



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Métallurgie

Réf:.....

Présenté et soutenu par :

DJERADI Farouk

Le : Mercredi 26 juin 2019

L'effet Du Temps de Recuit Sur L'évolution Des Propriétés De L'acier Utilise Pour Fabrication Des Bouteilles P245NB (BS₂)

Jury :

Dr. ATHMANI Moussa	MAA	Université de Biskra	Président
Mme. LAMMEDI Fatma Zohra	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. BENTRAH Hamza	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2018 - 2019



Remerciements

A tous les êtres chers dont le soutien nous a été indispensable.

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation ainsi qu'à Que Dr. **LEMMADI Fatima Zohra** pour son soutien et ces conseils durant la réalisation de ce modeste travail.*

*Nous remercions également les membres de jury, **Athmani Moussa et BenTrah Hamza.***

*Je remercie également Monsieur **Messaoudi Salim**, enseignant du Métallurgie qui aide moi au microstructure.*

*A tous les personnels du labo de métallurgie physique surtout Mr. **Trir Boubakeur** et toute l'équipe de hall de technologie.*

A tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de loin ou de près à ce projet.

Dédicace

Je dédie modeste travail

A mes très chers parents

A mes très chers enfants

A mes frères, à mes sœurs

A tous mes amis et collègue....

..... A ma femme

Merci

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition	03
Figure I.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone	04
Figure I.3: Structure ferritique	06
Figure I.4: Structure austénitique (avec précipités de carbures)	06
Figure I.5: Structure perlitique	06
Figure I.6: Le cycle thermique	09
Figure I.7: Cycle thermique (recuit de recristallisation)	12
Figure I.8: Cycle thermique (recuit de restauration)	13
Figure I.9: Cycle thermique (recuit d'homogénéisation)	15
Figure I.10: Cycle thermique (recuit de régénération)	16
Figure I.11: Cycle thermique (recuit d'adoucissement)	17
Figure I.12: Cycle thermique (recuit complet)	19
Figure I.13: Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C)	22
Figure I.14: Courbe TRC et dureté après trempe	23
Figure I.15: Procédé d'emboutissage	24
Figure I.16: Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre-flan	25
Figure I.17: a) Emboutissage par expansion, b) Emboutissage profond avec rétreint	25
Figure I.18: a) Presse d'emboutissage de la bouteille à gaz. b) Schéma de la forme	27
Figure I.19: Tôle circulaire prédisposée à l'emboutissage	27
Figure I.20: Forme de l'emboutie réalisée.	27

Chapitre II

Figure II.1 : Four électrique	29
Figure II.2: Polisseuse	29
Figure II.3: Microscope métallographique	30
Figure II.4: La méthode Vickers de mesure de dureté	31
Figure II.5: Microduromètre	31
Figure II.6: Diffractomètre des rayons X	32

Chapitre III

Figure III.1: Microstructures de l'acier BS ₂ de la tôle emboutie simple	34
Figure III.2: Microstructures de l'acier BS ₂ de la tôle emboutie après recuit de 30 mn à 650°C.	35
Figure III.3: Microstructures de l'acier BS ₂ de la tôle emboutie après recuit de 60 mn à 650°C.	36
Figure III.4: Microstructures de l'acier BS ₂ de la tôle emboutie après recuit de 90 mn à 650°C.	37
Figure III.5: Microstructures de l'acier BS ₂ de la tôle emboutie après recuit de 120 mn à 650°C.	38
Figure III.6: Microstructures de l'acier BS ₂ de la tôle emboutie après recuit de 150 mn à 650°C.	39
Figure III.7: Microstructures de l'acier BS ₂ de la tôle emboutie après recuit de 180 mn à 650°C.	40
Figure III.8: Spectre de diffraction des rayons X de l'acier BS2 à l'état embouti	43
Figure III.9: Spectre de diffraction des rayons X état recuits à 650°C 150min de maintiens.	44
Figure III.10: La variation de la microdureté Vickers en fonction de temps de maintien de l'acier 0.19% à 650°C suivi par un temps de maintien variant.	46

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les différentes classes d'aciers.	07
Tableau II.1: la composition chimique de l'acier BS2 (P245NB).	28
Tableau III.1 : les valeurs de mesures la dureté de l'acier 0.19% à 650° C Suivi par un temps de maintien varie.	45

Sommaire

INTRODUCTION GENERAL	01
CHAPITRE I : Etude Bibliographique	
I.1 Introduction	02
I.2 Fer et alliages ferreux	02
I.2.1 Propriétés chimiques, physiques et mécaniques du fer	02
I.2.2 alliages ferreux.....	03
a) Éléments alpha gènes et gamma gènes	03
b) Diagrammes de phases fer – carbone	04
I.3 Les aciers.....	08
I.3.1 Les différentes classes d’aciers	08
a) Aciers non alliés et aciers alliés	08
b) Aciers de qualité	09
c) Aciers spéciaux	09
d) Aciers inoxydables	09
I.4 Traitements thermiques des aciers	10
I.4. 1 Gammes des traitements thermiques de l'acier	11
I.4.1.1 Les recuits	11
I.4. 1. 2 Différents types de recuit.....	12
a) Le recuit de recristallisation.....	12
b) Le recuit de restauration.....	14
c) Le recuit d’homogénéisation.....	15
d) Le recuit de régénération (ou d’affinage structurale).....	16
e) Le recuit d’adoucissement.....	18
f) Le recuit complet (ou Total).....	19
I.4.1.3 La Trempe.....	21
a. Trempe à l’eau.....	21
b. Trempe à l’huile	22
c. Trempe à l’air	22
I.4.1.4 Le Revenu	24
I.5 Généralités sur l’emboutissage	25
I.5.1 Modes d'emboutissage	26
I.5.2 L’emboutissage en température.....	27
a) L’emboutissage à chaud	27
b) L’emboutissage à froid.....	27

CHAPITRE II : Matériau et méthodes expérimentales

II.1. Introduction.....	29
II.2 Matériau étudié.....	29
II.3 Méthodes expérimentales.....	30
II.3.1 Les traitements thermiques.....	30
II.3.2 Polissage mécanique.....	30
II.3.4 Les techniques d'analyse	31
II.3.4.1 Microscopie optique (MO)	31
II.3.4.2 Microdureté.....	31
II.3.4.3 Diffraction des rayons x	33

Chapitre III : Résultats expérimentales et interprétations

III.1 Introduction.....	34
III.2 Métallographie	34
III.3 Analyse par la diffraction des rayons X	42
III.4 La microdureté.....	44

CONCLUSION GENERAL	47
---------------------------------	----

Références Bibliographiques	48
--	----

ANNEXE

RÉSUMÉ

INTRODUCTION GENERAL

Le thème de la métallurgie est très vaste. On doit discuter des différents métaux (or, argent cuivre, fer), mais aussi des alliages (alliages cuivreux, acier, fonte, ...) mais aussi de leur découverte et de toutes les étapes de préparation des minerais pour obtenir le métal (cette étape s'appelle la minéralurgie) qui sera ensuite mis en forme (techniques de fabrication) pour en faire des objets. Il s'articule en différentes étapes très différentes qui requièrent des chaînes opératoires particulières (extraction, préparation, fabrication).

Du fait de sa grande résistance, de sa bonne aptitude à l'usinage et de sa grande compétitivité, l'acier est l'un des matériaux de construction les plus importants. En changeant sa composition chimique et les conditions d'obtention, il est possible de varier à grande échelle ses propriétés et le sidérurgiste est capable d'adapter ses propriétés aux exigences spécifiques des utilisateurs.

L'élaboration d'un acier pour une utilisation quelconque nécessite une étude approfondie et bien précise sur le domaine et les conditions de son utilisation, pour modifier les propriétés mécaniques d'un acier, on procède soit par la modification de sa composition chimique en lui additionnant d'autres éléments, soit par la modification de sa structure en lui faisant subir des traitements thermiques.

Notre travail, se restreint à l'étude des propriétés mécanique d'un acier BS2 à 0.19%C destiné a la fabrication la bouteille de gaz par l'effet de maintien à leur traitements thermique (recuit). Pour atteindre cet objectif, nous avons divisé notre travail en trois parties:

- La première partie est consacrée à l'étude bibliographique qui sont généralités sur les aciers et les différents traitements thermiques qui sont généralement appliqués aux aciers.
- La deuxième partie est consacrée à la présentation du l'acier BS2 et des différentes techniques expérimentales qui sont nous permettre de déterminer les méthodes de préparation métallographiques et les moyens de caractérisation.
- La troisième partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus, leur interprétation.
- Enfin, on achève notre travail par une conclusion.

CHAPITRE I
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Le Fer est un élément chimique. Il est assez difficile d'obtenir du fer très pur, mais ce n'est pas gênant car les propriétés d'emploi du fer deviennent bien plus intéressantes et variées lorsqu'on lui ajoute des éléments d'alliage judicieusement choisis et dosés. [1]

I.2 Fer et alliages ferreux:

I.2.1 Propriétés chimiques, physiques et mécaniques du fer

- Point de fusion: $T_f = 1538^\circ\text{C}$
- Structure cristalline:
 - ✓ CC (ferrite δ) entre $T_f = 1538^\circ\text{C}$ et 1394°C
 - ✓ CFC (austénite γ) entre 1394°C et 912°C
 - ✓ CC (ferrite α) entre 912°C et l'ambiante
- Passage de l'état ferromagnétique (à basse température) à l'état paramagnétique (à haute température) à 768°C (point de Curie).
- Masse volumique: $\rho = 7870 \text{ kg.m}^{-3}$
- Module d'élasticité longitudinal (module d'Young) E: 211400 N/mm^2 ($T=20^\circ\text{C}$)
- Module de Coulomb G : 81600 N/mm^2 ; ($T=20^\circ\text{C}$)
- Conductivité thermique: $73.3 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$; ($T=20^\circ\text{C}$)
- Coefficient de dilatation linéique (fer α à 20°C): $\alpha = 12.6.10^{-6} .\text{K}^{-1}$
- Résistivité électrique: $0.104 \mu\Omega .\text{m}$
- Caractéristiques mécaniques à 20°C (fer α pur):
 - ✓ Résistance à la traction $R_m = 180 \text{ à } 290 \text{ MPa}$
 - ✓ Limite d'élasticité $R_e = 100 \text{ à } 170 \text{ MPa}$
 - ✓ Allongement à la rupture $A \% = 40 \text{ à } 50\%$ [2 , 3]

I.2.2 alliages ferreux:

a) Elements alpha gènes et gamma genes

Le fer métallique existe sous deux formes cristallines:

- 1) La variété cubique centrée, stable au-dessous de 910°C (fer α) et au-dessus de 1400°C (fer δ). Les solutions solides dans le fer α sont appelées ferrites.
- 2) La variété cubique à face centrée, stable entre 910°C et 1400°C (fer γ). Les solutions solides dans le fer γ sont appelées austénites.

