
Université ABBES LAGHROUR Khenchela



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



Mémoire

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

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Thème

Étude expérimentale de l'effet de la durée de
cémentation sur les propriétés mécaniques de
l'acier XC10

Réalisé par :

- ABBED Khaoula
- BOUGHOUAL Hiba

Dirigé par : Dr. SAOUDI Abdenour

Membres de jury :

- Dr. MEDDOUR Belkacem (Président)
- Dr. SID Noureddine (Examineur)

Année universitaire : 2019-2020

Remercîments



Nous tenons à exprimer nos profondes gratitudees à l'encadreur Dr. SAOUDI Abdenour pour avoir dirigé ce mémoire, avec un encadrement sérieux et efficace.

Comme nous tenons à remercier :

- Le Présidente de jury : Dr. Meddour Belkacem
- L'examineur de jury : Dr. SID Noureddine
- 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 maitrise. Leurs discussions nous ont été indispensables et nous sommes extrêmement reconnaissants.

DÉDICACES



Je remercie dieu qui m'a donné l'effort et la volonté pour avoir achever ce travail.

Et je dédie ce modeste travail à :

- Mon chère père MABROUK. Qui m'a encouragé tout au long de ma carrière et m'a toujours soutenue
- Ma très chère mère M. ZAKIA. d'elle que je tire ma force, ma détermination et ma persévérance
- Mon frère : Aissa
- Mes sœurs : Houda, Ismahan, Asma et Mariem
- Mes amies : Boughougale Hiba, Malkia Dalale, Mizen Salima, Krikrou Imene et Bouchami Abir

Et à tous mes amis de promotion.

ABBED Khaoula

DÉDICACES



Je remercie dieu qui m'a donné l'effort et la volonté pour voir achevé ce travail.

Et je dédie ce modeste travail à :

- Ma très chère mère H.FATMA
 - Mon très cher NOUR EDDIN qui m'a donné tous qu'ils peuvent.
 - Mes sœurs : Linda, Nawal, Nassira, Lamia, Soumia, Amira, Aya, Wafae et Takwa et Lila
 - Mes frères : Gani, Zubair et Imade
 - Mes amies : Abbed khaoula, Krikrou Imene
- Et à tous mes amis de promotion.

BOUGHOUGAL Hiba

Résumé

Le traitement thermochimique de cémentation est un traitement de surface permettant d'améliorer la durée de vie en fatigue des pièces traitées. Les dernières avancées dans ce domaine permettent de définir les paramètres technologiques du procédé en fonction des caractéristiques mécaniques en fatigue recherchées. La zone superficielle est très souvent la partie d'un composant qui subit les plus fortes contraintes, c'est également cette zone qui est exposée aux frottements, aux forces extérieures et aux attaques chimiques. Les traitements de surface sont largement utilisés pour régler les problèmes d'usure, d'attaque chimique, de corrosion ou de fatigue. Ce travail concerne la mise au point d'un traitement de cémentation de surface de l'acier XC10 par diffusion précipitation. Ce procédé de durcissement superficiel permet d'augmenter et d'améliorer les propriétés en surface des aciers à faible teneur en carbone ($C < 0.2\%$) (l'acier XC10 dans notre cas). Il est proposé dans ce travail, de rechercher les conditions opératoires optimales de la cémentation pour obtenir les résultats souhaités en variant la durée de maintien (2 heures ou 4 heures). Finalement, la caractérisation des propriétés chimiques, structurales et mécaniques (composition chimique, structure, dureté, résistance à la traction, ténacité, résistance au choc,...) par différents dispositifs disponibles des éprouvettes de l'acier XC10 avant et après cémentation est réalisée dans ce travail.

ملخص

العلاج بالتدعيم الكيميائي الحراري هو معالجة سطحية تعمل على تحسين عمر التعب للأجزاء المعالجة. أحدث التطورات في هذا المجال تجعل من الممكن تحديد الإعدادات التكنولوجية للعملية بدلالة خصائص الإجهاد الميكانيكي المطلوبة. غالبًا ما تكون مساحة السطح جزءًا من المكون الذي يتعرض لأكبر قدر من الإجهاد، كما أن هذه المنطقة هي التي تتعرض للاحتكاك والقوى الخارجية والهجوم الكيميائي. تُستخدم المعالجات السطحية على نطاق واسع لمعالجة مشاكل التآكل أو الهجوم الكيميائي أو التآكل أو التعب. يتعلق هذا العمل بتطوير معالجة الكربنة السطحية للفولاذ XC10 عن طريق نشر الترسيب. عملية التصلب السطحي هذه تسمح بزيادة وتحسين خصائص السطح للفولاذ منخفض الكربون ($C < 0.2\%$) (فولاذ XC10 في حالتنا). في هذا العمل يُقترح البحث عن الظروف المثلى لعملية الكربنة للحصول على النتائج المرجوة عن طريق تعديل وقت التثبيت (2 ساعة أو 4 ساعات). وفي أخيرًا يتم تحديد الخصائص الكيميائية والهيكلية والميكانيكية (التركيب الكيميائي، الهيكل، قوة الشد، الصلابة، ومقاومة الصدمات، وما إلى ذلك) بواسطة الأجهزة المختلفة المتاحة لعينات الصلب XC10 قبل وبعد الكربنة في هذا العمل.

Abstract

Thermochemical cementation treatment is a surface treatment that improves the fatigue resistance of treated parts. The latest advances in this field make it possible to define the technological parameters of the process as a function of the desired mechanical fatigue characteristics. The surface area is very often the part of a component that is subjected to the greatest stress, it is also this area that is exposed to friction, external forces and chemical attack. Surface treatments are widely used to address problems with wear, chemical attack, corrosion or fatigue. This work concerns the development of a surface cementation treatment of XC10 steel by precipitation diffusion. This surface hardening process increases and improves the surface properties of low carbon steels ($C < 0.2\%$) (XC10 steel in our case). It is proposed in this work, to look for the optimal operating conditions of cementation to obtain the desired results by varying the duration of maintenance (2 hours or 4 hours). Finally, the characterization of the chemical, structural and mechanical properties (chemical composition, structure, hardness, tensile strength, toughness, impact resistance,...) by different devices available specimens of the XC10 steel before and after carburizing is carried out in this work .

Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Listes des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vi
Liste des symboles.....	vii
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les aciers

I-1 Introduction	2
I-2 Définition de fer.....	2
I-3 Fer et alliages ferreux	2
I-3-1 Le fer	2
I-3-2 Alliages ferreux	3
I-4 Aciers.....	4
I-4-1 Constituants des aciers	5
I-4-2 Produits ferreux	6
I-4-3 Aciers à moyenne teneur en carbone.....	6
I-5 Diagramme d'équilibre.....	7
I-5-1 Différentes phases observées dans les aciers	7
I-5-1-1 La ferrite.....	8
I-5-1-2 L'austénite γ	8
I-5-1-3 La cémentite.....	8
I-5-1-4 La perlite	9
I-5-2 Types des aciers selon le pourcentage de carbone	9
I-6 Caractéristiques mécaniques des aciers	10
I-7 Classification générales des aciers	11
I-7-1 Classification selon leur composition chimique.....	11
I-7-2 Classification par le mode d'emploi.....	12
I-8 Aciers de cémentation	13
I-8-1 Acier faiblement alliés	13
I-9 Influence spécifique des éléments d'addition.....	14
I-10 La fabrication des aciers	15
I-10-1 Métallurgie primaire.....	15
I-10-2 Métallurgie secondaire	16
I-10-3 Coulée continue et en lingots	16
I-10-4 Laminage des produits plats et longs	16
I-12 Défauts des aciers	17
I-13 Conclusion	18

Chapitre II: Cémentation des aciers

II- 1 Introduction	19
II-2 Le but de cémentation	19
II-3 Principe de la cémentation	19
II-4 La profondeur de cémentation.....	20
II-5 Techniques de cémentation	21
II-5-1 Cémentation solide (en caisse).....	21
II-5-2 Cémentation liquide	21

II-5-3 Cémentation gazeuse.....	21
II-5-4 Cémentation ionique	23
II-6 Rôle des éléments d'alliage sur la cémentation	23
II-6-1 Carbone	23
II-6-2 Autres éléments d'alliages	24
II-7 Traitements après cémentation.....	25
II-8 Traitements préparatoires de la surface.....	26
II-9 Etapes de la cémentation	27
II-9-1 Etapes d'enrichissement de carbone	27
II-9-2 Trempe au cours de cémentation	27
II-9-3 Structure obtenue après trempe.....	28
II-9-3-1 Martensite	29
II-9-3-2 Austénite résiduelle	29
II-9-3-3 Cémentite.....	30
II-9-4 Revenu au cours de cémentation.....	31
II-9-5 Effet du revenu.....	32
II-10- Propriétés des pièces cémentées	32
II-11 Les défauts de cémentation	33
II-12 La correction des défauts de cémentation	34
II-12-1 Contrôles d'atelier.....	34
II-12-2 Contrôles de laboratoire	34
II-13 Conclusion.....	34

Chapitre III : Techniques expérimentales-Résultats et discussions

III-1 Introduction.....	36
III-2 Matériau étudié (acier (XC10))	36
III-3 Préparation des échantillons avant la cémentation	36
III-4 Techniques de cémentation.....	37
III-5 Préparation des échantillons après la cémentation.....	38
III-5-1 Polissage	38
III-5-2 Attaque chimique.....	40
III-6 Composition chimique	40
III-6-1 Eprouvette de l'acier (XC10) brut	41
III-6-2 Eprouvette de l'acier (XC10) cémenté pendant 2 h.....	41
III-6-3 Eprouvette de l'acier (XC10) cémenté pendant 4 h.....	42
III-7 Microstructure.....	43
III-7-1 Eprouvette de l'acier (XC10) brut	43
III-7-2 Eprouvette de l'acier (XC10) cémenté pendant 2 h.....	44
III-7-3 Eprouvette de l'acier (XC10) cémenté pendant 4h.....	45
III-8 Dureté.....	46
III-8-1 Essai dureté Vickers.....	47
III-8-2 Résultats obtenus de la dureté.....	48
III-9 Essai de traction	49
III-9-1 Forme de l'éprouvette de traction.....	50
III-9-2 Exécution de l'essai	51
III-9-3 Résultats obtenus de traction	52
III-9-3-1 Eprouvette de l'acier (XC10) brut.....	52
III-9-3-2 Eprouvette de l'acier (XC 10) cémenté pendant 2 h	52
III-9-3-3 Eprouvette de l'acier (XC10) cémenté pendant 4 h	53

III-10 Essai de résilience	54
III-10-1 Forme de l'éprouvette de résilience.....	55
III-10-2 Résultats obtenus de résilience	55
III-10-2-1 Eprouvette de l'acier (XC 10) brut.....	55
III-10-2-2 Eprouvette de l'acier (XC10) cimenté pendant 2 h	56
III-10-2-3 Eprouvette de l'acier (XC 10) cimenté pendant 4 h	56
III-11 Conclusion	57
Conclusion générale	58

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les aciers

Figures	Désignations	Pages
Figure I-1	Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition	4
Figure I-2	L'origine de l'acier et leur classification	5
Figure I-3	Variation de la structure cristalline du fer en fonction de la température	6
Figure I-4	Diagramme d'équilibre fer- carbone	7
Figure I-5	Microstructure d'un acier eutectoïde	9
Figure I-6	Microstructure d'un acier doux	10
Figure I-7	Microstructure d'un acier hypereutectoïde	10
Figure I-8	Les différentes étapes pour l'élaboration de l'acier	17

chapitre II : Cémentation des aciers

Figures	Désignations	Pages
Figure II -1	Profondeur conventionnelle de cémentation	20
Figure II- 2	Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe	22
Figure II- 3	Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier SUS 316 L	22
Figure II-4	Micrographie par microscopie électronique à balayage d'un acier 16MnCr5 cémenté 10 minutes à basse pression à 950 °C	24
Figure II- 5	Structures cristallines de l'austénite γ et de la martensite α' dans les aciers	28
Figure II-6	Micrographie de la martensite	29
Figure II-7	Micrographie de l'austénite	30
Figure II-8	La micrographie de la cémentite	31
Figure II-9	Schéma de principe du traitement du revenu. 1) solution solide sursaturée, 2) zones de Gunier – Preston, 3) précipités θ'' , 4) précipités θ' , puis θ (Al ₂ Cu)	31

Chapitre III : Technique expérimentale - résultats et discussions

Figures	Désignations	Pages
Figure III-1	Matière premier (acier XC10)	36
Figure III-2	Machine de tournage	37
Figure III-3	Machine de rectification cylindrique	37
Figure III-4	Meuleuse	39
Figure III-5	La polisseuse	39
Figure III-6	La machine de polissage fine	40
Figure III-7	Spectromètre à émission optique	41
Figure III-8	Microscope optique	43
Figure III-9	Microstructure de l'acier XC10 avant le traitement	43
Figure III-10	Profondeurs de la couche cémentée pendant 2 h de l'acier XC10	44
Figure III-11	Microstructure au cœur de l'acier XC10 cémenté pendant 2h	44
Figure III-12	Microstructure de la couche superficielle de l'acier XC10 pendant 2h	45
Figure III-13	La profondeur de la couche cémentée pendant 4 h de l'acier XC10	45
Figure III-14	Microstructure au cœur de l'acier XC10 cémentée pendant 4 h	46
Figure III-15	Microstructure de la couche superficielle de l'acier XC10 cémentée pendant 4 h	46
Figure III-16	La machine de la dureté	47
Figure III-17	Principe de l'essai et empreinte typique de l'essai	47
Figure III-18	La forme de l'éprouvette de dureté	48
Figure III-19	Les valeurs de la dureté HV de l'interface vers le cœur d'acier XC10 avant et après la cémentation	49
Figure III-20	Courbes conventionnelles typiques de traction	50
Figure III-21	Eprouvette d'essai de traction	51
Figure III-22	Machine électromécanique de traction-compression uni-axiale	52
Figure III-23	L'éprouvette de l'acier XC10 brut avant et après la traction	52
Figure III-24	L'éprouvette de l'acier XC10 cémenté pendant 2 h avant et après la traction	53
Figure III-25	L'éprouvette de l'acier XC10 cémenté pendant 4 h avant et après la traction	54
Figure III-26	Courbe force- déformation de trois éprouvette de l'acier XC10 avant	54

	et après cémentation	
Figure III-27	La machine de résilience	55
Figure III-28	L'éprouvette Charpy pour l'essai de résilience	55
Figure III-29	L'éprouvette d'acier XC10 brut avant et après le choc	56
Figure III-30	L'éprouvette de l'acier XC10 cémenté pendant 2 h avant et après le choc	56
Figure III-31	L'éprouvette de l'acier XC10 cémenté pendant 4 h avant et après le choc	57

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les aciers

Tableaux	Désignations	Pages
Tableau I-1	Classification des aciers suivant la composition chimique	12
Tableau I-2	La variation des éléments des aciers alliés	12
Tableau I-3	Les classes d'aciers à outils	13
Tableau I-4	Les pourcentages des éléments d'addition peuvent être négligés	14
Tableau I-5	Eléments d'additions et leurs effets sur l'acier	15

Chapitre II : Cémentation des aciers

Tableaux	Désignations	Pages
Tableau II-1	Désignations métallurgiques communément cémentées	25

Chapitre III : Technique expérimentale - résultats et discussions

Tableaux	Désignations	Pages
Tableau III-1	Les conditions opératoires de la cémentation	38
Tableau III-2	Composition chimique de l'acier XC10 brut (sans traitement)	41
Tableau III-3	Composition chimique de l'acier XC 10 cémenté pendant 2h	42
Tableau III-4	Composition chimique de l'acier XC10 cémenté pendant 4h	42
Tableau III-5	Les valeurs de la dureté HV à l'interface et le cœur de l'acier XC10 avant et après la cémentation	49
Tableau III-6	Résultats obtenus après la traction de l'éprouvette brut (sans traitement)	52
Tableau III-7	Résultats obtenus de la traction de l'éprouvette de l'acier XC10 cémenté 2h	53
Tableau III-8	Résultats obtenus de la traction de l'éprouvette de l'acier XC10 cémenté 4h	53
Tableau III-9	Résultats obtenus après le choc de l'éprouvette d'acier XC10 brut	56
Tableau III-10	Résultats obtenus après le choc de l'acier XC10 cémenté pendant 2h	56
Tableau III-11	Résultats obtenus après le choc de l'acier XC10 cémenté pendant 4h	57

Liste des symboles

C : Carbone

Fe : Fer

Mn : Magnésium

P : Phosphor

S : Soufre

Cr : Chrome

Ni : Nickel

Mo : Molybdène

W : Tungstène

Al : Aluminium

CH₄ : Méthane

Fe₃C : Cémentite

Co : Cobalt

Cu : Cuivre

Ti : Titane

Si : Silicium

2 h : 2 heures

4 h : 4 heures

D : Le diamètre [mm]

F : Force appliquée [N]

CFC : Cubique à faces centrées

CC : Cubique centrée

R_m : La résistance à la traction [MPa]

ε_c : Déformation [sans unité]

F_m : Force de traction maximale [N]

A% : L'allongement à la rupture [%]

Z (%) : Coefficient de striction [%]

S₀ : Section initiale [mm²]

S_u : Section minimale après rupture [mm²]

L₀ : Longueur initiale entre repères [mm]

L_c : Longueur de la partie calibrée [mm]

L_u : Longueur ultime après rupture [mm]

T : Température [°C]

σ : Contrainte [Pa]

E: Module d'Young [MPa]

E_a : Energie absorbé [J]

TRC : Un diagramme de transformations en refroidissement continu

Introduction Générale

Introduction générale

Actuellement l'acier a pris une place prépondérante dans l'industrie. En effet, grâce à son bas coût de fabrication et à ses propriétés mécaniques et thermiques, ce matériau se trouve sous différentes formes et tailles, pour des applications nombreuses et variées : construction mécanique, bâtiment, industrie automobile, appareils électriques...etc. Cependant, L'acier est le sujet de plusieurs problèmes, notamment en cas de la pauvreté du carbone en conduisant à la sensibilité à la surcharge, l'usure, la corrosion et à la fatigue...etc. Pour traiter ces problèmes, le traitement thermo-chimique particulièrement la cémentation est la solution la plus utilisée qui consiste à diffuser une quantité du carbone d'une atmosphère gazeuse carbonisée à la couche superficielle de l'acier à faible teneur en carbone ($C < 2\%$), ce dernier influe largement sur les propriétés structurales, mécaniques et tribologiques..., et ce qui ne permet pas d'utiliser les aciers à faible teneur en carbone dans des conditions très sévères.

L'objectif de notre travail vise à étudier l'effet de la durée de cémentation sur la quantité du carbone diffusée à la couche superficielle de l'acier XC10.

