

République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la  
recherche scientifique  
Université de M'sila  
Faculté de Technologie



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

## MASTER

En Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études

En vue de L'obtention du Diplôme de Master Académique

Option : Génie des Matériaux

intitule du sujet

### Amélioration des caractéristiques des métaux utilisant la projection thermique

Encadré par : Hemrit. F

Présenté par : Mahroug Eloulahi

devant le jury:

**Encadreur :** Hemrit. F  
**Président :** Hebbich.N  
**Examineur :** Mechta.A

Université de M'sila  
Université de M'sila  
Université de M'sila

M.C.B  
M.A.A  
D O C

**Année universitaire : 2018 /2019**



# Remerciement

*Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont à Mr «HAMRIT Fareh» mon encadreur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail. Mr Habbich. N en tant que Président de jury et Mme Mechta. A en tant que examinateur.*

*Nous remercierons aussi toutes mes amies de spécialités « Génie des Matériaux ». Et tous nos enseignants du département de Génie Matériaux qui m'ont encouragé à donner le meilleur de nous-même en assurant une formation aussi meilleure que possible.*

*Enfin, tous mes remerciements vont à ceux qui, de près ou de loin m'ont apporté leur aide. Je pense bien évidemment à tous ceux qui se sont montrés disponibles jusqu'au dernier moment.*

*MAHROUG Eloualhi*

# Dédicace

*Je dédie ce travail*

*Mes parents :*

*Ma mère qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*À mes sœurs.*

*Mes neveux sans exception surtout (CHAOUROUK, IKRAM, ALAA, ANIS,  
MERIAM, BASSMA)*

*Mon cher ami(LAOUIDJI Abdou)*

*Mahroug Eloualhi*

# *Sommaire*

<b>Introduction .....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les aciers</b>	
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>03</b>
<b>I.2. Les acier .....</b>	<b>03</b>
<b>I.2.1. Les différentes familles d'aciers .....</b>	<b>05</b>
<b>I.2.1.a. Aciers non allies a usages générales (types S, E,...) .....</b>	<b>05</b>
<b>I.2.1.b. Aciers spéciaux (type C) .....</b>	<b>05</b>
<b>I.2.1.c. Aciers patin ables .....</b>	<b>05</b>
<b>I.2.1.d. Aciers inoxydables .....</b>	<b>05</b>
<b>I.2.2. Aciers ordinaire sans traitement thermique .....</b>	<b>06</b>
<b>I.2.2.a. Aciers faiblement alliés .....</b>	<b>06</b>
<b>I.2.2.b. Aciers fortement alliées .....</b>	<b>06</b>
<b>I.3. Influence des éléments d'alliages .....</b>	<b>07</b>
<b>I.4. Désignation des aciers .....</b>	<b>08</b>
<b>I.5. Diagramme d'équilibre d'aciers .....</b>	<b>09</b>
<b>I.6. Composition des aciers.....</b>	<b>10</b>
<b>I.7. Les différents phases de l'aciers .....</b>	<b>10</b>
<b>I.7.1. La ferrite (F) .....</b>	<b>10</b>
<b>I.7.2. Austerite (A) .....</b>	<b>11</b>
<b>I.7.3. La cémentite (C) .....</b>	<b>11</b>
<b>I.7.4. La perlite .....</b>	<b>11</b>
<b>I.7.5. Troostite (T) .....</b>	<b>12</b>
<b>I.7.6. Bainite (B) .....</b>	<b>12</b>
<b>I.7.7. Sorbite (S) .....</b>	<b>12</b>
<b>I.7.8. Martnsite .....</b>	<b>12</b>
<b>I.7.9. Ledeburite I (LI) .....</b>	<b>13</b>
<b>I.7.10. Ledeburite II (LII) .....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre II : Les traitements thermiques</b>	
<b>II.1. Généraliste .....</b>	<b>14</b>
<b>II.1.1. Définition .....</b>	<b>14</b>
<b>II.1.2. Règle générale .....</b>	<b>14</b>
<b>II.1.3. Chauffage .....</b>	<b>15</b>
<b>II.2. Les traitements thermiques classiques .....</b>	<b>15</b>

# Sommaire

<b>II.2.1.</b> Les recuits .....	16
<b>II.2.1.a.</b> Recuit de normalisation .....	16
<b>II.2.1.b.</b> Recuit complet .....	17
<b>II.2.1.c.</b> Recuit de coalescence .....	17
<b>II.2.1.d.</b> Recuit de recristallisation .....	17
<b>II.2.1.e.</b> Recuit de détente .....	17
<b>II.2.2.</b> Trempe .....	18
<b>II.2.3.</b> Revenue .....	19
<b>II.3.</b> Traitement de surface .....	19
<b>II.3.1.</b> Trempe superficielle des aciers .....	20
<b>II.3.1.1.</b> Principe et but .....	20
<b>II.3.1.2.</b> Procède de la trempe superficielle .....	20
<b>II.3.1.3.</b> Moyens de chauffage d'une trempe superficielle .....	20
<b>II.3.1.3.a</b> Le chauffage par induction .....	20
<b>II.3.1.3.b.</b> Trempe superficielle par flamme .....	21
<b>II.3.2.</b> Traitements thermochimiques .....	21
<b>II.3.2.1.</b> Traitement thermochimique avec des éléments léger .....	22
<b>II.3.2.1.a.</b> La cémentation .....	22
. Cémentation solide .....	23
. Cémentation liquide .....	23
. Cémentation gazeuse .....	23
. Cémentation ionique .....	24
<b>II.3.2.1.b.</b> Carbonitrurions (750-850c°) .....	25
<b>II.3.2.1.c.</b> La boruration .....	25
. Propriétés d'une surface de borure .....	26
<b>II.3.2.1.d.</b> La nitruration .....	26
. La nitruration gazeuse .....	28
. La nitruration ionique .....	28
. La nitruration en bain de sel .....	29
<b>II.3.2.1.e.</b> Siliciuration .....	29
<b>II.3.2.2.</b> Traitement thermochimiques avec des éléments l légers .....	30
<b>II.3.2.2.a.</b> La cyanuration .....	30
<b>II.3.2.3.</b> Traitement thermochimiques avec des éléments lourd .....	30

# *Sommaire*

II.3.2.3.a. Métallisation par cémentation .....	30
II.3.2.3.b. La chromisation .....	30
<b>Chapitre III : La projection thermique</b>	
III.1.1. Historique et évolution de projection thermique .....	32
III.1.2. Principe de la projection thermique .....	33
III.1.2.1. Projection par arc électrique .....	34
III.1.2.2. projection plasma .....	35
III.1.2.3. Projection supersonique à froid (cold spray) .....	36
III.1.2.4. Projection flamme supersonique (HVOF) .....	37
III.1.2.5. Projection à détonation .....	37
III.1.2.6. Projection flamme .....	38
III.1.2.6.a. Projection flamme poudre .....	39
III.1.2.6.b. Projection flamme- fil .....	39
III.1.3. Projection flamme- fil .....	41
III. 1.3.1. Avantage et inconvénient du procédé flamme –fil .....	42
III.1.3.2. Paramètre opératoires du procédé à flamme- fil .....	42
III.3. Formation et structure des dépôts .....	43
III.3.1. Ecrasement de particules projetée sur structure .....	44
III.3.2. structure générale des revêtements réalisés par projection thermique .....	45
III.3.2.1. Structure métallurgique .....	45
III.3.2.2. Oxydes .....	46
III.3.2.3. La densité .....	46
III.3.2.4. Adhérence .....	46
III.3.2.5. Dureté .....	46
III.3.3. Préparation de surface .....	47
III.3.3.1. Dégraissage .....	47
III.3.3.2. Décapage .....	47
III.3.3.3. Le sablage .....	47
III.3.3.4. Préchauffage .....	48
III.3.4. Paramètre de projection influence sur le dépôt .....	48
<b>Conclusion</b> .....	50
<b>Références bibliographique</b>	
<b>Résumé</b>	

## Liste des tableaux

<b>Tableau. I.1</b> : Pourcentage des éléments	06
<b>Tableau. I.2</b> : Elément d'addition et leur effet sur l'acier	08
<b>Tableau. I.3</b> : pourcentage des éléments d'addition	09
<b>Tableau. III.4</b> : Caractérisation des différents types de projection thermique	41

## Liste des figures

<b>Fig.I.1</b> : Filière d'élaboration d'acier	04
<b>Fig.I.2</b> : Diagramme d'équilibre d'acier	10
<b>Fig.II.3</b> : Cycle des traitements thermiques	14
<b>Fig.II.4</b> : Les étapes de chauffage pour des aciers	15
<b>Fig.II.5</b> : Cycle de traitement du recuit complet	16
<b>Fig.II.6</b> : structure d'un acier AISI11 à l'état recuit	17
<b>Fig.II.7</b> : Cycle thermique de la trempe et revenu	18
<b>Fig.II.8</b> : Trempe superficielle par induction	21
<b>Fig.II.9</b> : Chauffage par flamme	21
<b>Fig.II.10</b> : Four des traitements thermochimiques	22
<b>Fig.II.11</b> : procédé de cémentation	22
<b>Fig.II.12</b> : Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe	24
<b>Fig.II.13</b> : Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2h d'un acier	24
<b>Fig.II.14</b> : Couche de boruration sur l'engrenage	26
<b>Fig.II.15</b> : Couche de nitruration	27
<b>Fig.II.16</b> : Le diagramme fer- Azote	27
<b>Fig.II.17</b> : Couche de chromisation	31
<b>Fig.III.18</b> : Principe de la projection thermique	34
<b>Fig.III.19</b> : Schéma de principe de la projection à l'arc	35
<b>Fig.III.20</b> : Schéma de principe de la projection plasma	36
<b>Fig.III.21</b> : Schéma du principe de la projection supersonique HVOF	37
<b>Fig.III.22</b> : Schéma de Principe du canon à détonation	38
<b>Fig.III.23</b> : Schéma de principe d'un pistolet flamme poudre	39
<b>Fig.III.24</b> : Schéma d'un pistolet flamme fil	40
<b>Fig.III.25</b> : Schéma de principe de la projection thermique à flamme fil	42
<b>Fig.III.26</b> : Schéma d'écrasement de la particule	44
<b>Fig.III.27</b> : Schéma de principe de formation d'une dépôt élaboré par projection thermique	45

## Liste des abréviations

**Re** : Limite élastique

**R m** : Résistance a la traction

**A** : Allongement

**KCV** : La résilience

# Introduction

---

## Introduction :

En construction mécanique la conception d'organes de machines exige d'avoir recours à des aciers aptes aux traitements thermiques afin de pouvoir réaliser les propriétés de résistance.

Les traitements thermiques qui permettent d'atteindre un ensemble de caractéristiques déterminées peuvent être classés en deux catégories :

- Traitements destinés à modifier la caractéristique dans la masse, recuit, trempe et revenu.
- Traitements de la surface on destine deux types.

1- Les traitements thermiques localisés chauffage superficiel et trempe.

2- Traitements superficiels thermo-chimiques de cémentation, traitements nitruration, carbonitruration toujours accompagnés d'un traitement dans la masse.

Les aciers sont pour but l'obtention d'une dureté élevée en surface jointe à une ténacité et une ductilité et une d'un véritable matériau composite présentant une amère si lie et une zone superficielle de grandes duretés avec augmentation simultanée de la résistance à l'usure et dans beaucoup ductilité importèrent à cœur. La structure est alors macroscopiquement hétérogène et est de cas de la limite d'endurance aux sollicitations cycliques (fatigue) . On peut obtenir ce résultat de diverses manières correspondant à des traitements industriels très utilisés pour certains d'entre eux. Modification d'une zone superficielle par traitement thermique localisé : durcissement par trempe après chauffage superficiel. Modifications d'une zone superficielle par traitement thermo-chimique de diffusion d'un élément d'alliage par contact avec milieu adapté :

- nitruration : diffusion d'azote.
- sulfone-nitruration : diffusion simultanée d'azote et de soufre.
- chromisation : diffusion de chrome.
- boruration : diffusion de bore.
- shérardisation : diffusion de Zn.

Modification d'une zone superficielle par d'un ou plusieurs éléments suivie d'un traitement thermique affectant la zone modifiée.

- cémentation: diffusion de carbone suivie d'un durcissement par trempe.
- carbonitruration : diffusion simultanée d'azote de suivi d'un durcissement par trempe.

Dans tous les cas précédents le résultat est une modification de la constitution physico-chimique d'une superficielle de faible (quelques de micromètres à quelque millimètres) tout en préservant les propriétés de la zone centrale.

## Introduction

---

-En plus de modifier la microstructure de la surface et ,partant , ses propriétés mécaniques , les traitements thermo-chimiques en modifient la compositions , et ce sur profondeur pouvant atteindre 1 ou2 mm. On introduit l'influence de la composition chimique surtout des éléments d'addition sur les propriétés mécanique obtenus.

-Augmentation de la dureté permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs [1].

Le plan du mémoire se décompose en trois chapitres :

Le premier chapitre, traite de brefs rappels bibliographiques concernant les aciers.

Le deuxième chapitre présente une étude sur les traitements chimiques.

Dans le troisième chapitre, on présente une généralité sur la projection thermique et ses types.

# Chapitre I : Généralité sur les aciers

---

## I. Généralités sur les aciers

### I.1. Introduction :

Depuis longtemps, l'acier joue un rôle très important dans la vie quotidienne des hommes. Il est utilisé dans plusieurs domaines. Il est à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Donc la connaissance de la structure et du comportement des aciers au cours de leur utilisation reste impérative. Les matières premières de fer, le fer s'y trouve essentiellement combiné sous forme d'oxyde ferrique  $Fe_2O_3$  ou oxyde magnétique  $Fe_3O_4$  (magnétite). [2] Le fer en sera donc extrait par réduction les matières premières de la charge doivent :

- Répondre à des contraintes chimiques :
- Analyse précise des lits de fusion.
- Présente une granulométrie compatible un bon écoulement dans la cuve du haut fourneau.
- Présenté des caractéristique physico-chimiques bien déterminées : réductibilité, résistance aux chocs thermiques, résistance à l'écrasement. [2]

### I.2. Les aciers :

Les aciers sont essentiellement alliages de fer et de carbone, qui contiennent en certains autres éléments introduit en faibles quantités au moment de leur élaboration (dans les aciers alliés, on introduit par exemple des éléments d'alliage dans le but de modifier les propriétés de l'acier). [2]

## Chapitre I : Généralité sur les aciers

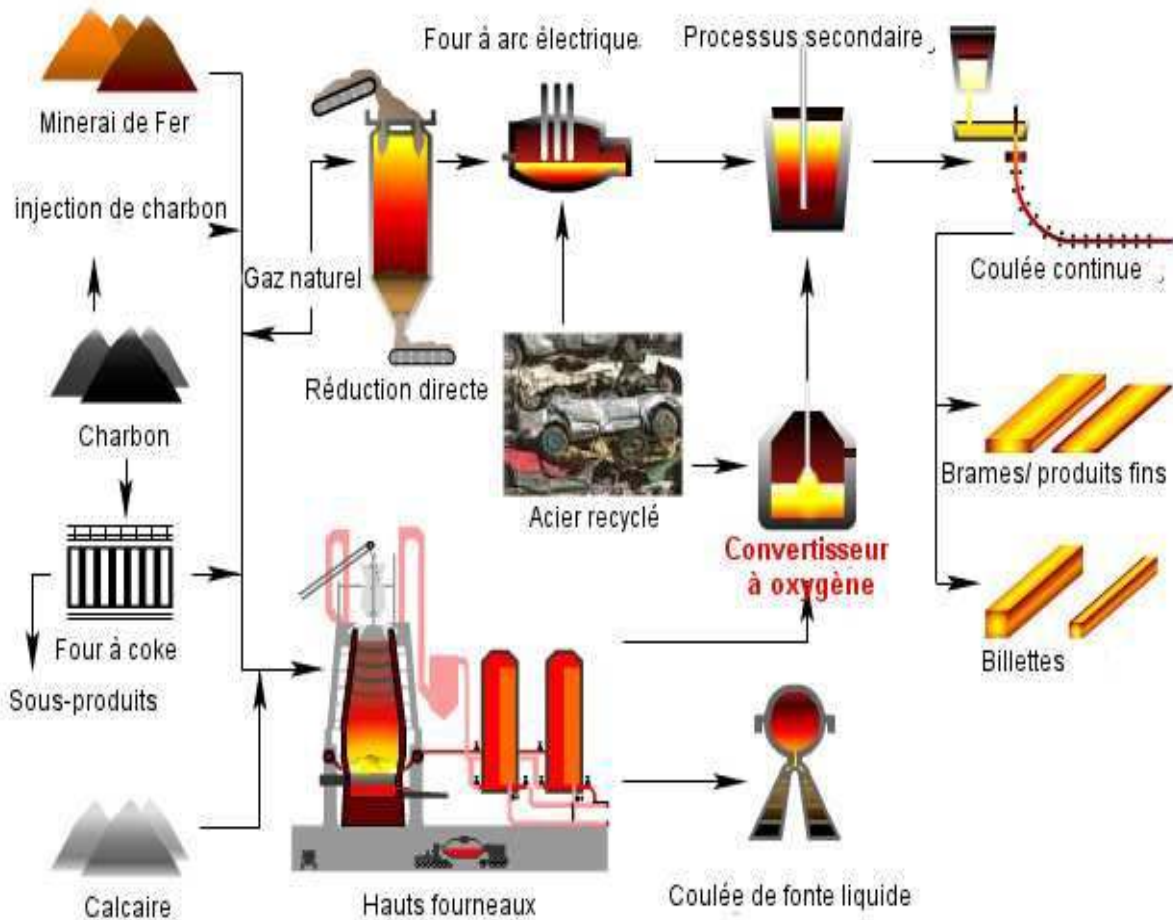


Figure. I.1: Filières d'élaboration d'acier.