Les éléments d'addition ont des solubilités très différentes dans ces deux variétés. Ce fait entraîne l'existence de domaines de transformations très différentes en présence d'éléments d'addition (Figure I.1). Dans le fer pur, le passage de fer α au fer γ se produit à une température définie. La présence d'un élément d'addition entraîne l'apparition d'un domaine plus ou moins étroit dans lequel les deux variétés allotropiques peuvent coexister en équilibre. Les diagrammes permettent de classer les éléments d'addition en deux types:[4]

1) Les éléments gamma gènes qui abaissent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer γ et de ce fait abaissent les limites du domaine d'existence de l'austénite); ce sont essentiellement le nickel et le manganèse auxquels on peut ajouter le cuivre (peu utilisé comme élément d'alliage),

2) Les éléments alpha gènes qui relèvent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer α et de ce fait élèvent les limites du domaine d'existence de la ferrite); ce sont les plus nombreux des éléments d'alliage tels chrome, silicium, molybdène, vanadium, tungstène, titane. [5]

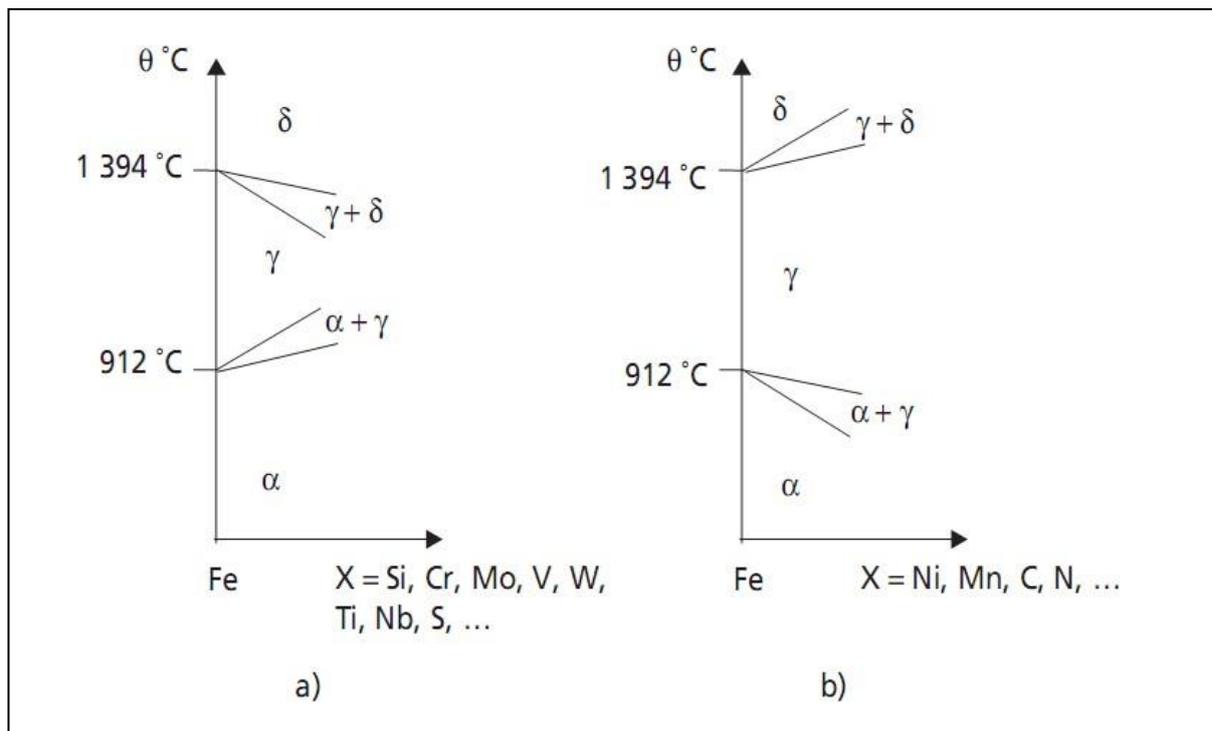


Figure I.1 : Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition [2]

b) Diagrammes de phases fer -carbone:

Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présence section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles. [6]

La figure I.2 présente les températures importantes pour l'acier et la fonte. Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région.

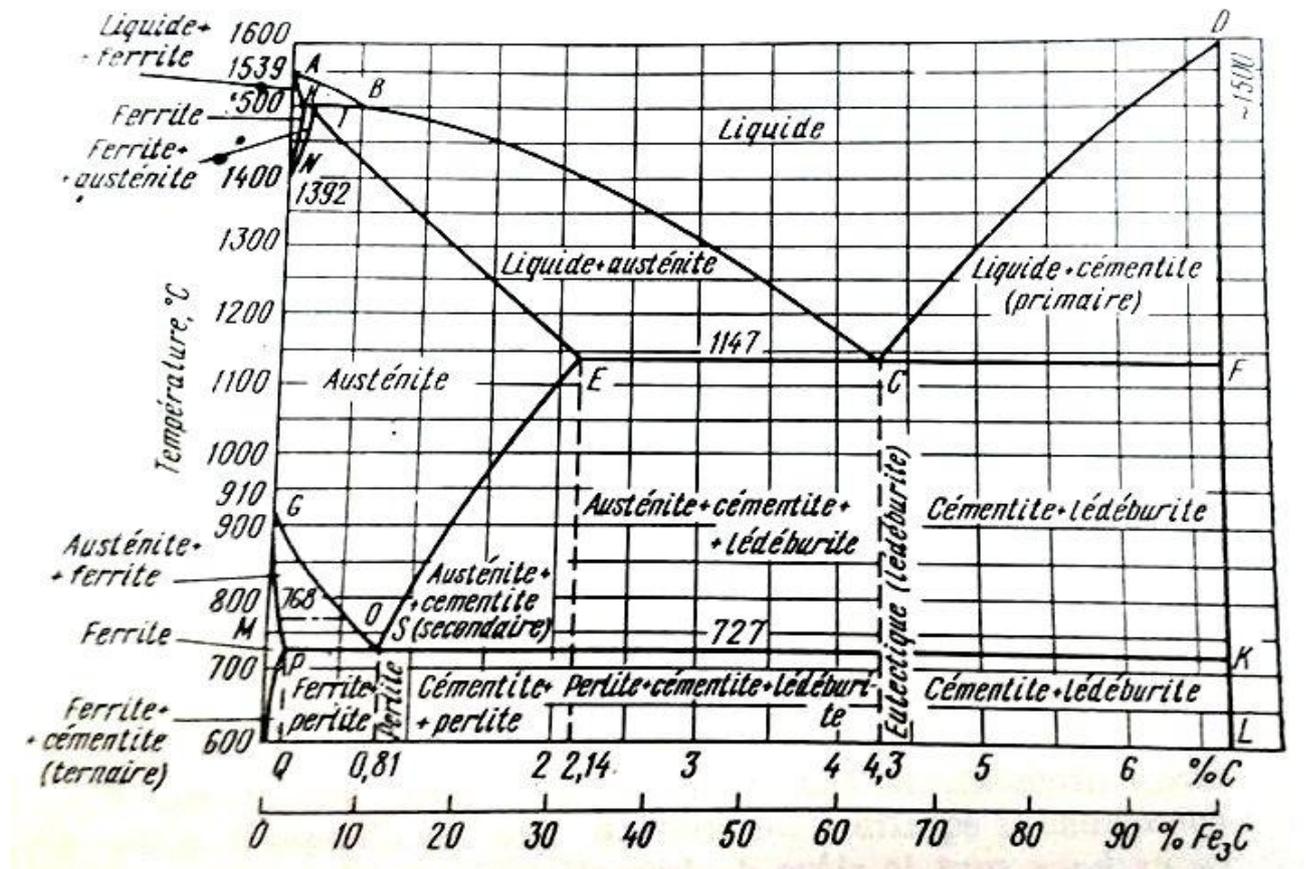


Figure I.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone. [7]

➤ **La ferrite (F) :**

Est une solution solide du carbone et d'autres inclusions dans le fer α . On distingue la ferrite α à basse température à solubilité du carbone allant jusqu'à 0.02%, et la ferrite δ à haute température à solubilité limite de 0.1%. un atome de carbone occupe dans le réseau de ferrite le centre d'une face du cube, ou s'inscrit une sphère de 0.29 rayon atomique R du fer, il loge également dans les dislocations, les lacunes, etc.

➤ **L'austénite (A) :**

Est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer γ . la solubilité limite du carbone dans le fer γ est de 2.14%. Dans le réseau du fer γ un atome de carbone occupe le centre d'une maille élémentaire ou peut s'inscrire une sphère de rayon 0.41 R (R est le rayon atomique de fer) et les domaines défectueux du cristal.

➤ **La cémentite (carbone de fer Fe_3C) :**

Est une combinaison chimique du fer et du carbone. La teneur de la cémentite en carbone est de 6.67%. La cémentite cristallise dans un système rhombique compliqué à empilement compact. Sa température de fusion n'est pas connue exactement du fait que la cémentite peut se décomposer et on adopte que sa fusion a lieu à peu près à 1550°C. Jusqu'à 210°C (point A_0) la cémentite est ferromagnétique. Ses propriétés caractéristiques sont la dureté élevée ($\sim HV1000$) et la plasticité très faible.

➤ **La perlite:**

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite. Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure. Cette microstructure est illustrée à la figure I.5. la perlite pure se forme à 727°C, et contient 0.77% de carbone. Cette phase comporte toujours 0.77% de carbone, on trouve de perlite et de la ferrite, pour un acier ou de la fonte contenant plus de 0.77% de carbone, la perlite se forme avec de la cémentite.

➤ **Le point eutectoïde :**

Un acier contenant 0.8% de carbone à la température de 727°C. Toute l'austénite de l'acier se transforme en perlite La microstructure de ces aciers est une combinaison de ferrite et de perlite. Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde sont appelés aciers hypereutectoïdes.[7]

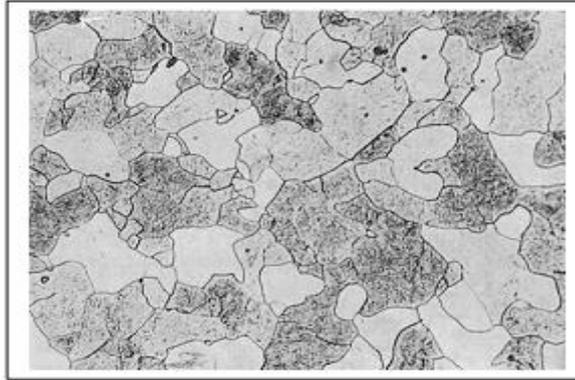


Figure I.3 : Structure ferritique

(Fer Armco, Traitement : 950 °C (30 min) – four, Attaque Nital (3 %), Grossissement : 180) [8]

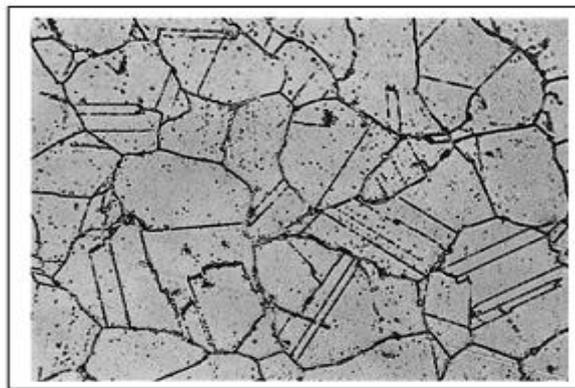


Figure I.4 : Structure austénitique (avec précipités de carbures)

