

---

**Université ABBES LAGHROUR Khenchela**



جامعة عباس لغرور خنشلة  
Faculté des Sciences et Technologie  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Département de Génie Mécanique  
قسم الهندسة الميكانيكية



# Mémoire

de fin d'études Pour l'obtention du diplôme  
**MASTER (LMD)**

**Filière : Génie Mécanique**  
**Spécialité : Génie des Matériaux**

## Thème

---

Influence de la vitesse de  
refroidissement sur la structure et la  
dureté de l'acier 30CrMnTi  
austénitisé avant et après cémentation

---

**Réalisés par :**

- ABIDI Wafa
- BENABID Aqila

**Membres du jury**

- Président : **DJEBAILI Hamid** Pr Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
- Rapporteur : **SAOUDI Abdenour** MCA Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
- Examineur : **BOULAHROUZ Salim** MCA Univ. Abbès Laghrou - Khenchela

---

**Année universitaire : 2021-2022**

---

# *Remerciements*

*Je remercie chaleureusement Dieu tout puissant, pour la puissance, la volonté et la patience qu'il ma nous a donné durant mes années d'études ;*

*Nous exprimons notre gratitude à notre encadreur Dr. SAOUDIA pour sa disponibilité, ses conseils et son aide pour accomplir ce travail.*

*Comme nous tenons à remercier :*

- *Le Présidente de jury : Pr. DJEBAILI Hamid*
- *L'examineur de jury : Dr. BOULAHROUZ Salim*

*Tous nos professeurs qui nous ont enseignés durant notre cursus universitaire.*

*Nous avons également remercié tout l'ensemble de l'entreprise de construction mécanique à Khenchela (ECMK), qu'ils nous acceptent au sein de leur laboratoire et assuré la partie expérimentale de cette maîtrise. Leurs discussions nous ont été indispensables et nous sommes extrêmement reconnaissants.*

# *Dédicace*

*A l'âme pure de mon père, Rahmat allah ealayh.*

*Je dédie le fruit de mes efforts à la personne la plus chère et la plus précieuse de ma vie, qui a illuminé mon chemin avec ses conseils et était une mer limpide coulant d'amour et de sourires, à celle qui a décoré ma vie avec la pleine lune blanche et des bougies de joie, à celui qui m'a donné force et détermination, pour continuer le chemin, et a été une raison de poursuivre mes études, à celui qui m'a appris Patience et diligence au cher*

*Maman.*

*A ceux que le cœur leur rappelle avant que la plume ne les écrive, à ceux qui ont partagé avec moi la douceur et l'amertume de la vie sous un même toit, mes frères : Saber, Hicham, et mes sœurs : Hasina, Hayat, Soulaf, Kenza, sans moi étant la femme de mon frère Hayat.*

*Et aux poussins : Salsabil, Amir, que Dieu leur accorde la réussite dans leurs études, et Chorouk, Tasneem Hanin, Sidra, que Dieu Tout-Puissant les protège et prenne soin d'eux.*

*J'ai ma deuxième famille, Radya, Nadia, Karima, Basma, et mes généreux parents, hafidahom allah, et à mon soutien et compagnon, Youssef, adamak allah pour moi comme un bon mari... .*

*Et à mes plus chers amis, Hizia, Hana, Dounya, Akila, khouloud, Awatif, Amina, chaima et chams,*

*À tous ceux que ma plume n'a pas compris, je leur dis qu'ils sont loin, et ils ne sont pas loin de le cœur. Votre amour et vous êtes dans la présence du cœur.*

**Wafa**

# *Dédicace*

*Louange a dieu et prières sur le bien –aime Mustafa , sa famille et ses fideles ce qui suit : louange a dieu qui nous a permis de franchir cette étape de notre parcours d'étude avec ce mémoire , fruit d'efforts et de succès , par sa grâce , est dédiée a ceux qui s'efforcent et coquins de profiter du confort et du contentement , qui n'ont rien épargne pour me pousser sur le chemin du succès , qui m'a appris a gravir les échelons vie sagement et patiemment a mes honorables parents , que dieu les protège ; mon père et ma mère .*

*Pour moi de leur amour coule dans mes veines et remplit mon cœur de leur mémoire mes frères : Halima, Adel, Lotfi, Hossam, Hamza.*

*A tout mes neveux : Adam Mohammed, Razan, Rahma, Ranim, Abdel ale Djalil, Hachem, Rami..*

*A mes oncles, tantes, tantes et oncles, que dieu les protège a mes chers proches dont la mémoire est encore présente chéris, qui dieu ait pitié d'eux et leur accorde le paradis du paradis.*

*A la mère la plus chère que j'ai connue de ma vie, la femme de mon cicle, que dieu la guérisse et lui accorde la paix...*

*A tous mes proches.. a qui nous partageons alors que nous ouvrons ensemble la voie vers le succès et la créativité a qui nous avons joint la main la main dans la main pendant que nous cueillons une fleur nous avons appris ... a tous nous avons appris ..*

*A tous mes amis , collègues et collègues : Wafa , Awatif , Chaima , Amina , Khouloud , Ranya , Chames , Imane , Noura , Yasmin , Siham , Akila , Kahina , Souad , Mona , Houria , Fatma , Hayat et sa famille , Saliha , Souhila , Amal , Imane DARRAJA et sa famille , Elham , Souade , Eli mes cousines : Hasna , Nihade , Afaf , Manal ,Aya , Romaysa , Linda , Imane , Fatima , Wahiba , Khaira , Samiha .*

*Surtout ma sœur et compagne, Souhila. a ma personne la plus chère ceux, Hamza BEN ABBES, et a tous ceux qui ont contribue a mon soutien et a mes cotes pour que je puisse terminer mes études et obtenir une maitrise.*

**AQILA**

## Résumé

Le but de notre travail est d'étudier l'effet de la vitesse de refroidissement sur la structure et la dureté de l'acier 30CrMnTi austénitisé avant et après cémentation. Nous avons utilisé trois éprouvettes de Jominy E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub> en analysant toutes les transformations structurales et les modifications de duretés en fonction de la vitesse de refroidissement avant et après cémentation-trempabilité de l'acier 30CrMnTi austénitisé. Les résultats obtenus montrent que la quantité du carbone diffusée à la surface de l'acier 30CrMnTi austénitisé a entraîné un durcissement supplémentaire de la couche superficielle en créant une structure martensitique + carbures. La dureté de l'acier 30CrMnTi dépend de la nature de la structure transformée.

## Abstract

The aim of our work is to study the effect of cooling rate on the structure and hardness of austenitized 30CrMnTi steel before and after carburizing. We used three specimens of Jominy E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> and E<sub>3</sub> by analyzing all the structural transformations and the modifications of hardness according to the cooling rate before and after carburizing-hardening of the austenitized 30CrMnTi steel. The results obtained show that the quantity of carbon diffused on the surface of the austenitized 30CrMnTi steel led to an additional hardening of the surface layer by creating a martensitic structure + carbides. The hardness of 30CrMnTi steel depends on the nature of the transformed structure.

## ملخص

الهدف من عملنا هو دراسة تأثير معدل التبريد على هيكل وصلابة الفولاذ 30CrMnTi المؤكسد قبل الكربنة وبعدها. استخدمنا ثلاث عينات من Jominy E<sub>1</sub> و E<sub>2</sub> و E<sub>3</sub> من خلال تحليل جميع التحولات الهيكلية وتعديلات الصلابة وفقاً لمعدل التبريد قبل وبعد التصلب الكربوني لفولاذ 30CrMnTi المؤسس. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن كمية الكربون المنتشرة على سطح الفولاذ المؤكسد 30CrMnTi أدت إلى تصلب إضافي للطبقة السطحية عن طريق تكوين هيكل مارتنسيتي + كربيد. تعتمد صلابة 30CrMnTi على طبيعة الهيكل المحول.

# **Introduction**

## **générale**

## Introduction générale

Aujourd'hui, l'acier est considéré comme le matériau le plus utilisé dans les secteurs industriels. C'est un alliage de fer et de carbone, et il contient également d'autres éléments qui sont introduits en petites quantités. La teneur en carbone varie approximativement entre 0.005% et 2.11% en masse, ou plus la teneur en carbone de l'acier est élevée, plus sa dureté est élevée. Dans le cas d'un faible pourcentage de carbone, l'acier est exposé à de nombreux problèmes tels que la corrosion, la fatigue et des propriétés mécaniques modestes ... etc.

La cémentation est l'un des traitements thermochimiques appropriés et la meilleure solution pour éviter ces problèmes par la diffusion d'une quantité de carbone de l'atmosphère gazeuse carbonisée vers la couche superficielle d'acier à faible teneur en carbone ( $C\% < 0.3$ ), tout en affectant fortement les propriétés structurales et mécaniques. Le but de notre étude est de mettre en évidence l'effet de la vitesse de refroidissement sur la structure et la dureté de l'acier 30CrMnTi avant et après cémentation-trempabilité par l'essai de Jominy.

Notre mémoire contient de trois chapitres :

- Le premier chapitre : présente une généralité sur les aciers en déterminant ses compositions chimiques, les microstructures et leurs propriétés mécaniques.
- Le deuxième chapitre : orienté à mettre en évidence les traitements thermiques classiques (trempé, revenu) et le traitement thermochimique en particulier la cémentation.
- Le troisième chapitre : dédié à l'étude expérimentale en analysant la structure de l'acier 30CrMnTi et son comportement mécanique avant et après cémentation-trempabilité en utilisant trois éprouvettes de Jominy (trempabilité)  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ . Finalement, nous avons discuté tous les résultats obtenus.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur les**

### **aciers**

## Chapitre I : Généralité sur les aciers

<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>I.2. Définition de l'acier.....</b>	<b>7</b>
<b>I.3. Fabrication de l'acier .....</b>	<b>8</b>
<b>I.4. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone (Fe-C) .....</b>	<b>8</b>
I.4.1. Eléments de base.....	9
I.4.1.1. Le fer .....	9
I.4.1.1.1. Fer $\alpha$ .....	10
I.4.1.1.2. Fer $\gamma$ .....	10
I.4.1.1.3. Fer $\delta$ .....	10
I.4.1.2. Le carbone .....	11
I.4.2. Influence des éléments d'alliage sur les structures d'équilibre .....	12
I.4.2.1. Les éléments alphagènes .....	12
I.4.2.1.1. Le chrome (Cr).....	12
I.4.2.1.2. Le molybdène (Mo) .....	12
I.4.2.1.3. Le silicium (Si).....	12
I.4.2.1.4. Le vanadium (V) .....	13
I.4.2.1.5. Le titane (Ti) .....	13
I.4.2.1.6. Le niobium (Nb) .....	13
I.4.2.2. Les éléments gammagènes .....	13
I.4.2.2.1. Le nickel (Ni) .....	13
I.4.2.2.2. Le manganèse (Mn).....	13
I.4.2.2.3. Le carbone (C).....	13
I.4.2.2.4. L'azote (N).....	14
I.4.2.2.5. Le soufre (S) .....	14
I.4.2.2.6. Le cuivre (Cu) .....	14
I.4.3. Influence des éléments d'alliage sur les propriétés chimiques des aciers....	15
<b>I.5. Les différentes phases de l'acier .....</b>	<b>16</b>
I.5.1. Ferrite(F).....	16
I.5.2. Austénite (A) .....	16
I.5.3. Cémentite (C) .....	16
I.5.4. Perlite (P) .....	16
I.5.5. Troostite (T) .....	17

---

I.5.6. Bainite (B) .....	17
I.5.7. Sorbite (S).....	17
I.5.8. Martensite (M) .....	17
I.5.9. Ledeburite I (LI) .....	18
I.5.10. Ledeburite II (LII) .....	18
<b>I.6. Classification des aciers .....</b>	<b>18</b>
I.6.1. Aciers non alliés et alliés .....	18
I.6.1.1. Aciers non alliés .....	18
I.6.1.2. Aciers alliés .....	19
I.6.1.2.1. Acier faiblement alliés.....	20
I.6.1.2.2. Aciers micro alliés .....	20
I.6.1.2.3. Aciers fortement alliés .....	20
<b>I.7. Propriétés des aciers.....</b>	<b>20</b>
<b>I.8. Aciers de cémentation .....</b>	<b>20</b>
<b>I.9. Domaine d’application des aciers .....</b>	<b>21</b>
I.9.1. Monuments et construction .....	21
I.9.2. Mécanique et technologie .....	21
I.9.3. Vie quotidienne .....	22
<b>I.10. Défauts des aciers .....</b>	<b>22</b>
<b>I.11. Conclusion.....</b>	<b>23</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Mailles élémentaires des structures cristallines (C.C et C.F.C) de l'acier.....	7
<b>Figure I.2.</b> Le cycle de fabrication de l'acier.....	8
<b>Figure I.3.</b> Diagramme d'équilibre Fer-Carbone.....	9
<b>Figure I.4.</b> Structure cristalline de Fer $\alpha$ .....	10
<b>Figure I.5.</b> Structure cristalline de Fer $\gamma$ .....	10
<b>Figure I.6.</b> Structure cristalline de Fer $\delta$ .....	11
<b>Figure I.7.</b> Influence du molybdène sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma dans le système fer-carbone-molybdène.....	14
<b>Figure I.8.</b> Influence du manganèse sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma dans le système fer-carbone-manganèse.....	15

**Liste des tableaux**

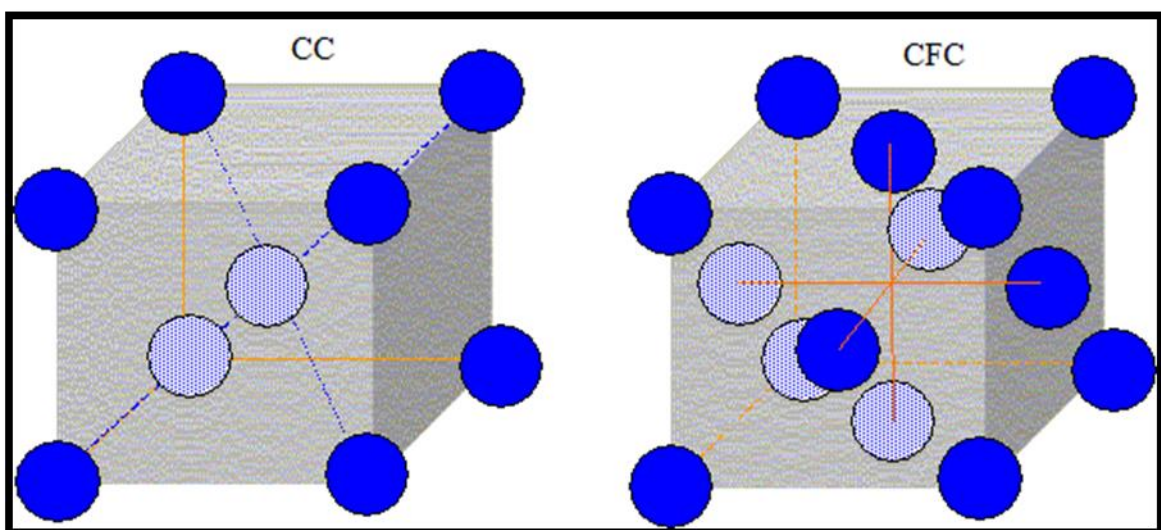
**Tableau I.1.** Caractéristique du Carbone. .... 11

## I.1. Introduction

Les aciers jouent et continuent de jouer un rôle capital sur le plan technologique. Les aciers sont des matériaux de construction, de transport (trains, automobiles), de composants mécaniques (visserie, ressorts, câbles, roulements, engrenages), d'outillage de frappe (marteaux, burins, etc.) et de coupe (fraises, forets, porte plaquette), etc. Ils sont aussi très présents dans des produits destinés au grand public (meubles, ustensiles de cuisine). Plusieurs facteurs expliquent cette importance : sur le plan mécanique, les aciers ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique, et à cause de leurs meilleures propriétés aussi physicochimiques que mécaniques qu'ils possèdent, ils se prêtent facilement à une production en masse. L'acier demeure le seul matériau capable tout à la fois de soutenir des efforts et des charges considérables, de conserver ses vertus à haute et basse température et de résister à la corrosion. On peut modifier également leur propriété en ajoutant d'autres éléments [1].

## I.2. Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2.11 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments outre le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage (Fig.I.1) [2].



**Figure I.1.** Mailles élémentaires des structures cristallines (C.C et C.F.C) de l'acier [3].

### I.3. Fabrication de l'acier

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.
- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique [4].

Le laminage à chaud est une technique puissante de mise en forme dont les applications sont très variées. Une grande majorité des matériaux métalliques est soumise à un formage par laminage au cours de son cycle de fabrication. Bien que le mot laminage évoque plus spécifiquement les produits plats, de nombreux autres procédés de laminages ont été utilisés pour obtenir d'autres géométries (fils, ronds, barres, tubes, rails, etc.) [5].

