtement [37] [38].

II.3.2.4 Domaines d'application :

Les alliages à base de nickel ont une combinaison unique de propriétés qui leur permet d'être utilisés dans différents domaines d'applications, utilisés seuls ou en combinaison avec d'autres particules.

Les alliages NiCrBSi sont largement utilisés dans les applications où une résistance à l'usure combinée à une résistance à l'oxydation ou à la corrosion est requise. Particulièrement, ils sont largement utilisés en revêtements pour améliorer la qualité des surfaces soumises à des conditions tribologiques sévères à savoir les turbines, les chaudières, les échangeurs de chaleur, les extrudeuses, les machines agricoles [39].

II.3.3 Acier inox (316L) :

L'acier inoxydable (316L) possède d'excellentes propriétés telles que la résistance chimique très élevée, la bonne ductilité et des caractéristiques mécaniques élevées.

II.3.3.1 Composition chimique :

La composition chimique de l'acier inoxydable 316 L est présentée dans ce tableau.

Eléments (%)	C	Cr	Fe	Mo	Mn	N	Ni	P	S	Si
Minimum	-	16,5	Reste	2,0	-	-	10,0	-	-	-
Maximum	-	18,5	-	2,5	2,0	0,11	13,0	0,045	0,030	1,0

Tableau 2.3 : Composition chimique de l'acier inoxydable 316 L. [39]

II.3.3.2 Propriétés :

L'acier inoxydable 316 L est un acier inoxydable austénitique dont la phase austénitique est stabilisée par du nickel. Cette phase, qui possède une faible teneur en carbone, est particulièrement très résistante à la corrosion inter-granulaire. La structure austénitique confère également une excellente ténacité, même aux températures cryogéniques. Comparé aux aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel, l'acier inoxydable 316L offre un fluage, une contrainte à la rupture et une résistance à la traction plus élevées à hautes températures. Les propriétés mécaniques et thermiques de l'acier inoxydable 316 L sont résumées dans le tableau suivant.

Acier Inoxydable	316 L
Structure	Austénitique
Masse volumique (kg.m ⁻³)	8000
Module de Young (N/mm ²)	193x 103
Résistance à la traction (N/mm ²) au minimum	650
Limite d'élasticité minimale 0,2%, (N / mm ²)	300
Dureté (HBN)	270 max
Conductivité thermique 20°C (W.m ⁻¹ . °K ⁻¹)	16.3
Coefficient moyen de dilatation thermique, 20-100°C(°K ⁻¹)	15,9 x 10 ⁻⁶
Résistance électrique, 20°C (μ.Oh.m)	0,74

Tableau 2.4 : Propriétés mécaniques et thermiques de l'acier inoxydable 316 L. [39]

II.3.3.3 Domaines d'application :

Les aciers inoxydables 316 L sont souvent appelés (inox chirurgical) et (inox marine). Leurs excellentes propriétés mécaniques et chimiques les rendent très appréciés dans différents domaines d'application comme les industries chimiques, pharmaceutiques, pétrolières, agroalimentaires (cuves...), mobilier urbain et aussi intensément en milieu nautique.

Les aciers inoxydables 316 L sont également très populaires comme matériaux de revêtements protecteurs obtenus par différentes techniques ou même comme substrats sur lesquels d'autres types de revêtements peuvent s'élaborer [39]

CHAPITRE III :
L'adhérence des revêtements
et les méthodes d'essais

Chapitre III : L'adhérence des revêtements et les méthodes d'essais

III Introduction :

Les couches minces sont des couches de matière de très faible épaisseur, typiquement inférieure de vingt à dix microns, déposées à la surface d'un matériau appelé substrat. Elles peuvent être utilisées à plusieurs fins, comme, par exemple, la protection d'un objet contre les agressions chimiques (corrosion) ou mécaniques (frottement, usure, ...), ou pour créer des surfaces ayant des caractéristiques spécifiques (hydrophile, biocompatibilité, conductivité électrique, ...) : on parle alors de fonctionnalisation de surface. Parmi les très nombreux exemples de réalisation industrielle, il est courant de citer le verre ophtalmique, revêtu de nombreuses couches minces pour les traitements anti rayure, antireflet et antichoc. De nouveaux champs d'application ont récemment vu le jour, notamment dans l'industrie de la microélectronique, très demandeuse en couches ultra-minces (à l'échelle nanométrique) dotées de propriétés conductrices, isolantes ou protectrices, servant à la fabrication des microprocesseurs. Les couches minces connaissent également une forte expansion dans le domaine du biomédical, avec l'utilisation de couches très dures de type diamant pour le revêtement des prothèses de hanche, ou de couches polymères chargées de principes actifs pour les sens à élution médicamenteuse.

Les propriétés mécaniques d'un matériau sont déterminées par un ensemble de grandeurs, telles que le module de Young ou la limite d'élasticité, qui caractérisent sa résistance à une déformation imposée. Elles permettent d'orienter le choix d'un matériau pour une application visée, au même titre que les propriétés physico-chimiques, optiques ou électriques. Il n'existe pas de loi de comportement universelle pour les matériaux, et si des modèles existent, ils ne s'appliquent qu'à des matériaux parfaits ou à des cas particuliers. Les propriétés d'un corps solide dépendent, à la fois, de sa composition élémentaire (atomes, molécules) et de sa microstructure (organisation interne). Le plus souvent, les grandeurs mesurées évoluent également en fonction de l'essai mécanique mis en œuvre et de l'échelle à laquelle s'applique cet essai. La caractérisation mécanique d'un matériau est encore plus difficile lorsque celui-ci se présente sous la forme d'une couche mince : il faut alors avoir recours à des moyens de mesure spécifiques qui, bien souvent, ne génèrent pas une sollicitation mécanique simple de la matière, comme le font les essais de traction ou de compression pour les matériaux à l'état massif.

Chapitre III : L'adhérence des revêtements et les méthodes d'essais

L'adhérence caractérise la résistance à la séparation de deux corps et se mesure également par des essais mécaniques. Elle découle des forces d'interactions à l'interface des deux matériaux, regroupées sous le terme d'adhésion. Si cette propriété est, bien sûr, l'une des principales préoccupations des fabricants d'adhésifs ou de colles, on comprendra qu'elle est également particulièrement importante dans le domaine des couches minces. Une couche mince peu adhérente est susceptible de se détacher de son substrat et de provoquer l'avarie du système qu'elle compose. Contrairement aux essais permettant une mesure des propriétés mécaniques intrinsèques, les essais d'adhérence applicables aux couches minces sont extrêmement variés. Le choix d'un essai d'adhérence dépend des matériaux mis en jeu, de l'épaisseur du revêtement et, bien souvent, de l'utilisation future de l'assemblage qui détermine la nature des contraintes auxquelles l'interface sera soumise. La plupart des essais d'adhérence appliqués aux couches minces sont complexes à mettre en œuvre et à interpréter, les seuls essais mécaniquement simples, n'étant réalisables qu'à l'échelle macroscopique.

Peu d'essais courants de caractérisation de l'adhérence sont spécifiques aux produits revêtus de couches minces ($< 20 \mu\text{m}$). La grande majorité des techniques s'appliquant aux revêtements minces dérive de celles utilisées pour tester l'adhérence des adhésifs dans les joints collés ou des revêtements épais ($> 100 \mu\text{m}$), ou bien pour détecter des défauts microstructuraux (microfissures ou porosités au niveau des jonctions soudées). Toutefois, la faible quantité de matière que constitue le revêtement par rapport au substrat et les fortes adhérences, obtenues grâce à de nouveaux procédés de dépôt, limitent le nombre de techniques permettant d'imposer une sollicitation mécanique à l'interface. Ou alors il est nécessaire d'ajouter une interface supplémentaire consistant en un joint de colle dont la résistance mécanique constituera un facteur limitant du test. Les progrès accomplis dans l'instrumentation permettent de détecter des défauts de plus en plus petits, comparables à ceux rencontrés aux interfaces couche-substrat, et laissent présager un emploi croissant de techniques de contrôle non destructif (CND), bien que leur utilisation soit confidentielle pour l'instant. Après avoir défini les termes adhésion et adhérence, nous présenterons les différentes techniques de test d'adhérence qui nous paraissent les plus représentatives et les mieux adaptées aux structures du type revêtement-substrat afin de compléter ou de réactualiser certains travaux antérieurs qui constituent, par ailleurs, une source d'informations complémentaires [40–41].

III.1 L'adhésion et l'adhérence :

Le physicien francophone attribue aux termes adhésion et adhérence des significations très différentes, alors qu'ils sont synonymes dans le langage courant. Cette nuance sémantique est maintenant reconnue et intégrée par les spécialistes anglo-saxons [42]. L'adhésion se manifeste principalement sous deux formes :

- **L'adhésion thermodynamique :**

Il s'agit de l'énergie libre, résultant du bilan énergétique proposé par Dupré, caractérisant la formation ou la séparation d'une interface entre deux corps 1 et 2.

- **L'adhérence :**

C'est la force, la contrainte ou le travail nécessaires pour créer la décohesion entre le revêtement et le substrat (ou plus généralement entre les corps 1 et 2). La grandeur mesurée caractérise un mécanisme irréversible de destruction de la jonction. Cette grandeur, nommée adhérence, est fonction de facteurs dissipatifs autres que l'adhésion, tels que les déformations du revêtement et du substrat, le frottement, etc., dont la méconnaissance rend difficile la détermination de la valeur exacte de l'adhésion à partir de cette adhérence. Dans le cas d'adhésifs polymères où l'adhésion est faible et où il est possible de minimiser les facteurs dissipatifs, en supposant que l'expérience de décohesion est bien décrite par les modèles de mécanique linéaire de la rupture (déformation axisymétrique ou plane, phénomènes dissipatifs confinés en tête de fissure, géométrie simple), les travaux de A.N. Gent [43], J. Schultz [44] et E.H. Andrews [45] ainsi que D. Mauges et M. Barquins [46] montrent que l'adhérence est caractérisée par le taux de restitution de l'énergie élastique (G), lequel est proportionnel à la valeur exacte de l'adhésion selon la relation :

$$G = W_{12} f(v, T) \quad \text{III.1}$$

Avec, v : la vitesse de propagation de la fissure. T : la température.

Ces conditions expérimentales lors du test d'adhérence ne peuvent être obtenues pour toutes les configurations revêtement substrat. Elles nécessitent par ailleurs des mesures très fines étant donné que le rapport W_{12}/G est bien souvent inférieur au pourcent. De plus, le test d'adhérence génère rarement la propagation d'une fissure à l'interface de la couche et du substrat (rupture adhésive). Expérimentalement, on trouve souvent une échelle mettant en évidence la propagation de cette fissure en partie dans l'un ou l'autre des matériaux (rupture cohésive) ou bien dans une zone de transition, dite interphase, qu'il reste à définir.

III.2 Adhérence d'une interface :

L'adhésion est une notion microscopique définie comme l'ensemble des liaisons physico-chimiques pouvant s'exercer à l'interface entre deux corps en contact. Plusieurs mécanismes interviennent sur l'adhésion tels que: la diffusion, les réactions chimiques, les forces électrostatiques, l'accrochage mécanique, etc....

L'adhérence est une notion macroscopique complexe liée aux énergies de rupture faisant intervenir l'énergie d'adhésion mais aussi tous les phénomènes accompagnant la propagation d'une fissure. Elle peut être déterminée grâce à des essais mécaniques cherchant à séparer les deux matériaux. Ces deux notions, n'ont pu être définies correctement qu'au début du XXème siècle, suite aux problèmes de collage des structures en bois dans l'aéronautique [42]. Les premiers travaux ont porté principalement sur les interfaces liquide/solide dans le cadre des problèmes de mouillages dont Young et Laplace (1805) ont donné les premières théories. Par la suite, au cours du XXème siècle, différentes études expliquent la différence observée entre la valeur théorique issue des calculs de mouillabilité et les valeurs expérimentales. Ces théories bâtissent petit à petit la description actuelle de l'interface en lui ajoutant différents éléments, comme l'ancrage mécanique et l'adhésion électrostatique [47].