Ce mémoire s'articule sur trois chapitres :

- Le premier chapitre destiné à l'étude bibliographique concernant les aciers et leurs caractérisations.
- Le deuxième chapitre orienté à mettre en évidence les traitements thermiques classiques (trempe, recuit et le revenu) et le traitement thermo-chimique en particulier la cémentation.
- Le troisième chapitre est destiné à l'étude expérimentale en analysant l'influence de la quantité du carbone diffusée à la couche superficielle de l'acier XC10 cémentée en fonction du temps de maintien 2 heures ou 4 heures. Durant notre étude, nous présentons les diverses techniques expérimentales utilisées pendant le traitement et les moyens de caractérisation. Finalement, nous discutons les résultats obtenus avant et après cémentation.

Chapitre I : **Généralités sur** **les aciers**

I-1 Introduction

Depuis longtemps, l'acier joue un rôle très important dans la vie quotidienne des hommes. Il est utilisé dans plusieurs domaines. Il est à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Donc la connaissance de la structure et du comportement des aciers au cours de leur utilisation reste impérative¹.

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés de l'acier et leur augmentation a tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage, on parle des types aciers (classification traditionnelle), et on va étudier leur différent phase à partir de leur variétés allotropique. On peut acquérir les aciers sous des formes et des propriétés très variées grâce à l'ajout des éléments d'addition et la diversité des traitements thermiques. Il est considéré alors comme un acier allié².

I-2 Définition de fer

Le fer est l'élément le plus abondant sur terre (34,6% en fraction massique), représentant de l'ordre de 5% de la croûte terrestre externe³. Il qui ne s'obtient pas facilement à l'état pur. Lorsqu'on lui ajoute des éléments d'alliage judicieusement choisis et dosés, ses propriétés d'emploi deviennent bien plus intéressantes et variées⁴.

I-3 Fer et alliages ferreux

I-3-1 Le fer

Les Propriétés chimiques, physiques et mécaniques du fer sont^{2,5,6} :

- Caractéristiques chimiques et physiques à $T = 20^{\circ}\text{C}$.
 - Module de Coulomb : $G = 81600 \text{ N.mm}^{-2}$.
 - La température de fusion: $T_f = 1538^{\circ}\text{C}$.
 - Masse volumique: $\rho = 7870 \text{ k.gm}^{-3}$.
 - Module d'élasticité longitudinal (module d'Young) : $E = 200 \text{ Gpa}$.
 - Conductivité thermique: $73.3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

1 : M.ELOUALHI : « Amélioration des caractéristiques des métaux utilisant la projection thermique », Université de Msila, 2019.

2 : S. JEGOU : « Influence des éléments d'alliage d'aciers nitrurés ». Thèse, ENSAM Aix-en-Provence, (2009).

3 : HADRI FAIZ : Thèse de doctorat « Étude du mécanisme de corrosion atmosphérique à long terme des aciers: nouvelles stratégies de protection des aciers du patrimoine culturel », 2012.

4 : GUY MURRY : « Aciers généralité », Technique de l'ingénieur, M300, 1993.

5 : M. DUPEUX : « Aide-mémoire science des matériaux », DUNOD, Paris 2004.

6 : H. DE LEIRIS: « Métaux et Alliages », Tome 2, Editions Masson et Cie, 1971.

- Coefficient de dilatation linéique : $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$.
- Résistivité électrique: $0.104 \mu\Omega \cdot m$.
- Caractéristiques mécaniques à $T = 20^\circ C$ (fer α pur):
 - Résistance à la traction $R_m = 180$ à 290 MPa.
 - Limite d'élasticité $R_e = 100$ à 170 MPa.
 - Allongement à la rupture $A \% = 40$ à 50% .

Le fer existe sous deux variétés allotropiques différentes, c'est-à-dire avec deux formes cristallines (C.C) et (C.F.C):

- À des basses températures et jusqu'à $912^\circ C$ (A3), ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (C.C) : On l'appelle alors fer α , il ne dissout pratiquement pas le carbone: ($0.02 \% C$ au maximum à $723^\circ C$), (moins de $0.01 \% C$ à $300^\circ C$).
- À des températures supérieures à $912^\circ C$ et jusqu'à $1394^\circ C$ (A4) le réseau cristallin est du type cubiques à faces centrées (C.F.C) : on l'appelle fer γ . Le fer γ dissout facilement le carbone : ($0.8 \% C$ à $723^\circ C$), ($2.14 \% C$ à $1147^\circ C$).
- Au-dessus de $1394^\circ C$ et jusqu'au point de fusion à $1538^\circ C$, le fer retrouve la structure cubique centrée du fer α : On l'appelle alors fer δ . Il dissout un peu mieux le carbone que le fer α : ($0.07\% C$ au maximum à $1493^\circ C$).
- Jusqu'à $768^\circ C$ (A2) point de curie, le fer est ferromagnétique, au-delà il devient paramagnétique. Le caractère ferromagnétique se dit d'une substance qui peut prendre une forte aimantation.

I-3-2 Alliages ferreux

Les éléments d'addition ajoutés à l'acier ou alliage métallique à base de fer (Fe + C), jouent un rôle particulier sur les caractéristiques générales, ou un rôle commun lorsque plusieurs éléments d'addition sont présents dans la composition chimique finale⁷.

Dans le fer pur : Le passage de fer α au fer γ se produit à une température définie, les éléments d'alliages et leurs proportions donc peuvent être regroupées en deux familles^{8,9,10}:

7 : S. OULBAN : Thèse de magistère, Rapporteur Mr A. Ait Saada, Université de Boumerdes.

8 : F. Z. LEMMADI : thèse de magistère, Rapporteur Mr. A. Chala, Université de Biskra.

9 : G. MURRY: Aide-mémoire « Métallurgie, Métaux • Alliages • Propriétés », dunod, paris 2e édition, 2010.

10 : AMY ZAHIA: thèse de magistère « caractérisation de l'acier inoxydable X5CrNi18-10 et étude son oxydation à température », université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.

- La première est la famille des éléments alphagènes : ils favorisent la prépondérance à température ambiante d'une structure cristallographique cubique centrée. Ils augmentent la stabilité du fer α et de ce fait élèvent les limites du domaine d'existence de la ferrite. Ce sont notamment : le chrome, le molybdène, le silicium, le titane, le niobium, le vanadium, le tungstène, l'aluminium et le tantale.
- La seconde est la famille des éléments gammagènes : ils favorisent la prépondérance à température ambiante d'une structure cristallographique cubique à face centrée. Ils augmentent la stabilité du fer γ et de ce fait abaissent les limites du domaine d'existence de l'austénite. Ce sont notamment : le nickel, le carbone, l'azote, le cobalt et le manganèse.

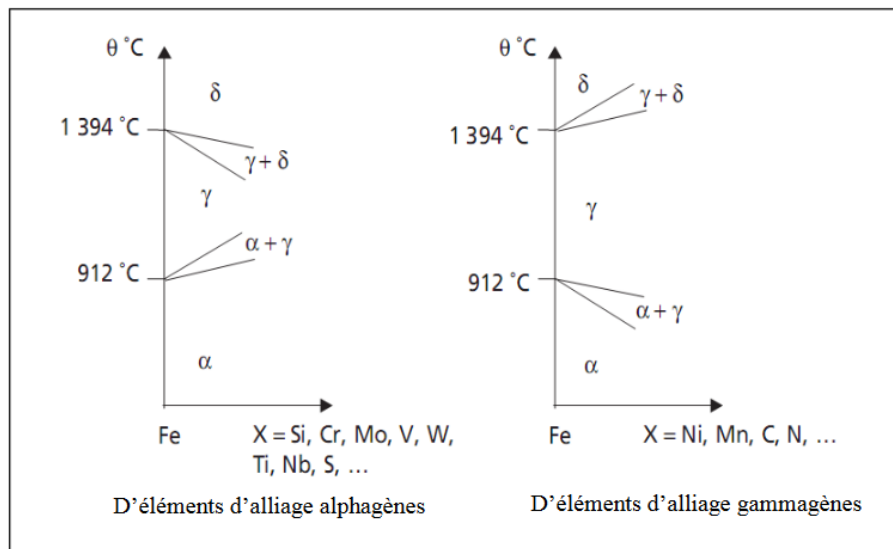


Figure I-1 : Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition¹¹.

I-4 Aciers

On appelle aciers les produits ferreux qui sont en général aptes au façonnage à chaud. L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présentant une teneur en carbone inférieure à 2 %. Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier.

Les propriétés des aciers varient dans de grandes proportions avec la teneur en carbone et avec la teneur en éléments d'apport Ni, Cr, Mn ...etc. D'une façon générale, les aciers

11 : B. ZOUIDJA : « Caractérisation mécanique et microstructurale d'un cordon soudure pour un acier X60 destiné à l'installation des hydrocarbures ». Université Amar Thelidji-Laghouat ,2012.

possèdent d'excellentes propriétés. Ce sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux^{12,13}.

On classe quelques uns des aciers les plus courants selon leur concentration en carbone, à savoir les aciers à faible teneur en carbone. Chaque groupe se subdivise en sous-groupes selon la concentration des autres éléments d'alliage. Les aciers au carbone ordinaires ne contiennent que des concentrations résiduelles en impuretés autres que le carbone et un peu de manganèse. Quant aux aciers alliés, on leur ajoute davantage d'éléments d'alliage en concentration précises¹⁴.

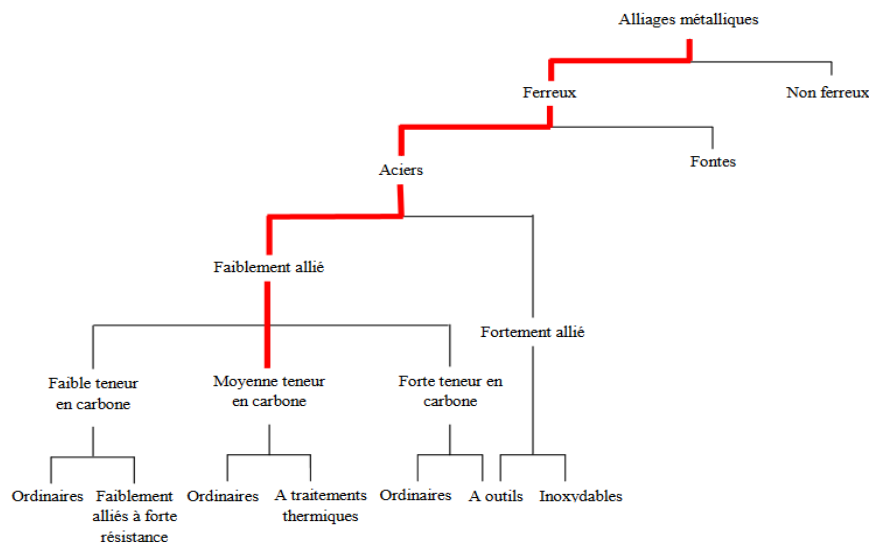


Figure I-2 : L'origine de l'acier et leur classification¹⁴.

I-4-1 Constituants des aciers

Les constituants de l'acier sont alliés au fer qui est un élément métalliques de symbole Fe, de numéro atomique 26, de masse atomique 55,85 g/mole. Il est solide à la température ambiante, devient liquide à la température 1538°C et gazeux à la température de 2880°C¹⁵. Il existe sous plusieurs formes cristallines différentes (allotropies) selon la température (figure I-3)¹⁶:

- A basse température, la structure cristalline du fer est du type cubique centrée (CC), c'est-à-dire qu'ils occupent les sommets et le centre d'un cube, avec un

12 : TTX Hang, TA Truc, NT Duong, N Pébère, MG Olivier : « Progress in Organic Coatings 74 (2), 343-348 », 2012.

13 : P.B. RAJA, M.G. SETHURAMAN: « Materials lettres 62, 133 », (2008).

14 : W.D. CALLISTER, JR : « Science et génie des matériaux», MODULO, Canada 2001.

15 : G.BERANGER, G. HENRY, G. SANZ : « Le livre de l'acier ». Technique et documentation, Lavoisier, 1994.

16 : IDRRIM : « Métal : Réparation et rénovation des structures métalliques », FAME - Version 3, Février 2018.

paramètre cristallin de $2,9 \text{ \AA}$, on l'appelle fer α . Cette structure est stable jusqu'à une température de 910°C .

- Aux températures comprises entre 910°C et 1390°C , le fer α se transforme en fer γ , de structure cristalline cubique à faces centrées (C.F.C).
- Au-delà de 1394°C , la structure cristalline stable est de nouveau du type cubique centrée que l'on appelle alors fer- δ .

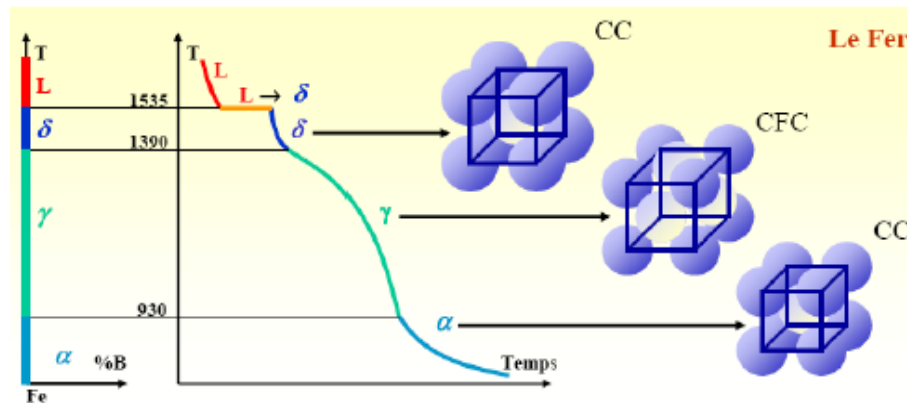


Figure I-3 : Variation de la structure cristalline du fer en fonction de la température¹⁶.

I-4-2 Produits ferreux

On appelle produits ferreux les alliages dans lesquels la proportion de fer en poids est supérieure à celle de chacun des autres constituants¹⁷.

I-4-3 Aciers à moyenne teneur en carbone

La concentration en carbone de ces aciers varie de (0.25 % m) à (0.60 % m). Leurs propriétés mécaniques s'améliorent par austénitisation, trempe, puis revenu. On les utilise le plus souvent à l'état revenu.

Les aciers à moyenne teneur en carbone ont une faible trempabilité et leur traitement thermique n'est efficace que si leur section est très mince et si la vitesse de refroidissement est très élevée. L'ajout de chrome (Cr), de nickel (Ni) ou de molybdène (Mn) facilite l'application de traitements thermiques à ces alliages et offre un large éventail de combinaisons résistance-ductilité.

Les traitements thermiques produisent des aciers plus résistants que les aciers au carbone ordinaires, mais d'une ductilité et d'une ténacité moindres. Parmi les pièces faites d'acier à moyenne teneur en carbone, mentionnons les roues de train et les voies ferrées, les

17: N. GUELAI, F. BOUTARFIF: Mémoire de fin d'étude de master, « Comportements mécaniques des aciers faiblement alliés avant et après cémentation », 2016, p (10).

engrenages, les vilebrequins ainsi que d'autres pièces de machine et des composants structuraux ayant haute résistance à l'usure et ténacité¹⁸.

I-5 Diagramme d'équilibre

Le diagramme fer-carbone (figure I-4) décrit les différents états du mélange fer et carbone selon la proportion de fer et de carbone dans le mélange. Au-dessus de 2,11% de carbone on parle de fontes, en dessous de cette concentration on parle d'acier. Ce diagramme permet de visualiser la forme d'acier que l'on a selon la température et la teneur en carbone.

Toutefois, ce diagramme n'est valable que pour des aciers non alliés, c'est-à-dire ne contenant que du fer et du carbone. Certains éléments d'alliage favorisent l'élargissement de la phase γ (éléments gammagènes) et certains autres favorisent le cas inverse (éléments alphagènes). Il existe deux diagrammes fer-carbone, car il existe du carbone à l'état libre (graphite), et du carbone en combinaison chimique (cémentite). Il y a donc un diagramme fer-graphite (dit diagramme stable) et un diagramme fer-cémentite (dit diagramme métastable)¹⁹.

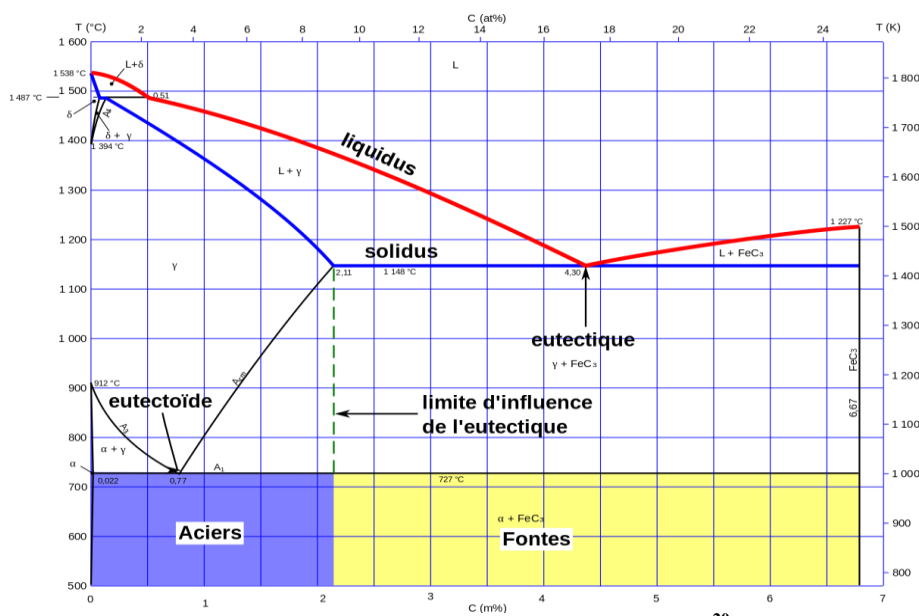


Figure I-4 : Diagramme d'équilibre fer-carbone²⁰.

I-5-1 Différentes phases observées dans les aciers

La détermination des phases et des constituants d'un acier à une température donnée est fournie par la lecture du diagramme. Il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque

18 : JP. BAILN, JM. DORLOT : « Des matériaux », Editeur presses internationales polytechnique, 3 éd ISBN 2-553-00770-1, 2000.

19 : J. BARALIS, L. CASTEX, J.C. CHAIZE : Mémoires et Etudes Scientifiques Revue de Métallurgie, « Influence des conditions de traitement sur la distribution des phases et des contraintes résiduelles dans les couches nitrurées », 43(6), 629-642, 1986.

