

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT : GENIE  
MECANIQUE



FILIERE : GENIE MECANIQUE  
OPTION : GENIE DES  
MATÉRIAUX

N° :...../2022.....

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Réalisé Par :

LAMOURI Hamza

KHADAR Adel

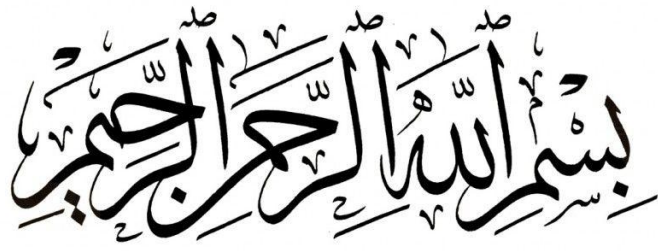
Intitule

**Etude de traitement de surface des aciers alliés**

Soutenu devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité
ZEMMAMOUCHE Radouane	MCA	Président
BENARIOUA Younes	Professeur	Encadreur
BOUDILMI Aissa	MCA	Examineur

Année universitaire : 2021 / 2022



## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

- + A mon cher père et ma chère mère.*
- + A mes chers frères et sœurs.*
- + A toute ma famille.*
- + A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

## *Remerciements*

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant, qui nous a  
donné la force et

La foi pour accomplir ce modeste travail ;

Nous tenons à adresser nos profonds remerciements à notre directeur de  
recherche,

Pr. BENARIOUA Younes, pour ses précieux conseils, ses orientations, son  
aide, son

Soutien, et sa confiance en nous ;

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt  
qu'ils ont porté à

Notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par  
leurs

Propositions.

Merci à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce

modeste

mémoire.

Liste des figures

<b>CHAPITRE I : Généralités sur les aciers</b>		<b>Page</b>
<b>Fig. I. 1.</b> Illustration schématique des principaux constituants du système Fe <sub>3</sub> -C		<b>10</b>
<b>Fig. I. 2.</b> Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe -Fe <sub>3</sub> C		<b>11</b>
<b>Fig. I. 3.</b> Diagramme métastable Fe <sub>3</sub> -C		<b>12</b>
<b>Fig. I.4.</b> Influence du carbone		<b>14</b>
<b>Fig. I.5.</b> Teneur en éléments d'alliages		<b>18</b>
<b>Fig. I.6.</b> Teneur en éléments d'alliages		<b>19</b>
<b>CHAPITRE II : LES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS</b>		
<b>Fig. II.1.</b> Représentation schématique du chauffage par induction pour la trempe superficielle		<b>24</b>
<b>Fig. II.2.</b> Représentation schématique pour la trempe superficielle Par un chalumeau		<b>25</b>
<b>Fig. II.3.</b> Représente l'opération de La nitruration		<b>32</b>
<b>CHAPITRE III : Matériaux et méthode expérimentale</b>		
<b>Fig III.1.</b> l'opération de découpage		<b>39</b>
<b>Fig III.2</b> Avant et après la coupage		<b>39</b>
<b>Fig.III.3.</b> Machine de polissage		<b>40</b>
<b>fig.III.4.</b> représenter four de traitement de nitruration		<b>41</b>
<b>Fig III.5:</b> microscope optique NIKON		<b>42</b>
<b>Fig III.6:</b> La machine de microduromètre		<b>43</b>
<b>Fig III.7 :</b> vue d'empreinte		<b>44</b>

<b>Fig III.8.</b> Micrographie Acier A	<b>46</b>
<b>Fig III .9.</b> Micrographie Acier B	<b>47-48</b>
<b>Fig.III.10</b> Micrographie Acier E	<b>49-50</b>

## Liste des Tableau

<b>CHAPITRE I: Généralités sur les aciers</b>		<b>Page</b>
<b>Tableau I 1</b>	Les différentes classes d'aciers	<b>02</b>
<b>Tableau I 2</b>	Les limites des teneurs en éléments d'alliage	<b>03</b>
<b>CHAPITRE II : LES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS</b>		
<b>Tableau II.1.</b>	Généralement l'épaisseur de la couche à cémenter	28
<b>CHAPITRE III : Matériaux et méthode expérimentale</b>		
<b>Tableau III.1</b>	les échantillons des aciers	<b>38</b>
<b>Tableau III.2.</b>	La dureté des échantillons après la nitruration	<b>51</b>

**TABLE DES MATIERES**

## Introduction générale

<b>CHAPITRE I: Généralités sur les aciers</b>		<b>Page</b>
Introduction		<b>01</b>
I.1. Les différentes classes d'aciers		<b>01</b>
I.1.1 Aciers non alliés et aciers alliés		<b>02</b>
I.1.2 Aciers de qualité		<b>03</b>
I.1.3 Les aciers spéciaux		<b>05</b>
I.1.4 Aciers inoxydables		<b>05</b>
I.1.5 Généralités sur les aciers à outils		<b>06</b>
I.1.5.1 Classification des aciers a outils		<b>06</b>
I.2 acier faiblement allié		<b>07</b>
I.3 Aciers fortement alliés		<b>07</b>
I.4 Aciers de construction		<b>08</b>
I.5 DIAGRAMME FER-CARBONE		<b>08</b>
I.5.1. Les différentes phases du système Fer-Carbone		<b>08</b>
I.5.2 Diagramme stable- diagramme métastable		<b>10</b>
I.5.2.1 Analyse du diagramme Fer-carbone à cémentite		<b>11</b>
I.6 .Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier		<b>13</b>
I.6.1. Influence des éléments chimiques constants		<b>14</b>
I.6.2 Influence de l'azote, de l'oxygène et de l'hydrogène		<b>16</b>
I.6.3 Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier		<b>17</b>
Conclusion		<b>19</b>
<b>CHAPITRE II: LES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS</b>		
Introduction		<b>20</b>
Partie A		<b>20</b>
II.1 traitements thermiques calcique		<b>20</b>
II.1.1. Trempe		<b>20</b>

II.1.2 .Revenu	<b>21</b>
II.1.3. Le recuit	<b>22</b>
Partie B	<b>22</b>
II.2 traitement thermique superficielle	<b>22</b>
II.2.1 traitement thermique superficielle sous ajoute d'éléments d'additions	<b>22</b>
II .2.1.1 Trempe superficielle	<b>23</b>
II.2.2 traitement thermique superficielle avec l'ajoute d'éléments léger	<b>25</b>
II.2.2.1. Cémentation de l'acier	<b>25</b>
II.2.2.1.1 Mécanisme de la cémentation	<b>26</b>
II.2.2.1.2 Les procédés de cémentation	<b>27</b>
II.2.2.2 La nitruration	<b>30</b>
II.2.2.2 .1Mécanisme de la formation de la couche nitrurée	<b>31</b>
II.2.2.2.2 La nitruration présente beaucoup d'avantages sur la cémentation	<b>31</b>
II.2.2.3 La carbonitruration	<b>33</b>
II.2.2.4 La cyanuration	<b>33</b>
II.3.1 traitement thermique superficielle avec l'ajoute d'éléments lourds	<b>34</b>
II.3.1.1 La chromisation	<b>34</b>
II.3.1.2 La boruration	<b>35</b>
II.3.1.3 La siliciuration	<b>36</b>
Conclusion	<b>36</b>
<b>CHAPITRE III : Matériaux et méthode expérimentale</b>	
Introduction	<b>37</b>
III.2.1.Matériaux étudiés	<b>37</b>
III.2.2.Mode de préparation des échantillons	<b>38</b>
III.2.2.1.Le decoupage	<b>38</b>
III 2.2.2 le polissage	<b>39</b>
III.2.2.3.Traitement de nitruration	<b>40</b>
III. 3. Caractérisation	<b>41</b>
III.3.1.Préparation des échantillons	<b>41</b>

III.3.2.Procédure d'attaque pour métallographie optique	<b>41</b>
III.3.3.Microscopie optique	<b>42</b>
III 3.4 La Microdureté	<b>43</b>
III.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS	<b>44</b>
III.4.1. Microstructure	<b>45</b>
III.4.2. Cémentation de l'acier XC38	<b>45</b>
III.4.3. Cémentation de l'acier 22MC6	<b>46</b>
III.4.4. Nitruration de l'acier 42CD4	<b>48</b>
III.5. Epaisseurs des couches de traitements	<b>50</b>
III. 6. Dureté.	<b>51</b>
Conclusion	<b>52</b>

Conclusion générale

## **Introduction générale**

L'industrie sidérurgique qui s'intéresse à la production de l'acier et des fontes reste toujours importante, malgré le développement dans d'autres secteurs de production de matériaux métalliques et non métalliques. Les produits sidérurgiques jouent également un rôle crucial dans le développement d'une société. Les entreprises sidérurgiques compétitives génèrent des emplois, des recettes d'exportation, des recettes fiscales et des innovations. Le développement dans les différents secteurs industriels est dû au développement de programmes de recherche dans le domaine des matériaux. Beaucoup de chercheurs sont entraînés de développer de nouveaux matériaux comme les polymères, les céramiques et particulièrement les matériaux composites qui présentent un sujet d'actualité.

Le durcissement superficiel des matériaux métalliques peut être obtenu par une diversité de procédés mécaniques, thermiques, physico-chimiques ou thermochimiques. Les buts essentiels sont principalement d'améliorer de la résistance à l'usure et à l'oxydation à basse ou à haute température

Parmi les différents types de aciers, où nous avons pris un groupe de types d'acier, et compris l'acier non alliés et aciers alliés, et le traitement thermique, pour les aciers occupent toujours la place qu'il faut, et ceci grâce à leur aptitude à la transformation et l'amélioration des différentes propriétés.

L'objet de cette étude est d'obtenir et de caractériser, tant du point de vue microstructural que mécanique, les couches obtenues à partir de la nitruration et cémentation des différents aciers en utilisant différents paramètres technologiques tel que la température, le temps de maintien et la pression du gaz utilisé.

Le travail de cette étude est agencé en trois chapitres. Le premier chapitre s'articule autour des généralités sur l'historique et les types des aciers. Le deuxième chapitre est une bibliographie générale sur le traitement thermique des aciers. Pour le troisième chapitre, il sera réservé à la phase pratique de notre travail dans laquelle nous allons appliquer un traitement basé sur la nitruration et cémentation sur les matériaux choisis. Le manuscrit de cette étude est terminé par une conclusion générale et liste de références bibliographiques.

# CHAPITRE I

## Généralités sur les aciers

### **Introduction :**

L'acier est un alliage métallique utilisé dans les domaines de la construction métallique

L'acier est composé d'au moins deux éléments, principalement du fer et ensuite du carbone, en pourcentages allant de 0,02% à 1,67% en poids.

C'est essentiellement une teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés d'un métal appelé "acier". Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne possèdent pas de propriétés semblables à l'acier ni de ferronickel, par exemple.

Il existe de nombreux types d'acier qui peuvent être étudiés et savent être exploités

- Quels types d'acier peuvent être étudiés et connaissent leurs caractéristiques ?

### **I.1. Les différentes classes d'aciers :**

Les familles d'aciers sont classées en deux critères :

A- La composition chimique : nature et teneur des éléments d'alliage, aciers non alliés ( $\leq 1\%$  d'éléments d'alliage), aciers peu alliés (teneur de chaque éléments d'alliage  $\leq 5\%$ ), aciers très alliés.

B- Propriétés d'usage ou qualité : aciers de qualité, aciers spéciaux, (aciers d'usage général, aciers de construction mécanique, aciers pour appareils à pression, aciers à outils, aciers inoxydables).

C'est ainsi que la norme NF EN 10020 distingue selon des classes de qualité définies dans le Tableau I 1

**Tableau I 1** Les différentes classes d'aciers

<b>Aciers</b>	<b>Non alliés</b>	<b>Alliés</b>
<b>De qualité</b>	Aciers de qualité non alliés	Aciers de qualité alliés
<b>Spéciaux</b>	Aciers spéciaux non alliés	Aciers spéciaux alliés
<b>Inoxydable</b>	/	Aciers inoxydables

### **I.1.1 Aciers non alliés et aciers alliés :**

Pour définir ces 2 classes d'aciers, il faut prendre en compte :

- pour un élément d'alliage autre que Mn, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou 70 % de la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée,
- pour le manganèse, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée (la limite prévue au tableau suivant est alors portée à 1,80 %).

Les limites des teneurs en éléments d'alliage qui séparent le domaine des aciers non alliés du domaine des aciers alliés sont indiquées dans le Tableau : I.2. Un acier est considéré comme allié dès qu'une de ces limites est atteinte.

**Tableau I 2** Les limites des teneurs en éléments d'alliage

Élément spécifié	Limite %
AL	0.30
B	0.08
Cr	0.30
Cu	0.40
Mn	1.65
Mo	0.08
Nb	0.08
Ni	0.30
Si	0.60
Ti	0.05
V	0.10
W	0.30
ZR	0.05
Autres éléments(C S P N...)	0.05

### I.1.2 Aciers de qualité :

Les aciers de qualité sont des aciers pour lesquels il existe, par exemple, des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ou de formabilité.