Différentes méthodes existent pour déterminer la ténacité ou bien l'état d'adhérence d'une interface. Du fait de la complexité de certaines mesures, il est nécessaire de suivre à la lettre des normes pour arriver à des résultats reproductibles et quantifiables. D'autres méthodes sont employées de façon qualitative dans l'industrie dans le but de réaliser des tests rapides [48].

III.2.1 Tests d'adhérence :

III.2.1.1 Tests purement mécanique :

III.2.1.1.1 Test de flexion à 4 points :

L'éprouvette se présente sous la forme d'un substrat parallélépipédique de hauteur e_s , de largeur b , de module d'Young E_s et de coefficient de Poisson ν_s . Elle est revêtue sur une face par une couche uniforme d'épaisseur e_r , de module d'Young E_r et de coefficient de Poisson ν_r . En appui sur deux plots distants de L , l'échantillon est chargé à ses extrémités à une distance l des plots centraux comme l'indique la figure III.1. Sous l'effet de la force F , les films fragiles se fissurent et si l'énergie de rupture inter facial, sensiblement égale à l'énergie élastique restituée (G_i), est inférieure au quart environ de celle du substrat en Mode I (G_s) [49], la fissure se propage à l'interface du substrat et du revêtement et s'étend sur une longueur $2a_f$. P.G. Charalambides et coll. ainsi que H.C. Cao et A.G. Evans ont montré que dans certaines conditions de déformation élastique des matériaux, l'énergie restituée, équivalente à l'énergie de rupture par unité d'aire, s'écrit [50, 51] :

$$G_i = (1/I_s - \lambda/I_c) M^2(1 - \nu_s^2)/(2bE_s) = [E_s / (1 - \nu_s^2)] / [E_r / (1 - \nu_r^2)] \quad \text{III.2}$$

M le moment soit $M = Fl/2$ et I_s et I_c les moments d'inertie tels que $I_s = be_s^3/12$ et I_c une fonction de b , e_s , e_r et λ . Ces auteurs décrivent précisément les conditions expérimentales à satisfaire pour appliquer ces relations et proposent des fonctions de corrélation ajustables selon ces conditions. Cependant, il est parfois difficile de dissocier la contribution de l'interface de l'expression globale de G_i . La formation de la ou des fissures peut être détectée grâce à l'emploi d'un capteur d'émission acoustique [52]. Cette technique permet aussi de déterminer la ténacité du revêtement fissuré.

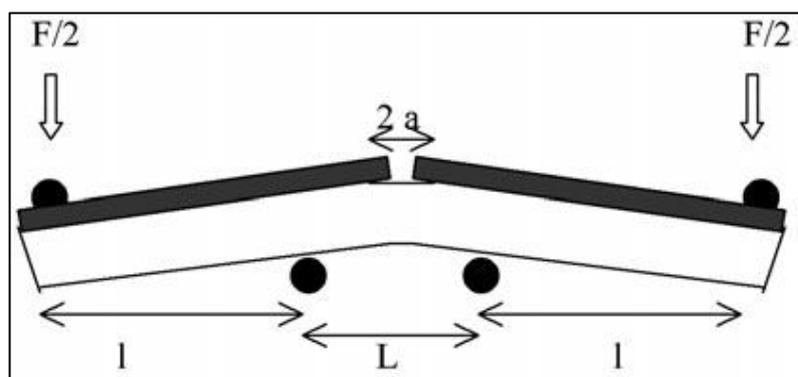


Figure 3.1 : Test de flexion 4 points.

III.2.1.1.2 Essai de gonflement :

S'agissant d'un substrat revêtu, la principale difficulté de cette technique réside dans la nécessité de réaliser un enlèvement de matière sélectif, de manière à ouvrir une fenêtre dans le substrat afin de conserver le revêtement d'épaisseur e_r sous la forme d'une membrane. Cette membrane est alors soumise côté substrat à la pression P d'un fluide généralement gazeux. Sa déformation caractérisée par la hauteur δ de la flèche est le plus souvent déterminée par une méthode d'interférométrie optique [53]. L'enregistrement de la variation de la pression en fonction de δ conduit à une courbe de la forme de celle présentée figure III.2. On distingue deux régimes particuliers : Le premier correspond aux faibles valeurs de la flèche. Si la déformation de la membrane est élastique, avec c_1 et c_2 des coefficients géométriques et f_a le rayon de la membrane dans sa partie autoporteeuse, la fonction $P(\delta)$ s'écrit alors :

$$P = [\sigma_0 e_r c_1] \delta / f_a^2 + [e_r c_2 E_r / (1-\nu_r)] \delta^3 / f_a^4 = k_1 \delta / f_a^2 + k_2 \delta^3 / f_a^4$$

Il est possible d'en déduire les contraintes internes bi axiales, σ_0 , et le bi module, $E_r/(1-\nu_r)$ du revêtement. Une analyse plus poussée permet de considérer des caractéristiques anisotropes des matériaux et des géométries à symétrie non radiale des membranes [53, 54].

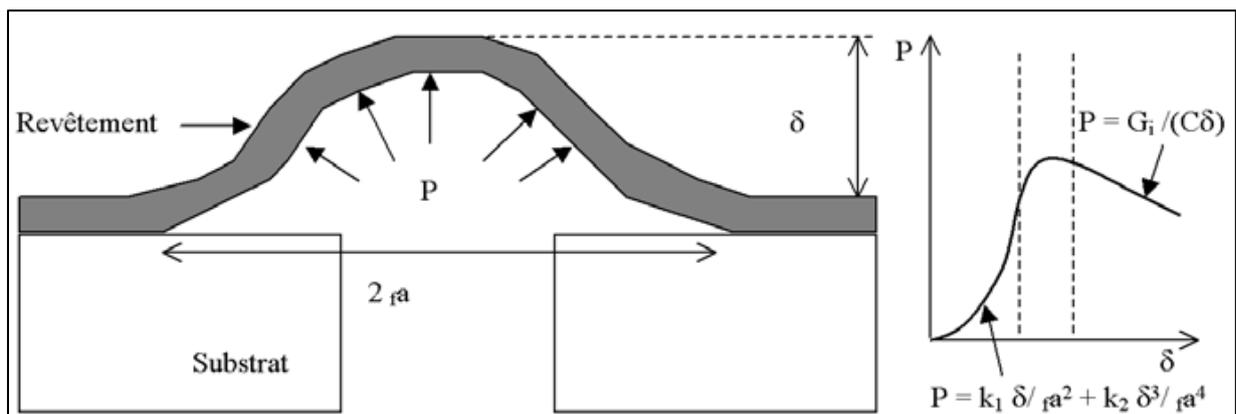


Figure 3.2 : Test de gonflement.

III.2.1.1.3 Essai d'indentation :

On distingue deux types d'essai d'indentation.

a) L'indentation sur l'interface :

L'indentation interfaciale permet de déterminer localement l'adhérence d'un revêtement. Ce procédé de caractérisation est simple à mettre en œuvre puisqu'il ne nécessite qu'un

Chapitre III : L'adhérence des revêtements et les méthodes d'essais

appareillage d'indentation. En effet le but de l'essai d'indentation interfaciale est de provoquer la décohésion du dépôt du substrat par la création d'une fissure à l'interface. Un indenteur est appliquée au niveau de l'interface et soumis à une charge de plus en plus importante. A partir d'une charge, dite charge critique, une fissure s'amorce à l'interface et c'est en mesurant la longueur de cette fissure et en prenant en compte la force appliquée sur l'indenteur qu'il est possible de déterminer l'adhérence. Ce procédé permet de limiter le nombre de revêtement à élaborer car il permet de réaliser de nombreux tests d'adhérence sur un seul échantillon. [55]

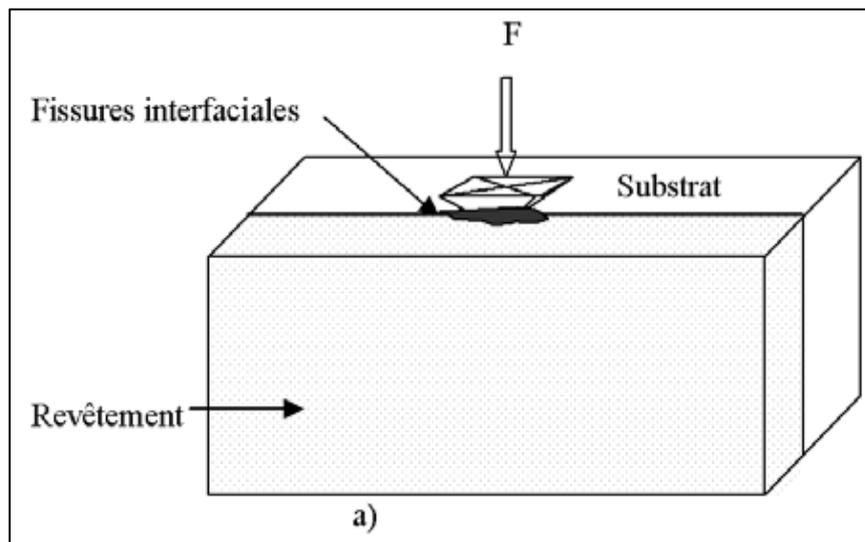


Figure 3.3 : Test d'indentation sur l'interface. [55]

b) L'indentation normale :

Pour les films minces ($< 2 \mu\text{m}$) des informations sur le module d'Young et la dureté de l'interface peuvent être recueillies en réalisant des nano indentations normales à cette interface. En mode de fonctionnement classique (charge-décharge), des indentations successives réalisées à différentes profondeurs h permettent de tracer un profil discret de dureté $H(h)$ et de module d'Young $E(h)$ en fonction de cette profondeur. A partir de la nano indentation en mode dynamique, où au mode de fonctionnement classique est superposé durant la charge de l'indenteur une oscillation de très faible amplitude ($\sim 1 \text{ nm}$) [56], les profils $E(h)$ et $H(h)$ sont directement obtenus sous une forme quasi-continue. Les grandeurs déterminées intègrent une information sur tout le volume déformé. La détermination précise du module d'Young et de la dureté de la zone inter faciale dépend du modèle utilisé pour analyser le comportement mécanique et pondérer la contribution au résultat final des différentes régions déformées (film

Chapitre III : L'adhérence des revêtements et les méthodes d'essais

- interface - substrat) [57]. Une qualification directe de l'interface est encore difficilement envisageable mais elle permet une analyse comparative entre différents échantillons où le module d'élasticité ou bien la dureté varie dans la région inter faciale sur une épaisseur conséquente (zone d'interphase). Des résultats plus quantitatifs peuvent être obtenus par l'apport de la simulation numérique et la prise en compte de gradients de propriétés mécaniques dans la structure indentée.

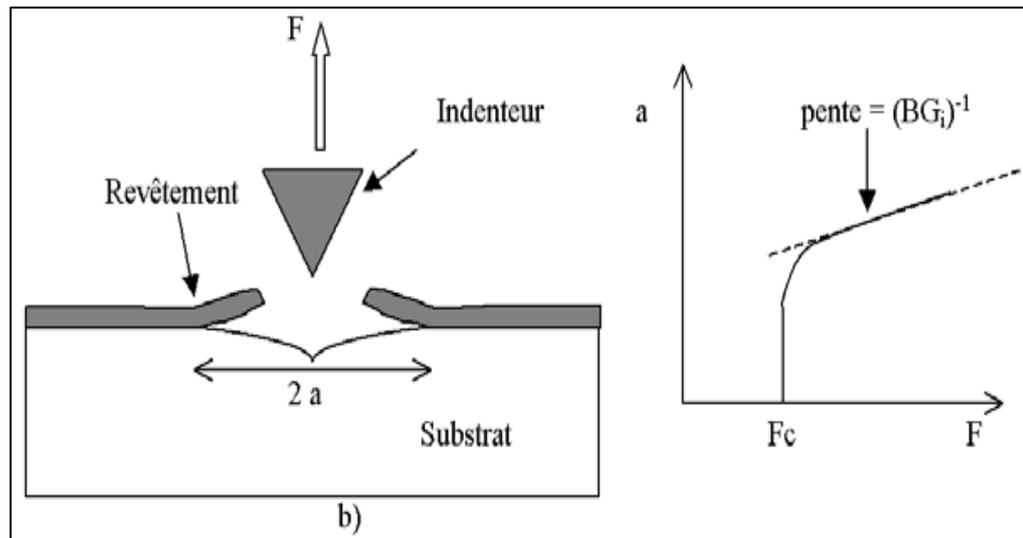


Figure 3.4: Test d'indentation normale.