20 : O.A.J YACOUB : cours technologie Matériels et Composants électriques, « Les métaux et alliages ferreux Fiche environnementale », EAMAC /DEI, 1 édition 2011.

région²¹. Voici ci-dessous les caractéristiques des constituants métallographiques des aciers du diagramme fer-carbone de la (figure I-4). La martensite, la bainite, la troostite et la sorbite ne se trouvent qu'après un traitement thermique. Une micrographie, est une représentation de ce que l'on voit d'un échantillon de matière au microscope^{22,23}.

I-5-1-1 La ferrite

On distingue deux sortes de ferrite :

I-5-1-1-1 La ferrite α

La ferrite α est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer α , sa solubilité au carbone à température ambiante allant jusqu'à 0,02 %. Elle est malléable et facilement usinable, sa dureté est de l'ordre de 85 à 95 HV.

I-5-1-1-2 La ferrite δ

La ferrite δ est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer δ , sa solubilité limite au carbone à haute température allant jusqu'à 0,1 %. Au microscope, la ferrite à l'aspect de grain homogène. Ses caractéristiques sont :

- La résistance à la traction : $R_m = 300 \text{ N/mm}^2$.
- Très ductile : $A\% = 40$.

I-5-1-2 L'austénite γ

L'austénite γ est une solution solide du carbone dans le fer γ . Cette phase dissout (0,8 % à 727 °C) et (2,14 % à 1147 °C), elle est stable qu'au dessus de 723 °C. C'est une phase plastique, mais sa charge de rupture est relativement faible.

I-5-1-3 La cémentite

La cémentite est une combinaison chimique de fer et de carbone (Fe_3C) dont la teneur en carbone est de 6,67 %. Elle cristallise dans un système rhomboédrique, sa température de fusion est de 1550 °C. Cette phase est très dure (environ 1000 HV), mais fragile. La cémentite existe sous forme de carbure de fer hypereutectoïde (cémentite primaire) et sous forme de cémentite secondaire (hypoeutectoïde).

21 : G. FALLOT : Thèse de doctorat « Rôle du carbone lors de la nitruration d'acier de construction et influence sur les propriétés mécaniques », (2015).

22 : L. BARRALLIER : Thèse ENSAM Aix-en-Provence, « Génèse des contraintes résiduelles de nitruration. Étude expérimentale et simulation », (1992).

23 : L. SAGHI : mémoire de magister « Etude des paramètres de revêtement des aciers à chaud par le zinc » université Mouloud mammer de Tizi-Ouzou, p(6), 2010.

I-5-1-4 La perlite

La perlite est un mélange hétérogène de ferrite α et de cémentite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) à 0,8 % en masse de carbone, qui peut avoir deux aspects : lamellaire ou globulaire. Elle est caractérisée par sa dureté (elle est de l'ordre de 210 HV), sa résistance mécanique ($R_m = 850 \text{ N/mm}^2$) et sa dureté. Facile à usiner et offre une assez bonne résistance à l'usure par frottement.

I-5-2 Types des aciers selon le pourcentage de carbone

Le point eutectoïde, est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe au point de (0.8 % de carbone ; 727°C). Lorsque le refroidissement d'un acier passe par ce point, l'acier présente une structure constituée de lamelle alternée de ferrite et de cémentite²⁴. La (figure I-5) présente la microstructure d'un acier eutectoïde :

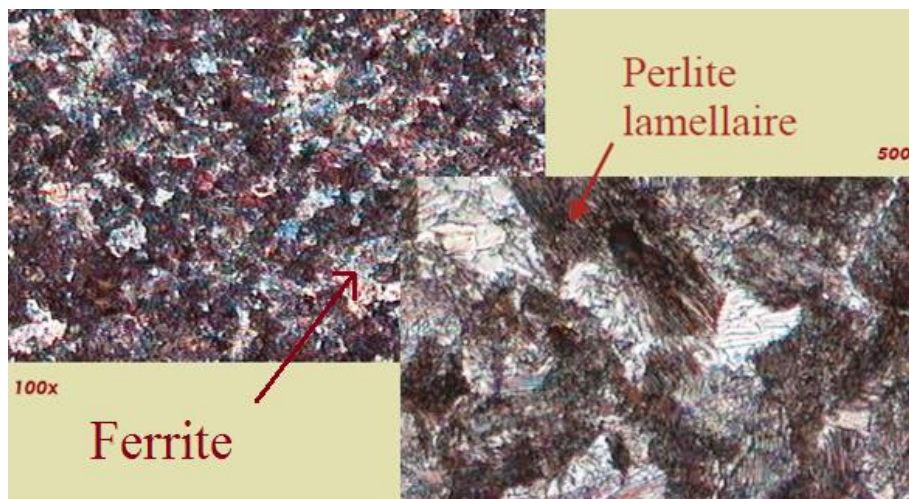


Figure I-5 : Microstructure d'un acier eutectoïde²³.

Très peu d'aciers ont une composition eutectoïde exacte. La plupart d'entre eux contiennent moins de carbone que le mélange eutectoïde et sont désignés par aciers hypoeutectoïdes qu'a un pourcentage de carbone inférieure à 0,8%. La microstructure de ces aciers est une combinaison de ferrite (α) et de perlite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). La perlite se présente sous forme d'îlots aux joints de grains de la ferrite²⁰. Ce genre de l'acier ne dissout pratiquement pas le carbone, il est doux, très malléable²⁵. La (figure I-6) présente microstructure d'un acier doux²³.

24 : G. MURRY : « Transformations dans les aciers », Techniques d'ingénieur, MI 115. Centre français D'exploitation 2002.

25 : G. FALLOT : Thèse de doctorat « Rôle du carbone lors de la nitruration d'acier de construction et influence sur les propriétés mécaniques » (2015).

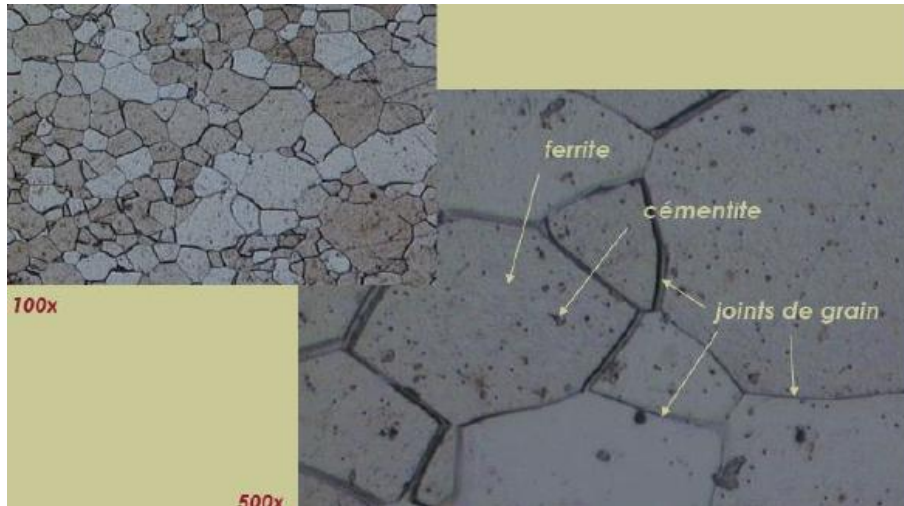


Figure I-6 : Microstructure d'un acier doux²³.

Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde (comprise entre 0,8 à 2,14%) sont appelés aciers hypereutectoïdes. La microstructure d'un acier hypereutectoïdes est une combinaison de cémentite (carbure) et de perlite²⁰. Ce genre d'acier dissout facilement le carbone²². La (figure I-7) présente microstructure d'un acier hypereutectoïde.

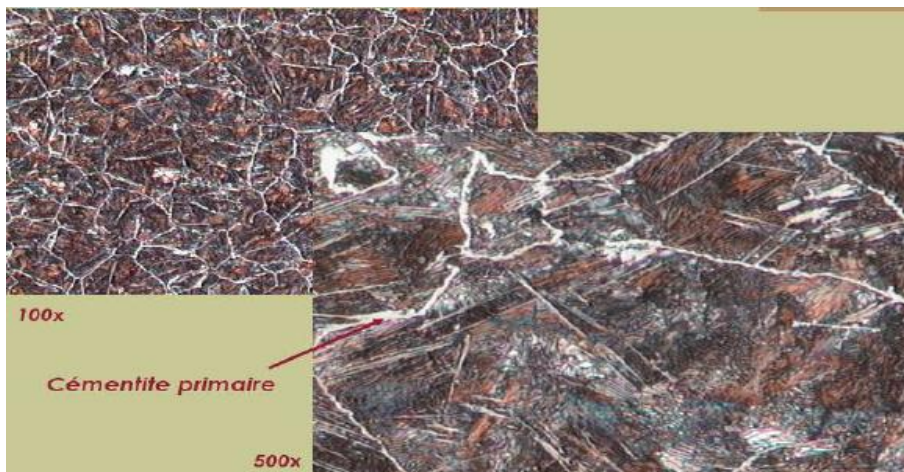


Figure I-7 : Microstructure d'un acier hypereutectoïde²³.

I-6 Caractéristiques mécaniques des aciers

Les propriétés mécaniques usuelles des aciers se rattachent aux notions courantes d'élasticité et de plasticité. L'élasticité est la possibilité que possède le métal de pouvoir subir une déformation qui cesse après la suppression, de l'effort qui l'a provoquée. La plasticité est la possibilité de subir une déformation permanente sans que rupture s'ensuit, elle prend deux aspects principaux : malléabilité (possibilité de réduire le métal en feuilles plus ou moins minces) et ductilité (possibilité de pouvoir l'étier en fils), cette propriété est utilisée dans (le forgeage, le laminage, le tréfilage ...).

Parmi les caractéristiques mécaniques des aciers les plus couramment utilisées pour une application de construction métallique est l'essai de traction :

Cette expérience qui permet de déterminer les caractéristiques mécaniques essentielles d'un métal à la température ordinaire consiste à soumettre une éprouvette de forme définie à un effort lent et continu dirigé suivant l'axe longitudinal le plus souvent jusqu'à rupture. Un dispositif mécanique permet de tracer la courbe qui représente la charge en fonction de l'allongement. Les caractéristiques déterminées sont²⁶:

- R_m : Résistance à la rupture.
- R_e : Résistance à la limite élastique.
- A% : Allongement.
- E : Module d'élasticité longitudinal.

I-7 Classification générale des aciers

Plusieurs classifications des aciers se font sur la base de la composition chimique, le procédé d'élaboration et le mode d'emploi. On s'intéresse à quelques classifications:

I-7-1 Classification selon leur composition chimique

On a désigné des alliages de fer et de carbone sous le nom aciers non alliés ou aciers au carbone, des alliages de fer plus ou moins carburés et d'autres éléments, en générale métalliques sous le nom d'acier alliés²⁷ :

- a) **Acier au carbone ou non alliés** : Contiennent du carbone en proportion croissante, du magnésium en proportion supérieure au carbone et des traces de phosphore de silicium et de soufre (tableau I-1).

Qualité (%)	C (%)	Mn (%)	P (%)	Si (%)	S (%)	Allonge (%)
Extra-doux	0.15	0.4	0.04	0.03	0.02	30
Doux	0.25	0.4	0.04-0.06	0.03-0.10	0.02-0.03	25
Mi-doux	0.35	0.4	0.06	0.15	0.03	20

26 : C. CHAUSSIN, G. HILLY « Elaboration des métaux », tome II, DUNOD, 1984.

27 : N. BOUAOUADJA : « Matériaux, Tome1, Matériaux métalliques ». Ed, office des publications universitaires, Alger, p(181), 1992.

Mi-dur	0.45	0.5	0.06	0.20	0.03	15
Dur	0.55	0.6	0.06	0.25	0.03	10
Extra- dur	0.65	0.7	0.06	0.3	0.03	5

Tableau I-1 : Classification des aciers suivant la composition chimique²⁸.

- b) **Acier alliés**: Composition variable suivant l'emploi, les éléments alliés sont en proportion variant généralement entre 0 et 5% (tableau I-2).

Eléments alliés	Proportions (%)	Observations
Carbone	0.2 ÷ 0.7	-
Silicium	0.7 2 ÷ 4 (aciers spéciaux)	Ressorts tôles de transf
Magnésium	0.3 ÷ 0.8 12 ÷ 14 (aciers très durs)	Vois ferrés
S, P, Cu, Ni, Cr, V, Molybdène	<0.1	-

Tableau I-2 : La variation des éléments des aciers alliés²⁸.

I-7-2 Classification par le mode d'emploi

On distingue les types suivants²⁸:

- **Les aciers de construction** : Ils sont utilisés pour la construction.
- **Les aciers à propriétés physiques et chimiques spéciales (aciers spéciaux)** : ils contiennent les aciers inoxydables, les aciers à propriétés magnétiques spéciales, les aciers à propriétés de dilatation... etc.
- **Les aciers à outils** : ils sont utilisés dans la fabrication d'instruments (permettant de façonner les matériaux). Les nuances d'aciers à outils sont rangées selon le mode de travail de l'outil, en quatre classes comme le montre (tableau I-3).

28 : S. JEGOU, L. BRRALLIER, R. KUBLER, M.AMJ SOMERS : « Evolution of residual stress in the diffusion zone of a model Fe-Cr-C alloy during nitriding », HTM Journal of Heat Treatment and Materials, Vol. 66, No. 3, pp. 135- 142, 2010.

Classes	Caractères communs
Aciers à outils au carbone	Aciers d'usage général
Aciers à outils alliés pour travail à froid	Aciers à haute résistance
Aciers à outils alliés pour travail à chaud	Aciers résistant aux chocs thermiques
Aciers rapides	Aciers sur carburés

Tableau I-3: Les classes d'aciers à outils²⁹.

I-8 Aciers de cémentation

Ce sont des aciers à grains fins et à basse teneur en carbone ($C < 0.2 \%$). Les éléments d'alliage sont choisis en fonction de la massivité des pièces et des caractéristiques à cœur visées, ce sont²⁹:

- Aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation.
- Acier au carbone XC10 - XC12 - XC18.
- Acier au manganèse chrome 16MC5 - 20MC5.
- Acier au chrome – molybdène 18 CD4.
- Acier au nickel – chrome 10NC6 - 16NC6 - 20NC6 - 14NC11 - 18NC8.
- Acier au nickel – chrome – molybdène 20NCD2-18NCD6 - 16NCD13.
- Acier au bore 21B3-20MB5-19NCDB2.
- Aciers de cémentation pour organes mécaniques massifs hautement sollicités.

I-8-1 Acier faiblement alliés

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5%. Ils sont choisis chaque fois qu'une haute résistance est exigée. Ils sont utilisés en état de livraison ou avec traitement³⁰. Ils sont désignés par³¹:

- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone exprimé en centième pour cent (multiplié par 100).

29 : J. BLOUET, R. GRAS: « traitement et revêtement de surface pour application tribologique », P(34), CETIM, 1994.

30 : M. COLOMBIE : « Matériaux métalliques», 2ème éd, 2017.

31 : M.ELOUALHI : Mémoire de master « Amélioration des caractéristiques des métaux utilisant la projection thermique ». Université de Msila, p(6), 2019.

- Suivi de symboles normalisés des éléments alliés dans l'ordre des teneurs décroissantes, c'est à dire, le premier élément indique toujours l'élément dont la teneur est la plus élevée.
- Les symboles sont suivis par des nombres indiquant la teneur moyenne des éléments d'additions multiplié par 4 pour les éléments Cr, K, M, N, S et par 10 pour tous les autres.

La désignation des éléments mentionnés ci-dessous est négligée dans le cas où leur teneur est égale ou inférieure à celle mentionnées ci-dessous (tableau I-4)³².

M, S	N	Cr	D, V
1 %	0.5 %	0.25 %	0.10 %

Tableau I-4 : Les pourcentages des éléments d'addition peuvent être négligés³²

Exemple ²¹ :

45 CD 20 – 4 : c'est un acier faiblement allié contenant :

- ✓ 0,45 % de carbone.
- ✓ $20/4 = 5$ % de chrome (Cr).
- ✓ $4/10 = 0,4$ % de molybdène (D).

20 NC 6 : c'est un acier faiblement allié contenant :

- ✓ 0,20 % de carbone.
- ✓ $6/4 = 1,5$ % de nickel (N).
- ✓ Le pourcentage de chrome (Cr) est inférieur à 1,5 %.

I-9 Influence spécifique des éléments d'addition

L'action des éléments d'addition sur les caractéristiques des aciers dépend essentiellement de deux facteurs. Le premier facteur est le type de modification qu'ils apportent de stabilité de l'austénite. Certains éléments, appelés gammagènes tels que le nickel et le manganèse, élargissent le domaine de stabilité de l'austénite et abaissent les températures de transformation. On peut donc obtenir des structures austénitiques.

Le chrome et le molybdène rétrécissent le domaine de stabilité de l'austénite et élèvent les températures de transformation. Le deuxième facteur est la tendance des éléments à se substituer en partie aux atomes de fer de la cémentite Fe_3C , Ou à former des carbures.

³² : SAID BENSAAIDA (Professeur Chef d'équipe de recherche, Laboratoire LARRHYS): « Cours de traitements thermiques, classification et fabrication de l'acier et des fondations ». University Mohamed khider de Biskra,

Par ordre d'affinité avec le C : Cr, W, Mo, V, Ti, Nb. Le Si et le Ni qui ne forment pas des carbures se retrouvent en solution dans la ferrite³⁰.

Eléments	Effet sur l'acier
Carbone	Augmente la dureté, la résistance à la traction et à la corrosion, diminue la ductilité et la malléabilité.
Silicium	Présente dans tous les aciers, a faible pourcentage (0.2 à 0.5)%, rôle de désoxydant. Allié et à plus forte teneur, améliore la limite élastique et accroît la résistance à l'oxydation.
Manganèse	Augmente la trempabilité des aciers alliés et permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite, où il remplace une partie du fer.
Nickel	Augmente la ductilité, surtout aux très basses températures.
Chrome	Agit sur les points de transformation de l'acier et ralentit ainsi la vitesse de transformation de l'austénite au cours du refroidissement (augmentation de la trempabilité).
Molybdène	Augmente la trempabilité des aciers alliés.

Tableau I-5 : Eléments d'additions et leurs effets sur l'acier^{30,33,34}.

I-10 La fabrication des aciers

L'acier s'élabore actuellement de deux manières soit dans des convertisseurs, à partir de la fonte élaborée à l'aide des hauts fourneaux soit dans un four électrique, à partir d'acier de récupération on parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique. En résumé les étapes de la fabrication de l'acier^{35,36,37}:

I-10-1 Métallurgie primaire

La formation de la fonte : le minerai de fer et le coke sont introduits dans le haut fourneau par le haut, la chaleur provoquant la combustion du coke et l'élimination des éléments chimiques contaminants. Le fer se charge ensuite de carbone au cours de sa descente et se transforme en fonte, qu'il faut alors séparer d'un mélange de déchets appelé laitier.