**A- Aciers de qualité non alliés** Tous les aciers non alliés qui ne sont pas des aciers spéciaux.

#### A.1 Aciers au carbone pour appareils à pression

Aciers de qualité non alliés (Fe/C ou Fe/C/Mn) auxquels il est demandé de retrouver leur structure d'emploi par normalisation (et éventuellement revenu) après mise en forme à chaud (à l'état austénitique). Ces aciers doivent satisfaire à des exigences particulières relatives à leur résistance à la rupture fragile et, lorsqu'ils sont employés à température supérieure à l'ambiante, à leur limite d'élasticité à chaud et à leur tenue au fluage.

## **A.2 Aciers pour emboutissage et pliage à froid**

Aciers de qualité livrés en produits plats auxquels il est demandé de présenter des propriétés particulières de ductilité, d'emboutissage et d'état de surface. En général, les teneurs en éléments interstitiels de ces aciers sont réduites le plus possible (sauf parfois en phosphore ajouté pour augmenter la limite d'élasticité). Parmi ces aciers, on peut classer les aciers pour emballages, aciers de qualité auxquels, outre l'aptitude à l'emboutissage, on demande une propreté inclusion aire particulière et, dans certain cas, une protection spécifique contre la corrosion (fer blanc et fer chromé notamment).

## **B- Aciers de qualité alliés**

Aciers qui contiennent des éléments d'alliage mais ne sont pas, en général, destinés à un traitement thermique. Font partie de cette catégorie :

- des aciers à grains fins soudables de construction métallique.
- des aciers pour tôles magnétiques.
- des aciers pour rails, palplanches ou cadres de mine.
- des aciers en produits plats destinés à un formage à froid sévère et contenant des éléments d'affinement du grain tels que B, Nb, Ti, V et/ou Zr.
- des aciers ne contenant comme élément d'alliage que Cu.
- des aciers dits « dual phase » (aciers biphasés ferritiques avec 10 à 35 % de martensite).

### I.1.3 Les aciers spéciaux :

Les aciers spéciaux présentent, par rapport aux aciers de qualité une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. Ils sont généralement destinés à un traitement thermique et se caractérisent par une réponse régulière à ce traitement.

#### A- Aciers spéciaux non alliés :

Font partie de cette catégorie : – des aciers avec garantie de résilience à l'état trempé et revenu; – les aciers avec garantie de réponse aux traitements thermiques; – des aciers à teneur faible en inclusions; – des aciers à teneur en S et P ne dépassant pas 0,020 % à l'analyse sur coulée et 0,025 % à l'analyse sur produit; – des aciers dont la résilience KV en long à – 50 °C est supérieure à 27 J sur éprouvettes prélevées en long et 16 J sur éprouvettes prélevées en travers; – des aciers pour réacteurs nucléaires avec  $Cu \leq 0,10 \%$ ,  $Co \leq 0,05 \%$  et  $V \leq 0,05 \%$ ; – des aciers ferrito-perlitiques micro-alliés au V et/ou Nb dont la teneur en carbone n'est pas supérieure à 0,25 %; – des aciers pour armature de précontrainte du béton.

#### B- Aciers spéciaux alliés :

Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers de qualité ni des aciers inoxydables. Font partie de cette catégorie : – les aciers de construction mécanique, – certains aciers soudables à grains fins pour appareils à pression; – certains aciers résistant au fluage; – les aciers pour roulement; – les aciers à outils et les aciers à coupe rapide; – des aciers à propriétés physiques spéciales.

### I.1.4 Aciers inoxydables :

On appelle aciers inoxydables des aciers qui résistent à la corrosion atmosphérique et à la corrosion électrochimique. Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone (pour éviter la précipitation de carbures de chrome). Bien qu'un certain nombre tels que Mo, Cu, Si, Ti, Nb, etc., soient ajoutés pour améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques, l'essentiel des propriétés des aciers inoxydables est lié à la

connaissance des diagrammes de phases et des diagrammes TRC des alliages ternaires Fe-Cr et quaternaires Fe-C-Cr-Ni.

### **I.1.5 Généralités sur les aciers à outils :**

Ces aciers sont utilisés dans la fabrication d'outils destinés ; soit à la mise en forme d'autres matériaux avec ou sans enlèvement de matière ; soit à la préhension ou au mesurage d'objets. La diversité des problèmes posés dans ces domaines conduit à l'existence d'un très grand nombre de nuances d'aciers à outils.

#### **A- Propriétés générales d'emplois :**

- Dureté la plus élevée possible, permettant une grande résistance aux déformations lors du travail par enfoncement, pénétration ou cisailage.
- Ténacité élevée permettant de supporter des contraintes élevées sans rupture brutale, caractéristique souvent complétée par une bonne résistance aux chocs répétés.

#### **B- Propriétés de mise en œuvre :**

- Bonne trempabilité afin d'obtenir des duretés homogènes et élevées sur de grandes épaisseurs sans déformation excessives.
- Résistances convenables à la surchauffe, au grossissement de grain, à la décarburation.
- Résistance à l'adoucissement au revenu.
- Bonne usinabilité et bonne aptitude à la rectification.

### **I.1.5.1 Classification des aciers à outils :**

Il est intéressant de classer ces aciers selon la température atteinte par la partie active en cours de service, c'est-à-dire d'utiliser comme critère la résistance à l'adoucissement en fonction de la température (ou la dureté à chaud). La norme NF EN ISO 4957 range les aciers en quatre classes ;

A- Aciers non alliés pour travail à froid

B- Aciers alliés pour travail à froid

C- Aciers alliés pour travail à chaud

D- Les aciers rapides : Les éléments d'alliage de base sont W, Mo, V, Cr

## I.2 acier faiblement allié :

La teneur en manganèse est supérieure à 1 % et aucun élément d'addition ne doit dépasser 5 % en masse. Ils sont utilisés pour des applications nécessitant une haute résistance.

### Exemples de désignation normalisée :

35NiCrMo16 : contient 0,35 % de carbone, 4 % de nickel, du chrome et molybdène en plus faible teneur. Cet acier présente une bonne tenue aux chocs ainsi qu'une haute résistance mécanique jusqu'à 600 °C ; 100Cr6 : 1 % de carbone et 1,5 % de Chrome. C'est l'acier typique utilisé dans les roulements à bille

Exemple :

55Cr3

0,55 % de carbone - 0,75 % de chrome

( $3 / 4 = 0,75$ ).

51 CrV 4

0,51 % de carbone - 1 % de chrome

( $4 / 4 = 1$ ). Pour cette désignation le pourcentage de vanadium n'est pas précisé .

## I.3 Aciers fortement alliés :

Au moins un élément d'addition dépasse les 5 % en masse, destinés à des usages bien spécifiques, on y trouve des aciers à outils, réfractaires, (très haute résistance, utilisés dans l'aéronautique et pour la fabrication de coque de sous-marins), (très grande résistance à l'usure), (faible coefficient de dilatation).

Un exemple de désignation normalisée est « X2CrNi18-9 » (il s'agit d'un acier inoxydable).

Les aciers rapides spéciaux (HSS) font partie de cette famille.

**Exemple : X 5 Cr Ni Mo 17-12**

acier fortement allié

- 0,05% de carbone
- 17% de chrome.
- 12% de nickel.

**Autre exemple : X 30 Cr 13**

X 30 Cr 13

- acier fortement allié
- 0,30% de carbone
- 13% de chrome.

## **I.4 Aciers de construction :**

Peut utiliser comme aciers de construction de simples aciers au On carbone mais aussi, très souvent, des aciers alliés dès qu'il ne s'agit plus de pièces peu sollicitées (les éléments d'alliage les plus fréquents sont le chrome, le nickel, le molybdène). Pour répondre aux exigences croissantes des mécaniciens, on a été conduit à élaborer un assez grand nombre d'aciers de construction qui permettent de couvrir un large éventail de caractéristiques mécaniques et de répondre à des utilisations très diverses.

## **I.5 DIAGRAMME FER-CARBONE :**

### **I.5.1. Les différentes phases du système Fer-Carbone**

**1. La ferrite  $\alpha$  :** Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer  $\alpha$ , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ( $HB \approx 80$ ), peu tenace ( $R \approx 300$  MPa), mais très ductile ( $A \approx 35\%$ ).

**2. La ferrite  $\delta$**  : Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer  $\delta$ . Sa structure est cubique centré CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

**3. L'austénite  $\gamma$**  : Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer  $\gamma$ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint  $\approx 2\%C$  à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

**4. La cémentite (Carbone de fer  $Fe_3C$ )** : La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile.

**5. La perlite** : Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure (HB $\approx$ 200), résistante (Rm $\approx$ 850 MPa) et assez ductile (A $\approx$ 10).

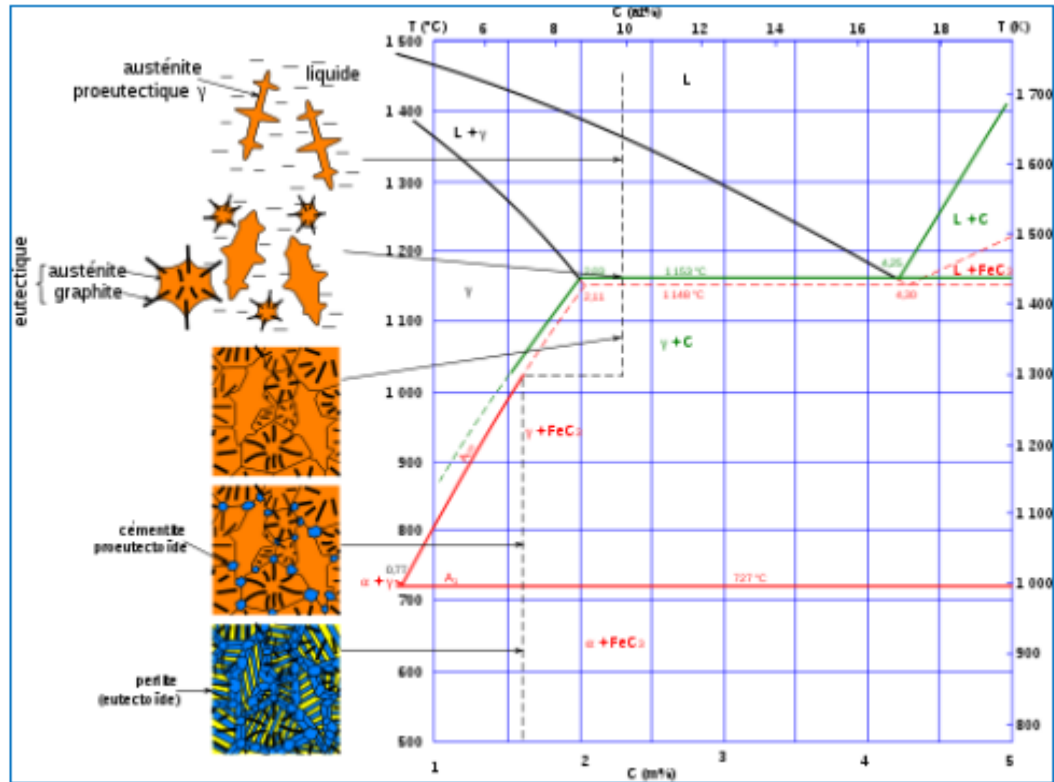


Fig. I. 1. Illustration schématique des principaux constituants du système Fe<sub>3</sub>-C

### I.5.2 Diagramme stable- diagramme métastable :

L'étude dans les conditions d'équilibre des alliages Fe-C, montre qu'ils subissent deux types d'évolution :

- La première produit une phase riche en carbone de formule Fe<sub>3</sub>C appelé carbone de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit métastable ou à cémentite.
- La deuxième forme une phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur C<sub>gr</sub>, qui a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. Son obtention exige la décomposition du carbone Fe<sub>3</sub>C en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium.