III.2.1.1.4 Le scratch test :

Le scratch test est un essai de rayage dont la finalité est de créer un endommagement de la structure sollicitée. L'endommagement recherché à des fins de détermination de l'adhérence des revêtements (structure stratifiée constituée d'une ou plusieurs couches) sur leurs substrats, est une décohésion de l'interface. Les grandeurs mesurées au moment de la fissuration inter faciale sont le plus souvent la force normale, F_{nc} , la force tangentielle, F_{tc} , la distance parcourue par l'indenteur, l_c , qui permet de déterminer le travail fourni par la force tangentielle, W_{tc} , ainsi que les grandeurs associées au profil de la rayure, comme la demi-largeur du contact, a_c . L'installation commerciale dont nous disposons dans l'équipe L.P.M.I. est munie d'un capteur d'émission acoustique, AE, afin de déterminer plus précisément la force normale critique, dans l'hypothèse où l'endommagement inter facial génère durant le rayage une émission acoustique spécifique. Il convient en premier lieu d'identifier les mécanismes d'endommagements générés par la pointe. On distingue ceux associés uniquement à la fissuration du film ou du substrat, de ceux à l'origine de la décohésion inter faciale.

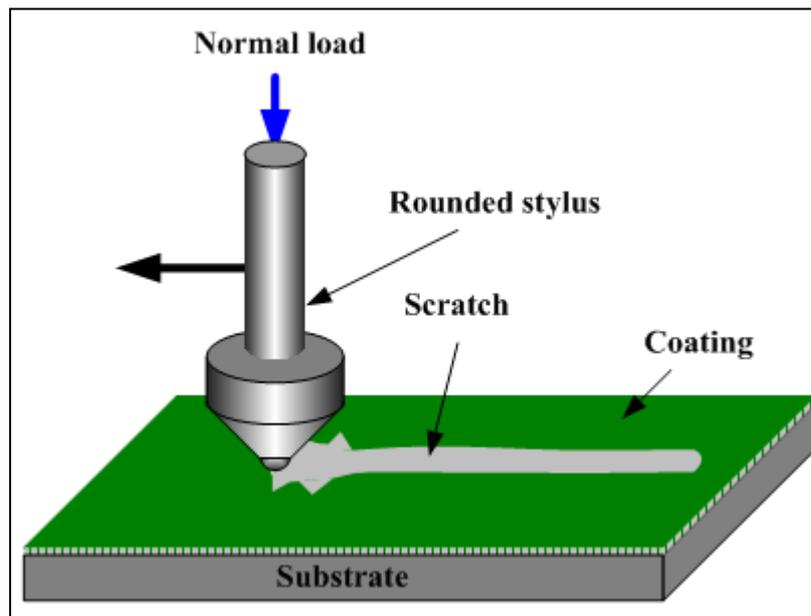


Figure 3.5: le scratch test.

III.2.1.1.5 Test de pelage:

Le test de pelage se définit par la mesure d'une force P . Cette force, une fois divisée par la largeur b du ruban, est nommée force de pelage.

Ce test est effectué en appliquant un morceau de ruban sur un panneau de test. Ce ruban est ensuite retiré sous un certain angle, nommé angle de pelage. Les panneaux de test peuvent être réalisés dans différents matériaux comme du verre, de l'acier (haute énergie de surface), du HDPE (faible énergie de surface) ou le matériau utilisé dans l'application réelle. On note θ l'angle de pelage, et b la largeur de l'adhésif.

Trois situations de pelage sont fréquemment utilisées :

- Pour un angle θ faible, on décolle le ruban de façon particulièrement tendue (force élevée)
- Pour $\theta=90^\circ$, on réalise une traction perpendiculaire (force modérée).
- Pour $\theta=180^\circ$, on réalise un essai de traction en retournant l'adhésif. Généralement, la force est moindre dans ce cas (décollage plus facile). [58]

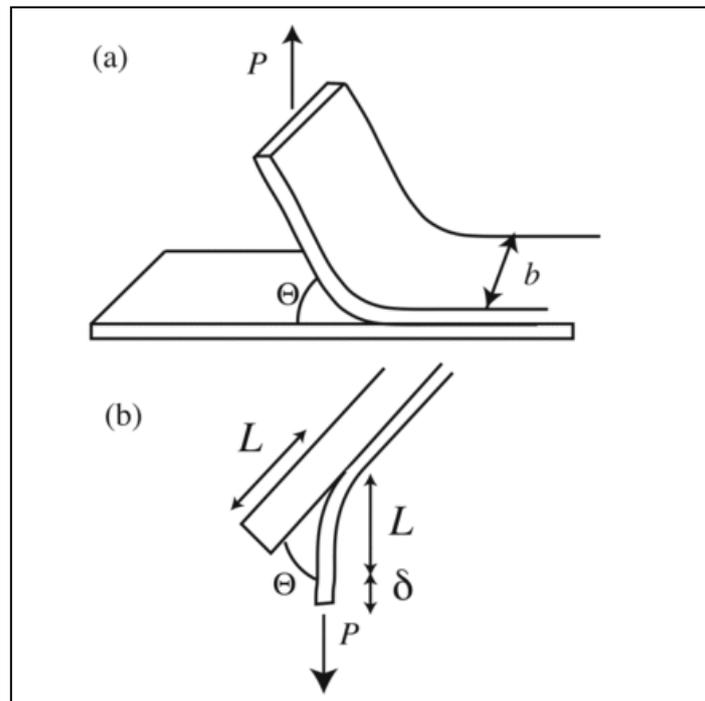


Figure 3.6 : Test de pelage. [58]

III.2.1.2. Tests non-mécanique:

III.2.1.2.1 Essai de choc au laser :

L'interface entre un revêtement mince ($< 10 \mu\text{m}$) et son substrat est soumise ici à une contrainte de tension, sans contact mécanique, en générant une onde de choc sous l'effet de l'irradiation par un faisceau laser pulsé dirigé perpendiculairement à cette interface [59]. En effet, pour des densités de puissance supérieures à $0,1 \text{ GW/cm}^2$, l'interaction du faisceau laser avec la face arrière du substrat crée un plasma très dense, qui se détend dès que l'excitation cesse entre deux impulsions. Cette détente génère dans l'échantillon une onde de choc tout d'abord compressive et dirigée du substrat vers la couche, puis de tension et dirigée en sens inverse, après réflexion d'une partie de l'onde de choc sur la surface libre du revêtement. D'importantes vitesses de déformation sont ainsi obtenues ($d\varepsilon/dt \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$). La difficulté de cette technique réside notamment dans l'évaluation de la contrainte critique, σ_c , responsable de la rupture interfaciale [60]. C'est pourquoi l'adhérence est parfois exprimée au moyen de la fluence de l'impulsion laser responsable de cette décohésion. Mais on détermine maintenant σ_c et G_i [61] avec une plus grande précision, en associant aux modèles de propagation des ondes de choc dans la structure, des mesures interférométriques de vitesse de déplacement des surfaces libres sous l'effet des ondes de choc.

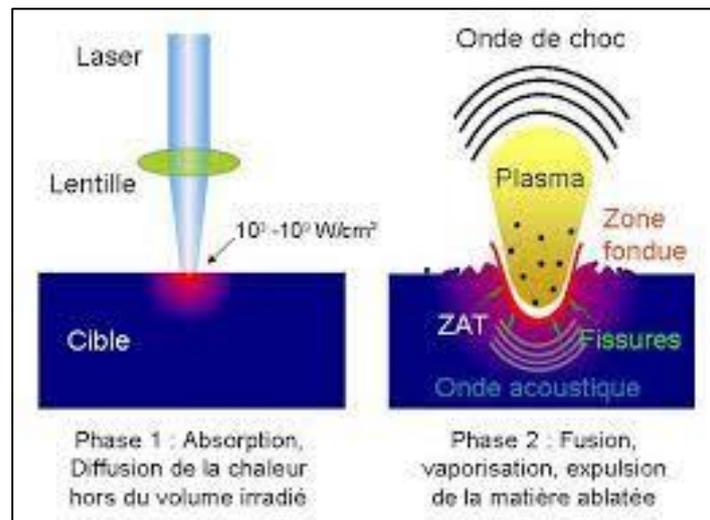


Figure 3.7 : Essai de choc au laser.

III.2.1.2.2 Essai d'émission acoustique :

L'Émission Acoustique (EA) est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à une sollicitation.

La détection et l'analyse des signaux permettent d'obtenir des informations inédites sur les anomalies du champ de contraintes, liées par exemple à la présence de défauts. La détection est réalisée par un capteur piézoélectrique avec une fréquence de 50 kHz à 1 MHz (généralement 50 à 500 kHz).

L'émission acoustique diffère des techniques usuelles de contrôle non destructif pour plusieurs raisons :

- Le matériau génère lui-même le signal à analyser. Les caractéristiques mécaniques et métallurgiques du matériau ont une importance prépondérante ;
- Un signal d'EA ne peut être obtenu que si la structure est sollicitée ; seuls les défauts actifs peuvent être détectés ;
- L'EA peut révéler la présence d'un défaut, voire donner sa position et parfois, si les données de référence sont suffisantes, graduer sa nocivité mais en aucun cas, l'EA ne vise à décrire la géométrie du défaut (profondeur, largeur, longueur, forme...) ;
- Une structure de grande dimension est contrôlable par l'EA en une seule opération au moyen d'un nombre limité de capteurs ; il n'est pas nécessaire que les zones critiques à contrôler soient accessibles directement ;

Chapitre III : L'adhérence des revêtements et les méthodes d'essais

- L'EA n'est pas simplement une technique de contrôle non destructif. Fondamentalement, il s'agit d'une technique de surveillance, puisque l'émission d'ondes de contrainte est étroitement associée aux mécanismes physiques qui accompagnent l'initiation et la propagation des défauts. [62]

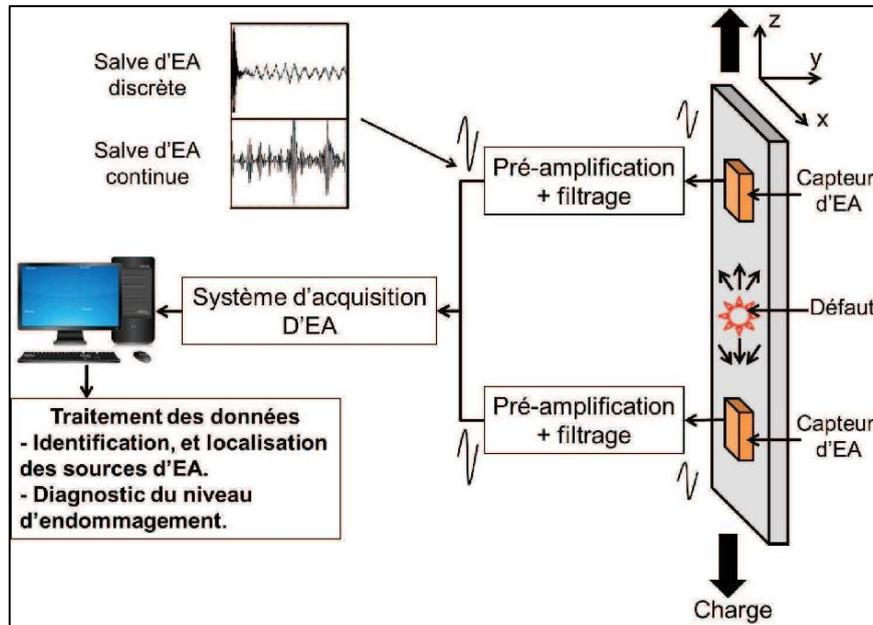


Figure 3.8 : Essai de l'émission acoustique.

