



**المدرسة الوطنية  
للمهندسين بتونس**  
École Nationale d'Ingenieurs de Tunis

**Département Génie Industriel**

# **Traitement des surfaces des métaux**

Projet de fin d'année I

**Réalisé par :  
Masmoudi Mahmoud**

**Kammoun Khalil**

**Classe :  
1AGI1**

**Encadré par  
Mr. Mansour Wassim**

Année universitaire 2010/2011

# Table des matières :

Table des matières :.....	2
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux.....	6
Introduction générale.....	7
1. Chapitre 1 : Historique.....	8
1.1. Origine:.....	9
1.2. XVIème Siècle:.....	9
1.3. XIXème Siècle.....	10
1.4. XXème Siècle:.....	10
2. Chapitre 2 : Les traitements des surfaces des métaux.....	12
2.1. Traitements chimiques :.....	13
2.1.1. Passivation :.....	14
2.1.1.1. Description du procédé :.....	14
2.1.1.2. Applications :.....	14
2.1.1.3. Avantages – Limitations :.....	15
2.1.2. La chromatisation :.....	15
2.1.2.1. Description du procédé.....	15
2.1.2.2. APPLICATIONS :.....	15
2.1.2.3. Avantages – Limitations :.....	15
2.1.3. L'oxalation.....	16
2.1.3.1. Principe du procédé.....	16
2.1.3.2. Avantages – Limitations :.....	16
2.1.4. Phosphatation :.....	16
2.1.4.1. Principe du procédé.....	16
2.1.4.2. Applications :.....	16
2.1.4.3. Avantages – Limitations :.....	17

2.2. TRAITEMENTS LASER.....	17
2.2.1. De quoi dépend?.....	17
2.2.2. Avantage:.....	18
2.2.2.1. Couplage LASER:.....	18
2.2.2.2. Soudage LASER:.....	18
2.2.2.3. Traitement de surface LASER:.....	18
2.2.3. Procédé industriel:.....	18
2.2.4. Lasers industriels:.....	19
2.2.4.1. Laser à CO2:.....	19
2.2.4.2. Laser Nd: YAG.....	19
2.2.4.3. Laser à diode:.....	20
2.2.4.4. Laser à excimère:.....	20
2.3. TRAITEMENTS THERMIQUES.....	20
2.3.1. Les avantages:.....	20
2.3.2. Les défauts :.....	20
2.3.2.2. Fissures :.....	21
2.3.2.3. Déformations et gauchissements :.....	21
2.3.3. Dans quels cas on utilise ce type de traitement?.....	21
2.3.4. Procédés industriels :.....	21
2.3.4.3. Revenue :.....	23
2.3.4.4. Traitements thermochimiques.....	24
2.4. Traitements mécanique :.....	24
2.4.1. Décapage mécanique :.....	24
2.4.2. Le Galetage.....	24
2.4.2.1. Procédés industriel:.....	24
2.4.2.2. Différents types de galetage :.....	24
2.4.2.3. Avantages du galetage :.....	24
2.4.3. grenailage de précontrainte:.....	25
2.4.3.1. procédé industriel :.....	25
2.4.3.2. Les avantages du grenailage de précontrainte :.....	25

2.4.4. Le moletage.....	25
2.4.4.1. Principe :.....	25
2.4.4.2. Applications :.....	26
2.5. REVETTEMENTS :.....	26
2.5.1. REVÊTEMENTS PAR VOIE HUMIDE .....	27
2.5.1.1. Démétallisation:.....	27
2.5.2. REVÊTEMENTS PAR VOIE SÈCHE.....	28
2.5.2.1. Dépôts physiques en phase vapeur.....	28
2.5.2.2. Dépôts chimiques à partir d'une phase gazeuse (CVD) :.....	29
2.5.2.3. Projection thermique: .....	30
2.5.2.4. Immersion des métaux fondus:.....	32
2.5.2.5. Faisceau à haute énergie:.....	32
CONCLUSION.....	33
Références bibliographiques.....	34

# Liste des figures

Figure 1 :Principe de traitement par voie chimique.....	14
Figure 2 : Influence de la longueur d'onde sur l'absorption du faisceau laser .....	18
Figure 3: Principe de fonctionnement de la projection laser .....	20
Figure 4: le procédé de traitement thermique .....	23
Figure 5: Trempe générale instantanée d'une surface de révolution .....	24
Figure 6: Les différentes types de moletage.....	27
Figure 7: démétallisation électrolytique.....	28
Figure 8: Démétallisation chimique.....	29
Figure 9: DÉPÔTS PVD.....	29
Figure 10:Pulvérisation cathodique.....	30
Figure 11: DÉPÔTS PAR PROJECTION THERMIQUE.....	31
Figure 12: Principe fondamental de la projection thermique (doc. AREGA).....	31
Figure 13: Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique.....	32
Figure 14: Principe de fonctionnement d'une torche plasma.....	32

# Liste des tableaux

Tableau 1 :Principaux traitements chimiques et leurs applications.....	13
Tableau 2: Les différentes procédés de la passivation.....	14
Tableau 3 : comparaison entre l'application du moletage par déformation et par enlèvement de métal.....	26

# Introduction générale

Dans l'antiquité, la finition des pièces fabriquées, métalliques étaient ou non, était négligée et on ne tient compte que de la fonctionnalité et des objectifs visés par cette pièce. Après quelques années on a remarqué qu'un traitement de surface de la pièce nous permet d'améliorer sa qualité et d'augmenter ses caractéristiques telles que sa résistance et son pouvoir réfléchissant. D'où cette nécessité de traitement de surface favorise l'existence d'une pléthore de types de traitements dont chacun a un certain nombre d'avantages et d'inconvénients.

La surface des métaux possède un ensemble de caractéristiques qui peuvent être soit physiques (dureté, pouvoir réfléchissant) soit chimiques ou électriques (résistivité, potentiel...). Ces caractéristiques sont modifiables par un traitement de surface qui peut intervenir dans une phase intermédiaire ou dans la plupart des cas dans la phase finale de l'élaboration de la pièce.

Le traitement de surface, quelque soit son type chimique, thermique, laser ou mécanique, a comme but de modifier et transformer la surface de la pièce dans le sens de lui conférer de nouvelles propriétés telles que la résistance à la corrosion, à l'usure ou à la modification de l'aspect apparent et la conservation dans le temps de ses propriétés électriques, optiques ou thermiques...

Il est vrai que les traitements de surface des métaux ont des avantages multiples mais on ne doit pas nier la présence d'une pléthore d'inconvénients qui menace la durée de vie et la qualité des pièces traitées.

Dans ce cadre, le but de ce projet est d'élaborer une étude bibliographique sur les types de traitements de surface, en particulier le traitement des métaux. Ce travail effectué est présenté dans ce rapport sous formes de deux chapitres:

Le premier consiste en un aperçue sur l'historique des traitements de surface et de donner une idée sur leurs origines puis on étudie l'évolution des traitements de surface depuis sa naissance jusqu'au XXème siècle. Le second sera consacré pour la présentation des différents types de traitements de surfaces, ainsi que leurs procédés industriels, leurs avantages et leurs inconvénients.

# **Chapitre 1 : Historique**

## 1.1. Origine:

Il est vrai qu'on ne peut pas fixer avec précision l'origine des traitements de surface mais on peut vérifier facilement l'existence de ces traitements il ya plus que trois milles ans. En effet, la présence dans les sépultures antiques de Thèbes et de Memphis de divers objets recouverts d'une mince couche de cuivre, tels que des vases et des statuettes en argile cuite, des lames de sabre et des pointes de flèches en bois, permet de supposer que les anciens Egyptiens utilisaient des procédés analogues à la galvanoplastie du cuivre telle qu'elle est encore pratiquée de nos jours

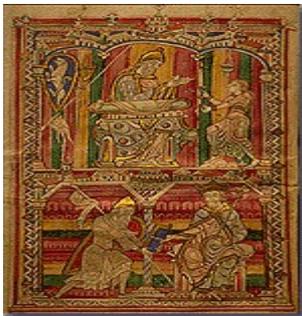
Comment serait-il donc possible d'expliquer autrement l'exécution de ces statues en cuivre rouge, de très faible épaisseur?

Donc on doit bien admettre que de tels ouvrages n'ont pu être réalisés que par le dépôt du cuivre provenant d'une solution concentrée d'un sel de ce métal, acétate, sulfate, tartrate, sur une statue en bois sculpté, dont la surface été préalablement métallisée par application d'or réduit en poudre à fine granulation ou bien par application d'or battu en feuilles minces. La présence d'une source extérieure de courant n'était pas nécessaire pour exécuter le dépôt de cuivre: il suffit tout simplement d'immerger, dans la solution de cuivre, des plaques de zinc et de les relier à la statue préalablement métallisée à l'or, ce qui détermine un échange d'ions constant. Lorsque le dépôt de cuivre devient suffisamment épais, on retire la statue cuivrée du bain puis on procède à un chauffage progressif permettant finalement la réduction en cendres du support en bois. On sait maintenant qu'un tel processus thermique non seulement consolidait le dépôt de cuivre en homogénéisant sa structure, mais aussi l'affinait par diffusion. [0]

## 1.2. XVIème Siècle:

PLINE L'ANCIEN mentionne la dorure et l'argenture par amalgamation avec le mercure parmi les procédés utilisés de son temps pour décorer les armes et les objets en bronze.