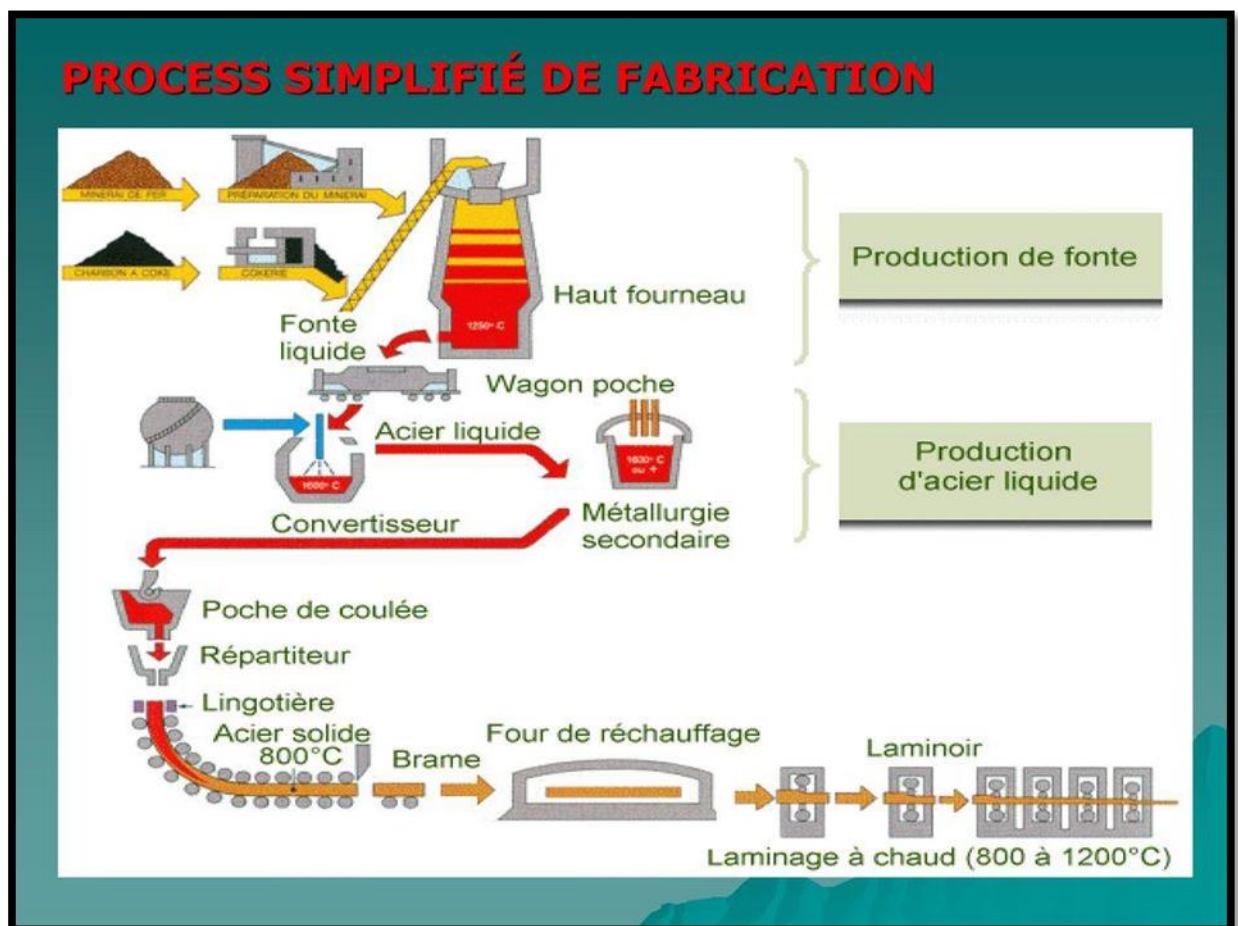


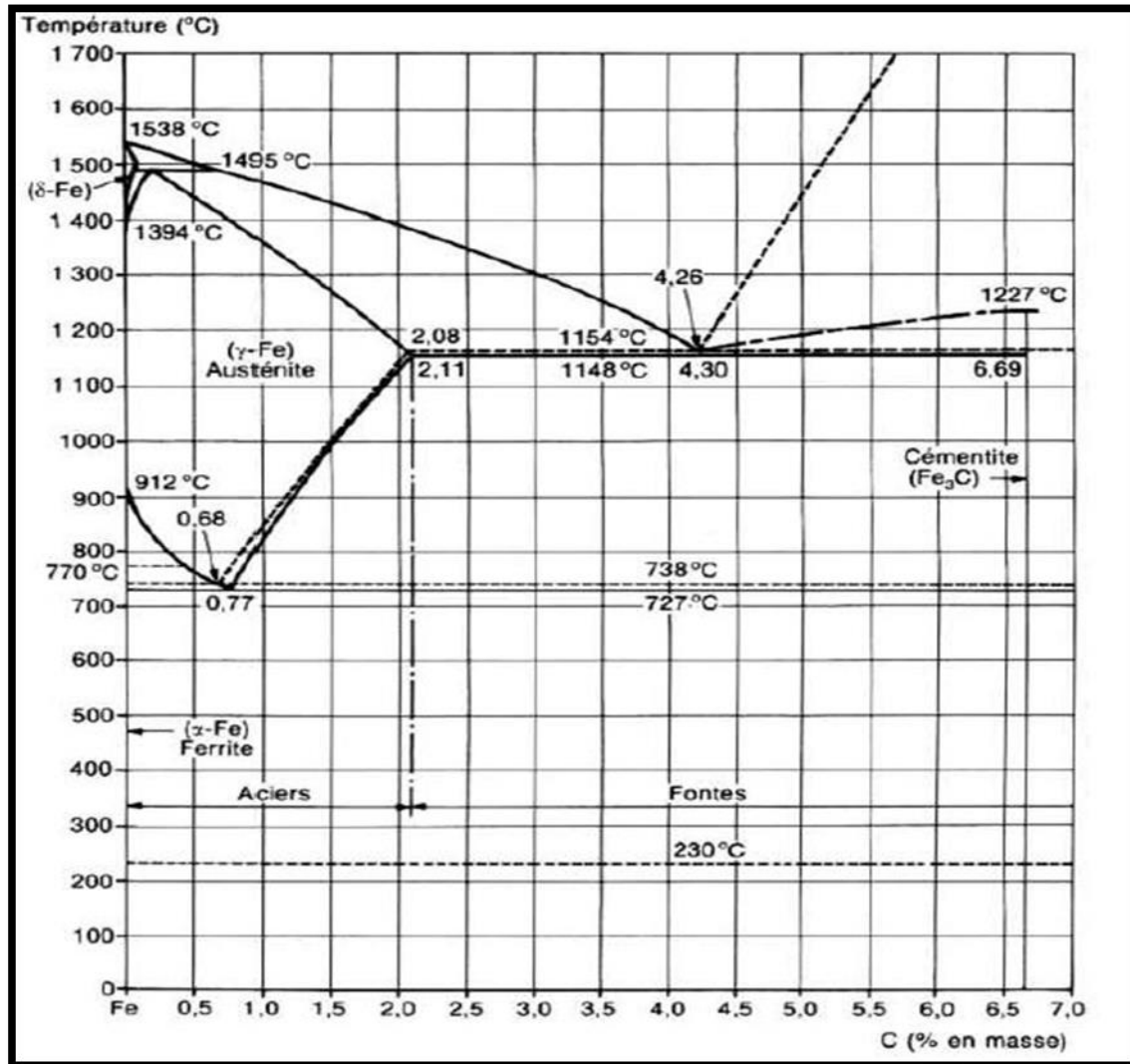
Figure I.2. Le cycle de fabrication de l'acier [6].

### I.4. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone (Fe-C)

Il est probable que l'alliage binaire du fer et du carbone soit le plus important de tous les systèmes d'alliages. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone.

La présence de la section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles [7].

La figure I.3 représente les différentes températures importantes pour l'acier et la fonte. Il représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration du ferret du carbone varie.



**Figure I.3.** Diagramme d'équilibre Fer-Carbone [8].

## I.4.1. Eléments de base

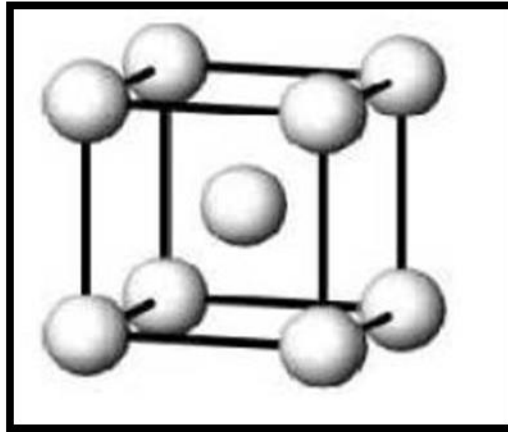
Le diagramme d'équilibre se compose des éléments suivants :

### I.4.1.1. Le fer

Le fer existe sous trois variétés allotropiques, il existe sous la forme de fer alpha, gamma et delta de structures cristallines : CC et CFC.

## I.4.1.1.1. Fer $\alpha$

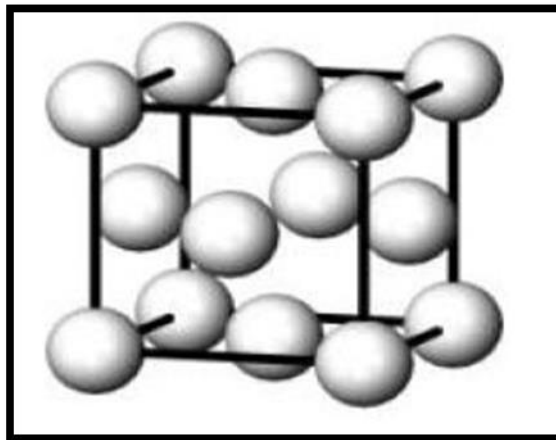
Il a une structure cristalline cubique centrée qui n'existe qu'en dessous de 906°C. Ne dissout pratiquement pas le carbone. Il est très malléable.



**Figure.I.4.** Structure cristalline de Fer  $\alpha$ .

## I.4.1.1.2. Fer $\gamma$

Il a une structure cristalline cubique à face centrée qui n'existe qu'entre 906°C et 1400°C. Il dissout facilement le carbone.



**Figure.I.5.** Structure cristalline de Fer  $\gamma$

## I.4.1.1.3. Fer $\delta$

Cette forme existe entre la température 1401°C et 1538°C température à la quelle fusionne le fer, sa structure est cubique centres (cc) .son paramètre cristallin varie entre 0.2926 et 0.2935 nm.

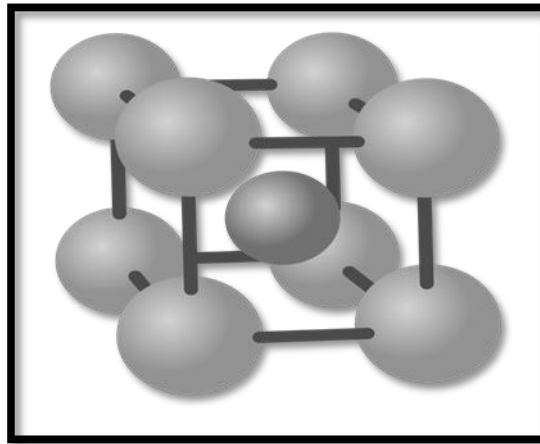


Figure.I.6. Structure cristalline de Fer $\delta$

**I.4.1.2. Le carbone**

C'est un élément non métallique peut abondant (0,1% en masse dans l'écorce terrestre). Il est rare à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales comme dans le pétrole, le charbon, le bois, la houille etc... Ses caractéristiques sont les suivantes :

Tableau I.1. Caractéristique du Carbone [9].

Numéro atomique	Masse atomique (g/mole)	Masse atomique (g/mole)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Température de fusion (°C)
6	12	0.77	2.5	3500

Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500°C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le graphite ou se combiner avec le fer en formant une phase intermétallique Fe<sub>3</sub>C appelée cémentite ou carbone de fer.

- La phase intermétallique cémentite a une structure très compliquée et elle est très dure.
- La Formation du graphite ou de la cémentite dépend des éléments d'alliage qui accompagnent le fer et surtout du type de refroidissement (vitesse de refroidissement).
- Lorsque le refroidissement du métal liquide est lent les atomes de carbone se cristallisent en formant le graphite et selon le cas contraire, lorsque le refroidissement est rapide on a la formation de la cémentite (Fe<sub>3</sub>C), qui ne peut se décomposer à la température ambiante, mais a un maintien de température supérieure à 500°C et d'une durée très longue [9].

## I.4.2. Influence des éléments d'alliage sur les structures d'équilibre

À des teneurs limitées, les éléments d'alliage changent le tracé du diagramme d'équilibre Fe/C en modifiant tout d'abord les domaines respectifs d'existence des phases  $\alpha$  et  $\gamma$ .

### I.4.2.1. Les éléments alpha gènes

Les éléments alpha gènes qui augmentent la surface du domaine dans lequel la phase  $\alpha$  est stable et, de ce fait, diminuent la surface du domaine de stabilité de la phase  $\gamma$  comme l'illustre la figure 04 en ce qui concerne le molybdène ; la liste des éléments alpha gènes comprend presque tous les éléments habituels tels que Si, Al, Cr, Mo, Ti, W [10].

#### I.4.2.1.1. Le chrome (Cr)

Élément de base de tous les aciers inoxydables qui offre la résistance à la corrosion par la formation d'un film passif en se combinant avec l'oxygène et augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud. Lorsqu'il est associé avec le molybdène et le nickel, il confère de bonnes propriétés mécaniques à des températures allant jusqu'à 500°C [10].

#### I.4.2.1.2. Le molybdène (Mo)

C'est un élément alpha gènes qui, ajouté à raison de quelques pourcents, améliore la qualité du film passif, en particulier en milieux chlorurés et acides, à l'exception des solutions nitriques bouillantes. Le molybdène augmente la résistance au fluage des aciers au chrome. Il diminue la fragilité au revenu. Il améliore sensiblement la résistance à la corrosion inter cristalline et par piqure. Il confère une plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation pour des maintiens entre 1000 et 1100°C.

De plus, il augmente la résistance mécanique à chaud. M. K. AHN et al ont étudié l'effet du Mo sur l'acier inoxydable ferritique et ont montré que la présence du Mo augmente la résistance à la corrosion par piqure et la résistance à la corrosion sous contrainte [10]. Les travaux de SeokJooDoh et al sur l'influence du Mo sur les aciers inoxydables type 430 et 444 ont montré que son addition améliore la passivation, qui est principalement due à la substitution de l'oxyde de Cr par l'oxyde de Mo dans le film passif [11].

#### I.4.2.1.3. Le silicium (Si)

C'est un élément également alpha gènes, il augmente la résistance à la corrosion et améliore les propriétés d'emploi à haute température ce qui lui confère une bonne résistance à l'oxydation à chaud dans le cas de l'acide nitrique mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage.

### **I.4.2.1.4. Le vanadium (V)**

Il est un fort stabilisateur de ferrite. Avec la présence du nickel, il augmente la résistance mécanique [12].

### **I.4.2.1.5. Le titane (Ti)**

Doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure.

### **I.4.2.1.6. Le niobium (Nb)**

C'est un élément alphas, il se combine avec le carbone dans les aciers inoxydables et forme les carbures pour s'opposer à la corrosion inter granulaire.

### **I.4.2.2. Les éléments gammagènes**

Les éléments gammagènes qui augmentent la surface du domaine d'existence dans lequel la phase  $\gamma$  est stable figure 05 ; la liste des éléments gammagènes est relativement courte : Ni, Mn et Cu (dont l'action est assez faible) [13].

#### **I.4.2.2.1. Le nickel (Ni)**

Au-delà de 6 % à 8 %, sa présence se traduit par un effet gammagènes et l'acier devient austénitique à toutes températures. Il élargit ainsi le domaine d'existence de l'austénite. Il favorise la mise en œuvre par déformation plastique, améliore la résistance à la corrosion, en particulier la résistance à la corrosion sous tension, il affine le grain et améliore la ductilité. Le nickel a une influence favorable sur la trempabilité, la résistance au choc et la ténacité des calamines [14].

#### **I.4.2.2.2. Le manganèse (Mn)**

Bien que classé comme élément gammagènes, a un rôle alphas pour des teneurs supérieures à 7 %, rend ainsi difficile la transformation de l'austénite en martensite dans les aciers Cr-Ni et lors des sollicitations mécaniques aux basses températures.

#### **I.4.2.2.3. Le carbone (C)**

Il stabilise la structure austénitique introduit pour accroître les propriétés mécaniques de l'acier (dureté, charge à la rupture, fluage...), particulièrement sous l'effet des traitements thermiques, le carbone joue cependant un rôle néfaste vis-à-vis de la résistance à la corrosion (précipitation de carbures de chrome lorsque la teneur en carbone dépasse 0,030 % conduisant à la corrosion inter granulaire). Ceci a encouragé le développement de nuances d'aciers inoxydables à très faible teneur en carbone (inférieur à 0,03%) [14].

#### I.4.2.2.4. L'azote (N)

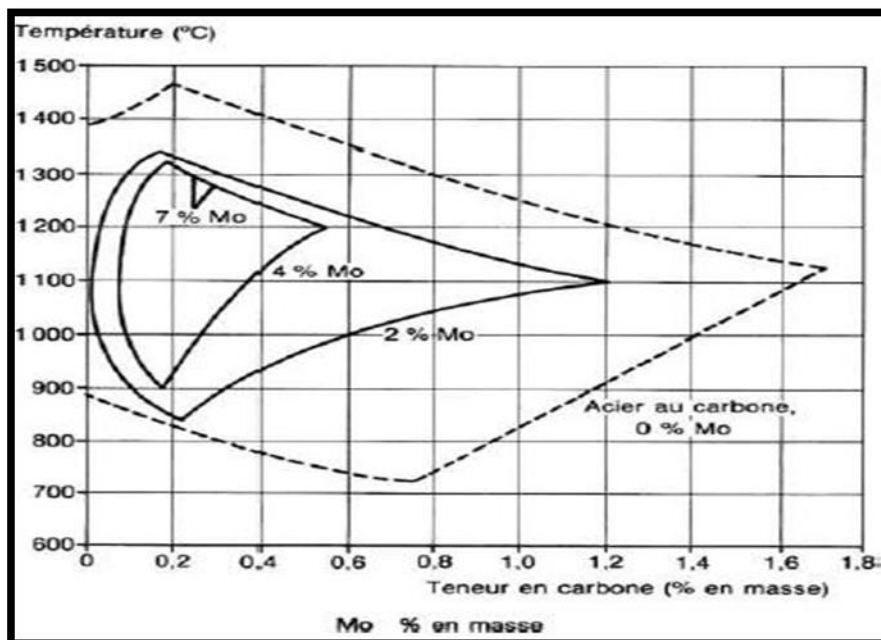
Stabilisateur d'austénite, associé à une basse teneur de carbone, l'azote permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans diminuer la résistance à la corrosion inter granulaire. Il a une influence bénéfique sur la résistance à la corrosion par piqûres et la résistance à la corrosion par crevasse par précipitation du nitrure de chrome  $\text{Cr}_2\text{N}$  moins riche en chrome que  $\text{Cr}_2\text{C}_6$  provoquant un moindre appauvrissement en chrome au voisinage des joints de grains. L'azote augmente aussi la résistance à la traction et diminue la ductilité des aciers inoxydables austénitiques [15].

#### I.4.2.2.5. Le soufre (S)

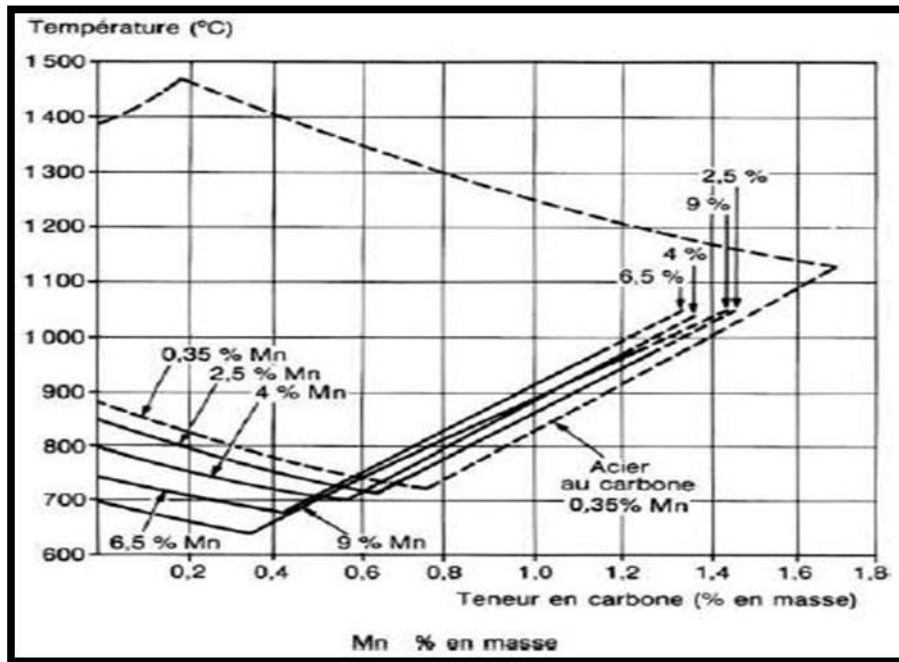
À des teneurs de l'ordre de 0,2 %, il améliore considérablement l'usinabilité (tournage, fraisage, perçage, etc.) mais cela se fait au détriment de la résistance à la corrosion par piqûres [16].

#### I.4.2.2.6. Le cuivre (Cu)

Il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion ou pour accroître l'aptitude à la frappe à froid, le cuivre aide aussi à la lutte contre la corrosion bactérienne. En outre le cuivre améliore l'usinabilité des aciers inoxydables austénitiques.



**Figure I.7.** Influence du molybdène sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma dans le système fer-carbone-molybdène [16].



**Figure I.8.** Influence du manganèse sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma dans le système fer-carbone-manganèse [17].

#### I.4.3. Influence des éléments d'alliage sur les propriétés chimiques des aciers

Il ne reste pratiquement à citer que le chrome qui est l'élément d'addition essentiel qui permet de conférer aux aciers un caractère d'inoxidabilité, c'est-à-dire une aptitude à s'auto protéger par formation d'une couche protectrice qui, après sa formation, arrête ou ralentit très fortement la progression de la corrosion.