Dans tous les cas, le teneur en carbone des aciers est inférieure à 1,5 %. En fonction du nombre d'éléments d'alliage ajoutés fer et de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliage à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation, la production de l'acier met en œuvre plusieurs filières selon les matières premières utilisées et le procédé employé. [3]

Ce pendant quel que soit le cas on met toujours en évidence trois opérations fondamentales :

**-Elaboration:** Série de processus métallurgiques dont le dernier au moins a lieu en phase liquide et qui est destinée à aboutir à une nuance d'acier désirée.

**-Coulée:** passage de l'état liquide à l'état solide.

**-Mise en forme :** mis à part le cas particulier du moulage, elle est obtenue par laminage qui est une déformation plastique à chaud ou à froid conduisant à des produits plats (tôles) ou longs (profilés, barres, etc.).

# Chapitre I : Généralité sur les aciers

---

C'est cette dernière classification que nous adoptons ici et qui nous permet de considérer les quatre familles suivantes :

- Les aciers au carbone d'usage général.
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non.
- Les aciers inoxydables.
- Les aciers à outils.[3]

## I.2.1. Les différentes familles d'aciers

Il existe des aciers faiblement alliés, à faible teneur en carbone, et au contraire des aciers contenant beaucoup d'éléments d'alliage (par exemple, un acier inoxydable typique contient 10 % de nickel et 18 % de chrome en Masse). [4]

### I.2.1.a. Aciers non alliés à usage général (types S, E, ...) :

Ils ont une faible teneur en carbone et sont les plus utilisés, leurs qualités pouvant varier. Leurs applications vont de la construction soudée à l'ameublement en passant par l'électroménager.

### I.2.1.b. Aciers spéciaux (type C) :

Leur composition est plus précise et plus pure et correspond à des usages définis à l'avance. Leurs applications courantes sont : forets, ressorts, arbres, matrices.

### I.2.1.c. Aciers patinables :

Les aciers à résistance améliorée à la corrosion sont des aciers faiblement alliés appelés également aciers patinables ou aciers auto protecteurs, dans certaines conditions d'exposition, ils ont la faculté de se couvrir d'une couche protectrice appelée « patine ». Ils sont connus sous différents noms de marque comme CORTEN, INDATEN, DIWETEN. Ces aciers font également l'objet de la norme NF EN 10025-5 de mars 2005.

### I.2.1.d. Aciers inoxydables :

L'acier inoxydable est une des trois grandes familles d'aciers qui présente une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage (Déformation irréversible). C'est un acier fortement allié. Ses applications sont multiples: chimie, nucléaire, mais aussi couteaux et équipements ménager. Ces aciers contiennent au moins 12% de chrome.

# Chapitre I : Généralité sur les aciers

## I.2.2. Aciers ordinaires sans traitement thermique :

Les aciers ordinaires correspondent à des produits de grande consommation. Ils sont obtenus dans les convertisseurs, fours martin. Ce sont des aciers qui n'ont pas fait l'objet d'une addition volontaire d'éléments d'alliage et qui ne doivent pas dépasser les valeurs limites comme le montre le tableau ci-dessous.[4]

éléments	P+S	Si+Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Al	Ti	Cu	Pb
%	0,20	2	0,5	0,25	0,10	0,05	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,10

Tableau .I.1 : pourcentage des éléments.

### I.2.2.a. Aciers faiblement alliés :

Ce sont des aciers dont la teneur en n'importe quel élément d'addition ne doit pas dépasser 5 %, ils sont désignés par :- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone exprimé en centième pour cent (multiplié par 100).- Suivi de symboles normalisés des éléments alliés dans l'ordre des teneurs décroissantes, c'est à dire, le premier élément indique toujours l'élément dont la teneur est la plus élevée.- Les symboles sont suivis par des nombres indiquant la teneur moyenne des éléments d'additions multiplié par 4 pour les éléments C, K, M, N, S et par 10 pour tous les autres éléments.

### I.2.2.b. Aciers fortement alliés :

Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments a une teneur supérieure à 5 %. Dans cette catégorie, on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc. Leur désignation normalisée est toujours précédée par la lettre Z suivie :

-D'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pourcent.

-Des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur décroissante.

-Des chiffres indiquant la teneur moyenne en pourcent des éléments d'addition.

Dans le cas des aciers fortement alliés, les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 comme dans le cas des aciers faiblement alliés. [4]

# Chapitre I : Généralité sur les aciers

## I.3. Influence des éléments d'alliages :

L'action des éléments d'addition sur les caractéristiques des aciers dépend essentiellement de deux facteurs .

Le premier facteur est le type de modification qu'ils apportent de stabilité de l'austénite. Certains éléments , appelés gamma-gènes tels que le nickel et le manganèse ,élargissent le domaine de stabilité de l'austénite et abaissent les températures de transformation . On peut donc obtenir des structures austénitiques.

le chrome et le molybdène rétrécissent le domaine de stabilité de l'austénite et élèvent les températures de transformation. Le deuxième facteur est la tendance des éléments à se substituer en partie aux atomes de fer de la cémentite  $Fe_3C$  , Ou à former des carbures . Par ordre d'affinité avec le C : Cr, W, Mo, V, Ti, Nb. Le Si et le Ni qui ne forment pas des carbures se retrouvent en solution dans le ferrite. [5]

Les éléments les plus fréquemment incorporés sont outre le silicium et le manganèse , le nickel et le chrome ; le molybdène, le tungstène ... Selon le pourcentage élément confère à l'acier des propriétés spécifiques.

éléments	Effet sur l'acier
Carbone	Augmente la dureté, la résistance à la traction et à la corrosion, diminue la ductilité et la malléabilité.
Silicium	Présent dans tous l'acier, a faible pourcentage (de 0,2 à 0,5 %) : rôle de désoxydant. Allie et à plus forte teneur : améliore la limite élastique et accroît la résistance à l'oxydation.
Manganèse	Augmente la trempabilité des aciers alliés et permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable , il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite , ou il remplace une partie du fer .
Nickel	Augmente la ductilité, surtout à la très basse température.
Chrome	Agit sur les points de transformation de l'acier et ralentit ainsi la vitesse de transformation de l'austénite au cours du refroidissement ( = augmentation de la trempabilité ) .
Molybdène	Augmente la trempabilité des aciers alliés.

## Chapitre I : Généralité sur les aciers

Bore	Ajouté à l'acier en quantité extrêmement faible, accroît la trempabilité et, dans des aciers très spéciaux, améliore la résistance mécanique et la ductilité aux températures élevées.
Azote	Abaisse le point de transformation $AC_3$ , il diminue la ductilité et la ténacité.
Tungstène et Vanadium	Forts caractères alpha gène et carbogène, fréquemment utilisés pour obtenir des aciers durs et résistants.
cobalt	Utilisé dans des aciers très spéciaux dont, il modifier certains processus structuraux.
Phosphore et Cuivre	En faibles proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air.

**Tableau I.2 :** éléments d'additions et leurs effets sur l'acier.

### I.4. Désignation des aciers :

Selon l'usage auquel on les destine, on peut classer les aciers soit en fonction de leurs propriétés mécaniques ( $Re_{0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A$ ,  $KCV$ ), soit en fonction de leur composition chimique.

Dans chacun des cas, des organismes nationaux établissent une normalisation qui peut varier d'un pays à l'autre.

Les aciers sont classés en deux groupes :

- Aciers non alliés (aciers ordinaires et aciers spéciaux,).
- Aciers alliés (faiblement et fortement alliés).

Le tableau ci-dessous donne un aperçu sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers alliés et non alliés. [5]

% des éléments d'addition	Acier non allié	Acier faiblement allié	Acier fortement allié
Al	< 0,3		> 0,3
B			> 0
Co	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3
Cr	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5
Cu	< 0,4		> 0,4
Mn + Si	< 1,5	1,5 à 3	> 3
Mo	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
Ni	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5

## Chapitre I : Généralité sur les aciers

---

Pb	< 0,4		> 0,4
V	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
W	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3

**Tableau. I.3:** pourcentage des éléments d'additions.

A titre d'exemples, citons les organismes de normalisation suivants :

**ACNOR** : Association canadienne de normalisation (Canada).

**ASTM** : American Society for Setting and Materials (États-Unis).

**SAE** : Society of Automobile Engainées (Etats - Unis).

**AISI** : American Iron. And Steele Institute (Etats -Unis).

**DIN** : Deutsche institut fur normaliseront (Allemagne).

**AFNOR** : Association française de normalisation (France).

### I.5. Diagramme d'équilibre d'acier :

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite  $Fe_3C$  (6.67%C) est fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008 % C et 2% C) et les fontes (de 2% C à 6.67% C) . [1]



## Chapitre I : Généralité sur les aciers

---

homogène polyédrique.

Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à 760°C.

### I.7.2. Austénite :

Du nom de William Chandler Roberts-Austen (1843-1902), l'austénite (fer  $\gamma$ ) est une phase du fer, stable entre 910°C et 1394°C. Elle a une structure cristallographique cubique à faces centrées, notation Strukturbericht A1.

Cette structure permet une grande solubilité du carbone (jusque 2,1% massique à 1147°C).

L'austénite est amagnétique. Certains éléments d'alliage (manganèse, nickel, azote par exemple) augmentent la plage de stabilité de l'austénite ; ils sont dits «gamma gènes». Avec un dosage suffisant, ils permettent, grâce à une trempe, d'obtenir de l'austénite à température ambiante à l'état métastable. C'est le cas des aciers dits austénitiques. La grande majorité des aciers inoxydables est austénitique, car ils combinent de bonnes résistances à la corrosion avec des propriétés mécaniques plus élevées que l'acier Ferritique. D'autres éléments (silicium, molybdène ou chrome par exemple) tendent à déstabiliser l'austénite. On appelle ces éléments « alpha gènes ».

### I.7.3. La cémentite (C) :

La cémentite ou carbone de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67%. Elle est magnétique jusqu'à 210°C et très dure (HB = 700) mais fragile. La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :- Lamellaire dans la perlite lamellaire.- Grains dans les aciers ayant subi un traitement thermique de recuit.- Et de précipités inter granulaires dans les aciers ayant un % C > 0,8.

Au point de vue du diagramme Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  et lors du refroidissement, la cémentite peut exister en trois différentes formes de liaison mais avec la même composition chimique.

### I.7.4. La perlite (P) :

C'est un eutectoid formé d'un mélange de grains de cémentite sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88% de ferrite + 12% de cémentite) elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,8% de carbone. Elle présente dans l'acier ordinaire toujours une teneur en carbone de 0,85%. La perlite est dure (HV= 200) et assez ductile  $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$ ,  $A = 1040$ .

## Chapitre I : Généralité sur les aciers

---

### I.7.5. Troostite (T) :

C'est une perlite extrêmement fine obtenue pour des vitesses de refroidissement assez importantes. Les nodules de troostite qui se développent à partir des joints de grains sont constitués par des lamelles ferrite-cémentite non séparables en microscopie optique. Cette microstructure est caractérisée d'une trempe douce.

Les caractéristiques mécaniques de la troostite sont assez importantes ( $HV \approx 450$ ).

### I.7.6. Bainite (B) :

Ce constituant qui présente une morphologie aciculaire est obtenu après des vitesses de refroidissement élevées.

On distingue des bainites supérieures qui peuvent être considérées comme étant des plaquettes de ferrite contenant des carbures orientés parallèlement à l'axe de la plaquette, et des bainites inférieures qui s'assimilent à des plaquettes de ferrite contenant une fine précipitation de carbures dispersés dans la plaquette de ferrite. Ces carbures ne sont discernables qu'en microscopie électronique.

Les caractéristiques mécaniques associées à une texture bainitique approchent celles d'une structure martensitique.

### I.7.7. Sorbite (S) :

Ce constituant n'est plus un produit de décomposition directe de l'austénite puisqu'il correspond, en fait, à un stade de décomposition la martensite (pour des températures supérieures à environ  $400^\circ\text{C}$ ). C'est un mélange complexe de carbure finement réparti dans une matrice ferrique distordue. Elle conduit à des propriétés mécaniques intéressantes par exemple la dureté reste encore élevée  $HV \approx (300 \text{ à } 400)$  pour une bonne résilience.

### I.7.8. Martensite :

En ce qui concerne les aciers, la martensite (fer  $\alpha$ ) est une phase métastable issue de la transformation sans diffusion de l'austénite en dessous d'une température martensitique. C'est une solution solide d'insertion sursaturée en carbone dans le fer  $\alpha$ , de même composition que l'austénite initiale. La transformation austénite - martensite consiste en un changement du réseau cristallin (avec un faible déplacement des atomes de fer), mais elle n'affecte pas le carbone: on appelle ce type de transformation «displacive». La martensite cristallise dans le

## Chapitre I : Généralité sur les aciers

---

système quadratique (prisme droit à base carrée qui est ici très voisin d'un cube). La martensite est ferromagnétique.

Elle possède une grande dureté ( $HV > 800$ ) et une fragilité notable.

Elle a une structure en aiguilles (plaques) ou en lattes, visibles avec un grossissement suffisant, après attaque par les réactifs classiques.

Ces aiguilles correspondent à des plaquettes internes dont le plan habituel est voisin de (225), orientées à l'intérieur de chaque grain initial d'austénite suivant trois directions parallèles aux côtés d'un triangle équilatéral.

Le durcissement de la martensite est d'ordre physico-chimique ; chaque atome de carbone, plus volumineux que l'interstice où il est inséré, écarte les deux atomes de fer voisins, le réseau du fer est ainsi fortement distordu, et ces perturbations en bloquant le mouvement des dislocations durcissent l'acier.

### **I.7.9. Ledeburite I (LI) :**

C'est un mélange eutectique entre l'austénite et la cémentite et provenant lors du refroidissement du métal liquide avec 4,3% de carbone à la température eutectique. Le ledeburite I contient 51,4% d'austénite et 48,6% de cémentite et peut contenir de 2,06 à 6,67% de carbone. Son domaine de stabilité est  $723^{\circ}\text{C}$  à  $1147^{\circ}\text{C}$ .

### **I.7.10. Ledeburite II (LII) :**

Le ledeburite (II) provient durant le refroidissement du ledeburite (I) par décomposition eutectoidale du composant contenant 51,4% d'austénite en perlite à la température  $723^{\circ}\text{C}$ . Le ledeburite II contient 51,4% de perlite et 48,6% de cémentite. Durant la solidification des alliages de fer et de carbone il y a lieu trois types de transformations iso thermiques, il s'agit des réactions péristaltiques, eutectiques et eutectoides.

## Chapitre II : Les traitements thermiques

### II. Les traitements thermiques :

#### II.1. Généralistes :

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution). [6]

Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement) [6].

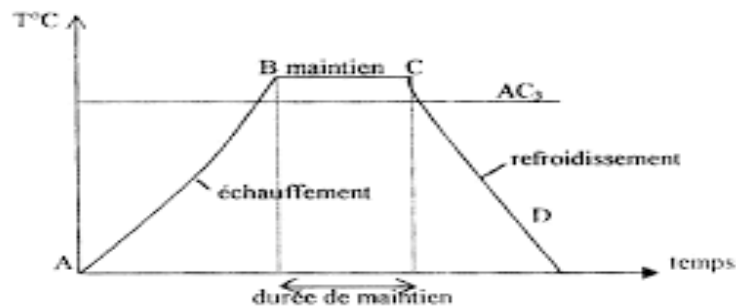


Figure. II.3 : cycle des traitements thermiques.

##### II.1.1. Définition:

Ensemble d'opérations de chauffages et de refroidissements, destinées à modifier les propriétés et les caractéristiques d'un produit métallurgique de manière à adapter son aptitude à un emploi déterminé. Les aciers, les fontes et certains alliages d'aluminium et de cuivre sont sensibles à leurs effets [7].

##### II.1.2. Règle Générale :

Faire coexister dans une pièce destinée à un usage défini les valeurs maxima admissibles des caractéristiques (généralement mécaniques) qui varient en sens inverse, à savoir : (Résistance à la rupture  $R_m$  — Résistance élastique  $R_e$  — Dureté H), avec (Allongement  $A\%$  — Résilience).

**Remarque :** Dans les cas difficiles le choix d'aciers spéciaux permet de secondé l'effet du traitement thermique malgré qu'il soit préférable d'utiliser un acier ordinaire

## Chapitre II : Les traitements thermiques

convenablement traité à la place d'un acier spécial ayant subi un mauvais traitement. Les opérations de traitements thermiques comportent un cycle composé d'un chauffage, d'un maintien à température, d'un refroidissement. Elles sont destinées à produire des constituants de trempe, de revenu, de recuit [8].

### II.1.3. Chauffage :

La montée en température doit être suffisamment lente pour éviter les tapures et les déformations, en principe elle doit être d'autant plus lente que le métal est plus Dur, plus riche en carbone et en éléments spéciaux tels me (Mn, W, Cr). Que la section à chauffer est importante et massive, que la conductibilité du métal est plus faible (Figure II.04).