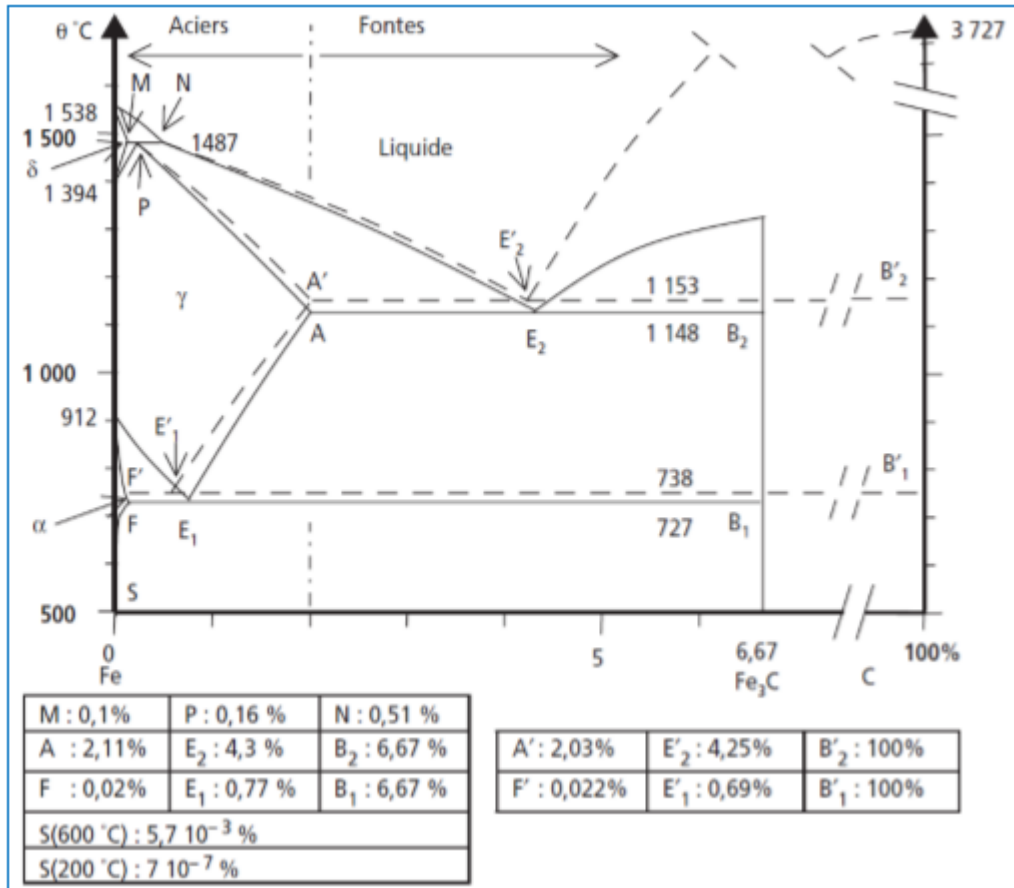


Fig. I. 2. Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe -Fe<sub>3</sub>C

### I.5.2.1 Analyse du diagramme Fer-carbone à cémentite :

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<sub>3</sub>C (6.67%C) et 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).

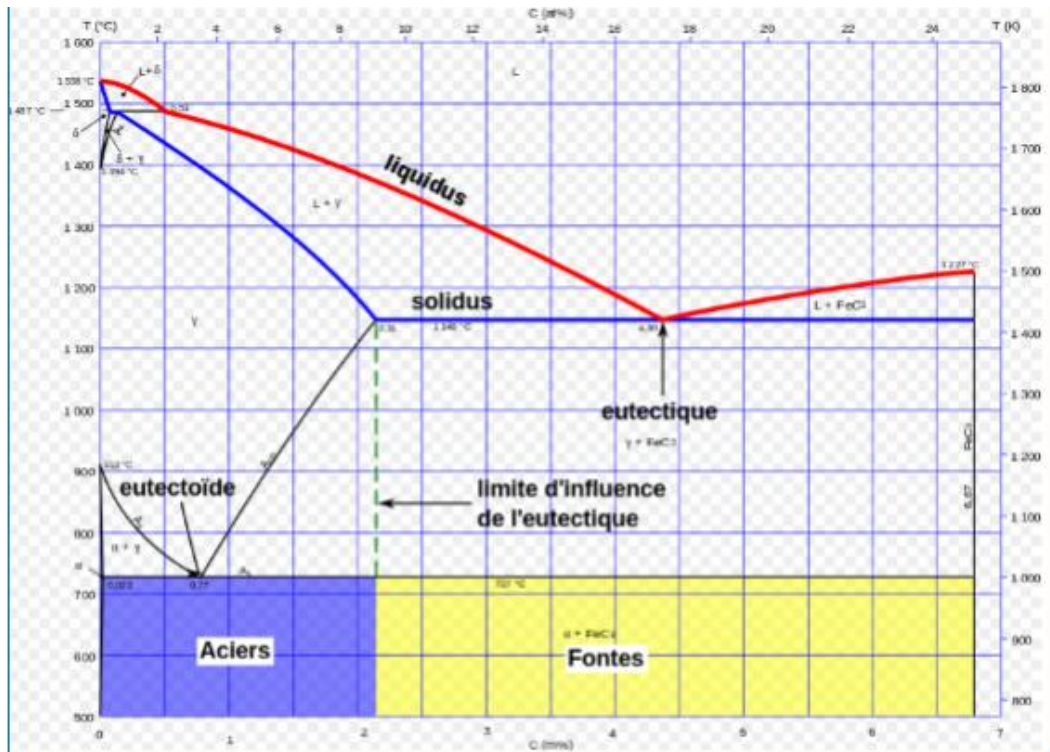


Fig. I. 3. Diagramme métastable Fe<sub>3</sub>-C

#### a. Courbes :

- **Acm** : indique la fin de la dissolution après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.
- **A0** : (210°C) précise la température de la transformation magnétique de la cémentite.
- **A1** : précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austénite n'existe plus au-dessous de cette ligne.
- **A2** : (point de Curie  $\approx 768^\circ\text{C}$ ) précise la température de la perte de magnétisme du Fer  $\alpha$ . en générale ce point ne figure pas sur le diagramme Fer-C.
- **A3** : précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite. La ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

• **A4** : précise la fin de la transformation au chauffage de l'austénite en ferrite  $\delta$  et/ou liquide. L'austénite n'existe plus au-dessus de cette ligne. On peut trouver Ac3, Ac4... pour indiquer que le point est tracé en chauffage, ou Ar3, Ar4 lorsqu'il s'agit de refroidissement

**b. Les transformations :**

Le diagramme Fer-carbone contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers :

- **Eutectique à 1147°C** : il marque la température minimale d'existence du liquide.
- **Eutectoïde à 723°C (A1)**. Il marque la fin de la transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de 723°C, la perlite n'existe plus
- **Péritectique à 1487°C**, mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.

## **I.6. Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier**

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2 % ( $\ll 2\%$ ), outre le fer et le carbone qui sont les éléments essentiels rentrant dans leur composition, les aciers se composent de plusieurs autres inclusions ou impuretés constantes ou inévitables telles que Mn, Si, P, O, N, H, etc., qui influent sur leurs propriétés. La présence de ces inclusions s'explique soit par :

- La difficulté de l'élimination de certaines d'entre elles lors de l'élaboration (S, P). - Leurs passages dans l'acier lors de l'opération de désoxydation (Mn, Si). - L'addition en vue d'améliorer les propriétés de l'acier (Cr, Ni, Mo, etc.)

Les fontes contiennent ces mêmes inclusions ou impuretés mais en teneurs plus grandes.

L'influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier peut être divisée en deux groupes les éléments chimiques constants et les éléments d'alliages.

### I.6.1. Influence des éléments chimiques constants

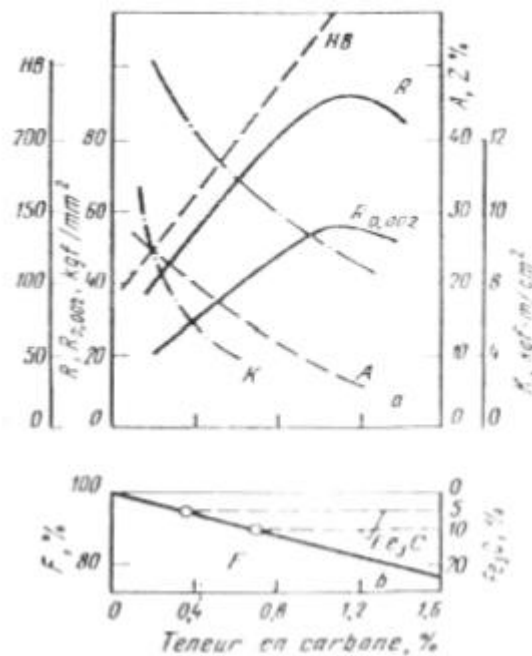
La fragilité et la plasticité sont les propriétés essentielles de l'acier, le même métal peut être ductile ou fragile selon :

- La composition chimique. - L'état de surface. - La température.

Parmi les éléments chimiques, généralement contenus dans les aciers ordinaires, on peut citer : C, Si, Mn, P, S, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>.

#### a. Le carbone :

Après refroidissement lent, la structure d'un acier se compose de la ferrite et de la cémentite (deux phases). La quantité de cémentite est directement proportionnelle à la teneur en carbone, (fig.I. 5).



**Fig. I.4.** Influence du carbone :

a- sur les propriétés mécaniques de l'acier

b- sur le nombre de phases présentes dans l'acier

La ferrite, une fois associée à la cémentite, donne la perlite. Le carbone est un élément qui a une grande influence sur les propriétés de l'acier. L'augmentation de la teneur en carbone accroît la dureté, la charge à la rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement, la striction et la résilience.

Notons toutefois que la résistance commence à chuter à partir de 1,2 % C (fig.5). Les propriétés physiques changent aussi et on observe :

- La diminution de la densité, de la conductibilité thermique, de l'induction rémanente et de la permittivité. - L'augmentation de la résistivité électrique et de la force coercitive.

L'influence la plus importante du carbone sur les propriétés mécaniques de l'acier est surtout due au fait que, par trempe on obtient un constituant très dur, appelé la martensite.

#### **b. Le silicium :**

La teneur du silicium dans l'acier varie de 0,05 à 0,3 %, il existe surtout à l'état de solution ferrite. Son influence n'est pas très importante sur les propriétés de l'acier, mais rend toutefois, l'acier plus homogène à la coulée, en s'opposant, grâce à son pouvoir réducteur à la formation de soufflures, l'un des défauts les plus fréquents qu'on rencontre après solidification de l'acier. Sa présence en grande quantité permet une bonne désoxydation de l'acier.

#### **c. Le manganèse :**

Le manganèse existe en solution dans la ferrite sous forme de MnS et surtout sous forme de carbure  $Mn_3C$  associé à la cémentite  $Fe_3C$ . Sa teneur dans l'acier varie de 0,2 à 0,8 %. La présence du manganèse dans l'acier est très souhaitée, car d'une part, il augmente la dureté de l'acier et sa trempabilité, et d'autre part, il joue le rôle d'antidote du soufre, car le soufre est moins nocif dans la mesure où il se trouve sous forme de MnS et non sous forme de FeS ou de soufre libre.

#### **d. Le phosphore :**

Il existe en solution dans la ferrite et provoque un grossissement du grain, ce qui augmente la fragilité de l'acier à froid. En se ségréguant facilement, il contribue à l'hétérogénéité de l'acier. Sa

teneur doit être limitée de 0,025 à 0,040 %. Le phosphore augmente la limite élastique et la charge de rupture tout en diminuant considérablement la plasticité et la ductilité.

**e. Le soufre :**

C'est un élément nuisible pour l'acier, il diminue surtout sa forgeabilité. Il peut exister sous forme de MnS et de FeS. A froid, le soufre amène également une diminution importante de la résistance. La teneur limite en soufre doit être inférieure à (0,035 à 0,060%), généralement inférieure à ¼ de la teneur en manganèse. Parfois, on utilise des aciers de décolletage riches en soufre (0,015 à 0,025 %), afin de faciliter la fragmentation des copeaux. Un minimum de soufre (0,02 %), est toujours nécessaire pour des raisons d'usinabilité.

**I.6.2 Influence de l'azote, de l'oxygène et de l'hydrogène :**

L'azote et l'oxygène sont contenus dans un acier sous forme d'inclusions non métalliques fragiles tels que FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (oxydes) et Fe<sub>4</sub>N (nitrures), de solution solide ou à l'état libre dans les volumes défectueux du métal (retassures, criques, etc.). Les inclusions d'insertion (azote, oxygène), en se concentrant aux joints de grains, forment le long de ces joints, des nitrures et des oxydes, en élevant ainsi le seuil de fragilité à froid et en altérant la résistance à la rupture pour devenir fragile. Les inclusions non métalliques (oxydes, nitrures, scories), étant des concentrateurs de contraintes, sont susceptibles de réduire sensiblement, si leur quantité est importante ou s'ils s'accumulent en agrégats, la limite de fatigue et la résilience.

L'hydrogène dissout dans l'acier est un élément très nocif, qui exerce une forte action fragilisante. Absorbé pendant la fusion, l'hydrogène, non seulement rend l'acier plus fragile, mais détermine dans les laminés et les grosses pièces de forge, la formation des flocons. Les flocons sont des criques très fins et d'une forme ovale ou arrondie, qui apparaissent dans une cassure sous la forme de taches ou flocons argentés. Ils altèrent brusquement les propriétés de l'acier. Leur présence rend le métal inutilisable dans l'industrie. La fragilisation par H<sub>2</sub> s'observe souvent, lors du soudage. L'hydrogène est alors une source de criques à froid dans le métal d'apport et de base. La coulée et la fusion sous vide, diminuent sensiblement la teneur en H<sub>2</sub> dans l'acier.