En corrosion aqueuse, cette couche dite passive a une composition très complexe qui dépend de celle de l'acier et de celle du milieu agressif ; elle contient généralement des ions hydroxydes, des cations des métaux oxydables contenus dans l'acier et des anions issus du milieu corrosif.

En corrosion sèche à chaud, cette couche est essentiellement formée d'oxyde de chrome  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [17]. D'autres éléments peuvent, à des degrés moindres, augmenter la résistance des aciers aux agressions chimiques ; ce sont :

- Le molybdène, le cuivre et le nickel en corrosion aqueuse ;
- Le silicium, l'aluminium et le nickel en milieux oxydants à chaud.

**I.5. Les différentes phases de l'acier****I.5.1. Ferrite (F)**

C'est une solution solide de carbone dans le fer  $\alpha$  c'est à dire la ferrite est constituée par du fer renfermant des traces de Carbone (faible teneur en carbone  $< 0,02\%$ ) ainsi.

On distingue la ferrite  $\alpha$  à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à  $0,02\%$  et la ferrite  $\delta$  à haute température à solubilité limite en carbone allant jusqu'à  $0,1\%$ . La ferrite est peu tendue et très ductile ( $HV = 90$ ,  $R_m = 300\text{N/mm}^2$ ,  $K = 300\text{j/cm}^2$ ). Elle est magnétique à la température ordinaire, au microscope la ferrite a l'aspect de grains homogène polyédrique. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique Jusqu'à  $760^\circ\text{C}$ .

**I.5.2. Austénite (A)**

Du nom de William Chandler Roberts-Austen (1843-1902), l'austénite (fer  $\gamma$ ) est une phase du fer, stable entre  $910^\circ\text{C}$  et  $1394^\circ\text{C}$ . Elle a une structure cristallographique cubique à faces centrées, notation Strukturbericht  $A_1$ . Cette structure permet une grande solubilité du carbone (jusque  $2,1\%$  massique à  $1147^\circ\text{C}$ ). 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.5.3. Cémentite (C)**

La cémentite est une combinaison chimique de fer et de carbone ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) dont la teneur en carbone est de  $6,67\%$ . Elle cristallise dans un système rhomboédrique, sa température de fusion est de  $1550^\circ\text{C}$ . Cette phase est très dure (environ  $1000\text{ HV}$ ), mais fragile. La cémentite existe sous forme de carbure de fer hypereutectoïde (cémentite primaire) et sous forme de cémentite secondaire (hypereutectoïde).

**I.5.4. Perlite (P)**

C'est un 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  $R_M = 800 \text{ N/mm}^2$ .

### I.5.5. Troostite (T)

C'est une perlite extrêmement fine obtenue pour des vitesses de refroidissement assez importantes huile. 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.5.6. 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.5.7. 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°C). C'est un mélange complexe de carbure finement réparti dans une matrice ferritique distordue. Elle conduit à des propriétés mécaniques intéressantes par exemple la dureté reste encore élevée HV  $\approx$  (300 à 400) pour une bonne résilience.

### I.5.8. Martensite (M)

En ce qui concerne les aciers, la martensite ( $\text{Fe}\alpha$ ) 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 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.5.9. 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 débrutie 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°C à 1147°C.

### **I.5.10. 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°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 [18].

## **I.6. Classification des aciers**

### **I.6.1. Aciers non alliés et alliés**

#### **I.6.1.1. Aciers non alliés**

En faisant abstraction des impuretés, l'acier peut être considéré comme un alliage binaire fer carbone (jusqu'à 1,7 % de carbone). Les mélanges hétérogènes fer- carbone sont caractérisés par la présence de grains de ferrite (solution solide fer -carbone) et de grains de perlite (agrégat perlite +cémentite ( $Fe_3C$ )). La cémentite est un composé dur et fragile qui se dispose en fines lamelles alternées sur les grains. A l'examen au microscope optique, ces lamelles de cémentite présentent un aspect nacré à l'origine du nom de cette structure particulière: la perlite. Au-dessus de 0,85 %de carbone (eutectoides), l'acier n'est plus composé que de perlite. De plus, la cémentite supplémentaire s'accumule aux joints de grains. On doit noter que ces structures correspondent à un état recuit (non trempé) de l'acier.

Mais nous rappelons que la trempe des aciers consiste à faire subir au matériau un cycle particulier de variation de la température et surtout un refroidissement qui permet la création d'une nouvelle structure appelée martensite : ceci permet d'augmenter les caractéristiques de dureté, de limite élastique...etc. Les différentes structures des aciers en fonction de la température sont représentées dans le diagramme d'équilibre fer-carbone. Il traduit la composition de phases et la structure de l'alliage dont la concentration varie du fer pur à la cémentite (6.67% C) [19].

### **I.6.1.2. Aciers alliés**

#### **I.6.1.2.1. Acier faiblement alliés**

Pour améliorer certaines propriétés d'un acier (limite élastique, résilience, ...), on lui ajoute de faibles proportions d'éléments comme le chrome, le nickel, le vanadium, le zirconium, ...etc.

Un acier est faiblement allié si les teneurs en éléments d'addition restent inférieures à 5%. Par contre pour une teneur supérieure à 5% pour l'un quelconque des éléments d'addition, l'acier est dit fortement allié. Les propriétés sont nettement différentes de celles des aciers non alliés. La trempabilité est généralement supérieure et des structures martensitiques peuvent être obtenues par des trempes à l'huile ou à l'air (aciers autotrempants) [20].

#### **I.6.1.2.2. Aciers micro alliés**

Les aciers micro alliés sont des aciers à haute résistance mécanique caractérisés par de faibles additions de niobium (Nb), de vanadium (V) et/ou de titane (Ti). Ces éléments de micro alliage ( $\approx 0.1$  % massique) s'associent avec des éléments interstitiels (carbone, et/ou azote) pour former des précipités : nitrures, carbones et/ou carbonitrures. Cette précipitation conduit à un accroissement des propriétés mécaniques par rapport aux aciers de base au carbone manganèse. Ces niveaux de propriétés mécaniques sont garantis par l'affinage des grains austénitiques et le durcissement structural induit par la précipitation de dispersive.

Les effets spécifiques de telles additions peuvent être affectés par l'addition d'autres éléments d'alliage (B, Si, Cr, etc.) d'une part, et par la maîtrise des paramètres de traitements thermiques et/ou thermomécaniques, d'autre part, vers la fin des années soixante, les aciers micro alliés occupaient une place importante parmi les aciers. Ils ont gagné rapidement l'intérêt des fabricants grâce à la possibilité d'utiliser des procédés de semi calmage dans leur production, de par la faible affinité du niobium et du vanadium pour l'oxygène [20].

### I.6.1.2.3. Aciers fortement alliés

On désigne par acier fortement allié un métal dans lequel un des éléments d'addition au moins A a une teneur égale ou supérieure à 5 %.

Il se distingue par une lettre majuscule Z, indiquant que ce métal est fortement allié, suivie de 100 fois la teneur en carbone suivie elle-même du symbole des éléments d'addition et des pourcentages exacts de ceux-ci. Dans les aciers fortement alliés la teneur en molybdène n'est pas spécifiée, celui-ci entrant dans l'alliage à moins de 1 % [19].

### I.7. Propriétés des aciers

Les aciers constituent une classe de matériaux très vaste possédant une large panoplie de caractéristiques mécaniques. Ils ont un module de Young d'environ 200 GPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, des traitements thermiques et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis.

Les traitements thermiques des aciers recouvrent un ensemble d'opérations ayant pour but des transformations structurales à l'état solide sous l'influence de cycles thermiques choisis, afin d'optimiser leurs propriétés mécaniques ou physiques :

Résistance à la rupture, aux chocs et à l'usure; ténacité; élasticité et la dureté... Les opérations des traitements thermiques sont couramment mises en œuvre dans des fours à l'atmosphère ou sous vide. Les procédés utilisés sont des traitements de durcissement (trempe, cémentation...) et des traitements d'adoucissement (recuits...) [21].

Les traitements de surfaces recouvrent un ensemble d'opérations ayant pour but de modifier les caractéristiques superficielles des aciers afin de leur conférer des propriétés spécifiques telles que : résistance à la corrosion et l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques superficielles (dureté, glissement...). Les techniques utilisées sont des revêtements métalliques (zinc, chrome, or...); des revêtements non métalliques (peinture, plastique...); des traitements de conversion (anodisation...) et des traitements mécaniques (polissage...) [22].

### I.8. Aciers de cémentation

Les aciers de cémentation, à faible teneur en carbone (inférieure à 0,3%) permettent d'obtenir des pièces après les usinages mécaniques et le traitement de cémentation, possèdent une haute dureté superficielle 62 HRC associée à une bonne ténacité à cœur (20 à 40) HRC [23]. Grâce à la haute dureté de surface obtenue avec le traitement de cémentation, ces aciers sont utilisés pour réaliser tous les organes mécaniques exigeant une

dureté de surface considérable comme les engrenages, les goujons, les bagues, les arbres et tout le matériel nécessaire pour à la transmission du mouvement.

Les éléments d'alliage sont présents dans les aciers de cémentation pour améliorer leur aptitude à subir la transformation martensitique (trempabilité). Plus l'acier est trempant et moins il est nécessaire de refroidir énergiquement une pièce pour obtenir la transformation martensitique. Tous les éléments d'alliage, à l'exception du cobalt, augmentent la trempabilité mais dans des proportions variables, ainsi le chrome, le manganèse et le molybdène qui intervient dans les aciers de cémentation apportent une forte augmentation de trempabilité [24].

### **I.9. Domaine d'application des aciers**

L'acier est le métal de prédilection des bricoleurs, pour sa résistance au poids et à la température. C'est moins cher que l'inox ou l'aluminium, si l'acier n'est pas traité, il rouillera. Mais parfois, c'est l'effet que certains designers recherchent en matière de décoration et de style, l'acier est souvent utilisé à des fins mécaniques. Selon l'épaisseur choisie, vous pouvez facilement le monter, le souder, le plier et ajouter une couche de peinture pour lui donner l'aspect souhaité. Nous avons compilé 3 exemples d'utilisations de l'acier, selon l'alliage choisi, l'acier a de nombreuses applications et sous de nombreuses formes différentes. Des objets du quotidien à la machinerie industrielle, voici quelques exemples de produits ou ouvrages en acier [25].

#### **I.9.1. Monuments et construction**

Utilisé en élément de façade ou d'enveloppe, l'acier apporte à l'architecte un éventail de textures, de géométries et de coloris, qui vont l'aider à répondre aux contraintes environnementales, du site le plus contemporain au centre-ville classé monument historique, en passant par la pleine campagne [26].

#### **I.9.2. Mécanique et technologie**

Les aciers à outils ont une importance technologique primordiale, aucune étape de la fabrication et quel que soit le procédé employé ne peut se passer d'outil. La production mondiale de ce genre d'acier ne représente qu'un faible pourcentage  $\sim 0.1\%$ , mais compte par exemple en Amérique plus de 75 nuances. Chacune de ces nuances est destinée à une fonction bien spécifique [27].

### I.9.3. Vie quotidienne

L'acier a opéré sa révolution technologique pour être aujourd'hui présent dans presque tous les secteurs de l'activité économique (depuis les poutrelles et les armatures de béton armé, jusqu'aux aiguilles et aux prothèses de hanche), et se trouve au cœur de la vie quotidienne (boîtes, conserves...) [28].

### I.10. Défauts des aciers

Les nombres représentant les divers aspects des propriétés des aciers ne rendent pas entièrement compte de la qualité de chacun d'eux. S'ils correspondent assez bien au point de vue du mécanicien, ils ne suffisent pas : il faut envisager également des propriétés plus purement physiques du métal. Nous avons fait allusion à l'hétérogénéité et aux propriétés directionnelles d'une pièce d'acier : c'est un des phénomènes complexes qu'on peut englober sous l'appellation de défauts et maladies des aciers. L'hétérogénéité est liée aux ségrégations, c'est-à-dire aux irrégularités de composition se produisant lors de la solidification et qui ne peuvent pas être entièrement effacées lors des transformations et traitements ultérieurs. Ces ségrégations, parfois liées à des dégagements gazeux, persistent dans l'acier et peuvent être à l'origine de divers autres défauts [29].

Les inclusions non métalliques que l'on rencontre dans tous les aciers normalement élaborés constituent également un défaut pouvant avoir des conséquences graves. Les plus grosses proviennent d'entraînement de laitier ou de réfractaire : elles sont accidentelles et doivent pouvoir être évitées grâce à des précautions spéciales.

Les plus petites, les plus nombreuses d'ailleurs, sont, au contraire, inhérentes à l'acier et sont liées au processus même d'élaboration et surtout à la phase de désoxydation ; leur formation peut continuer même pendant la solidification. Si leurs inconvénients sont moins graves, elles n'en ont pas moins une influence profonde sur les propriétés de l'acier. En fait, les progrès réalisés depuis le début de la décennie quatre-vingt au niveau des procédés d'élaboration et de coulée sont considérables et permettent l'obtention d'aciers homogènes de haute pureté :

Les problèmes qui viennent d'être évoqués sont donc largement minimisés. Des criques et des tapures peuvent se produire soit au cours de la solidification, soit pendant les transformations ultérieures. Si elles n'ont pas pu être éliminées dès leur formation, elles entraînent le rejet de l'acier en cours de fabrication, et l'utilisateur ne les rencontre guère.

On peut cependant observer des fissures internes se produisant à l'occasion du forgeage ou du laminage.

Elles sont souvent liées à des ségrégations et parfois à des dégagements gazeux (hydrogène). À ce dernier type de défauts se rattachent les flocons [30].

Des défauts peuvent également apparaître lors des traitements thermiques. Nous ne parlons pas là des malfaçons de traitement telles qu'un cycle de température incorrect, mais de défauts tels que la décarburation ou la carburation superficielle ou encore de tapures provenant d'un mode de refroidissement mal adapté à la forme de la pièce ou à la nuance de l'acier.

Il peut se produire encore une altération des caractéristiques mécaniques (fragilisation), soit parce que l'acier a été chauffé à trop haute température (surchauffe), soit par suite d'un revenu dans une zone de température ne convenant pas pour l'acier traité (fragilité de revenu).

Bien d'autres défauts encore peuvent être rencontrés dans les aciers. Il est donc évident que la détermination des grandeurs mesurables ne peut pas suffire pour apprécier la qualité. Outre ces déterminations, le contrôle de la qualité comportera l'examen de l'acier ou de la pièce à l'aide de méthodes faisant appel aux ressources de la technique la plus évoluée. On utilisera des méthodes magnétiques ou électromagnétiques pour l'examen des surfaces, des rayonnements ultrasonores pour sonder l'intérieur du métal et mettre en évidence des inclusions ou des fissures internes. L'examen par transparence, à l'aide de rayons X ou de rayonnement  $\gamma$  provenant de substances radioactives, permet également de s'assurer de l'absence de défauts internes et même de les observer à distance à l'aide de caméras de télévision. La perfection des méthodes de contrôle permet maintenant d'utiliser l'acier avec une grande sécurité [31].

### I.11. Conclusion

Nous concluons que les aciers sont des matériaux composés essentiellement de fer - carbone, qu'ils se présentent généralement une gamme des caractéristiques (mécaniques, physique ou chimique) équilibré pour lui conférer une bonne résistance des sollicitations mécaniques, des agressions chimiques ou une combinaison entre les deux. Les constituants des aciers et les éléments d'addition ont une influence significative sur les propriétés des aciers, notamment la variation des éléments d'additions (éléments métalliques) ou de teneur en carbone qui permet de classer les aciers selon leur concentration dans le matériau.

Finalement, les différentes étapes de fabrication de l'acier et des défauts qui peuvent observer au cours de fabrication.

**Références**

- [1] O. Taâmallah. « Effet de traitement mécaniques de surface (TMS) sur l'érouissage et la ténacité d'un acier », mémoire de magister, université Badji Mokhtar-Annaba 2012.
- [2] H. Bouhaf, " Contribution à l'étude des causes de dégradation des conduites du transport d'eau industrielle ", Mémoire de Master, université Badji Mokhtar, Annaba, 2016.
- [3] <https://www.chimix.com/an7/sup/A58c.htm>
- [4] De 10 En Edition Metals Herd-book International American Society Of Matériels, (1990).Disponible En Ligne Sur Le Site: <Http://Www.Totalmateria.Com/Articles/Art62.Htm>
- [5] A. Boumaraf, « Effet De Soudage Sur La Structure D'un Acier Faiblement Allié (Bs2) Utilisedanslafabricationdesbouteillesagaz», Mémoire de master en génie mécanique ,Université Mohamed Khi der Biskra, (2015).
- [6] <Https://Www.Futura-Sciences.Com/Sciences/Questions-Reponses/Matiere-Fabrication-Acier-835/>
- [7] W.D. CALLISTER, Jr, Science et génie des matériaux, MODULO, Canada 2001.
- [8] Mir, métallographie et traitements thermiques des métaux, 3ième édition 1982.
- [9] <Https://Www.Rocdacier.Com/Les-Alliages-Binaires-Et-Diagramme-Fer-Carbone/>.
- [10] (K.W.) ANDREWS. – Empiricalformulae forthe calculation of some transformation températures. J. of the Iron. and SteelInstitut, juil. 1965.
- [11] M. K. AHN, H.S.Know&H.M.Lee : Quantitative comparaison of the influences oftungsten and molybdène on the passivité of Fe-29Cr ferriticstainlesssteels, Elsevier(1998).
- [12] J.SeokJooDoh, Ho Je, Jim Suk Kim : Influence of Cr and Mo on the passation ofstainlesssteel of stainlesssteel 430 -18Cr- and 444 -18Cr-2Mo-: In situ XANES study, Elsevier (2003).
- [13] S.M.Addasi, A.Shokuhfar : Improvisent of MechanicalProperties of Cr-Ni-Mo-Cu-TiStainlessSteelWith Addition of Vanadium, Journal of iron. and steelresearch, International(2007).
- [14] Jean VARRIOT : Chaudronnerie en aciers inoxydables, Techniques de l'Ingénieur, A 869.
- [15] J.Zhou-hua, ZHANG Zu-mi, XU Bao-y, LIU Fu-bin: MechanicalProperties of nickel free highnitrogenausteniticstainlesssteels, Materials Symposium(2007).

- [16] Wu Di & Li Zhang : A new Ph-free machinable austenitic stainless steel, Journal of Iron and Steel Research, International (2010).
- [17] T.Sourisseau, E.Chauveau, B.Baroux, Mechanism of Copper action on pitting phenomena observed on stainless steel in chlorite media. Corrosion Science (2005).
- [18] A. BOUDJELLAL.T& HACHEROUF, « Amélioration Des Caractéristiques Mécaniques D'un Aciers par des Différents Techniques », 2019/2020.
- [19] Y. Barkat. « Étude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2016.
- [20] M. Hantcherli « Influence d'éléments d'addition sur les transformations de la martensite revenue dans les aciers faiblement alliés », thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines-Saint Étienne 2010.
- [21] P. Guyton. Hardening by ordered coherent precipitates related to the statistical theory-Phil .Mag., vol.24, pages 987-993, (1971).
- [22] R. Reynoldson, W. Heat Treatment: Fluidized Bed Furnaces. ASM Interactional. (1993).
- [23] Youssef, R. Cémentation, Nitruration des aciers faiblement alliés Amélioration des propriétés d'usure et de frottement (Thèse de magister) (2012)..
- [24] SAID, B. traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes.
- [25] « Technique De L'ingénierie » M1002.
- [26] J .Morel, Calcul Des Structures Métalliques Selon L'eurocode3, 2002.
- [27] J. Paul Bailon, J. Marie Dorlot." Des Matériaux", 3eme Edition 2000-2001.
- [28] O. Taâmallah ; Effet Des Traitements Mécaniques De Surface (Tms) Sur L'écrouissage Et La Ténacité D'un Acier, Mémoire De Master, L'université De Badji Mokhtar, 2007.
- [29] D.M. STEFANESCU casting, volume 15 in ASM Hand book, Edition, American Society for Metals, USA, 1988.
- [30] [Couteaux.free.fr/acier technique/acier.html#defaults](http://Couteaux.free.fr/acier%20technique/acier.html#defaults).
- [31] Prat. Ind. Méc. Louis Gasquel, Volume 38, Number 12, Décembre 1955, Page(s): 323 – 323.