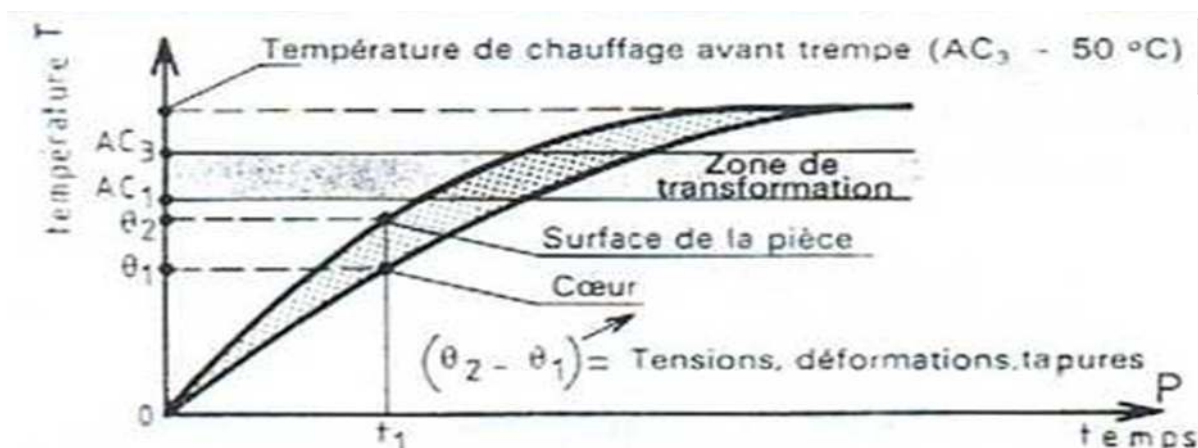


Figure .II.4 : les étapes de chauffage pour les aciers.

**Remarque :** On ne préchauffe généralement pas de pièce des petites dimensions de forme simple, de section uniforme - conçues en aciers doux ou mi-durs déconstruction. Par contre on préchauffe toujours les pièces en aciers durs, aciers outils, aciers rapides. On admet que la fragilité s'étend jusqu'à  $550\text{ °C}$  à  $650\text{ °C}$ . La température de préchauffage étant inférieure environ  $30\text{ °C}$ . Pour certains aciers nécessitant une température de traitement élevée (ex : aciers rapides deux préchauffages sont recommandés:  $650$  et  $870\text{ °C}$ ). [9]

### II.2. Les traitements thermiques classiques :

A l'état solide les aciers sont de caractère cristallin, le cristal est formé à partir de motif (maille élémentaire) répété périodiquement dans les 3 dimensions de l'espace et formant un réseau de structure, en est une représentation schématisée purement conventionnelle, car aucun cristal ne représente un réseau aussi simple. Les cristaux ainsi formés peuvent atteindre individuellement des dimensions voisines du dixième de millimètre et pouvant aller au-delà du centimètre. La zone marquant le passage d'un cristal au cristal voisin est désignée sous le nom de joint, elle est effectuée par un changement d'orientation du système cristallin [10].

## Chapitre II : Les traitements thermiques

Le nom de grain désignant le cristal doit être attribué avec précaution, car il peut s'appliquer à des agrégats constitués de plusieurs cristaux [10].

### II.2 .1. Les recuits :

Les recuits ont pour but d'adoucir les aciers en éliminant les effets des étapes antérieures de leur fabrication (écrouissage ou trempe), ainsi que les hétérogénéités de structure imputables à leur élaboration (forgeage, laminage, soudage). Les recuits permettent en outre de retrouver les structures d'équilibre des aciers. Selon les buts visés et les modifications structurales obtenues, on distingue plusieurs types de recuits : le recuit de normalisation, le recuit complet, le recuit de coalescence, le recuit de recristallisation et le recuit de détente [11].

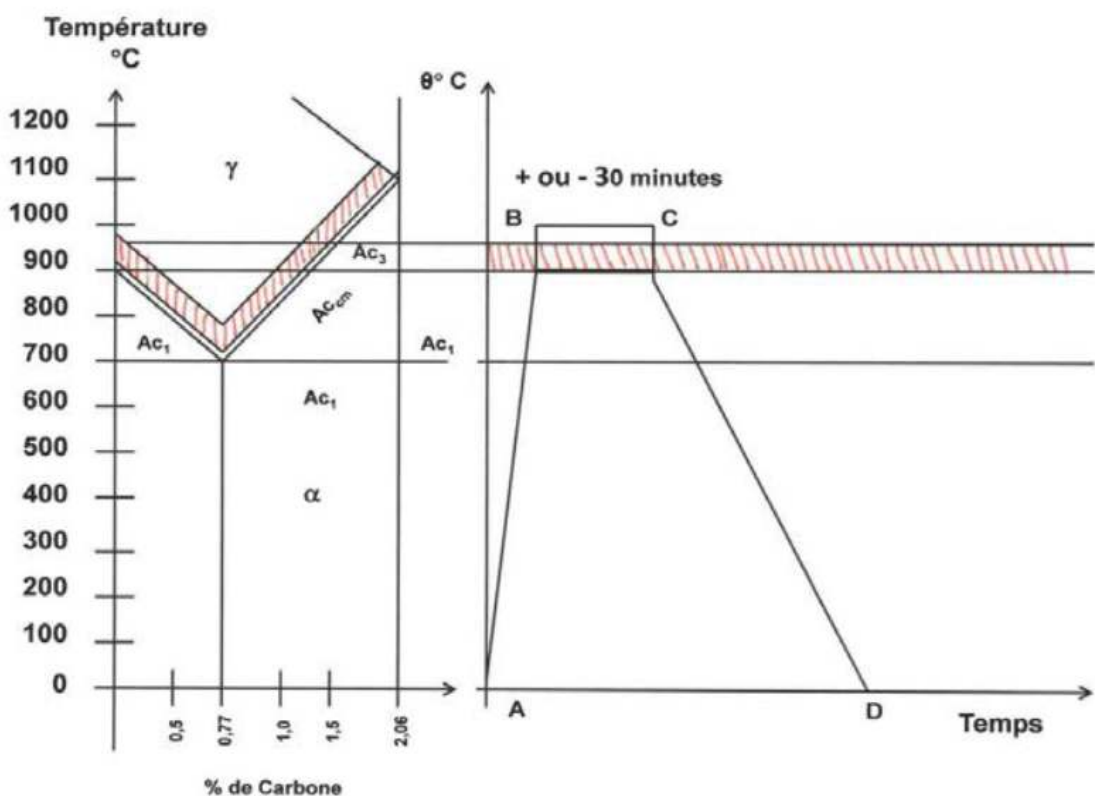


Figure. II.5: cycle thermique du Recuit complet.

#### II.2 .1.a. Recuit de normalisation :

On procède au chauffage dans le domaine austénitique (50 °C au-dessus de la température d'austénitisation,  $A_3$ , et au maintien pendant environ une heure. Après quoi, on laisse l'acier refroidir à l'air. La structure obtenue est un mélange de ferrite et de perlite fine. On cherche ici à obtenir une microstructure uniforme (affinement de la taille des grains) et à améliorer les propriétés de l'acier, après une déformation à chaud. [11]

## Chapitre II : Les traitements thermiques

---

### II.2 .1.b. Recuit complet :

Ce recuit est techniquement semblable à la normalisation ; toutefois, pour obtenir une perlite plus grossière et un adoucissement plus marqué des propriétés, on laisse l'acier refroidir au four. [11]

### II.2 .1.c .Recuit de coalescence :

On procède au chauffage et au maintien prolongé à une température légèrement inférieure à la température de début de transformation, AC1.

On cherche ainsi à obtenir une perlite globularisée, afin de rendre les aciers durs plus facilement usinables. La structure obtenue est moins dure que celle d'une perlite lamellaire. [11]

### II.2 .1.d. Recuit de recristallisation :

On procède au chauffage dans le domaine Ferritique (entre 500 et 700 °C) et on contrôle le refroidissement.

On applique ce traitement aux produits déformés à froid (tôles minces laminées à froid, par exemple) pour faire disparaître les structures d'écrouissage et faciliter ainsi une mise en forme ultérieure (emboutissage, pliage, etc ). [12]

### II.2.1.e. Recuit de détente :

On procède au chauffage dans le domaine Ferritique (entre 500 et 650 °C) et on veille à ce que le refroidissement soit lent. Ce traitement permet de réduire, voire d'éliminer, les contraintes internes engendrées au cours de la fabrication (assemblages soudés, pièces moulées et forgées, etc.). [12]



**Figure .II.6:** structure d'un acier AISI H11 à l'état recuit

## Chapitre II : Les traitements thermiques

### II.2.2. Trempe :

On veille ici à ce que le refroidissement soit suffisamment rapide, afin d'éviter la transformation de l'austénite en produits d'équilibre (ferrite et perlite) et d'obtenir plutôt une transformation martensitique. La vitesse critique de trempe est la vitesse de trempe minimale qui permet d'éviter tout début de transformation perlitique ou bainitique et d'obtenir ainsi une structure entièrement martensitique. Cette vitesse critique de trempe, qui est fonction de la composition chimique de l'acier et de son histoire antérieure (taille des grains austénitiques, conditions d'austénitisation, etc.), permet de définir la trempabilité de l'acier. La trempabilité est la capacité d'un acier de se transformer en martensite dans des conditions de refroidissement données. Un rond d'acier ordinaire (contenant 0,60 % de C) de 100 mm de diamètre, lorsqu'il est trempé à l'eau, ne subit une transformation martensitique complète que sur quelques millimètres de profondeur, par contre, ce même rond peut être trempé à cœur s'il contient en plus des éléments d'alliage. L'acier du second rond est par conséquent plus trempable que celui du premier. La trempabilité d'un acier est déterminée par le diamètre critique. On appelle diamètre critique le diamètre d'une barre (trempée dans des conditions données), dont la structure, au centre, se compose de 50 % de martensite et de 50 % de perlite. Puisque ce diamètre est fonction de la sévérité du milieu de trempe, le diamètre critique idéal est celui qu'on obtiendrait dans un milieu de trempe de sévérité infinie. Dans un tel milieu, la surface de la pièce trempée atteindrait instantanément la température du bain de trempe, et la vitesse de refroidissement, en un point quelconque de la pièce, ne dépendrait que des propriétés thermiques du métal et non de la résistance de l'interface métal-bain de trempe à l'écoulement de la chaleur. [13]

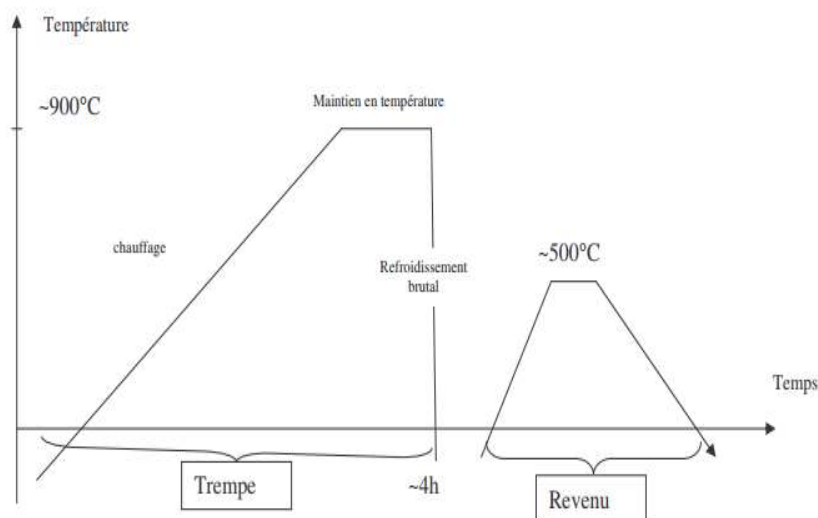


Figure. II.7: cycle thermique de la trempe et revenu.

## Chapitre II : Les traitements thermiques

---

### II.2.3.Revenue :

Après la trempe, on chauffe l'acier entre 150 et 650 °C pendant environ une heure. Nous avons déjà vu que, au cours du revenu, il y avait décomposition de la martensite et retour partiel à une structure comportant les constituants d'équilibre ferrite et carbures. Si le revenu diminue les propriétés mécaniques de l'acier (limite d'élasticité, résistance et dureté), il améliore par contre sa ductilité et sa ténacité. Toutefois, dans certains domaines de température, le revenu peut s'accompagner d'une diminution de la ténacité. Cette sensibilité à la fragilisation au cours du revenu - fragilité au bleu - se manifeste pour des températures de revenu allant de 250 à 350 °C, températures auxquelles la cémentite commence à se former; cette sensibilité est par ailleurs reliée à la présence d'impuretés (N, P ou S). Une autre forme de fragilisation au cours du revenu apparaît dans les aciers alliés entre 400 et 575 °C ; dans ce cas, ce sont des traces de Sn, Sb ou P qui entraînent, par ségrégation inter granulaire, une fragilisation des anciens joints de grains austénitiques. [14]

### II.3. Traitements de surface :

Les traitements thermiques dans la masse améliorent les propriétés mécaniques des aciers, mais ils s'accompagnent d'une diminution de leur ténacité. Or, pour de nombreuses utilisations, ce sont surtout les propriétés des surfaces qui sont importantes (dureté superficielle et résistance à l'usure, par exemple). Dans ces cas, il est donc préférable de ne traiter que la surface de la pièce, afin que son cœur, de résistance moyenne, conserve une bonne ténacité. Les pièces pour lesquelles on effectue de tels traitements sont aussi nombreuses que variées : arbres de torsion, dents d'engrenages et de pignons, arbres à came, surfaces de glissement, etc. Pour effectuer les traitements de surface, puisqu'il n'est plus nécessaire que l'acier ait une forte trempabilité, on utilise en général des aciers au carbone ordinaires, ou des aciers peu chargés en éléments d'addition et qui sont sujets à une faible pénétration de trempe. Les surfaces traitées, à cause des transformations qui accompagnent le traitement, sont le siège d'importantes contraintes de compression résiduelles. Cet état de contrainte exerce un effet bénéfique sur la résistance à la fatigue et sur l'endurance des pièces ainsi traitées, puisque les microfissures auront plus de difficulté à se former dans les zones superficielles mises en compression. On distingue deux types de traitements de surface :

1. Les trempes superficielles, appliquées uniquement à la surface des pièces.
2. Les traitements thermochimiques, qui modifient la composition de la surface. Dans les deux cas toutefois, la pièce traitée est hétérogène, car, entre le cœur et la surface, s'établit des gradients de structure et de propriétés. [15]

## **Chapitre II : Les traitements thermiques**

---

### **II.3.1. Trempe superficielle des aciers :**

#### **II.3.1.1. Principe et but :**

Il consiste à chauffer localement la surface d'un pièce en acier jusqu'à la température d'austénitisation, à la refroidir ensuite à une vitesse suffisante pour obtenir un constituant de trempe énergétique.

Le refroidissement s'effectue le plus souvent par un jet d'eau sous pression, ont pour but l'obtention d'une dureté élevée en surface jointe à une ténacité et une ductilité importantes à cœur, on peut obtenir ce résultat par une modification de la zone superficielle de la pièce soit par un traitement thermique localisé (chauffage superficielle et trempe), soit par un traitement thermo-chimique de diffusion d'un élément métallique (aluminium, chrome...) ou d'un élément non métallique (carbone; azote, bore). Par voie solide, liquide, gazeuse ou ionique. [15]

#### **II.3.1.2. Procède de la trempe superficielle :**

La grande dureté provient du refroidissement énergétique venant à la fois de l'intérieur de la section, le volume de métal à refroidir étant faible par rapport à celui resté froid. Dans le cas d'un traitement thermique classique, la quantité de chaleur à évacuer de toute la masse de la pièce ne permettrait d'obtenir ce résultat qu'en choisissant un acier fortement allié.

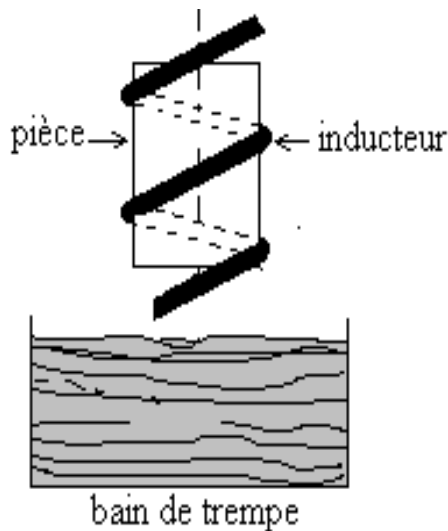
On distingue deux types de traitements de surface les trempe superficielles, appliquées uniquement à la surface des pièces, et les traitements thermo-chimiques, qui modifient la composition de la surface, dans les deux cas toutefois, la pièce traitée est hétérogène, car, entre le cœur et la surface, il s'établit des gradients de structure et de propriétés. [14]

#### **II.3.1.3. Moyens de chauffage d'une trempe superficielle :**

##### **II.3.1.3.a. Le chauffage par induction :**

Le chauffage à la flamme oxyacétylénique ou oxy-métriques ont couramment utilisés. Un générateur de courant haute fréquence, crée un champ magnétique alternatif dans lequel est placée la pièce à chauffer. L'ensemble forme sans fer, l'échauffement de la pièce est dû aux pertes par courant s'induits (de FOUCAULT), la circulation des courants s'effectue à la périphérie de la pièce sur une épaisseur qui est fonction de la fréquence, la profondeur chauffée, varie en fonction de fréquence  $f$  (en HZ) et le temps et la puissance, la fréquence restant fixe. Dans les applications courantes de chauffage par induction, la puissance spécifique utilisée de 1 à 4 KW/cm<sup>2</sup>. [15]

## Chapitre II : Les traitements thermiques



Ce procédé s'applique aux pièces de formes extérieures et intérieures et convient pour la série. Cependant son installation est onéreuse.  
Exemple d'application : vilebrequin ; arbre à came

Figure .II.8:trempe superficielle par induction.