Acier à 0,12 % C - 25 % Cr - 20 % Ni - 1,5 % Mn - 1,5 % Si Traitement : 1 125 °C (1 h) - eau - 800 °C (30 min) Attaque électrolytique (acide oxalique 10 %) Grossissement : 900 [8]



Figure I.5 : Structure perlitique

Acier à 0,8 % C - 0,21 % Mn - 0,22 % Si Traitement : 800 °C (30 min) – four Attaque Nital (3 %)

Grossissement : 900 [8]

I.3 Les aciers :

Les aciers sont des alliages fer-carbone qui comportent aussi une concentration appréciable d'autres éléments. Il existe des milliers d'alliages de ce type dont la composition est différente, de même que les traitements qu'ils ont subis. Les propriétés mécaniques dépendent de la teneur en carbone, laquelle est normalement inférieure à 1% m. 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 précises. [6]

I.3.1 Les différentes classes d'aciers:

Il est habituel de classer les aciers en plusieurs groupes correspondant à différentes particularités de composition ou d'emploi. Distingue selon des classes de qualité définies dans le tableau 01

Aciers	non alliés	alliés
de qualité	Aciers de qualité non alliés	Aciers de qualité alliés
spéciaux	Aciers spéciaux non alliés	Aciers spéciaux alliés
inoxydables		Aciers inoxydables

Tableau I.1 : Les différentes classes d'aciers

Ces notions sont définies comme suit.[5]

a) Aciers non alliés et aciers alliés :

Pour définir ces 2 classes d'aciers, on prend en compte :

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

domaine des aciers non alliés du domaine des aciers alliés. Un acier est considéré comme allié dès qu'une de ces limites est atteinte.

b) Aciers de qualité :

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

c) Aciers spéciaux :

Les aciers spéciaux présentent, par rapport aux aciers de qualité une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. Ils sont généralement destinés à un traitement thermique et se caractérisent par une réponse régulière à ce traitement.[5]

d) Aciers inoxydables :

Aciers spéciaux dont l'élément d'alliage de base est le chrome à des teneurs supérieures à 10 % et contenant souvent peu ou très peu de carbone (pour éviter la précipitation de carbures de chrome) mais, par contre, des éléments d'alliage agissant sur l'état structural et sur la résistance à la corrosion (nickel, molybdène, cuivre, titane, niobium...). Les fortes additions d'éléments d'alliage alphagènes (Cr, Mo...) ou gammagènes (Ni, Mn) modifient profondément l'état structural d'emploi de ces aciers, et on distingue quatre catégories.

1. Les aciers inoxydables martensitiques.
2. Les aciers inoxydables ferritiques.
3. Les aciers inoxydables austénitiques.
4. Les aciers inoxydables austéno-ferritiques.[3]

I.4 Traitements thermiques des aciers :

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement).

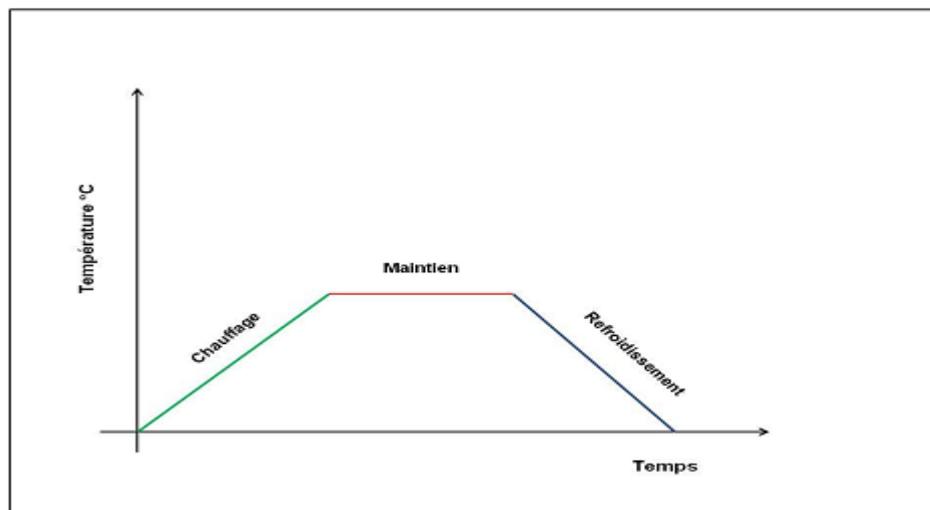


Figure I.6 : Le cycle thermique

Les effets des traitements thermiques, pour une pièce, dépendent :

- de la température maximale;
- de la durée de maintien de la pièce à cette température;
- du milieu dans lequel se trouve la pièce à cette température;
- de la vitesse de variation de la température lors du chauffage et surtout lors du refroidissement.
- des dimensions de la pièce à traiter (effet de masse). [9]

I.4. 1 Gammes des traitements thermiques de l'acier :

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- ❖ Le recuit.
- ❖ La normalisation.
- ❖ La trempe.
- ❖ Le revenu et le vieillissement.

Les principaux facteurs qui permettent de distinguer entre les différents types de traitements thermiques sont la température de maintien et la vitesse de refroidissement. [7]

I.4.1.1 Les recuits :

Les recuits consistent en un traitement thermique visant l'obtention d'états proches de l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire la restauration des propriétés originales du matériau. Ce procédé se déroule dans une atmosphère protégée pour prévenir l'oxydation de la surface métallique. Par exemple, quand on fabrique des carrosseries d'automobile, une tôle obtenue par laminage à froid sera trop résistante et pas assez ductile pour pouvoir être emboutie. Dans un tel procédé de fabrication, les déformations plastiques peuvent atteindre 50 %. Si une tôle laminée à froid était utilisée telle quelle pour l'emboutissage, il y aurait des risques de déchirure des tôles et la capacité des presses d'emboutissage devrait être doublée ou triplée. [9]

Le recuit a donc pour but, séparément ou simultanément :

- de supprimer les effets sur la structure :
 - de la solidification;
 - d'une déformation plastique;
 - d'une soudure;
 - d'un traitement thermique antérieur.

- de mettre le métal dans un état adouci défini ou de le faire tendre vers un état si la structure a été perturbée par des traitements antérieurs;
- de provoquer la formation de structures favorables à l'usinage ou à la déformation à froid;
- de provoquer la formation d'une structure déterminée en vue, par exemple, de réaliser un traitement thermique ultérieur;
- d'éliminer ou de réduire les contraintes internes de la pièce;
- d'atténuer l'hétérogénéité de la composition chimique.

Le recuit comporte un chauffage et un maintien à une température égale ou supérieur à $A_c 1$, suivi d'un refroidissement généralement lent. Cela dit, on distingue divers types de recuits, soit des recuits d'homogénéisation, de régénération, d'adoucissement, de détente, de sphéroïdisation, de normalisation, de recuit total, etc. [9]

I.4. 1.2 Différents types de recuit

a) Le recuit de recristallisation:

But du traitement :

C'est un recuit destiné à faire recristalliser un acier pour obtenir un grain plus fin, après un recuit de stabilisation. On l'utilise également pour régulariser les effets des contraintes provoquées par la déformation à froid à une température inférieure, les parties extérieures des pièces ainsi façonnées étant plus écrouies qu'à cœur. Dans ce cas, la structure cristalline du métal a été d'autant plus modifiée que les contraintes de déformation ont été plus importantes. Ce traitement est absolument nécessaire entre chaque opération de déformation importante. La recristallisation s'accompagne généralement d'une réduction de la résistance et de la dureté d'un matériau, ainsi qu'une augmentation simultanée de la ductilité. [9]

Champ d'application :

- Pièces estampées dans un acier laminé à froid;
- Pièces forgées pour faciliter les opérations ultérieures (rectification ou formage à froid).

Cycle thermique :

A → B : Chauffage;

B → C : Maintien pendant au moins 5 heures à une température comprise entre 500 °C et 700 °C
(température proportionnelle au taux d'écroutissage);

C → D : Refroidissement lent.

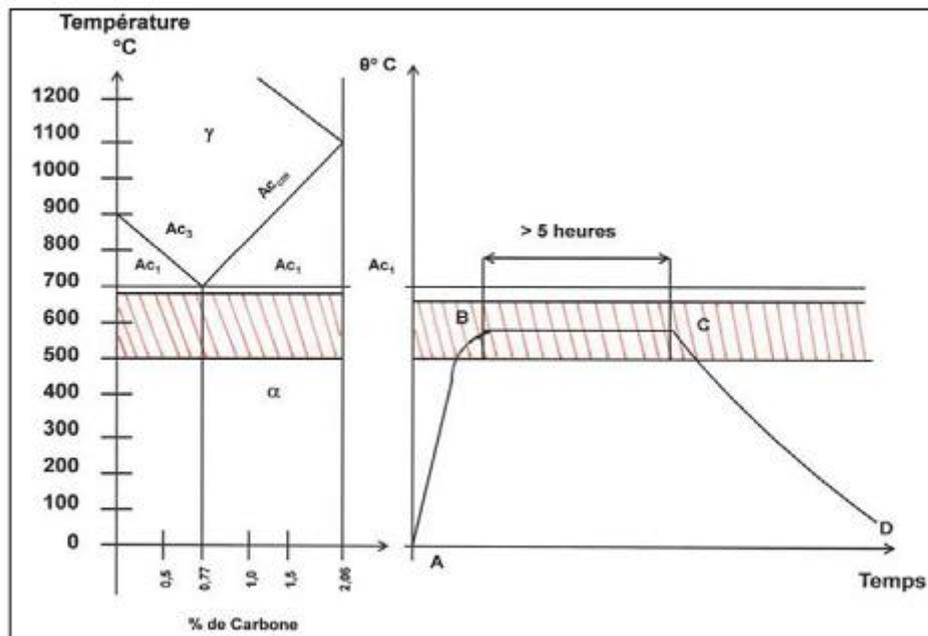


Figure I.7 : Cycle thermique (recuit de recristallisation) [9]

Technologies de chauffe :

- Four à l'air;
- Four sous vide;
- Four à atmosphère contrôlée;
- Four à bain de sel.

b) Le recuit de restauration:

But du traitement :

Le recuit de restauration est similaire au traitement de recristallisation. Seule la température de traitement est inférieure (entre 200 et 450 °C). Il rétablit partiellement les propriétés de l'acier sans qu'il y ait modification apparente de la structure cristalline. [9]

Champ d'application :

- Aciers à haute teneur en carbone;
- Acier hypereutectoïde;
- Aciers alliés.

Cycle thermique :

A → B : Chauffage;

B → C : Maintien pendant au moins 5 heures à une température comprise entre 200 °C et 450 °C;

C → D : Refroidissement lent.