# **Chapitre II**

## **Cémentation des aciers**

## Chapitre II : Cémentation des aciers

<b>II.1. Introduction .....</b>	32
<b>II.2. Le but de cémentation .....</b>	32
<b>II.3. Principe de la cémentation .....</b>	32
<b>II.4. La profondeur de cémentation .....</b>	33
<b>II.5. Techniques de cémentation .....</b>	34
II.5.1. Cémentation solide (en caisse) .....	34
II.5.2. Cémentation liquide .....	35
II .5.2.1. Chimie des bains.....	35
II.5.3. Cémentation gazeuse .....	36
II.5.4. Cémentation ionique .....	36
<b>II.6. Rôle des éléments d'alliage sur la cémentation .....</b>	37
II.6.1. Carbone.....	37
II.6.2. Autres éléments d'alliages .....	37
<b>II.7. Traitements thermiques après cémentation .....</b>	39
<b>II.8. Traitements préparatoires de la surface .....</b>	39
<b>II.9. Etapes de la cémentation .....</b>	40
II.9.1. Etapes d'enrichissement de carbone .....	40
II.9.2. Trempe au cours de cémentation .....	40
II.9.3. Structure obtenue après trempe .....	41
II.9.3.1. Martensite.....	41
II.9.3.2. Austénite résiduelle.....	42
II.9.3.3. Cémentite.....	43
II.9.4. Revenu au cours de cémentation .....	44
II.9.5. Effet du revenu .....	44
<b>II.10. Propriétés des pièces cémentées .....</b>	44
II.10.1. Usure.....	45

II.10.2. Fatigue.....	45
II.10.3. Fatigue superficielle.....	46
<b>II.11. Les défauts de cémentation .....</b>	<b>46</b>
<b>II.12. Conclusion .....</b>	<b>47</b>

---

**Liste des figures**

<b>Figure II.1.</b> Variation de la concentration de carbone avec la distance.....	<b>33</b>
<b>Figure II.2.</b> Profondeur conventionnelle de cémentation.....	<b>33</b>
<b>Figure II.3.</b> Phases de cémentation.....	<b>34</b>
<b>Figure II.4.</b> Structures cristallines de l'austénite $\gamma$ et de la martensite $\alpha'$ dans les aciers.....	<b>41</b>
<b>Figure II.5.</b> Micrographie de la martensite.....	<b>42</b>
<b>Figure II.6.</b> Micrographie de l'austénite.....	<b>43</b>
<b>Figure II.7.</b> La micrographie de la cémentite.....	<b>43</b>

**Liste des tableaux**

**Tableau II.1.** Effet des éléments d'alliage classés du plus au moins carburigènes. **38**

## II.1. Introduction

On appelle un procédé de cémentation tout procédé permettant de carburer partiellement ou totalement un objet en acier, sans le soumettre à la fusion, et de telle façon que le métal carbure modifié est structure et les propriétés chimique et mécanique [1].

L'objectif principal de la cémentation est d'obtenir une dureté et une résistance à l'usure élevées des couches superficielles tout en conservant un cœur doux. Pour ce procédé, les aciers à faible teneur en carbone (jusqu'à un maximum d'environ 0,30% de carbone), avec ou sans éléments d'alliage (nickel, chrome, manganèse, molybdène), sont largement utilisés [2,3].

## II.2. Le but de cémentation

La cémentation est le plus ancien traitement thermochimique maîtrisé pour augmenter la dureté superficielle des pièces en acier. Pour cela, on augmente la teneur superficielle en carbone. La diffusion est toujours suivie de trempe à l'huile pour former des structures dures de martensite dans la couche enrichie [4].

## II.3. Principe de la cémentation

Dans ce processus, le carbone est diffusé dans l'acier en chauffant au-dessus de la température de transformation et en maintenant l'acier en contact avec un matériau carboné qui peut être un milieu solide, un liquide ou un gaz. Dans de telles conditions, le carbone est absorbé en solution solide dans l'austénite. Comme la solubilité du carbone est plus à l'état austénitique qu'à l'état ferrique, l'état entièrement austénitique est essentiel pour la cémentation [5].

La cémentation se déroule en deux étapes :

- L'absorption de carbone libre sur la surface de l'acier se produit en raison d'une grande différence entre le potentiel de carbone de l'atmosphère et la teneur en carbone de la surface de l'acier. Le taux d'absorption de la teneur en carbone supplémentaire sur la surface augmente avec une augmentation de la teneur en carbone de la surface jusqu'à ce qu'elle devienne égale à celle de l'atmosphère.
- La diffusion du carbone de la surface vers l'intérieur se produit dans la deuxième étape. Dès que l'acier entre en contact avec l'atmosphère de cémentation, le carbone

en surface atteint sa valeur maximale ( $C_s$ ). Il reste constant tout au long du processus. La teneur en carbone de l'intérieur est la même que la teneur en carbone d'origine dans l'acier,  $C_o$ . À un instant  $t > 0$ , la concentration en carbone varie linéairement avec la distance (figure 1). La première loi de diffusion de Fick régit ensuite la diffusion du carbone dans l'acier [6].

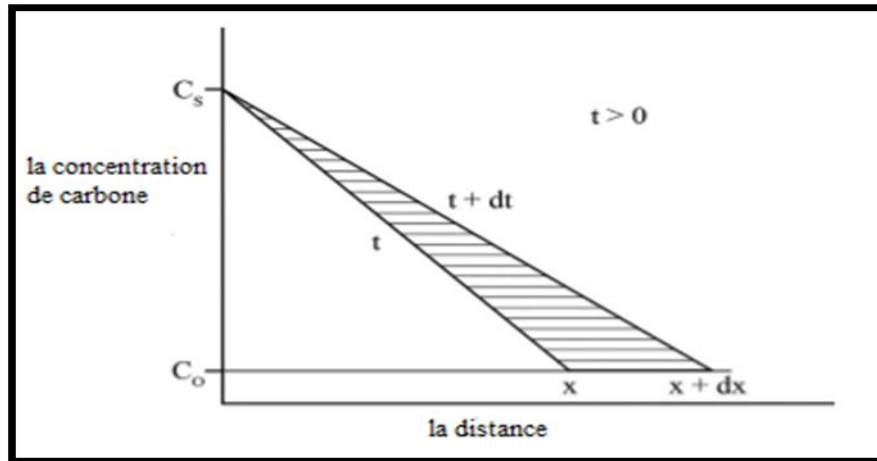


Figure II.1. Variation de la concentration de carbone avec la distance [6].

#### II.4. Profondeur de cémentation

Une couche traitée est caractérisée par son profil de micro dureté, mesuré sur l'échelle Vickers ou Knoop. Il permet de mesurer l'épaisseur efficace de la couche, appelée profondeur conventionnelle de cémentation. Elle est définie par la distance à la surface du point pour lequel la dureté a une valeur égale à 550 HV, (Figure II.2) [7].

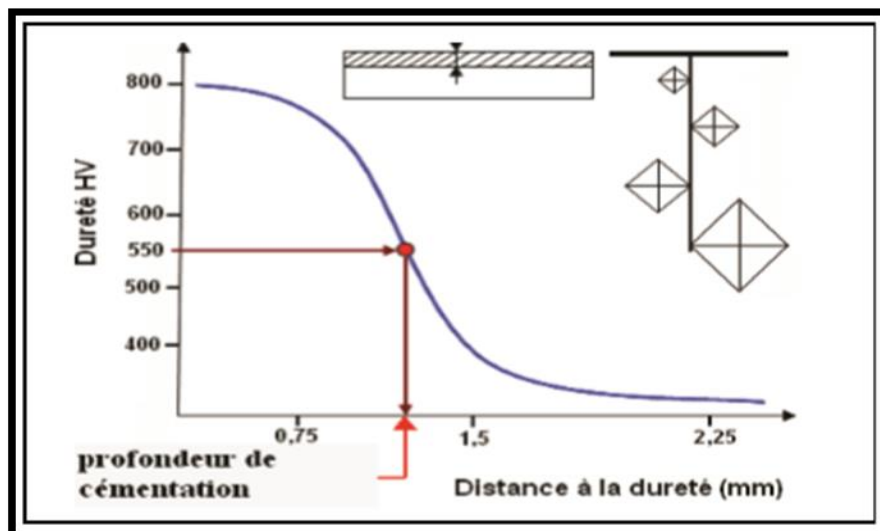


Figure II.2. Profondeur conventionnelle de cémentation [7].

La profondeur de la couche cémentée et la rapidité de l'opération sont fonction des trois paramètres suivants :

- ✓ Le pouvoir cémentant du ciment caractérisé par son potentiel carbone.
- ✓ La cinétique de réaction gaz-métal.
- ✓ La diffusion du C dans l'acier [8].

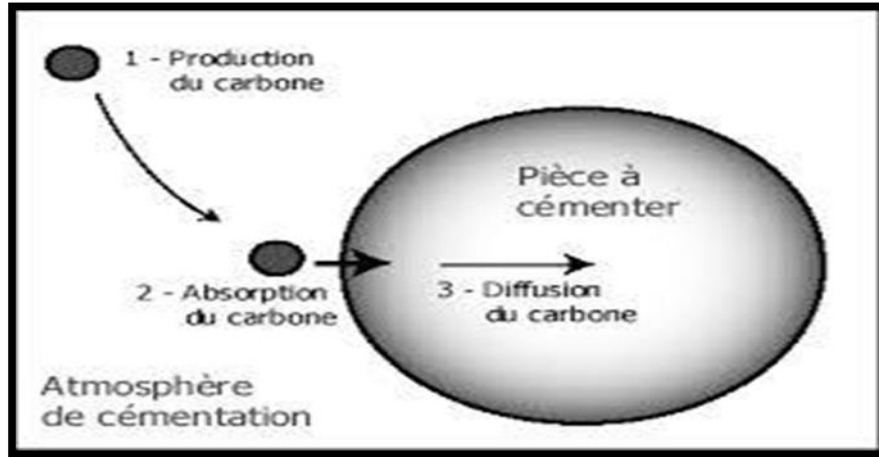


Figure II.3. Phases de cémentation [8].

## II.5. Techniques de cémentation

Les agents de carburation peuvent être solides, liquide ou gazeux.

### II.5.1. Cémentation solide (en caisse)

L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, le plus souvent le charbon de bois. Pour accélérer la cémentation, on ajoute au charbon comme activant 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 :



Directement à partir du ciment qui est considéré comme source de carbone. L'addition du carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone :



### II.5.2. 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.

#### II .5.2.1. Chimie des bains

Au contact de l'air le cyanure de sodium s'oxyde en formant du cyanate  $\text{Na CNO}$  ( $\text{Na}^+ \text{CNO}^-$ ) :



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.



Le dioxyde de carbone formé est immédiatement réduit en oxyde de carbone par le cyanure, avec transformation en cyanate qui est de fait le véritable agent actif du bain :



Le carbonate produit dans la réaction (4) est stable à la température d'emploi du bain, c'est un produit de fin de réaction dans lequel se décomposera tout le cyanure.

Une partie du (CO) formé lors de la réaction (4) vient brûler en surface et ne conduit pas à la réaction (5) de cémentation.

Si le bain est insuffisamment aéré, le cyanure se décompose en cyanamide avec Formation de carbone.



Cette réaction exclut la diffusion d'azote, elle devrait être recherchée si on cherche privilégier la cémentation par rapport à la carbonituration. Toutefois, elle est plus rapide que la réaction d'absorption et diffusion du carbone par l'acier et conduit à un épaissement du bain et à la formation d'une croûte importante en surface due aux remontées de carbone.

Lors de la sortie des pièces du bain, les particules de carbone se collent sur leur Surface, gênent la trempe et sont souvent la cause de plages douces.

Pour éviter ces inconvénients, on emploie des diluants et des activateurs. Les Diluants n'interviennent pas sur la réaction de carburation, ils agissent seulement sur la température de fusion et sur la viscosité du bain. Ce sont des chlorures alcalins ( $\text{Na Cl}$ ,  $\text{K Cl}$ ). Les activateurs ont pour effet de favoriser et contrôler la réaction de décomposition du cyanure

en cyanamide (réaction 7). C'est le plus souvent du chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) additionné d'un peu de chlorure de strontium ( $\text{SrCl}_2$ ). Le baryum complexe la radicale cyanamide et la réaction devient [9] :



### II .5.3. Cémentation gazeuse

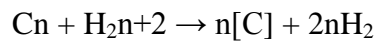
La cémentation gazeuse est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par installation et décomposition à chaud (combustion) d'hydrocarbures, ces atmosphères sont caractérisées par leurs potentiels de carbone. Le potentiel carbone est défini comme étant la teneur 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'affinité 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 libre 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 martensite qui auront pour effet d'abaisser notablement la résistance à la fatigue. La formation des oxydes internes est un phénomène typique dans la cémentation gazeuse la quantité des oxydes internes formés et leurs profondeurs dépendent des conditions de la cémentation.

(Température, temps.), plus la profondeur de la couche cémentée est grande, plus la profondeur des oxydes internes est importante. Les oxydes peuvent être formés soit au niveau des joints de grains soit à l'intérieure des grains. Ceci peut influencer sur la résistance à la fatigue des outils [9].

### II.5.4. 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 selon l'expression :



Par rapport aux autres techniques de cémentation, la cémentation par plasma présente les avantages suivants [9]:

- ✓ 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 ;
- ✓ Plus basse consommation de gaz et d'énergie ;
- ✓ 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.

## II.6. Rôle des éléments d'alliage sur la cémentation

Les éléments d'alliage sont présents dans les aciers de cémentation pour améliorer leur aptitude à subir la transformation martensitique (trempabilité). Plus l'acier est trempant et moins il est nécessaire de refroidir énergiquement une pièce pour obtenir la transformation martensitique, tous les éléments d'alliage, à l'exception du cobalt, augmentent la trempabilité mais dans des proportions variables, ainsi le chrome, le manganèse et le molybdène qui interviennent dans les aciers de cémentation apportent une forte augmentation de trempabilité [10].

### II.6.1. Carbone

Les éléments d'alliage ont un rôle prépondérant dans le traitement d'austénitisation. La germination de l'austénite est instantanée dans le cas des aciers au carbone mais la présence de certains éléments d'alliage peut ralentir la croissance gouvernée essentiellement par la diffusion, du fait de leur faible diffusivité [11],

### II.6.2. Autres éléments d'alliages

Généralement, les nuances d'aciers traitées (Tableau 2) contiennent des éléments d'alliage (Tableau 3) qui influent fortement sur les propriétés de la pièce en intervenant sur:

- Les teneurs en carbone et en azote admissibles.
- La trempabilité (qui conditionne les propriétés de résistance mécanique).
- La cinétique de diffusion du carbone et de l'azote (et donc l'épaisseur et la microstructure de la couche traitée).

Les éléments d'alliage carburigènes et nitrogènes agissent sur la position de  $A_{cm}^*$  et favorisent ainsi le piégeage du carbone et de l'azote. Dès que la teneur en carbone franchit cette ligne  $A_{cm}^*$ , deux types de carbures peuvent faire leur apparition dans la couche enrichie:

- Des carbures secondaires de type  $M_{23}C_6$  (par exemple  $Cr_{23}C_6$ ) ou de type  $M_7C_3$  qui sont principalement localisés dans les joints de grains de la matrice austénitique.
- Des carbures primaires de type  $MC$  fréquemment répartis de manière plus homogène dans l'ensemble du matériau.

La formation de ces carbures est à éviter la plupart du temps car elle favorise les phénomènes de ségrégation. Par exemple, dans le cas spécifique de la cémentation d'aciers inoxydables, il est nécessaire de conserver une teneur en chrome identique dans toute la matrice afin de garder les propriétés de résistance à la corrosion [12].

**Tableau II.1.** Effet des éléments d'alliage classés du plus au moins carburigènes [13.14].

Elément	Caractéristique
V	Forme de carbures et carbonitrides primaires de type $Mc$ dont la solubilité est faible. Améliore la trempabilité et génère un durcissement secondaire.
MO	Est un élément alpha gène très carburigènes. Il augmente la trempabilité de l'acier contribue au durcissement par solution solide.
W	A une tendance à générer un durcissement secondaire et à forme des carbures primaires du type $Mc$ qui permettent de diminuer la tendance au grossissement de grain par sur chauffe. Il améliore la trempabilité de l'acier.
Cr	Est un élément alpha gène qui joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la trempabilité de l'acier. Il forme des carbures de type $M_{23}C_6$ et $M_7C_3$ qui s'opposent au grossissement de grain lors de l'austénitisation et participent à la résistance à l'usure.
Mn	Est un élément gamma gène carburigènes qui s'insère dans les carbures du type $M_7C_3$

### II.7. Traitements thermiques après cémentation

Pour donner aux pièces leurs propriétés finales, on les soumet après cémentation à des traitements thermiques dont le but est :

- De corriger la structure et d'affiner le grain au cœur et dans la couche cémentée.
- D'obtenir une dureté élevée de la couche cémentée et de bonnes propriétés mécaniques de cœur.
- D'éliminer le réseau de carbure dans la couche cémentée, qui peut apparaître par suite de la sursaturation en C [15].

Le traitement thermique conduit dans la couche cémentée à une structure composée de martensite d'une certaine quantité d'austénite résiduelle et des carbures. L'opération terminale des pièces ayant subi la cémentation est un revenu à basse température à 160 ou 180 °C, qui transforme la martensite de trempe de la couche superficielle en martensite de revenu assurant ainsi un adoucissement.

Dans le cas d'une trempe d'aciers fortement alliés, la structure de la couche cémentée garde en quantité) jusqu'à 10%( de l'austénite résiduelle qui altère la propriété de dureté. Après trempe, ces aciers sont traités à froid contribuant à la transformation de la plus grande partie de cette austénite en martensite.

La quantité d'austénite résiduelle peut être diminuée en réduisant la quantité de carbone dans la couche ou en ajoutant dans le four, avant l'achèvement du processus, de l'ammoniac pour former des nitrures des éléments d'alliages.

La cémentation suivie d'un traitement thermique élève la limite de fatigue des pièces par suite de la formation dans la couche cémentée de contrainte de compression résiduelles importantes. La limite à la fatigue peut être encore élevée par écrouissage réalisé par grenailage [16].

### II.8. Traitements préparatoires de surface traitée

Ce sont des traitements de conditionnement d'une surface industrielle par une succession d'opérations appropriées afin de la rendre apte à recevoir et maintenir un traitement ultérieur. Alors, l'objectif de ces types de traitements est rendre la surface apte à recevoir

des traitements de surface et de revêtement, en éliminant toutes les souillures en surface du matériau (les graisses, les huiles, les oxydes superficiels...). En général, les processus de traitement préparatoire de surface sont chimiques, électrolytiques et mécaniques [17].

## II.9. Etapes de la cémentation

### II.9.1. Etapes d'enrichissement de carbone

On crée une couche superficielle plus ou moins enrichie en carbone (0.1 à 0.2% au départ avec des teneurs finale de 0.7 à 1.2 % de carbone en général.

Deux phénomènes interviennent

- Une réaction chimique qui fournit du carbone à la surface de la pièce.
- Un processus de diffusion dans la zone superficielle, de la surface vers l'intérieur.