### II.3.1.3.b. Trempe superficielle par flamme :

Les courants induits examinés précédemment sont remplacés par une flamme qui, dirigée perpendiculairement à la surface à durcir , élève température , la flamme est escamotée ou déplacée, remplacée immédiatement par une douche munie de jet d'eau de refroidissement qui produit l'effet de trempe recherché. [16]

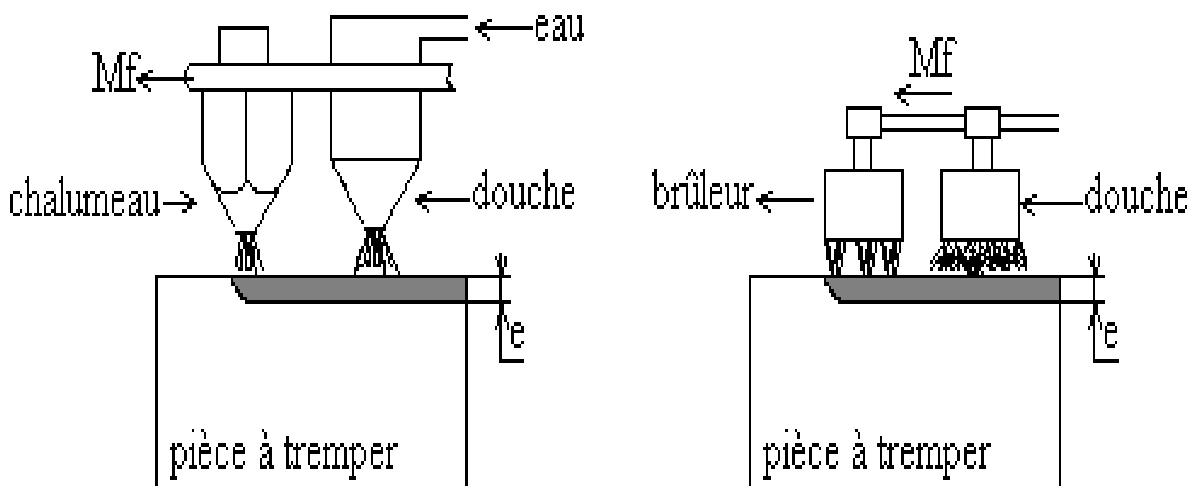


Figure .II.9: chauffage par flamme.

### II.3.2.Traitements thermochimiques :

En plus modifier la microstructure de la surface et, partant , ses propriétés mécaniques , les traitements thermochimiques en modifient la composition , ce une profondeur pouvant atteindre 1 ou 2 mm .Ces traitements thermochimiques sont :

## Chapitre II : Les traitements thermiques

- La cémentation diffusion le carbone.
- La boruration diffusion le bore.
- La nitruration diffusion l'azote.-La cyanuration et carbonisation.-La métallisation par cémentation [17].

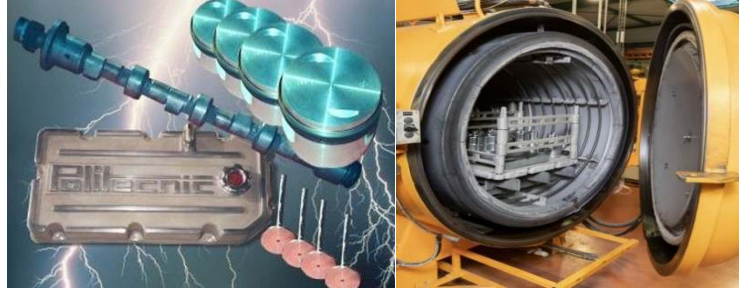


Figure. II.10 : four des traitements thermo-chimiques.

### II.3.2.1. Traitements thermo-chimiques avec élément léger :

#### II.3.2 .1.a. La cémentation :

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier et ayant pour but principal, l'obtention d'une surface dure et résistance à l'usure par enrichissement de la couche superficielle en carbone jusqu'à une concentration de 0,8 à 1,2 % C et par trempe ultérieure suivie d'un revenu à basse température. Ce procédé accroît également la limite de fatigue. La cémentation est appliquée aux aciers à faible teneur en carbone (0,5 à 0,02 % C) pour les grosses pièces jusqu'à 0,3 % C. Le choix de la nuance d'acier est nécessaire pour que le cœur de la pièce garde sa ductilité. Il existe trois modes essentiels de cémentation.- Par agents solides contenant du carbone. - Par gaz.- Par agents liquides. Généralement la profondeur maximum de pénétration est de 2 mm, donc il est exigé que les différentes opérations d'usinage doivent être réalisées avant le traitement de cémentation, c'est à dire, les pièces à cémenter sont fournies après l'usinage qui doit prévoir alors une surépaisseur de rectification de 0,05 à 0,1 mm, ou après finition. [17]

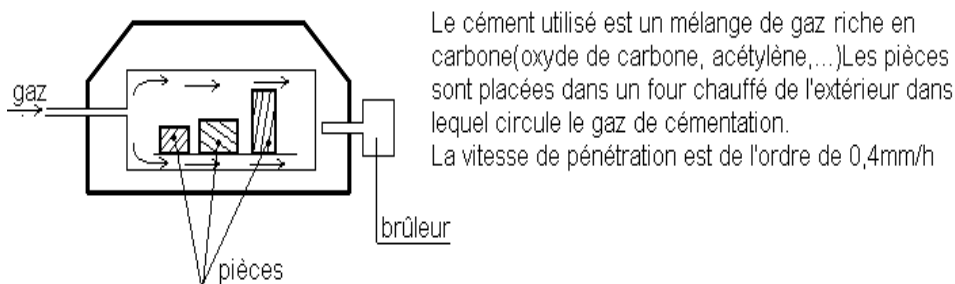


Figure. II.11: procédé de cémentation.

## Chapitre II : Les traitements thermiques

---

### -Cémentation solide :

Dans cette opération est un ciment solide, le plus souvent le charbon de bois. Pour accélérer la cémentation, on ajoute au charbon des activateurs dont le carbonate de baryum  $BaCO_3$  et le carbonate de sodium  $Na_2CO_3$  à raison de 10 à 40 % du poids du charbon. Le ciment solide largement utilisé se compose de charbon de bois, de 20 à 25% de  $BaCO_3$  et jusqu'à 3,5% de  $CaCO_3$ . Les pièces sont placées dans des caisses soudées en acier, ou plus rarement, en fonte. La température de cémentation varie de 900 à 940 °C. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C. Le carbone atomique est obtenu de la manière suivante :  $2CO \rightarrow CO_2 + O_{at}$

L'addition du carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone :  $BaCO_3 + CBaO + 2CO$  [18]

### -Cémentation liquide :

Les pièces sont plongées dans un bain de sel fondu à base de cyanure de baryum et de sodium vers 980°C. Cette technique relativement simple de mise en œuvre permet un chauffage homogène et une action chimique régulière. [19]

### -Cémentation gazeuse :

La cémentation gazeuse est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par installation et décomposition à chaud (combustion) d'hydrocarbures, atmosphères qui sont caractérisées par leur potentiel carbone. Le potentiel carbone d'une atmosphère est défini comme étant « la teneur en carbone à la surface d'un échantillon de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation considérée dans les conditions retenues ». Il y a carburation si, initialement l'activité du carbone dans le métal est inférieure au potentiel carbone de l'atmosphère. Dans le cas inverse, il y a décarburation du métal. Quand ces deux variables sont égales le système est à l'équilibre et n'évolue pas. Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libéré s'insère dans le réseau cubique à face centrée du fer.

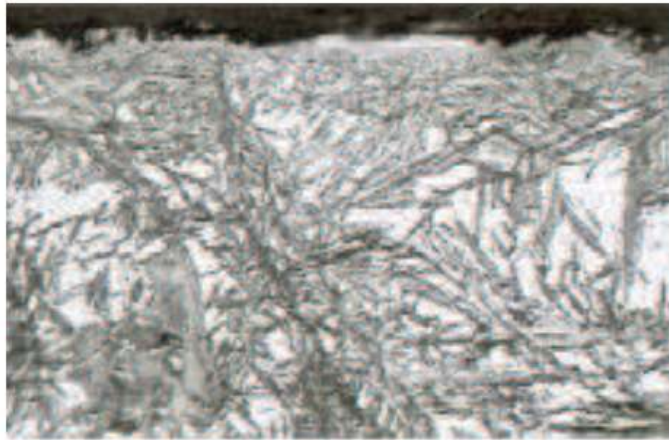


Au cours de la cémentation, il peut y avoir dans la partie superficielle de la couche enrichie, une oxydation des éléments manganèse, chrome et silicium présents dans l'acier. Par suite de la diminution de la trempabilité qui en résulte, il peut y avoir au cours de la trempe formation de constituants autres que la martensitique auront pour effet d'abaisser notablement la résistance à la fatigue. La formation des oxydes internes est un phénomène typique dans la

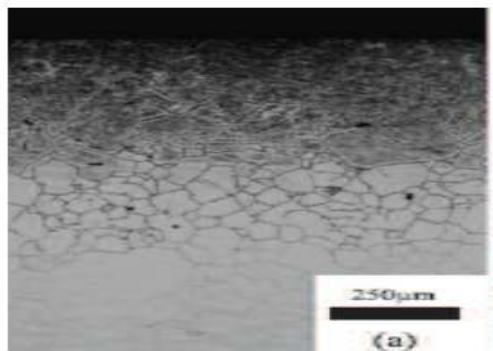
## Chapitre II : Les traitements thermiques

---

cémentation gazeuse. Les quantités des oxydes internes formés et leur profondeurs dépend des conditions de la cémentation (température, temps....), plus la profondeur de la :



**Figure. II.12:** Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe.



**Figure. II.13:** Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier.

### - Cémentation ionique

Les pièces à cémenter sont placées en position de cathode à l'intérieur d'une enceinte contenant un hydrocarbure sous pression réduite. L'application d'une différence de potentiel électrique entre une anode et une cathode (la pièce) conduit à la formation d'une décharge électrique dans l'enceinte et d'une couche luminescente qui entoure la pièce, dont le chauffage est assuré par le plasma. De façon très simplifiée, les gaz carburants sont dissociés pour fournir du C libre. Par rapport aux autres techniques de cémentation, la cémentation par plasma présente les avantages suivants :

- Possibilité d'effectuer un décapage ionique préalable de la surface à cémenter afin de la nettoyer.- Transfert plus rapide de carbone dans l'acier.
- Meilleur contrôle des paramètres de traitement et de la productibilité.- Plus basse consommation de gaz et d'énergie.

## Chapitre II : Les traitements thermiques

---

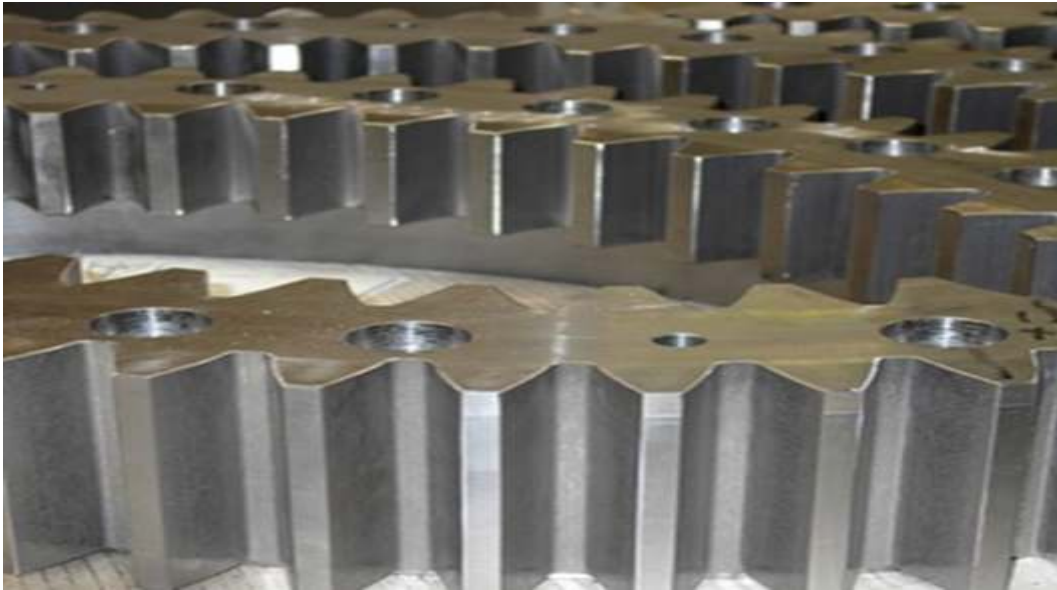
- Absence de pollution de l'environnement.
- Plus grande propreté et absence d'oxydation superficielle des pièces traitées ;
- Possibilité de réaliser des zones cémentées très précisément délimitées. [20]

### II.3.2.1.b. Carbonituration (750- 880 °C) :

Les agents de carbonituration sont liquides ou gazeux les éléments liquides sont des sels à base de cyanure, cyanate alcalins, carbonates et chlorures alcalins ; les carbonates et les chlorures permettent d'abaisser le point de fusion et les chlorures activent le bain. Les ciments gazeux sont des mélanges de gaz contenant du carbone (hydrocarbure..) et de gaz contenant de l'azote (ammoniac), par réaction mutuelle ces gaz forment du *CN* et du *CNH* qui sont les agents à la fois carburants et nitrurant. Les atomes d'azote, comme les atomes de carbone, entrent en solution solide d'insertion dans l'austénite. L'azote accélère la diffusion du carbone, c'est ainsi que la carbonituration des aciers mi-durs à 850 °C progresse deux fois plus vite que la cémentation des mêmes aciers par le carbone seul, l'azote a donc un rôle important d'accélération du processus d'enrichissement. [21]

### II.3.2.1.c. La boruration :

La boruration est un traitement Thermo-chimique pour métaux ferreux, qui résulte en une surface de Borure de Fer très dure et résistante à l'usure. Le traitement est idéal pour les pièces qui sont exposées simultanément à de l'usure abrasive et adhésive, avec des exigences de résistance à la corrosion élevées. En principe tous les métaux ferreux sont applicables à la boruration, il est cependant important de noter que la teneur de silicium doit être max. 1 % et celle de l'aluminium doit être < 0,005 %. Les grands avantages d'une Boruration sont une obtention d'une dureté de surface qui est 3 x plus élevée que dans l'état non traitée et 2 x plus dur que la Nitruration ou une trempe. La résistance contre le soudage à froid (frottement/grippage des matériaux) sera moins bonne. La résistance à la corrosion reste raisonnable dans les milieux alcalins et acides non oxydants, et bonne résistance à la cavitation. Les applications typiques sont des robinets-vannes dans l'industrie chimique, vis, têtes de spin, outils de soufflage dans l'industrie du verre, vannes rotatives de dosage et plaques d'usure. [22]



**Figure. II.14:** Couche de boruration sur l'engrenage.

### **-Propriétés d'une surface de Borure :**

Profondeur du traitement 10-30  $\mu\text{m}$ . Applications Thermiques avec pointe à maxi 1000°C et en continu maxi 500°C. Dureté de la surface: 1600-2000 Micro Vickers. Traitement très économique grâce à de faibles coûts d'outils. Bon accrochage au support du fait de la constitution dentelée de la couche de Borure Trempe possible pendant et après traitement possible. Dimensions standard 3200x2000x900mm, autres sur demande.- Industries: Appareillage, Vannes et robinets, Constructions de machines Industrie du verre Industrie Textile. [23]

### **II.3.2.1.d. La nitruration :**

La nitruration conduit à l'obtention d'un durcissement superficielle par diffusion d'azote en générale sans traitement thermique consécutifs.

L'agent nitrurant peut être :

-liquide : bains de sels fondus.

-solide : poudres.

-gazeux : ou l'azote est actif à l'état atomique (nitruration gazeuse classique) ou à l'état d'ions dans un plasma (nitruration ionique).[24]

## Chapitre II : Les traitements thermiques

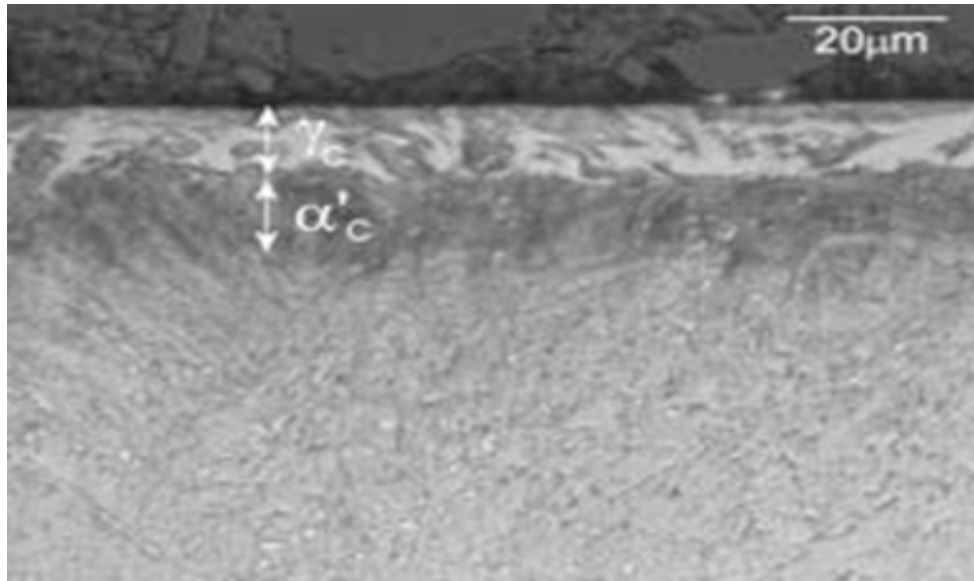


Figure. II.15 : couche de nitruration.