Dans un traité écrit sur les divers Arts au XIème siècle, le moine Théophile, bénédictin de l'abbaye d'Helmershausen, décrit exactement la pratique de la dorure au mercure: la préparation de l'amalgame par dissolution à chaud de l'or dans le mercure, on la filtre à travers une peau de cerf afin d'éliminer le mercure en excès, on l'applique à la brosse sur les objets à dorer et enfin par l'intermédiaire du chaleur on fait l'évaporation du mercure. Le moine Théophile traite également du battage de l'or et de l'étain entre des feuilles de parchemin, de la préparation des métaux précieux en poudre, de l'argent niellé, de l'outillage de l'orfèvre et du graveur ainsi que de la trempe de l'acier. [0]



### 1.3. XIXème Siècle

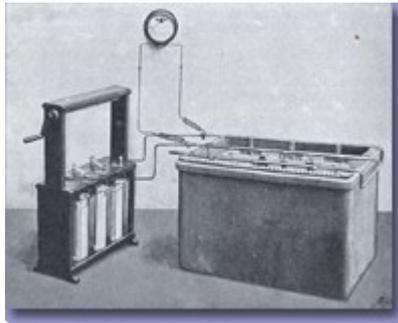
Il est vrai que l'argenture au mercure est totalement abandonnée mais on ne doit pas nier que la dorure au mercure existe encore.



On note même en France dans un rapport de l'Administration des Monnaies et Médailles au Ministre des Finances que l'on employait encore en 1921 12 kilogrammes d'or à 98,5% pour la dorure au mercure; ce poids tombait à 7 kilos en 1930 et seulement 3,600 kilos en 1935.

Actuellement, il existe encore quelques "doreurs au mercure", ils sont en général spécialisés dans la réparation des objets d'époque.

Par l'intermédiaire du courant électrique de la pile inventé par le physicien VOLTA et grâce à un autre physicien italien BRUGNATELLI on a réussi en 1805 à déposer de l'or sur des objets en argent plongés dans une solution de chlorure d'or



Il est vrai qu'à l'époque ce phénomène était négligé et les savants n'ont pas attaché l'importance qu'il mérite, mais on ne doit pas nier que ce phénomène devient, quelques années plus tard, l'objet de recherches de plusieurs chercheurs citons à titre d'exemple: SPENCER en Angleterre, de LA RIVE en Suisse (1825) et Antoine BECQUEREL en France (1829) mais ils n'ont pas trouvé un résultat définitif.

On affirme qu'en 1840 les frères ELKINGTON ont pris un brevet le 27 septembre en Angleterre tandis que de RUOLZ en prenait un en France le 19 décembre. A partir de 1850 on vit se développer la galvanoplastie des métaux précieux et surtout des métaux communs. Il était possible d'obtenir d'excellents résultats car la lenteur de déposition favorise la finesse granulaire du métal déposé et surtout sa cohésion. Peu à peu on se dirige vers l'électrolyse industrielle c'est-à-dire les dépôts métalliques à des fins décoratives. Après l'apparition de la dynamo, on vit alors se développer les premiers bains de cuivrage à épaisseur et les premiers bains de nickelage. Certes les dépôts étaient mats et quelquefois durs à aviver, mais cela permettait la création d'une nouvelle corporation, celle des polisseurs et aviveurs sur métaux. Jusqu'à cette époque, Aucun dépôt n'était possible sans recours à un travail préalable de polissage et à une finition polie et avivée. [0]

### 1.4. XXème Siècle:

Les grands Maîtres du galvano sont ROSELEUR pour la France et LANGBEIN-PFANHAUSER pour l'Allemagne. Leurs ' traités de galvanoplastie ' était l'objet de plusieurs éditions et de nos jours ces manuels sont presque introuvables, même à des prix prohibitifs. Ils relatent directement, simplement et surtout sincèrement les phénomènes rencontrés au cours d'une électrolyse industrielle. Ils indiquent avec force détails la manière de préparer un bain et

de le dépanner en cas de défaillance. Ils donnaient tous les ' tuyaux ' pratiques pour réussir tel ou tel dépôt en insistant sur les phases opératoires déterminantes. [0]

# **Chapitre 2 : Les traitements des surfaces des métaux**

## 2.1. Traitements chimiques :

### Voie chimique

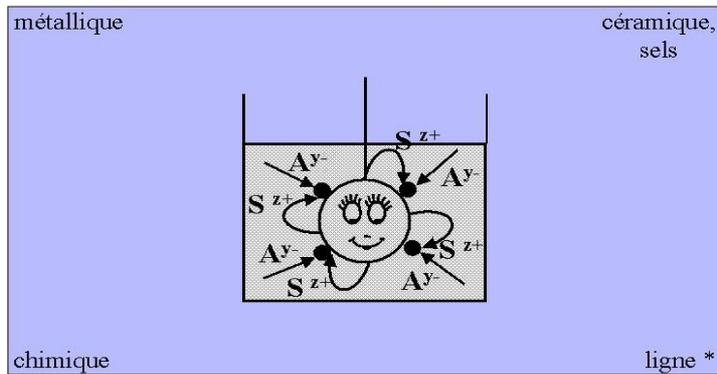


Figure 1 : Principe de traitement par voie chimique

Il existe plusieurs types de traitement chimique des surfaces métalliques utilisés dans les environnements industriels, on trouve la plupart d'eux dans ce tableau :

Tableau 1 : Principaux traitements chimiques et leurs applications[1]

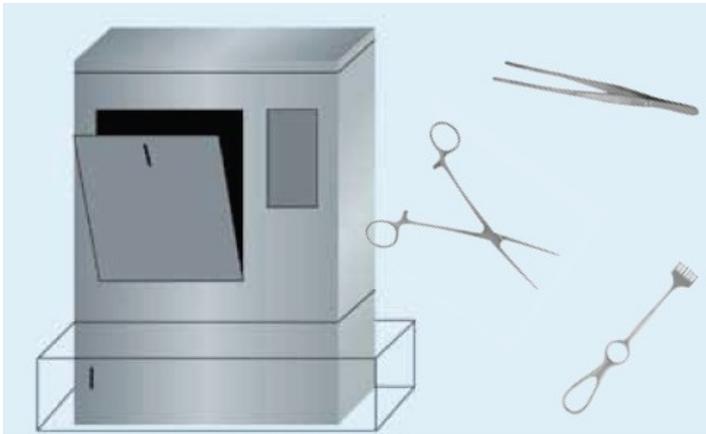
Traitement (1)	Métal	Applications
<b>Passivations :</b> Nitrique ..... Chromique ..... Phosphochromique .....	Aciers inoxydables Métaux cuivreux, argent Fer	} Sans finition, protection temporaire conservation d'un état de surface
<b>Oxydations alcalines :</b> <i>Noir alcalin - Bronzage</i> ..... <i>EW, MBW, Pylumin, Alrok, Decoral</i> ..... <i>Protectatin</i> ..... <i>Dow n° 6</i> .....	Fer, fonte Cuivre Aluminium Étain Magnésium	Huilé, décoration et anticorrosion Sans finition, base de collage Coloré, colmaté ou peint Décoration Décoration
<b>Chromatations :</b> Mordançage.....  Conversion, activation .....	Zinc et cadmium, cuivre et alliages, aluminium, magnésium et alliages  Titane	} Sans finition, verni ou peint, anticorrosion  Base de dépôt électrochimique ou lubrifié pour antigrippage
<b>Phosphatations :</b> Au fer (amorphe, alcaline) ..... Au zinc, Zn/Mn, Zn/Ca, Zn/Ni .....  Au manganèse..... Au calcium ..... Au chrome.....	} Fer, zinc, aluminium  Fer Fer Aluminium	} Sans finition en base d'adhérence et isolement électrique Huilé, verni, peint en anticorrosion Lubrifié pour frottement et déformation à froid Lubrifié pour frottement Isolement électrique Décoration, base de peinture
<b>Oxalation</b> .....	Acier inoxydable	Lubrifié pour frottement et déformation à froid
<b>Dépôts par déplacement :</b> Cuvrage ..... Nickel <i>DIP</i> ..... <i>Duclanisation</i> .....	Cu(II)/Fe Ni(II)/Fe Sn(II)/Cu	Sans finition en tréfilage, base de traçage en chaudronnerie Sans finition, base d'émaillage Décoration
<b>Dépôts autocatalytiques :</b> <i>Kanigen, Nibodur</i> .....	Ni(II)/Fe Cu(II)/plastique Au(III)/Au/Ag/Pd/Pt ou Cu Pd(II)/[idem Au(II) ou autre]	Anticorrosion Création de conductivité } Décoration

(1) Les procédés sont pour la plupart brevetés et propriétés de fournisseurs. Les noms de procédés sont des marques déposées.

### 2.1.1. Passivation :

La passivation consiste à créer artificiellement une fine couche d'oxyde de chrome pour l'anticorrosion de l'inox.

#### 2.1.1.1. Description du procédé :



La passivation se manifeste en deux étapes principales. Dans une première étape appelée de nettoyage, on élimine toute forme de contaminants présents en surface des métaux, ainsi que les matières grasses, pour empêcher les acides utilisés ultérieurement dans l'étape de passivation d'interagir adéquatement avec la surface de l'inox.

Dans la deuxième étape de passivation, on élimine toute sorte de particule ferreuse par précipitation. Puis, la restauration de la couche protectrice engendrée par l'oxyde de chrome aura lieu. [2]

Voici en plus un tableau contenant les procédés utilisé pour la passivation d'une façon plus détaillé :

Tableau 2: Les différentes procédés de la passivation[8]

Procédé	Produit	Concentration	Température	Temps
① nettoyage	deconex® HT 1501	2%	85 °C	10 min
② rinçage	eau dure		température ambiante	2 min
③ passivation	deconex® 34 GR	2% en eau démin.	85 °C	30 min
④ rinçage	eau déminéralisée		température ambiante	2 min
⑤ rinçage	eau déminéralisée		température ambiante	2 min
⑥ rinçage	eau déminéralisée		85 °C	2 min
⑦ séchage			110 °C	

#### 2.1.1.2. Applications :

La passivation est utilisée généralement dans la tenue à la corrosion en milieu peu agressif ou base d'accrochage de revêtements organiques comme la peintures ou colles ou bien comme application possible au tampon.