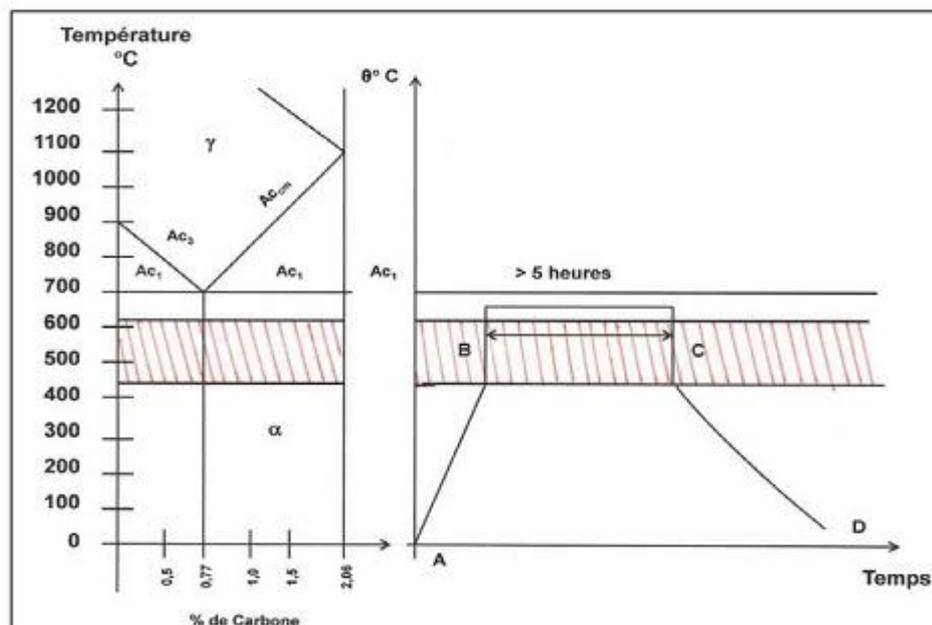


Figure I.8 : Cycle thermique (recuit de restauration) [9]

Technologies de chauffe :

- Four à l'air;
- Four sous vide;
- Four à atmosphère contrôlée;
- Four à bain de sel.

c) Le recuit d'homogénéisation**But du traitement :**

Le recuit d'homogénéisation s'applique aux aciers bruts de fonderie pour lesquels le refroidissement a entraîné une mauvaise répartition des constituants (hétérogénéité). Il a pour but de réduire cette hétérogénéité. En fait, ce traitement vise à la fois une composition chimique homogène et adoucissement du matériel, par chauffe et retenue prolongée à température élevée. [9]

Champ d'application :

- Aciers bruts de coulée;
- Aciers moulés.

Cycle thermique :

A → B : Chauffage;

B → C : Maintien pendant plusieurs heures à une température élevée, soit de 1000 °C à 1200 °C domaine austénitique;

C → D : Refroidissement lent.

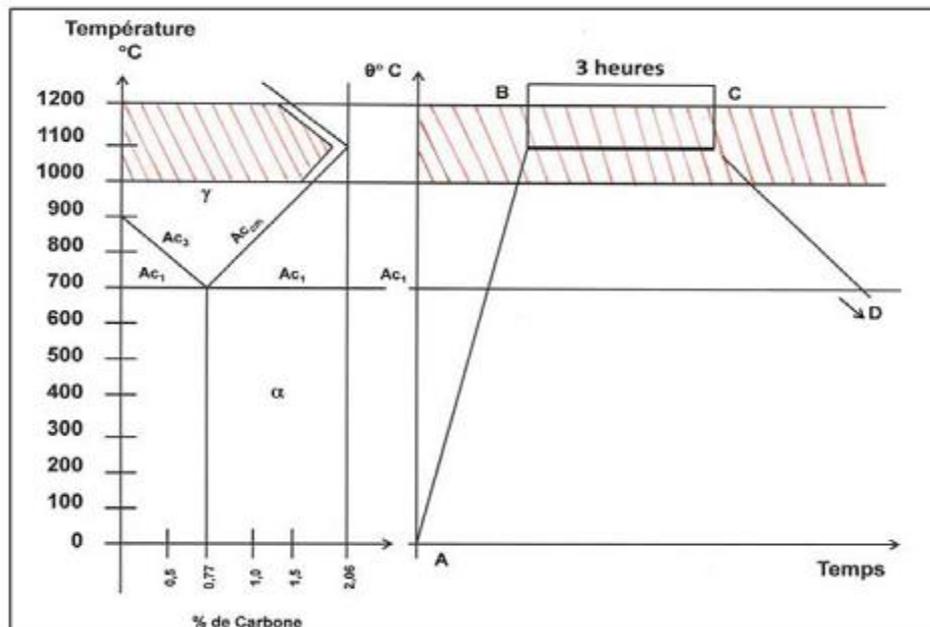


Figure I.9 : Cycle thermique (recuit d'homogénéisation) [9]

Technologies de chauffe :

- Four à l'air;
- Four sous vide;
- Four à atmosphère contrôlée;
- Four à bain de sel.

d) Le recuit de régénération(ou d'affinage structurale):

But du traitement :

Le maintien prolongé de l'acier à une température supérieure à Ac_3^4 (domaine austénitique) favorise le grossissement des grains d'austénite. Lors du refroidissement, de gros grains de perlite apparaissent. Le métal dit « surchauffé » présente alors une certaine fragilité. Le recuit de régénération a pour but d'affiner ce grain et de rendre à l'acier sa structure fine. [9]

Champ d'application :

- Pièces forgées à haute température;
- Aciers moulés; pièces avec des soudures.

Cycle thermique :

A → B : Chauffage rapide avec fragmentation des grains;

B → C : Maintien à une température $\geq A_{c3}$, le temps nécessaire pour permettre une niformisation de la température (durée variant selon les dimensions de la pièce), entre 750 °C à 950 °C;

C → D : Refroidissement lent à l'air.

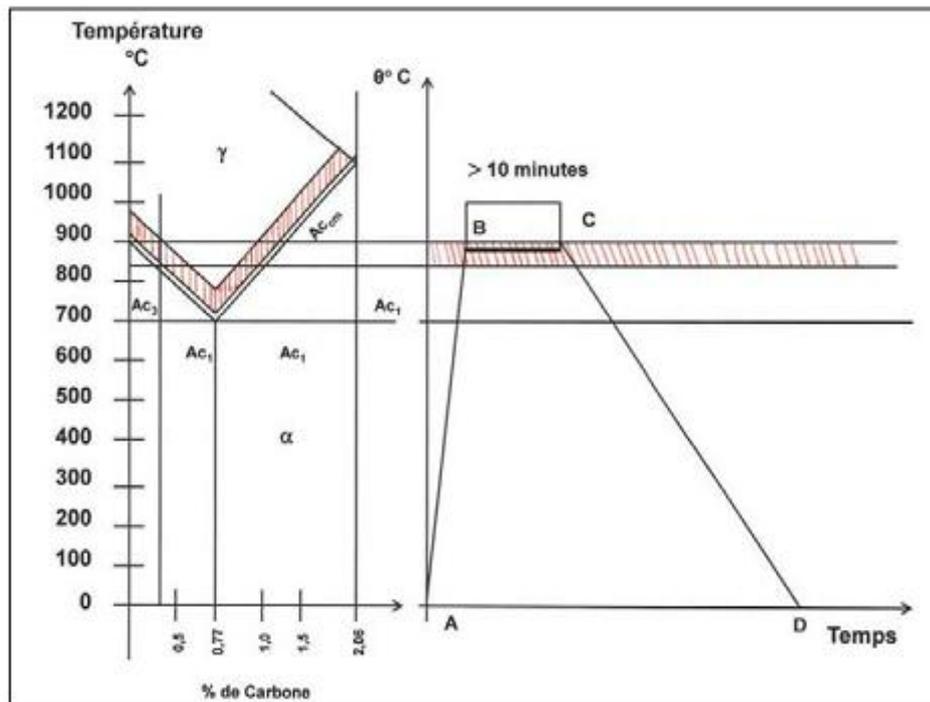


Figure I.10 : Cycle thermique (recuit de régénération) [9]

Technologies de chauffe :

- Four à l'air;
- Four sous vide;
- Four à atmosphère contrôlée;
- Four à bain de sel.

e) Le recuit d'adoucissement

But du traitement :

Le recuit d'adoucissement s'effectue sur les pièces trempées dans le but de faire disparaître les effets de la trempe. Il permet par la suite un usinage plus facile. Une méthode particulière d'adoucissement consiste à utiliser un cycle thermique permettant de « sphéroïdiser » ou « globulariser » la perlite, en chauffant l'acier et en le laissant refroidir tout juste au-dessous et autour duquel on fait intervenir de faibles variations de température pour faciliter la formation de petites sphérules de carbure de fer, dans une matrice perlitique. [9]

Champ d'application :

- Aciers au carbone
- Aciers alliés.

Cycle thermique :

A → B : Chauffage;

B → C : Maintien à une température $\geq A_c3$, pendant une courte durée (minimum 15 minutes pour les petites pièces);

C → D : Refroidissement très lent (à l'air, au four ou dans une matière isolante : cendres, sable, chaux).

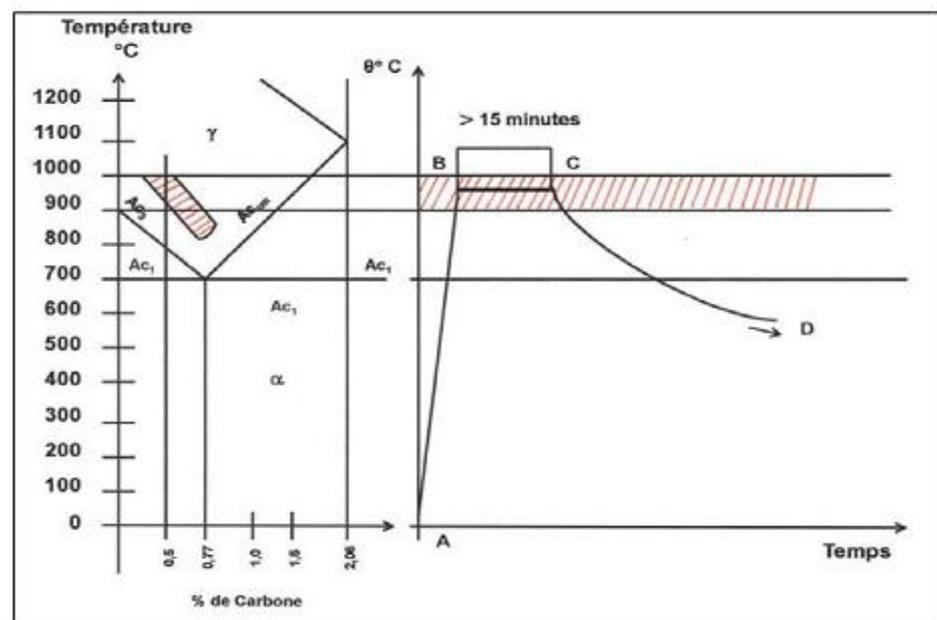


Figure I.11 : Cycle thermique (recuit d'adoucissement) [9]

Technologies de chauffe :

- Four à l'air.
- Four sous vide.
- Four à atmosphère contrôlée.
- Four à bain de sel.

f) Le recuit complet(ou Total)**But du traitement :**

Le recuit complet est un traitement qui annule tous les traitements précédents. Bien que semblable au recuit de normalisation, le refroidissement se fait toutefois de manière contrôlée au four car selon la nuance d'acier traitée et l'épaisseur, il se peut que le refroidissement à l'air calme suffise à tremper la pièce ou à donner une structure qui rend l'acier non apte à l'usinage. Les températures et les temps de traitement sont sensiblement les mêmes que pour le recuit de normalisation avec un maintien d'une minute par millimètre d'épaisseur de la pièce. Ce recuit permet de détruire partiellement ou totalement l'effet d'écrouissage que le métal a subi préalablement. [9]

Champ d'application :

- Aciers à haute teneur en carbone;
- Acier hypereutectoïde; pièces forgées.