- Le diagramme fer-azote On a le diagramme suivant en pourcentage atomique :

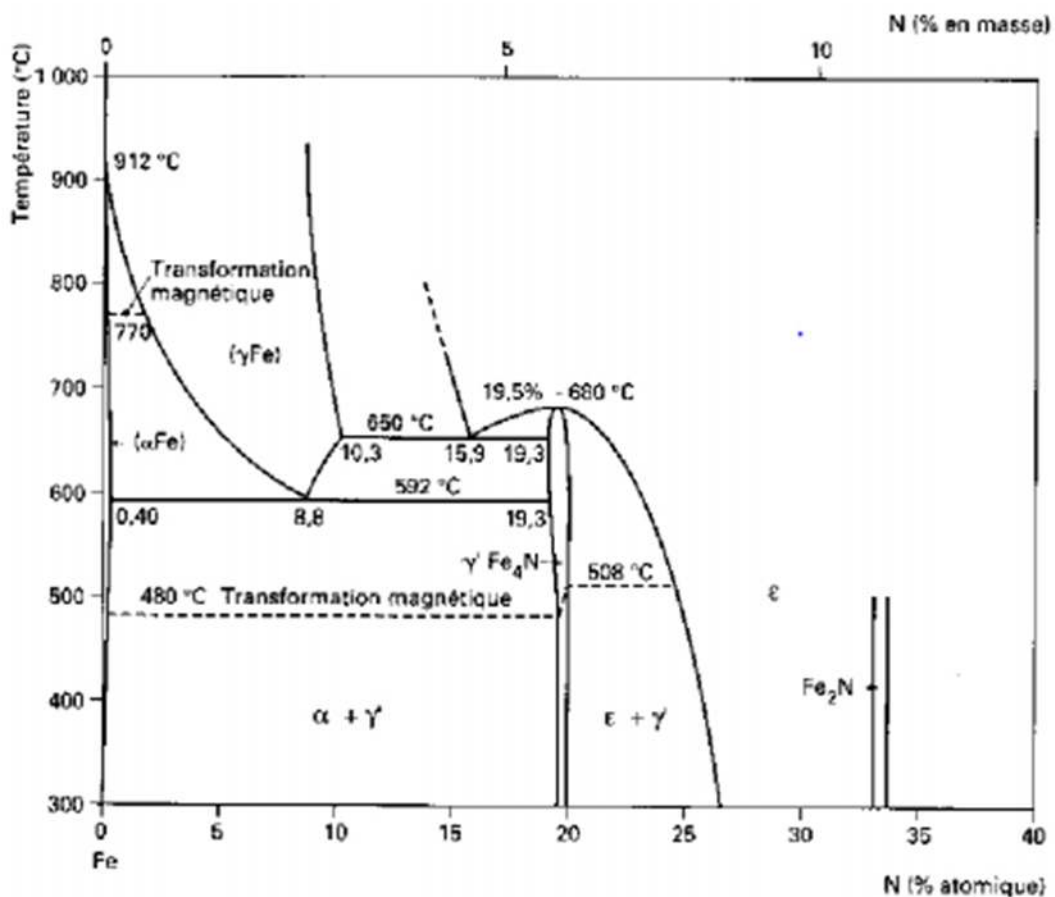


Figure. II.16 : Le diagramme fer -Azote.

La phase la plus riche est la phase  $\epsilon$  Fe<sub>2</sub>N Sa structure est hexagonale avec en Moyenne 2 ou 3 atomes d'azote en insertion par maille. [25] On a ensuite la phase  $\gamma'$

## Chapitre II : Les traitements thermiques

---

Fe<sub>4</sub>N de structure cubique faces centrées avec un atome d'azote au centre de la maille. On

retrouve ces 2 phases  $\epsilon$  et  $\gamma'$  dans la couche superficielle sur une épaisseur de 20  $\mu\text{m}$ .

Elles constituent la couche blanche qui est fragile.

Au-delà, plus en profondeur, on a la couche de diffusion avec une solution solide d'insertion de l'azote dans le fer  $\alpha$  qui atteint entre 0,5 mm et 1mm.

Le coefficient de diffusion est  $D = 6,60 \cdot 10^{-16}$  m<sup>2</sup>/s.

La durée du traitement est de Plusieurs dizaines d'heures.

En ordre de grandeur, il faut 100 h pour avoir une épaisseur de 1 mm de la couche de diffusion. [25]

### -La nitruration gazeuse :

Ce type de nitruration se déroule généralement dans un four de type cloche ou puits équipé d'un système de convection forcée de l'atmosphère. Le principe de base est d'amener du gaz ammoniac dans un four doté d'un système de brassage de l'atmosphère et d'une régulation de température. Ce traitement de nitruration peut être considéré d'une façon globale comme un transfert des atomes d'azote du gaz ammoniac dans le matériau. Cette réaction peut s'écrire de la façon suivante :  $\text{NH}_3 = \text{N} + 3\text{H}$ . Pour des températures voisines de 600 °C, un traitement de 10 heures avec de l'azote permet d'obtenir des couches de combinaison d'épaisseur pouvant atteindre les 20 microns et pour certaines conditions la couche de diffusion peut dépasser les 150 microns. [26]

### - La nitruration ionique :

Dans une enceinte contenant un mélange gazeux à base d'azote sous une pression de 10 à  $1 \times 10^3$  Pa, on applique une tension continue, comprise entre deux électrodes. L'échantillon à traiter fait office de cathode et les parois de la cuve d'anode. Le courant et la tension sont choisis de manière à provoquer une décharge lumineuse qui conditionne le départ et l'accélération des électrons libres de l'échantillon métallique vers les surfaces anodiques du four. Lorsque ces électrons entrent en collision avec les molécules de gaz proches de la surface de l'échantillon, celles-ci s'ionisent c'est à dire qu'elles libèrent un ou plusieurs électrons de valence qui peuvent percuter d'autres molécules et libérer ainsi d'autres électrons. De plus, le champ électrique au voisinage de la cathode et de l'anode est suffisamment élevé pour provoquer ainsi l'ionisation des atomes de l'atmosphère gazeuse au voisinage des pièces. L'ensemble des particules ionisées constitue ainsi le plasma dans lequel

## **Chapitre II : Les traitements thermiques**

---

les ions négatifs formés sont attirés par l'anode tandis que les ions positifs sont attirés par la cathode. C'est le cas des ions azote, qui sont majoritairement positifs et sont attirés par la pièce à traiter. L'interaction entre les ions azote et la matière conduit alors à un processus d'absorption et, suivant les paramètres de traitement, à la formation de nitrures et à la diffusion d'azote atomique à travers la section de la pièce. Le problème pour cette technique est l'impossibilité de dissocier la création du plasma de l'échantillon. En effet, pour des pièces de formes complexes, il se produit des phénomènes de cathode creuse avec un échauffement local de la pièce. C'est pourquoi de nouveaux systèmes sont actuellement développés dans le but de créer le plasma par des électrodes secondaires. [27]

### **- La nitruration en bain de sel :**

Aux températures de nitruration 500 - 550 °C, il est possible d'obtenir une réaction de nitruration à partir de la décomposition thermique d'un cyanure alcalin (potassium ou sodium). Différents bains industriellement utilisés, à base de cyanate et de carbonate peuvent être utilisés, la nitruration peut être activée par insufflation d'air, la réaction est alors plus rapide. Il est possible de former des couches de nitrure de combinaison (composé de  $\epsilon$ ) épaisses, mais souvent la couche de diffusion est faible et la température élevée ne permet pas d'obtenir des valeurs de contraintes importantes. [28]

### **II.3.2.2.e. Siliciuration :**

C'est la saturation en silicium de la surface de l'acier, ce qui donne à l'acier une bonne tenue à la corrosion, vis à vis des différents milieux, la siliciuration accroît quelque peu l'usure. L'opération s'effectue dans un mélange pulvérulent (75 % de Ferro-silicium + 20 % de chamotte et le reste H<sub>4</sub>Cl), ou le plus souvent, dans un milieu gazeux (SiCl<sub>4</sub>), obtenue en faisant passer du chlore par un espace réactif contenant les pièces à traiter et du Ferro-silicium ou du carbure de silicium.

La température de saturation est de 950 à 1000°C.

La couche siliciure se distingue particulièrement par une porosité accrue, sa profondeur est de 0,3 à 1 mm, mais caractérisée par une faible dureté (200 à 300 HV).

La siliciuration est appliquée aux pièces utilisées dans l'équipement chimique, du papier, du pétrole etc. [29]

## Chapitre II : Les traitements thermiques

---

### II.3.2.2. Traitements thermochimiques avec deux éléments légers :

#### II.3.2.2.a. La cyanuration :

La cyanuration est un procédé ayant pour but la saturation simultanée de la surface de l'acier en carbone et en azote afin d'augmenter la dureté et la tenue à l'usure. Les aciers destinés à subir un tel traitement contiennent de 0,2 à 0,4 % C. La cyanuration réalisée à des températures de 820 ou 860°C, dans des bains contenant 20 à 25 %  $\text{NaCN}$ , 25 à 50 %  $\text{NaCl}$  et 25 à 50 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , est destinée pour obtenir une couche de faible épaisseur (0,15 à 0,35 mm). La durée de l'opération varie en fonction de l'épaisseur de la couche à obtenir est de 30 à 90 mm. [30]

Le carbone atomique et l'azote dégagés selon les réactions ci-dessous, diffusent dans l'acier.

$2\text{NaCN} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NaCNO}$   $2\text{NaCNO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO} + 2\text{N}$   $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{Cat}$

Pour obtenir une couche plus épaisse (0,5 à 2 mm), l'opération se déroule dans un bain différent composé de  $\text{NaCN}$ ,  $\text{BaCl}_2$  et  $\text{NaCl}$ . La cyanuration est très employée dans l'industrie automobile et applicable aux petites pièces, telles que les pignons de commande de la pompe à huile, les compteurs de vitesse, les axes de ressort de la suspension arrière, les vis sans fin du volant, les petits arbres, les écrous etc. L'inconvénient de la cyanuration est le prix élevé et la nocivité des cyanures, ainsi que la nécessité imposée de prendre des mesures de protection spéciales. [30]

### II.3.2.3. Traitements thermochimiques avec élément lourd :

#### II.3.2.3.a. Métallisation par cémentation :

C'est un traitement thermochimique qui consiste à saturer la couche superficielle de l'acier en éléments tels que aluminium, chrome, bore etc. Après traitement, l'acier acquiert plusieurs propriétés importantes telles que la tenue à chaud et à l'usure accrue, la résistance à la corrosion et la dureté. [31]

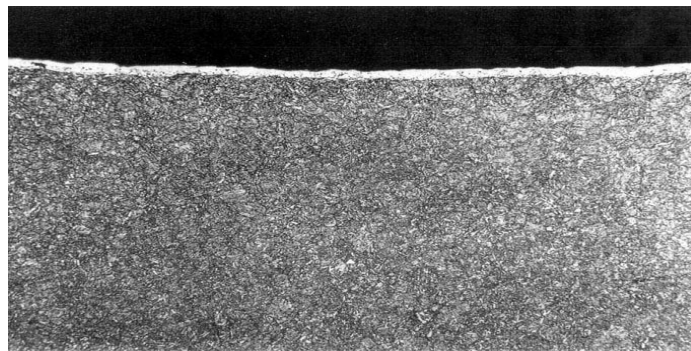
#### II.3.2.3.b. La chromisation :

C'est la saturation en chrome de la couche superficielle des pièces de l'acier, par diffusion du chrome en milieu pulvérulent à une température supérieure à  $A_{C_3}$ , (1000 à 1050 °C). Généralement la chromisation augmente la tenue à la corrosion jusqu'à 800°C et celle des aciers à teneur élevée en carbone (> 0,3 à 0,4 % C) (chromisation dure) augmente la dureté et la tenue à l'usure. [32]

## Chapitre II : Les traitements thermiques

---

La chromisation s'effectue dans des poudres formées essentiellement du ferrochrome et d'une matière poreuse. Les pièces sont mises en caisses et entourées de ce mélange. Une circulation d'hydrogène est assurée de bas vers le haut. A 1000°C, on introduit du chlorure d'hydrogène anhydre qui réagit avec le ferrochrome selon la réaction :  $F_eCr + 4 HCl \rightarrow F_eCl_2 + C_rCl_2 + H_2$  Dont une partie du  $CrCl_2$  réagit avec le fer, l'autre partie réagit avec l'hydrogène.  $C_rCl_2 + Fe \rightarrow F_eCl_2 + C_rC_rCl_2 + H_2 \rightarrow 2 HCl + C_r$  Le chrome ainsi formé, peut diffuser dans l'acier. L'opération dure quelques heures jusqu'à 12 heures. La dureté de la couche formée par une chromisation douce (faible teneur en carbone) est de 250 à 300 HV, tandis que pour une chromisation dure (teneur 0,4 % C), peut atteindre de 1200 à 1300 HV, l'épaisseur est de 0,15 à 0,20 mm. [32]



**Figure. II.17 :** couche de chromisation

La chromisation est très employée pour les pièces constituant les machines à vapeur, soupapes, valves, tubulures, etc. Il faut distinguer entre la chromisation et le chromage qui consiste à réaliser un dépôt électrolytique de chrome pour les aciers alliés, non alliés, trempés et non trempés. La couche obtenue est très dure (900 HV), mais assez fragile et peu résistante aux chocs thermiques. [33]

## **Chapitre III : Projection thermique**

---

### **III.1 Projection thermique :**

#### **III.1.1 Historique et évolution de projection thermique :**

Parmi les techniques dites «propres», la projection thermique est l'une des plus anciennes. Ce travail concerne un nouveau développement de cette technologie. La projection thermique a plus de 100 ans. Au début du 20<sup>ème</sup> siècle (1909) un ingénieur suisse de Zurich, le Docteur Max Ulrich Schoop a minutieusement étudié l'impact de balles en plomb sur un mur en béton, ce qui lui a inspiré de réaliser une invention portant sur l'utilisation de la technique de revêtement en plomb ou en zinc par projection de métal fondu. Dans un premier temps, il a utilisé un creuset rempli de métal fondu et de l'air préalablement chauffé pour la pulvérisation et la projection du métal. Après différentes évolutions techniques, l'utilisation d'un chalumeau comme source d'énergie et d'un métal en poudre a été qualifiée et brevetée en 1911 comme "processus pour fondre un matériau dans une zone de chauffage et pour le propulser à l'état fondu et/ou ramolli par la chaleur, sur une cible pour y former un enduit". Concernant la source enthalpique, la première innovation a été brevetée par Hermann Drösse. Il a proposé un appareil de chauffage par arc électrique. Depuis, les procédés avec utilisation de l'arc n'ont pas cessé d'évoluer. En 1912 Schoop remplace la poudre par un fil métallique en créant un véritable pistolet de projection. En 1915, il dépose un brevet sur le principe de la projection par arc électrique entre deux fils. Le procédé devient utilisable pour de nombreuses applications dans les domaines de la protection de surface, de l'anticorrosion, de la réparation et du rechargement. Son inventeur reçoit une récompense de mérite en 1915 et la technologie est mondialement connue depuis sous le nom de «schoopage». A partir de ce cette période deux types de source enthalpique ont été développés. Le premier utilise l'énergie de la combustion et le second l'énergie d'une décharge électrique continue [34].

La combustion a été au départ le procédé le plus développé, marqué par l'apparition du canon à détonation (D-Gun Coatings) breveté par Praxair Surface Technologie dans les années 50. La nécessité d'utiliser des matériaux réfractaires, notamment dans le domaine de l'aérospatial, a entraîné le développement de nouvelles techniques, en particulier l'utilisation de l'énergie du plasma. Le développement des équipements, notamment des générateurs de plasma, a permis d'améliorer la longévité des torches (brevet SNECMA déposé en 1960) et par conséquent rendu de plus en plus utilisés les procédés de projection par plasma dont l'abréviation anglaise APS (Atmospheric Plasma Spraying) est largement répandue dans les publications depuis [34].

## Chapitre III : Projection thermique

---

Les années 70 montrent le développement de la projection plasma sous faible pression résiduelle. Le premier dépôt a été obtenu par Muehlberger en utilisant la technique baptisée par la suite Vacuum Plasma Spraying (VPS) ou Low Pressure Plasma Spraying (LPPS). Elle permet d'exploiter le procédé pour l'obtention de dépôts métalliques denses sans présence d'oxydes et avec une meilleure adhérence. Un autre procédé qui a marqué l'évolution technologique de la projection thermique mais par source enthalpique gazeuse est en 1983 le procédé High Velocity Oxy-fuel (HVOF), technique de Browning Engineering qui a fourni des revêtements à haute température pour les turbines à gaz dans le domaine aéronautique et spatial [34].

Ainsi depuis les premiers travaux de Schoop, la compréhension des phénomènes physiques impliqués dans le procédé, l'avancement des modélisations, le développement des systèmes de contrôle en ligne, la robotisation et l'automatisation des processus ont assuré un progrès constant de la projection thermique et de son application pour l'élaboration de nouveaux matériaux [34].