33 : M. WIEST, E.KASSA, W.DAVES, J.C.O. NIELSEN and H.OSSBERGER : « Assessment of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact ». Wear : 265, 1439-1445.

34 : J. W. CHRISTIAN : « Rapids Solidification, The theory of Transformations in Metals and Alloys », p(1088) , 2002.

35 : J. PHILIBERT, A. VIGNES, Y. BRECHET, P. COMBRADE : « Métallurgie Du minerai au matériau », DUNOD, 2 édition, 2013.

36 : AZOUZ AHMED, mémoire de master « Effet de la nature de l'acier sur un traitement de cémentation ». Université Mohamed Boudiaf - Msila Faculté de technologie, 2016.

37 : HAZARD, COLL : « Mémotech — Structures métalliques »p (14), 2000.

I-10-2 Métallurgie secondaire

- a) La conversion de la fonte en acier : la fonte en fusion est ensuite versée sur de la ferraille dans un convertisseur à oxygène où de l'oxygène est insufflé pour éliminer le carbone sous forme de CO_2 .
- b) L'affinage : l'acier obtenu est affiné en ajoutant des éléments (nickel, chrome...) pour former différents alliages et modifier les propriétés mécaniques de l'acier en fonction des besoins.

I-10-3 Coulée continue et en lingots

L'acier liquide est coulé dans une lingotière en cuivre de section carrée, rectangulaire ou ronde (selon le demi-produit fabriqué). Le métal commence à former une peau solide dans la lingotière violemment refroidie à l'eau. La coulée peut être également faite en lingotière : l'acier est coulé et solidifié dans des moules en fontes. Après un réchauffage à 1200°C , ils sont écrasés dans un laminoir pour être transformés en, brames, ébauches de produits plats, et blooms, futurs produits longs (blooming).

I-10-4 Laminage des produits plats et longs

La brame est réchauffée dans un four pour rendre le métal plus malléable, donc plus facile à étirer et à mettre en forme. L'ébauche est ensuite amincie par écrasements progressifs entre les cylindres du laminoir. Les blooms ou billettes issues de la coulée en lingots ou de la coulée continue sont transformés en poutrelles, profilés, rails, barres ou fils.

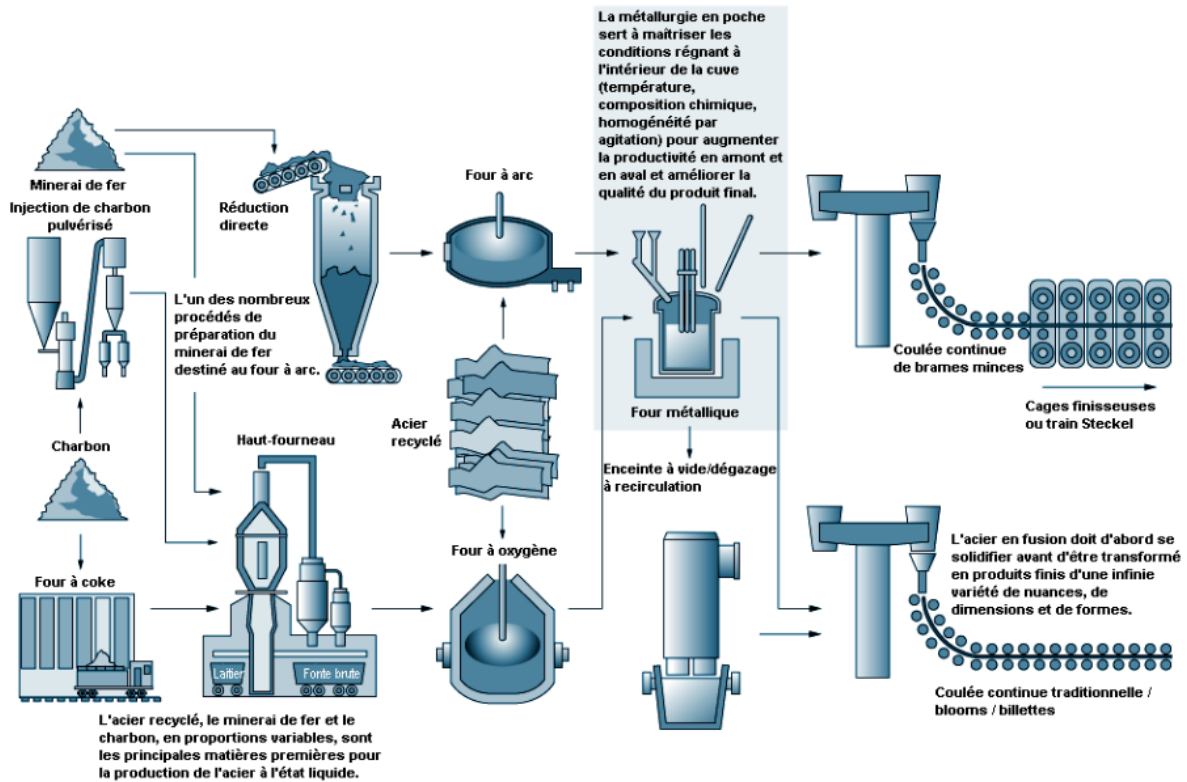


Figure I-8 : Les différentes étapes pour l'élaboration de l'acier³⁸.

I-12 Défauts des aciers

Le manque d'homogénéité de l'acier se traduit par certains défauts caractéristiques: Les uns sont naturels, dépendants du métal lui-même ou bien de la coulée même surveillée, les autres sont accidentels et se produisent lorsque certaines précautions ne sont pas observées lors des traitements mécaniques ou thermiques. Les défauts des aciers les plus courants sont³⁹ :

- Soufflures : c'est une poche accidentelle gonflée de gaz qui est située la plupart du temps dans le cœur et dans le voisinage de la peau du lingot.
- Pailles : une paille est une soufflure que l'opération de laminage aplatit et étire. Elle est apparente sur les surfaces polies sous forme d'un trait noir, dans la direction du laminage. Ce trait défectueux devient plus vif sous l'action du passage et frottement de la toile émeri, sa disparition a lieu sous l'effet de la lame ou de la meule.

38 : D. CHEVALIER : Thèse de doctorat « Contribution à la compréhension du couplage thermomécanique en laminage à chaud sur l'évolution des défauts de coulée », p (), 2016.

39 : L. GUASCUEL : « La pratique des industrielles mécaniques, les défauts des aciers », p (323-323). DUNDO, 1955.

- Repli du métal : c'est un défaut soit de forgeage ou d'emboutissage, qui se présente sur les surfaces polies, par un trait ayant sensiblement le même aspect que la paille, mais bien souvent très étendu. Ces plis sont si apparents que le rebut de la pièce s'impose immédiatement
- Crique : C'est une déchirure superficielle longitudinale ou transversale, elle provient d'ordinaire des difficultés du retrait qu'éprouve l'acier pendant le temps de sa solidification surtout dans la région des angles même arrondis ou d'une rupture du métal.
- Tapure : c'est un décollement intérieur, un défaut vraiment gênant diminuant la sécurité, car la tapure constitue une solution de continuité qui est susceptible de se développer, même sous l'influence de faibles efforts. La tapure résulte d'un glissement moléculaire créé par refroidissement, qui se présente généralement sur les surfaces polies par un trait de forme centré ou irrégulier.
- Retassure : elle est produite par l'évacuation des gaz et le retrait du métal dans le haut du lingot en refroidissement, c'est un entonnoir de retassement (moyens préventifs : emploi courant d'une masselotte coiffant la tête du lingot, compression préalable,...).

I-13 Conclusion

Nous concluons que les aciers sont des matériaux composés essentiellement de fer, 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'aditions (éléments métalliques) ou de teneur en carbone qui permet de classé les aciers selon leur concentration dans le matériau en acier faiblement allié ou acier au carbone, sinon acier allier. On constate aussi qu'il y a des différentes étapes de fabrication de l'acier et des défauts qui peuvent observer au cours de fabrication.

Chapitre II :

Cémentation

des aciers

II-1 Introduction

La cémentation est le plus ancien traitement thermochimique maîtrisé par l'homme utilisé pour augmenter les propriétés mécaniques et chimiques de la surface d'une pièce à basse teneur en carbone. Pour cela on augmente la teneur superficielle en carbone par différentes méthodes ou principes de cémentation jusqu' à une concentration exigée⁴⁰. La diffusion est toujours suivie de trempe pour former de la martensite conduisant à une bonne résistance à l'usure et à la fatigue³. Ce traitement surfacique est très impotente dans les constructions mécaniques parce que les propriétés mécaniques et chimiques des couches extérieures des pièces traitées peuvent être améliorées. Selon le processus choisi, la surface traitée présentera une résistance à l'usure et à la corrosion améliorée avec une dureté élevée⁴¹.

II-2 Le but de cémentation

La cémentation est un traitement thermochimique de diffusion de carbone qui permet d'obtenir une couche superficielle de forte dureté en surface jointe à une bonne ductilité au cœur⁴².

En fait, on obtient un matériau composite avec une structure macroscopiquement hétérogène présente une profondeur résiliente, une zone superficielle, cette technique est pour améliorer les caractéristiques superficielles d'un acier contre l'usure, par l'augmentation de la dureté et contre la fatigue et la corrosion sous contrainte par la génération de contraintes résiduelles de compression^{43,44}.

II-3 Principe de la cémentation

La cémentation est une opération chimique qui consiste à faire absorber du carbone par des pièces en acier doux et demi-doux (la teneur de carbone généralement inférieure de 0.2%). Il suffit pour cela de chauffer la pièce à cémenter à une température suffisante et nécessaire à la formation de la structure austénitique et favorise la diffusion du carbone, en présence d'une source riche en carbone, charbon de bois + carbonate de baryum ou sels alcalins + cyanure de potassium ou gaz carbonique + gaz d'hydrocarbure. La couche superficielle absorbe le

40 : R. LANGEVIN : « Guide d'auto –Apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique ». ERFORM, 2015.

41 : J.R. DAVIS: 'Surface Hardening of Steels- Understanding the Basics'; ASM International, 2002.

42 : M.M. BCHAUPINIL, L. SERAPLIR, R. TRIWT: « Analogies et différence entre les traitements de carbonituration et de cémentation », Aciers spéciaux N°13, 1975.

43 : R. L'EVEQUE: « Traitement superficiels des aciers à outils », techniques de l'ingénieur, M1135, Paris, France, 1993.

44 : H. HERNES, H. Fr. HINZ, I. M. Hucklenbroich: « Progress in tool steel, proceeding of the 4th international conference on tooling, 1996, University Bochum ».

carbone et se transforme en acier très carburé⁴⁵. L'opération est réalisée dans un milieu susceptible de céder du carbone à l'acier porté à une température supérieure à 700°C, le plus souvent entre 850°C et 1000°C (selon les aciers). Le durcissement est accompli lorsque la couche enrichie en carbone est trempée pour former de la martensite conduisant à une bonne résistance à l'usure et à la fatigue^{4,5}.

II-4 La Profondeur de cémentation

La couche traitée peut être caractérisée par le profil de micro-dureté qui 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 550HV, (figure II-1)⁴⁶. La profondeur de durcissement par cémentation dépend partiellement de la trempabilité des aciers, mais surtout des conditions du traitement. L'épaisseur visée pour la couche cémentée varie selon la destination et le volume de la pièce. Les épaisseurs importantes (0.8 mm à 1.8 mm ou plus) sont réservées à des pièces devant résister à l'usure et des pièces de forte section. Pour les pièces moyennes de faibles sections, tels que les engrenages d'automobile, des épaisseurs de 0.2 mm à 0.8 mm peuvent être suffisantes⁴⁷.

Les aciers ayant des concentrations élevées en éléments gammagènes (Si, Ni) augmentent la diffusivité du carbone dans l'austénite mais réduisent la cinétique de transfert du carbone à partir de l'atmosphère vers la surface de l'acier, par contre, les aciers avec des éléments carburigènes (Cr, Mo) augmentent le coefficient de transfert de masse dans l'atmosphère en améliorant l'évolution du profil de carbone⁴⁸.

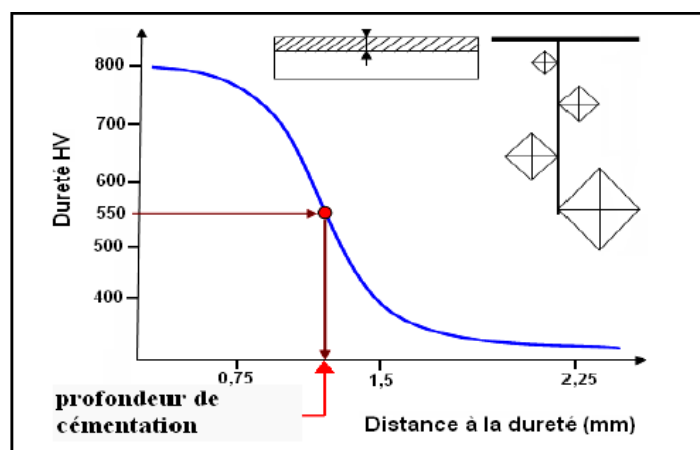


Figure II -1: Profondeur conventionnelle de cémentation⁶.

45 : BENJAMIN MARTIN: Résumé de cours « Matériaux », p (11, 12).

46: J.BANALIS, G.MEADER : « Précis de métallurgie-élaboration, structure, propriétés, normalisée », Edition Nathan 1997.

47: J.P.PEYRE, TOURNIER: « Choix des traitements thermiques superficiels », laboratoire RPM CETIM Senlis 1985.

48: K. OLGA, ROWAN, RICHARD D and JR. SISSON: « Effect of alloy composition on carburizing performance of steel », journal of phase equilibria and diffusion, JPEDAV, ASM International 2009.

II-5 Techniques de cémentation

Les agents de cémentation peuvent être solides, liquides ou gazeux.

II-5-1 Cémentation solide (en caisse)

Les ciments solides sont des mélanges à bases de matière carbonées aptes à former les gaz ou les espèces carburantes (CO). La cémentation se fait en vase clos pour éviter que les gaz ne s'échappent pas, d'où le nom de cémentation en caisse donné à ce procédé, peu utilisé actuellement et réservé au traitement de grosses pièces ou de séries limitées de petites pièces⁴⁹.

II-5-2 Cémentation liquide

Les pièces sont immergées dans un bain de sels fondus maintenu à la température choisie pour la réaction chimique et la diffusion. L'agent de carburation a pour base le groupe des cyanures alcalins. Le ciment liquide contient de cyanure dont le rôle est d'accélérer la diffusion du carbone dans l'acier (la pénétration est de l'ordre 0.33 mm/h). Le traitement s'effectue de (700 à 910 °C) environs⁵⁰.

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, atmosphères qui sont caractérisées par leur potentiel carbone. Le potentiel carbone d'une atmosphère est défini comme étant « la teneur en carbone à la surface d'un échantillon de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation considérée dans les conditions retenues ». Il y a carburation si, initialement l'activité du carbone dans le métal est inférieure au potentiel carbone de l'atmosphère. Dans le cas inverse, il y a décarburation du métal. Quand ces deux variables sont égales le système est à l'équilibre et n'évolue pas. Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libéré s'insère dans le réseau cubique à face centrée du fer⁵¹.



49: ARFAOUI ALI, CHAKER MED AMIR: « Traitements mécaniques et traitements thermochimiques ». Matériaux métalliques-chapitre 9.

50: DR. GILLES OLIVE: « Chimie des matériaux » 3eme Edition 2005, P (47,48).

51: H. HERNES, H. FR. HINZ and I. M. HUCKLENBROICH: « Progress in Tobol steel, proceeding of the 4th international conference on tooling », 1996, University Bochum.

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 fatigue⁵². La formation des oxydes internes est un phénomène typique dans la cémentation gazeuse^{53, 54}.

Les quantités des oxydes internes formés et leurs profondeurs dépend des conditions de la cémentation (la température, le temps, le débit de carbone...), 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 austénitiques soit à l'intérieure des grains. Ceci peut influencer sur la résistance à la fatigue des outils. La (Figure II-2) représente la structure d'une couche cémentée à 980°C pendant 2h (33% H₂, 28% CO, 0.8% CH₄, enrichi avec propane C₃H₈), indiquant la présence d'une oxydation interne^{55, 8}.

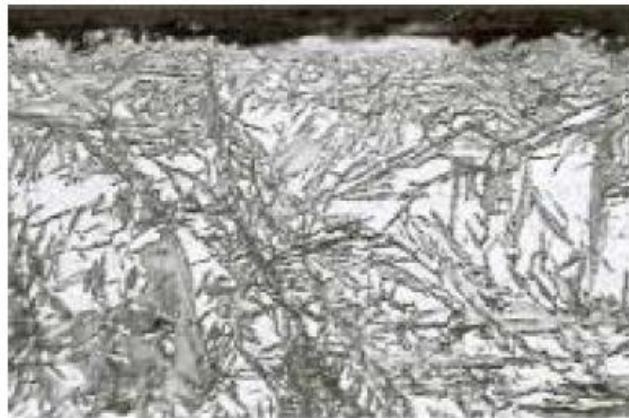


Figure II- 2: Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe¹⁵.

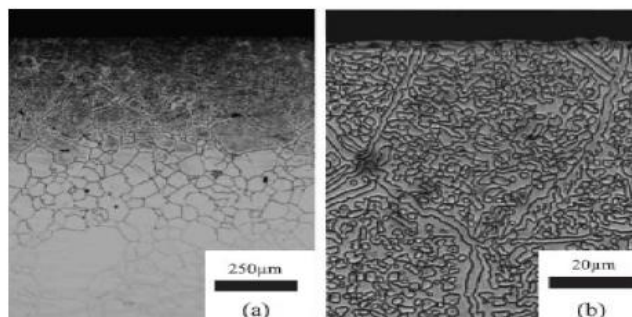


Figure II- 3: Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier SUS 316 L¹⁵.

52: G. KRAUSS: « Microstructure and properties of carburized steel », Metals handbook, heat treating, vol 4, materials park, OH: ASM international, 1991. P (363–75).

53: G. PARRISH: « Carburizing: microstructures and properties », materials park, OH: ASM international; 1999.

54: J.P.PEYRE, TOURNIER: « Choix des traitements thermiques superficiels », RPM CETIM Senlis 1985.

55: Y. UEDA, N. KANAYAMA, K. ICHII, T. OISHI: « Surface and Coatings Technology », 2005, p(50).

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 Carbone libre⁵⁶.