**Applications :** aéronautique, automobile, bâtiment, mobilier urbain, boîtage...

### **2.1.1.3. Avantages – Limitations :**

La passivation reste une étape essentielle pour maximiser la résistance à la corrosion de pièces essentielles et de composants usinés à partir d'aciers inoxydables.

Elle engendre plusieurs bénéfices selon les exigences des différents milieux industriels. Pour l'industrie agroalimentaire, l'avantage le plus important est sans doute l'accroissement de la longévité de l'équipement. Pour l'industrie biopharmaceutique, le gain se situe au niveau du potentiel de purification des surfaces qui en résulte. [2]

Concernant les limitations de ce traitement on site que la tenue à la corrosion des couches de conversions sans chrome hexavalent est souvent plus faible que celle des couches de chromatisation et que l'application d'un système de peinture est souhaitable comme pour les chromatisations, lorsqu'une protection anticorrosion optimale est recherchée ainsi que le recul en utilisation industrielle est encore limité. [3]

### **2.1.2. La chromatisation :**

#### **2.1.2.1. Description du procédé**

La chromatisation est une conversion chimique des solutions contenant du chrome hexavalent soit par aspersion ou par immersion afin de former des couches d'oxydes complexes. Ce traitement dure de 1 à 3 minutes à une température d'utilisation inférieure à 70°C. Et ces couches obtenues possèdent une masse surfacique de l'ordre de 1 g/m<sup>2</sup> et d'une faible épaisseur d'environ 0,5 µm. La couche de chromatisation se caractérise par une excellente base d'accrochage pour les finitions organiques et l'augmentation de la résistance à la corrosion de l'aluminium. [4]

#### **2.1.2.2. APPLICATIONS :**

- Tenue à la corrosion en milieu peu agressif
- Base d'accrochage de revêtements organiques (peintures, colles, caoutchouc...).
- Réparation locale de traitement d'anodisation ou de peinture, endommagés.
- Stockage sous abris. [4]

Applications : aéronautique, automobile, bâtiment, mobilier urbain ...

#### **2.1.2.3. Avantages – Limitations :**

En plus que la tenue à la corrosion intrinsèque est faible et que ce traitement nécessite souvent une étape supplémentaire de protection comme la peinture, les limitations environnementales qui se manifestent dans la présence de chrome hexavalent toxique et cancérigène sont considérées comme inconvenients de ce traitement.

Par contre le traitement des pièces est tolérant en raison de la faible épaisseur de la couche formée.

En plus de la mise en évidence des criques et la bonne aptitude au frottement, le fait qu'aucune attaque du métal par l'électrolyte en cas de rétention, contrairement à l'OAS se considèrent comme avantage de la chromatisation.

### **2.1.3. L'oxalation**

L'oxalation est un traitement de conversion de surface appliqué depuis longtemps sur des surfaces métalliques, telles que l'acier, le zinc ou l'aluminium, et destiné à former sur la surface un dépôt à base d'oxalate dont les propriétés de pré-lubrification facilitent le formage à froid.

#### **2.1.3.1. Principe du procédé**

Après une préparation adaptée de la surface du métal, l'oxalation en solution aqueuse est effectuée par immersion de 5 à 15 min, à une température de 50 à 65 °C selon le type de bain (température la plus courante 60 à 65 °C). [5]

Le traitement se fait en 3 étapes ; en premier lieu la préparation de la surface comme le dégraissage chimique ou le décapage puis la conversion chimique et en fin la lubrification.

#### **2.1.3.2. Avantages – Limitations :**

L'oxalation permet l'accrochage du lubrifiant, évite le contact du métal à déformer avec l'outillage et garantit ainsi une déformation plastique dans les meilleures conditions en plus de la diminution du coefficient de frottement, suppression du grippage, réduction de l'usure des outillages. [6]

Mais l'acide oxalique qui est utilisé dans l'oxalation est un produit très caustique pour la peau et les muqueuses. [5]

### **2.1.4. Phosphatation :**

La phosphatation est un procédé de conversion chimique qui consiste à transformer la surface des métaux en phosphate métallique stable et insoluble.

#### **2.1.4.1. Principe du procédé**

Le principe consiste à traiter le fer, la fonte ou l'acier, dans des bains acides bouillants renfermant 3 à 4 % de phosphates de fer et de manganèse préparés à partir de l'acide orthophosphorique ; dès que les pièces, auparavant décapées, sont immergées dans ces solutions, il se produit une attaque superficielle avec dégagement d'hydrogène et production d'un phosphate de fer secondaire, lequel atteint rapidement la limite de saturation ; l'attaque s'arrête alors et il se produit sur le métal un dépôt des phosphates complexes en excès ; le recouvrement obtenu, d'une couleur gris-noir, est extrêmement adhérent puisqu'il se dépose sur un métal légèrement gravé par l'attaque antérieure : il est de plus très résistant à la corrosion atmosphérique normale ; il constitue enfin, de par sa nature même, une base d'accrochage remarquable pour des finitions appropriées aux genres de corrosions spéciales contre lesquels les pièces peuvent avoir à lutter. [7]

#### **2.1.4.2. Applications :**

On utilise ce genre de traitement pour l'isolation électrique, la protection contre la corrosion et l'accrochage des finitions organiques, ainsi que l'amélioration des propriétés de frottement sous lubrification en mécanique, aussi bien que l'accrochage des lubrifiants dans la déformation à froid des métaux comme l'étrépage, le tréfilage, le filage, l'extrusion. [7]

### 2.1.4.3. Avantages – Limitations :

Le traitement de surface de phosphatation est un procédé qui améliore la résistance à la corrosion, il occupe le rôle de sous couche d'accroche très efficace tout en ajoutant une barrière anticorrosion supplémentaire, Bonnes qualités de glissement, empêche la friction dans les opérations de déformation des métaux et Accepte bien les huiles anticorrosion et les peintures et ne s'enlève à peine lors du maniement des pièces, d'où une très bonne protection anticorrosion et une bonne isolation.

Par contre il peut avoir des Problèmes d'assemblage car la couche peut avoir une épaisseur de +2  $\mu\text{m}$  à +30  $\mu\text{m}$  et un aspect chimique dangereux irritant en raison des proportions de nitrate et d'acide.

## 2.2. TRAITEMENTS LASER

### 2.2.1. De quoi dépend?

- Le coefficient d'absorption A est une caractéristique importante de l'association d'un rayonnement et d'un matériau puisque l'effet recherché dépend de la longueur de pénétration du faisceau qui doit être de préférence monochromatique et de longueur d'onde le plus petit possible.
- La nature chimique du substrat, son aspect de surface et la polarisation de la radiation incidente sont à prendre en compte puisqu'ils permettent d'avoir les propriétés superficielles recherchées.

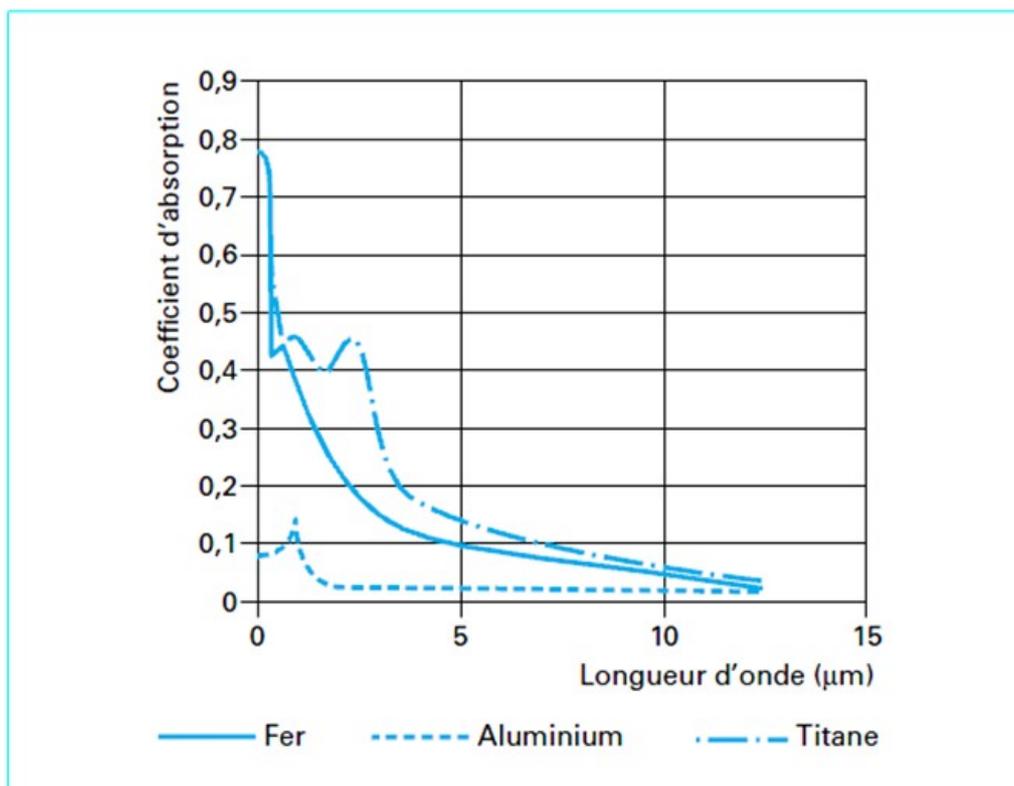


Figure 2 : Influence de la longueur d'onde sur l'absorption du faisceau laser [10]

- La topographie de surface joue un rôle important dans le couplage du faisceau laser avec la matière c'est-à-dire la rugosité de la surface du matériau influe considérablement sur le coefficient de pénétration du faisceau laser.
- L'angle d'incidence du faisceau laser agit considérablement sur les propriétés de la surface

### **2.2.2. Avantage:**

#### **2.2.2.1. Couplage LASER:**

- Rapidité et flexibilité du coupage en 3D grâce au guidage intégré du rayon dans le poignet du robot.
- Excellente qualité de coupe des métaux et matières plastiques
- Cautérisation des chants sur des pièces textiles ou plastiques
- Vitesse de coupe élevée
- Absence de copeaux et d'impuretés sur la pièce
- Pas d'efforts sur la pièce et le gabarit

#### **2.2.2.2. Soudage LASER:**

- Déformation infime des pièces
- Qualité et résistance des cordons de soudure
- Rapidité et efficacité

#### **2.2.2.3. Traitement de surface LASER:**

- Faible déformation
- Absence de fissures
- Trempe de couches superficielles sur de petites pièces

### **2.2.3. Procédé industriel:[9]**

Le faisceau laser va fondre au point d'impact le substrat métallique formant un bain liquide. En même temps la température de la poudre augmente par le faisceau laser et cette poudre est transportée par un gaz porteur généralement Hélium ou Argon au travers d'une buse coaxiale jusqu'au bain liquide ainsi créé.