### I.6.3 Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier

L'addition des éléments d'alliages peut donner lieu à :

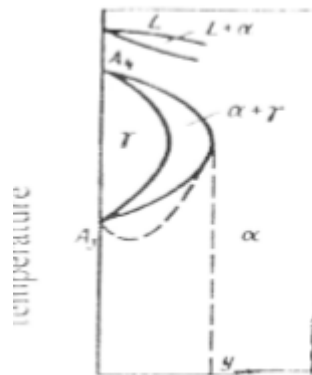
- La formation des solutions solides dans le fer.
- La dissolution de ces éléments dans la cémentite, en remplaçant dans son réseau, les atomes de fer ou à la formation des carbures particuliers.
- La production (lorsque la teneur en éléments d'alliage est élevée), des composés intermétalliques avec le fer.

Les éléments d'alliages ont une influence sur les transformations allotropiques du fer. Tous ces éléments, à l'exception de C, N, H et en partie du bore, formant avec le fer des solutions solides de substitution. Leur dissolution dans le fer, influe fortement sur les positions des points A4 (1392°C) et A3 (910°C), qui déterminent le domaine des températures d'existence du fer  $\alpha$  et  $\gamma$ . L'action exercée par les éléments d'alliages sur les variétés allotropiques du fer permet de les classer en deux groupes.

#### a. Eléments gammagènes :

Comme le Ni et le Mn, ces éléments abaissent le point A3 et élèvent le point A4, ce qui donne une extension du domaine de la phase  $\gamma$  et une réduction du domaine de la phase  $\alpha$ . La figure 137 montre l'addition de ces éléments qui fait monter le point A4 jusqu'à la ligne solidus. Alors que dans les conditions d'une concentration élevée de l'élément d'alliage, le point A descend jusqu'à l'ambiante empêchant ainsi la transformation réciproque  $\alpha$  en  $\gamma$  et  $\gamma$  en  $\alpha$ . Les alliages de ce type sont dit austénitiques. Les alliages qui ne subissent que partiellement la transformation  $\alpha$  en  $\gamma$ , s'appellent demi-austénitiques. Teneur en éléments d'alliages. (fig. 5).





**Fig. I.6.** Teneur en éléments d'alliages

### Conclusion :

Après avoir terminé ce chapitre, nous pouvons tirer les conclusions suivantes : Il est à noter qu'il existe plusieurs nuances d'acier qui ont des propriétés différentes, et donc leurs utilisations seront différentes. Parmi ces aciers, on peut citer les aciers de construction, qui sont notamment des aciers à faible teneur en carbone. Le schéma fer carbone peut également être connu, étudié et évalué en analysant les enjeux qui lui sont liés et les transformations qui se produisent dans la microstructure de l'acier et comment aussi l'effet des éléments ajoutés sur la forme de l'acier et altérant ses propriétés internes, ce qui nous permet de développer Et des découvertes de nombreux aspects qui peuvent être étudiés dans le domaine de l'industrie mécanique

## **CHAPITRE II**

### **Les traitements thermiques des aciers**

#### **Introduction :**

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud et destinée modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Pour les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, certains traitements sont quasi obligatoires pour obtenir une performance optimale. Ces traitements sont la trempe et le revenu. Ils permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques de l'acier: limite élasticité, résistance à la traction, ténacité, dureté et résilience aux besoins de l'utilisation. D'autres traitements, normalement désignés comme recuits, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. Ils ont donc pour but de faire disparaître les états hors équilibre résultant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques.

#### **•Partie A :**

### **II.1 traitements thermiques calcique :**

#### **II.1.1. Trempe :**

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donnera l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine. La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C. La trempe s'effectue

en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier (cf. essai Jominy). Pour les aciers au carbone, la trempe se fait dans l'eau de 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérent à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente. Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment, la transformation de carbone martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion. Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation. Un plan d'accolement est un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans l'ancienne et la nouvelle structure (minimum de distorsion). Lors de la transformation les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille. L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages.

### **II.1.2. Revenu :**

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe). D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour

origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

### II.1.3. Le recuit :

Le recuit d'homogénéisation s'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels

-Le refroidissement a entraîné l'hétérogénéité de composition chimique (ségrégation) de l'austénite. Il s'obtient en maintenant l'acier dans le domaine austénitique (solution solide  $\gamma$ ) à une température aussi élevée que possible afin d'accélérer la diffusion du carbone et celle des autres éléments d'alliage.

-Le recuit de régénération ou normalisation sert à affiner le grain (le rendre plus petit) pour les pièces qui ont subi un grossissement de grain parce qu'ils étaient exposés à une température élevée lors d'une opération de forgeage, moulage ou soudage. Le traitement s'effectue, pour une durée de quelques minutes, entre 50 à 100°C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique. Le refroidissement (normalement à l'air) ne doit pas être trop lent pour éviter un grossissement de grain de la ferrite. Sous les mêmes conditions, mais pour une durée un peu plus longue (15 à 30 min) on pratique

-Le recuit d'adoucissement sur les pièces trempées pour faciliter ensuite leur usinage et formage. On peut obtenir le même résultat par un revenu à une température en-dessous de la température de transformation  $\alpha$ - $\gamma$  pendant environ 15h.

-Le recuit de détente remet en équilibre mécanique en diminuant les contraintes résiduelles (contraintes internes) résultant d'un travail à froid ou d'une opération de soudage. La température du traitement n'est pas liée à la transformation  $\alpha$ - $\gamma$  mais dépend fortement de l'acier.

## •Partie B :

### II.2 traitement thermique superficielle :

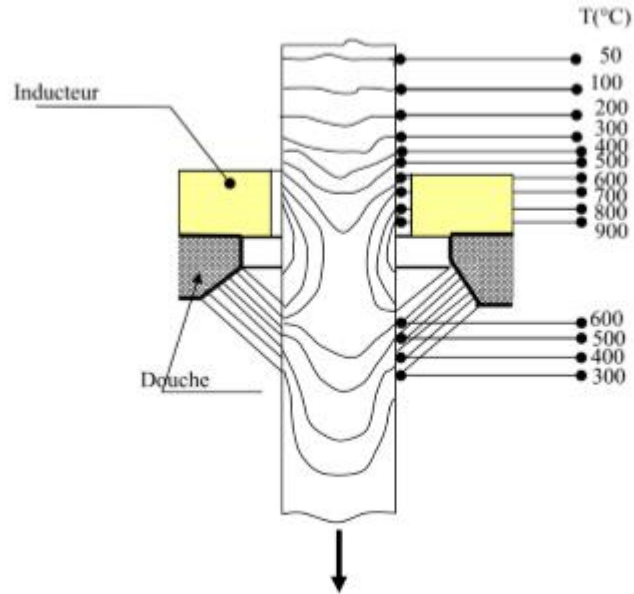
#### II.2.1 traitement thermique superficielle sous ajout d'éléments d'additions :

### II .2.1.1 Trempe superficielle :

La trempe normale a pour but de transformer l'acier en un état martensitique après son refroidissement à partir de la température de trempe. Mais il existe beaucoup d'éléments de construction ou de pièces mécaniques qui ne subissent l'usure qu'à la surface tels que les arbres, les pignons etc. D'où ces éléments exigent une dureté superficielle et un cœur ductile résistant aux charges dynamiques. La trempe superficielle est un traitement local qui ne trempe qu'une mince couche superficielle, tout en laissant intacte la couche sous-jacente. La possibilité de tremper un acier superficiellement, c'est à dire, obtenir une surface dure et un noyau ductile, c'est de chauffer la pièce jusqu'à l'obtention d'une température de trempe à la surface, c'est une transformation martensitique uniquement à la surface de la pièce, la température étant inférieure à celle de la surface, donc ne subissant pas une telle transformation. Lors du chauffage, on doit diminuer la durée de maintien pour éviter une pénétration de la trempe. Les avantages essentiels que présente la trempe superficielle sont l'augmentation de la dureté, de l'amélioration de la tenue à l'usure, de la résistance, de la limite de fatigue des couches superficielles des pièces. Il existe plusieurs modes de trempe superficielle :

- Trempe superficielle par induction (la plus utilisée).
- Trempe superficielle au chalumeau.

**a. Trempe superficielle par induction** : Le chauffage aux courants d'induction à haute fréquence est assuré par l'action thermique du courant induit dans la pièce placée à cet effet dans un champ magnétique alternatif (fig. 7). La pièce est placée à l'intérieur d'un inducteur composé d'une ou de plusieurs spires. Le courant induit s'établit qu'en surface de la pièce et la densité du courant alternatif induit n'est pas la même suivant la section du conducteur (pièce chauffée). Le courant passe surtout par la surface du conducteur. Cet effet porte le nom d'effet de peau et il est d'autant moins profond que la fréquence est très élevée. Une grande intensité donne en surface l'élévation de la température désirée



*Fig. II.1. Représentation schématique du chauffage par induction pour la trempe superficielle*

**b. Par un chalumeau :** Il est utilisé lorsque la trempe concerne les parties superficielles des grosses pièces (cylindres de laminaires, gros arbres, etc...) fabriquées en petites séries, et convient surtout pour des pièces de formes irrégulières. La méthode consiste à donner une puissance calorifique considérable de façon à ce que la surface obtienne la température de trempe et le cœur reste froid. Un refroidissement rapide ultérieur est assuré par un jet d'eau qui se déplace conjointement avec le chalumeau. L'épaisseur de la couche trempée varie de 2 à 4 mm et sa dureté atteint l'ordre de 55 HRC. La couche superficielle acquiert une structure martensitique alors que la couche sous-jacente à une structure bainite + martensite

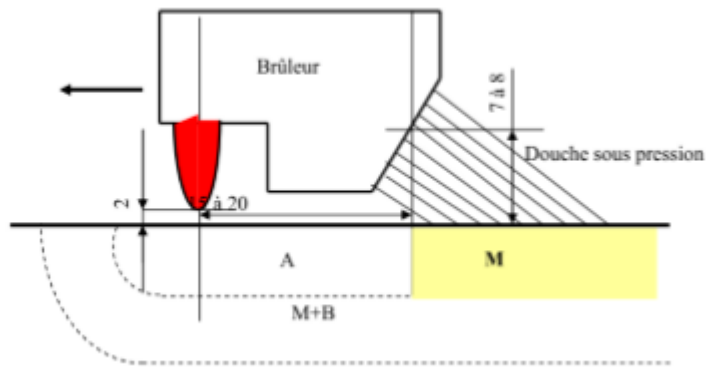


Fig. II.2. Représentation schématique pour la trempe superficielle Par un chalumeau

### II.2.2. Traitement thermique superficielle avec l'ajoute d'éléments léger :

On désigne par traitement thermochimique, la saturation superficielle de l'acier par un élément chimique (C, N, Al, Cr...). Cette saturation se produit par diffusion à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température convenablement choisie. Le traitement thermochimique consiste à chauffer les pièces, dans un milieu solide, liquide ou gazeux, capable de lui céder l'élément diffusant, à les maintenir à cette température, puis à les refroidir. Ce traitement permet de changer la structure de l'acier et la composition chimique des couches superficielles, ce qui entraîne une large variation des propriétés.

La vitesse de diffusion des atomes diffusants qui s'insèrent dans le réseau du fer n'est pas la même. La saturation en carbone et en azote, qui forment avec le fer des solutions solides d'insertion, rend la diffusion plus rapide que la saturation en métaux, qui forment avec le fer des solutions solides de substitution ; c'est pour cela que les températures dans ce dernier cas doivent être plus élevées.

#### II.2.2.1. Cémentation de l'acier :

La cémentation est une opération de durcissement superficiel par accroissement de la teneur en carbone suivie de trempe. Le principe consiste à former à la surface d'un acier doux (0.1 à 0.2)% C, une couche superficielle plus ou moins profonde riche en carbone (0.8 à 0.9 %) C en chauffant les pièces à une température convenable dans un milieu capable de leur fournir du carbone, appelé cément.

La cémentation s'obtient suite à :

- Une réaction chimique dans le ciment qui produit du carbone actif à la surface du métal.
- Une diffusion de ce carbone dans les couches superficielles de l'acier porté à l'état austénitique.

### II.2.2.1.1 Mécanisme de la cémentation :

La diffusion du carbone dans l'acier n'est possible que lorsque le carbone se trouve à l'état atomique à la surface du métal. Le carbone atomique absorbé par la surface de l'acier diffuse vers l'intérieur des pièces.

Aux températures de l'existence de la ferrite (au-dessous du point A1), la cémentation ne se fait pas par suite d'une faible solubilité du carbone dans le fer  $\alpha$ . La cémentation est réalisée généralement aux températures supérieures au point AC3 (920 à 950°C) qui rendent stable l'austénite, dissolvant en quantité le carbone.