CHAPITRE IV :
Analyse numérique
de l'endommagement de la structure
film/substrat

Chapitre IV : Analyse numérique de l'endommagement de la structure film/substrat

IV. Introduction :

Plusieurs domaines d'application relatifs aux films minces et à leur capacité d'adhérence film/substrat suscitent un grand intérêt ; cependant, le décollement peut se produire pour diverses raisons telles que les contraintes résiduelles dues à la différence de coefficient de dilatation du couple film/substrat. Dans le test de pelage classique, l'énergie dissipée par des mécanismes autres que celle de la séparation doit être prise en compte pour déterminer les propriétés intrinsèques de l'interface où la mixité des modes locaux de rupture est évaluée sur la base de résultats numérique.

Dans notre étude, la méthode des éléments finis (FEM) est utilisée pour étudier le comportement de pelage d'un film élastoplastique sur un substrat élastique en déterminant la variation des contraintes équivalentes et la déformation plastique au point de contact film/substrat. La région plastiquement déformée du pelage a été estimée pour quantifier la contribution d'énergie dissipée dans la zone de point de contact. L'épaisseur du film, son angle de pelage, ses propriétés mécaniques, et ainsi que l'estimation de la taille de la zone plastique ont également été mis en évidence en fonction d'angle de pelage et l'épaisseur de film pour différents nuance d'alliage aluminium.

IV.1 Modèle géométrique et numérique :

Un modèle géométrique 3D est élaboré à l'aide du code SolidWorks. Le composite est constitué de deux matériaux différents entièrement liés : le substrat en alumine et le film en alliage aluminium, caractérisés par leurs propriétés mécaniques dans le Tableau 4.2. Les dimensions de la structure sont mentionnées dans le modèle géométrique montré dans le Tableau 4.1. L'épaisseur et la rigidité du substrat sont généralement beaucoup plus grandes que celles du film. Le film est soumis à une charge de traction en déplacement imposé et la base du substrat est fixée.

Le substrat (céramique) très rigide est considéré comme un comportement élastique linéaire et le film (aluminium) présente un comportement élastoplastique dont la partie plastique obéit à une loi puissance $\sigma = \sigma_y (\varepsilon/\varepsilon_y)^m$.

Chapitre IV : Analyse numérique de l'endommagement de la structure film/substrat

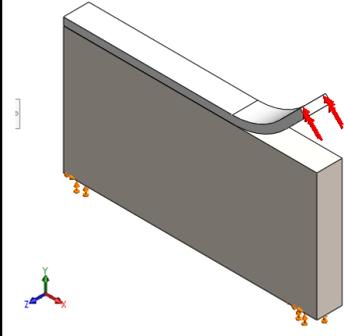
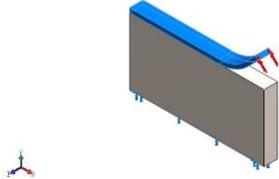
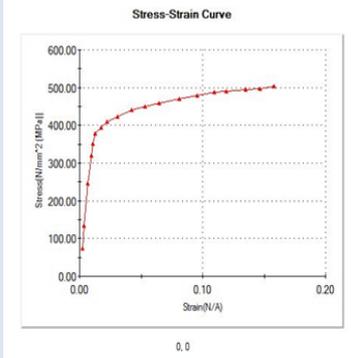
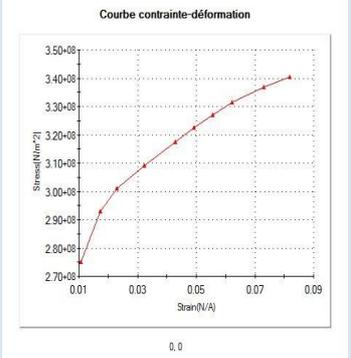
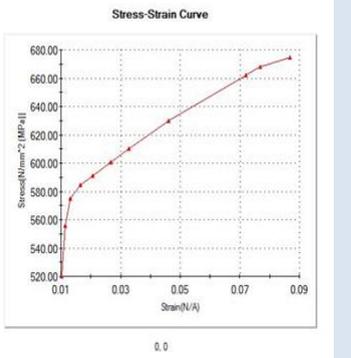
Fixture name	Fixture Image	Fixture Details				
Fixed-1		<table border="1"> <tr> <td>Entities:</td> <td>1 face(s)</td> </tr> <tr> <td>Type:</td> <td>Fixed Geometry</td> </tr> </table>	Entities:	1 face(s)	Type:	Fixed Geometry
Entities:	1 face(s)					
Type:	Fixed Geometry					
Resultant Forces						
Components	X	Y	Z	Resultant		
Reaction force(N)	4.24264	-4.24263	5.58794e-09	5.99999		
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0		

Tableau 4.1: Modèle géométrique.

Model Reference	Properties				
	Matériau	E (GPa)	ν	σ_e [MPa]	σ_{UTS} [MPa]
	AL2024	74.08	0,33	363	477
	AL6061	69.04	0.33	252	360
	AL7075	71.70	0.33	520	570

Stress-Strain Curve	Courbe contrainte-déformation	Stress-Strain Curve
		
AL 2024	AL 6061	AL 7075

Courbe contrainte-déformation

Chapitre IV : Analyse numérique de l'endommagement de la structure film/substrat

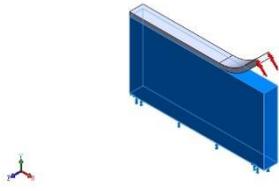
	Name:	Alumina (Substrate)
	Model type:	Linear Elastic Isotropic
	Tensile strength:	3e+08 N/m²
	Elastic modulus:	3.7e+11 N/m²
	Poisson's ratio:	0.22

Tableau 4.2: Propriétés mécanique des matériaux.

IV.2 Maillage du modèle :

La figure 4.1 montre la discrétisation du modèle avec un maillage raffiné pour assurer une précision numérique et un maillage progressivement grossier en s'éloignant de la région de contact. Le composite film/substrat est modélisé à l'aide de 8178 éléments (Tableau 4.3 information sur maillage).

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Maximum element size	3.75752 mm
Minimum element size	3.75752 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts independently	Off
Total Nodes	13556
Total Elements	8178

Tableau 4.3: Informations sur maillage.

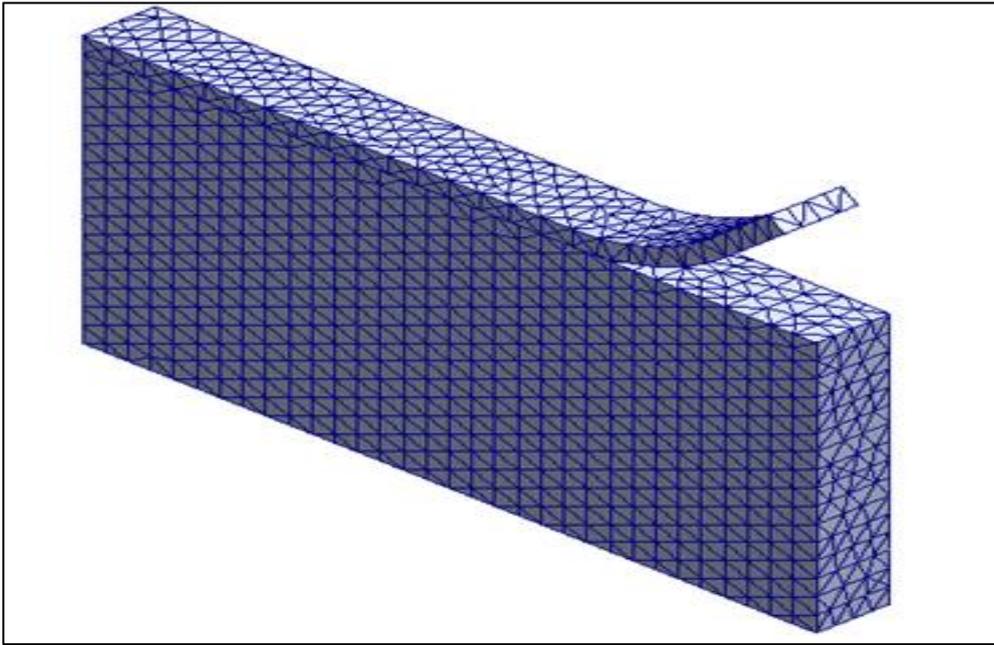


Figure 4.1: Maillage typique du modèle film/substrat.

IV.3 Effet d'angle :

En maintenant une épaisseur constante $h = 3 \text{ mm}$, l'angle sera varié de 30° à 90° avec un pas de 15° .

On remarque dans la figure 4.2 que la contrainte maximale de von Mises se situe dans la racine du bras suite à l'arrachement du film ainsi que sur la frontière supérieure du bras en traction à cause de l'étirement de la courbure initiale de ce dernier. Le reste du bras et le substrat en général demeure non sollicité. La figure 4.3 et 4.4 montre que la plastification au début de l'interface commence par les parties latérales pour s'orienter vers l'intérieur. Apparemment, l'endommagement s'initie à partir des parois latérales, où le matériau devient ensuite totalement dégradé ce qui correspond à $\text{Damage} = 1$.

Chapitre IV : Analyse numérique de l'endommagement de la structure film/substrat

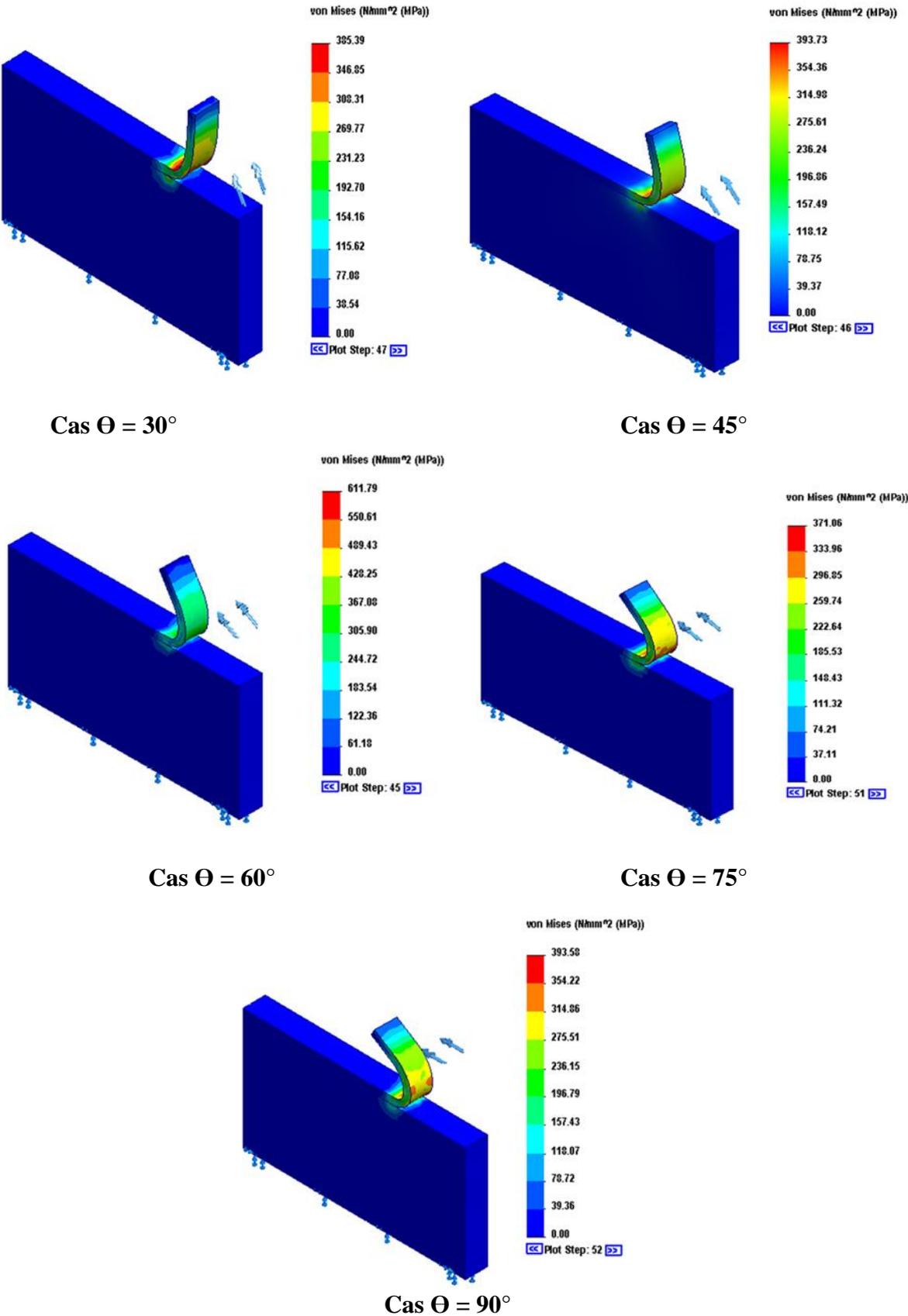


Figure 4.2: Contour des Contrainte Von Misses en fonction angle θ .