II-6 Rôle des éléments d'alliage sur la cémentation

Un acier de cémentation a une teneur en carbone ($C < 0,2\%$) et une combinaison d'un élément métallique avec un ou plusieurs métaux par fusion (alliages), au cours de la cémentation d'un acier, la teneur en carbone est augmentée ou l'acier sera dur et les alliages assurent l'amélioration de leur aptitude à subir la trempabilité après un refroidissement énergiquement.

II-6-1 Carbone

Le gradient de concentration obtenu par la cémentation entre le cœur et la couche de la pièce cémentée est d'autant plus accentué que le métal de base est pauvre en carbone. Généralement, les aciers de cémentation ont une teneur en carbone inférieure à 0.2%. Dans les aciers trempés et revenus, le carbone a un effet sur la dureté de la martensite obtenue et sur l'abaissement de la température M_s (températures de début de transformation martensitique). Il est aussi susceptible de modifier la trempabilité par effet de l'association avec les éléments d'alliage. Cette influence est d'autant plus forte que l'acier est plus riche en éléments d'alliage, elle peut devenir nulle quand ces derniers sont absents^{57,58}.

La progression de la diffusion vers l'intérieur est plus facile dans la ferrite que dans l'austénite à cause de l'énergie d'activation de l'austénite qui est plus élevée.

Aux températures de l'existence de la ferrite (au dessous du point A_1), la cémentation ne se fait pas par suite d'une faible solubilité du carbone dans le fer. La cémentation est réalisée généralement aux températures supérieures au point AC_3 (920 à 950°C) qui rendent stable l'austénite, dissolvant en quantité le carbone.

56 : V.YAKUB, A.TIJANI: « Modeling and simulation of thermochemical heat treatment processes: A phase field calculation of Nitriding in Steel », PHD thesis, university of Bremen 06/2008.

57 : M. MOUFLARD: « Utilisation des atmosphères contrôlées ». Traitement thermique, n°14, 1965, p (23).

58 : GUY MURRY : « Aciers pour traitements thermiques : propriétés et guide de choix ». P (4).

Pendant la cémentation, les atomes de carbone diffusent dans le réseau du fer γ . Lorsque la limite de saturation de l'austénite en carbone, déterminée par la ligne SE du diagramme (Fe-Fe₃C) est atteinte, les conditions favorisent la formation à la surface d'une couche de cémentite continue.

Dans les conditions réelles, il est rare qu'on observe la formation d'une couche de cémentite continue à la surface. Dans les conditions courantes, la cémentation au-dessus du point AC₃, ne forme que l'austénite qui se décompose après refroidissement lent en précipitant la ferrite et la cémentite. Dans ces conditions un refroidissement lent produit trois zones dans la structure de la couche cémentée (figure II- 4)⁵⁹ :

- Hypereutectoïde constituée de perlite et de cémentite secondaire formant un réseau suivant l'ancien grain d'austénite.
- Eutectoïde constitué de perlite lamellaire.
- Hypoeutectoïde constituée de perlite et de ferrite.

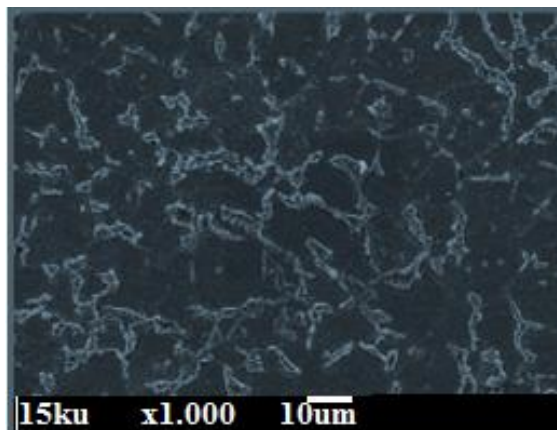


Figure II-4 : Micrographie par microscopie électronique à balayage d'un acier 16MnCr5 cémenté 10 minutes à basse pression à 950 °C.

II-6-2 Autres éléments d'alliages

Généralement, les nuances d'aciers traitées (tableau II-1) contiennent des éléments d'alliage qui influent fortement sur les propriétés de la pièce en intervenant sur⁶⁰:

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

59: SAID BENSADA (Professeur Chef d'équipe de recherche, Laboratoire LARRHYS): « Cours de traitements thermiques, classification et fabrication de l'acier et des fondations », University Mohamed khider de Biskra, p (84-58).

60: Atlas des courbes de transformation des aciers de fabrication française. 1974, IRSID, CPS, Paris.

Désignations (Nom AFNOR)	Compositions chimiques (%m)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
16MnCr5	0,14-0,19	0,4	1-1,3	0,8-1,1	-	-
18CrMo4	0,13-0,10	0,15-0,35	0,5-0,8	0,9-1,2	0,4	0,2-0,3
16NiCr6	0,14-0,17	0,15-0,4	0,4-0,6	1,4-1,7	1,4-1,7	-
20NiCrMo2	0,17-0,23	0,15-0,4	0,6-0,9	0,35-0,65	0,4-0,7	0,15-0,25
27CrMo4	0,29	0,3	0,7	1,07	0,28	0,2
27MnCr5	0,26	0,265	1,29	1,29	0,145	0,04
29MnCr5	0,26-0,32	0,1-0,4	1,1-1,4	1,15-1,3	-	-

Tableau II-1 : Désignations métallurgiques communément cémentées²⁰.

II-7 Traitements après cémentation

Pour donner aux pièces leurs propriétés finales, on les soumet après cémentation à des traitements thermiques dont le but¹³:

- 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 Carbone.

Le traitement thermique conduit dans la couche cémentée à une structure composée de martensite et 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 °C 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 50%) 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^{61, 62}.

Lorsque la couche superficielle riche en carbone subit la transformation martensitique, le cœur déjà transformé et occupant un volume très important par rapport aux couches superficielles se comporte comme un corps rigide qui impose ses dimensions empêchant l'expansion accompagnant l'accroissement de volume dû à la transformation martensitique. En conséquence de cette «contrainte dimensionnelle», les couches superficielles riches en carbone sont mises en compression et la zone centrale en traction pour satisfaire l'équilibre mécanique des forces et des moments⁶³.

Des concentrations plus élevées dégradent les propriétés mécaniques de la pièce cémentée. Les éléments d'alliages influent fortement sur la structure de la couche cémentée, le mécanisme de sa formation et la vitesse de diffusion. Le chrome et le tungstène diminuent le coefficient de diffusion du carbone dans l'austénite, car il augmente l'énergie d'activation, mais en renforçant la concentration du carbone à la surface, augmente quelque peu, la profondeur de cémentation. Le nickel au contraire accroît la vitesse de diffusion mais diminue la concentration du carbone à la surface et donc la profondeur de cémentation. Le manganèse n'exerce presque aucune action sur le coefficient de diffusion, accroît la concentration du carbone à la surface et augmente donc quelque peu la profondeur de cémentation⁶⁴.

II-8 Traitements préparatoires de la surface

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 sont⁶⁵:

- Chimiques ou électrolytiques.
- Mécaniques (Polissage, Abrasion par projection, Satinage mécanique ...).

61: 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.

62: AZOUZ AHMED, mémoire de fin d'étude en master « effet de la nature de l'acier sur un traitement de cémentation ». Université Mohamed Boudiaf - Msila Faculté de technologie, 2016.

63: NATALIA LOUKACHENKO : « Mise au point de surfaces résistant a des sollicitations déroulement- glissement sous des pressions de contact levées de 2,5 GPa et jusqu'à 300°C ». Applications aux engrenages et aux transmissions par courroies. P (21).

64: SAID BENSADA (Professeur Chef d'équipe de recherche, Laboratoire LARRHYS): « Cours de traitements thermiques, classification et fabrication de l'acier et des fondations », University Mohamed Khider de Biskra, p (84-58).

65: C. PIGNET, 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 -p (47).

II-9 Etapes de cémentation

Il faut que la couche superficielle subisse un traitement thermique conduisant à la formation d'une phase dure par transformation martensitique ou par précipitation⁶⁶ :

- Traitement de durcissement superficiel par trempe avant cémentation par le carbone.
- Traitement de durcissement superficiel par trempe après cémentation par le carbone.
- Cémentation gazeuse à pression atmosphérique (la plus employée).
- Traitement thermique après cémentation.

II-9-1 Etape d'enrichissement de carbone

L'enrichissement en carbone est l'étape de traitement thermochimique de diffusion. Par mise en contact avec un milieu cémentant, on forme à la surface de l'acier (teneur initiale en carbone ($C > 0,2\%$)) une couche superficielle plus ou moins profonde enrichie en carbone. Les teneurs atteintes en surface varient selon les applications de 0,7% à 1,2% de carbone en général. Ce traitement est toujours suivi d'une trempe afin d'obtenir le durcissement de la couche enrichie par formation de martensite^{67,68}. Ce traitement procure les avantages suivants⁶⁹:

- Une couche dure de profondeur déterminée.
- Une bonne résistance à l'usure et à la fatigue.
- L'amélioration de la dureté au cœur permettant d'obtenir la résilience recherchée.

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 martensitique⁷⁰. 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

66: RACHID GHERIANI: thèse de doctorat « Influence de la proportion de phases dans le domaine de températures (400°C–1000°C) sur des films de Ti et de Cr, déposes sur des substrats en aciers, Traitements de transformation structurale », 2005, p (7).

67: J.P.PEYRE, C.TOURNIER: « Choix des traitements thermiques superficiels », édition. CETIM 1985.

68: N. GUELAI, F. BOUTARFIF: Mémoire de fin d'étude de master, « Comportements mécaniques des aciers faiblement alliés avant et après cémentation », 2016, p (10).

69: BEUMELBURG (W.) Comportement d'éprouvettes cémentées présentant divers états superficiels, des teneurs en carbone variables en surface lors d'essais de flexion rotative, flexion fatigue et résilience, Traitement Thermique.

70: M. COLOMBIE: « Matériaux industriels, matériaux métallique », DUNOD, Paris 2000.

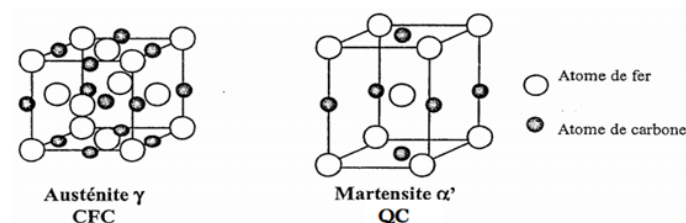
(perlite et bainite) au centre des pièces⁷¹. Le diagramme TRC de l'acier permet de définir, pour la procédure d'austénitisation correspondante, les conditions de refroidissement qui provoquent la transformation de l'austénite en martensite (ou éventuellement en martensite + bainite)⁷². La formation des 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 outils⁷³.

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 dépend⁷⁴:

- 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.

II-9-3 Structure obtenue après trempe

Après trempe directe, les régions voisines de la surface sont constituées de martensite aciculaire et d'austénite résiduelle. La taille des plaquettes de martensite dépend de la taille des grains d'austénite initiale. Une double trempe permet d'obtenir des structures plus fines et très homogènes. A des distances croissantes vers l'intérieure, la teneur en carbone diminue, la fraction volumique d'austénite résiduelle diminue au profit de celle de la martensite. Les mailles cristallographiques de l'austénite et de la martensite sont présentées sur la (figure II-5)⁷⁵.



71: L.COLOMBIER: « Les aciers à outils et leur traitement thermique », PYCEDITION, Paris 1971.

72: L. SCHLIDT: « Tool materials for molds and Dies », Colorado school of Mines Press, 118-64, 1987.

73: R. LÉVÊQUE: « Traitements thermiques dans la masse des aciers à outils », technique de l'ingénieur, M1134, 2013.

74: R. LÉVÊQUE: « les aciers à outils », technique de l'ingénieur, M330A, 1979.

75:D. A. PORTER, K. E. EASTERLING : « Phase transformations in metals and alloys », 1992.

Figure II- 5 : Structures cristallines de l'austénite γ et de la martensite α' dans les aciers⁷⁶.

II-9-3-1 Martensite

La martensite est une phase métastable obtenue par un refroidissement rapide de l'austénite. C'est une solution solide d'insertion sursaturée en carbone dans le fer α , de même composition que l'austénite initiale⁷⁷. Cette sursaturation en carbone entraîne une distorsion du réseau de la maille qui devient quadratique, distorsion d'autant plus marquée que la teneur en carbone de l'acier est élevée. Dans les aciers, il existe deux structures cristallographiques de martensite⁷⁸:

- La martensite α' de structure quadratique centrée (QC).
- La martensite ϵ de structure hexagonale compacte (HC).

Les deux structures forment pour de faibles énergies de faute d'empilement. Au cours de cette étude, seule la martensite est considérée.



Figure II-6: Micrographie de la martensite⁷⁹.

II-9-3-2 Austénite résiduelle

Au cours de la cémentation, quand la profondeur de la couche durcie en surface augmente, la teneur de l'austénite résiduelle augmente aussi, à cause de l'augmentation de la teneur en carbone, et pour la même raison la précipitation des carbures et l'oxydation interne peuvent se développer⁸⁰. L'austénite résiduelle est un constituant de dureté faible inférieur à 320 HV, il est très défavorable à la dureté mais a une bonne résistance à la fatigue en flexion⁸¹. L'austénite, ou fer gamma, de structure cubique à faces centrées, est le constituant stable du

76: 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.

77: SAHRAOUI NABIL, KORICHE ABDELGHANI: Mémoire de fin d'étude de master, « Etude d'élaboration et caractérisation des composés métallique revêtant les acier », universitaire de Msila, 2017.

78: ROMAIN GUIHEUX: Thèse de doctorat, « Comportement d'aciers à transformation de phase austénite-martensite pour la simulation du grenailage de précontrainte », 2016.

79: SAHRAOUI NABIL, KORICHE ABDELGHANI: Mémoire de fin d'étude de master, « Etude d'élaboration et caractérisation des composés métallique revêtant les acier », universitaire de Msila, 2017.

80: M.BONIADRI, F. D'ERRICO, C.TAGLIABUE: « Fluence of carburizing and nitriding on failure of gears- a case study », Eng. Fail. Anal, 2006.

81 : HARTEREI GERSTER: « traitements thermiques, la trempe superficielle », p (4).

fer pur entre 910°C et 1450°C. Cette allotropie permet une grande solubilité du carbone (jusqu'à 2,1% massique à 1147°C)⁸².

À haute température, elle est le constituant des aciers au carbone et des aciers peu alliés dans lesquels le carbone est en solution solide dans un intervalle de température dont l'étendue dépend des teneurs en éléments d'addition. Les éléments gammagènes (Ni, Mn...) élargissent le domaine de stabilité de l'austénite, tandis que d'autres éléments (Si, Al, Mo...), dits alphagènes, le rétrécissent. Il existe aussi un certain nombre d'aciers fortement alliés dont la structure austénitique demeure stable ou métastable jusqu'à la température ambiante et au-dessous, en particulier les aciers inoxydables dérivant de la nuance Fe-18Cr-8Ni⁸³.

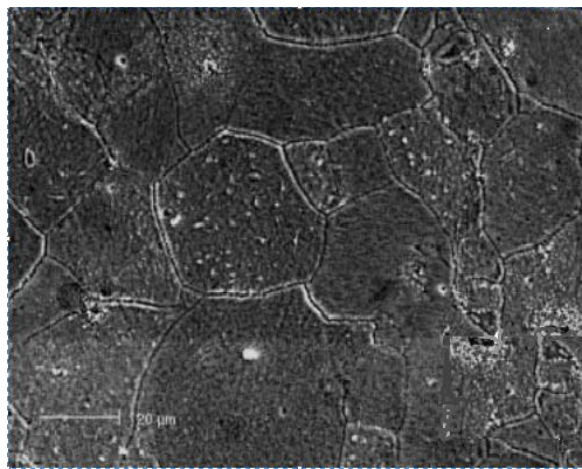


Figure II-7: Micrographie de l'austénite³⁴.

II-9-3-3 Cémentite

Cémentite (ou du carbure de fer) est un composé de fer et de carbone, et plus précisément un métal de transition intermédiaire carbure à la formule (Fe_3C) en poids, elle est de 6,67% de carbone et 93,3% de fer. Il est un matériau dur à ductilité quasi nulle, de limite élastique supérieure de l'ordre de 2000 MPa (dureté voisine de $\text{HV}=700$)⁸⁴. Il a une orthorhombique structure cristalline. Normalement classé comme céramique dans sa forme pure, et est un constituant souvent trouvé et important dans la métallurgie des métaux ferreux⁸⁵. Dans certains cas d'ailleurs, la composition des carbures précipités peut évoluer au cours du refroidissement⁸⁶. Alors que la cémentite est présente dans la plupart des aciers et

82 : L. BARRALLIER: Mémoire de fin d'étude « Génèse des contraintes résiduelles de nitruration. Étude expérimentale et modélisation », 1992.

83 : THIERRY IUNG et JEAN-HUBERT SCHMITT: « Durcissement des aciers ferritique, perlitique, bainitiques et martensitiques », technique de l'ingénieur, M4341, 3eme édition 2017.

84: PHILIPPE CHOMEL: « Sélection des matériaux métalliques - Familles de matériaux », technique de l'ingénieur, BM5071, 2001.

85: SMITH, WILLIAM F. HASHEMI JAWAD: « Fondations de la science des matériaux et en génie (4e éd.) ». McGraw-Hill, 2006.

86: GUY MURRY: « Transformations dans les aciers ». Technique de l'ingénieur, M1115, 1998.

des fontes, il est produit comme matière première dans le processus de carbure de fer, qui appartient à la famille des technologies alternatives de fabrication du fer⁴⁷.

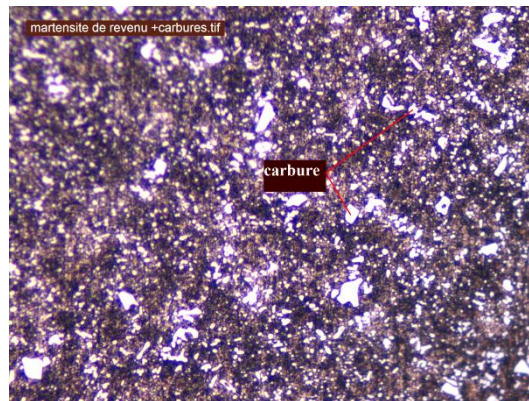
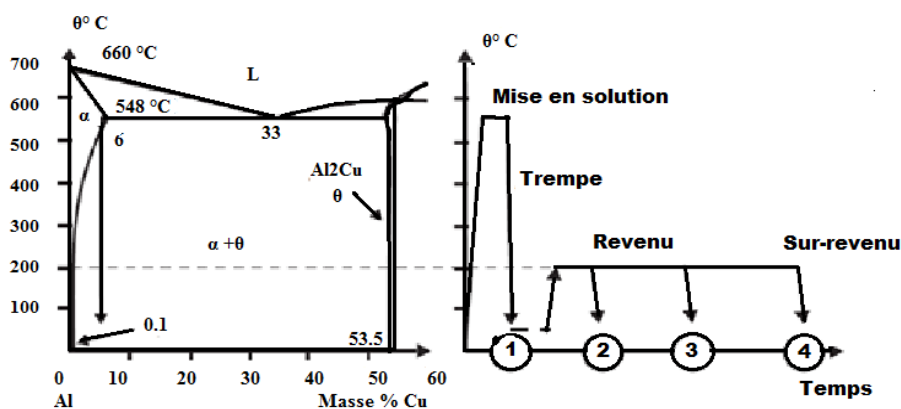


Figure II-8 : La micrographie de la cémentite⁸⁷.