Pendant la cémentation, les atomes de carbone diffusent dans le réseau du fer  $\gamma$ . Lorsque la limite de saturation de l'austénite en carbone est atteinte, les conditions favorisent la formation à la surface d'une couche de cémentite continue.

Dans les conditions réelles, il est rare qu'on observe la formation d'une couche de cémentite continue à la surface. Dans les conditions courantes, la cémentation au-dessus du point Ac3, ne forme que l'austénite qui se décompose après refroidissement lent en précipitant la ferrite et la cémentite.

Dans ces conditions un refroidissement lent produit trois zones dans la structure de la couche cémentée.

- Une structure hypereutectoïde constituée de perlite et de cémentite secondaire formant un réseau suivant l'ancien grain d'austénite.
- Une structure eutectoïde constitué de perlite lamellaire.
- Une structure hypoeutectoïde constituée de perlite et de ferrite. La quantité de ferrite augmente à mesure qu'on s'approche du cœur de la pièce.

L'épaisseur de la couche cémentée diminue avec l'augmentation de la concentration en carbone dans l'acier. Pour un acier à  $\leq 0,17$  % C, elle est de 15 % de l'épaisseur soumise à la cémentation, pour les aciers à  $> 0,17$  % C, elle est de 5 à 9 %. Le plus souvent, l'épaisseur de la couche varie de 0,5

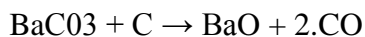
à 2 mm et la concentration en carbone dans la couche superficielle doit être de 0,8 à 1,0 %. Des concentrations plus élevées dégradent les propriétés mécaniques de la pièce cémentée.

### II.2.2.1.2 Les procédés de cémentation :

#### a. Cémentation par agent solide :

Dans ce cas, on utilise comme agent de cémentation le charbon de bois activé en grains, ainsi que du coke. Pour activer la cémentation, on ajoute de 10 à 40 % du poids du charbon, le carbonate de baryum  $BaCO_3$  et le carbonate de sodium  $Na_2CO_3$ .

Le ciment solide employé à l'état granulé favorise le déplacement des gaz et permet d'obtenir une vitesse de pénétration plus élevée que dans le cas de poudre. La présence de carbonates enrichit l'atmosphère de cémentation en gaz CO selon la réaction :



A son tour, le gaz CO s'oxyde en présence du fer en donnant du carbone actif C qui diffuse dans l'acier :



Les pièces prévues pour la cémentation sont préalablement décapées ensuite placées dans des caisses en acier. Lors de la pose des pièces, on couvre le fond de la caisse d'une couche de ciment, damée de 20 à 30 mm d'épaisseur, sur laquelle est placée la première série de pièces en maintenant une distance de 10 à 15 mm entre les pièces et les parois latérales.

Ensuite cette première couche de pièces est couverte d'une couche de ciment damée de 110 à 115 mm d'épaisseur, sur laquelle on pose la deuxième couche de pièces etc. La couche supérieure des pièces est couverte d'une couche de ciment de 35 à 40 mm d'épaisseur pour compenser son retrait éventuel. La caisse est couverte d'un couvercle dont les bords sont mastiqués avec de l'argile réfractaire ou avec un mélange d'argile et de sable de rivière pétris dans l'eau jusqu'à l'état pâteux.

La caisse est placée dans un four où la température de cémentation varie de 910 à 930°C. Le maintien à la température de cémentation est de 7 à 9 min par centimètre de la dimension maximale

de la caisse. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C. Généralement l'épaisseur de la couche à cémenter est choisie selon la température et durée de cémentation.

**Tableau II.1.** Généralement l'épaisseur de la couche à cémenter

Durée en heures		Epaisseurs de la couche de cémentation en mm				
		1h	2h	10h	30h	60h
T en °C	850 °C	0.4mm	0.8mm	1.2mm	1.5mm	2.5mm
	900 °C	0.6mm	1.2mm	1.5mm	2.5mm	4.5mm

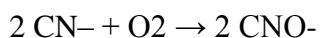
### b. Cémentation par agent liquide :

Le milieu liquide est un bain de sels en fusion riche en produits carburants ou carbonitrurant dans lequel on immerge les pièces.

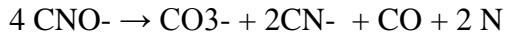
Les bains de cémentation sont formés de cyanure de sodium NaCN, de chlorure de baryum BaCl<sub>2</sub> (activateur) et de chlorures alcalins (modérateurs), permettant de réaliser une fluidité convenable. Du graphite en poudre surnage à la surface du bain et empêche l'action de l'air.

### Il existe trois types de bains :

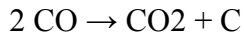
- les bains non activés à haute teneur massique en cyanure (30 à 40 %) pour lesquels la diffusion d'azote est importante avec pour conséquence une limitation de la teneur en carbone. Ce sont les véritables bains de carbonituration ; leur emploi est limité à 870 °C;
- les bains activés ou accélérés à moyenne teneur en cyanure (15 à 20 %) employés jusqu'à 900°C, bien adaptés aux faibles profondeurs, faciles à employer grâce à leur fluidité ;
- les bains activés à faible teneur en cyanure (8 à 10 %) pour la cémentation profonde employés jusqu'à 950 °C. Au contact de l'air, le cyanure de sodium s'oxyde en formant du cyanate NaCNO :



à la température de traitement, le cyanate se décompose en carbonate et en cyanure et libère du monoxyde de carbone et de l'azote actif



L'azote diffuse dans le fer alors que le CO se décompose en surface des pièces



La cémentation par agent liquide permet d'obtenir les mêmes profondeurs de cémentation pour les temps plus courts relativement à la cémentation par agent solide et gazeux.

### c. Cémentation gazeuse :

La cémentation gazeuse se fait en chauffant les pièces dans un milieu de gaz contenant du carbone. Ce traitement permet d'obtenir, par rapport à la cémentation par agent solide, une concentration exacte du carbone dans la couche à cémenter et diminue la durée du processus.

Le ciment est un mélange réducteur composé de CO + H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> additionné d'une faible proportion d'hydrocarbures (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> et surtout le propane C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>).

Par exemple : 38 % d'azote + 40 % d'hydrogène + 20 % de monoxyde de carbone (CO) + 2 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>.

Le mélange réducteur CO + H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> s'obtient généralement par combustion partielle de gaz de distillation de la houille ou d'hydrocarbure. Le produit obtenu est ensuite réduit par du carbone, afin d'éliminer les gaz décarburants (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O).

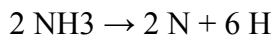
La réaction principale qui assure la carburation est la dissociation du méthane et de l'oxyde de carbone.



La cémentation s'effectue à la température de 930 à 950°C, la durée de l'opération assurant l'obtention d'une couche de 0,7 à 1,5 mm d'épaisseur dans les fours à moufle ou à marche continue est de 6 à 12 heures.

### II.2.2.2 La nitruration :

La nitruration est un procédé de durcissement superficiel appliqué à certains aciers et fontes permettant d'obtenir des duretés plus élevées que celles obtenues par cémentation. La nitruration consiste à saturer en azote, la surface de l'acier dans le milieu ammoniac qui se dissocie suivant la réaction suivante :



La nitruration accroît sensiblement la dureté de la couche superficielle, sa tenue à l'usure, la limite de fatigue et la tenue à la corrosion dans des milieux comme l'atmosphère, l'eau, la vapeur etc.

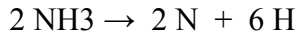
La nitruration se produit généralement à des températures oscillant entre 504 °C et 566 °C, à partir desquelles le matériau se trouve à l'état ferritique plutôt que dans le domaine austénitique utilisé pour la cémentation.

Le gaz ammoniac, est utilisé comme agent de nitruration, dans lequel les pièces baignent et sont chauffées jusqu'à 550°C. Au contact du fer, l'ammoniac se dissocie en azote et hydrogène. Une partie de l'azote est absorbée par le métal, tandis que les gaz H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> en excès sont évacués. La diffusion de l'azote dans la couche superficielle est plus rapide que celle du carbone à la température 550°C.

La présence du chrome, de l'aluminium et du molybdène dans l'acier permet la formation des nitrides de ces éléments qui augmentent effectivement la dureté des pièces nitrurées jusqu'à 1200 HV. La nitruration n'est suivie d'aucun traitement thermique, ce qui permet d'éviter toute oxydation du métal et toute déformation des pièces. Pour la pratique de la nitruration, les pièces à nitrurer doivent subir au préalable un traitement thermique (trempe + revenu) pour obtenir le maximum de résilience et bien sùre, leur usinage doit être aussi effectué avant l'opération de nitruration.

### II.2.2.2 .1 Mécanisme de la formation de la couche nitrurée :

Les alliages fer-azote forment différentes phases et parmi elles, la phase F4N (nitrure de fer), avec une teneur en azote de 6,10 %, c'est un corps très dur mais fragile. La nitruration s'effectue dans une atmosphère d'ammoniac qui, au chauffage, se dissocie suivant la réaction suivante :



Donc c'est le gaz ammoniac qui est utilisé comme agent de nitruration, dans lequel les pièces baignent et sont chauffées jusqu'à 550°C. Au contact du fer, l'ammoniac se dissocie en azote et hydrogène. Une partie de l'azote est absorbée par le métal, tandis que les gaz H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> en excès sont évacués. La diffusion de l'azote dans la couche superficielle est plus rapide que celle du carbone à la température 550°C.

La présence du chrome, de l'aluminium et du molybdène dans l'acier permet la formation des nitrures de ces éléments qui augmentent effectivement la dureté des pièces nitrurées jusqu'à 1200 HV. Les aciers pour nitruration contiennent généralement les éléments d'alliages Al (1,5 %), Cr (1,65 %), Ni (2 %), Mo (0,3 %) et du carbone (0,35 à 0,45 %). Les éléments d'alliages, s'ils augmentent la dureté, ils diminuent simultanément l'épaisseur de la couche nitrurée. Cette action est faite surtout dans le cas de l'addition de W, Ni, Cr, Mo.

La nitruration est destinée aussi à certaines fontes, qui contiennent également du Cr et Al. Les fontes subissent avant nitruration une trempe et un revenu pour leur donner une structure dure et tenace. La durée de nitruration varie en fonction de l'épaisseur de la couche à obtenir, par exemple 10 heures (0,1 mm) et 70 heures (0,5 mm).

#### II.2.2.2.2 La nitruration présente beaucoup d'avantages sur la cémentation :

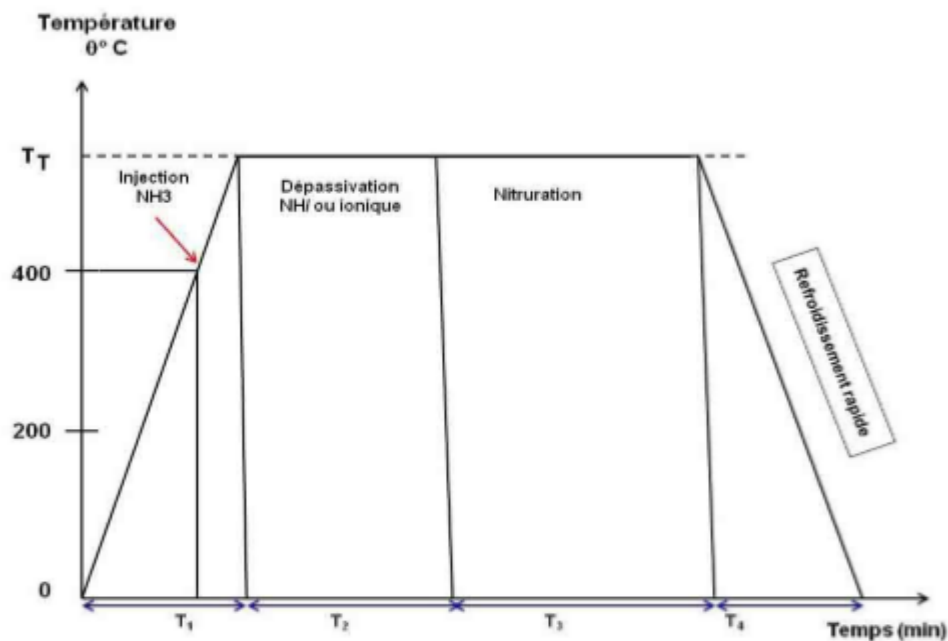
- La dureté est plus grande (1100 HV au lieu 800 HV)
- Elle se conserve jusqu'à 500°C, alors que la dureté d'une couche cémentée chute à partir de 200°C.
- Donne le maximum de résistance à l'usure et une certaine résistance à la corrosion

Par contre, la nitruration coûte plus chère que la cémentation et présente un léger gonflement de la couche nitrurée dont il ne faut pas négliger.