Depuis, la projection thermique a donné lieu à de très nombreux développements ayant pour objet d'étendre le champ d'application de la technique à de nouveaux matériaux et d'améliorer certaines propriétés des revêtements. Quelques dates ont particulièrement marqué la projection thermique [35]:

- 1911 : Utilisation de la projection à l'arc électrique par M.U. Schoop ;
- 1951 : Invention de la projection plasma ;
- 1955 : Naissance du canon à détonation ;
- 1975 : Création de la projection plasma sous faible pression de gaz interne ;
- 1983 ; Début de la projection à la flamme rapide (HVOF) ;
- 1991 ; Emergence de la projection plasma sous gaz neutre à pression supérieure à la pression atmosphérique ;
- 1993 : Prise de brevet du procédé PROTAL® ;
- 1995 : Développement de la projection froide ou "cold spray".

### III.1.2 Principe de la projection thermique :

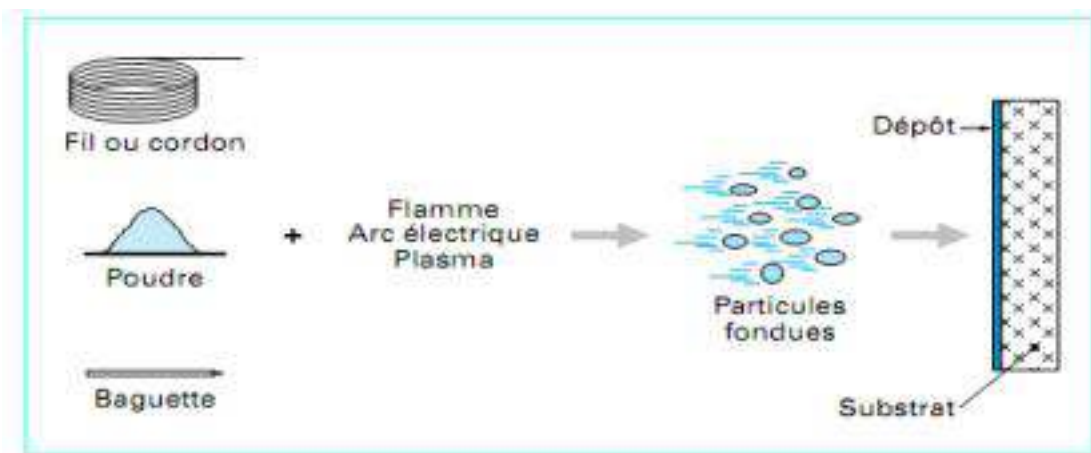
La projection thermique consiste à utiliser une source de chaleur pour fondre et accélérer un matériau. Celui-ci prend alors la forme de particules pâteuses ou liquides qui heurtent, s'étalent et se solidifient sur un substrat, formant un dépôt par empilements successifs [36].

## Chapitre III : Projection thermique

Ce technique permettent de projeter une grande gamme de matériau : métaux et alliages, cermets, céramiques et dans certains conditions, des polymères. Une différence de 300°K entre la température de fusion et la température de décomposition ou d'évaporation du matériau est nécessaire pour que le matériau puisse être projeté dans de bonnes conditions [37].

La morphologie et les propriétés des dépôts dépendent de nombreux paramètres expérimentaux (**Figure III.18**), relatifs principalement à :

- la nature du matériau à projeter,
- la source de chaleur,
- l'atmosphère environnante,
- le substrat.



**Figure III.18** : Principe de la projection thermique.

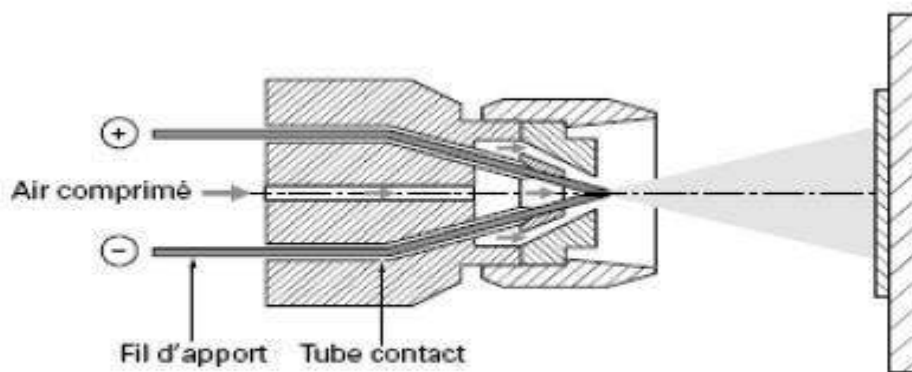
Il existe de nombreux procédés de projection thermique. Tous les procédés utilisent le même principe : fondre un matériau d'apport, puis le projeter grâce à un gaz vecteur. Deux types d'énergie sont utilisés comme source de chaleur : la flamme et l'arc électrique. Les six principaux procédés sont la projection à l'arc, plasma, à froide, HVOF, à détonation et à la flamme. [38]

### III.1.2.1 Projection par arc électrique :

La projection à l'arc est le premier procédé ayant utilisé l'énergie d'une décharge électrique. Il consiste en un arc électrique créé entre deux fils consommables et un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat.

## Chapitre III : Projection thermique

L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, et un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible). Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant [Figure III.19]. L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à 10% et une adhérence de 20 à 40 MPA. La technique est simple et peu coûteuse et permet de déposer la matière avec un débit important (de 5 à 30 kg/h). L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt. Des modifications du pistolet et l'emploi d'un second jet de gaz ont permis de concentrer le flux de matière atomisée et de diminuer la porosité des couches [39].



**Figure III.19 :** Schéma de principe de la projection à l'arc .

Les matériaux projetés sont des métaux conducteurs électriques (aluminium, cuivre, zinc, molybdène), des aciers mais aussi des alliages NiCrAl, NiMoAl. L'une des limites importantes du procédé est la nature des matériaux (tréfilabilité et conductibilité). La gamme des matériaux projetés peut être élargie en utilisant la technologie des fils fourrés qui permet de déposer des carbures (CrC, WC, TiC) et des oxydes ainsi que d'élaborer des couches composites [34].

### III.1.2.2 Projection plasma :

Le plasma est initialement amorcé par une source extérieure comme un arc de décharge électrique à haute tension. Cet arc crée une zone localement conductrice entretenue par les courants induits. La génération du plasma se passe dans un tube généralement en

## Chapitre III : Projection thermique

quartz qui est entouré par un inducteur appliquant un champ magnétique alternatif à haute fréquence. L'injection des particules est effectuée axialement à l'aide d'un injecteur refroidi par l'eau. La vitesse d'écoulement du gaz est directement liée au diamètre intérieur de la torche (de l'ordre de 50 mm) et entraîne un séjour plus long des particules dans le plasma, ce qui permet de fondre les particules de grande taille ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ). L'utilisation de la projection plasma HF est possible sous atmosphère inerte ou réductrice dans une gamme de pression située entre 10 et 200 kPa. Il est possible d'y utiliser un divergent de type de-Laval qui permet d'atteindre une vitesse d'écoulement supersonique pour une pression de chambre d'environ 6 kPa. La torche reste immobile pendant la projection, donc c'est le substrat qui doit être déplacé [34].

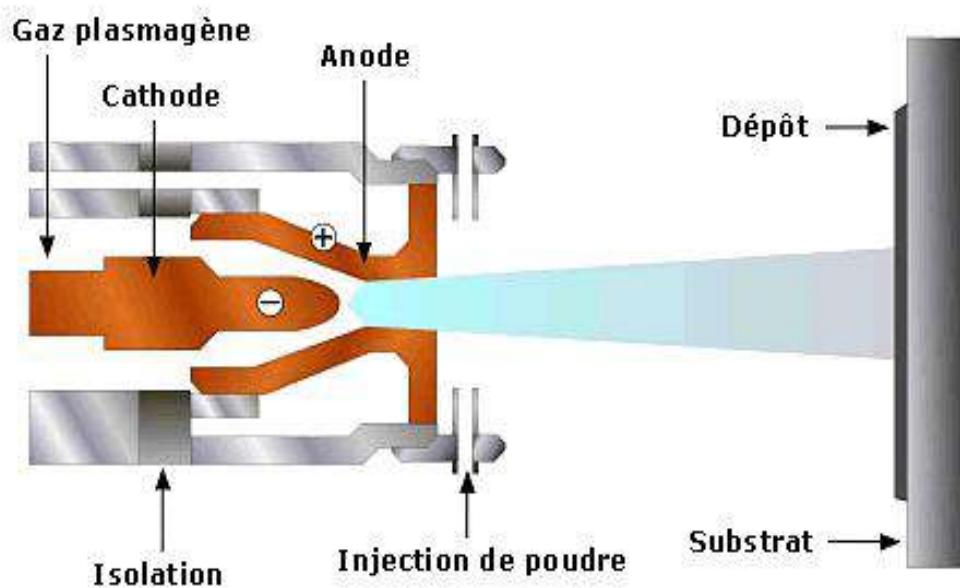


Figure III.20 : Schéma de principe de la projection plasma.

### III.1.2.3 Projection supersonique à froid « Cold Spray » :

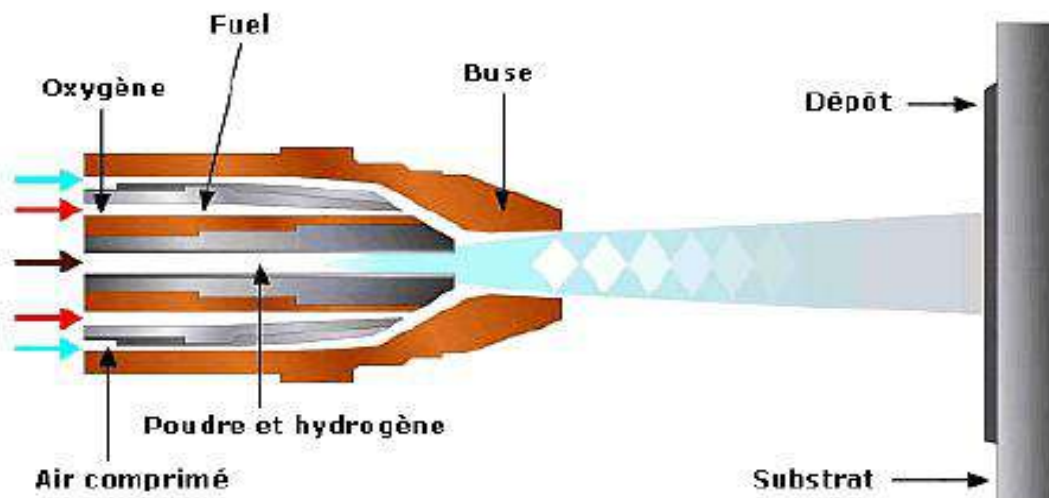
Qui n'est pas réellement un procédé de projection thermique puisqu'il s'effectue « à froid » mais lui est tout de même assimilée. Cette technique très récente est encore en développement et consiste à utiliser un jet de gaz chaud à haute pression (20 à 35 bars) pour projeter une poudre, généralement métallique préchauffée. Les particules adhèrent au substrat et les unes aux autres par déformation plastique, ce qui permet de limiter l'échauffement et les contraintes résiduelles [40].

Cependant, seuls les procédés permettant d'atteindre des températures et des vitesses élevées de particules peuvent faire fondre les matériaux à température de fusion très élevée (exemple : la température de fusion de l'alumine est  $2050^{\circ}\text{C}$ ) [41].

## Chapitre III : Projection thermique

### III.1.2.4 Projection flamme supersonique (HVOF) :

La projection à la flamme supersonique utilise également une troche à flamme mais la géométrie spéciale de la tuyère et l'ajout d'une chambre de combustion (où règne une pression de 0,5 à 0,7 MPa), suivie d'une tuyère convergente-divergente, permet à la flamme d'atteindre des vitesses supersonique. Le matériau à projeter se présente généralement sous forme de poudre. Il est injecté à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où il est fondu et accéléré dans la tuyère à une vitesse de 300-600m/s [42].



**Figure III.21** : Schéma du principe de la projection supersonique HVOF

Les pressions importantes atteintes dans le pistolet n'autorisent pas l'utilisation de l'acétylène comme gaz combustible (risque d'explosion). Pendant leur temps de séjour très court (quelques dixièmes de millisecondes) dans la flamme, les particules sont généralement chauffées à l'état pâteux, l'énergie cinétique (vitesse  $>300\text{m/s}$ ) acquise permettant cependant la réalisation de dépôt caractérisés par une faible porosité ( $<2\%$ ), une bonne adhérence (70-100MPa) et une faible rugosité de surface. Les principales applications de ce procédé sont la projection de cermets (WC-Co, Cr-Co ou NiCr), de métaux, d'alliages et d'alliage auto faibles [42].

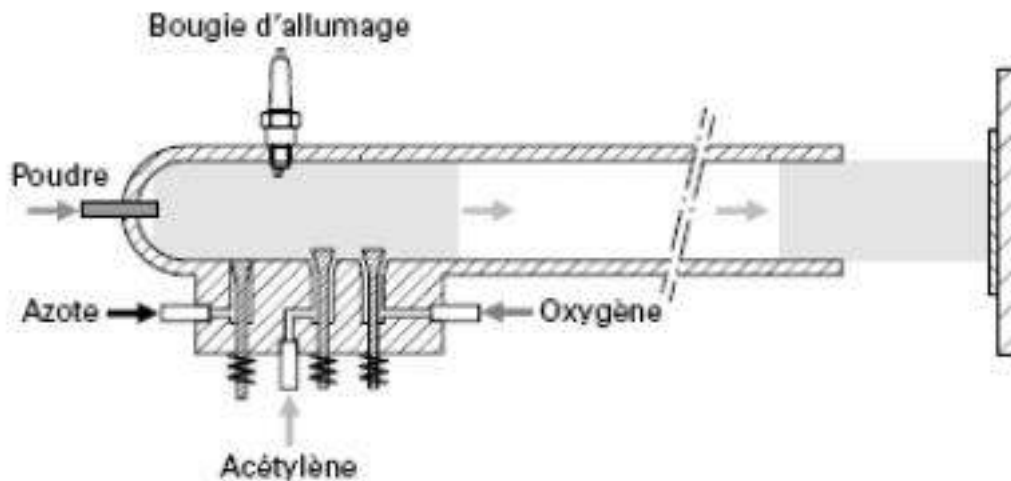
### III.1.2.5 Projection à détonation :

Le procédé est connu sous le nom de D-Gun (détonation gun). Le dispositif principal est un canon à détonation, où la réaction d'oxydation se produit avec une vitesse supérieure à la vitesse du son [Figure III.22], le canon est constitué d'un tube de diamètre 21 à 25 mm et

## Chapitre III : Projection thermique

d'une longueur d'environ 1 m fermé d'un côté. Il est équipé d'un système de soupapes pour injecter les gaz et la poudre ainsi que d'un dispositif d'allumage entièrement automatisé. La poudre est injectée en même temps que le mélange des gaz (généralement acétylène/oxygène).

L'onde de choc de l'explosion amorcée par une étincelle propulse la poudre tout au long du canon avec une vitesse proche de 1000 m/s.[34]



**Figure III.22** : Schéma de principe du canon à détonation.

Les allumages sont reproduits avec une fréquence de 4 à 10 tirs par seconde et successivement suivis d'un balayage du canon avec un gaz neutre. Le revêtement obtenu possède un faible taux de porosité (moins de 1%) et une très bonne adhérence (80 MPa) mais il est limité à une épaisseur qui ne dépasse pas 300  $\mu\text{m}$ .

Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de W et de Cr avec des liens de Ni ou Co, mais aussi des oxydes de chrome ou de l'aluminium. Les applications en protection anti-usure sont dans les domaines de l'aéronautique et de la sidérurgie [38]

### III.1.2.6 Projection flamme :

On désigne par le nom de projection flamme toute projection utilisant l'énergie thermique provenant de la combustion d'un carburant avec l'oxygène. La température d'une flamme oxy-combustible varie de 2800°C à 3150°C. Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2800°C, et qui ne subliment pas, peuvent être projetés. Il existe deux types de projection par flamme qui sont à flamme poudre et fil [43] :

## Chapitre III : Projection thermique

### III.1.2.6.a. Projection flamme poudre :

Le procédé de projection par flamme est le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustible et à le véhiculer jusqu'au substrat grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (figure III.23). Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000 °C. La vitesse des particules projetées par la flamme est faible ( $\sim 50$  m / s) et c'est pourquoi elles sont souvent accélérées avec de l'air. La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondues. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes à quelques centièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 1 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat ( $T < 250^\circ\text{C}$ ). Les taux de porosité varient de 10 à 20% avec un rendement moyen de 50 %. La force d'adhérence des dépôts au substrat est de 20 à 40 MPa [43].