Le mouvement du substrat en X et Y et le déplacement en Z de l'ensemble buse coaxiale et laser réalisent la géométrie de la pièce. D'où la fabrication de la pièce couche par couche à partir des données conceptions assistées par ordinateur.

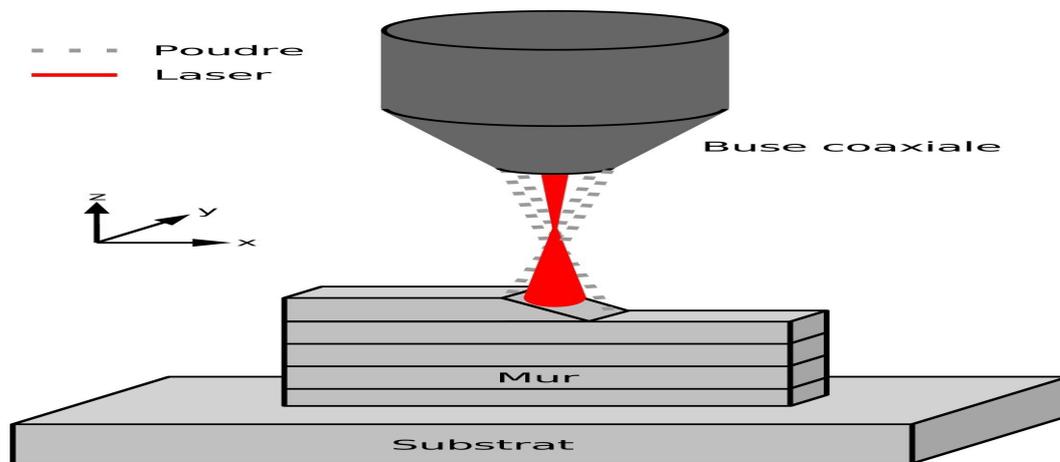


Figure 3: Principe de fonctionnement de la projection laser [1]

Lorsque le faisceau laser attaque les parois du substrat on remarque la présence d'une couche fine du liquide puis cette dernière est vaporisée en surface forment une plume de matière ablatée. Cette plume exerce une surpression sur la couche de métal fondu. Le métal liquide est repoussé vers les bords de l'impact. Après la fin de l'impulsion, le métal fondu tend à revenir à sa place. Lorsque l'on observe au microscope la surface de l'échantillon ayant subi un impact unique, on observe très peu de changement. Mais la répétition des tirs conduit à des modifications de surface importantes: ablation de matière dans le cas de la texturation ou échauffement superficiel induisant une insertion d'oxydes dans la proche surface.

## 2.2.4. Lasers industriels:[10]

### 2.2.4.1. Laser à CO<sub>2</sub>:

C'est un laser à gaz émettant un rayonnement à 10,6micro mètre de longueur d'onde. Les rayonnements émis sont généralement en mode continu. Ce type de laser est le plus utilisé et cela pour multiple raisons:

D'une part on constate une forte puissance accessibles et un faible coût de fonctionnement. D'autre part, ce laser est caractérisé par sa fiabilité industrielle. Mais on ne doit pas nier la présence de quelques obstacles tels qu'on peut citer un faible coefficient d'absorption et une difficulté au cours du transport du faisceau qui nécessite un arrangement de miroirs.

### 2.2.4.2. Laser Nd: YAG

C'est un laser à solide dopé au néodyme. Le rayon laser, de longueur d'onde de l'ordre de 10,6 micro mètre, peut être émit soit en mode continue soit en mode pulsé.

La technologie Nd:YAG possède plusieurs avantages dont on peut citer principalement la grande souplesse d'utilisation qui se manifeste par la possibilité de transporter le faisceau par fibre optique. Le faisceau est également mieux absorbé par les substrats métalliques que dans le cas des autres faisceaux.

Le coût d'utilisation représente l'un des inconvénients qui menace ce type de laser.

#### **2.2.4.3. Laser à diode:**

Le laser à diode émet des rayons principalement en mode continu avec une puissance qui peut atteindre 3KW. Il prend naissance récemment dont son intérêt est le faible encombrement de la tête laser. Ce type de laser est caractérisé par une longueur d'onde de l'ordre de 920 nano mètre et il est très bien absorbé par les éléments métalliques.

#### **2.2.4.4. Laser à excimère:**

Ces lasers émettent des rayons dans l'UV et donc des longueurs d'onde entre 0,15 et 0,4 $\mu$ m. Le mode de fonctionnement des ces lasers est le mode impulsionnel avec une très courte durée ce provoque la présence des instabilités « pulse à pulse ». Ce type de source est très peu utilisé dans la gamme des applications.

### **2.3. TRAITEMENTS THERMIQUES**

Le traitement thermique est une opération qui consiste à générer des transformations métallurgiques dans la structure cristalline des matériaux en appliquant le cycle thermique approprié. Celui-ci comporte:

- une augmentation de la température suivant une courbe prédéfinie.
- un maintien en température suivant un ou plusieurs paliers.
- un refroidissement plus ou moins rapide en fonction du temps.

#### **2.3.1. Les avantages:**

Les apports thermiques, en quantité suffisamment faible mais bien localisés dans les zones critiques des surfaces des métaux, nous permet :

- D'améliorer la résistance des métaux à la fatigue et à l'usure
- Une limitation économique et modulable des apports énergétiques
- cycles rapides et non polluants autorisant le traitement en chaîne de fabrication
- qualité des pièces traitées en ce qui concerne la reproductibilité du durcissement, les risques de déformations, la facilité de mise en compression naturelle des surfaces, la faible épaisseur affectée par l'oxydation de celles-ci.
- De leur redonner les caractéristiques mécaniques qu'ils possédaient avant soudage et qui ont été affectés du fait du cycle thermique imposé par l'opération de soudage
- d'éviter la fissuration dans les zones soudées et thermiquement affectées
- d'augmenter les caractéristiques mécaniques du matériau d'origine.

#### **2.3.2. Les défauts [11] :**

Les principaux défauts provoqués par les traitements thermiques des pièces peuvent être résumés en trois points :

#### **2.3.2.1. Contraintes propres :**

Elles sont provoquées par les gradients de température au chauffage et au refroidissement entre les divers points de la pièce.

- Pour le chauffage, il faudrait que la montée en température dans le four soit faible car Si les gradients de température sont élevés, ces contraintes peuvent devenir suffisamment importantes pour provoquer des déformations.
- Pour le refroidissement, il faudrait que la vitesse soit faible pour réduire le gradient de température, mais pas trop afin d'éviter toute transformation indésirable.

#### **2.3.2.2. Fissures :**

Elles se forment le plus souvent au cours de la trempe. Pour parer à ce défaut incorrigible, on recommande lors du projet des pièces, d'éviter les saillies, les angles vifs, les raccordements brusques etc., de refroidir modérément en utilisant une trempe à deux bains.

#### **2.3.2.3. Déformations et gauchissements :**

Concernent surtout les pièces trempées à cause du refroidissement qui n'est pas homogène Au début, seules les couches externes se refroidissent et donc se transforment en martensite, ce qui provoque des contraintes de traction sur le cœur de la pièce qui est encore plastique. Puis les couches internes se transforment à leur tour, la dilatation correspondante, peut exercer sur les couches superficielles plus froides, donc peu plastiques, un effort de traction, le cœur étant en état de compression.

### **2.3.3. Dans quels cas on utilise ce type de traitement?[12]**

Le mécanicien doit prendre en compte les exigences concernant :

- les techniques de mise en forme : qui peuvent être :
  - ◆ l'usinage : intérêt d'emploi d'aciers judicieusement traités pour faciliter cette opération et d'aciers à usinabilité améliorée,
  - ◆ l'estampage ou le forgeage à chaud: nécessitant une garantie d'absence de défauts préjudiciables à cette opération,
  - ◆ la mise en forme à froid par extrusion ou frappe à froid: exigeant un traitement préalable spécifique et l'absence de défauts préjudiciables à cette opération
- la possibilité d'effectuer des traitements thermiques à diverses étapes de fabrication ou sur pièces finies afin d'atteindre les tolérances dimensionnelles et l'état de surface recherché.

### **2.3.4. Procédés industriels [13] :**

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de:

- Un échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation.
- Maintient à une température définie.
- Refroidissement.