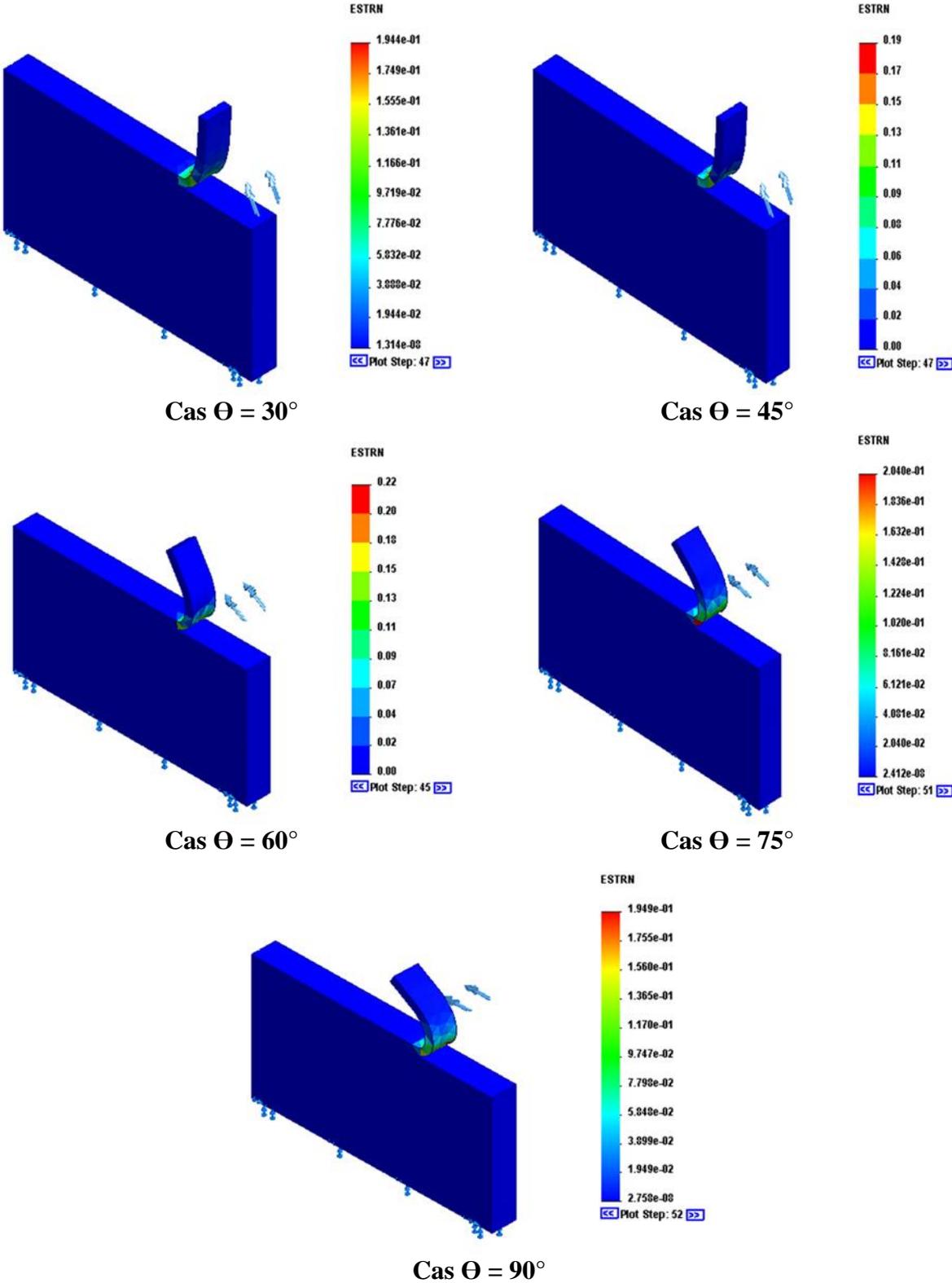


Figure 4.3: Contour des Déformations plastiques en fonction θ .

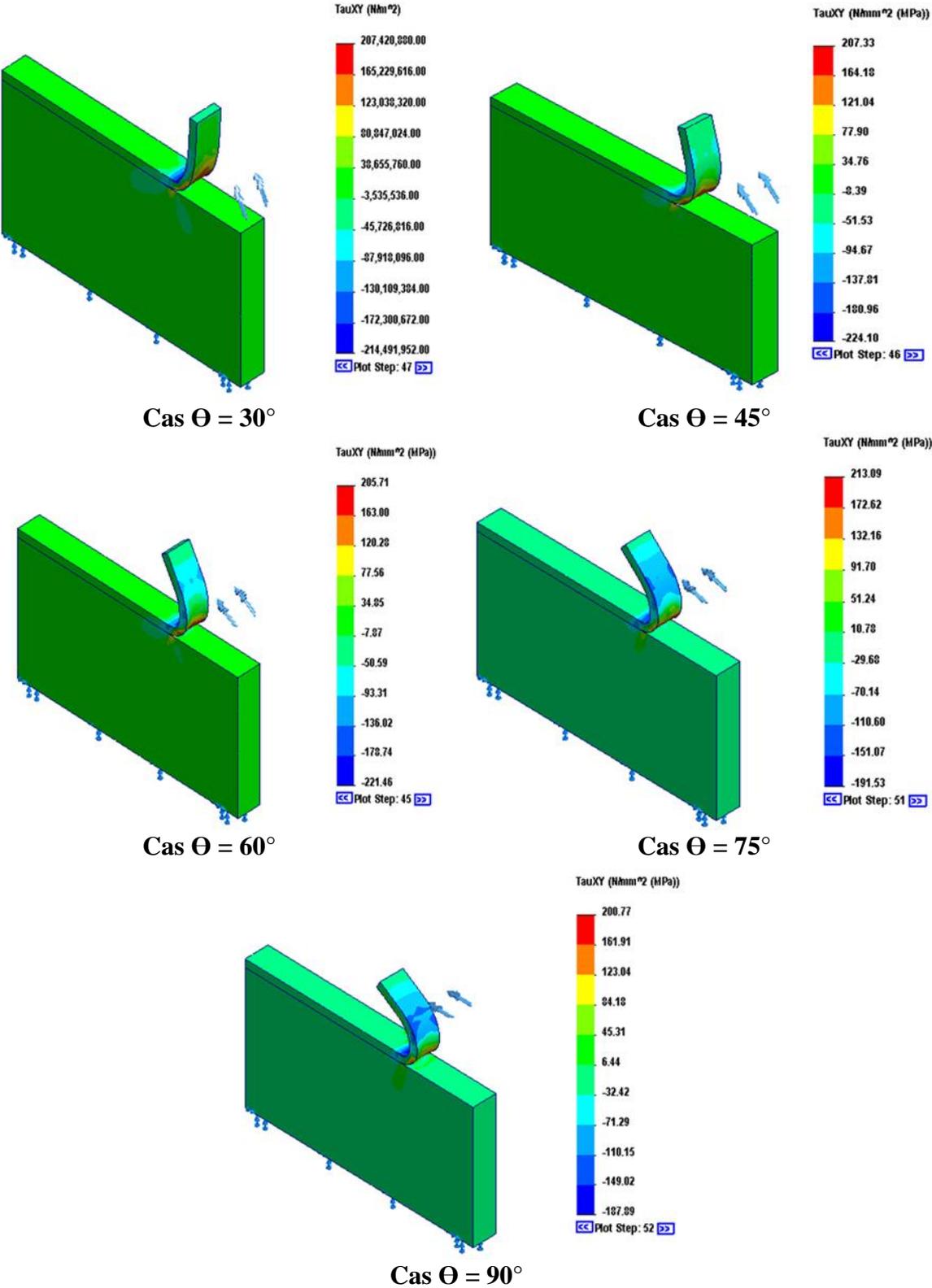


Figure 4.4: Contour des contraintes de cisaillement τ_{xy} en fonction θ .

IV.4 Effet d'épaisseur :

Dans cette application, on va étudier l'effet de l'épaisseur du film sur l'évolution des contraintes équivalentes pour un angle de pelage $\theta = 45^\circ$.

Chapitre IV : Analyse numérique de l'endommagement de la structure film/substrat

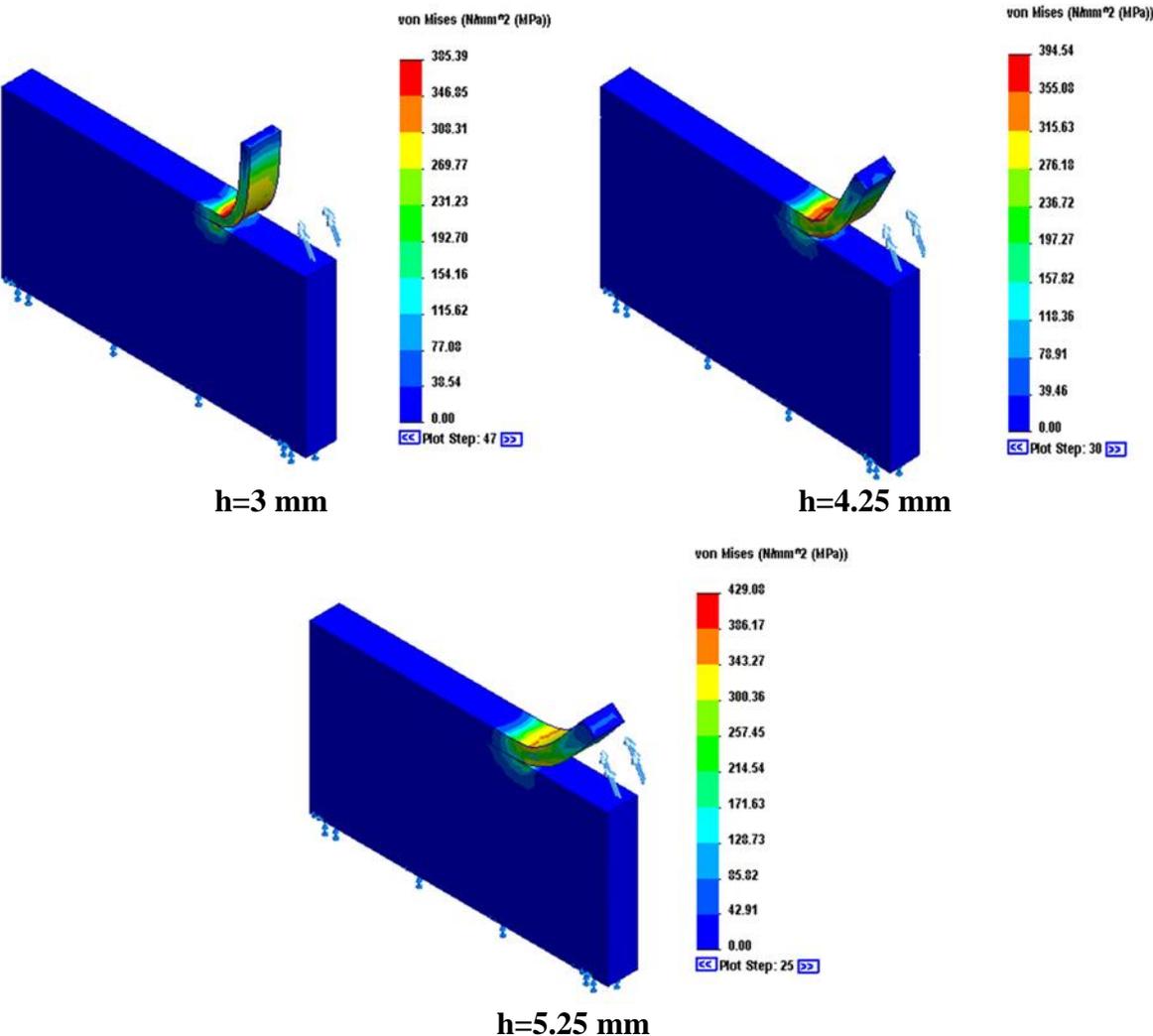


Figure 4.5: Répartition des contraintes Von Mises pour différent épaisseur h.