Généralement il existe deux types de nitrurations :

- **Nitruration gazeuse** : Elle s'opère avec un courant d'ammoniac gazeux qui se dissocie partiellement en présence du fer qui joue le rôle de catalyseur.
- **Nitruration liquide** : Elle s'effectue à une température de 570°C pendant 0,5 à 3 heures dans un bain de cyanures alcalins (60% NACN et 40% KCN). La basse température fait que l'azote fourni par la décomposition des cyanures est pratiquement le seul à diffuser dans l'acier. Après nitruration les pièces sont refroidies à l'air ou à l'huile. Ce traitement produit à la surface de l'acier une fine couche superficielle carbonitrurée (10 à 15  $\mu\text{m}$ ) riche en azote et d'une zone de diffusion d'environ 0.5 mm.
- **La nitruration ionique**

La nitruration ionique est obtenue dans une décharge lumineuse, c'est à dire, l'azote est introduit à partir d'ions d'un plasma obtenu par décharge électrique sous tension de 1100 à 1400 V dans une atmosphère raréfiée contenant un mélange gazeux ( $\text{N}_2 + \text{NH}_3$ ) à faible pression



*Fig. II.3. Représente l'opération de La nitruration*

### II.2.2.3 La carbonitruration :

La carbonitruration est un procédé de durcissement superficiel des pièces en acier que l'on chauffe dans une atmosphère gazeuse ( $\text{CO} + \text{N}_2 + \text{C}_3\text{H}_8$ ), permettant au métal d'absorber simultanément du carbone et de l'azote. Après le temps de diffusion, les composants sont directement trempés à l'huile. Le traitement thermique est terminé par un revenu à basse température, située entre  $150^\circ\text{C}$  et  $200^\circ\text{C}$ , pour les plages de profondeur de couche cémentée les plus profondes, ce qui permet de réduire la fragilisation en fonction des circonstances tribologiques.

Ce procédé est donc un compromis entre la cémentation et la nitruration. Le durcissement provient surtout de la cémentation par carburation de la couche superficielle des pièces. Le rôle de l'azote est surtout d'abaisser le point de transformation  $\text{AC}_3$ . C'est pourquoi la température de chauffage lors de la trempe est moins élevée ( $700$  à  $850^\circ\text{C}$ ) que pour la cémentation. Une partie de l'azote pénètre dans le réseau cristallin de l'acier en provoquant entre autres une augmentation importante de la trempabilité. Les pièces carbonitrurées peuvent donc ensuite être trempées.

La dureté obtenue est de l'ordre de 62 HRC. Une épaisseur cémentée de  $0,5$  à  $0,7$  mm demande environ 3 heures de traitement. La couche carbonitrurée doit avoir une structure martensitique à grains fins, une faible quantité de carbonitrides et environ 20 à 30% d'austénite résiduelle.

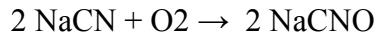
Un vaste éventail d'aciers peuvent être carbonitrurés<sup>29</sup>, des aciers au carbone ordinaire aux aciers doux (avec une teneur en aluminium réduite), en passant par les aciers faiblement alliés avec un maximum variant de 0,25 % à 0,50 % de carbone, les aciers de décolletage et les aciers frittés. La carbonitruration est généralement appliquée aux pièces de formes complexes.

Il s'agit d'un traitement de plus en plus, prisé par les industries exigeant une grande précision pour leurs pièces (véhicules automobiles et aéronautique).

### II.2.2.4 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  $860^\circ\text{C}$ , 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. Le carbone atomique et l'azote dégagés selon les réactions ci-dessous, diffusent dans l'acier.



Pour obtenir une couche plus épaisse (0,5 à 2 mm), l'opération se déroule dans un bain différent composé de NaCN, BaCl<sub>2</sub> et 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.

### **II.3.1 traitement thermique superficielle avec l'ajoute d'éléments lourds :**

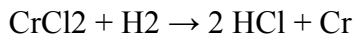
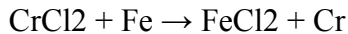
C'est un traitement thermochimique qui consiste à saturer la couche superficielle de l'acier en éléments tels qu'aluminium, chrome, bore etc. Après traitement, l'acier acquiert plusieurs propriétés importantes telles que la tenue à chaud et à l'usure accrue, la résistance à la corrosion et la dureté.

#### **II.3.1.1 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 AC<sub>3</sub>. Les pièces sont mises en caisses et entourées de poudres formées essentiellement de ferro-chrome et d'une matière poreuse réfractaire. Une circulation d'hydrogène est assurée de bas vers le haut. A 1000°C, on introduit du chlorure d'hydrogène qui réagit avec le ferro-chrome selon la réaction :



une partie du CrCl<sub>2</sub> réagit avec le fer, l'autre partie réagit avec l'hydrogène.



Le chrome ainsi formé, peut diffuser dans l'acier. L'opération dure quelques heures jusqu'à 12 heures. Deux procédés de chromisation sont utilisés :

- **Chromisation douce** : appliquée aux aciers à faible teneur en carbone, doux et extra doux. Ce traitement confère à l'acier une résistance à la corrosion remarquable et l'acier peut subir sans dommage, les traitements de pliage et d'emboutissage.
- **Chromisation dure** : appliquée aux aciers à haute teneur en carbone (> 0,3 % C) et en particulier aux aciers à outils. Elle conduit à la formation d'une couche compacte et adhérente de carbures pouvant atteindre une dureté de (1600 à 2000 HV).

### II.3.1.2 La boruration :

C'est une saturation de la couche superficielle de l'acier en bore par diffusion de ce dernier en milieu pulvérulent et à une température supérieure à AC3. Le bore permet d'obtenir des borures, de type FeB ou Fe<sub>2</sub>B, qui assurent une dureté très élevée (1800 à 2000HV), une bonne tenue à l'usure et à la corrosion.

La boruration est effectuée par électrolyse des sels fondus contenant du bore, le bain de bore Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> fondu, sert de cathode, dans ce dernier on place les pièces. La température de saturation est de 930 à 950°C et la durée de séjour est de 2 à 6 heures.

La boruration peut être aussi effectuée sans électrolyse dans des bains de chlorures fondus (NaCl, BaCl<sub>2</sub>), auxquels on ajoute du ferro-bore (20 %) ou du carbure de bore (10 %) pulvérents.

La boruration est appliquée aux pièces employées dans l'industrie pétrolière, bagues de pompes à boue, les matrices et estampes pour le formage à chaud. La boruration est un procédé que peuvent subir tous les aciers, car elle confère aux pièces une grande résistance à l'abrasion et à l'usure.

### II.3.1.3 La 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 ferrosilicium ou du carbure de silicium. La température de saturation est de 950 à 1000°C. La couche siliciurée 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.

### Conclusion :

Les différents traitements thermiques ou thermiques appliqués à l'acier en général sont décrits afin de réduire certaines erreurs qui peuvent survenir dans la forme de la pièce à fabriquer, et là où il existe de nombreux traitements thermiques qui permettent d'obtenir la meilleure pièce mécanique et à partir de ceux-ci il y a Trempe et Revenu et le recuit et le considère Ce dernier est un traitement thermique classique, et il existe un type de traitement thermique appelé traitement thermique superficiel (Trempe superficielle ;Cémentation ; La siliciuration...etc .) qui un effort pour réduire cette perte de résistance à la corrosion. Concerne le traitement de la surface d'une pièce mécanique

## **CHAPITRE III**

### **Matériaux et méthode expérimentale**

#### **Introduction :**

Dans ce chapitre nous allons présenter les matériaux étudiés, le mode de préparation des échantillons, les investigations expérimentales utilisées pour l'élaboration des aciers étudiés et les techniques et les équipements utilisés. On décrira les différentes conditions des expérimentations réalisées et la méthodologie concernant l'obtention de caractérisation des couches de nitruration, les zones formées lors de ce traitement.

#### **III.2.1. Matériaux étudiés**

Pour réaliser notre travail, on a utilisé cinq types d'aciers selon le traitement thermochimique de nitruration. Les matériaux utilisés sont acier A, acier B, acier C, acier D, acier E.

Généralement, les aciers choisis pour cette étude, possèdent d'excellentes propriétés, ils ont une bonne résistance aux chocs, bonne résilience à basse température, aptitude au polissage et une usinabilité excellente, une grande résistance à l'usure dans la zone cémenté une bonne ténacité à cœur et une combinaison d'une bonne limite élastique et d'un bon allongement avant rupture. Ces aciers sont utilisés largement comme roues couronnes, pignons, arbres vilebrequins, roues dentées, arbres de réducteurs, broches, pièces automobiles et engrenages fortement sollicités ayant une ténacité élevée.

**Tableau III.1.** Les échantillons des aciers

<b>ACIERS</b>	<b>Echantillons</b>
Acier A	A1 ; A2 ; A3
Acier B	B1 ; B2 ; B3 ; B4
Acier C	C1 ; C2
Acier D	D1 ; D2
Acier E	E1 ; E2 ; E3

### **III.2.2.Mode de préparation des échantillons**

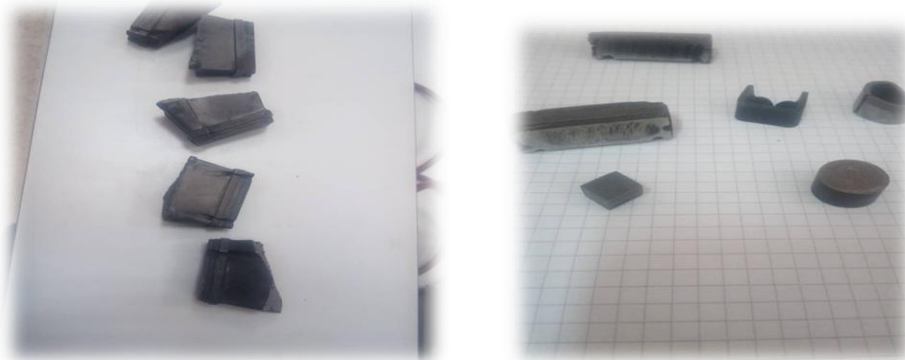
La préparation des échantillons destinés aux traitements de nitruration et cémentation est devisée en deux étapes, le découpage ; le polissage.

#### **III.2.2.1.Le découpage:**

Pour le découpage on a utilisé une macro tronçonneuse pour préparer les échantillons .Le découpage se fait à la présence de l'eau pour éviter l'augmentation de la température (a cause de frottement entre le disque abrasive et l'échantillon) donc par conséquence on évite le changement de la structure.



*Figure III.1. l'opération de découpage*



*Figure III.2. Avant et après la coupure*

### III 2.2.2 le polissage :

L'opération de polissage a été effectuée avec des papiers abrasifs de différentes granulométries : 120, 320, 400, 600, 800, 1000, 2000, 4000. Ensuite les échantillons ont été finit avec la pâte diamanté dans un papier feutre pour avoir un état miroir des surfaces.



*Figure.III.3. Machine de polissage*

### **III.2.2.3.Traitement de nitruration**

Dans ce traitement on va se baser sur une paramètres : le temps (1h , 3h, 5h ) et la température fixe pour chaque type du matériau traité. Notre plan de traitement de nitruration est varié par rapport a chaque type d'acier Le traitement de nitruration est effectué dans un four industriel de nitruration de type NACHI. Les paramètres, la capacité et caractéristiques techniques de four ont été indiqué ci-dessous : Température de service : 550 à 580°C, Maxi. 600°C.La capacité de traitement Maxi. 240 kg, Temps nécessaire pour Environ 3 heures jusqu'à augmenter la température 560°C (pour le four à vide). Dimensions intérieures: Di. 500 mm du four De750 mm Chauffage Electricité, alimentation 200 V triphasé 50 Hz.



four fermé

four ouvert

*fig.III.4. représenter four de traitement de nitruration*

Pour le four il est nécessaire d'effectuer la vérification et le réglage avant de procéder à la marche : Nettoyer soigneusement l'intérieur du four et s'assurer qu'il n'y existe pas de corps étrangers. Régler les instruments suivants à leurs valeurs de consigne Vérifier la marche du ventilateur pour assure la propagation de la chaleur.

### III. 3. Caractérisation :

#### III.3.1.Préparation des échantillons

La préparation des éprouvettes destinées à l'étude microscopique est divisée en plusieurs étapes : le coupement à froid, le polissage, l'attaque révélatrice de la microstructure et Microdureté.

Tout d'abord les échantillons pour l'étude microstructurale ont été découpés à froid de façon transversale pour observer la structure à l'intérieur des pièces.l'échantillon et d'assurer la planéité de la surface lors du polissage. Ensuite, on effectue un polissage mécanique avec du papier abrasif cité précédemment en passant vers des grains de plus en plus fins puis on utilise l'alumine pour éliminer les rayures. En effet, pour pouvoir observer les détails microscopiques de la structure, il faut éliminer les rayures.

#### III.3.2.Procédure d'attaque pour métallographie optique

L'attaque des échantillons met en évidence la morphologie des grains, les défauts ou irrégularités de la surface, les sous-structures, les précipités, les inclusions, etc. La méthode

d'attaque utilisée est l'attaque chimique qui provoque une dissolution différentielle des cristaux suivant leur orientation, des phases suivant leur nature ou une attaque spécifique aux joints de grains. Pour révéler la structure des couches intérieures des pièces d'aciers cémentés, dans ce travail, on a utilisé le nital, de composition chimique ( $\text{HNO}_3$  (4%) + alcool éthylique), comme réactif. La durée de l'attaque est de 2 à 3 secondes.