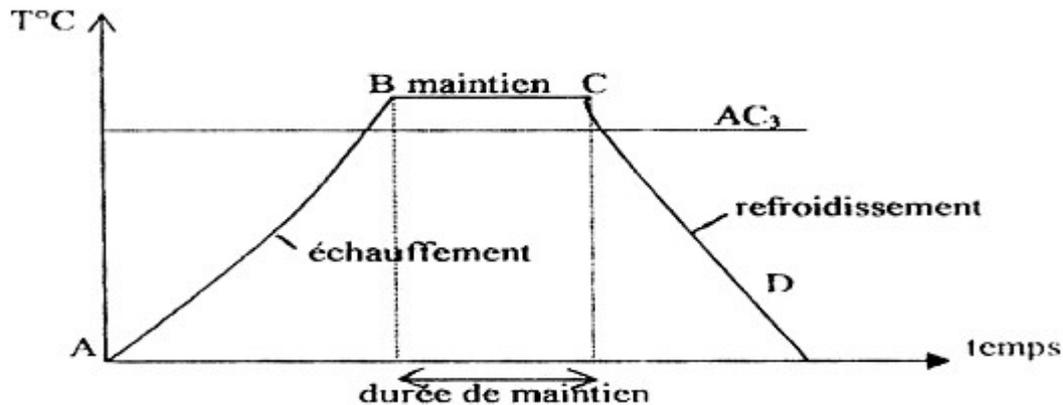


Figure 4: le procédé de traitement thermique [19]

#### 2.3.4.1. Recuit :

Le recuit est un traitement thermique appliqué pour obtenir un état d'équilibre thermodynamique. Son cycle est défini par les opérations suivantes:

- Chauffage à une vitesse contrôlée jusqu'à une température dite de recuit déterminée en fonction du but recherché.
- Une fois la température du recuit est atteinte, on effectue un maintien isotherme contrôlée ou des oscillations autour de cette température, pendant un temps déterminé qui varie selon le traitement antérieur, le volume de la pièce et en fonction du but à réaliser.
- Un refroidissement obligatoirement lent et qui dépend de la nature de l'alliage. Cette vitesse doit être proche de la vitesse critique de recuit afin de rester le plus proche possible des états d'équilibre.  
Elle varie en général pour les aciers au carbone entre 150 et 200 °/heure alors qu'elle est plus lente pour les aciers alliés à austénite de l'ordre de 30 à 100 °/heure.

Suivant l'état initial de l'acier et la température de recuit. On constate trois type de recuit:

- **Recuit d'homogénéisation:** Ce type de recuit s'applique aux aciers bruts de coulée et aux aciers moulés.

- **Recuit de recristallisation:** après le traitement thermique, la dureté et la résistance du métal augmentent et sa plasticité diminue et donc ce type de recuit est capable d'éliminer ces contraintes.
- **Recuit de détente:** nommer aussi recuit de relaxation ou recuit de stabilisation. Cette forme de recuit est appliquée aux pièces moulées, usinées et soudées

#### 2.3.4.2. Trempe :

La trempe est un traitement thermique qui a pour but de conférer les meilleures propriétés de résistance en vue de résister aux sollicitations mécaniques les plus durs.

Le traitement de trempe comporte d'abord un chauffage, dans des conditions semblables à celles des recuits, jusqu'à atteindre une température, généralement déterminée grâce aux diagrammes d'équilibre.

Un maintien suffisant à cette température de trempe afin d'obtenir une structure homogène, on constate que cette durée est évidemment d'autant plus grande que la taille de la pièce à tremper est plus importante.

Le refroidissement depuis la température de trempe s'effectue avec une vitesse supérieure à une vitesse critique caractéristique de l'alliage trempé.

Il existe trois types de trempe qui sont:

- **Trempe après chauffage à la flamme:** à l'aide d'un chalumeau la température de la surface de la pièce se transforme immédiatement jusqu'à la température désirée qui dépasse généralement 900°C

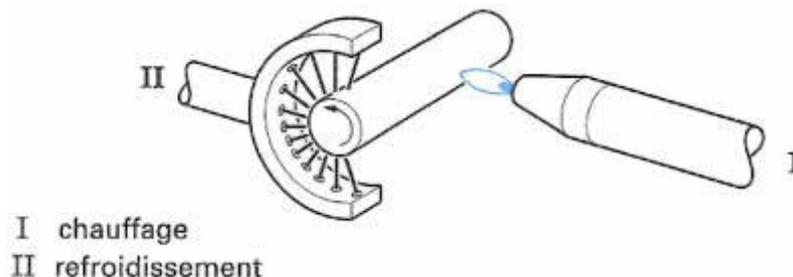


Figure 5: Trempe générale instantanée d'une surface de révolution [14]

- Trempe avec chauffage par induction en moyenne ou haute fréquence.
- Durcissements en phase solide par faisceau laser ou faisceau d'électrons.

#### 2.3.4.3. Revenu :

Le revenu est un traitement thermique appliqué à un matériau trempé en vue de lui conférer un compromis entre ses caractéristiques de résistance et de ductilité.

Son cycle thermique consiste aux opérations suivantes:

- Chauffage jusqu'à une température dite de revenu inférieure à la température de trempe et à celle du recuit. La nature des phases obtenues et leur composition sont en général voisines de celles obtenues par recuit, mais la structure micrographique est considérablement plus fine.
- Maintien contrôlé à cette température.
- Refroidissement jusqu'à la température ambiante.

#### **2.3.4.4. Traitements thermochimiques**

Durant les traitements thermochimiques, on essaye de modifier superficiellement la composition des alliages afin d'obtenir en surface soit des pièces pratiquement finies avec une dureté superficielle élevée, soit des pièces avec la dureté recherchée.

Les transformations réalisées en surface permettent en outre de faire naître des contraintes superficielles de compression très favorables à la tenue en service des pièces traitées

→ Il est nécessaire de chauffer ou de refroidir le plus lentement possible pour assurer une meilleure homogénéité de température, sans toutefois rester au-dessous des vitesses critiques nécessitées par les transformations recherchées : chauffage par paliers, trempe dans un fluide à température suffisamment élevée et contrôlée. On utilise aussi parfois, pour la trempe, des *poteyages* sur certaines parties des pièces pour y limiter la vitesse de refroidissement.

## **2.4. Traitements mécanique :**

### **2.4.1. Décapage mécanique :**

Cette méthode nous permet d'éliminer les couches adhérentes d'oxydes ou de revêtements protecteurs anciens mais dégradés. Pour réaliser le décapage mécanique, On utilise souvent en pratique industrielle comme procédés le brossage, le grattage, le sablage, le grenailage, le microbillage qui s'effectuent soit à sec, soit en phase humide. Dans le cas de décapage en phase humide un agent passivant est ajouté à l'eau afin de freiner la réactivité de l'atmosphère environnante avec la surface fraîchement mise à nu.

### **2.4.2. Le Galetage**

#### **2.4.2.1. Procédés industriel:**

Le galetage est une opération de lissage sans enlèvement de matière et de compactage des surfaces métalliques dans le corps du roulement qui consiste en une déformation plastique des couches périphériques du composant. [15]

Exemple d'application: le galetage d'un vilebrequin (en fin d'usinage, on réalise un galetage aux bords des tourillons et des manetons pour réduire le risque de fissuration.

#### **2.4.2.2. Différents types de galetage :**

Il existe 3 types de galetage; un Galetage de renforcement qui permet d'augmenter la résistance à la fatigue des pièces de construction soumises à des contraintes élevées, un Galetage dimensionnel ou de forme dont le but est de modifier la forme initiale de la pièce

soit pour la ramener dans la tolérance soit pour introduire des corrections volontaires destinées à un usage particulier. le troisième type appelé Galetage de surface ou super finition est réalisée sur des surfaces cylindriques, sur des sphères ou galetage de filets pour améliorer les flancs.[16]

#### **2.4.2.3. Avantages du galetage :[16]**

- Amélioration de l'état de surface de la pièce usinée.
- augmentation des propriétés de dureté.
- une grande précision
- Absence totale de copeaux
- Amélioration des caractéristiques mécaniques
- Autorisation d'un gain de 30% sur la dureté et la résistance à la rupture
- Amélioration jusqu'à 100% la résistance à la fatigue
- annulation des amorces de rupture en glaçant la surface
- Economie au niveau temps et matière
- Possibilité de fileter des pièces de très grandes longueurs.

#### **2.4.3. grenailage de précontrainte:[17]**

##### **2.4.3.1. procédé industriel :**

Le grenailage de précontrainte contrôlé ou « shot peening », est une technique sensible, basée sur la transformation structurelle des matériaux. Le procédé consiste à mettre des pièces mécaniques sous compression superficielle, par la projection de billes d'acier.

Cette opération de microbillage qui permet de créer une zone comprimée, est appliquée soit sur toute la surface soit localement.

Afin de résoudre un problème de grenailage, on tient compte de la nature du matériau à traité, du diamètre de la grenaille, du type de grenailleuse et de la vitesse de projection.

##### **2.4.3.2. Les avantages du grenailage de précontrainte :**

- Augmentation de la tenue au frottement et à la fatigue
- Augmentation de la résistance des pièces.
- Suppression des amorces de fissures
- Allègement de la pièce par réduction de l'engagement matière tout en augmentant les propriétés mécaniques

- Pas de modification du poids de la pièce avant et après grenailage

## 2.4.4. Le moletage

### 2.4.4.1. Principe :

Le moletage est une opération qui consiste à réaliser une déformation de la matière soit par roulage, où il s'agit de la pénétration d'une ou plusieurs molettes dans la pièce à travailler, soit par enlèvement de métal.