Le carbone étant bien plus soluble en phase austénitique qu'en phase ferritique, de plus la diffusion étant facilité par la température, le traitement à lieu vers 900 à 950 °C avec des temps maintien de plusieurs heures.

Une température plus élevée risquerait de provoquer un grossissement des grains d'austénite [18].

### II.9.2. Trempe au cours de cémentation

Le rôle d'une trempe est généralement à l'inverse des recuits et pour permettre d'obtenir des structures hors d'équilibre dans les conditions où on les rencontre, à l'échelle aussi bien cristalline que micrographique.

Le refroidissement doit être suffisamment rapide afin d'éviter la transformation de l'austénite en ferrite, perlite et bainite et d'obtenir plutôt une transformation martensitique [19].

Lors de la trempe, le cœur des outils (pièces) subit des vitesses de refroidissement plus lentes que celles de la surface. Ces vitesses sont assez lentes pour produire la structure non martensitique (perlite et bainite) au centre des pièces [20].

Le diagramme TRC de l'acier permet de définir, pour la procédure d'austénitisation correspondante, les conditions de refroidissement qui provoquent la transformation de l'austénite en martensite (ou éventuellement en martensite + bainite) [21].

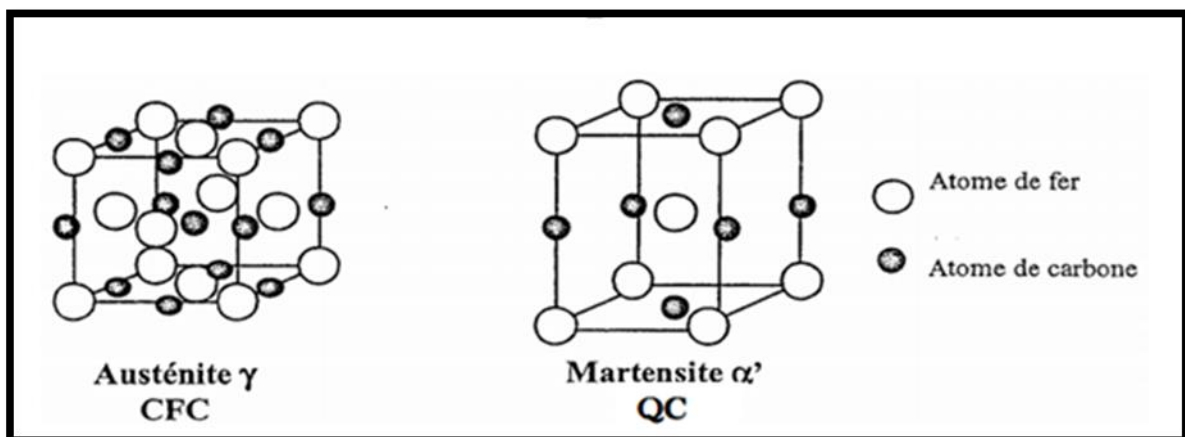
La formation des carbures MC et/ou  $M_7C_3$  au cours de la trempe peut jouer un rôle très important dans l'amélioration de la résistance à l'usure en augmentant la dureté de la surface, cependant les carbures de type  $M_{23}C_6$  sont moins résistants et tendent à diminuer la résistance au fluage des aciers à outils [22].

Le milieu de trempe peut être plus ou moins agité (brassage) ou projeté (refroidissement par aspersion). Le refroidissement en chaque point d'un volume d'acier dépend :

- Des propriétés thermiques du métal.
- De la géométrie de la pièce (forme, dimensions, etc.).
- De la position du point considéré dans la section de la pièce.
- Des propriétés thermiques du milieu de trempe et de certaines de ses propriétés physiques (viscosité notamment).
- De la température du milieu de trempe [23].

### II.9.3. Structure obtenue après trempe

Après refroidissement direct, les surfaces adjacentes sont constituées de martensite aciculaire et d'austénite résiduelle. La taille des plaquettes de martensite dépend de la taille des granules d'austénite initiaux. La double trempe permet d'obtenir des structures très précises et homogènes. Lorsque les distances sont augmentées vers l'intérieur, la teneur en carbone diminue et le volume d'une partie de l'austénite résiduelle diminue au profit de la martensite [24].



**Figure II.4.** Structures cristallines de l'austénite  $\gamma$  et de la martensite  $\alpha'$  dans les aciers [25].

#### II.9.3.1. Martensite

Est une solution solide d'insertion sursaturée en carbone dans le fer  $\alpha$  (ferrite), de même composition que l'austénite initiale. La transformation austénite - martensite consiste en une modification du réseau cristallin (avec un faible déplacement des atomes de fer), sans qu'il y ait de diffusion des atomes de carbone. Avec un refroidissement lent, le carbone se déplace. Avec un refroidissement rapide, il se fige dans la structure [26].

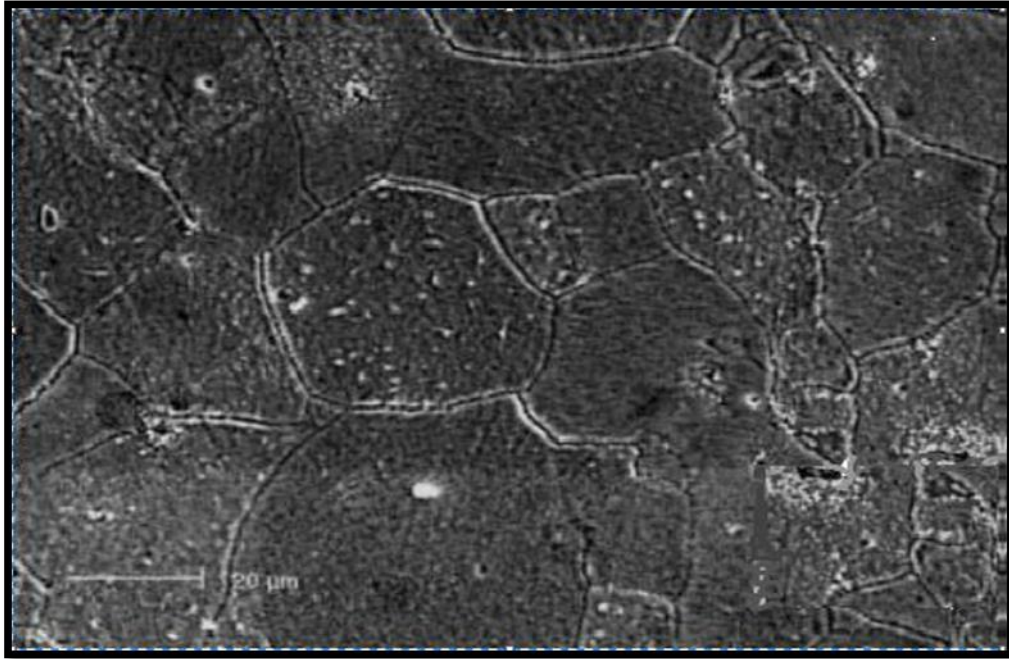


**Figure II.5.** Micrographie de la martensite [27].

### II.9.3.2. Austénite résiduelle

Au cours de la stabilisation, avec une augmentation de la profondeur de la couche superficielle durcie, la teneur en austénite résiduelle augmente également, ce qui entraîne une augmentation de la teneur en carbone et, pour la même raison, une précipitation de carbures et une oxydation interne peuvent se développer [27]. L'austénite résiduelle est un composant de faible dureté inférieure à 320 HV, inadapté à la dureté mais présentant une bonne résistance à la fatigue par flexion [28]. L'austénite, ou fer gamma, avec une structure cubique à faces centrées, est la composante constante de Fer pur entre 910°C et 1450°C. Ce contraste permet une forte solubilité dans le carbone (jusqu'à 2,1 % en masse à 1147 °C) [29].

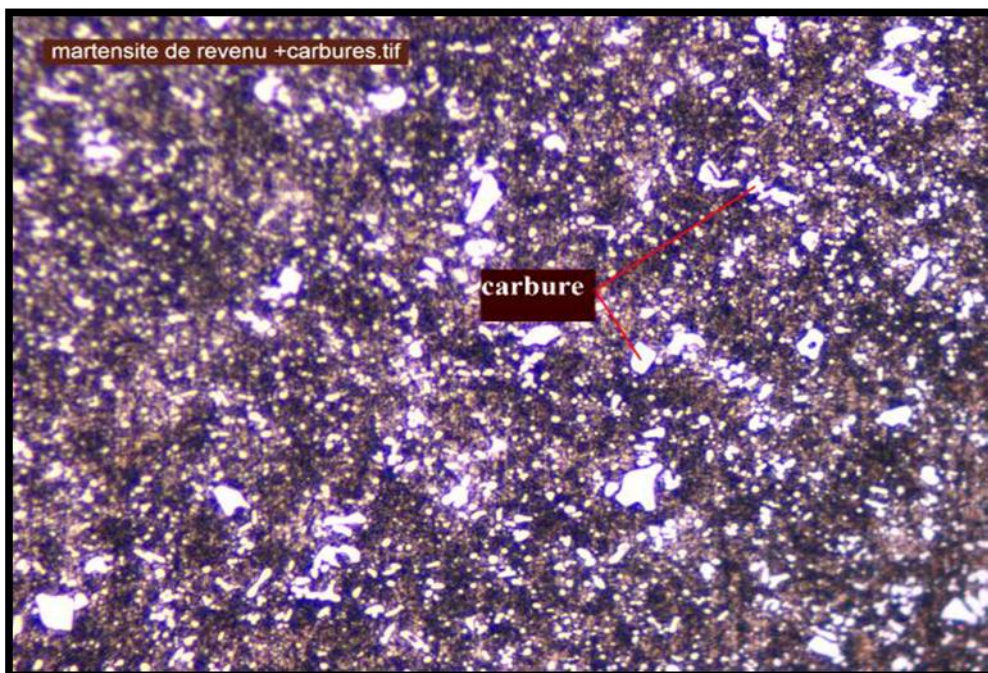
A des températures plus élevées, c'est un composant des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés où le carbone dans une solution solide est dans une plage de température dont la plage dépend des teneurs des éléments d'addition. Les éléments gamma gènes (Ni, Mn...) élargissent le champ de stabilité de l'austénite, tandis que d'autres éléments (Si, Al, Mo...), appelés alpha gènes, le rétrécissent. Il existe également un certain nombre d'aciers fortement alliés dont la structure austénitique reste stable ou stable jusqu'à et en dessous de la température ambiante, en particulier les aciers inoxydables dérivés de Fe-18Cr-8Ni [30].



**Figure II.6.** Micrographie de l'austénite [31].

### II.9.3.3. Cémentite

La cémentite est constituée de molécules composées d'un atome de fer et de deux atomes de carbone, trois atomes de fer pour un atome de carbone,  $Fe_3C$ . Il contient 6,67 % de carbone (en masse). La cémentite ne forme pas de grain à l'échelle macroscopique, et on la retrouve sous diverses formes : fines aiguilles, plaquettes, dans les bordures de grains d'acier hyperdermique, etc. [32].



**Figure II.7.** La micrographie de la cémentite [33].

#### II.9.4. Revenu au cours de cémentation

L'acier trempé est dur, mais il est généralement trop cassant pour être utilisé directement. La trempe consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de basculement, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, et parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles de la trempe et d'augmenter la durabilité. Malheureusement, l'augmentation de la ténacité est toujours obtenue sous une forme ou une autre au détriment de la rigidité et de la limite élastique. Des contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors du refroidissement, la dilatation thermique provoque des contraintes au-delà de la limite d'écoulement plastique et parfois même de la résistance à la traction (fissures de refroidissement) [34].

#### II.9.5. Effet du revenu

L'effet de substitution de même que l'effet de revenu, en économie résulte de l'arbitrage d'un agent économique (ménages, entreprises, administrations et Reste du Monde) selon son coût

D'opportunité entre deux situations. L'effet de revenu signifie qu'une baisse du pouvoir d'achat se traduit, toutes choses égales par ailleurs, par une diminution des quantités demandées de chaque bien. L'effet de substitution est évoqué lorsqu'un bien devient plus cher relativement à un autre, la demande baisse pour le premier et se répercute sur le second. Ces deux constats microéconomiques illustrent bien un changement de comportements pour les acteurs économiques étant donné qu'ils impactent la loi de l'offre et la demande. Nous expliquerons comment l'effet de revenu et l'effet de substitution traduisent-ils d'un changement de comportement des acteurs économiques puis nous aborderons les conséquences de ce changement comportemental [35].

#### II.10. Propriétés des pièces cémentées

Les propriétés de surface conditionnent la tenue des pièces en frottement (usure et fatigue). On cherche généralement à réaliser des couches superficielles de propriétés particulières (notamment de dureté élevée) s'appuyant sur un cœur peu fragile (donc moins dur) donnant à la pièce, dans son ensemble, une combinaison exceptionnelle de propriétés (résistance au frottement, à l'usure, à la fatigue et ténacité). On rencontrera donc très souvent, la macrostructure suivante :

- Une couche superficielle présentant, en général, une dureté élevée ( $\approx 700$  HV ou plus) et des contraintes résiduelles de compression importantes (plusieurs centaines de MPA) ; l'épaisseur de cette couche peut varier de 0,1 à plusieurs millimètres ;
- Un cœur constituant la partie restante de la pièce, de dureté beaucoup plus faible (inférieure en général à 400 HV).

La formation de carbure est favorisée par la température de revenu à  $200^\circ\text{C}$ . Il a été rapporté que l'acier cémenté et revenu à cette température acquiert des propriétés mécaniques excellentes [36]. En contrepartie selon Christiansen et al.[37], la décomposition de l'austénite qui a permis la précipitation des carbures de chrome se traduira, par conséquent, à la rétraction du chrome de la solution solide; ainsi, les propriétés favorables de la résistance à la corrosion de l'acier seront affectées.

### II.10.1. Usure

L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces. En réalité ces mécanismes, dits d'usure, sont des mécanismes de transformations tribologiques de surface avec ou sans détachement de particules ; et l'usure, au sens de la mécanique, se traduit par l'émission de débris hors du contact dans le respect de la conservation des débits [38].

### II.10.2. Fatigue

La microstructure optimale doit présenter :

- ✓ Des teneurs en austénite résiduelle inférieures à 25-30 % ; on constate un abaissement de la limite de fatigue de 10 % par tranche de 30 % d'austénite ;
- ✓ Des épaisseurs d'oxydation interne (perlite et bain ite) inférieures à  $6 \div 10 \mu\text{m}$ ; ce constituant très nuisible peut, pour des épaisseurs de  $30 \mu\text{m}$ , faire chuter la limite de fatigue de 45 % ;
- ✓ Une absence de carbures en réseaux alors que l'on peut tolérer ce constituant s'il est réparti dans la structure et en nodules. Pour les paramètres de la macrostructure, on notera qu'un optimum semble se dégager pour :
  - Des résistances à cœur en sous-couche comprises dans le domaine 1080-1240 MPa.
- ✓ Un rapport épaisseur cémentée/épaisseur pièce de 7 % environ, valeur établie pour des pièces ou partie de pièces (dent d'engrenage par exemple) d'épaisseur

inférieure à 12-15 mm V.F. da Silva et al [39] affirment que la présence de l'austénite résiduelle dans la couche cémentée augmente sa résistance à la fatigue.

### **II.10.3. Fatigue superficielle**

La microstructure superficielle influe peu sur cette caractéristique et la quantité d'austénite résiduelle peut être tolérée jusqu'à des valeurs élevées (environ 50 %), les autres constituants étant sans influence notable. On préconise généralement la réalisation d'une épaisseur de traitement double de la profondeur du cisaillement maximal dû aux contraintes d'Hertz. Il semble en outre qu'une résistance à cœur comprise entre 850 et 1150 N/mm<sup>2</sup> soit légèrement favorable [40]. D. Jeudi [41], affirme que la meilleure résistance à la fatigue est atteinte quand une transformation homogène de l'austénite résiduelle se produit dans la couche traitée pendant le chargement cyclique. En générale, c'est la couche cémentée durcie qui résiste à l'usure ; de ce fait, il sera nécessaire que l'épaisseur de traitement soit supérieure à l'épaisseur d'usure que l'on tolère sur la pièce, car le cœur sera peu résistant. En ce qui concerne la constitution de la couche cémentée, on notera que la décarburation et l'oxydation interne ont une action défavorable sur la résistance à l'usure. Par contre, les carbures sont bénéfiques ; le rôle de l'austénite dépend de son instabilité, il est donc difficile à apprécier dans la pratique courante [40].

L'amélioration de la résistance à l'usure peut être due à la présence d'une grande quantité d'austénite résiduelle pour les temps de maintiens courts. En outre, cet état est renforcé par l'effet de durcissement de l'austénite résiduelle lors de l'essai d'abrasion où la contrainte induite peut transformer l'austénite résiduelle en martensite, ce qui est en plein accord avec la littérature [39].

### **II.11. Les défauts de cémentation**

Même si les déformations peuvent être, à juste titre, considérées comme des défauts de cémentation, la distinction est faite ici entre elles et les défauts ou anomalies que peuvent présenter les pièces traitées : points doux, présence de carbures, etc.

Comme une opération de traitement thermochimique fait intervenir en réalité beaucoup de séquences (stockage, manutention, lavage, traitement thermochimique, éventuelle reprise d'usinage, éventuelle reprise en traitement, grenailage, revenu, parachèvement, etc.). Chacune d'elle peut être la source d'une anomalie qui se répercutera sur le produit final et sur sa qualité. Par souci de concision et de clarté, regroupe un certain nombre d'anomalies significatives, leurs principales causes et leurs principales conséquences [42].

La correction des anomalies de traitement suppose [42] :

- Des controls atelier :
  - Aspect visuel à l'état tel et après grenailage, qui permet de soupçonner certains cas de points doux,
  - Mesures de dureté superficielle par prélèvement, la charge sous laquelle se font ces mesures de dureté dépendant de l'épaisseur de la couche visée,
  - Mesures de dureté en sous-couche après meulage,
  - Contrôles par moyens non destructifs (courants de Foucault, ondes de surface, etc.) qui permettent de faire du contrôle à 100 % et discriminent les pièces mauvaises,
  - Mesures de déformations,
  - Aspect visuel des pièces après usinage pour éliminer les criques de rectification ;
  
- Des controls de laboratories :
  - Examens métallographiques de la qualité des couches,
  - Filiations de micro dureté sur coupes,
  - Analyses chimiques pour déterminer les teneurs en carbone et/ou azote superficielles, éventuellement le gradient en profondeur (méthode du clinquant, dosage de copeaux, etc.) [42].

## II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le but et le principe de cémentation en précisant l'évolution de cette technique et ses différentes classes. En outre, nous concluons que la couche superficielle d'un acier ( $C < 0.30\%$ ) est enrichie en carbone suivi d'une trempe et revenu pour avoir un durcissement superficielle d'une profondeur bien limitée. L'avantage de ce procédé réside dans la simplicité de maîtriser les étapes et les cycles de traitement...