II-9-4 Revenu au cours de cémentation

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau.

Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe (figure II-9). La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe)⁸⁸.



87 : ECMK : « laboratoire de physique-chimie » 2019.

88: DJEDDI OUARDA, BOUHBIB A. RAHIM : Mémoire de fin d'étude de master « Effet des traitements thermiques sur les propriétés des fils de cuivre tréfilés à l'ENICAB-Biskra », 2016, p(50).

Figure II-9: Schéma de principe du traitement du revenu. 1) solution solide sursaturée, 2) zones de Gunier – Preston, 3) précipités θ'' , 4) précipités θ' , puis θ (Al_2Cu)⁸⁹.

II-9-5 Effet du revenu

Dans le cas de cémentation, le revenu a un effet sur la ténacité des couches enrichies de carbone. L'effet de revenu se porte sur la structure martensitique. L'état martensitique pur, sans austénite résiduelle s'obtient pour les aciers hypereutectoïdes refroidis vers 200°C.

Les réactions au cours du revenu varient avec le temps et surtout avec la température. Ce dernier paramètre a un effet sur la structure de la martensite selon les intervalles de températures suivants⁹⁰:

- Vers 100°C-150°C, la martensite initiale dite (α') (réseau quadratique) se décompose et donne carbure-epsilon et alpha, avec epsilon est un carbure de fer hexagonal (semblable à la composition Fe_2C) et alpha est martensite à faible teneur de carbone.
- De 200°C à 400°C, la martensite alpha perd progressivement son carbone sous forme de cémentite et donne ferrite (α) + cémentite (Fe_3C).
- De 280°C à 350°C, transformation de carbure epsilon en réagissant sur la ferrite qui l'entoure et qui devient ainsi un carbure-kappa plus pauvre en carbone. Kappa est un carbure de fer de structure orthorhombique Fe_5C_2 .
- De 450°C à 500°C, transformation du carbure kappa en réagissant avec la ferrite donnant Fe_3C (cémentite).

Dans le cas des aciers trempés non entièrement martensitiques, si l'acier contient de l'austénite résiduelle. Celle ci se décompose à partir d'environ 250°C et jusqu'à 150°C, selon des réactions qui se superposent aux précédentes en les masquant plus ou moins. Finalement, on arrive à l'état ferrite + cémentite. Tandis que, s'il contient des constituants en équilibre physico-chimique (perlite, troostite, ferrite, cémentite), cas d'une trempe incomplète, lors du revenu, ces constituants ne peuvent subir que des variations de dimensions et de forme⁹¹.

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)

89: M. DUPEUX: « Aide-mémoire Science des matériaux », Paris (2004), p (95) et p (118).

90: DOMINIQUE OTTELL: Thèse de doctorat « Technologie des métaux et alliages particulièrement en aéronautique », P (66).

91: GUY MURRY: « Aciers pour traitements thermiques, propriétés et guide de choix », P(4).

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 suivante⁹² :

- Une couche superficielle présentant, en général, une dureté élevée (≈ 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 °C. Il a été rapporté que l'acier cémenté est revenu à cette température acquiert des propriétés mécaniques excellentes. En contre partie selon Christiansen et autres, 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 affectées⁹³.

II-11 Les défauts de cémentation

Si les déformations peuvent être à juste titre considérées comme des défauts de cémentation, cette dernière ayant pour but essentiel de carburer pour durcir superficiellement l'acier doux, il est clair que le manque de dureté de la couche cémentée est contraire au résultat recherché et constitue donc c'est un défaut sérieux.

Les points doux et les parties mallees sont assez fréquents sur les aciers doux de la cémentation ordinaire, il est même difficile de les éviter, cet accident peut avoir plusieurs causes soit dans le cas où l'acier doux est de mauvaise qualité ou bon qualité⁹⁴:

- Trop grand volume de pièces dans la caisse : les pièces se touchent et la faible proportion de ciment est incapable de libérer suffisamment de gaz actif.
- Mélange de ciment trop pauvre, de mauvaise qualité, contenant des impuretés.
- Décarburation par le manque d'étanchéité des caisses mal fermées: le ciment s'épuise par la perte trop rapide des gaz cimentant.

92: G. KRAUSS: « Microstructure, Residual Stress, and fatigue of carburized Steels », Proceedings: quenching, and carburizing, 1991, The institutes of Materials, Melbourne, 205-225.

93: T. CHRISTIANSEN, M.A.J. SOMERS: « Revue de Matérialographie Struers », 2006.

94: La pratique des industries mécaniques : « Métallurgie, la cémentation », vol 40, N°=10, 1956, p(267).

- Dans les cémentations profondes, il arrive aussi que l'action du ciment soit complètement épuisée avant la fin de l'opération : la surface du métal. ne recevant plus de carbone, en perd par suite de sa pénétration en profondeur.

II-12 La correction des défauts de cémentation

La correction des anomalies de traitement suppose⁹⁵.

II-12-1 Contrôles d'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.

II-12-2 Contrôles de laboratoire

- 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.

II-13 Conclusion

Nous concluons que la cémentation est un traitement thermochimique superficiel d'enrichissement en carbone dans une phase austénitique généralement comprise entre (910 à 1000 °C), contribue au durcissement de l'interface, en même temps, il maintient une ductilité au cœur. Ce genre de traitement permettant d'assurer une bonne résistance à l'usure grâce à l'obtention d'une couche riche en martensite à haute teneur en carbone. La phase austénitique est généralement suivie d'une trempe à l'huile pour durcir la surface par formation de la

95: D. GHIGLIONE, C. LEROUX, C. TOURNIER : « Cémentation. Carbonituration », Technique de l'ingénieur, M1226, 1994.

structure martensitique et d'un revenu à basse température pour enlever la fragilité du matériel, éliminer les contraintes et ajuster la dureté finale par formation des carbures. Et nous avons pris en compte qu'il y a un rôle et une influence de la composition chimique surtout des éléments d'addition (le chrome, le molybdène,...) sur les propriétés mécaniques obtenus.

**Chapitre III:
Techniques
expérimentales
- Résultats et
discussions**

III-1 Introduction

Ce chapitre est destiné à l'étude expérimentale en analysant l'influence de la quantité du carbone diffusée à la couche superficielle de la pièce cémentée. La première étape de cette technique consiste à choisir le matériau à cémenter en décrivant les diverses techniques expérimentales utilisées pendant le traitement de cémentation et les moyens de caractérisation pour analyser les modifications des propriétés chimiques, structurales et mécaniques du matériau avant et après traitement. Finalement, nous allons discuter les résultats obtenus avant et après cémentation de la pièce tels que la microstructure, la composition chimique, la dureté, la fragilité et la résilience.

III-2 Matériau étudié (acier (XC10))

L'acier utilisé est un acier XC10. Le symbole XC indique que c'est un acier ordinaire au carbone à 0,1 %. C'est un acier extra-doux appartient à la classe des aciers de cémentation. La plupart de ses aciers contiennent des éléments d'addition comme chrome, manganèse, molybdène et d'autres éléments en traces négligeables comme l'aluminium et le cuivre. Il est couramment utilisé pour tôle de carrosserie, feuillard, quincaillerie, pièces de forge, les roues à dents et les arbres, ..., il est caractérisé par une surface dure et tenace à cœur.

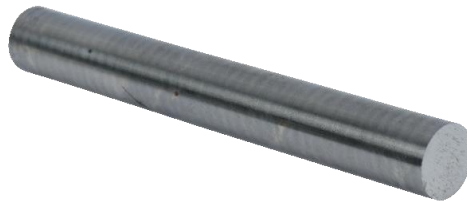


Figure III-1 : Matière premier (acier XC10).

III-3 Préparation des échantillons avant la cémentation

La préparation des échantillons destinés au traitement de cémentation se fait selon les étapes mentionnées ci-dessous :

- Après avoir choisi le matériau selon un certificat d'ordonnement (déterminer le type d'acier (XC10) et la quantité du matériau (six pièces pour les essais)).
- On coupe la matière selon les dimensions normalisée.

- On prépare les éprouvettes cylindriques et prismatiques pour les essais de (traction, dureté, résilience), on utilise les machines de tournage et de fraisage



Figure III-2 : Machine de tournage.

- Finalement, la finition de l'état de surface se fait par la machine de rectification.



Figure III-3 : Machine de rectification cylindrique.

III-4 Techniques de cémentation

Après avoir préparé les éprouvettes de l'acier XC10, on passe à la phase de la cémentation. D'abord, on met en évidence l'exécution de la technique du traitement utilisé. Les mises en température sont effectuées dans des fours à atmosphère contrôlée, qui sont destinés à réaliser des traitements thermiques ou thermochimiques. Les traitements purement thermiques sont réalisés sous air ou sous atmosphère protectrice, alors que les traitements thermochimiques nécessitent l'utilisation des gaz chimiquement actifs (C_3H_8 , CH_3OH , N_2 , NH_3), c'est le carbone dans l'état de cémentation. Les fours de cémentation sont chauffés par des résistances électriques en contact avec l'atmosphère du four ou isolées de celle-ci.

La cémentation de l'acier XC10 se fait dans un milieu isotherme et avec des conditions représentées dans le tableau III-1 ci-dessous.

Durée de cémentation	2 heures	4 heures
Température du traitement (°C)	910	910
Le débit de méthanol (CH ₃ OH) (m ³ /h)	4.10 ⁻³	4.10 ⁻³
Le débit de carbone (C) (m ³ /h)	1.1	1.1
Le potentiel de carbone Cp (%)	0.5	0.5

Tableau III-1 : Les conditions opératoires de la cémentation.

Les éprouvettes de l'acier XC10 se laissent cémenter pendant 2 heures ou 4 heures avec un débit du carbone $C = 1.1 \text{ m}^3/\text{L}$ à une température $T = 910^\circ\text{C}$. Après la cémentation, on passe à la phase de diffusion du carbone de l'atmosphère carbonée à la couche superficielle des éprouvettes de l'acier XC10 pendant une durée $t = 1$ heure avec un débit du carbone $C = 0.85 \text{ m}^3/\text{L}$ à une température $T = 910^\circ\text{C}$. Pour que le carbone se combine avec le fer en produisant la cémentite Fe_3C , on fait tremper l'acier XC10 dans un bain d'huile pendant 20 minutes à une température $T = 830^\circ\text{C}$. Après la trempe, l'acier XC10 devient dur et fragile et pour résoudre ce problème, un traitement thermique (revenu) est fait à une température qui ne dépasse pas 180°C pendant 2 heures pour éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et pour augmenter la ténacité.

III-5 Préparation des échantillons après la cémentation

Après avoir cémenté les éprouvettes de l'acier XC10, on passe à les préparer pour analyser les propriétés chimiques, structurales et mécaniques (microstructure, composition chimique, rugosité, dureté,....etc.), par deux principales opérations:

III-5-1 Polissage

La première étape consiste en plate les éprouvettes de l'acier XC10 à l'aide d'une meule (figure III-4) pour éliminer la couche carburée produite de la cémentation à fin d'obtenir une coupe transversale de la couche cémentée vers le cœur brut.



Figure III-4 : Meuleuse.

La seconde étape consiste à faire un polissage dégradé de la surface. Les éprouvettes de l'acier XC10 sont polies à l'eau (pour éviter tout échauffement du matériau) à l'aide d'une polisseuse (figure III-5) avec du papier abrasif en passant des gros grains vers les plus fins (p180, p320, p400, p600, p800, p1000). Les chiffres correspondent au nombre de grains par unité de surfaces (grains/cm^2). Entre chaque papier, il faut, croiser la direction de polissage permettre de faire ressortir les rayures résiduelles de l'étape précédente.



Figure III-5 : La polisseuse.

La troisième étape, appelé polissage ultra fin, est effectué en présence de la pâte diamant de deux granulométries 3 et 1 micromètre. Le polissage de finition est réalisé sur un drap ou filtre contenant ces pâtes et réactif chimique qui permet d'aider le polissage. D'autre part pour éliminer les rayures (des stries sont observées sur la surface de l'échantillon) produites par des arrêtes tranchantes ou/et des particules abrasifs et d'autre part de conserver une planéité optimale sur tous types d'échantillon.



Figure III-6 : La machine de polissage ultra fin.

Pour ces stades, le rinçage de l'échantillon sous l'eau courant, est requis à chaque changement de papiers abrasifs et de drap afin d'éviter que des particules de grand diamètre ne polluent le stade de polissage à plus faible granulométrie.

III-5-2 Attaque chimique

L'attaque des échantillons met en évidence la morphologie des grains, les défauts ou irrégularités de la surface, les sous-structures, les précipités, les inclusions, ... etc. La méthode d'attaque utilisée est l'attaque chimique qui provoque une dissolution différentielle des cristaux suivant leur orientation, des phases suivant leur nature ou une attaque spécifique aux joints de grains. Pour révéler la structure des couches intérieures des pièces d'acier cimentées.

Dans ce travail, on met l'éprouvette 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 l'échantillon à nouveau sous l'eau courante et on le met sous gouttes d'alcool éthylique (C_2H_5OH) encore une fois. Finalement, on sèche l'éprouvette de l'acier XC 10 à l'aide d'un séchoir.

III-6 Composition chimique

La composition chimique en pourcentage massique est déterminée par un spectromètre à émission optique (figure III-7), ce dernier est lié à un ordinateur et un écran d'affichage, qui sont placés plus loin par un câble USB de 3 mètres de longueur. Il est assez compact et léger, pour être déplacé sans difficulté. L'instrument doit être placé à au moins 30 cm loin du mur, afin de permettre une circulation d'air suffisante.



Figure III-7 : Spectromètre à émission optique.

III-6-1 Eprouvette de l'acier (XC10) brut

L'analyse chimique de l'acier (XC10) brut (sans traitement) permet de déterminer la composition chimique en pourcentage massique (tableau III-2). On trouve que l'acier XC10 avant le traitement contient du carbone en proportion mineur $C=0.10\%$ et du fer en proportion major 98.69 %. L'acier XC10 appartient à la classe des aciers extra-doux (le carbone varie de 0,05 % à 0,15 %) et selon le pourcentage des éléments d'addition, on constate que l'acier XC10 est de la famille des aciers faiblement alliés car les alliages ne dépassent pas 5% comme montré dans le tableau III-2 ci dessous.

L'élément	C	Fe	Mn	P	S	Cr	Ni
Quantité (%)	0.10	98.69	0.49	0.0172	0.0182	0.103	0.103

L'élément	Mo	W	Al	Co	Cu	Ti	Si
Quantité (%)	0.0242	0.0266	0.0054	0.0293	0.124	0.0024	0.207

Tableau III-2: Composition chimique de l'acier XC10 brut (sans traitement).

III-6-2 Eprouvette de l'acier (XC10) cémenté pendant 2 h

L'analyse chimique de l'acier (XC10) cémenté pendant 2h permet de déterminer la variation des compositions chimiques après la cémentation en pourcentage massique (tableau III-3). Après la cémentation, la quantité du carbone augmente de 0.10% à 0.871% à cause de la diffusion du carbone pendant 2 heures de l'atmosphère carbonée à la couche superficielle de l'acier XC10. En revanche, la quantité de fer est diminuée de 98.69% à 97.984 % à cause de

la composition du fer et le carbone en produisant de la cémentite (Fe_3C). La variété de la proportion des autres éléments résulte de l'hétérogénéité de notre nuance.

L'élément	C	Fe	Mn	P	S	Cr	Ni
Quantité (%)	0.871	97.984	0.484	0.0159	0.0156	0.0998	0.103

L'élément	Mo	W	Al	Co	Cu	Ti	Si
Quantité (%)	0.0223	0.0196	0.0046	0.0284	0.123	0.0022	0.212

Tableau III-3: Composition chimique de l'acier XC 10 cémenté pendant 2h.

III-6-3 Eprouvette de l'acier (XC10) cémenté pendant 4 h

L'analyse de l'acier (XC10) cémenté pendant 4h permet de déterminer la variation des compositions chimiques après la cémentation en pourcentage massique (tableau III-4). L'augmentation de la durée de maintien de la cémentation (4 heures) où les conditions opératoires sont identiques avec le maintien 2 heures montre que la quantité du carbone devient plus grande $C=1.09\%$ ce qui s'explique par la continuation de la diffusion du carbone de l'atmosphère carbonée à la couche superficielle de l'acier XC10. D'autres part, la diminution de la quantité du fer $Fe=97.504\%$ s'exprime par la combinaison entre le fer et le carbone diffusé en produisant de la cémentite (Fe_3C). La variété de la proportion des autres alliages résulte de l'hétérogénéité de notre nuance.

L'élément	C	Fe	Mn	P	S	Cr	Ni
Quantité (%)	1.09	97.504	0.584	0.0155	0.0261	0.095	0.118

L'élément	Mo	W	Al	Co	Cu	Ti	Si
Quantité (%)	0.0267	0.0173	0.0058	0.0214	0.121	0.0015	0.192

Tableau III-4: Composition chimique de l'acier XC10 cémenté pendant 4h.

III-7 Microstructure

Les images de la micrographie sont obtenues à l'aide d'un microscope optique qui est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (grossissement) et de séparer les détails de cette image afin qu'il soit observable à l'œil nu. Il est utilisé en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage (figure III-8). En outre sa grande facilité d'utilisation, permet l'observation de grandes surfaces et de les collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Mais compte tenu de sa faible résolution, il n'est pas possible de l'utiliser pour une observation fine d'objets rugueux de petite taille.