Cycle thermique :

A → B : Chauffage;

B → C : Le cycle thermique est semblable à celui du recuit de régénération sauf que la température de chauffage est un peu plus élevée;

C → D : Refroidissement très lent dans le four.

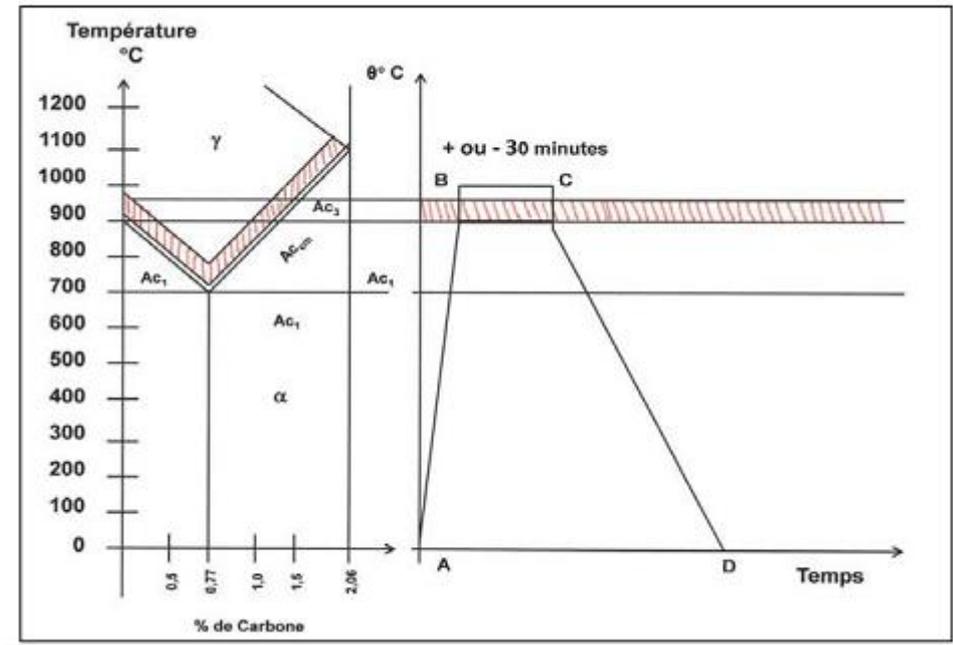


Figure I.12 : Cycle thermique (recuit complet) [9]

Technologies de chauffe :

- Four à l'air;
- Four sous vide;
- Four à atmosphère contrôlée;
- Four à bain de sel.

I.4.1.3 La Trempe

Dans le cadre des traitements thermiques de durcissement des alliages métalliques un refroidissement après un chauffage provoquant la mise en solution des éléments susceptibles de former des précipités (mise en solution précédée ou accompagnée d'une transformation allotropique) peut avoir différents objectifs :

- conserver en solution hors équilibre les éléments précipitables (en vue d'une précipitation contrôlée lors d'un chauffage ultérieur); on conçoit que, pour ce faire, il sera nécessaire de réaliser un refroidissement plus rapide qu'un refroidissement critique correspondant à l'alliage considéré;
- provoquer une précipitation dans des conditions permettant d'obtenir le durcissement souhaité; il faudra alors effectuer un refroidissement selon une loi imposée par l'alliage considéré.

Ces refroidissements sont généralement réalisés par mise en contact du bloc métallique avec un fluide (qui est généralement à température ambiante ou parfois préchauffé), fluide qui absorbe sa chaleur. Dans ces conditions les caractéristiques du refroidissement dépendent de divers facteurs :

- la conduction de la chaleur dans le métal ;
- la quantité de chaleur à extraire du métal ;

La trempe s'effectue en général soit : [5]

a. Trempe à l'eau :

L'eau constitue le milieu de refroidissement le moins cher qui permette, dans la pratique de tous les jours, de réaliser les refroidissements les plus énergiques. Toutefois, il faut noter qu'au cours d'une trempe à l'eau la vitesse de refroidissement n'est pas constante. L'eau a l'avantage de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique. Lorsque la géométrie de la pièce le permet, l'eau peut former facilement des bulles de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux ; la circulation de l'eau, l'agitation de la pièce ainsi que sa présentation doivent donc être adaptées. Si la température de l'eau s'élève, son pouvoir refroidissant diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée).

Ainsi donc, l'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :

- de la température de l'eau ;
- de l'agitation des pièces ;
- de la circulation de l'eau et de son renouvellement éventuel. Par ailleurs, il est nécessaire d'éviter toute contamination de l'eau par des produits étrangers (sels notamment), qui changerait sa sévérité de trempe et empêcherait d'obtenir des résultats constants. [12]

b. Trempe à l'huile :

Il existe une très grande variété d'huiles de trempe qui peuvent différer :

- par l'huile de base (minérale ou synthétique) ;
- par les additifs qu'elles contiennent, additifs qui ont pour objet soit de modifier le pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (notamment la résistance à l'oxydation).

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante; elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise, suivant les propriétés de l'huile considérée, entre 400 et 600 °C, soit à un niveau bien supérieur à celui correspondant à la trempe à l'eau. La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente. [12]

c. Trempe à l'air :

Est le cas le plus simple à mettre en œuvre et il doit être choisi en priorité dans le cas des aciers à outils de bonne trempabilité, car les risques de déformations sont d'autant plus grandes que le mode de refroidissement est plus rapide.

Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier.

Pour les aciers au carbone, la trempe se fait dans l'eau de 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérent à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente. Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable.

L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion.

Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation.

Un plan d'accolement est un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans l'ancienne et la nouvelle structure (minimum de distorsion). Lors de la transformation les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille.

L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation α - γ . Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en conditions isothermes, Température - Temps - taux de Transformation, Figure I.13) et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, voir Figure I.14) dans le cas des trempes. [12]

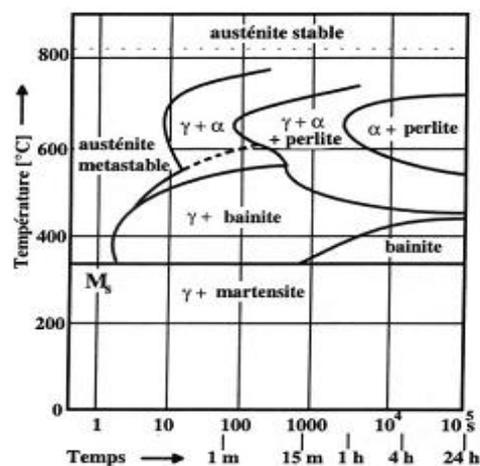


Figure I.13 : Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C) : Ce diagramme se lit en suivant une isotherme. [12]

I.4.1.4 Le Revenu :

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

D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation. [12]

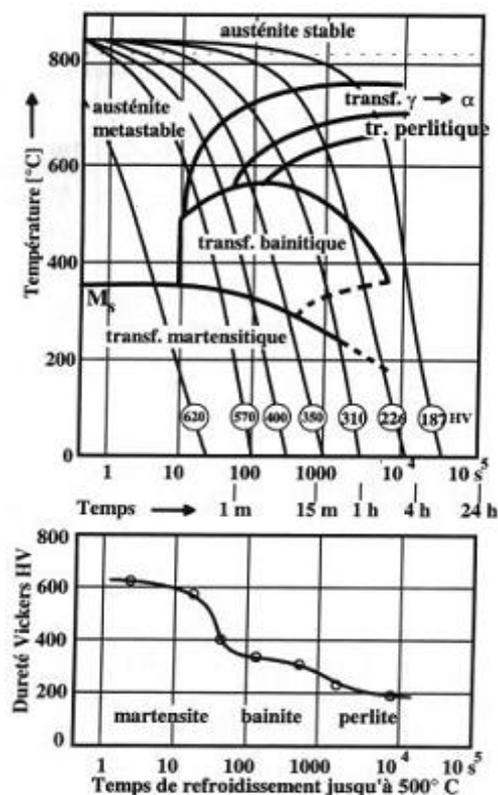


Figure I.14 : Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement [12]

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 30 min sont représentées dans le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier. [12]

I.5 Généralités sur l'emboutissage :

Emboutir : « Travailler une plaque de métal au marteau et sur une enclume, de manière à la rendre concave d'un côté et convexe de l'autre » [Litré]. Par cette définition, nous sommes à même d'imaginer qu'il y a fort longtemps que l'on emboutit des tôles. Les temps modernes, nés de la société de consommation, ont mené aux développements de l'automobile et à l'équipement des foyers entre autres. Par là même, le marteau est devenu poinçon, l'enclume, matrice et, les pinces et étriers servant à maintenir la tôle, serre-flan. L'emboutissage consiste alors à fabriquer, à partir d'un flan plan de faible épaisseur, une pièce de forme complexe généralement non développable (Figure I.15 et I. 16). Le flan étant plaqué, avec une certaine force contre la matrice, par le serre-flan et, mis en forme par avancée du poinçon à l'aide d'une presse. [13]

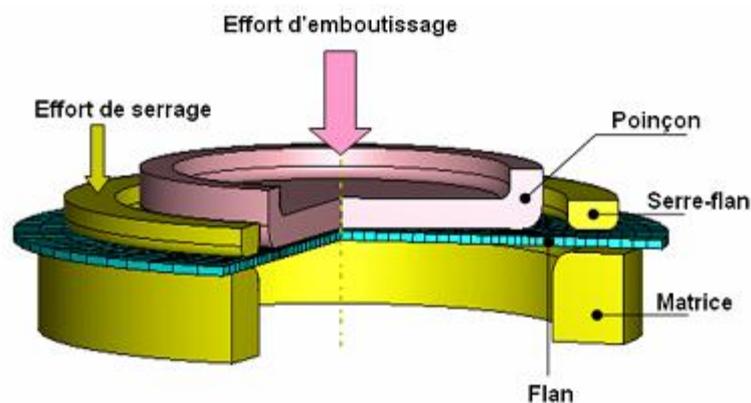


Figure I.15. Procédé d'emboutissage [14].

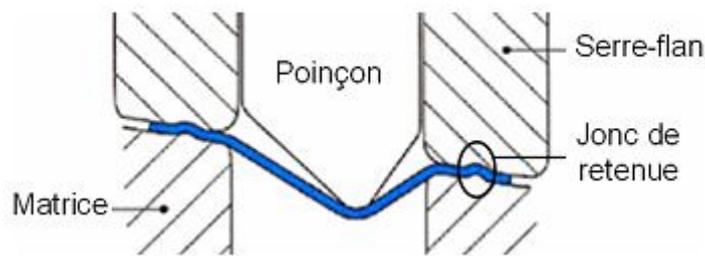


Figure I.16. Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre-flan.[14].

I.5.1 Modes d'emboutissage :

L'emboutissage impose à la tôle différents modes de déformation dont le but est l'obtention d'une surface creuse. Le type d'outillage conditionne les deux cas limites de déformation :

L'expansion : c'est l'accroissement du diamètre d'un corps creux, par action sur sa paroi interne à l'aide d'un outil, d'un fluide ou d'un matériau élastique. Le schéma (Figure I.17-a) met en évidence un emboutissage par expansion sur le poinçon, le flan étant bloqué sous le serre-flan, l'épaisseur sous le poinçon diminue.