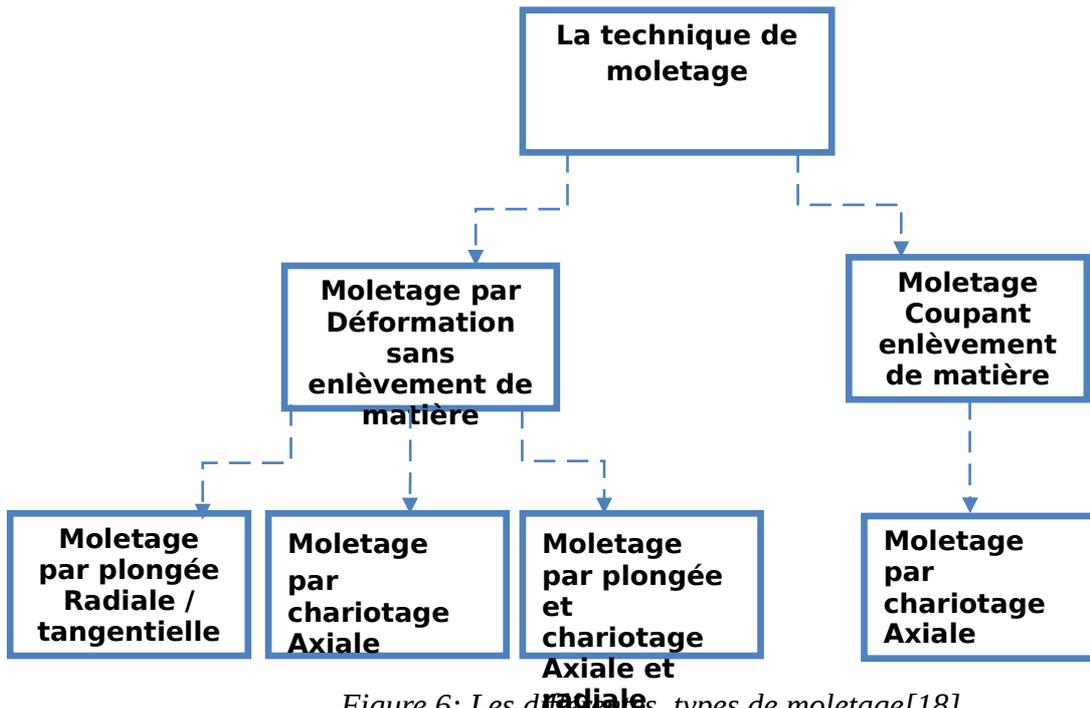


Figure 6: Les différents types de moletage[18]

Le moletage permet d'augmenter l'adhérence dans le but de faciliter la manœuvre d'une pièce. Mais elle peut être aussi la préparation d'une surface en vue d'obtenir une meilleure adhérence avec un autre composant dans le cas d'un surmoulage par exemple.

### 2.4.4.2. Applications :

	<b>Moletage par déformation</b>	<b>Moletage coupant</b>
<b>Application</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traitement de matière par déformation à froid</li> <li>• Le moletage par déformation du matériel en parois fines peut causer des difficultés</li> <li>• Multitude de domaine d'application <ul style="list-style-type: none"> <li>• Convient pour tous types de profils et marquages</li> <li>• Convient pour le moletage sur face et intérieur</li> <li>• Moletage près d'une face</li> <li>• Outil pouvant être appliqué à n'importe quelle position de la pièce usinée</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convient pour tous matériaux</li> <li>• Convient pour le moletage des matériaux en parois fines</li> <li>• Convient pour des profils visuels excellents</li> <li>• Domaine d'application limité <ul style="list-style-type: none"> <li>• Convient seulement pour les profils RAA et RGE</li> <li>• Convient seulement pour des pièces cylindriques avec une direction de travail axiale</li> <li>• Le moletage commençant au milieu de la pièce requiert une plongée</li> </ul> </li> </ul>

Tableau 3 : comparaison entre l'application du moletage par déformation et par enlèvement de métal.

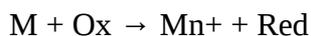
## 2.5. REVETTEMENTS :

Le revêtement est un terme qui désigne toute couche de métal obtenue sur une surface par un procédé de recouvrement, tel que la surface du métal les modifications du matériau de base à l'interface négligeable et la couche superficielle du métal résultat de ce traitement est presque homogène pour que la qualité de la couche soit définie par son épaisseur.

### 2.5.1. REVÊTEMENTS PAR VOIE HUMIDE [20]

#### 2.5.1.1. Démétallisation:

La démétallisation ou strippage est un traitement fondé sur l'oxydation du revêtement métallique par polarisation anodique du métal à modifier ou par l'intermédiaire d'un couplage oxydoréducteur entre deux couples rédox suivant la réaction :



On a deux méthodes de démétallisation :

- **Démétallisation électrolytique:**

La démétallisation électrolytique repose essentiellement sur une polarisation anodique de la pièce à traiter et donc on ionise sauf la surface superficielle de la pièce sans toucher le substrat : cette méthode n'est pas évidente et il est fort probable d'attaquer le métal de base à cause d'une mauvaise maîtrise des conditions opératoires. Malgré l'existence de plusieurs formules d'électrolytes, toutes ces formules sont basées sur des solutions acides ou bases généralement concentrées afin de ne pas toucher le métal de base.

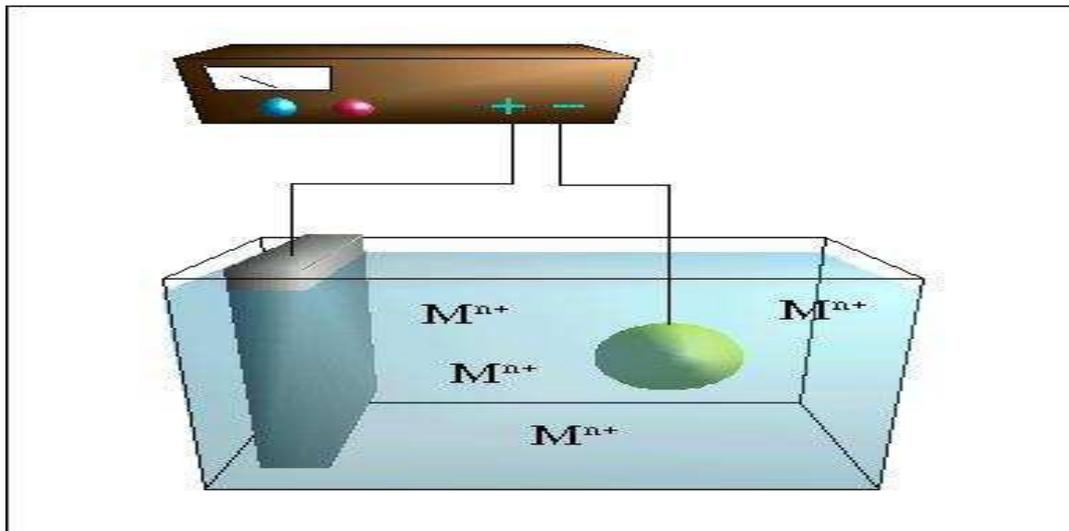


Figure 7: démétallisation électrolytique [22]

- **Démétallisation chimique:**

Le traitement chimique se pratique par une simple immersion de la pièce à traiter dans une solution bien déterminée et il met en œuvre des réactions d'oxydoréductions. Les outils principaux, qui sont capables d'atteindre les résultats recherchés, sont: la thermodynamique, cinétique électrochimique et en particulier les diagrammes tension-pH

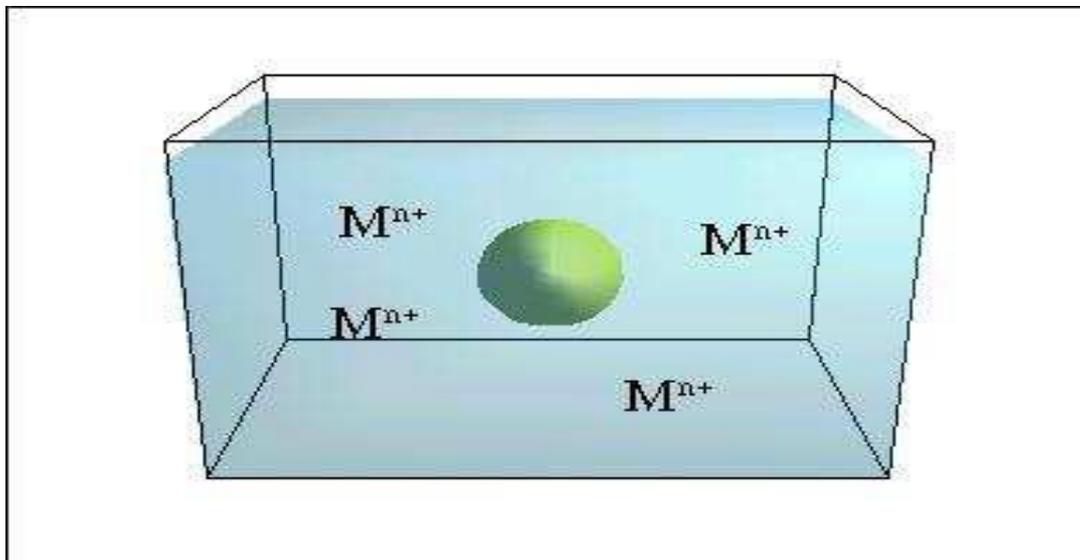


Figure 8: Démétallisation chimique [22]

→ Quelle que soit la solution adoptée, elle devra garantir la pérennité des pièces en préservant les caractéristiques mécaniques dimensionnelles... du substrat.

## 2.5.2. REVÊTEMENTS PAR VOIE SÈCHE

### 2.5.2.1. Dépôts physiques en phase vapeur

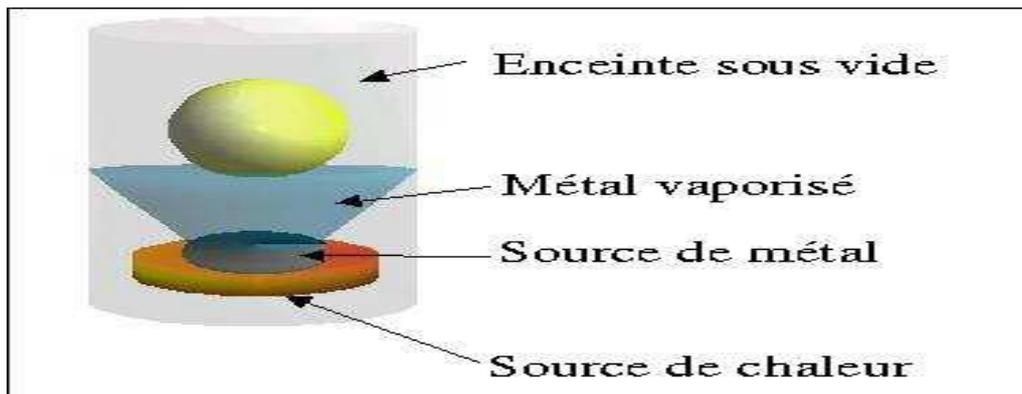


Figure 9: DÉPÔTS PVD [22]

Les dépôts PVD utilisent tous les techniques possibles permettant la limitation de la taille de la pièce à traiter et l'augmentation du coût du traitement ce qui nous permet d'avoir une qualité du dépôt la plus meilleure.