### III.3.3. Microscopie optique

La microscopie optique sert à déterminer ou à observer la microstructure de l'échantillon, ainsi que les évolutions microstructurales des alliages ayant subits des traitements thermiques. La structure peut être modifiée par tout le traitement mécanique, thermique, chimique ou thermo-chimique (comme notre cas) que subit le métal indépendamment des transformations physico-chimiques qui peuvent résulter de ces traitements. Les microscopes optiques métallographiques permettent l'observation par réflexion d'une surface métallique parfaitement plane, obtenue par polissage mécanique et ayant subie des traitements thermiques ou thermo-chimiques voulus



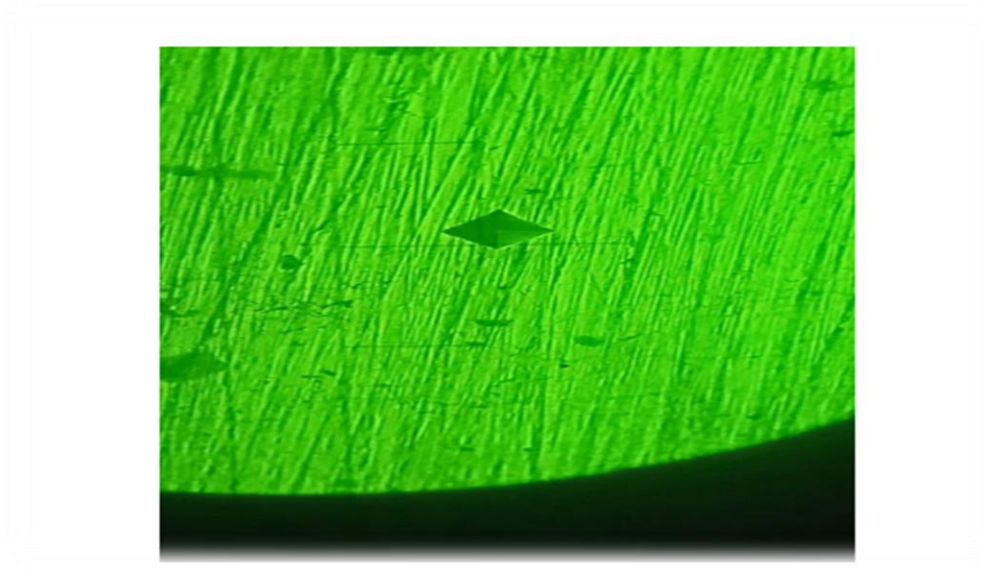
*Fig III.5. : microscope optique NIKON.*

### III 3.4 La Microdureté

Le but est de réaliser un profil de dureté dans la coupe transversale de l'échantillon à partir de la surface jusqu'à la fin de la couche de diffusion. Nous avons appliqué une charge de 200gf pendant 10 secondes avec un pas de 50  $\mu\text{m}$ . Les échantillons choisis pour ce test sont les aciers A et aciers B et Aciers C prélevés des filières et les aciers D et aciers E comme des échantillons témoins. Tous ses échantillons sont nitrurés à 560°C pendant 3 ou 5 heures. Les mesures de microdureté ont été faites à l'aide d'un appareil de microdureté Vickers (Fig I.6) muni d'un pénétrateur pyramide en diamant à base carrée et d'angle au sommet égal à 136°. Elle consiste à faire une empreinte sur la surface de l'échantillon, mesurer les diagonales de celles-ci et afficher directement la valeur de la microdureté.



*Fig III.6. : La machine de microduromètre*



*Fig III.7. : vue d’empreinte*

#### **III.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS**

Le traitement de cémentation et de nitruration conduit à l’établissement d’une couche durcie dans la zone superficielle des pièces les rendant ainsi plus aptes à résister à l’usure et à la corrosion. Comparée aux autres traitements thermo-chimiques de durcissement, la nitruration présente l’avantage de ne pas modifier que très faiblement les géométries et l’état de surface des matériaux [1- 3].

De manière générale, quel que soit le procédé utilisé, le traitement de cémentation et de nitruration se caractérisent par la diffusion respectivement du carbone et de l’azote des deux milieux ou l’enceintes des deux fours à partir de la surface vers le cœur des matériaux qui sont des différents types d’acier et par la formation des couches de carbure et de nitrures de fer dans les régions superficielles des aciers.

Les couches superficielles se forment après une période d’incubation et des températures appropriées. Pour le cas de cémentation, la température moyenne du traitement prend une

moyenne de 950°C alors pour le cas de nitruration la température moyenne devient à peu près 570°C.

La température du chauffage pour les deux traitements dépend aussi de la concentration des éléments secondaires du carbone et de l'azote. Pour ceci, le choix du paramètre de température pourra être déterminé par les diagrammes binaires fer-carbone et fer-azote sans tenir compte le paramètre du temps de chauffage qui en relation avec l'épaisseur des aciers transformés en carbure ou en nitrure.

Dans ce chapitre, les résultats obtenus des deux traitements seront présentés. Dans un premier temps, nous discuterons les résultats apportés par l'analyse métallographique. Nous examinerons ensuite les résultats obtenus concernant l'épaisseur des couches de cémentation obtenues par l'appareil de mesure utilisée au niveau de l'unité d'algal et confirmé par analyse métallographique.

Notre travail focalise sur l'effet de la nature de l'acier sur la diffusion du carbone et l'azote ainsi la précipitation de carbures et de nitrures de fer formés au cours de cémentation et de nitruration. Pour rappeler que les types d'aciers utilisés au cours de ce travail ont des compositions chimiques différentes

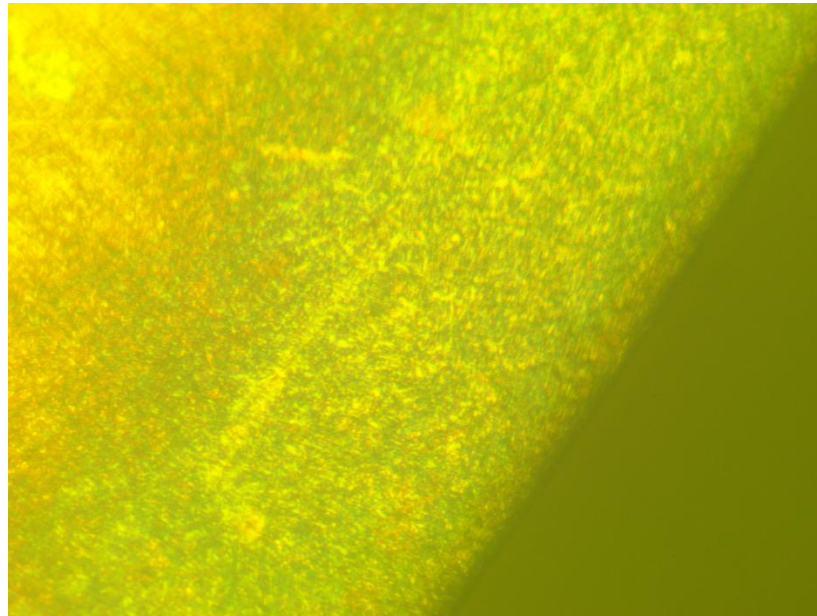
#### **III.4.1. Microstructure**

Les traitements de cémentation, de trempe modifient la structure globale des pièces d'aciers traités. Donc, nous allons analyser les changements structuraux provoqués par ces traitements en utilisant le microscope optique comme moyen d'analyse.

#### **III.4.2. Cémentation de l'acier XC38**

Les micrographies de la figure III-8 a et b obtenues par microscopie optique sous un grossissement de X10 représente la coupe transversale de l'acier XC38 cémenté à 930°C pendant 2, 4 et 6 heures, elle montre dans les deux photos, la formation d'une zone superficielle avec des concentrations en carbone très élevés à cause de processus d'enrichissement et de diffusion qui transfère le carbone du ciment à la surface de la pièce. Puis une zone contient du carbone à cause de processus de diffusion de carbone de la surface vers les couches intérieures, qui se

trouve avec des concentrations diminue à mesure que la distance entre l'extrémité et le noyau décroît, c'est la zone de diffusion.



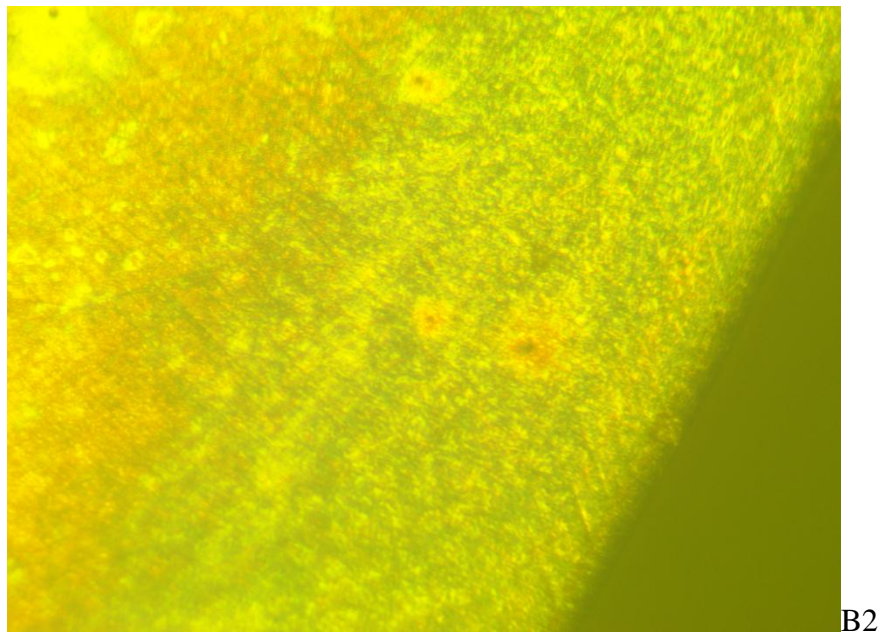
*Fig III.8. Micrographie Acier A*

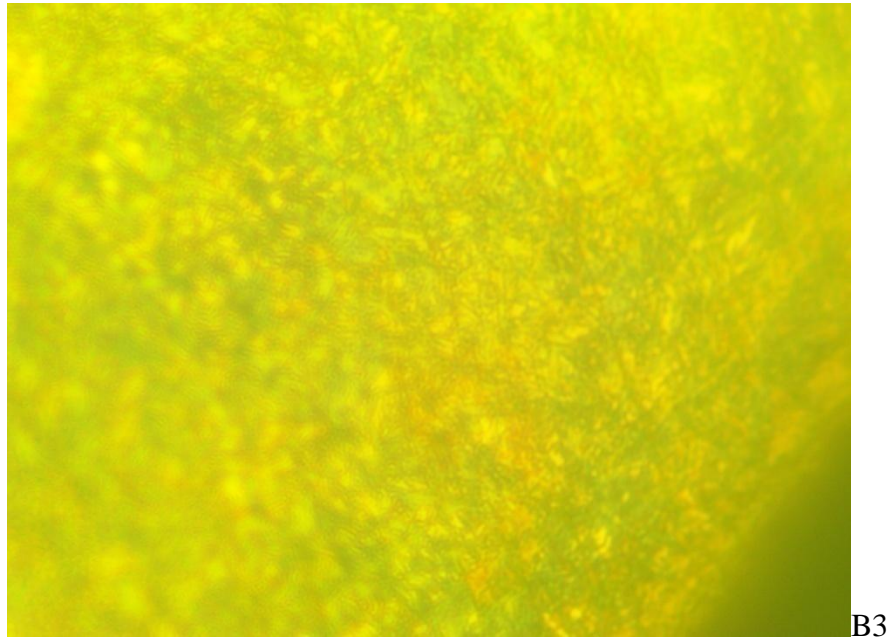
Enfin une zone qui représente le substrat non touché vraiment par l'effet de traitement où il n'y a pas de diffusion du carbone dans cette zone. Pour identifier clairement les types des carbures de fer formés dans la couche de cémentation, l'échantillon doit subir une analyse par diffraction des rayons X, mais d'après l'expérience acquise la zone surfacique a deux régions de combinaison et de diffusion.

#### **III.4.3. Cémentation de l'acier 22MC6**

La figure III.9 (B1, B2 et B3) présente la microstructure de l'acier 22MC6 cémenté pour temps de maintien de 2, 4 et 6h dans un four électrique à gaz chauffé à la température 950°C.

Dans les deux images structurales, elles figurent deux zones distinctes dont l'une correspond à la zone cémentation et l'autre correspond au substrat.