Le rétreint : c'est la réduction diamétrale de l'extrémité ouverte d'un corps creux. Le schéma (Figure I.17-b) montre un emboutissage profond avec rétreint du métal glissant sous le serre-flan, l'épaisseur entre serre-flan et matrice peut augmenter. [13]

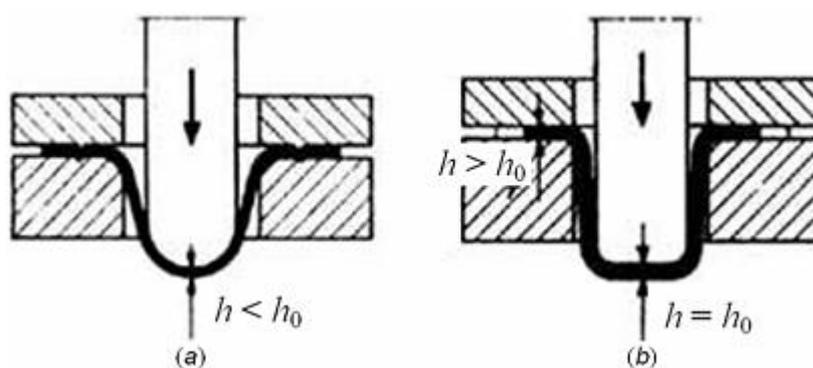


Figure I.17. a) Emboutissage par expansion, b) Emboutissage profond avec rétreint.

I.5.2 L'emboutissage en température :

Il existe deux techniques d'emboutissage :

a) L'emboutissage à froid

Cette technique consiste à former une pièce à température ambiante. Elle est principalement utilisée sur un outillage double effet mais peut aussi l'être sur un outillage simple effet dans le cas où les emboutis sont peu profonds ou s'ils nécessitent peu d'effort de serrage. Ce type de formage permet d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle, limite les coûts et évite la formation d'oxyde. Néanmoins, l'épaisseur des tôles à emboutir ainsi que les caractéristiques mécaniques sont à l'origine des limitations de cette technique. En effet, il devient nécessaire pour les grandes épaisseurs d'effectuer l'emboutissage en plusieurs passes. A ceci, il faut ajouter d'une part l'effet de l'érouissage apparaissant lors de la mise en forme et se traduisant par un durcissement structural et une baisse de la ductilité. D'autre part, la création de contraintes résiduelles au sein de la pièce finie en limite ses applications (risque de rupture fatigue). [15]

b) L'emboutissage à chaud :

Principalement utilisé sur presses hydrauliques simple ou double effet, le formage de fonds de réservoir en acier est le plus important domaine d'application. Cette technique facilite la déformation du matériau, permet l'emboutissage de pièces profondes par chauffage du flan (et de la matrice) et évite l'érouissage et la formation de contraintes résiduelles. Les cadences de production de l'emboutissage à chaud sont moins élevées que celles de l'emboutissage à froid du fait de l'inertie de chauffage. De plus les pièces finies sont de moins bonne qualité, que ce soit au niveau de l'état de surface ou du dimensionnement. Enfin, cette technique nécessite des mises au point de la sécurité plus importantes. [15]

a)



b)

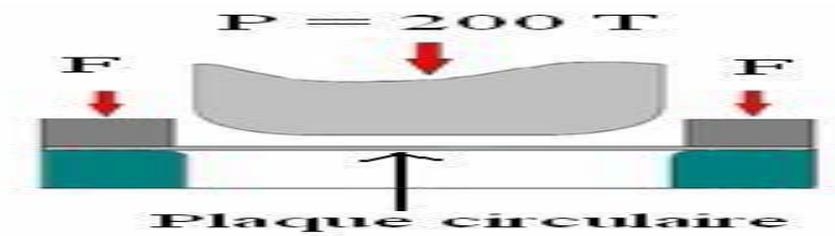


Figure I.18 :a) Presse d'emboutissage de la bouteille à gaz.
b) Schéma de la forme [18]



Figure I.19 .Tôle circulaire prédisposée à l'emboutissage [18]



Figure I.20. Forme de l'emboutie realise [18]

CHAPITRE II
MATÉRIAU ET
MÉTHODES
EXPÉRIMENTALES

II.1. Introduction:

L'étude expérimentale constitue la base de l'émission des hypothèses concernant les mécanismes de l'origine . Dans notre matériau, elle permet de confirmer certaines des théories mises en avant lors de l'étude bibliographique ou nouvellement émises à la suite de ce travail. Après une présentation générale du matériau étudié, des traitements thermique et thermo-mécaniques imposent à ce dernier, les principales techniques expérimentales utilisées sont présentées.

II.2 Matériau étudié:

Pour réaliser cette étude nous avons choisi l'acier BS2(P245NB) utilisé dans la fabrication des bouteilles à gaz (BAG Batna) .

D'après la norme P245NB. la composition chimique de cet alliage acier classée dans le tableau suivant :

Eléments	C	Si	Mn	P	S	AL	Nn	Nb	Ti
La quantité massique (%)	0.19	0.25	0.4	0.025	0.015	0.09	0.009	0.05	0.03

Tableau II.1: la composition chimique de l'acier BS2 (P245NB)

II.3 Méthodes expérimentales:

II.3.1 Les traitements thermiques:

Nous avons traité l'acier après lemboutissage avec un recuit pendant différents temps, (30 min , 1 h, 1.5 h, 2 h ,2.5 h et 3 h) à température 650 °C.



Figure II.1 Four électrique

II.3.2 Polissage mécanique:

Pour les observations aux microscopes optiques, les échantillons sont polis sur une polisseuse mécanique avec papiers abrasifs de différentes granulométries de 240 à 1200 en suite sur tissus feutré avec addition du lubrifiant et de la patte diamantée. Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée, séchés, puis attaqués chimiquement par:le nital 4% (une solution alcoolique nitrique) de composition 96%d'éthanol (C_2H_5OH) et 4% d'acide nitrique (HNO_3).



Figure II.2 Polisseuse

II.3.4 Les techniques d'analyse :

Les techniques d'analyse utilisées dans notre travail sont:

- La microscopie optique (M.O)
- La microdureté Vickers (HV)
- La diffraction des rayons X (DRX)

II.3.4.1 Microscopie optique (MO) :

La première approche pour une compréhension des différents traitements thermique et thermomécanique que subit l'échantillon est sa microstructure, car on peut observer, pour une matrice déterminée, l'évolution des grains (la taille, la forme...), la répartition des précipités, mouvement du joint de grain, les linges de glissement, et bien d'autres caractéristiques structurales.

Pour cela, nous avons utilisé un microscope métallographique de type Hund équipé d'un appareil photo numérique (**Figure II.3**) qui nous permis de prendre des micrographies de la structure des échantillons étudiés pour des grossissement allant jusqu'à 800 fois.

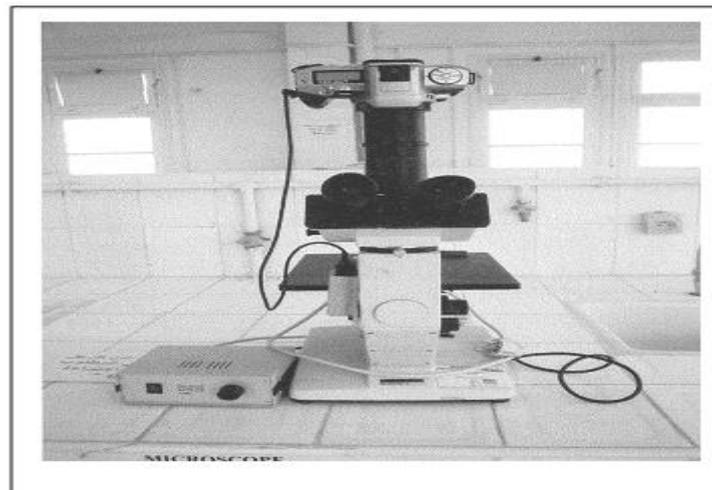


Figure II.3 Microscope métallographique

II.3.4.2 Microdureté:

La microdureté de Vickers est le rapport entre la charge appliquée et la surface projetée de l'empreinte rémanente (Fig. **II.4**) :

$$HV = F/S$$

Où F est la charge appliquée en kgf, et S la surface de l'empreinte en mm².

La valeur S s'obtient à partir de la mesure de diagonale d en mm.

$$\text{Soit: } S = d^2 / 2 \cos 22^\circ$$

$$\text{HV} = 1.8544F / d^2$$

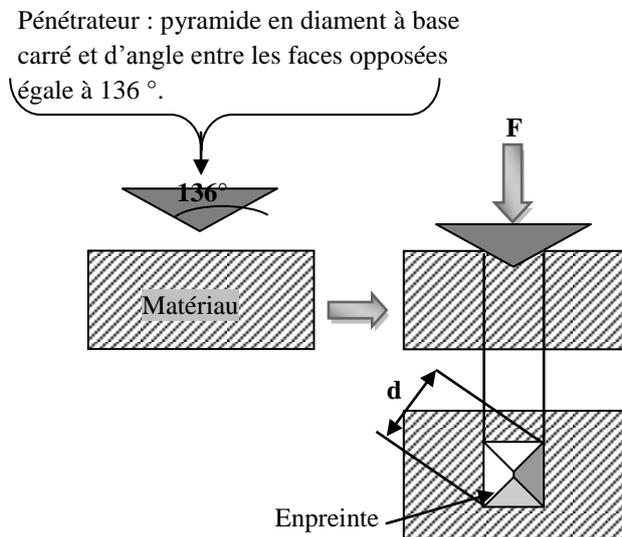


Figure II.4: la méthode Vickers de mesure de dureté

Pour suivre la microdureté de notre acier nous avons utilisé un appareil de mesure de la microdureté de marque Affri à affichage numérique (Fig.II.5).

Nous avons opté pour des mesures de dureté Vickers avec une charge de **500g**. De cinq à sept mesures sont effectuées sur chaque échantillon et une moyenne est prise avec élimination des valeurs non conformes.