- **Evaporation thermique:**

Le traitement des pièces de géométrie complexe est très difficile vu que le flux d'atomes ou de molécules du corps à déposer est très directif. Pour élaborer des alliages on procède à une évaporation directe d'un alliage « mère » ou à une Co-évaporation de tous les constituants formant l'alliage désiré mais pour certains composés tels que TiO<sub>2</sub>, TiN, CdS... on procède l'évaporation réactive.

- **Dépôt ionique: (Ion Plating).**

On confère une énergie de plus en plus grande aux particules vaporisées, excitées et même ionisées grâce à la création d'un plasma soit d'argon soit de gaz réactif entre la source d'évaporation et le porte-substrat.

- **Pulvérisation cathodique: (Sputtering)**

L'arrachement des atomes du matériau se fait par un bombardement de particules énergétiques qui sont en général des ions Ar<sup>+</sup>. Afin d'augmenter la qualité et la vitesse des dépôts on modifie le système diode (diode radiofréquence, triode, cathode magnétron...). La pulvérisation réactive est souvent utilisée pour les dépôts de composés tels que les nitrures, les oxydes, les sulfures.

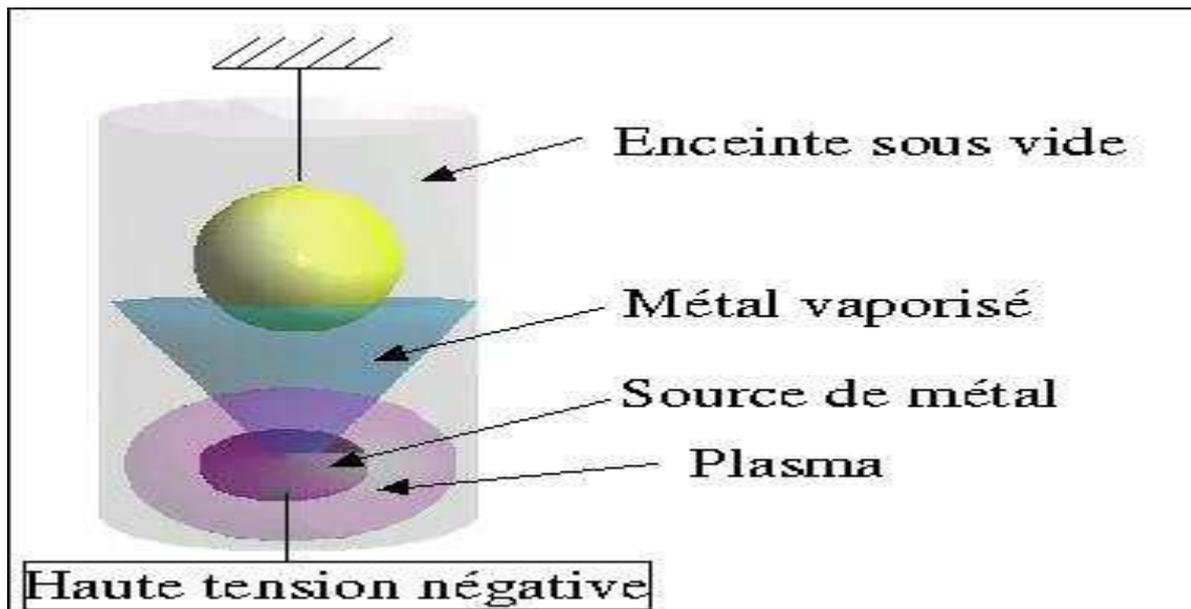


Figure 10: Pulvérisation cathodique [22]

- **Evaporation par arcs:**

Les arcs électriques ont des effets qui permettent la sublimation du matériau cible et l'augmentation de la vitesse des dépôts. La réalisation de multicouches alternées ou de nanomatériaux composites est possible en utilisant plusieurs sources.

### 2.5.2.2. Dépôts chimiques à partir d'une phase gazeuse (CVD) :

Afin de provoquer une réaction chimique on amène l'halogénure comme étant un composé volatil au voisinage de la surface à recouvrir et donc cette réaction chimique conduit au dépôt d'un produit solide qui réalisé soit en enceinte semi-étanche soit sous flux gazeux. De nombreux matériaux peuvent être déposés sur des substrats divers, avec une très bonne adhérence et une épaisseur importante. Les applications dans les domaines de l'usure, du frottement et de l'oxydation sont classiques.

### 2.5.2.3. Projection thermique: [21]

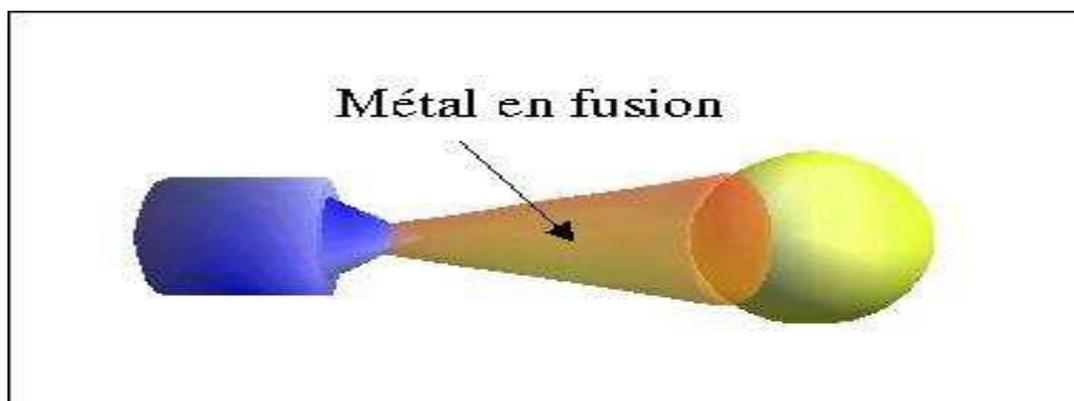


Figure 11: DÉPÔTS PAR PROJECTION THERMIQUE [22]

Le principe consiste essentiellement à fondre le matériau d'apport sur la surface du substrat par projection grâce à un gaz vecteur. Le mode opératoire se résume par: on fond la matière à déposer totalement ou partiellement dans une source de chaleur, la pulvérisation de la matière se fait par un gaz vecteur enfin les gouttelettes formées seront transportées jusqu'à la surface à revêtir.

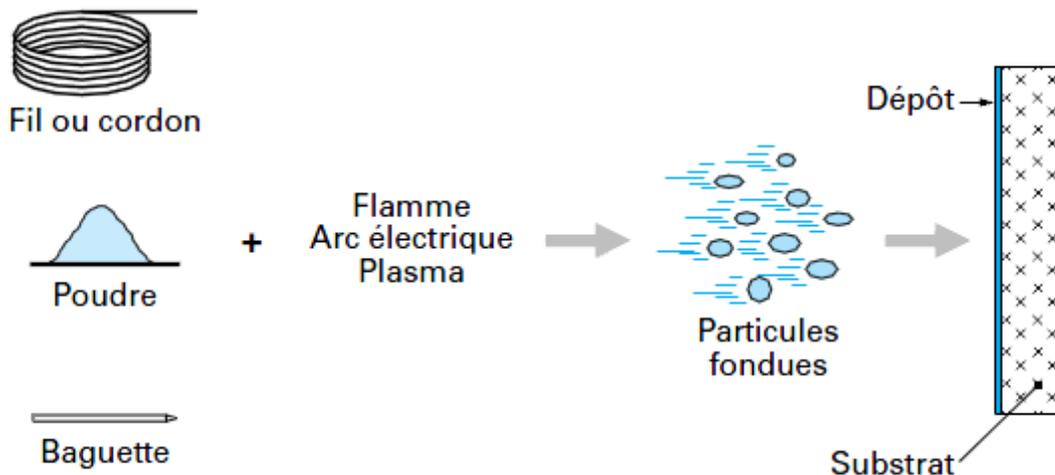
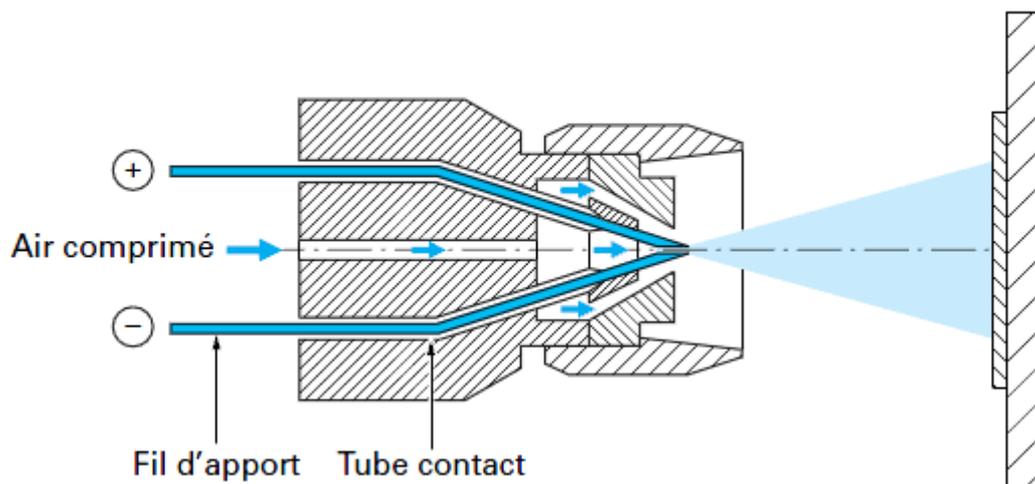


Figure 12: Principe fondamental de la projection thermique (doc. AREGA)[21]

- **Projection thermique flamme:** C'est la projection qui utilise l'énergie calorifique de la combustion de gaz
- **Projection thermique par arc électrique:** Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet



d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et le projetant sur le substrat.