## Références

- [1] L. Beck, Die Geschichte des Eisens in technischer und Kultur geschichtlicher Beziehung (Brunswick, 5 vol., 1884-1903). V. vol. I,p. 834 836
- [2] A. Rakhit, K. Heat treatment of gears: a practical guide for engineers. ASM international. (2000)
- [3] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-traitement-des-metaux-tiamd/archive-1/cementation-carbonitruration-m1226/>
- [4] M.M.Bchaupinil, L. Serapilir, R.Triwt : ‘Analogies Et Différence Entre Les Traitements De Carbonitruration Et De Cémentation’, Aciers Spéciaux №13, 1975.
- [5] T. Rajan, V., Sharma, C. P., & Sharma, A. Heat treatment: principles and techniques. PHI Learning Pvt. Ltd. (2011).
- [6] B. Ray, C., Prusty, R. K., & Nayak, D. Phase Transformations and Heat Treatments of Steels. CRC Press. (2020).
- [7] Transition Materials Carbides United Kingdom Edition published by ACADEMIC PRESSINC. (LONDON) LTD
- [8] G. Noussaiba, Fatma, B. Comportements mécaniques Des aciers faiblement alliés avant et après cémentation (Thèse de master). (2016).
- [9] Mémoire AZOUZ AHMED / [Effet De La Nature De L’acier Sur Un Traitement De Cémentation] / Master / Génie Mécanique/ Option : Productique/ Université De M’sila/2015 / 2016.
- [10] GUY (A.G.), HREN (J.J.) Elements Of Physical Metallurgy 3 » Ed. (1974). Addison Wesley Series in Metallurgy and Materials, M. COHEN Ed., P484.
- [11] D.V. Shtansky, K. Nakai Et I. Ohmori, Pearlite To Austenite Transformation In An Fe<sub>2.6</sub>Cr-1C Alloy, Acta Mater, 47, N°9, 2619-2632 (1999)
- [12] T. Turpin, J Dulcy, M Gantois, J Frey ,D Hertz. Précipitation Des Carbures Au Cours De La Cémentation En Phase Gazeuse D’aciers Inoxydables : Approche Thermodynamique, Cinétique Et Structurale. Matériaux 2002, Tours 21-25 Octobre 2002.
- [13] R.L’évêque. Aciers A Outils – Composition Chimique Et Structure, M4585. Techniques De l’Ingénieur 10.6.2003.
- [14] M .Durand-Charre. La Microstructure Des Aciers Et Des Fontes: Genèse Et Interprétation. Sirpe; 2003
- [15] G. KRAUSS, Microstructure and properties of carburized steel', in: Metals handbook. Heat treating, vol. 4. Materials Park, OH: ASM International; 1991. p. 363–75.

- [16] P. MICHAUD, Compréhension du rôle des éléments carburigènes dans la performance de nuances d'aciers destinées aux outillages pour l'injection d'alliages légers, aciers spéciaux N°35,1986.
- [17] C. Pigent, C. Pelouin, Etat de la technique dans l'industrie du traitement de surface dans le bassin Rhin-Meuse, Synthèse bibliographique, Agence de l'Eau Rhin Meuse(1990) 47p
- [18] T. Christiansen and M.A.J. Somers: *Revue de Matérialographie* Struers, 2006, 9, 1-17.
- [19] A. ESFAHANI, M.H. SOHI, J. RASSIZADEHGHANI, AND F.MAHBOUBI, '*Effect of treating atmosphere in plasma post-oxidation of nitrocarburized AISI 5115 steel*'; *Vacuum*, 82:346–351, 2007.
- [20] F. BORGIOLO, E. GALVANETTO, A. FOSSATI, T. BACCI: '*Glow-dischargenitriding and post-oxidizing treatments of AISI H11 steel*', *surf. Coat. Tech* 162(2002)61-66.
- [21] P. PSYLLAKI, K. PAPADIMITRIOU: '*Failure Modes of Liquid Nitrocarburized and Heat treated Tool Steel under Monotonic Loading Conditions*', *JFAPBC* (2006)6:13-18.
- [22] M.GODET, L.VINCENT: '*Propriétés tribologiques – Frottement – Usure*', *Pratique des Matériaux Industriels* ; Chapitre 2.2.4, 1990
- [23] A.VERLEENE, L.DUBAR, P. RAVASSARD et J. OUDIN, *méthodologie d'étude De la dégradation des outillages de frappes à froid* ; p 4, matériaux et technique N°1.2, 1999.
- [24] H.HOUMID BENNANI, *Contribution à l'étude de l'adhérence et des caractéristiques mécaniques et tribologiques de quelques couches minces dures* ; U.F.R. des Sciences et Technologies de l'université de Franche Comté, 1998.
- [25] R. GUIHEUX : Comportement d'aciers à transformation de phase austénite-martensite pour la simulation du grenailage de précontrainte », l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2016.
- [26] G. E. Totten, K. Fontana and L. Xian: '*Handbook of Metallurgical Process Design*'; 2004, Chap. 13, pp.507-544.
- [27] SAHRAOUI NABIL, KORICHE ABDELGHANI: *Memoir de fin d'étude de master, « Etude d'élaboration et characterization des composes métallique revêtant les acier », universities de Msila, 2017.*
- [28] K.H. LEE, K.S. NAM, P.W. SHIN, D.Y. LEE, AND Y. SONG, '*Effect of post oxidizing time on corrosion properties of plasma nitrocarburized AISI 1020 steel*'; *Mater Let*, 57:2060–2065, 2003.
- [29] V.F. da Silva, L.F. Canale, D. Spinelli, W.W. Bose-Filho, and O.R. Crnkovic ; *Influence of Retained Austenite on Short Fatigue Crack Growth and Wear Resistance of Case Carburized Steel*; *Materials Engineering and Performance*; JMEPEG (1999) 8:543-548.

- [30] D. Jeddi, H. Sidhom, D. Ghiglione, and H. Lieurade, 'Role of the Cyclic Stability of Retained Austenite in Fatigue Performance of Carburized 14NiCr11 Steel', *Materials Engineering and Performance*, Volume 14(1), JMEPEG (2005) 14:37-49.
- [31] G. KRAUSS, *Microstructure and properties of carburized steel*, In: *Metals handbook. Heat treating*, vol. 4. Materials Park, OH: ASM International; 1991. p. 363–75.
- [32] J. W. CHRISTIAN: « Rapids Solidification, The theory of Transformations in Metals and Alloys », p(1088) , 2002.
- [33] Sitewib  
[Http://Tsaucray.Free.Fr/1%20metallurgie/17%20traitement%20thermiques/F31.Htm](http://Tsaucray.Free.Fr/1%20metallurgie/17%20traitement%20thermiques/F31.Htm)
- [34] ECMK : « laboratoire de physique-chimie » 2019.
- [35] M. Colombie: « Matériaux Industriels, Matériaux Métallique », DUNOD, Paris 2000.
- [36] L.Colombier: « Les Aciers A Outils Et Leur Traitement Thermique », PYCEDITION, Paris 1971.
- [37] L. Schlidt: « Tool Materials For Molds And Dies », Colorado School Of Mines Press, 118-64, 1987.
- [38] R. L'évêque: « Traitements Thermiques Dans La Masse Des Aciers A Outils », *Technique De L'ingénieur*, M1134, 2013.
- [39] R. L'évêque: « Les Aciers A Outils », *Technique De L'ingénieur*, M330A, 1979.
- [40] [Http://Webcache.Googleusercontent.Com/Search?Q=Cache:Tsesagkdo0mj:Www.Comiteperform.Ca/IMG/Pdf/Guide\\_Hors\\_Production\\_Operateur\\_Traitement\\_Thermique.Pdf +&Cd=6&HI=Fr&Ct=Clnk&GI=Dz#26](http://Webcache.Googleusercontent.Com/Search?Q=Cache:Tsesagkdo0mj:Www.Comiteperform.Ca/IMG/Pdf/Guide_Hors_Production_Operateur_Traitement_Thermique.Pdf+%&Cd=6&HI=Fr&Ct=Clnk&GI=Dz#26)
- [41] D. OUARDA, BOUHBIB A. RAHIM : Mémoire De Fin D'étude De Master « Effet Des Traitements Thermiques Sur Les Propriétés Des Fils De Cuivre Tréfilés A L'enicab-Biskra », 2016, P(50).
- [42] <https://Www.Etudier.Com/Dissertations/Effet-De-Revenu-Et-Effet-De/51057872.Html>.

**Chapitre III**  
**Etude**  
**expérimentale de**  
**Trempabilité en**  
**bout-Cémentation**

## Chapitre III : Etude expérimentale de Trempabilité en bout- Cémentation

<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>56</b>
<b>III.2. Acier étudié (30CrMnTi) .....</b>	<b>56</b>
<b>III.3. Usinage des éprouvettes de trempabilité en bout (Jominy).....</b>	<b>57</b>
<b>III.4. Principe de trempabilité en bout et de cémentation.....</b>	<b>58</b>
<b>III.5. Enrobage .....</b>	<b>59</b>
<b>III.6. Polissage mécanique.....</b>	<b>61</b>
<b>III.7. Attaque chimique .....</b>	<b>62</b>
<b>III.8. Cristallographie des éprouvettes E<sub>1</sub> et E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub> .....</b>	<b>63</b>
III.8.1. Microstructure de l'éprouvette E <sub>1</sub> .....	64
III.8.2. Microstructure de la zone 1 des éprouvettes E <sub>2</sub> et E <sub>3</sub> .....	65
III.8.3. Microstructure de la zone 2 des éprouvettes E <sub>2</sub> et E <sub>3</sub> .....	66
III.8.4. Microstructure de la zone 3 des éprouvettes E <sub>2</sub> et E <sub>3</sub> .....	67
III. 8.5. Microstructure de la zone 4 des éprouvettes E <sub>2</sub> et E <sub>3</sub> .....	68
III.8.6. Microstructure de la zone 5 des éprouvettes E <sub>2</sub> et E <sub>3</sub> .....	69
<b>III.9. Dureté .....</b>	<b>70</b>
III.9.1. Essai de dureté Vickers .....	70
III.9.2. Résultats obtenus de la dureté des éprouvettes E <sub>1</sub> et E <sub>2</sub> et E <sub>3</sub> .....	71
III.9.2.1. La dureté de l'éprouvette E <sub>1</sub> .....	71
III.9.2.2. La dureté de l'éprouvette E <sub>2</sub> .....	72
III.9.2.3. La dureté de l'éprouvette E <sub>3</sub> .....	73
<b>III.10. Conclusion .....</b>	<b>73</b>

### Liste des figures

<b>Figure III.1.</b> Spectromètre d'étincelage.....	<b>56</b>
<b>Figure III.2.</b> Machine de tournage.....	<b>57</b>
<b>Figure III.3.</b> Dessin et dimensions de l'éprouvette de trempabilité en bout (Jominy).....	<b>57</b>
<b>Figure III.4.</b> Four de Nabertherm pour austénitisation de l'acier 30CrMnTi.....	<b>58</b>
<b>Figure III.5.</b> Four de cémentation gazeuse.....	<b>59</b>
<b>Figure III.6.</b> Machine de trempabilité en bout (Jominy).....	<b>59</b>
<b>Figure III.7.</b> La forme du méplat longitudinal dans les éprouvettes E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> et E <sub>3</sub> .....	<b>60</b>
<b>Figure III.8.</b> Les différentes zones de trempabilité en bout (Jominy).....	<b>60</b>
<b>Figure III.9.</b> Tronçonneuse.....	<b>61</b>
<b>Figure III.10.</b> Papier abrasif.....	<b>61</b>
<b>Figure III.11.</b> Machine de plissage mécanique.....	<b>62</b>
<b>Figure III.12.</b> La solution d'attaque chimique.....	<b>63</b>
<b>Figure III.13.</b> Microscope optique Leila DMi8.....	<b>64</b>
<b>Figure III.14.</b> Microstructure de l'acier 30CrMnTi de l'éprouvette E <sub>1</sub> non traité (brut)....	<b>64</b>
<b>Figure III.15.</b> La microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E <sub>2</sub> .....	<b>65</b>
<b>Figure III.16.</b> La microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E <sub>3</sub> .....	<b>65</b>
<b>Figure III.17.</b> La microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E <sub>2</sub> .....	<b>66</b>
<b>Figure III.18.</b> La microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E <sub>3</sub> .....	<b>66</b>
<b>Figure III.19.</b> La microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E <sub>2</sub> .....	<b>67</b>
<b>Figure III.20.</b> La microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E <sub>3</sub> .....	<b>67</b>
<b>Figure III.21.</b> La microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E <sub>2</sub> .....	<b>68</b>

---

<b>Figure III.22.</b> La microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E <sub>3</sub> .....	<b>68</b>
<b>Figure III.23.</b> La microstructure de la zone 05 de l'éprouvette E <sub>2</sub> .....	<b>69</b>
<b>Figure III.24.</b> La microstructure de la zone 05 de l'éprouvette E <sub>3</sub> .....	<b>69</b>
<b>Figure III.25.</b> La machine de la dureté.....	<b>70</b>
<b>Figure III.26.</b> Principe et empreinte typique de l'essai de dureté Vickers .....	<b>71</b>
<b>Figure III.27.</b> Profil de la dureté Vickers (HV) en fonction de la distance de Jominy (mm) de l'éprouvette E <sub>1</sub> .....	<b>72</b>
<b>Figure III.28.</b> Profil de la dureté Vickers (HV) en fonction de la distance de Jominy (mm) de l'éprouvette E <sub>2</sub> .....	<b>72</b>
<b>Figure III.29.</b> Profil de la dureté Vickers (HV) en fonction de la distance de Jominy (mm) de l'éprouvette E <sub>3</sub> .....	<b>73</b>

**Liste des tableaux**

<b>Tableau III.1.</b> Composition chimique de l'acier 30CrMnTi (brut).....	<b>56</b>
--	-----------

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'effet de la vitesse de refroidissement sur la structure et la dureté de l'acier 30CrMnTi avant et après cémentation et trempabilité en bout en utilisant trois éprouvettes de Jominy  $E_1$  : laissée sans traitement pour utiliser comme référence,  $E_2$  : austénitisée à  $T=930^\circ\text{C}$  pendant 60 minutes puis refroidir en bout par un jet d'eau durant 10 minutes et  $E_3$  : cémentée durant 4 heures puis on l'a trempée en bout. Les résultats seront présentés et discutés étape par étape dans ce qui suit.

### III.2. Acier étudié (30CrMnTi)

Le 30CrMnTi est un acier de cémentation avec une faible teneur en carbone  $C=0.3\%$ , et une bonne trempabilité qui atteint une bonne résistance à l'usure grâce à une dureté de surface élevée après un traitement de durcissement. La moyenne de trois résultats obtenus par une spectrométrie d'étincelage présentés dans le tableau ci-dessous, montre que l'acier 30CrMnTi comporte des compositions chimiques de base généralement équilibrées pour lui conférer une modeste propriété mécanique.

L'élément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Quantité(%)	0.3	0.201	0.916	0.0130	0.0132	1.19	0.226	0.0493	0.0323

L'élément	Co	Cu	Ti	V	W	Fe
Quantité(%)	0.0152	0.0241	0.0744	0.0123	0.0342	Bal.

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier 30CrMnTi (brut).



Figure III.1. Spectromètre d'étincelage.

### III.3. Usinage des éprouvettes de trempabilité en bout (Jominy)

Nous découpons de stock trois cylindres en acier 30CrMnTi, que nous allons usiner près pour l'essai de Jominy. Les essais de trempabilité en bout (Jominy) ont été effectués sur la base de la norme ASTM A255, en utilisant une machine de tournage (Figure III.2) pour usiner les trois éprouvettes de Jominy E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub> en suivant les dimensions de la norme avec une longueur  $L=97\pm 0.5$  mm et d'un diamètre  $d=20\pm 0.1$  mm, avec une tête de fixation de diamètre  $d_t=25$  mm (voir la Figure III.3).



Figure III.2. Machine de tournage.

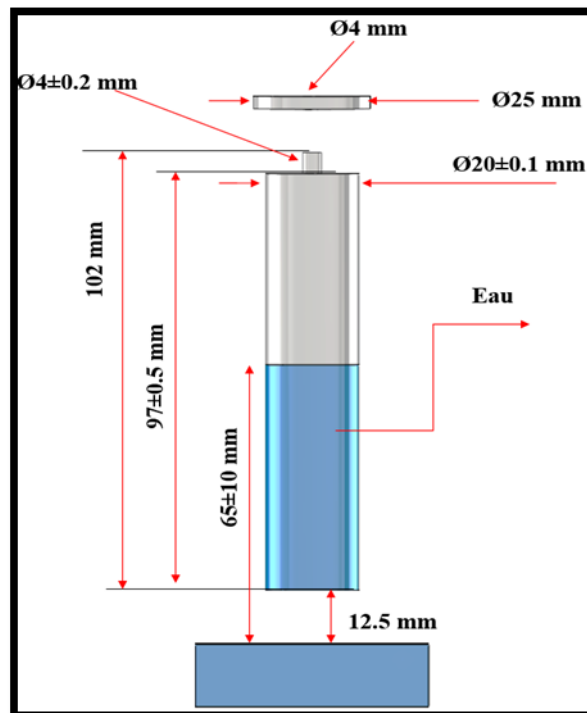


Figure III.3. Dessin et dimensions de l'éprouvette de trempabilité en bout (Jominy).

### III.4. Principe de trempabilité en bout et de cémentation

Dans cette étude et pour déterminer la trempabilité de l'acier 30CrMnTi avant et après cémentation, on utilise une technique commode qui est l'essai Jominy en suivant les étapes suivantes :

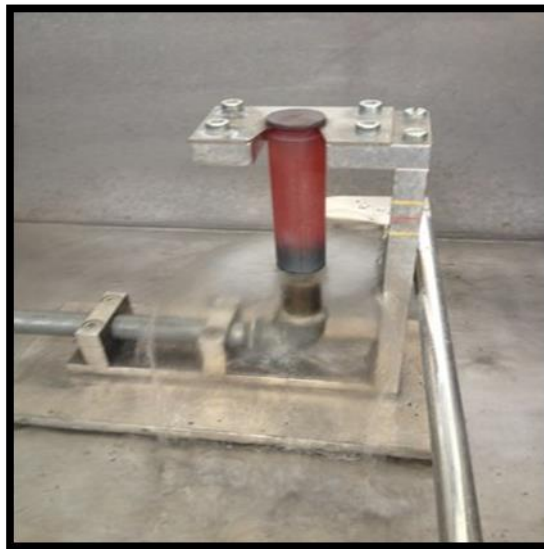
- L'éprouvette  $E_1$  est laissée sans traitement, pour l'utiliser comme référence afin de comparer les propriétés de l'acier 30CrMnTi trempé en bout et donc en fonction de la vitesse de refroidissement avant et après cémentation.
- Cémentation de l'éprouvette  $E_3$  à  $T_1=910^\circ\text{C}$  en utilisant un gaz de méthane actif ( $\text{CH}_3\text{OH}=4\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{h}$ ) avec  $C_p=1.1\%$  durant  $t_1=240$  minutes.
- Austénitisation des éprouvettes  $E_2$  et  $E_3$  à  $T_2=930^\circ\text{C}$  durant  $t_2=60$  minutes dans un four de Nabertherm avec conditions convenables.
- Ensuite, nous Mettons les éprouvettes  $E_2$  et  $E_3$  dans la machine d'essai de trempabilité en bout (Jominy) pour les tremper pendant  $t_3=10$  min à la base inférieure, tenue à l'aide d'un support approprié, par un jet d'eau courante de température comprise entre 15 et 25°C jusqu'à son refroidissement total par conduction. La distance entre la base inférieure et la source d'eau est  $d=12,5\text{mm}$ . La pression de l'eau est stable lorsqu'elle coule avec une hauteur  $h=65$  mm, puis retirez-les en les plongeant complètement dans l'eau pendant  $t_4=2$  min.



**Figure III.4.** Four de Nabertherm pour austénitisation de l'acier 30CrMnTi.



**Figure III.5.** Four de cémentation gazeuse.



**Figure III.6.** Machine de trempabilité en bout (Jominy).

### III.5. Enrobage

Avant l'enrobage, à l'aide d'une tronçonneuse, nous avons usiné un méplat sur les éprouvettes  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$  pour l'observation cristallographique et de mesurer la variation de la dureté en fonction de la distance de Jominy et donc en fonction de la vitesse de refroidissement. En préparation métallographie, l'enrobage des échantillons sert essentiellement à faciliter la manipulation des pièces dont la forme ou le volume risquent de compliquer les étapes ultérieures de leur préparation ainsi que leur analyse.