La figure 4.6 résume la distribution du champ des contraintes maximales suivant charge appliquée pour différent épaisseur, chemin probable.

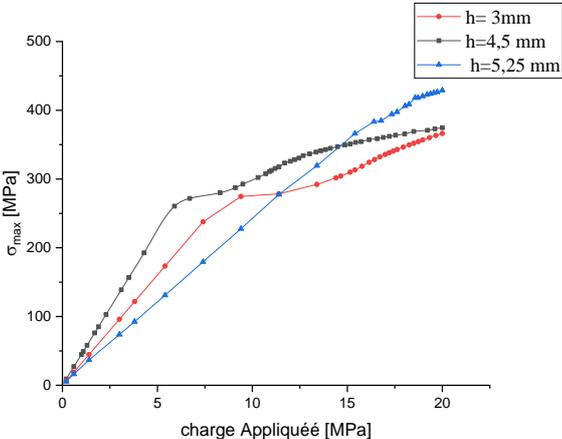


Figure 4.6: Evolution des contraintes équivalente max en fonction charge appliqué pour différent épaisseur h.

Chapitre IV : Analyse numérique de l'endommagement de la structure film/substrat

La figure 4.7 illustre la variation de la contrainte équivalente maximale de von Mises sur le rendement du métal. Ainsi, la contrainte équivalente de Von Mises est fortement liée à l'épaisseur du film. En effet, l'augmentation de l'épaisseur du film conduit à des concentrations de contraintes plus élevées à la pointe de contact. D'autre part, la diminution de l'épaisseur du film conduit à une relaxation des contraintes au point de contact ; cette relaxation des contraintes génère une plastification significative à la pointe de contact. Ceci montre clairement qu'un faible stockage d'énergie sous forme de déformation plastique. Une grande quantité d'énergie à la pointe de la fissure contenue dans un film est absorbée sous forme de déformation plastique

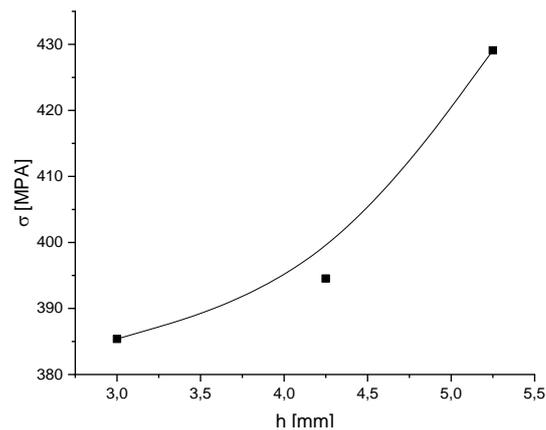
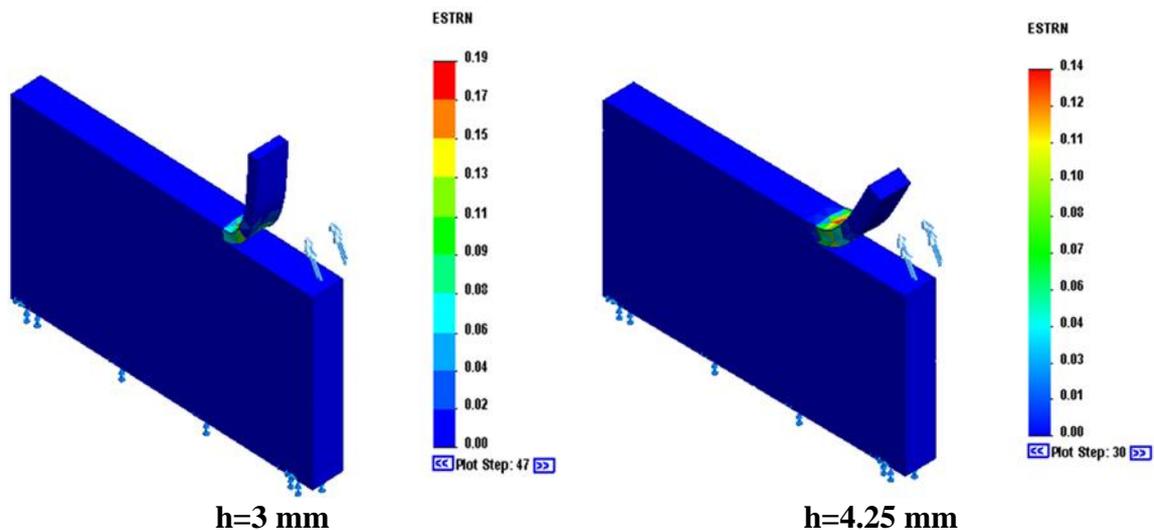


Figure 4.7: Variation des contraintes équivalentes en fonction de h.

La plastification partielle de la racine est clairement visible et s'étend progressivement sur le long du front, figure 4.8, sa valeur croît proportionnellement aux pas successifs de chargement, figure 4.9.



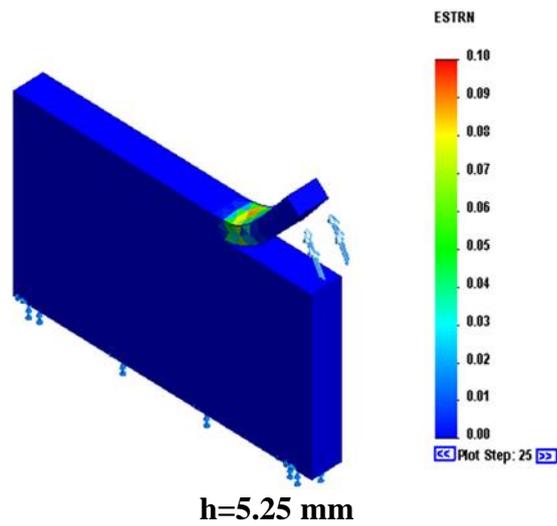


Figure 4.8: Contour des déformations plastiques en différent h et $\theta=30^\circ$.

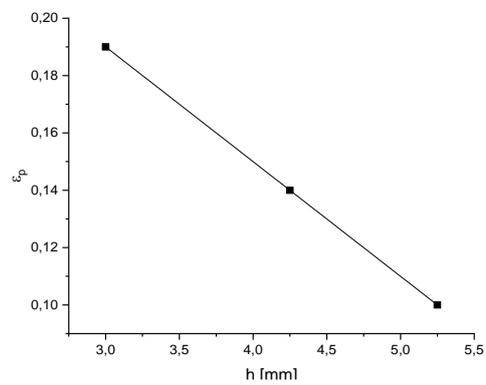
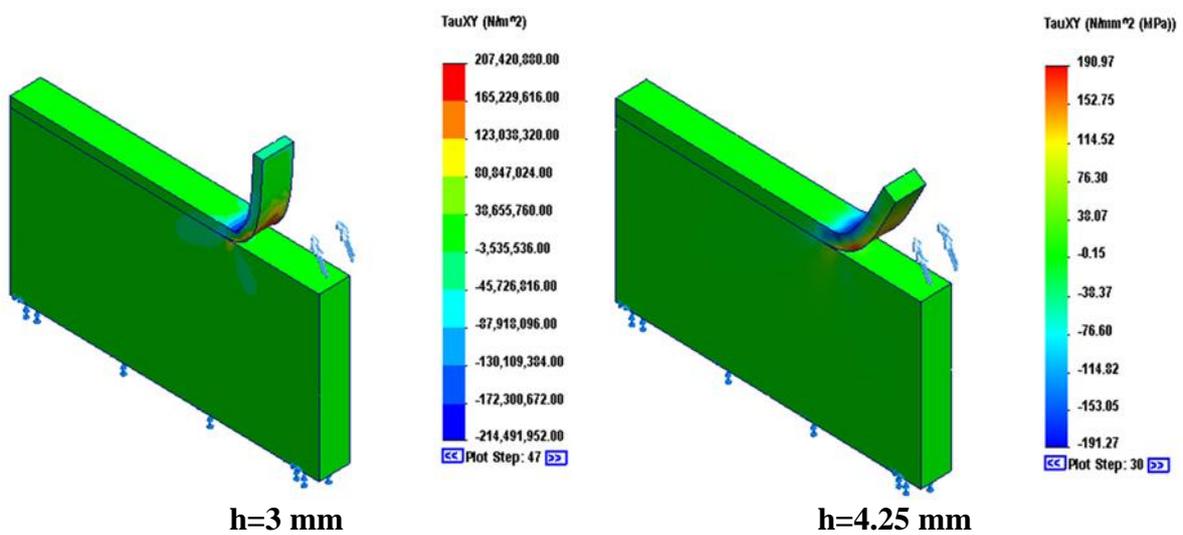
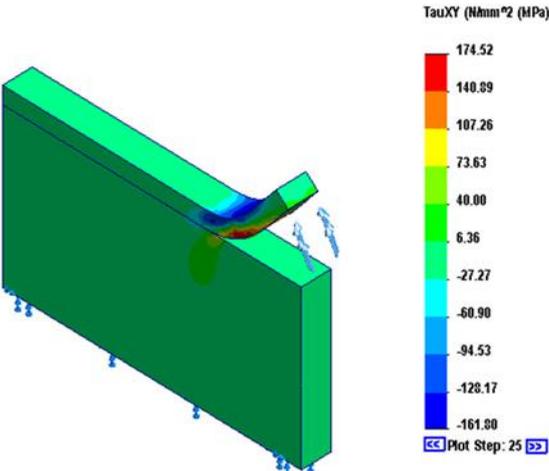


Figure 4.9: Courbe déformation plastique en fonction de h.



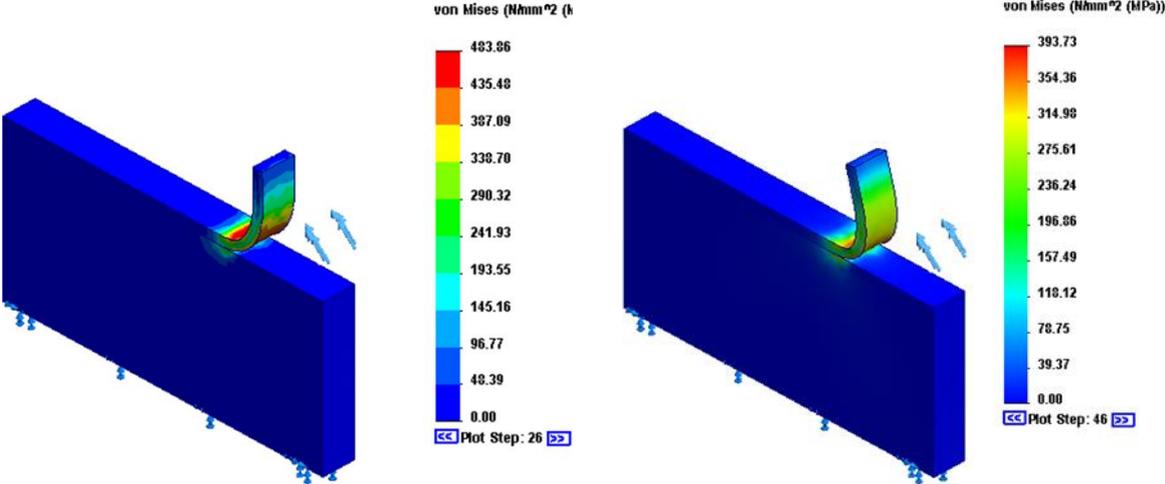


h=5.25 mm

Figure 4.10: Contour des contraintes de cisaillement τ_{xy} en différent h avec $\theta=30^\circ$.