*Fig III .9. Micrographie Acier B*

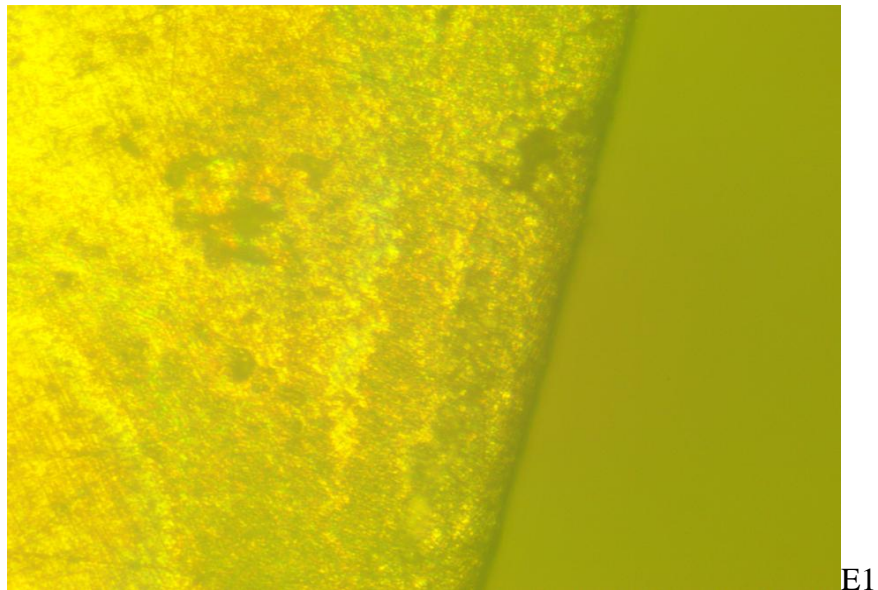
La formation des carbures de fer étant liée à la diffusion du carbone de l'atmosphère environnant dans la matrice de l'acier de base qui mise en solution solide interstitielle dans l'austénite qui par un refroidissement rapide grâce à la trempe effectuée à l'huile puis à l'air, se transforme à la martensite.

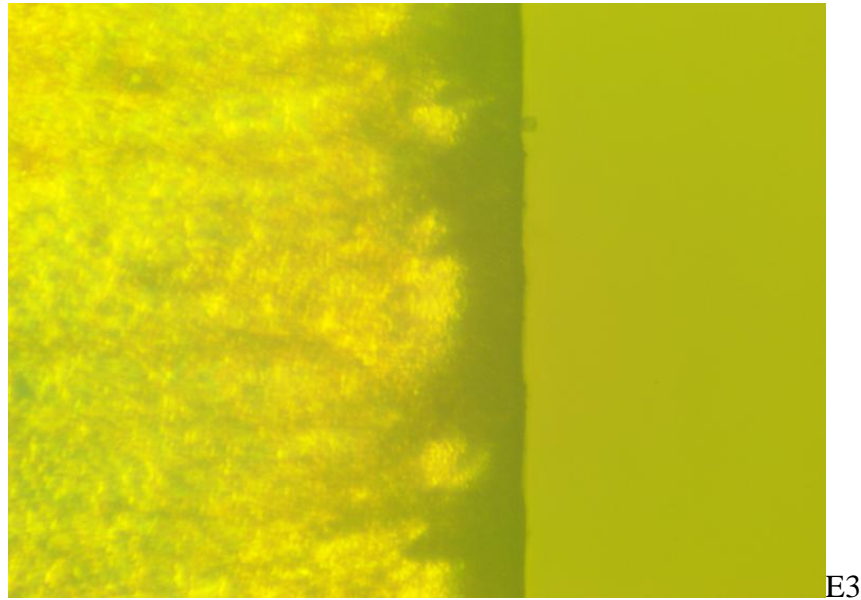
Cette dernière initiale riche en carbone ( $\alpha'$ ) qui a une structure quadratique se décompose, dans la première étape, en donnant un epsilon-carbure et la martensite à faible teneur de carbone ( $\alpha''$ ). Au point de vue comparative, la microstructure de cet acier présente pour trois cas de traitement 2, 4 et 6 heures une seule couche sombre dans sa zone de surface par rapport l'acier cémenté XC38 qui présente deux régions blanche et sombre. Nous pouvons dire pour ceci que ce type d'acier cémenté présente une seule zone de diffusion ou la concentration d'azote n'atteint pas vraiment la quantité de carbone qu'elle absorbe par l'autre type d'acier.

#### **III.4.4. Nitruration de l'acier 42CD4**

La figure (III-10) présente la micrographie de la coupe transversale de l'acier 42CD4 nitruré selon les conditions opératoires. La micrographie montre la formation d'une zone superficielle avec des concentrations en azote moyennement élevés à cause de l'aptitude de

diffusion de l'élément de l'azote à la surface de la pièce ainsi la précipitation des nitrures de fer formés. A ce propos nous n'avons procéder une analyse structurale à l'aide de DRX pour identifier la nature des phases formées à la surface de l'acier au cours du traitement de nitruration mais probablement et d'après la microstructure la zone superficielle ne présente pas la couche blanche qui indique la forte concentration d'azote menant à la formation de la phase  $Fe_{2,3}N$ . Dans ce cas on peut conclure que la couche de nitruration n'a pas eude forte concentration d'azote et la phase formée dans la couche est de  $Fe_4N$





*Fig.III.10 Micrographie Acier E*

### **III.5. Epaisseurs des couches de traitements**

Nous examinerons à partir de la microstructure des échantillons, les couches de cémentation et de nitruration obtenus au cours de ces deux traitements thermo-chimiques. La mesure des profondeurs des couches ou sous couches de cémentation ou de nitruration par observation micrographique permet d'évaluer aussi la quantité diffusante des deux éléments métalliques dans les aciers des substrats. Pour l'acier XC38 cémenté pour un temps de 6h présentant trois zones distinctes a au totale une épaisseur des deux sous couches beaucoup plus élevée à celle de l'échantillon cémenté pour une période de 2h. Presque la même chose au point de vue de l'épaisseur pour l'acier 22MC6 qui présente une seule couche de cémentation pour les deux temps de traitement. La couche de cémentation de ce type d'acier pour un temps de 4 est plus élevée qu'à ce traité pour une période de 4h. Nous remarquons au point de vue général que la couche de cémentation ou de nitruration augmente proportionnellement avec le temps de traitement.

### III. 6. Dureté.

Les résultats rencontrés dans la littérature montrent que l'introduction de l'azote en forte concentration dans les aciers stabilise leurs phases austénitiques et améliore les propriétés mécaniques de leurs surfaces notamment la dureté. Dans le cas général, l'azote en solution solide est un élément gammagène plus puissant que le carbone.

**Tableau III.2.** : La dureté des échantillons après la nitruration.

Matériaux	Aciers A		Aciers B		Aciers C		Aciers D		Aciers E	
Dureté (HV)	37	45,6	36	50,4	40	63,2	42,3	55,4	38,1	68,2
Moyan de dureté	41,3		43,2		51,6		48,85		53,15	

Les résultats sont dans un tableau montrant que sur les aciers plus dureté et moyan dureté et faible dureté .

**Plus dureté :** aciers E ; aciers C ;

**Moyan dureté :** aciers D

**Faible dureté :** aciers A ; aciers B

Lors de la nitruration, l'établissement d'un gradient de concentration d'azote à l'intérieur de l'acier génère des contraintes résiduelles de compression dans la couche et de traction dans le cœur. L'accommodation des contraintes introduites par la diffusion des atomes d'azote a pour conséquence la multiplication des dislocations

Les conditions de traitement, la composition chimique et la microstructure influencent la propriété de dureté. A titre d'exemple, pour les aciers au chrome traités par nitruration dans les mêmes

conditions ont montré que la dureté augmente quand la teneur en chrome est élevée. Ils ont constaté aussi que cette propriété est inversement proportionnelle à la température de revenu avant nitruration.

La capacité de durcissement par nitruration d'un acier allié dépend du type et de la répartition des éléments d'alliage. Si les éléments d'alliage sont déjà sous forme de précipité avant la nitruration, ils ne peuvent s'associer avec l'azote pendant le traitement .

## **Conclusion**

Nous avons présenté, dans ce troisième chapitre, les diverses techniques utilisées pour réaliser le traitement de cémentation et décrire les moyens de caractérisation pour faire l'étude des propriétés des dépôts correspondants. Ce chapitre décrit aussi la présentation des résultats ainsi la description de ces analyses qui touche dans cette étude l'analyse métallographique des sections transversales des échantillons des aciers traités par cémentation et nitruration.

## **Conclusion générale**

Les traitements superficiels concernent une vaste famille de procédés dont l'objectif est d'augmenter les propriétés mécaniques et chimiques des zones superficielles des matériaux notamment les aciers contre l'usure et la corrosion. Cette famille de traitement est caractérisée par l'incorporation des éléments légers non métalliques dans la zone des matériaux à traiter pour des températures généralement élevées.

Ces procédés qui sont traditionnels ou performant appelés traitements thermochimiques. Parmi ces techniques de traitement, la cémentation et la nitruration font à l'heure actuelle l'objet de nombreux développements consécutifs aux exigences de plus en plus sévères des concepteurs. On sait que le changement superficiel d'un alliage fer carbone au point de vue propriétés est directement relié au plusieurs paramètres technologiques qui dépendent du matériau à traiter, procédé utilisé et la source et la pression du gaz utilisé.

La nitruration ou la cémentation des aciers ont pour conséquence la formation d'une couche de combinaison en surface reposant sur une couche de diffusion. Les propriétés d'usage de l'acier traité dépendent fortement de la microstructure de la zone constituée de deux couches précédentes. La microstructure des aciers traités est caractérisée généralement par des examens micrographiques et structurale à l'aide de diffraction des rayons X.

Nous aurons aimé de procéder la caractérisation des échantillons (aciers nitrurés) qu'on a préparé au niveau d'Algérie et des échantillons cémentés préparés par ailleurs et de faire une étude expérimentale complète mais les vents vont à l'encontre de ce que les navires désirent. La fermeture des laboratoires a empêché la procédure ce qui nous a conduit de compléter cette partie par une recherche bibliographique approfondie permettant d'optimiser certains paramètres technologiques de nitruration qui pourront être utilisés des futures études.

Nous pouvons dire que lorsque le temps du traitement de nitruration et de cémentation augmente, l'épaisseur de la couche nitrurée ou cémentée augmente. Ces couches représentent en général deux zones distinctes qui sont la zone de combinaison et la région de diffusion, ces deux régions sont responsables au durcissement observés de la zone superficielles des différents aciers traités soit par la cémentation ou la nitruration.

## **Bibliographiques**

- [1] Guy Murry, 2004, Aide Mémoire Métallurgie, Dunod, Paris
- [2] J.Brallis, G.Maeder, Précis de métallurgie « élaboration, structure-propriétés et normalisation », Nathan 1983, pp108-112.
- [3] À. Cornet, F. Hlawka, 2010, Métallurgie Mécanique, Ellipses, France
- [4] Technique d'ingénieur, M300, 2011
- [5] J.P. LEBRUN.Traitement Thermique, Vol. 216, (1988),15
- [6] M.A. BEJAR, N. VRANJICAN.Journal of MaterialsTechnology, Vol. 35, (1992), 113.
- [7] S. MAZA. These de Magister Université de Msila (2010)
- [8] N. SAHRAOUI,A. KORAICHE Thèse de MasterUniversité de Msila , (2016).
- [9] A. AZZOUZ, Thèse de Master Université de Msila , (2015).
- [10] B. SILINI, M. ROUBACHE, Thèse de Master Université de Msila , (2018).
- [11] J. KÖLBEL. Tech. Ber. Inst. Ges. FörderungGlimmentladungs – Forsch., (1966).
- [12] J. KÖLBEL. Forschungsber. Landes Nordrhein – Westfalen, (1965), 1555.
- [13] Y. BENARIOUA, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences ; 9, 3, (2018) 313
- [14] M. CONFENTE, M. GANTOIS, H. MICHEL.Härt. Tech. Mitt., Vol. 30, (1975), 86.
- [15] E. METIN, O.T. INAL. Journal of Material Science, Vol. 22 (1987), 2783.
- [16] Y. BENARIOUA, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1033 (2018)
- [17] A.S.W. KURNY, R.M. MALLYA, .Materials Science and Engineering, Vol. 78,

- (1986), 95.
- [18] B. EDENHOFER. Heat. Treat. Met., Vol. 2, (1974), 60. Cité dans la référence 4.
- [19] I.Lakhtine, « métallographie et traitements thermiques des métaux », Edition Mir, Moscou, 3<sup>eme</sup> édition, 1982.
- [20] M.T. Leger, P. Detrez. Les aspects métallurgiques du traitement thermique des aciers. Notice CTIF (1976), P 31, 38, 42, 43, 56, 76
- [21] M. Wiest, E.Kassa, W.Davas, J.C.O Nielsen and H.Ossberger :assessment of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact.w