Il vise en outre à préserver les bords complexes et les défauts de surface lors de la préparation métallographique. La méthode d'enrobage sélectionnée se doit de respecter

parfaitement la microstructure de l'échantillon, la pression et la chaleur étant les deux facteurs les plus susceptibles de l'endommager.

La méthode la plus fréquente pour enrober un échantillon avec une résine thermodurcissable ou thermoplastique utilise la pression et la chaleur. Les résines époxy (EpoMet) comptent parmi les résines thermodurcissables courantes, tandis que le méthacrylate de méthyle (TransOptic) est la résine d'enrobage thermoplastique la plus utilisée pour la transparence. Nous avons réparti tous les méplats des éprouvettes E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub> en cinq (5) zones en fonction de la distance de Jominy et donc selon la vitesse de refroidissement (voir la Figure III.8).

- Zone 01 : refroidissement rapide ;
- Zone 02: refroidissement moyen ;
- Zone 03 : refroidissement un peu moyen ;
- Zone 04 : refroidissement lent ;
- Zone 05 : refroidissement très lent.

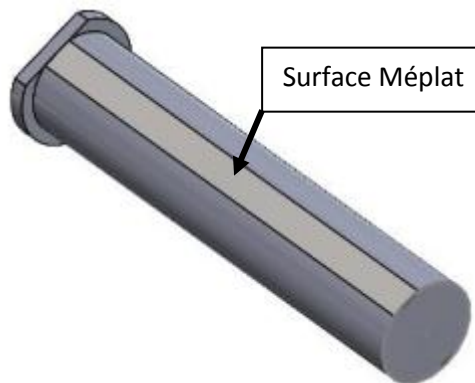


Figure III.7. La forme du méplat longitudinal dans les éprouvettes E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub>.

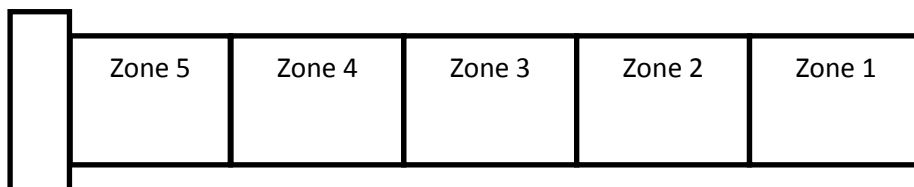


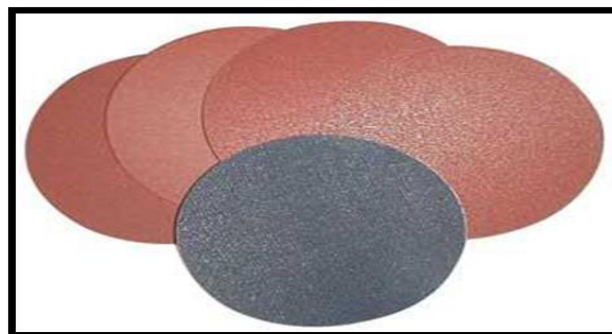
Figure III.8. Les différentes zones de trempabilité en bout (Jominy).



**Figure III.9.** Tronçonneuse.

### **III.6. Polissage mécanique**

Après l'enrobage des cinq zones méplates des éprouvettes  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$ , on passe à les polir en utilisant un procédé de finition permettant de retirer par un papier abrasif en gradient de p120 puis p320 ; p400 ; p600 ; p800 ; p1200 ; p2400 ; p4000, les défauts, rayures ou aspérités de la pièce avec lubrification à l'eau avec une vitesse de 250 tours/ min en obtenant des états de surface de grande qualité, caractérisés par l'indice de rugosité ( $R_a$ ), l'homogénéité de la brillance et l'éclat, comme le montre les figures III.10 et 11. Le but de ce polissage est d'enlever les oxydes et les déchets sur la surface et de donner une surface polie. En outre, afin d'obtenir des faces miroir, la finition a été réalisée à l'aide de disque en feutre avec l'addition du lubrifiant et de la pâte diamantée de granulométrie 6  $\mu\text{m}$ . Finalement, les échantillons polis des éprouvettes  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$  sont nettoyés à l'acétone et conservés à l'abri de l'humidité.



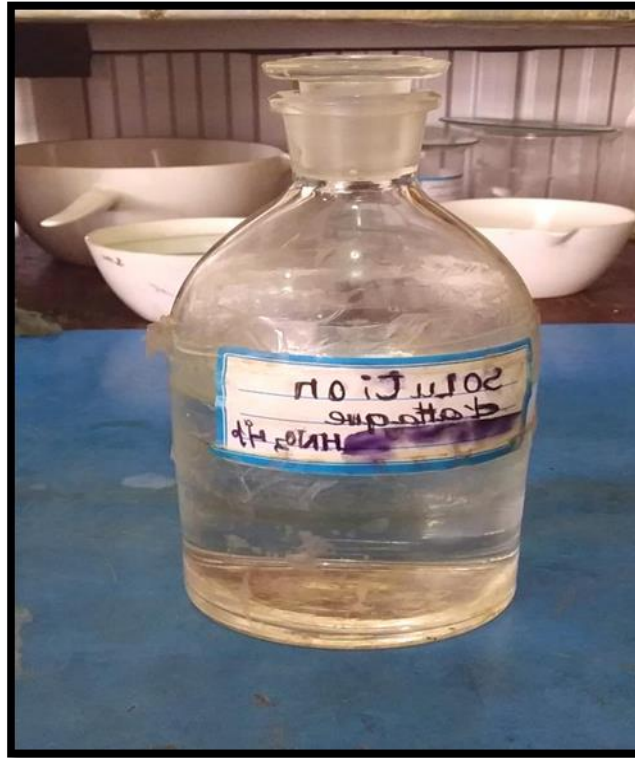
**Figure III.10.** Papier abrasif.



**Figure III.11.** Machine de plissage mécanique.

### **III.7. Attaque chimique**

Après le polissage de finition (miroir), nous avons passé à l'étape de l'attaque chimique pour révéler les joints de grains des structures de l'acier 30CrMnTi avant et après trempabilité en bout et cémentation. On met les échantillons de cinq (5) zones des éprouvettes  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$  sous gouttes d'alcool éthylique ( $C_2H_5OH$ ) pour éliminer les contraintes d'oxydation d'eau, ensuite dans une évaporation de céramique qui contient de solution d'attaque (96 % d'alcool éthylique  $C_2H_5OH$  + 4 % de acide nitrique  $HNO_3$ ), on submerge la pièce pendant (15 à 35 seconde), puis on lave les échantillons à nouveau sous l'eau courante et on le met sous gouttes d'alcool éthylique ( $C_2H_5OH$ ) encore une fois pour éviter la corrosion. Finalement, on sèche les échantillons à l'aide d'un séchoir.

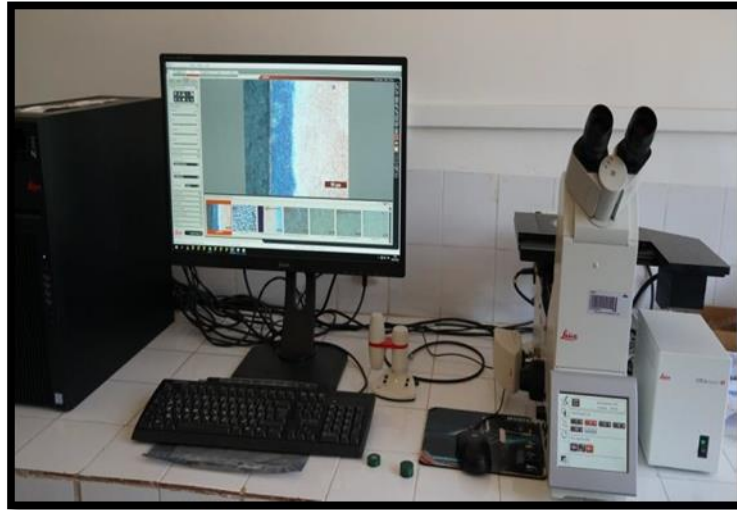


**Figure III.12.** La solution d'attaque chimique.

### III.8. Cristallographie des éprouvettes $E_1$ et $E_2$ et $E_3$

Pour voir la microstructure de cinq zones des éprouvettes  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$ , nous avons utilisé le microscope optique Leica DMi8 qui donne une image grandie d'un objet en général transparent. Il est constitué d'un banc optique dont une partie se trouve devant l'objet : l'éclairage, l'autre partie derrière l'objet pour l'observation. Ce banc doit être rigide et posséder tous les organes de centrage des pièces optiques [1].

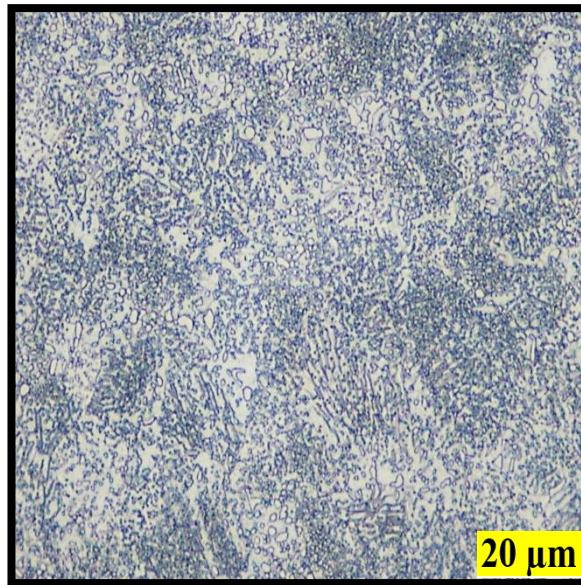
Les éprouvettes sont observés à l'aide d'un microscope optique (voir la figure 13), muni de cinq objectifs ( $\times 5$ ,  $\times 10$ ,  $\times 20$ ,  $\times 50$ ,  $\times 100$ ) et grandissement totale oculaire ( $\times 10000$ ). Il est équipé d'un appareil photo numérique, de longueur focale de 29 mm et de 7.0 giga-pixels. Cela nous permet d'avoir des différents grossissements en utilisant le zoom de l'appareil et les objectifs du microscope. La nature des microstructures obtenues pour les cinq zones des éprouvettes  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$ , dépend de la répartition du carbone dans la couche cimentée et de la vitesse de refroidissement [2].



**Figure III.13.** Microscope optique Leica DMi8.

### III.8.1. Microstructure de l'éprouvette E<sub>1</sub>

L'observation micrographique de l'éprouvette E<sub>1</sub> montre que l'acier 30CrMnTi non traité (brut) a une structure du type perlite globulaire en petits globules blancs de Fe<sub>3</sub>C de contour noir sur fond de ferrite dans toutes les zones (Voir la Figure III.14). Cette structure est consécutive à un recuit d'adoucissement.



**Figure III.14.** Microstructure de l'acier 30CrMnTi de l'éprouvette E<sub>1</sub> non traité (brut).

### III.8.2. Microstructure de la zone 01 des éprouvettes E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub>

Selon les microstructures obtenues dans la zone 1 du méplat longitudinal à 1.5 mm de l'extrémité trempée par un jet d'eau des éprouvettes E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub>, on observe dans la zone 1 de l'éprouvette E<sub>2</sub> et du cœur de l'éprouvette E<sub>3</sub> une structure mixte de bainite et de martensite

(voir la Figure III.15 et 16), à l'effet de la transformation de l'austénite avec une vitesse de refroidissement très élevée. En outre, le bord de la zone 1 cémentée de l'éprouvette E<sub>3</sub> présente une structure martensitique dans laquelle sont imbriqués des carbures de fer Fe<sub>3</sub>C (voir la Figure III.16).

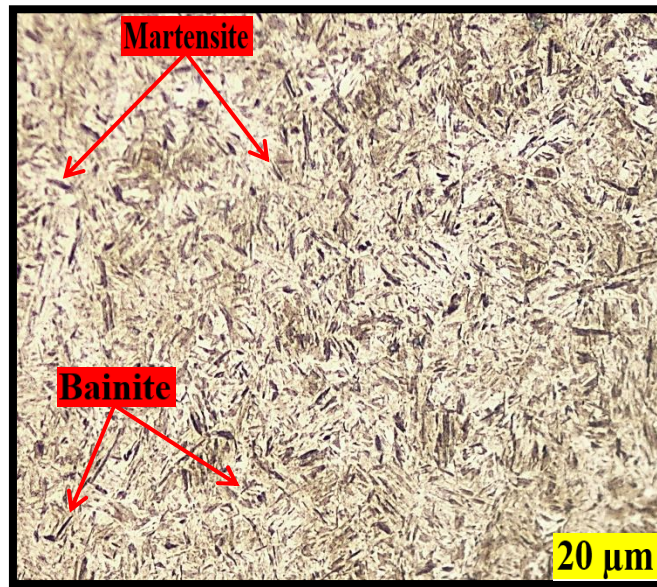


Figure III.15. La microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E<sub>2</sub>.

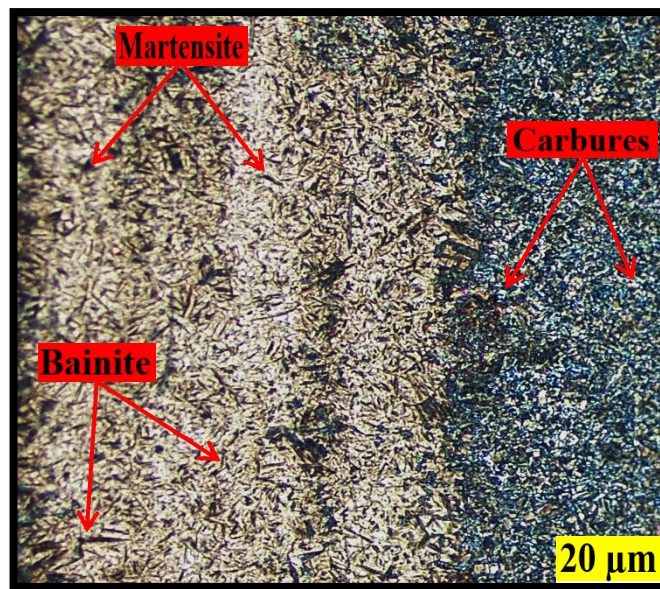


Figure III.16. La microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E<sub>3</sub>.

### III.8.3. Microstructure de la zone 2 des éprouvettes E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub>

La microstructure dans la zone 2 à 15 mm de l'extrémité trempée par un jet d'eau des éprouvettes E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub>. L'observation par le microscope optique de la zone 2 de l'éprouvette E<sub>2</sub> montre une structure mixte de martensite + sorbite + perlite globulaire-lamellaire et de ferrite, en effet de la diminution de la vitesse de refroidissement par conduction ce qui a empêché la transformation complète de l'austénite en martensite (Figure III.17). Cependant, dans la zone 2 de l'éprouvette E<sub>3</sub>, on observe une structure mixte de martensite + bainite inférieur et supérieur dans toute la zone au bord et au cœur (Figure III.18).

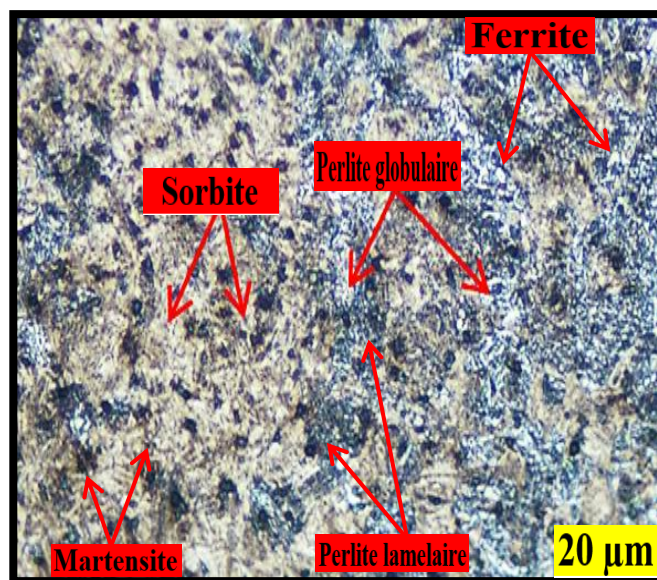


Figure III.17. La microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E<sub>2</sub>.

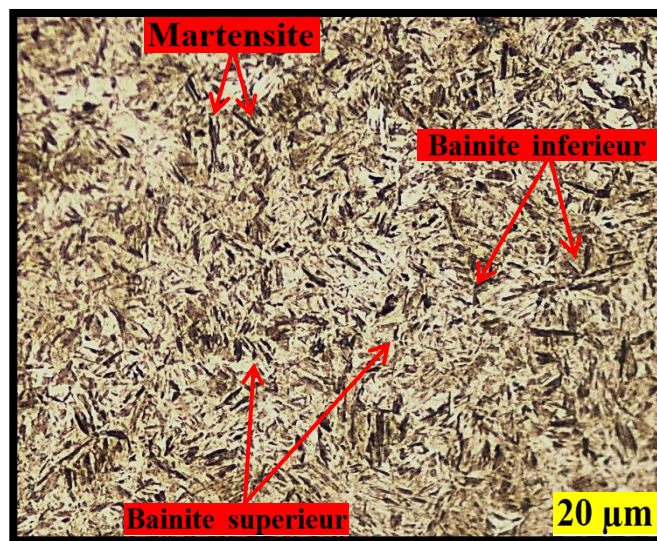


Figure III.18. La microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E<sub>3</sub>.

#### III.8.4. Microstructure de la zone 3 des éprouvettes E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub>

Lorsqu'on éloigne de 30 mm de l'extrémité trempée par un jet d'eau, la conduction du froid entre les atomes est diminuée en fonction de la distance de Jominy donc la vitesse de refroidissement devient lente, ce qui a permis l'apparition des nouvelles structures dans la zone 3. Dans l'éprouvette E<sub>2</sub> on observe la diminution de la quantité de martensite et de sorbite, et l'augmentation de la quantité de l'austénite transformée en perlite lamellaire et perlite globulaire (Figure III.19). D'autre part, la structure dans zone 3 de l'éprouvette E<sub>3</sub>, présente l'apparition des grains de ferrite avec de la martensite + bainite inférieure et supérieure dans toute la zone au bord et au cœur (Figure III.20).

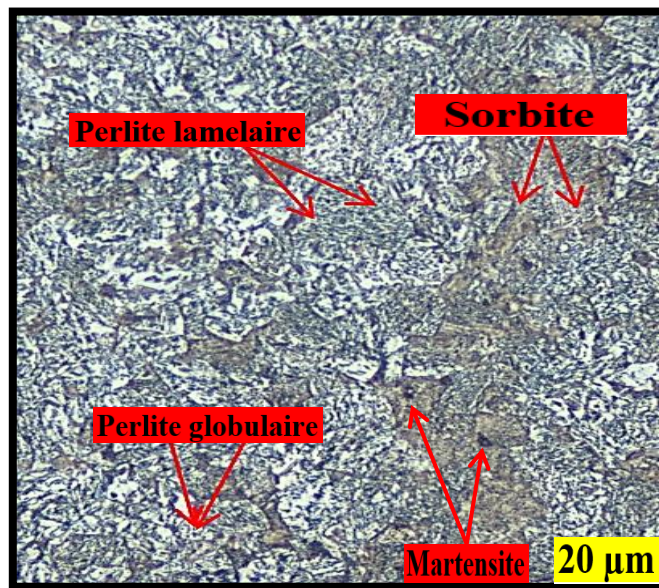


Figure III.19. La microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E<sub>2</sub>.