IV.5 Effet de matériau :

Etudier l'effet de différent matériaux du film sur l'évolution des contraintes équivalentes, déformation plastique et contrainte tangentiel dans le plant xy (τ_{xy}) pour un angle de pelage $\theta = 45^\circ$ et épaisseur du film h=3mm.



AL2024

AL6061

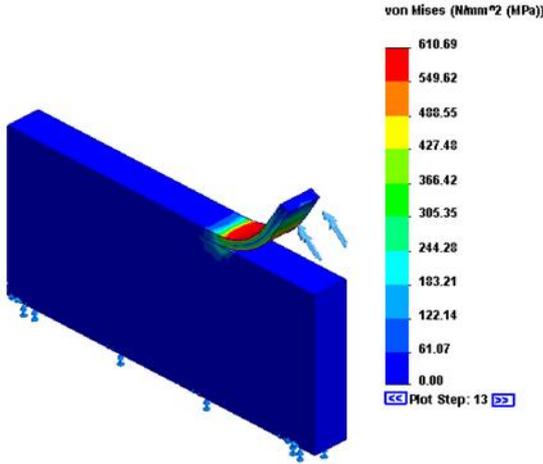


Figure 4.11: Répartition des contraintes Von Mises pour différent matériaux.

La figure 4.11 et 4.12 montre l'effet de caractéristique de matériau sur la contrainte de von Mises (σ_{max}). Les valeurs de la contrainte équivalente augmentent presque proportionnellement aux différent alliage d'aluminium. L'augmentation des propriétés mécaniques du film implique un accroissement des propriétés de ductilité du métal, par conséquent les propriétés mécaniques de résistance du film, impliquant une augmentation de la contrainte équivalente de von Mises. La relaxation des contraintes dans la zone de processus de rupture conduit à une déformation plastique importante au voisinage de la pointe de la fissure. Si l'on compare les valeurs de σ_{max} pour AL2024 et AL7075, on peut noter une variation de 7 %. L'effet de différent alliage d'aluminium sur la plastification au point de contact est illustré dans la figure 4.13 et 4.14.

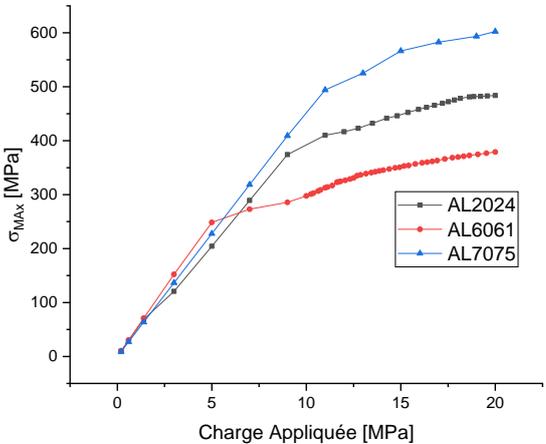


Figure 4.12: Evolution des contraintes équivalente max en fonction charge appliqué pour différents matériaux.

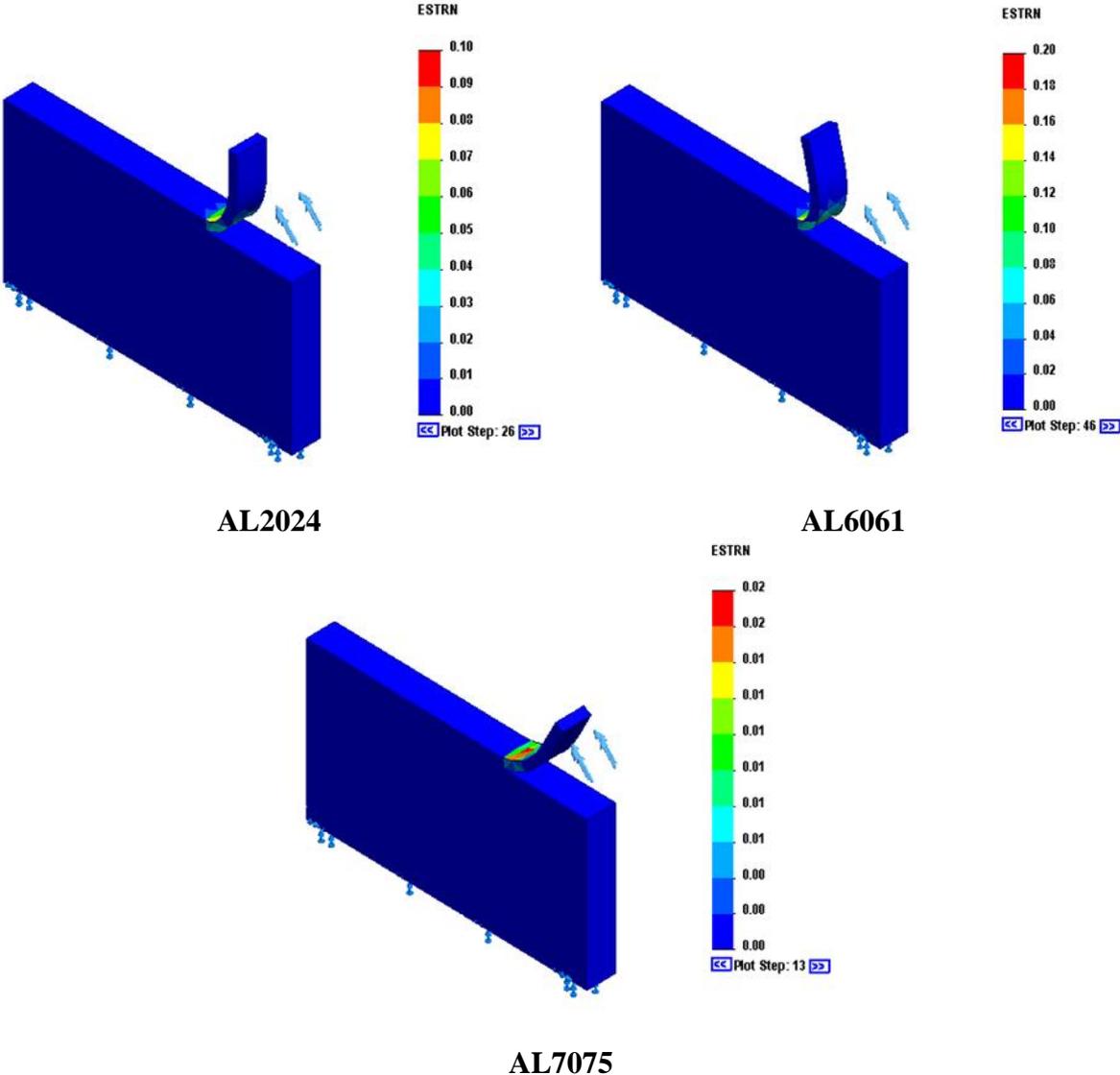


Figure 4.13: Répartition des déformations plastiques pour différent alliage d'aluminium.

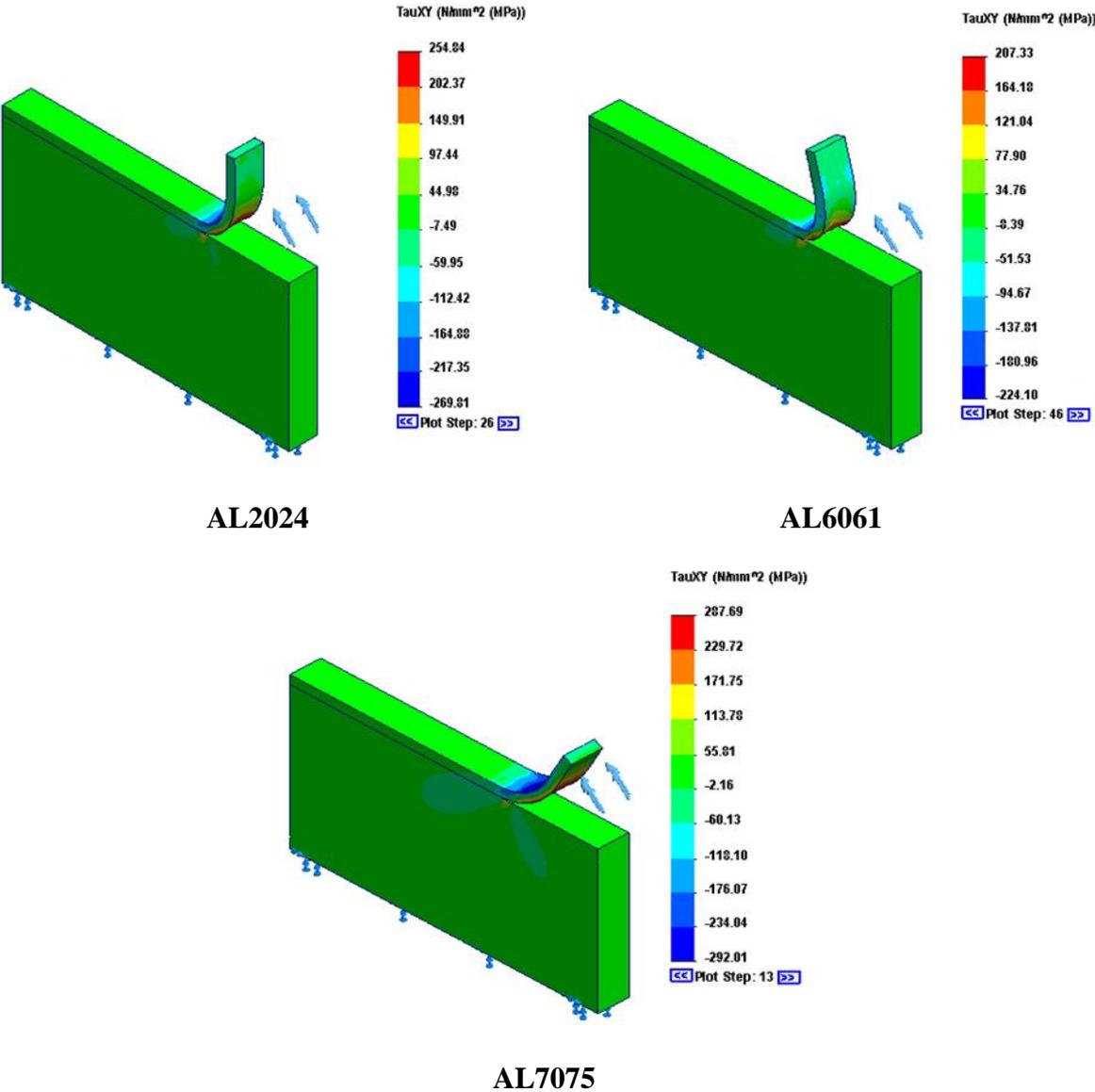


Figure 4.14: Contour des contraintes de cisaillement τ_{xy} pour différent alliage d'aluminium.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'étude des structures réalisées à partir de matériaux de revêtement considérés comme bimatériaux est d'un grand intérêt en ingénierie. L'objectif de ce travail est de mener une enquête aussi riche que possible afin de mieux analyser les phénomènes physiques et mécaniques qui affectent la durée de vie des revêtements métalliques et leur impact sur les problématiques industrielles. Les essais d'adhérence sont un domaine florissant dont la recherche fait appel à différentes disciplines : modélisation mathématique et mécanique, analyse numérique, etc. Dans cette étude, des méthodes numériques ont été développées et mises en œuvre en utilisant des déformations conceptuelles issues de petits calculs structuraux et des techniques pour les grandes déformations ; en particulier les développements liés à la modification de la topologie pour le remaillage lors de la propagation de fissures. Le code SOLIDWORKS a été utilisé pour la modélisation numérique de l'endommagement a été appliqué aux essais de pelage. Pour cela, il est nécessaire de bien gérer les interfaces entre les différents matériaux en superposant les nœuds d'interface communs à chaque matériau.