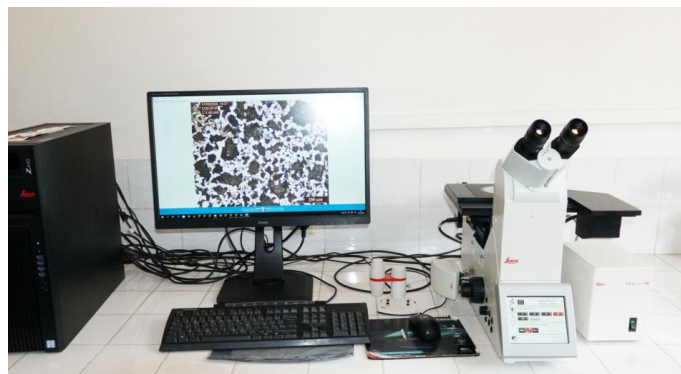


Figure III-8 : Microscope optique.

III-7-1 Eprouvette de l'acier (XC10) brut

La figure III-9 présente la micrographie de la structure de l'acier XC10 brut (sans traitement). On constate que la structure de l'acier XC10 brut (sans traitement) est homogène à grains uniformes de ferrite et de perlite lamellaire.

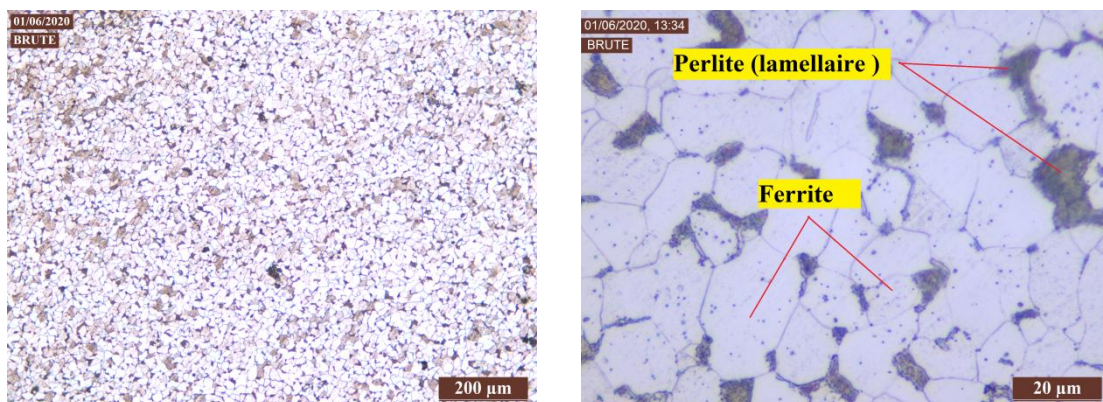


Figure III-9 : Microstructure de l'acier XC10 brut (sans traitement).

III-7-2 Epreuve de l'acier (XC10) cémenté pendant 2 h

On constate que l'éprouvette de l'acier XC10 cémentée pendant 2 heures a deux structures différentes (voir la figure III-10). Premièrement, la structure du cœur reste homogène à grains uniformes de ferrite et de perlite lamellaire (figure III-11) car la diffusion du carbone reste superficiellement (n'atteint pas le cœur). Deuxièmement, le carbone se diffuse dans la couche superficielle d'une profondeur moyenne $P_m = 869.84 \mu\text{m}$, ce dernier conduit à la formation d'une nouvelle structure mélange de la martensite (transformée selon la quantité du carbone dans l'acier cémenté) + l'austénite résiduelle (car le refroidissement est lent à $T = 830^\circ\text{C}$) (figure III-12).

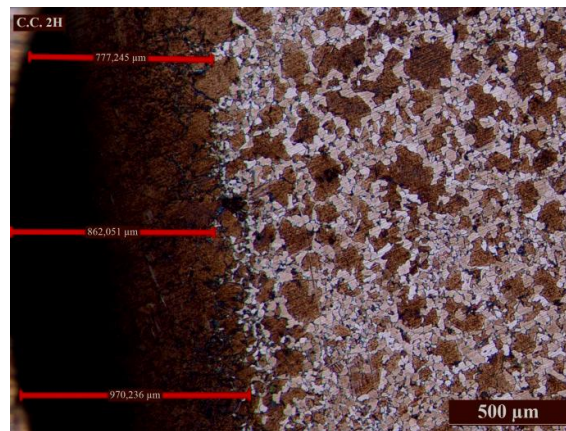


Figure III-10 : Profondeurs de la couche cémentée pendant 2 h de l'acier XC10.

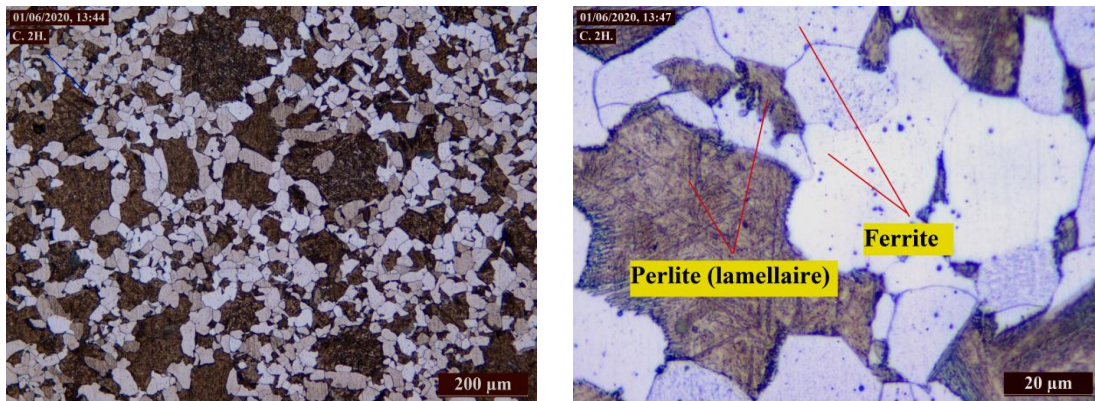


Figure III-11 : Microstructure au cœur de l'acier XC10 cémenté pendant 2 h.

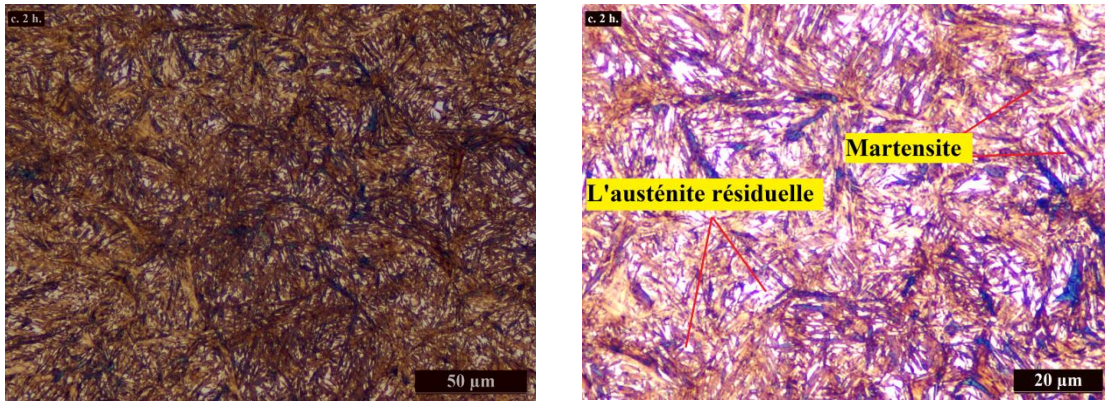


Figure III-12: Microstructure de la couche superficielle de l'acier XC10 cémenté pendant 2h.

III-7-3 Epreuve de l'acier (XC10) cémenté pendant 4h

On constate que l'éprouvette de l'acier XC10 cémentée pendant 4 heures a deux structures différentes (voir la figure III-13). Au cœur, on trouve la même structure de l'acier XC10 brut et le cœur de l'acier XC10 cémenté pendant 2 heures car la diffusion du carbone reste toujours superficielle (voir la figure III-14). En revanche, une structure mixte de la cémentite globulaire en blanc + la martensite (le reste) dans la couche cémentée (Fe_3C) (voir la figure III-15) à cause de la composition du fer et le carbone pendant le traitement. La profondeur moyenne de la couche cémentée augmente en fonction de l'augmentation de la durée de cémentation $P_m = 1163.4 \mu m$ comme montrée dans la figure III-13.

On constate qu'il existe une relation proportionnelle entre la durée de cémentation et la profondeur de la couche cémentée, c'est-à-dire que la profondeur augmente si le temps de maintien est long et l'inverse. En outre, La structure de l'acier XC10 se varie selon la quantité du carbone diffusée, ce qui conduit à une composition des nouvelles structures différentes de la structure de base.

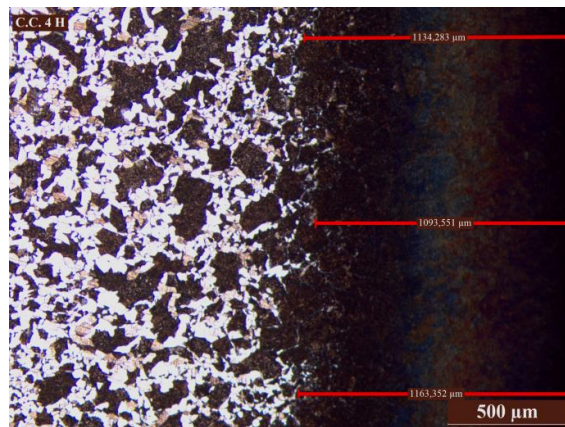


Figure III-13: Profondeurs de la couche cémenté pendant 4 h de l'acier XC10.

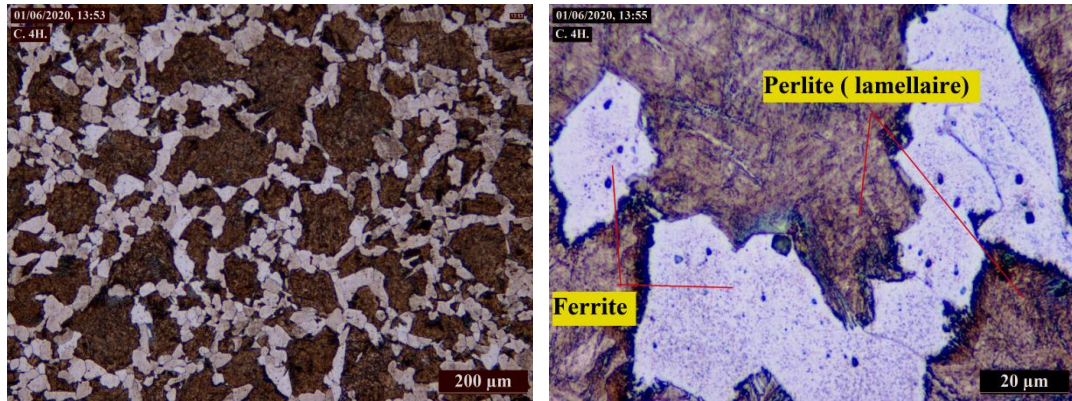


Figure III-14 : Microstructure au cœur de l'acier XC10 cémenté pendant 4 h.

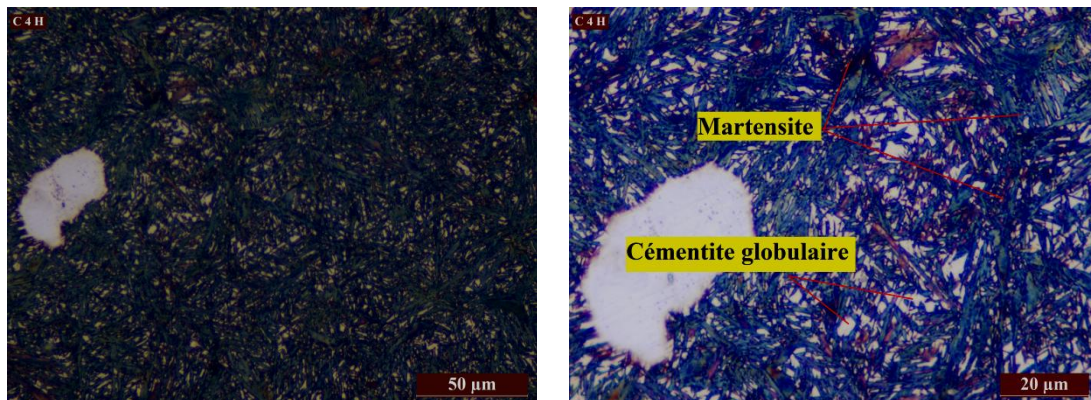


Figure III-15 : Micrographie de la couche superficielle de l'acier XC10 cémenté pendant 4 h.

III-8 Dureté

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétreur-surface, la géométrie de pénétreur, ses propriétés mécaniques et la charge principale des méthodes de mesure de la dureté utilisée : la dureté brinell (HB), la dureté vickers (HV), les duretés rockwell C et B (HRC et HRB). Bien que les valeurs de dureté soient données sans dimensions, les duretés brinell et vickers, de par leur définition, sont homogènes à des contraintes.



Figure III-16: La machine de la dureté.

III-8-1 Essai dureté Vickers

Le pénétrateur est une pyramide en diamant, à base carrée et d'un angle au sommet entre faces opposées égales à 136°. 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.

$$HV = \frac{1.845 F}{D^2} \quad ; \quad D^2 = \frac{(d_1+d_2)}{2}$$

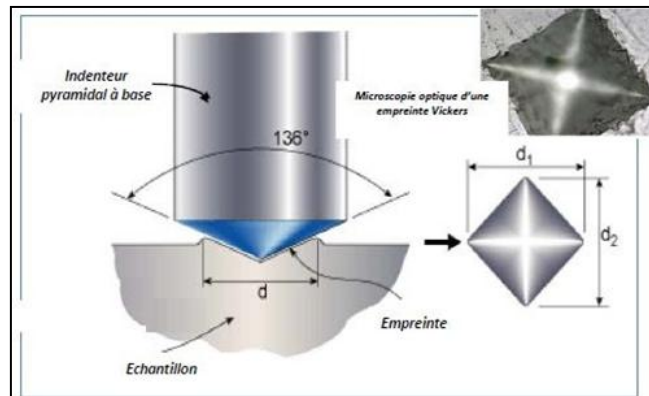


Figure III-17 : Principe et empreinte typique de l'essai de dureté Vickers⁹⁶.

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

III-8-2 Forme de l'éprouvette de dureté

La surface de l'éprouvette doit être propre, plane et lisse. Plus les dimensions du pénétrateur sont petites, plus l'état de la surface doit être lisse. Une application du polissage est parfois obligatoire. La préparation de l'éprouvette doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau dues, par exemple, au chauffage ou à l'écrouissage.

L'épaisseur de l'éprouvette doit être suffisante pour qu'aucune trace d'une déformation ne soit visible sur la surface opposée à celle de l'application de la charge. D'après une règle générale, l'épaisseur minimale est au moins dix fois supérieure à la profondeur de l'empreinte.



Figure III-18 : La forme de l'éprouvette de dureté.

Il faut noter que les essais de dureté sont exécutés de la façon suivante :

- La dureté HV superficielle sur les échantillons avant cémentation.
- La dureté HV superficielle sur les échantillons et au cœur après cémentation.
- La dureté HV superficielle vers le cœur (en profondeur).

III-8-2 Résultats obtenus de la dureté

Après les résultats présentés dans le tableau III-5, on constate que les valeurs données de la dureté HV de la couche superficielle cémentée vers le cœur de l'acier XC10 brut restent à l'entour de 151HV, qui explique que l'acier XC10 brut a une seule structure dans l'interface et dans le cœur. En revanche, une augmentation de la dureté HV de l'acier XC10 cémenté pendant 2 heures de 152HV au cœur à 644HV à l'interface, cette augmentation s'explique par la production d'une nouvelle structure dure par rapport à la structure de base au cœur. En outre, la dureté HV devient plus grande à l'interface 733HV de l'acier XC10 cémenté 4 heures et ne se change pas dans le cœur à l'entour de 151HV.

Pénétrations		1 ^{er} pénétration (HV)	2 ^{ème} Pénétration (HV)	3 ^{ème} Pénétration (HV)	Valeur moyenne (HV)
Eprouvette de l'acier (XC10)					
Brut (sans traitement)		156	143	156	151
Cémentée 2 h	cœur	156	146	154	152
	surface	569	667	697	644
Cémentée 4 h	cœur	155	153	145	151
	surface	740	740	720	733

Tableau III-5: Les valeurs de la dureté HV à l'interface et au cœur de l'acier XC10 avant et après la cémentation.

D'après les résultats obtenus de la dureté HV à l'interface (couche superficielle) vers le cœur de l'acier XC10 avant et après la cémentation (figure III-19), Nous constatons que la dureté HV est linéaire dans l'acier XC10 brut (sans traitement). Par contre, dans l'acier XC10 cémenté pendant 2 heures ou 4 heures, une dégradation intéressante de la dureté HV de la couche superficielle cémenté vers le cœur brut.

Nous concluons que le carbone diffusé à l'acier XC10 pendant la cémentation (2 heures ou 4 heures) a durci la couche superficielle.

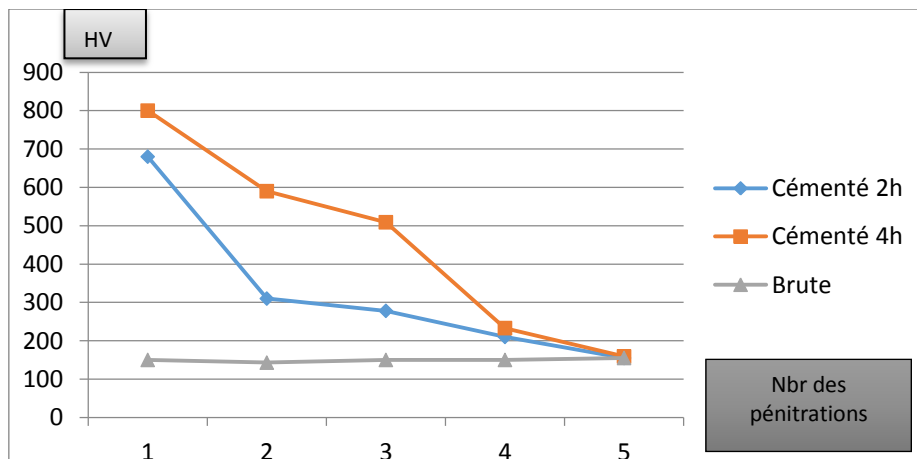


Figure III-19: Les valeurs de la dureté HV de l'interface vers le cœur de l'acier XC10 avant et après la cémentation.

III-9 Essai de traction

Essai de traction est l'essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée du matériau à tester), en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante

S_0 et longueur L_0 raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction. L'essai est effectué à la température ambiante dans les limites comprises entre (20°C et 35°C). Elle est employée pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible.

$$\text{La contrainte conventionnelle : } \sigma_C = R = \frac{F}{S} \quad \text{MPa}$$

$$\text{La déformation conventionnelle : } \varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [\%]$$

L'éprouvette de longueur initiale L_0 , de section S , subit une force croissante jusqu'à la rupture. Le graphe traduit la relation entre les allongements de l'éprouvette et la force F . (figure III-20).