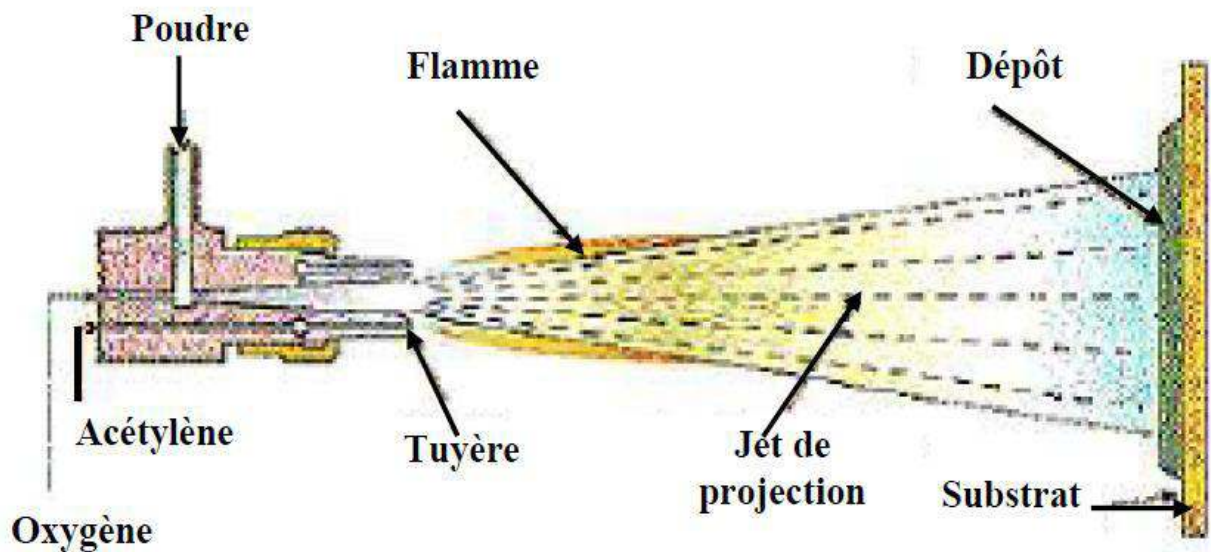


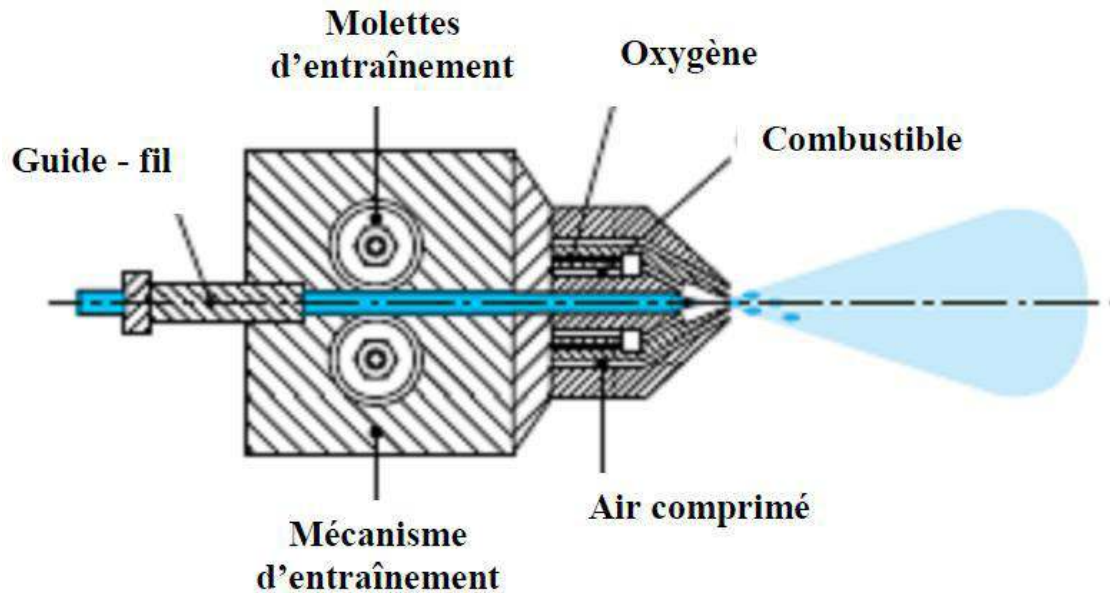
Figure III.23 : Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre.

### III.1.2.6.b. Projection flamme fil :

Dans cette technique (figure III.24) le matériau d'apport est introduit dans le centre de la flamme sous forme de fil, de cordon, ou de baguette. Ce procédé utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme poudre et qui ne sert qu'à faire fondre le matériau. Une fois fondue, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé, celui-ci est sert à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse

## Chapitre III : Projection thermique

des particules est plus élevée (150m/s) la température du bout de fil peut atteindre 0.95 fois la température de la flamme ce qui permet la projection des céramiques, à des taux horaires de dépôts qui varient de 1 à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, les propriétés de dépôts désirées et les diamètres de fil ou de baguettes utilisés [43].



Figures III.24 : Schéma d'un pistolet flamme fil.

On résumé les différents types de projection thermique et leurs caractéristiques dans le tableau suivants :

caractéristiques	Projection flamme poudre	Projection flamme fil	Projection HVOF	Projection canon décoction	Projection arc électrique	Projection plasma
Source de chaleur	Flamme oxy acétylénique	Flamme oxy acétylénique	Flamme oxy acétylénique	Flamme oxy acétylénique	Arc électrique	plasma
Température de flamme (°C)	3000	3000	3000	3000	6000	1200
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz flamme	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz plasma à (Ar/H)

## Chapitre III : Projection thermique

<b>Vitesse des particules (m/s)</b>	40	150	700	950	250	200
<b>Forme du matériau d'apport</b>	poudre	Fil au cordon	poudre	Poudre	fil	Poudre
<b>Rendement moyen (%)</b>	50	70	70	70	80	70
<b>Epaisseur (mm)</b>	0.1 à 1.5	0.1 à 1.5	0.05 à 1	0.05 à 1	0.2 à 3	0.05 à 1.5
<b>Exemple de matériau d'apport</b>	Métaux céramique carbures dans matrice métallique	Métaux céramique carbures dans matrice métallique	Métaux carbures	Métaux céramique	Métaux	Métaux céramique carbures

**Tableau III.4 :** caractérisation des différents types de projection thermique.

### III.1.3 Projection flamme-fil :

Il existe également un procédé appelé « projection Flamme-fil » où le matériau d'apport est sous forme de fil, de baguette ou de cordon. Il utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme-poudre (oxygène gaz combustible) auxquels s'ajoute de l'air comprimé servant à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse des particules est plus élevée (environ 150m/s). La température de l'extrémité du fil ou de la tige peut atteindre 0,95 fois la température de la flamme ce qui permet de projeter des céramiques. Les taux horaires varient de 1 kg/h à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, des diamètres de fil ou de baguettes utilisées et des propriétés de dépôts recherchées (figure III.25).

La projection Flamme-fil, plus connue sous le nom de métallisation ou shoopage a été inventée en 1910 par suisse schoop qui a développé le premier pistolet de projection thermique de fils métalliques. L'appareil consistait en un brûleur dans lequel un carburant, acétylène ou hydrogène, était mélangé avec de l'oxygène pour créer une flamme en sortie de tuyère de brûler. Un jet d'air comprimé entourant la flamme atomisant et propulsait le métal fondu. La continuité du procédé dépendait de l'approvisionnement du fil dans la flamme avec une vitesse contrôlée de façon à le fondre et le projeter avec un flux continu. Schoop résolut ce problème en utilisant une

## Chapitre III : Projection thermique

turbine qui actionnait un système d'engrenages et de molettes qui tirait le fil dans la du brûleur. Cette appareillage lui apparut similaire à un pistolet, depuis c'est pour cette raison que l'on parle de « pistolet » de projection thermique et rarement de « troche ». Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure du dessous.[42]

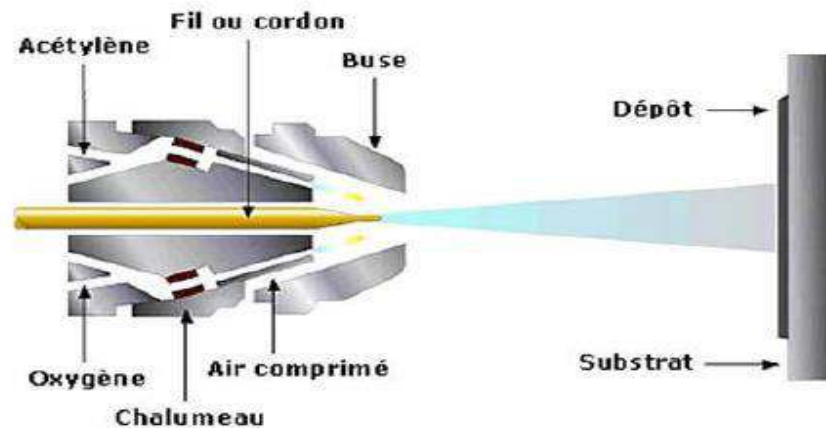


Figure III.25 : Schéma de principe de la projection thermique à flamme-fil.

Ce type de procédé de projection thermique a été très largement utilisé et l'est encore aujourd'hui pour les travaux de réparation d'éléments de machine et la protection contre la corrosion.[40]

### III.1.3.1 Avantages et inconvénients du procédé flamme-fil :

Ses avantages sont déjà qu'il a un coût d'investissement faible, il est facile d'utilisation en permettant l'obtention de rendements de projection élevés, c'est un système portable qui peut être utilisé en chantier. Ses désavantages sont qu'il est limité à la projection de matériaux existant sous forme de fil et le procédé ne permet pas l'obtention de revêtement à haute densité, avec un taux d'oxyde faible et une grande adhérence.[43]

### III.1.3.2 Paramètres opératoires du procédé à flamme-fil :

**a. Débit des gaz :** Un excès d'oxygène augmente l'oxydation du dépôt, donc sa dureté et réduit sa résistance mécanique (flamme oxydante), et un excès d'acétylène, entraîne un charbonnage du revêtement (flamme carburante).

**b. Pressions :** Une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal donc toutes les consommations.

## Chapitre III : Projection thermique

---

**c. Diamètre du fil ou du cordon :** Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente le grain du dépôt et les pertes.

**d. Vitesse du fil ou cordon :** Si elle trop grande, elle augmente la cadence et grosseur du grain, trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.

**e. Pression de l'air (vecteur de la projection) :** Son accroissement diminue la grosseur du grain, mais augmente l'oxydation du dépôt.

**f. Distance de projection :** Trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence, et surchauffe du dépôt, et elle est trop grand, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence.

**g. Angle :** En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.

**h. Vitesse de balayage :** Trop rapide, elle augmente les pertes de métal, il est Trop lent, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulières et élève la température du support.

**i. Vitesse de rotation (travaux sur tour) :** Trop rapide, elle entraîne un rebondissement des particules et une pollution du dépôt, elle est Trop lente, elle entraîne une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.[43]

### III.3 Formation et structure des dépôts :

Les dépôts formé par projection thermique sont obtenue par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est de type lamellaires. L'utilisation de l'air comprimé dans la pulvérisation du métal fondu et sa projection vers la surface à revêtir provoque l'oxydation, les réactions chimiques des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleur avec le substrat affectent une quantité du dépôt par la formation de porosités. On trouve souvent dans la morphologie des revêtements, des particules sphériques non fondue, celles qui soient initialement à l'état pâteux, et qui se solidifient avant d'arriver sur la surface du substrat.[44]

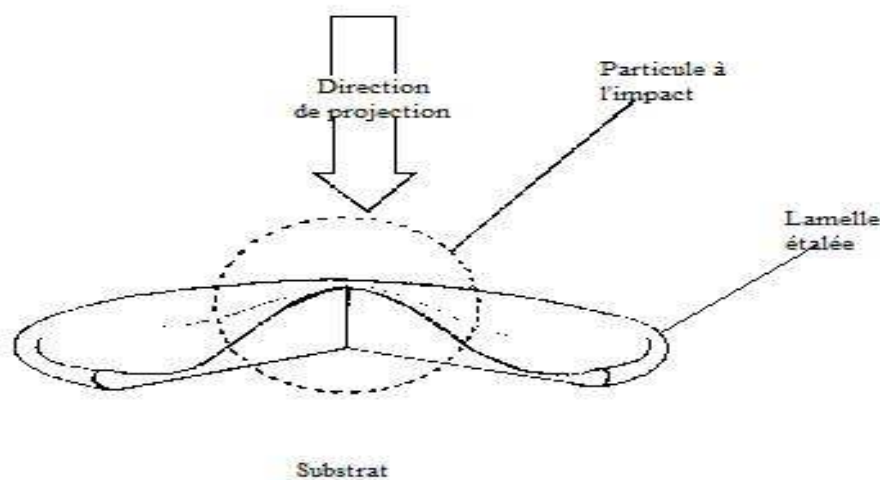
Afin de réaliser un bon accrochage mécanique, la surface des pièces à revêtir est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface.

- La surface du dépôt présente deux étapes caractéristiques :
- L'écrasement de chaque gouttelette
- La formation d'une couche de matériau, résultant de la cinématique liée au processus (mouvement relatifs torche/pièce) [44]

## Chapitre III : Projection thermique

### III.3.1 Ecrasement de particules projetées sur le substrat :

Lorsqu'une particule fondue s'écrase sur le substrat, elle prend une forme lamellaire grâce à l'étalement latéral du liquide sous les pressions présentes dans la particule (figure III.26). L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement. L'écrasement de la particule peut être divisé en trois étapes : impact initial, étalement de la particule et enfin refroidissement et solidification.[45]



**Figure III.26** : Schéma d'écrasement de la particule.

L'étalement des particules est un phénomène complexe qui dépend de nombreux paramètres liés à la particule (morphologie, vitesse, température...) et à l'état de surface du substrat ou du dépôt pendant la projection (matériau, rugosité, température,...). Plusieurs études ont essayé de qualifier l'étalement des particules. Elles ont défini par exemple la morphologie des lamelles en fonction des conditions de projection [46].

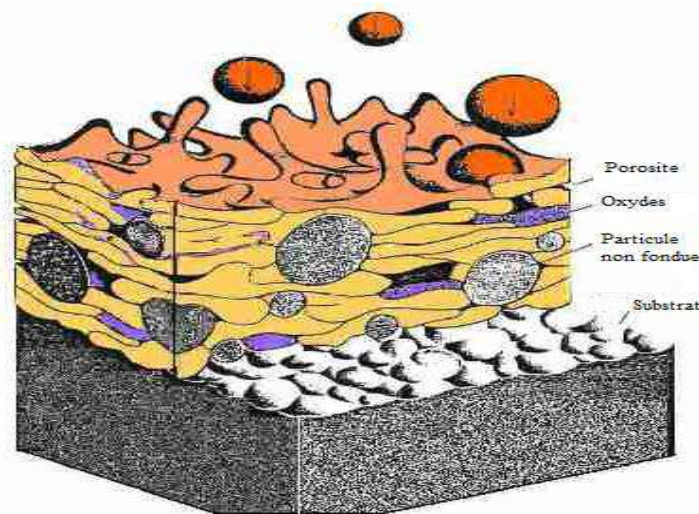
Plusieurs études expérimentales ont été effectuées (98% sur les surfaces lisses) pour comprendre l'influence des propriétés des particules à l'impact sur leur écrasement et la formation des splats. D'autres travaux ont été réalisés pour examiner les effets de la température, de la rugosité et des propriétés thermiques du substrat sur l'étalement et la solidification des particules. L'effet de la mouillabilité de la particule sur le substrat a été aussi évalué. Il faut noter que la mouillabilité dépend de la rugosité et de la porosité de substrat ainsi que de la composition chimiques et de l'état cristallin des particules et du substrat [44].

## Chapitre III : Projection thermique

La solidification des lamelles (une étape de l'ordre de quelques microsecondes) dépend du flux de chaleur des particules vers le substrat. Ce dernier est lié au contact ou à la résistance de contact entre la lamelle et le substrat. Il dépend également des propriétés thermiques du substrat et de la particule étalée. Le contact effectif lamelle-substrat varie avec la quantité des condensats et adsorbats à la surface, la porosité et la rugosité de la surface. Le refroidissement rapide de lamelle étalée favorise la nucléation hétérogène [44].

### III.3.2 Structure générale des revêtements réalisés par projection thermique :

Les revêtements thermiquement réalisés ont une caractéristique commune qui est la structure, lenticulaire ou lamellaire de leurs grains. Cette dernière résulte de la rapidité de solidification des petites particules ou globules aplaties, entrant en impact avec la surface froide du substrat. La projection thermique utilise de l'air à une grande proportion pour pulvériser le métal fondu, cette opération donne lieu à des interactions chimiques, en particulier l'oxydation des particules et donc la création d'une coquille d'oxyde sur la surface cible [47].



**Figure III.27** : Schéma de principe de formation d'un dépôt élaboré par la projection thermique.

Les revêtements sont caractérisés par plusieurs facteurs : la structure métallurgique, oxydes, la densité, la dureté et adhérence des dépôts [45].

#### III.3.2.1 Structure métallurgique :

Les dépôts sont généralement stratifiés s'ils ne sont pas traités *posteriori*. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins

## **Chapitre III : Projection thermique**

---

de 1% à 25% suivant les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules infondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur) [44].

En raison de la très grande vitesse de refroidissement des particules au contact du substrat, leur structure métallurgique est du type trempée, généralement à phase unique. Ceci permet d'expliquer que la structure d'origine du matériau peut se trouver modifiée après dépôt. [44]

### **III.3.2.2 Oxydes :**

Dans la projection thermique, l'oxygène pompé est en combustion totale tandis que l'oxygène de l'air combiné aux hautes températures rencontrées dans le transfert des particules liquide, peut donner naissance à des réactions d'oxydation avec les particules réactives [46]. La formation de couches d'oxydes entre le dépôt et le substrat, elles sont généralement beaucoup plus dures que le métal dans lequel elles sont incluses [47].