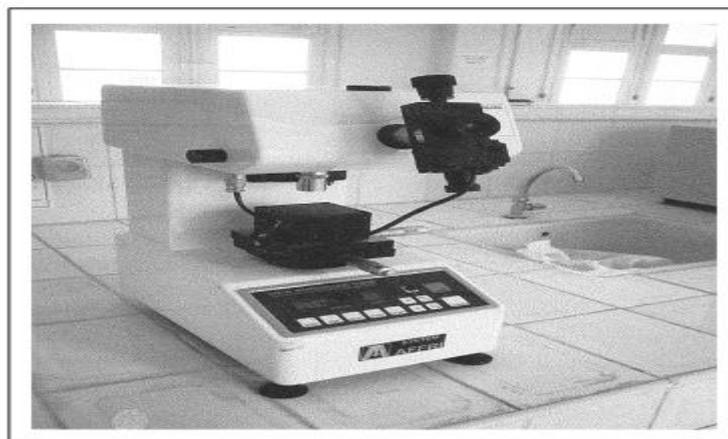


Figure II.5 Microduromètre

II.3.4.3 Diffraction des rayons x :

La diffraction se produit quand une radiation électromagnétique interagit avec les atomes d'un réseau cristallographique et quand la longueur de l'onde diffractée équivaut à l'espace interréticulaire. A partir des relations basées sur les découvertes de Laue et Bragg, la diffraction des rayons X peut être interprétée comme une réflexion sur une famille de plans {hkl}. Pour une famille donnée de plans cristallographiques {hkl}, de distance interréticulaire d, la relation de Bragg donne la relation entre l'angle d'incidence θ (angle de Bragg) du faisceau par rapport aux plans considérés {hkl}, sa longueur d'onde λ et d.

$$\lambda = 2d \sin\theta$$

L'analyse par la technique de diffraction des rayons X a été réalisée avec un appareil Bruker Analytical X-ray Systems du Laboratoire des RX à l'université de Biskra (Fig.II.7)



Figure II.6 Diffractomètre des rayons X

CHAPITRE III
RÉSULTATS
EXPÉRIMENTAUX ET
INTERPRÉTATIONS

III.1 Introduction:

Dans ce chapitre nous présenterons des résultats concernant l'influence de recuit lors des traitements thermiques sur les propriétés microstructurales et mécaniques de l'acier BS2 après l'emboutissage.

Dans cette partie d'étude, nous avons exposé en premier lieu les résultats obtenus sur l'acier à l'état emboutie et puis présentera les résultats de l'acier après le recuit à température 650°C .

III.2 Métallographie:

L'observation microscopique est réalisée par un microscope optique, son usage nous a permis de suivre l'évolution microstructural de l'échantillon, avec grossissement X50 et X100, prendre les photos pour différent phases présents et commenter leurs morphologies respectives.

Dans cette partie de notre travail, nous avons suivi l'évolution de la taille des grains sur la tôle d'acier hypoeutectoïde (0.19%C) au cours recuit à une température de 650°C pendant un temps de maintien de 30min

- Les résultats des observations sont illustrés sur les figures suivantes :

L'observation de la microstructure à l'état emboutie simple (figure III.1) montre qu'elle est de type ferrito-perlitique [8] et nous avons observé un l'allongement de grain pendant la déformation (emboutissage).

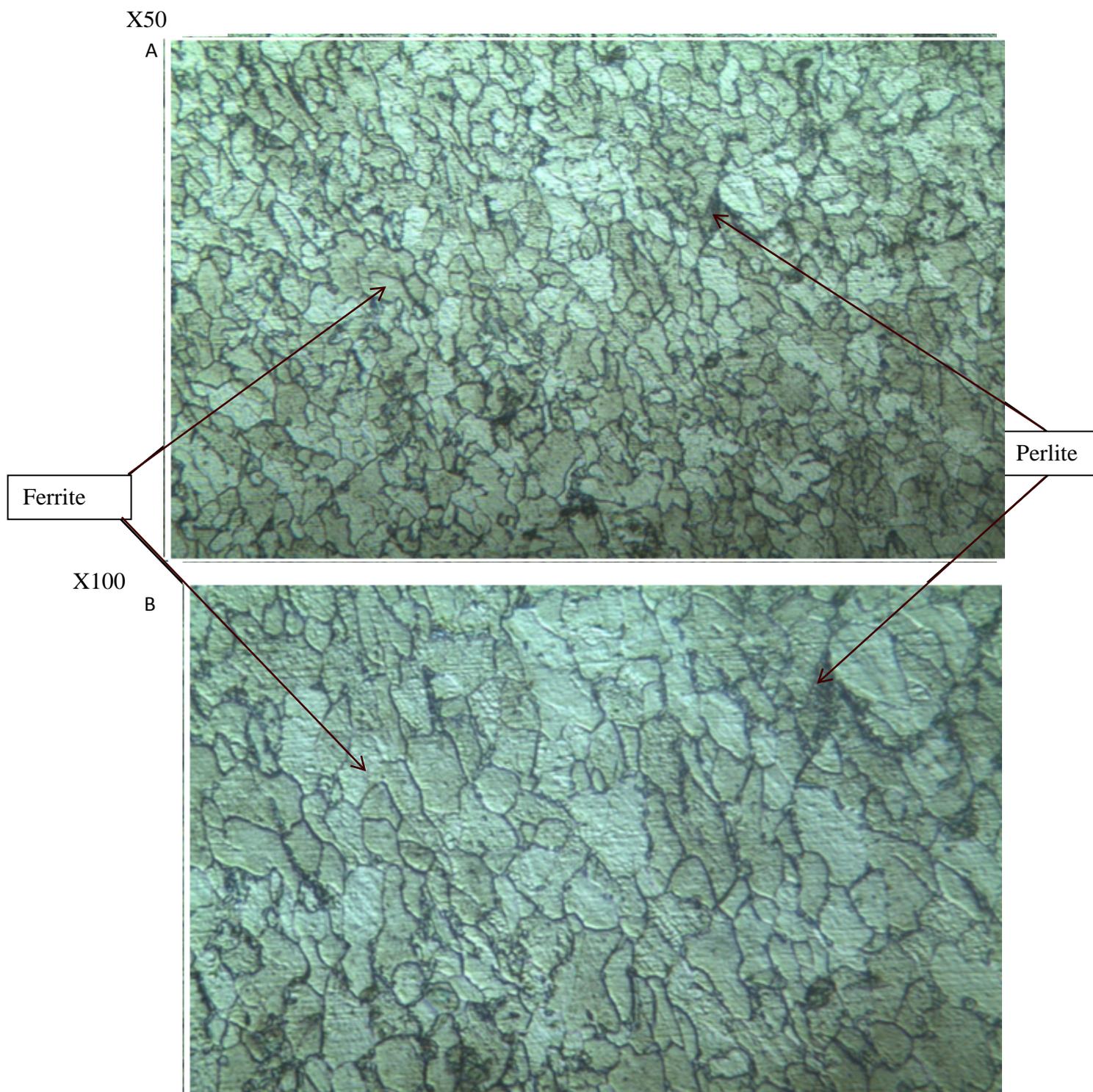
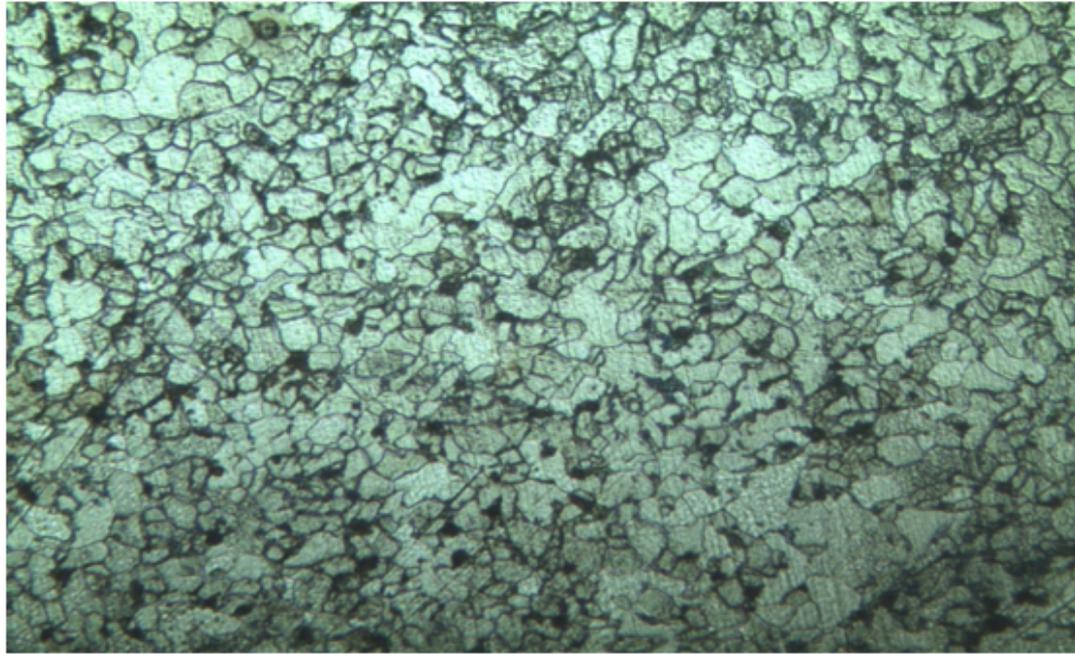


Figure III.1 Microstructures de l'acier BS₂ de la tôle emboutie simple.

- Dans le cas de l'échantillon recuit pendant 30 min à température 650°C (figure III.2) nous avons observé que la microstructure est restée toujours ferrito-perlitique [8] avec une augmentation des taches noirs qui illustrent l'augmentation des précipités (Fe_3C)

X50



X100

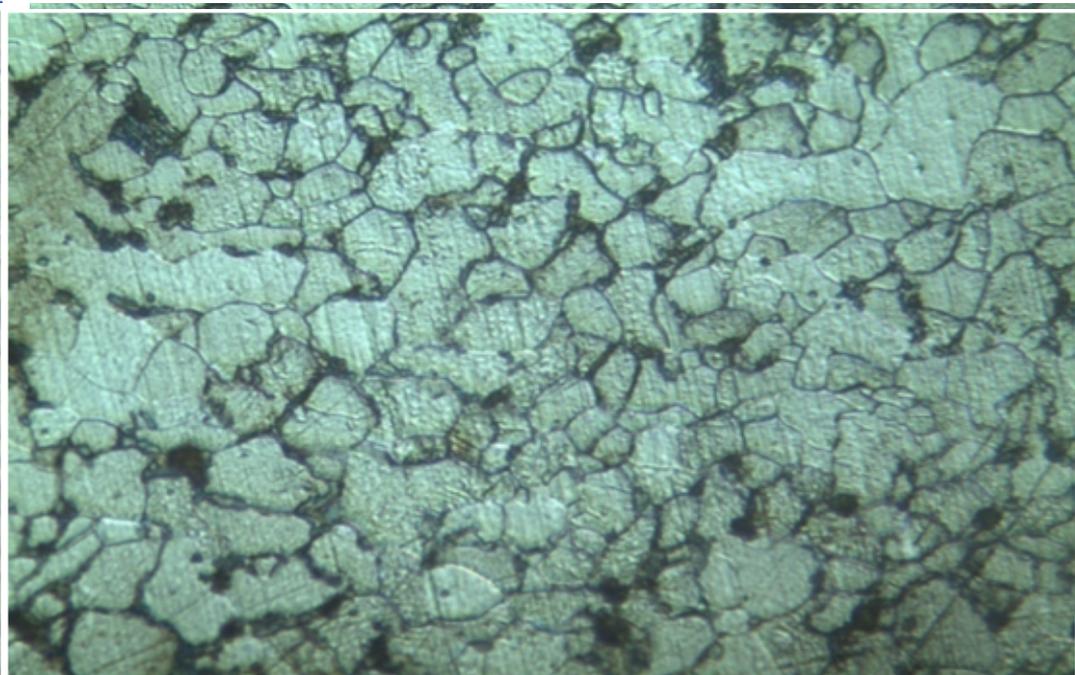
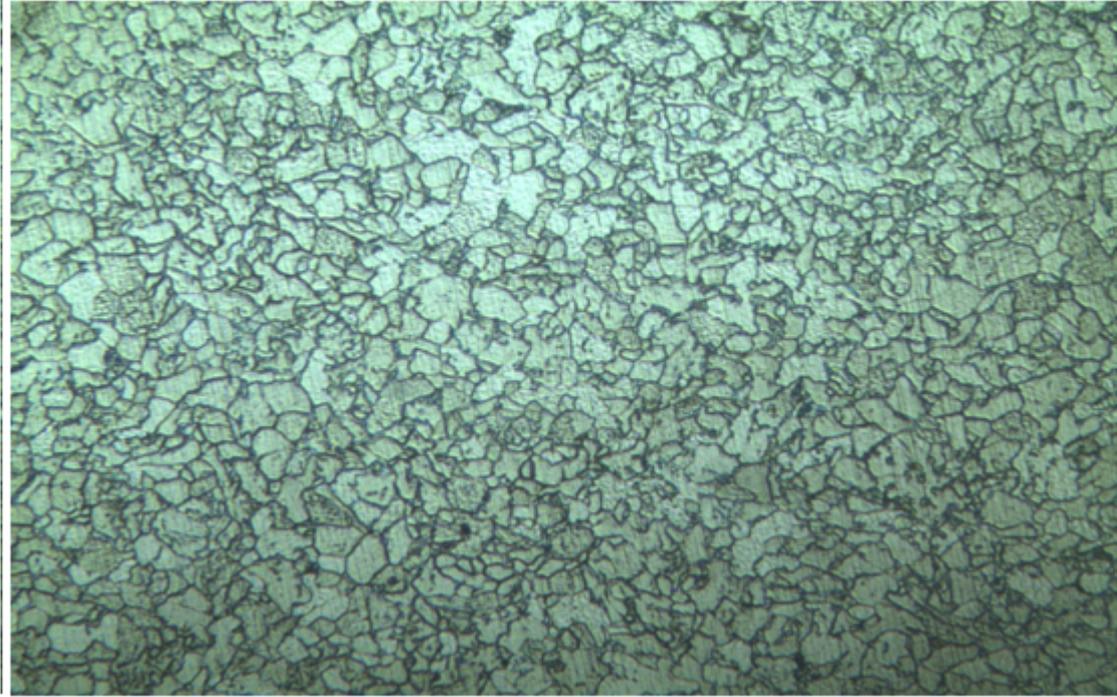