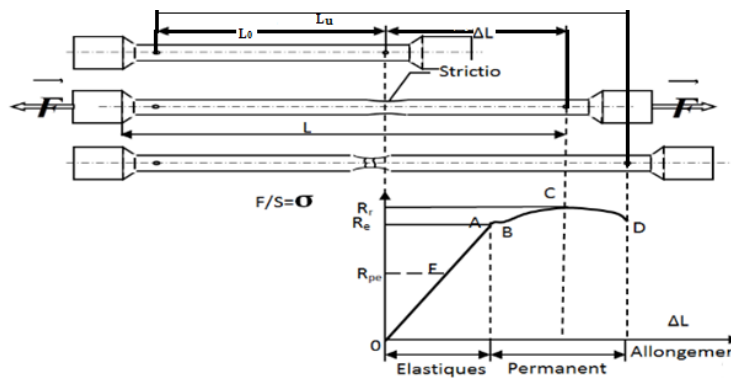


Figure III-20 : Courbe conventionnelle typique de traction⁹⁷.

- Entre les points 0 et A une phase élastique ou la déformation réversible, où il y a proportionnalité entre charge et déformation, au moins en première approximation c'est la loi de Hooke. $\sigma = R_e = E \cdot \varepsilon$
- De A à B, une déformation permanente homogène appelée aussi déformation plastique répartie.
- De B à C la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène c'est la striction, on aboutit à la rupture en D.

III-9-1 Forme de l'éprouvette de traction

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques.

97 : BOUDILMI A. : mémoire de fin d'étude en master « Contribution à l'étude de la fatigue des matériaux », p (4), 2016.

Les éprouvettes usinées doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée lorsque celles-ci sont de dimensions différentes. Les têtes de fixation peuvent être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine. Les éprouvettes non usinées (par exemple celles brutes fonderie) doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée.

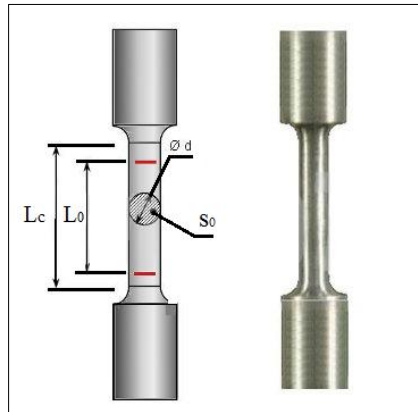


Figure III-21 : Epreuve de traction.

III-9-2 Exécution de l'essai

Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'une traverse fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette, l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique, soit des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre. Ceci, permettra d'aboutir à des résultats d'enregistrement de la courbe de traction, $F=f(\Delta L)$, caractéristiques mécaniques de l'éprouvette et de sa géométrie (F_m , R_m , $A\%$ et $Z\%$) de l'acier XC10 avant et après cémentation.

Les données des éprouvettes de traction (avant traction) sont:

- La longueur initiale $L_0 = 40 \text{ mm}$;
- La section initial $S_0 = 19.62 \text{ mm}^2$;
- L'allongement : $A\% = 100 ((L - L_0)/L_0)$;
- La striction : $Z\% = 100 ((S_0 - S)/S_0)$;
- La résistance à la traction : $R_m = F_m/S_0$.



Figure III-22 : Machine électromécanique de traction-compression uni-axiale.

III-9-3 Résultats obtenus de traction

III-9-3-1 Eprouvette de l'acier (XC10) brut

D'après les résultats obtenus (figure III-26) de l'essai de traction des éprouvettes d'acier XC10 avant et après cémentation. On constate que l'acier XC10 brut a un comportement élastoplastique et que la phase élastique est petite car il appartient à la classe de l'acier extra-doux ($C \% < 0.15$). Les valeurs présentées dans le tableau III-6 montrent que l'acier XC10 brut possède une résistance à la traction relativement moyenne $R_m=652$ MPa, et que l'éprouvette est déformée brutalement qui s'explique par les valeurs élevées de l'allongement $A=10.77\%$, et de la striction $Z=48.14\%$.

Eprouvette	F_m (N)	R_m (N/mm ²)	A (%)	Z (%)
Brut	12800	652	10.77	48.14

Tableau III-6 : Résultats obtenus de la traction de l'éprouvette de l'acier XC10 brut (sans traitement).



Figure III-23 : Les éprouvettes de l'acier XC10 brut avant et après traction.

III-9-3-2 Eprouvette de l'acier (XC 10) cémenté pendant 2 h

Après une cémentation de l'acier XC10 pendant 2 heures, on constate que les propriétés mécaniques de l'acier XC10 sont améliorées et que la phase élastique est augmentée (figure

III-26), où on trouve que la charge appliquée en traction devient plus grande $F_m = 14500$ N à cause de l'augmentation de la résistance à la traction $R_m = 739$ MPa de l'acier XC10 cémenté (2h). En outre, une diminution de l'allongement $A = 1.46\%$, et de la striction $Z = 11.6\%$ (tableau III-7), car l'acier XC10 devient dur parce qu'il est résultant de l'association d'une couche superficielle (cémentée) fragile reposant sur un cœur ductile.

Eprouvette	F_m (N)	R_m (N/mm ²)	A (%)	Z (%)
Cémenté 2h	14500	739	1.46	11.6

Tableau III-7 : Résultats obtenus de la traction de l'éprouvette de l'acier XC10 cémenté 2h.



Figure III-24 : Les éprouvettes de l'acier XC10 cémenté pendant 2h avant et après traction.

III-9-3-3 Eprouvette de l'acier (XC10) cémenté pendant 4 h

Après une cémentation de l'acier XC10 pendant 4 heures, on remarque une amélioration intéressante des propriétés mécaniques de l'acier XC10 (voir le tableau III-8). La phase élastique devient plus grande car la couche superficielle cémentée est devenue extra dure (structure de cémentite globulaire) qui conduit à l'augmentation de la résistance à la traction $R_m = 856$ MPa et de la force de traction $F_m = 16800$ N. Par contre, La phase plastique est diminuée car l'acier XC10 cémentée (4h) devient mi-fragile, l'allongement $A = 1.2\%$, et de la striction $Z = 3.93\%$.

Nous constatons que la durée de cémentation influe largement sur les propriétés mécaniques de l'acier XC10. Une longue durée de cémentation permet de diffuser une quantité du carbone intéressante qui se compose avec le fer en produisant de la cémentite (Fe_3C), ce dernier donne à l'éprouvette sa dureté car l'acier XC10 cémenté (4h) est résultant de l'association d'une couche superficielle cémentée (dure et fragile) reposant sur un cœur ductile.

Eprouvette	F_m (N)	R_m (N/mm ²)	A (%)	Z (%)
Cémenté 4h	16800	856	1.2	3.93

Tableau III-8 : Résultats obtenus de la traction de l'éprouvette de l'acier XC10 cémenté 4h.



Figure III-25 : Les éprouvettes de l'acier XC10 cémenté pendant 4h avant et après traction.

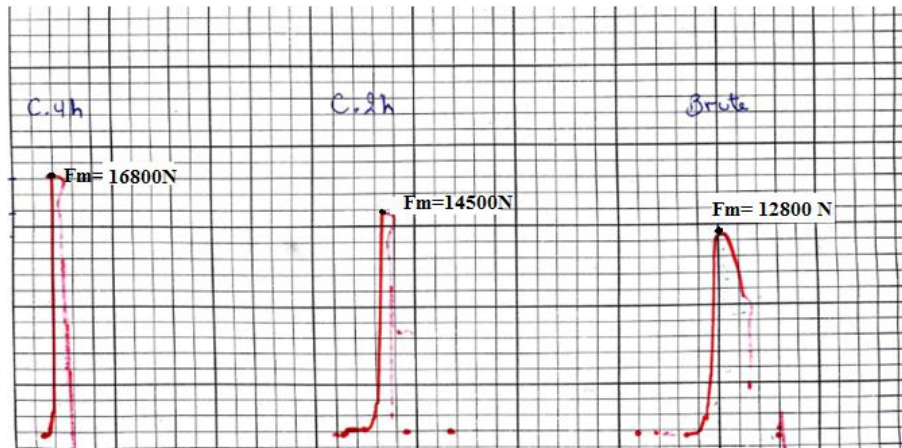


Figure III-26 : Courbes force-déformation des trois éprouvettes de l'acier XC10 avant et après cémentation.

III-10 Essai de résilience

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile. Les facteurs fragilisant sont⁹⁸:

- L'abaissement de la température.
- L'augmentation de la vitesse de déformation.

Le principe de l'essai consiste à rompre par choc une éprouvette entaillée reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie absorbée caractérisant la résistance aux chocs du matériau métallique essayé. La résistance aux chocs, donc l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joule par centimètre carré⁹⁹.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Energie absorbé par la rupture(J)}}{\text{Section au droit de l'entaille(cm}^2\text{)}}$$

98 : Dr. B. JACQUOT : cours « Propriétés mécaniques des biomatériaux utilisés en odontologie », UNF3S 2011.

99 : G. FRADE : « Métallographie -Essais mécaniques », Encyclopédie Universalise.



Figure III-27 : La machine de résilience.

III-10-1 Forme de l'éprouvette de résilience

Le choix du type d'éprouvette dépend de la sélectivité visée. Dans une gamme de matériaux relativement fragiles on choisira plutôt les éprouvettes avec entaille en U, dans une gamme de matériaux peu fragiles on choisira plutôt les éprouvettes avec entaille en V.

On utilise les éprouvettes de la forme U dont les dimensions sont normalisées (figure III-28).

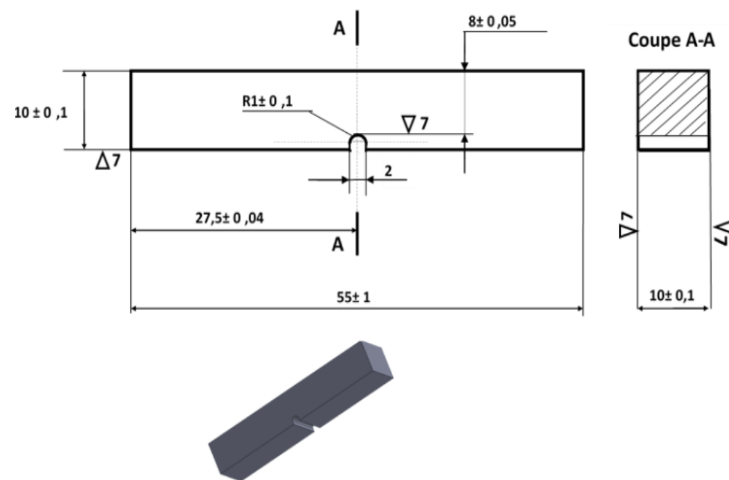


Figure III-28: L'éprouvette Charpy pour l'essai de résilience.

III-10-2 Résultats obtenus de résilience

III-10-2-1 Eprouvette de l'acier (XC 10) brut

Les résultats obtenus du choc (figure III-29), montrent que l'acier XC10 brut appartient aux aciers tendres et ductiles et sa ténacité $K_{IC} = 319.93 \text{ J/cm}^2$. L'éprouvette est déformée sans se casser complètement en absorbant une énergie $E_a = 223.95 \text{ J}$ (voir le tableau III-9 ci-dessous).

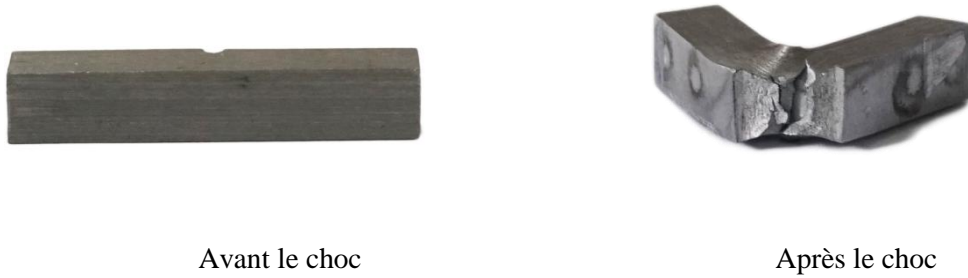


Figure III-29 : Les éprouvettes de l'acier XC10 brut avant et après le choc.

Eprouvette	Energie (J)	Ténacité (J/cm^2)
Brut	223.95	319.93

Tableau III-9: Résultats obtenus après le choc de l'éprouvette d'acier XC10 brut (sans traitement).

III-10-2-2 Eprouvette de l'acier (XC10) cémenté pendant 2 h

Après les résultats obtenus du choc (figure III-30), on constate que l'acier XC10 cémenté pendant 2 heures devient mi-dure ce qui conduit à la diminution de la ténacité $K_{IC} = 15,80 J/cm^2$ et de l'énergie absorbée $E_a = 11,06 J$ (voir le tableau III-10), car l'éprouvette constitue d'une couche superficielle cémentée (dure et fragile) reposant sur un cœur (tendre et ductile).

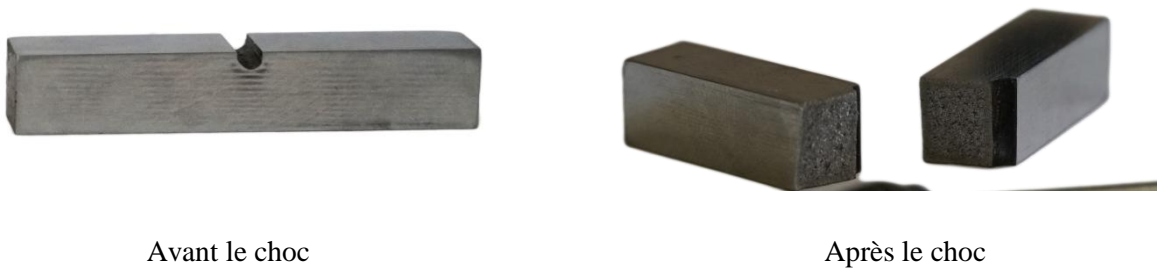


Figure III-30: Les éprouvettes de l'acier XC10 cémenté 2h avant et après le choc.

Eprouvette	Energie (J)	Ténacité (J/cm^2)
Cémenté 2h	11.06	15.80

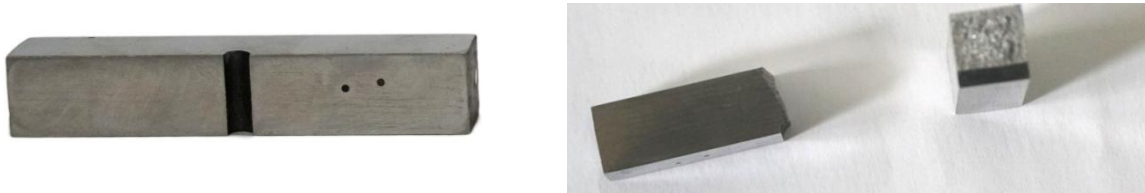
Tableau III-10: Résultats obtenus après le choc de l'acier XC10 cémenté pendant 2h.

III-10-2-3 Eprouvette de l'acier (XC 10) cémenté pendant 4 h

Après les résultats obtenus du choc présentés dans la figure III-31, on constate que la dureté de l'acier XC10 cémenté pendant 4 heures augmente en fonction de la quantité considérable

du carbone diffusée dans la couche superficielle. D'autre part, une diminution de la ténacité $K_{IC} = 15.05 \text{ J/cm}^2$ et de l'énergie absorbée $E_a = 10.53 \text{ J}$ (voir le tableau III-11) due de la fragilité de l'éprouvette de l'acier XC10.

Nous concluons que la cémentation influe sur les propriétés de choc de l'acier XC10 où l'augmentation de la quantité du carbone diffusé dans l'acier XC10 améliore la dureté en diminuant la résistance au choc (la fragilité).



Avant le choc

Après le choc

Figure III-31 : Les éprouvettes de l'acier XC10 cémenté 4 h avant et après le choc.

Eprouvette	Energie (J)	Ténacité (J/cm^2)
Cémente 4h	10.53	15.05

Tableau III-11 : Résultats obtenus après le choc de l'acier XC10 cémenté pendant 4h.

III-11 Conclusion

D'après notre étude, nous concluons que l'augmentation de la durée de cémentation permet de diffuser plus du carbone de l'atmosphère carbonée à la couche superficielle de l'acier XC10 traité ce qui permet de grandir la profondeur de la couche superficielle cémentée (riche en carbone) des pièces traitées pendant 2 heures ou 4 heures. L'acier XC10 cémenté (2 heures ou 4 heures) devient dur en augmentant la phase élastique et d'autre côté, il est devenu mi-fragile en diminuant la phase plastique et la résistance au choc.

L'acier XC10 cémenté (2 heures ou 4 heures) est résultant de l'association d'une couche superficielle (cémentée) dure et fragile reposant sur un cœur tendre et ductile.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Les différents résultats obtenus montrent l'intérêt de la cémentation en modifiant les propriétés chimiques, structurales et mécaniques des aciers à faible teneur en carbone. L'acier XC10 avant le traitement thermochimique en particulier la cémentation comporte des caractéristiques mécaniques de base généralement équilibrées pour lui conférer une modeste propriété mécanique (résistance mécanique, force de traction, dureté, ténacité, résistance au choc, l'énergie absorbée au choc,...). Généralement, la faiblesse de l'acier XC10 due de sa pauvreté du carbone ($C=0.10\%$) (appartient à la classe des aciers extras doux $C<0.15\%$).

Après un traitement de cémentation durant 2 heures ou 4 heures, une quantité du carbone est diffusée d'une atmosphère carbonée à la surface de l'acier XC10, en produisant un durcissement de la couche superficielle de la pièce traitée. La recherche d'une dureté maximale conduit à obtenir des teneurs superficielles suffisantes en carbone, ce qui permet de modifier la structure de base de la couche superficielle (ferrite + perlite lamellaire) à une structure composant d'un alliage fer-carbone par transformation martensitique est directement relié à sa teneur en carbone (la martensite + l'austénite résiduelle) ou (la martensite + la cémentite globulaire). La dureté portée à l'acier XC10 après une cémentation durant (2 heures ou 4 heures) influe sur sa fragilité en augmentant la phase élastique (dureté, force de traction, résistance à la traction) et en diminuant la phase plastique (l'énergie absorbée au choc, ténacité).

Nous concluons que l'acier XC10 brut est le résultant d'un cœur et couche superficielle tendres et ductiles. Cependant, l'acier XC10 cémenté durant (2 heures ou 4 heures) est résultant de l'association d'une couche superficielle cémentée (dure et fragile) reposant sur un cœur (tendre et ductile).