Ce travail a été consacré à étudier le phénomène de pelage au niveau de l'interface entre le film et le substrat. La technique utilisée, basée sur le comportement non linéaire, a donné des résultats très révélateurs sur les effets de l'angle du bras de film, son épaisseur, ses propriétés mécaniques. Cela a permis de quantifier la contrainte maximale nécessaire au décollement du film pour chaque configuration ainsi que l'estimation de la zone plastique et la quantification de l'endommagement au point de contact.

Références bibliographique

Références bibliographique:

- [1] <https://laurentgrenier.com>.
- [2] Gallitelli, Donato. Traitements de surface mécaniques: modélisation et caractérisations expérimentales. Diss. Troyes, 2018.
- [3] Lévêque, Robert. Traitements et revêtements de surface des métaux-2e éd. Dunod, 2022.
- [4] Parachèvement de surface, GM-3-PROFA Équipe Procédés de Fabrication :(T. Chaise, T. Elguedj, F. Girardin, L. Martini, N. Noel, N. Tardif), INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APLIQUEES LYON.
- [5] <https://www.uits-france.org>.
- [6] KHERRAF, ALLAOUA. Propriétés mécaniques et biomécaniques de dépôts obtenus par projection thermique « Application de l’Emission Acoustique ». Diss. Université de Batna 2, 2014.
- [7] <https://www.over-blog.com>.
- [8] <https://lermps.utbm.fr>.
- [9] Leroux, C., and P.Jacquot."Surface engineering of metallic alloys. Classification-applications-trends and development. " revue demetallurgie cahier d’informations techniques 108.5 (2011): 295-311.
- [10] DAHAOUI, Mourad. effet des prédeformations sur le comportement en fatigue des alliages d’aluminium a durcissement structural. Diss. Université Aboubekr Belkaid– Tlemcen, 2013.
- [11] Nelson.D.V., Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776,American Society for Testing and Materials.
- [12] L. PAWLOWSKI, The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, second edition, John Wiley and Sons, 2008, pp. 67-100, 167-213 and 221-283.
- [13] A. MCWILLIAMS, High-performance ceramic coatings: Markets and Technologies, Business Communications Company Inc.-BCC research, 2007.

Références bibliographique

- [14] D. Sokolov, Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression, Thèse, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, 2009.
- [15] A. PRONER, Revêtements par projection thermique, Techniques de l'Ingénieur M 1645, 1999.
- [16] MR. Dorfman, Chapter 22: Thermal Spray Coatings, Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition), William Andrew Publishing, 2018, p.469-488.
- [17] Marot, Guillaume. Modélisation de l'essai d'indentation interfaciale et confrontation aux essais normalisés pour la détermination de l'adhérence de revêtements obtenus par projection thermique. Diss. 2007.
- [18] Irwin G.R. Fracturing of metals, ASM, Cleveland, Ohio, p.147, 1949.
- [19] www.gordonengland.co.uk
- [20] J. CIZEK, K.A. KHOR, Z. PROCHAZKA, Influence of spraying conditions on thermal and velocity properties of plasma sprayed hydroxyapatite, Materials Science and Engineering C 27 (2007) 340–344.
- [21] A. Proner, Revêtements Par Projection Thermique, Techniques de l'ingénieur, M1645, p.3-20, 1999.
- [22] JR. Davis, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International US, 2004.
- [23] www.stellba.ch
- [24] L. PAWLOWSKI, The science and engineering of thermal spray coatings, Ed. Wiley, Chichester, UK, 1995
- [25] R. Lévêque, Traitements et revêtements de surface des métaux, Dunod Paris, 2013.
- [26] A. A. Syed, P. Denoirjean, A. Denoirjean, J. C. Labbe, et P. Fauchais, Influence of substrate surface oxidation stage on the morphology and flattening of splats, High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes, vol.7, n°2, 2003

Références bibliographique

- [27] M. Mellali, Influence de la rugosité et de la température de surface du substrat sur l'adhérence et les contraintes résiduelles au sein de dépôts d'alumine projetés par plasma, Thèse, Université de Limoges, 1994.
- [28] Y. Smaili, Contribution à la caractérisation mécanique et thermique des revêtements d'alumine et de carbure de tungstène, Thèse, Université Boumerdes, 2006.
- [29] E. Pons, Propriétés d'adhérence de revêtements projetés plasma sur substrats fragiles : caractérisation et identification de lois d'interface par Modèles de Zones Cohésives, Thèse, Institut Polytechnique de Grenoble, février 2016.
- [30] Y. Huang, M. Ohwatari, et M. Fukumoto, Effect of substrate material on flattening behavior of plasma sprayed Ni particles, in Proc. 6th Int. Symposium, 1996, p.731–36.
- [31] P. Fauchais, A. Vardelle, M. Vardelle, et M. Fukumoto, Knowledge concerning splat formation: An invited review, Journal of Thermal Spray Technology, vol.13, no 3, p.337 -360, septembre 2004
- [32] J. Cedelle, M. Vardelle, et P. Fauchais, Influence of stainless steel substrate preheating on surface topography and on millimeter- and micrometer-sized splat formation, Surface and Coatings Technology, vol.201, no 3, p.1373-1382, octobre 2006.
- [33] R. Bhola et S. Chandra, Parameters controlling solidification of molten wax droplets falling on a solid surface, Journal of Materials Science, vol.34, no 19, p.4883-4894, octobre 1999.
- [34] V. Barnier, Etude de l'oxydation de l'aluminium induite par traitement laser Nd : YAG (1064 nm, 10 ns) : conséquences sur les propriétés d'adhérence d'un revêtement d'alumine élaboré par projection thermique, Thèse, Université de Bourgogne Franche comté, 2006
- [35] CM. Serna Zuluaga, Mechanical Behavior of Al₂O₃-13%TiO₂ Ceramic Coating at Elevated Temperature, Thèse, Université Nationale de Colombie, 2016

Références bibliographique

- [36] ARM. Sahab, NH. Saad, S. Kasolang, et J. Saedon, Impact of Plasma Spray Variables Parameters on Mechanical and Wear Behaviour of Plasma Sprayed Al₂O₃ 3%wt TiO₂ Coating in Abrasion and Erosion Application, *Procedia Engineering*, vol.41, p.1689- 1695, janvier 2012.
- [37] N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, et F. Machi, An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by in situ laser remelting, *Wear*, vol.270, no 9, p.640-649, avril 2011.
- [38] W.-M. Zhao, Y. Wang, T. Han, K.-Y. Wu, et J. Xue, Electrochemical evaluation of corrosion resistance of NiCrBSi coatings deposited by HVOF, *Surface and Coatings Technology*, vol.183, no 1, p.118-125, mai 2004
- [39] Zouari, Sahar. Elaboration et caractérisation mécanique et physico-chimique des revêtements déposés sur des substrats en laiton par les techniques de projection thermique et pulvérisation pneumatique pour application d'industrie sanitaire. Diss. Université Bourgogne Franche-Comté; Université de Sfax (Tunisie), 2019.
- [40] S.Benayoun , Adhesion testes applied to coatings film, Ecole Centrale de Lyon, Ecully, France.
- [41] DAVIES, D. and J. A. WHITTAKER, 1967. Methods of testing the adhesion of metal coatings to metals. *Metallurgical Reviews*, 12, 15-26.
- [42] BROWN, S. D. 1995. Adherence failure and measurement: some troubling questions , p. 15-39. In K. L. Mittal (ed.), *Adhesion measurement of films and coatings*. VSP, Utrecht.
- [43] GENT, A. N. 1991. Rheology and adhesion. *Le Vide, Les Couches Minces*, Supplément N°258, 1-6.
- [44] SCHULTZ, J. 1993. Les principaux modèles théoriques de l'adhésion, 7ème Journées Francophones d'Etude sur l'Adhérence et l'Adhésion. Volume 1. SFA-SFV, Obernai, France.
- [45] ANDREWS, E. H. 1974. A generalized theory of fracture mechanics. *Journal of Materials Science* (9), 887-894.
- [46] MAUGIS, D. 1985. Review Subcritical crack growth, surface energy, fracture toughness, stick-slip and embrittlement. *Journal of Materials Science*, (tome?) 3041-3073.
- [47] RICKERBY, D. S. 1988. A review of the methods for the measurement of coating-substrate adhesion. *Surface and Coatings Technology*, 36, 541-557.

Références bibliographique

- [48] PERRY, A. J. 1981. The adhesion of chemically vapour-deposited hard coatings to steel-the scratch test. *Thin Solid Films*, 78, 77-93.
- [49] FELDER, E., C. ANGELELIS, M. DUCARROIR et P. MAZOT. 1998. Propriétés mécaniques des films minces : problématiques et moyens de mesure. *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 23, 791-819.
- [50] CHARALAMBIDES, P. G., J. LUND, A. G. EVANS and R. M. MCMEEKING. 1989. A test specimen for determining the fracture resistance of bimaterial interfaces. *J. Appl. Mech.*, 56, 77-82.
- [51] CAO, H. C. and A. G. EVANS. 1989. An experimental study of the fracture resistance of bimaterial interfaces. *Mechanics of Materials*, 7, 295-304.
- [52] COX, L. C. 1988. The four point bend test as a tool for coating characterization. *Surface and Coating Technology*, 36, 807-815.
- [53] BONNOTTE, E., P. DELOBELLE, L. BORNIER, B. TROLARD et G. TRIBILLON. 1995. Mise en oeuvre de deux méthodes interférométriques pour la caractérisation mécanique des films minces par l'essai de gonflement. Applications au cas du silicium monocristallin. *J. Phys. III France*, 5, 953-983.
- [54] HOHLFELDER, R. J., J. J. VLASSAK, W. D. NIX, H. LUO and C. E. D. CHIDSEY. 1995. Blister test analysis methods, p. 585-590, *Mat.Res. Soc. Symp. Proc. Volume 356*. Materials Research Society.
- [55] <https://www.developpez.net>.
- [56] LUCAS, B. N., W. C. OLIVER and J. E. SWINDEMAN. 1998. The dynamics of frequency-specific, depth-sensing indentation testing. In N. A. B. Eds. S.P. Baker, W.W. Gerberich, and N.R. Moody (ed.), *Spring MRS Meeting. Vol. 522*, San Francisco, CA.
- [57] BULL, S. J. 1999. Can scratch testing be used as a model for the abrasive wear of hard coatings ? *Wear*, 233-235, 412-423.
- [58] <http://www.physique-et-matiere.com>
- [59] AUROUX, E., M. BOUSTIE, J. P. ROMAIN, D. BERTHEAU, P. PEYRE, L. BERTHE and E. BARTNICKI. 2001. Debonding study of Ni-base substrate/Pt coatings interfaces using laser shock waves: characterization of the targets and experimental study. *Surface and Coatings Technology*, 138 (2-3), 269-277.

Références bibliographique

[60] GUPTA, V., J. YUAN and A. PRONIN. 1995. Recent developments in the laser spallation technique to measure the interface strength and its relationship to interface toughness with applications to metal/ceramic, ceramic/ceramic and ceramic/polymer interfaces, p. 367-401. In K. L. Mittal (ed.), Adhesion measurement of films and coatings. VSP, Utrecht.

[61] PRONIN A. and V. GUPTA. 1998. Measurement of thin film interface toughness by using laser-generated stress pulses. J. Mech.Phys. Solids, 46 (3), 389-410.

[62] <https://www.techniques-ingenieur.fr>.