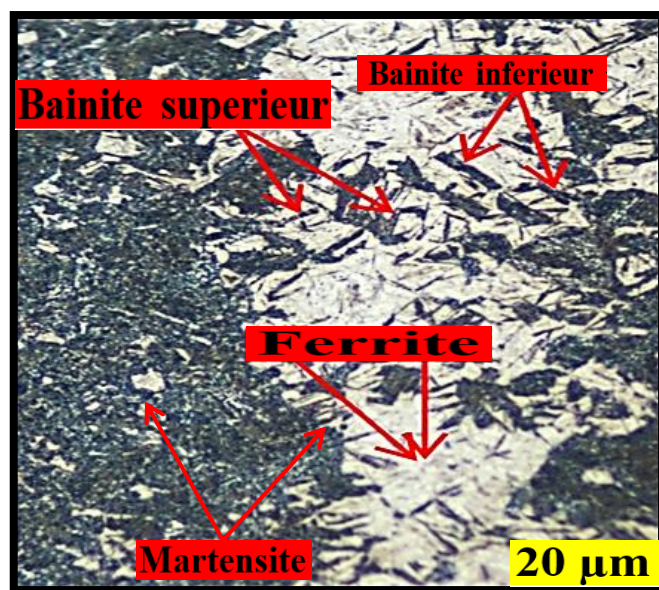


Figure III.20. La microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E<sub>3</sub>.

### III.8.5. Microstructure de la zone 4 des éprouvettes E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub>

Pour une distance de Jominy plus grand (60mm), la conduction devient très faible ce qui a influé directement sur la vitesse de refoirdissement dans la zone 4. Dans l'éprouvette E<sub>2</sub>, La majorité de l'austénite est transformée en ferrite et en perlite globulaire et lamellaire car la vitesse de refroidissement n'a pas été assez rapide pour avoir autres structures plus dures. En plus, on observe quelques traces de sorbite (Figure III.21). Par contre, la zone 4 de l'éprouvette E<sub>3</sub> présente une structure mixte plus dures de martensite + bainite inférieur et supérieur + carbures+ ferrite, et d'austénite résiduelle (austénite qui n'est pas transformée lors de refroidissement) (Figure III.22).

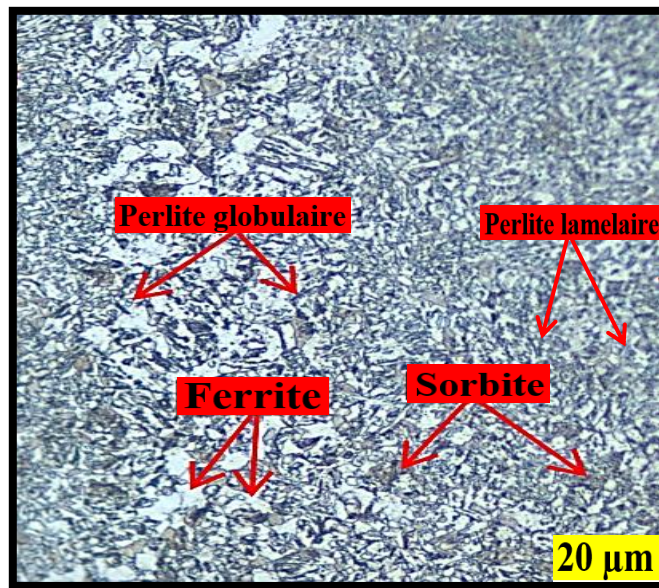


Figure III.21. La microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E<sub>2</sub>.

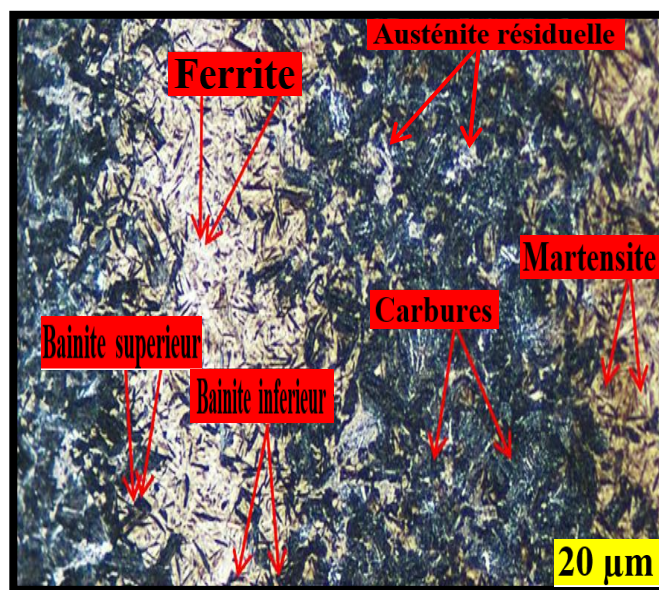


Figure III.22. La microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E<sub>3</sub>.

### III.8.6. Microstructure de la zone 5 des éprouvettes E<sub>2</sub> et E<sub>3</sub>

La zone 5 est loin de 95 mm de l'extrémité trempée par un jet d'eau. La vitesse de refroidissement dans cette zone est très lente car la conduction thermique est très basse en suivant une distance de Jominy plus grande. On remarque que la quantité de ferrite est augmentée dans l'éprouvette E<sub>2</sub> en présence de perlite globulaire et lamellaire (Figure III.23). D'autre part, la structure dans la zone 5 de l'éprouvette E<sub>3</sub>, contient de martensite + bainite inférieure et supérieure + ferrite (avec une quantité plus grande à celle dans la zone 4), et d'austénite résiduelle (austénite qui n'est pas transformée lors d'un refroidissement très lent) (Figure III.24).

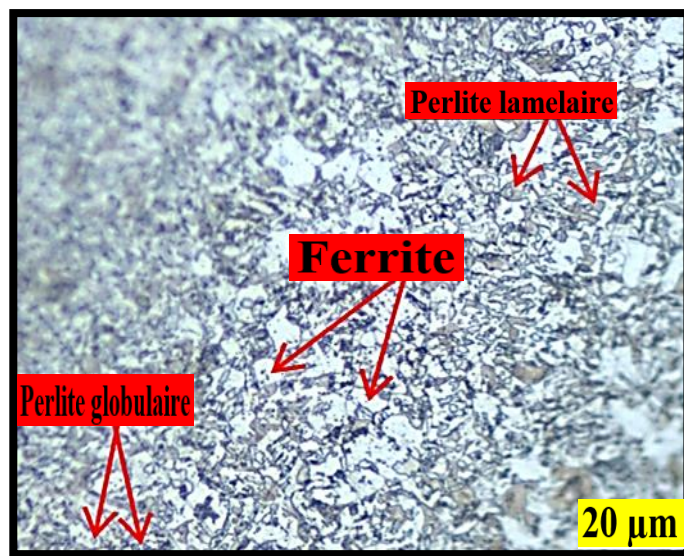


Figure III.23. La microstructure de la zone 05 de l'éprouvette E<sub>2</sub>.

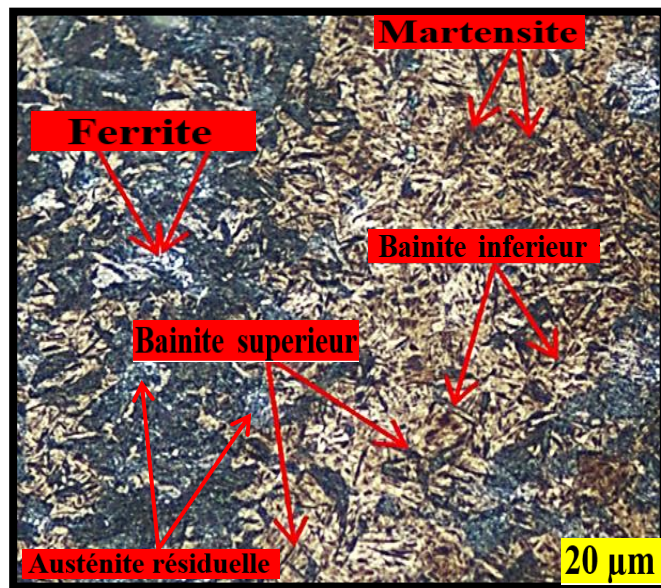


Figure III.24. La microstructure de la zone 05 de l'éprouvette E<sub>3</sub>.

### III.9. Dureté

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière est en fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétrateur-surface, la géométrie de pénétrateur, ses propriétés mécaniques et la charge principale des méthodes de mesure de la dureté utilisée. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau, en citant quelques méthodes : Brinell, Rockwell et Vickers le symbole de dureté est respectivement HB, HR, HV.



Figure III.25. La machine de la dureté.

#### III.9.1. Essai de dureté Vickers

Le pénétrateur est une pyramide en diamant, à base carrée et d'un angle au sommet entre faces opposées égales à  $136^\circ$ . L'empreinte est une pyramide en creux de diagonales du carré de base. Les mesures s'effectuent à l'aide d'un appareil optique approprié ou à afficheur directe dans les nouvelles générations des bancs d'essais [3].

$$HV=1,854 * F / D^2 \quad (1)$$

Où :

F : est la charge appliquée en N ;

D : la diagonale de l'empreinte en mm ;

H : La profondeur de pénétration est  $H = D / 7$ .

Cet essai est appliqué principalement aux métaux, mais peut l'être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges.

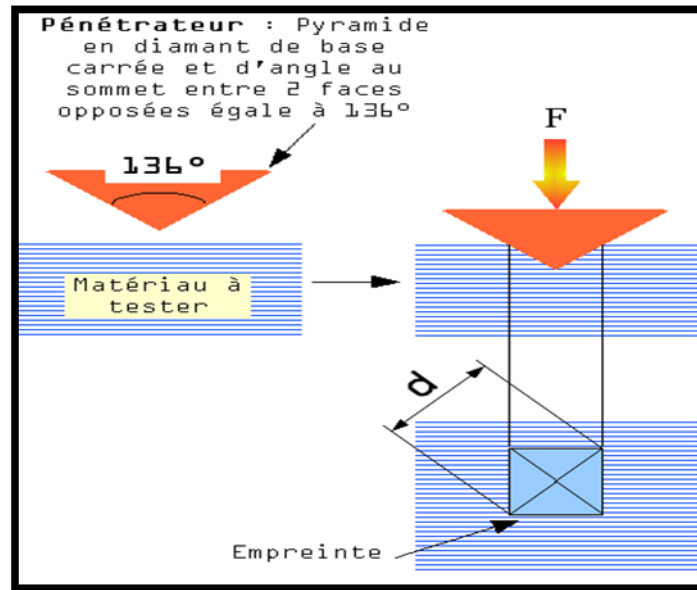


Figure III.26. Principe et empreinte typique de l'essai de dureté Vickers [3].

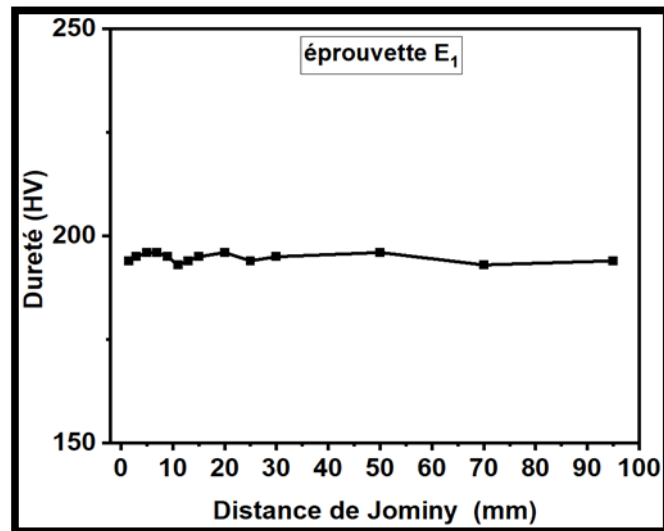
### III.9.2. Résultats obtenus de la dureté des éprouvettes $E_1$ et $E_2$ et $E_3$

#### III.9.2.1. La dureté de l'éprouvette $E_1$

Pour mesurer la variation de la dureté sur un méplat de la génératrice de l'éprouvette à partir de son extrémité trempée par le jet d'eau selon les distances suivantes en mm : 1.5, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 25, 30, 35, 50, 70, 95.

Le profil de la dureté (HV) a été fait en fonction de la distance de Jominy (d en mm) donc en fonction de la vitesse de refroidissement. La courbe obtenue porte le nom de courbe Jominy, permet de déterminer la trempabilité de l'acier 30CrMnTi avant et après cémentation (figure VI.4).

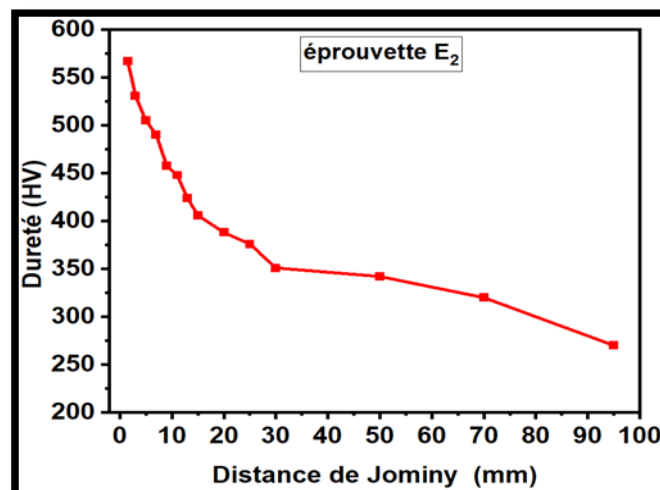
A partir de la figure III.27, on remarque clairement que la dureté est à l'entour de 195 HV sur tout le profil de la distance de Jominy, c'est-à-dire, dans toutes les zones 1, 2, 3, 4 et 5 du méplat longitudinal de l'éprouvette  $E_1$  car l'acier 30CrMnTi brut présente une structure de perlite globulaire dans les cinq zones.



**Figure III.27.** Profil de la dureté Vickers (HV) en fonction de la distance de Jominy (mm) de l'éprouvette E<sub>1</sub>.

### III.9.2.2. La dureté de l'éprouvette E<sub>2</sub>

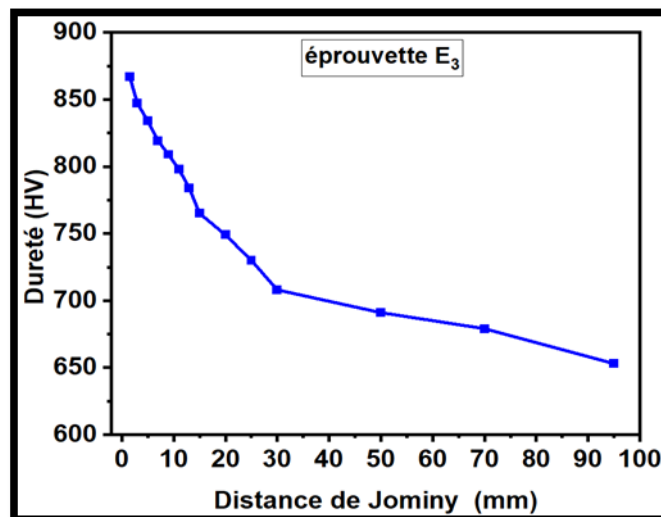
La figure III.28 présente le profil de la dureté qui a été obtenu dans les cinq zones de l'éprouvette E<sub>2</sub> trempée en bout par un jet d'eau. On constate que la dureté est maximale 567 HV à 1.5mm de l'extrémité froide par l'eau car cette zone présente une structure martensite + bainite. Lorsqu'on éloigne de l'extrémité, la dureté progressivement diminue en fonction de la distance de Jominy et donc en fonction de la vitesse de refroidissement jusqu'au 270 HV à 95 mm. Cette diminution due de la transformation d'austénite aux structures moins dures (ferrite + perlite lamellaire et perlite globulaire).



**Figure III.28.** Profil de la dureté Vickers (HV) en fonction de la distance de Jominy (mm) de l'éprouvette E<sub>2</sub>.

### III.9.2.3. La dureté de l'éprouvette E<sub>3</sub>

Généralement, les duretés obtenues de l'éprouvette E<sub>3</sub> sont supérieures à celle obtenues des éprouvettes E<sub>1</sub> et E<sub>2</sub>, car cette dernière est cémentée puis trempée en bout par un jet d'eau ce qui a permis de la création des carbures qui présentent des duretés très élevées. La figure III.29 montre le profil de dureté (HV) en fonction de la distance de Jominy (mm) et donc en fonction de la vitesse de refroidissement. Le bord de la zone 1 présente la dureté la plus élevée à l'entour de 868 HV en effet de la transformation de l'austénite en martensite + bainite et de la composition des atomes de fer avec les atomes de carbone diffusés durant la cémentation avec une vitesse de refroidissement très élevée en créant des carbures de fer (Fe<sub>3</sub>C). La dureté devient de plus en plus minimale pour une distance plus grande (Jominy) de l'extrémité trempée par un jet d'eau 653 HV à 95 mm, car la vitesse de refroidissement n'est pas assez suffisante pour avoir des structures d'une dureté plus élevée et pour la création des carbures.



**Figure III.29.** Profil de la dureté Vickers (HV) en fonction de la distance de Jominy (mm) de l'éprouvette E<sub>3</sub>.

### III.10. Conclusion

Nous concluons que l'acier 30CrMnTi (brut) présente une structure de perlite globulaire avec une dureté minimale à l'entour de 195 HV dans toutes les zones. Cependant, l'acier 30CrMnTi austénitisé à T=930 °C durant 60 minutes puis trempé en bout par un jet d'eau pendant 10 minutes, présente une structure dure (567 HV) de martensite + bainite dans la zone 1 à 1.5 mm de l'extrémité trempée.

Toutes les structures ont été modifiées en fonction de la distance de Jominy donc en fonction de la vitesse de refroidissement où la zone 5 présente une dureté minimale avec une structure de ferrite et perlite globulaire-lamellaire. Par contre, l'acier 30CrMnTi cémenté puis trempé en bout a une dureté la plus élevée en effet de la combinaison des atomes de fer et de carbone en créant de la cémentite. La dureté HV diminue pour une distance de Jominy plus grande.

## Références

[1] Centre de Biologie du Développement, UMR 5547, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse CEDEX 09, marc.moreau@univ-tlse3.fr

[2] R-baleh (flambage plastique quasi-statique et dynamique de structures tubulaires métalliques sous sollicitations simple et complexe-système d'absorptions d'énergie-via un nouveau dispositif expérimental) 2004.

[3] Dr BREK SAMIR : Cours de comportement mécanique des matériaux métalliques « Chapitre 1 : Essais mécaniques – Lois simples », p(17), 2019.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale

D'après notre étude, nous concluons que l'essai de Jominy est très utile pour caractériser la structure et la dureté de l'acier 30CrMnTi austénitisé en fonction de la distance de Jominy et donc en fonction de la vitesse de refroidissement. On résume les conclusions comme suit :

- De manière générale, la faiblesse de l'acier 30CrMnTi réside dans sa faible teneur en carbone ( $C\%=0.3$ ) ;
- Après trempabilité, la cémentation à améliorer les propriétés structurales et mécaniques de l'acier 30CrMnTi en créant une structure dure et fragile de martensite et de la cémentite localisée dans les joints de grains ;
- Après cémentation, une partie de l'atmosphère carbonisée est transmise à la surface de l'acier 30CrMnTi, ce qui entraîne un durcissement supplémentaire de la couche superficielle de la pièce traitée ;
- La structure de 30CrMnTi austénitisé dépend de la vitesse de refroidissement ;
- L'extrémité trempée par un jet d'eau de l'acier 30CrMnTi présente la dureté la plus élevée, où elle devient de plus en plus décroissante pour une distance de Jominy plus grande ;
- La cémentation n'a aucune influence sur la dureté de l'acier 30CrMnTi sans passer par la phase de trempe.