Figure 13: Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique[21]

- **Projection thermique plasma soufflé:**

Solide	Liquide	Gaz	Plasma
--------	---------	-----	--------

Le plasma est considéré comme le 4e état de la matière.

La source thermique est un arc électrique éclatant entre une cathode et une anode dans un plasma gazeux donnant naissance à un flux gazeux à une très haute température généralement supérieure à 15000°C étranglé dans une tuyère et l'échappement se fait à une vitesse très grande. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz sur le substrat

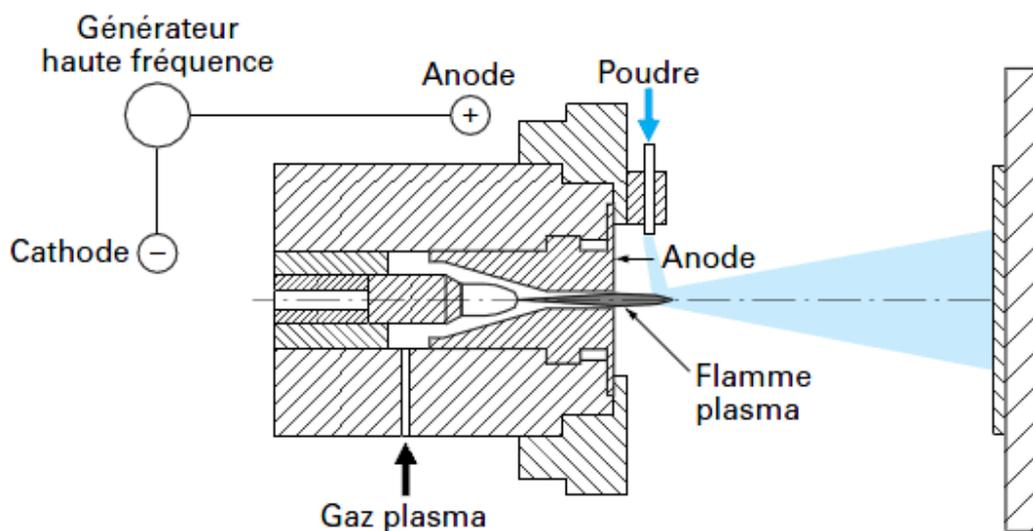


Figure 14: Principe de fonctionnement d'une torche plasma[21]

#### 2.5.2.4. Immersion des métaux fondus:

Cette méthode concerne uniquement les métaux ayant une température de fusion faible. Lors de la diffusion on constate qu'on se trouve dans le cas d'un revêtement de structure complexe, avec formation de divers composés tels que: êta, delta, dzêta et gamma.

#### 2.5.2.5. Faisceau à haute énergie:

Ces faisceaux sont essentiellement des faisceaux laser, bombardement électronique et implantation ionique nous donnent possibilités d'application prometteuses quoiqu'ils soient récemment découverts.

## CONCLUSION

L'étude du contexte industriel a permis de mettre en évidence que le traitement de surface est une activité polluante. Ils sont soumis à différents textes réglementaires dont ils ont comme objectifs d'une part la réduction des rejets polluants (en termes de concentration et de débits) et d'autre part la valorisation des déchets (recyclage, régénération, récupération). La fonctionnalisation des surfaces a toujours fait partie des procédés industriels de fabrication, pour des raisons cosmétiques ou pour lutter contre la corrosion des métaux. De plus en plus, de nouvelles fonctions sont ajoutées aux surfaces des objets, et de nouveaux procédés sont mis au point pour assurer des fonctions déjà existantes, en réponse à des enjeux économiques ou environnementaux.

Les enjeux liés à la maîtrise et au développement des technologies de traitement de surface sont multiples. L'enjeu environnemental est également prépondérant pour cet ensemble de technologies. L'enjeu sociétal rejoint ici la contrainte législative et normative. Par ailleurs, la

composition des matériaux déposés est également une source de pollution liée à l'usure des surfaces ou à une dissémination des objets finis sous forme de déchets. La mise au point de procédés de traitement de surface « propres », ne faisant plus appel à des solvants, ou utilisant des solvants moins polluants répond à une demande forte de la société et à des impératifs de normes de rejets pour les industriels. Par conséquent, il apparaît que la maîtrise des technologies de traitement de surface et la mise au point de nouvelles fonctions de surface est un atout majeur dans la conception des produits manufacturés. L'impact de ces technologies sur la compétitivité des industries et sur l'emploi est donc immédiat.

Les nouveaux procédés de traitement concernent aussi bien de nouvelles fonctions de surface que l'évolution des procédés de traitement inadaptés au contexte de la société actuelle. Les procédés de traitement ou de « fonctionnalisation » des surfaces sont extrêmement variés, faisant intervenir des briques technologiques telles que la pulvérisation par plasma, le traitement chimique de la surface ou du matériau de base de l'objet induisant une modification physico-chimique des surfaces, le greffage de fonctions moléculaires, la nano-structuration des surfaces, texturation, les procédés sol-gel, la mise en forme par attaque chimique sèche ou humide, les dépôts de poudre par voie électrostatique et le traitement par laser des surfaces métalliques, le polissage et nano-polissage.

## Références bibliographiques :

[0]Estoppey-Add or SA (Jan boesch)

[1]**Jacques DERUELLE** Traitements par voie chimique

[2][www.groupeiai.com/docs/fr/journaux/56.Journal\\_47.pdf](http://www.groupeiai.com/docs/fr/journaux/56.Journal_47.pdf) « consulté le 20/03/2011 »

[3]<http://www.a3ts.org/index.php/actualite/commissions-techniques/fiches-techniques-traitement-surface/passivation-conversion-sans-chrome-vi-version-5/>« consulté le 06/02/2011 »

[4]<http://www.a3ts.org/index.php/actualite/commissions-techniques/fiches-techniques-traitement-surface/chromatation/>« consulté le 06/02/2011 »

[5] **Théophile GUÉGUEN**, Oxalation des aciers spéciaux M 1 577

[6] **Abdelghani Belhocine**, *Obtention et caractérisation de carbure du chrome en film mince*

[7] **Théophile GUÉGUEN** Phosphatation M 1 575

- [8] [http://www.borer.ch/pdf\\_files.php?type=download&file=pdf\\_files/Industry/fran%C3%A7ais/Promotion/M%C3%A9tal/Proc%C3%A9d%C3%A9%20de%20passivation%20des%20aciers%20inoxydables.pdf](http://www.borer.ch/pdf_files.php?type=download&file=pdf_files/Industry/fran%C3%A7ais/Promotion/M%C3%A9tal/Proc%C3%A9d%C3%A9%20de%20passivation%20des%20aciers%20inoxydables.pdf) « consulté le 20/03/2011 »
- [9] **A. Longuet** Modélisation de la fabrication directe de pièces en Ti-6Al-4V par projection laser: couplage thermique, métallurgique, mécanique (page1)
- [10] **Cécile LANGLADE-BOMBA** Lasers de puissance et traitements superficiels (pages 4 et 5)
- [11] **SAID BENSAADA**, classification et désignation des aciers et des fontes : (page77)
- [12] **Guy MURRY**, Aciers pour traitements thermiques Propriétés et guide de choix (page8)
- [13] **Philippe POUPEAU**, Traitements thermiques des métaux et alliages (page 7et 8)
- [14] **Yves DESALOS**: Traitements thermiques superficiels des aciers (page3) année 2000
- [15] [http://www.baublies.de/fr/welche\\_geometrie.html](http://www.baublies.de/fr/welche_geometrie.html) consulté le 30/03/2011
- [16] **Stiefvater julien**, Galetage ou roulage à froid 16/05/07
- [17] <http://www.groupe-emi.fr/> consulté le 30/03/2011
- [18] [www.zeus-tooling.de](http://www.zeus-tooling.de) consulté le 30/03/2011
- [19] **SAID BENSAADA**: TRAIEMENTS THERMIQUES, CLASSIFICATION ET DESIGNATION DES ACIERS ET FONTES (page5) année 2010
- [20] **Gérard BÉRANGER**: Revêtements et traitements de surface. Approche technologique (pages 4, 5 et 6) année:2008
- [21] **Alain PRONER**: Revêtements par projection thermique (pages 6, 7 et 8) année: 1999
- [22] [http://www.google.tn/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBoQFjAA&url=http%2F%2Fflyc-plagourgue.ac\\_eunion.fr%2Fbtstc%2FDocpdf%2FFiche%2520traitement%2520de%2520surface.pdf&rct=j&q=D%C3%A9finitions%20de%20base%20en%20traitement%20de%20surface.pdf&ei=NTOWTd3AEI32sgbYq83PCA&usq=AFQjCNFVgOmijMbrw3BupzE-GOI0INZPLg&cad=rja](http://www.google.tn/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBoQFjAA&url=http%2F%2Fflyc-plagourgue.ac_eunion.fr%2Fbtstc%2FDocpdf%2FFiche%2520traitement%2520de%2520surface.pdf&rct=j&q=D%C3%A9finitions%20de%20base%20en%20traitement%20de%20surface.pdf&ei=NTOWTd3AEI32sgbYq83PCA&usq=AFQjCNFVgOmijMbrw3BupzE-GOI0INZPLg&cad=rja) "consulter le 01/04/2011"