### **III.3.2.3 La densité :**

Les dépôts projetés à chaud dans l'air sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Pour les dépôts métalliques, cette densité est également fonction de taux d'oxydes formés pendant la projection. [48]

### **III.3.2.4 Adhérence :**

Les revêtements adhèrent au substrat par un phénomène mécanique. Suivant les procédés et les matériaux, l'adhérence varie de 20 à 115 Mpa. Dans les cas où elle s'avère insuffisante (cas des projections d'oxydes par exemple), on utilise des sous-couches d'accrochage.

Plusieurs mécanismes interviennent sur l'adhérence du dépôt au substrat tel que la diffusion, la réaction chimique, des forces électrostatiques, l'accrochage mécanique, etc. [44]

### **III.3.2.5 Dureté :**

La dureté est la faculté de résistance qu'offre un corps à sa pénétration par un autre corps. Elle est caractérisée par un nombre qui dépend du genre d'essai exécuté (essai à la bille Brinell, essai de dureté à la bille basés sur la méthode de comparaison, essai de dureté Vickers, essai de dureté Rockwell, etc...) [44]. Les matériaux projetés thermiquement sont constitués

## **Chapitre III : Projection thermique**

---

de particules juxtaposées, liées entre elles. Ceci se traduit en générale par une dureté, elle est généralement influencée par le degré de cohésion entre particules, les duretés intrinsèques des particules, le taux de porosité et les inclusions d'oxydes. L'impact des particules suivantes sur température d'un acier projeté à 1500°C, chute rapidement à 100°C [47].

### **I.3.3 Préparation de surface :**

La préparation de surface est une étape que l'on peut qualifier de très importante pour réussir une bonne adhésion du revêtement sur la surface de la pièce dans la projection thermique [47].

#### **III.3.3.1 Dégraissage :**

Le dégraissage est à la base de tous les traitements de surface. Son objectif est d'éliminer les matières grasses et également les poussières et autres agents formant une couche intermédiaire de faible cohésion [49]. Le dégraissage s'effectue soit par dissolution en milieu de solvants organique, soit par saponification (donc en milieu alcalin).

Dans la plupart des cas, on aura recours à une élévation de température suffisante pour ramollir la souillure grasse. De même un effet mécanique (jet, brosses, ultrasons, bulles de gaz émis par électrolyse) est souvent nécessaire. Suivant les besoins, le dégraissage sera plus ou moins profond. Pour un dégraissage très poussé, il convient de faire suivre le dégraissage chimique d'un électrolytique (dont l'action ne saurait se résumer à l'action des bulles) [47]

#### **III.3.3.2 Décapage :**

Le nom générique du décapage regroupe les procédés éliminant les couches d'oxydes anhydres formée en haute température alors que le dérouillage concerne les oxydes hydratés de la corrosion naturelle. Les méthodes de décapage sont chimiques, électrochimique, mécanique ou thermique. Les méthodes chimique et électrochimique utilisent des solutions agressives acides ou alcalines ou encore des oxydants forts. Dans la plupart des cas une mauvaise préparation de surface est l'origine d'un traitement de surface défaillant. La qualité d'une préparation est une notion relative selon les utilisations, ni les éléments gênant ni leur teneur limite ne sont les mêmes [44].

#### **III.3.3.3 Le sablage :**

Le sablage est un prétraitement mécanique permettant la création d'un état de surface rugueux. Après le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à

## Chapitre III : Projection thermique

---

revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les anfractuosités de la surface et de réaliser ainsi un bon accrochage mécanique.

En contrepartie, cependant, le sablage crée des contraintes de compression dans le substrat au voisinage de la surface traitée. Le sablage se fait généralement à l'aide de particules d'abrasifs (alumine ou SiC, SiO<sub>2</sub>) qui sont entraînées par de l'air sous pression et dirigées sur le substrat.[49]

Un nettoyage ultérieur (par ultrasons par exemple) est indispensable pour éliminer les particules abrasives incrustées dans les creux et toute trace de poussière [49].

### III.3.3.4 Préchauffage :

Le préchauffage des surfaces est un moyen d'amélioration des propriétés interfaciales. L'augmentation de température peut se faire avec une flamme qui, appliquée à l'arrière de l'échantillon (lorsque cela est possible), permet d'éviter toute détérioration de la surface (dépôts possibles de suies et de produits de combustion). Il est également possible d'utiliser des résistances chauffantes pour augmenter la température de la surface. Le fait de chauffer l'arrière de la cible permet un contrôle de la température par pyrométrie plus aisé. Le préchauffage se fait alors, le plus généralement, grâce à la torche de projection. Celle-ci effectue des passages successifs devant la surface sans projeter de matière ce qui permet d'augmenter la température du substrat. Cependant avec ces dispositifs de préchauffage, le contrôle de la zone traitée est délicat [50].

### III.3.4 Paramètre de projection influence sur le dépôt :

- **Débit des gaz** : Un excès d'oxygène (flamme oxydant) augmente l'oxydation du dépôt, donc sa dureté et réduit sa résistance mécanique. Le dépôt devient fragile et difficile à usiner. Un excès du taux d'acétylène (flamme Carbonne) entraîne un charbonnage du revêtement. Dans les deux cas, on note l'usure prématurée des buses[46].

- **Pression du gaz** : Une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal donc tous les consommations (dissipation d'énergie).

- **Diamètre du fil et du cordon** : Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente les grains du dépôt et les pertes.

- **Vitesse du fil ou du cordon** : Trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur du grain, trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.

- **Pression de l'aire** : (air comprimé vecteur de la projection). Son accroissement diminue la grosseur du grain mais augmente l'oxydation du dépôt.

## Chapitre III : Projection thermique

---

- **Distance de projection** : Trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence et surchauffe du dépôt. Trop grande, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence.

- **Angle de projection** : En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.

- **Vitesse de balayage** : Trop rapide, elle augmente les pertes de métal et donne des épaisseurs de dépôt trop minces. Trop lente, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulier et élevé la température du support.

- **Vitesse de rotation** : Trop rapide, elle entraîne un rebondissement des particules et une pollution du dépôt. Trop lente, elle entraîne une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.

- **Refroidissement** : Trop rapide, il génère le délaminage des couches. Trop lente, il entraîne une surchauffe et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt [46].

## Conclusion

---

### CONCLUSION :

Depuis les années 1960, le marché de la projection thermique a progressé d'environ 10 % par an principalement grâce au développement des procédés. La flamme, qui représentait 70 % des applications en 1960, ne couvre aujourd'hui que 12 % du marché. Un essor particulier concerne ces dernières années, d'une part, l'arc électrique qui retrouve une seconde jeunesse, grâce aux progrès des équipements et des matériaux (fils fourrés) et, d'autre part, la projection hypersonique.

La projection thermique, hors corrosion, s'est longtemps développée dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique ou le nucléaire. D'autres secteurs sont aujourd'hui porteurs pour la projection thermique comme par exemple :

- . L'automobile avec les développements sur les pots catalytiques, ou le remplacement des chemises rapportées sur les blocs moteurs en alliage d'aluminium ;
- . L'énergie avec la production de piles à combustible à électrolyte solide en céramique ;
- . La mécanique en particulier dans l'optique de remplacer le chrome dur.

La recherche la plus pointue concerne toujours l'aéronautique, en particulier dans le cadre de pièces réalisées entièrement par plasma-formage, ou encore dans le cadre de dépôts à gradient fonctionnel (composite du type céramique/métal).

L'apparition de nouveaux matériaux compatibles avec la projection thermique (polymères, intermétalliques, nanocristaux, quasicristaux, amorphes, abrasables...) élargira également son champ d'application.

Le point le plus important pour l'avenir de la projection thermique concerne certainement la prise de conscience, au niveau des bureaux d'études notamment, des possibilités offertes par l'ensemble des procédés proposés et donc la possibilité de les intégrer dès la conception d'une pièce, et non plus de les utiliser en dernier recours.

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques :

- [1] M. khechba (2008), thèse de magistère, Université de Constantine.
- [2] « SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION » GHOMARI Fouad  
UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID. Tlemcen
- [3] Hazard et coll., Mémotech — Structures métalliques (Casteilla, 2000), p. 14
- [4] R. BUTIN, M. PINOT "Fabrications mécaniques". Technologie, tome 2, 1981.
- [5] « MATÉRIAUX MÉTALLIQUES » Michel Colombie
- [6] M. KRAUB, B. SCHOLTES , Thermal Fatigue of Shot Peened on Hard Turned HotWork steel AISI H11;324-330; 2002042.
- [7] N. Mebarki, D. Delagnes, P. Lamesle, F. Delmas, C. Levailant, Mater. Sci. Eng. A387–389 (2004) 171.
- [8] A. Bahrami, S. H. Mousavi Anijdan, M. A. Golozar, M. Shamanian, N. Varahram, Wear, 258 (2005) 846.
- [9] J.BANALIS, G.MEADER, Précis de métallurgie-Elaboration, structure,propriétés, normalisée ; Edition Nathau 1997.
- [10] M. COLOMBIE , Matériaux industriels, matériaux métallique ; DUNOD,Paris 2000
- [11] Y. C. Lin, S. W. Wang, T. M. Chen, J. Mater. Process. Technol. 120 (2002) 126.
- [12] L.COLOMBIER, les aciers à outils et leur traitement thermique,1971,PYCEDITION, Paris.
- [13] L. Schmidt, 'Tool Materials for Molds and Dies', 1987, Colorado School of Mines Press, 118.
- [14] J. R. T. Branco, 'Development of Nb Modified AISI H13/H11 Type Tool steels', Ph.D.thesis 1989 Colorado School of Mines
- [15] S. Mayer, C. Scheu, H. Leitner, I. Siller, H. Clemens, Int. J. Mater. Res. 100 (2009) 86.
- [16] M. L. Schmidt, ibid. 118-64.
- [17] M.M.BCHAUPINIL, L.SERAPLIR , R.TRIWT: 'Analogies et différence entre les traitements de carbonituration et de cémentation', Aciers spéciaux №13, 1975.
- [18] R. Lévêque: Traitement superficiels des aciers à outils, Techniques de l'Ingénieur, 1993, M1135, Paris, France.
- [19] H. Hems, H. Fr. Hinz and I. M. Hucklenbroich: 'Progress in tool steel', Proceeding of the 4th international Conference on tooling, 1996, University Bochum.

## Références bibliographiques

---

- [20] V.YAKUB, A.TIJANI: 'Modeling and Simulation of Thermochemical Heat Treatment Processes: A Phase Field Calculation of Nitriding in Steel', PHD thesis, university of Bremen 06/2008
- [21] D.GHIGLIONE, C.LEROUX, 'Pratique des traitements thermo-chimiques, cémentation, carbonitruration ; Technique de l'ingénieur M1226, page 2-20.
- [22] X. An, J. Cawley, W.M. Rainforth and L. Chen: Spectrochimica Acta-Part B, 2003, 58, 689-698.
- [23] M.J.SCHMUCK; Propriétés comparées des surfaces des pièces cémentées et carbonitrurées, aciers spéciaux N°33.1976.
- [24] C. FRANZ, G. BESSERDICH, V. SCHULZE, H. MUELLER, D. LOEHE, Influence of transformation plasticity on residual stresses and distortions due to the heat treatment of steels with different carbon contents; J. Phys. IV, 120:481–488, 2004.
- [25] M. SLOVACEK, Application of numerical simulation of heat treatment in industry; J. Phys. IV, 120:753–760, 2004.
- [26] R.M. MUÑOZ RIOFANO, L.C. CASTELETTI, P. NASCENTE, Effect of Ion Nitriding on the Abrasive Wear Resistance of Ultrahigh-Strength Steels with Different Silicon Contents; JMEPEG (2005) 14:75-84.
- [27] M. HERNANDEZ, M.H. STAIA, E.S. PUCHI-CABRERA, Evaluation of microstructure and mechanical properties of nitrided steels; Surf. Coat. Technol., 202:1935–1943, 2008.
- [28] S.BÖHMER, H.SPIES, J.BERG, Oxygen probes for controlling nitriding and nitrocarburising atmospheres; Surface Engineering, vol 10, no 2, p. 129 à 135 (1994).
- [29] R.HOFFMANN, K.WEISSOHN, Le rôle des sondes à oxygène dans la nitruration et la nitrocarburation ; Trait. Therm., no 267 (1993).
- [30] M.CARTIER, M.ARMBRUSTRE: 'Guide d'emploi des traitements de surfaces appliqués aux problèmes de frottement', Edition TEC et DOC.2000, page 187-195.
- [31] ASM Handbook, Vol.4, Heat Treating: ASM International, Materials Park, Ohio, 1991.
- [32] Y. Desalos: Revue traitement thermique, 1998, N° 315, 35-40.
- [33] N. Krishnaraj, P. Bala Srinivasan, K.J.L. Iyer and S. Sundaresan: Wear, 1998, 215, 123-130.

## Références bibliographiques

---

- [34] Schoop M.U., "Improvements in or connected with the coating of surface with metal, applicable also for soldering or uniting metals and other materials." United Kingdom Patent office 5,712 A.D. 1910, and JTST, Vol. 10, No 1, march 2001
- [35] M.KEHIL, « Tenue à l'usure d'un acier ordinaire à dépôt d'alumine par plasma, thèse de magister, mécanique appliqué » université Sétif, 2012.
- [36] S.NOUROUZI, « Contribution à l'étude du procédé ARC-FIL, pour la réalisation de dépôt métalliques durs résistants à l'usure abrasive » thèse de doctorat, université de Limoges, France, 2004.
- [37] A. Proner, revêtement par projection thermique, (éd) technique de l'ingénieur, M 1645, P 1-20,1999.
- [38] S. Beauvais, Thèse doctorat : « *Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma* », Ecole de Mines de Paris, 2003
- [39] <http://surfatec.org/>, guide du sablage, des grenailages, du microbillage, etc
- [40] S.BEAUVAIS, « Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma » Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003.
- [41] T. Mana, « évaluation de la tenue à l'usure d'un dépôt en acier 100Cr6 réalisée par technique de projection thermique à flamme-fil » mémoire de fin d'études, science des matériaux, université Bejaia,2007.
- [42] F.CHOUIT « Elaboration et caractérisation des matériaux de revêtements de types (Ni-Al-Zn) par projection thermique (torche), mémoire de fin d'études, Matériaux supraconducteurs et diélectriques » université annaba, 2008.
- [43] N. HIDJA , A. AIS, mémoire de fin d'étude « frottements des dépôt obtenue par projection thermique à l'arc électrique », université de béjaia.2009.
- [44] Site web <http://www.gordonengland.co.uk> , Nature of Thermal Spray Coatings.
- [45] R. YOUNES, mémoire de fin d'étude « étude du comportement mécanique et microstructural des revêtement en céramique obtenue par projection thermique<sup>3</sup> », université de béjaia.2016.
- [46] B.SADOUDI, mémoire de fin d'étude « étude comparative de la tenue à l'usure de deux types de dépôts réalisée par projection thermique via le teste de perte de mase en fonction du temps », université de béjaia.2007.
- [47] CHABROL-F.SCHUSTER, Caractérisation et contrôle des couches(1998).

## Références bibliographiques

---

[48] A. LAMRAOUI, thèse de doctorat « traitement de surface par texturation laser : une alternative "propre" de préparation de surface pour la projection thermique », Université de Belfort-Montbéliard, France, 2011.

[49] Y. Danlos, thèse de doctorat « Etude de l'association laser-projection thermique pour l'optimisation de revêtements », Université de Belfort-Montbéliard, France, 2009.

[50] F. TOURI, Mémoire de fin d'étude « Synthèse de nouveaux matériaux moléculaires par phosphorylation des dérivés aminés et étude de leurs propriétés électrochimiques et complexâtes » Université de setif, 2012.

**Résumé :**

Les métaux sont définis comme des solides utilisés à grande échelle industrielle pour la conception d'objets caractérisés par leurs fonctions et leurs propriétés physiques.

Les effets des traitements thermiques classiques (trempe et revenu) et du traitement thermochimique (cémentation à gaz par exemple) sur les caractéristiques mécaniques d'un acier à outil industriel de travail à chaud, proche de AISI-H11/H13 sont étudiées. La différence dans la composition chimique réside dans les éléments carbonés, silicium et vanadium. L'objectif des traitements thermiques est d'obtenir un outil efficace et performant en termes de dureté, de résistance à l'usure et de résistance au choc.

La projection thermique fait partie des techniques de traitement de surface par voie sèche. Cette technique regroupe un ensemble de procédés utilisés pour réaliser des revêtements épais (quelques dizaines de micromètres à quelques centaines généralement) de nature très variées sur des substrats (pièce à revêtir) tout aussi variés.

**Mots clés :** les métaux, traitement chimique, acier, projection thermique.

**Abstract :**

Metals are defined as solids used on a large industrial scale for the design of objects characterized by their functions and physical properties.

The effects of conventional heat treatment (quenching and tempering) and thermochemical treatment (gas cementation for example) on the mechanical characteristics of a hot working industrial tool steel, close to AISI-H11 / H13 are studied. The difference in the chemical composition lies in the elements carbon, silicon and vanadium. The objective of thermal treatments is to obtain an effective and efficient tool in terms of hardness, wear resistance and impact resistance.

Thermal spraying is part of dry surface treatment techniques. This technique groups together a set of processes used to produce thick coatings (a few tens of microns to a few hundreds generally) of very varied nature on substrates (part to be coated) just as varied.

**Key words:** metals, chemical treatment, steel, thermal spraying