Figure III.2 Microstructures de l'acier BS₂ de la tôle emboutie après un recuit de 30 mn à 650°C.

-Résultats obtenus à 650 C° avec 60 min de maintien (la figure III.3) nous avons remarqué un affinement des grains au début ceci est due à la formation de la ferrite et de la perlite, et la formation de la bainite.

X50



X100

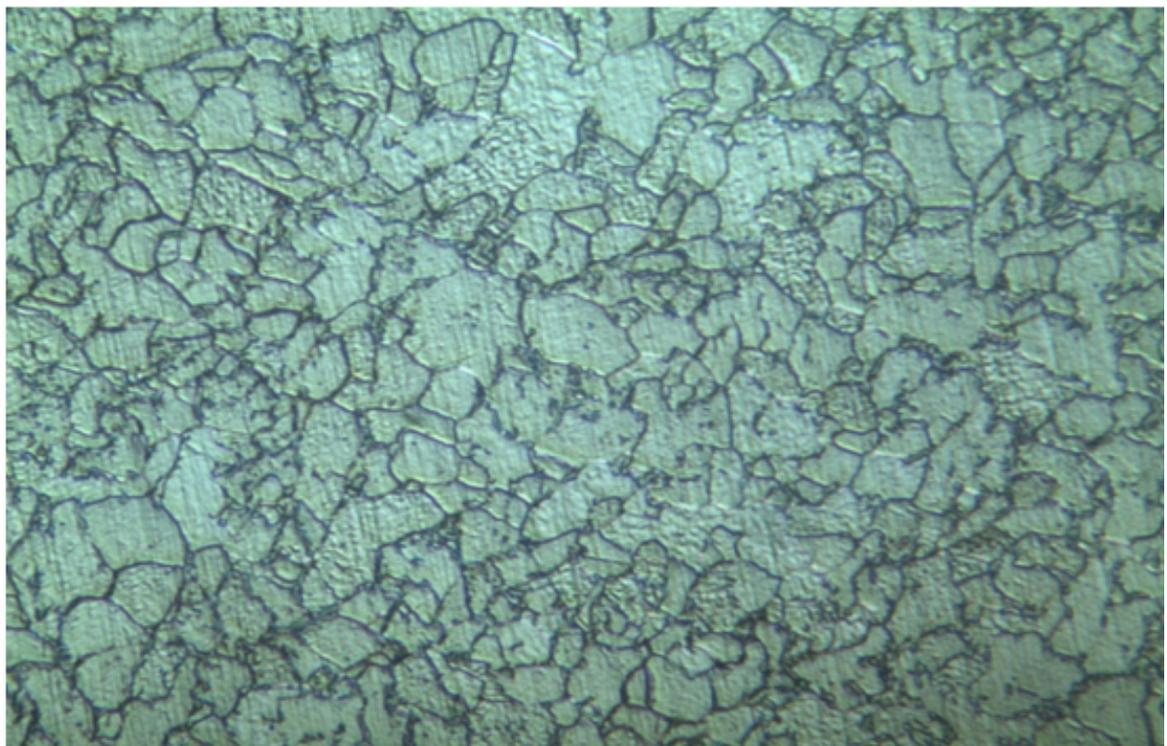
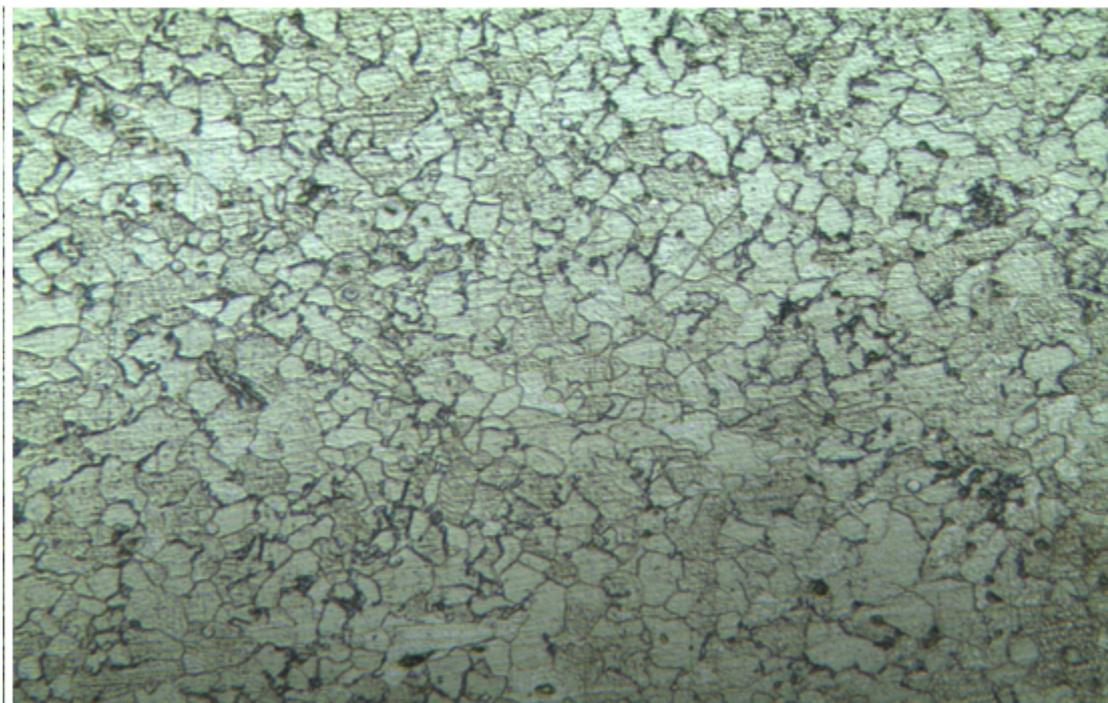


Figure III.3 Microstructures de l'acier BS₂ de la tôle emboutie après recuit de 60 mn à 650°C.

- Le suivi de l'évolution structurale a montré d'une part que traitement de recuit à 650°C pendant 90 min à cette même température provoque la formation de nouveau petits grains ferritiques avec des distributions de tailles hétérogènes. Et augmentation de la formation de la phase bainite (**Figure III.4**).

X50



X100

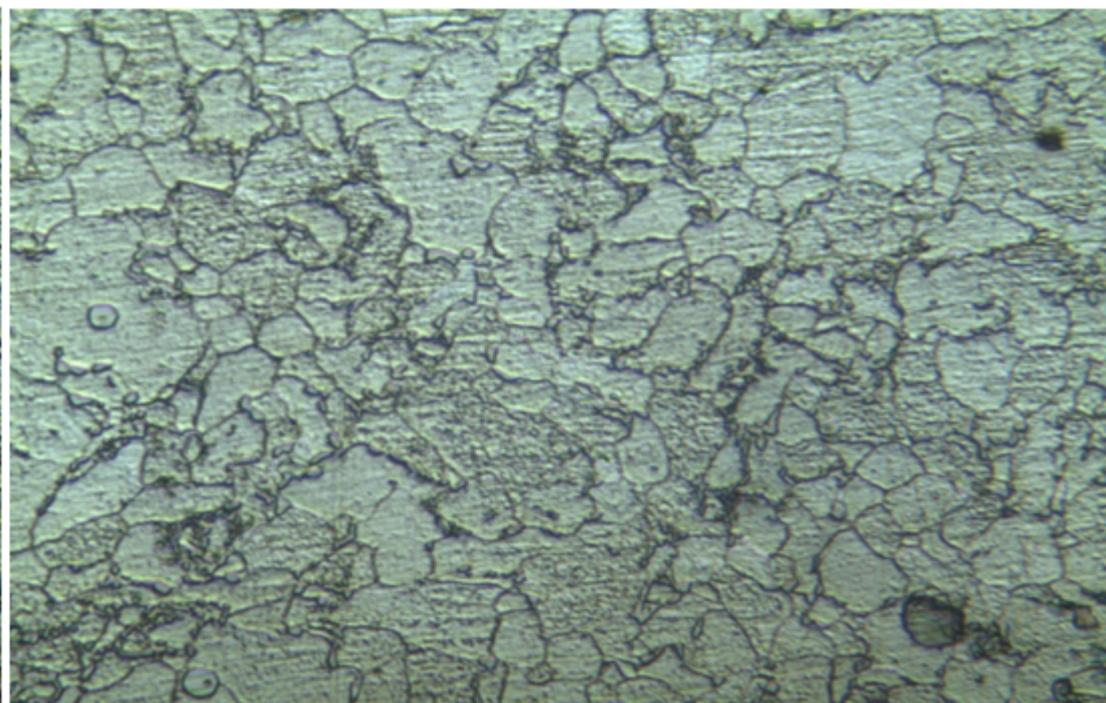


Figure III.4 Microstructures de l'acier BS₂ de la tôle emboutie après recuit de 90 mn à 650°C.

- Dans le cas de l'échantillon recuit pendant 120°C à 650°C(figure III.5) nous avons observé dans cette structure de nouvelle forme obtenue après la recristalliser des gros grains et des fins grains.

X50

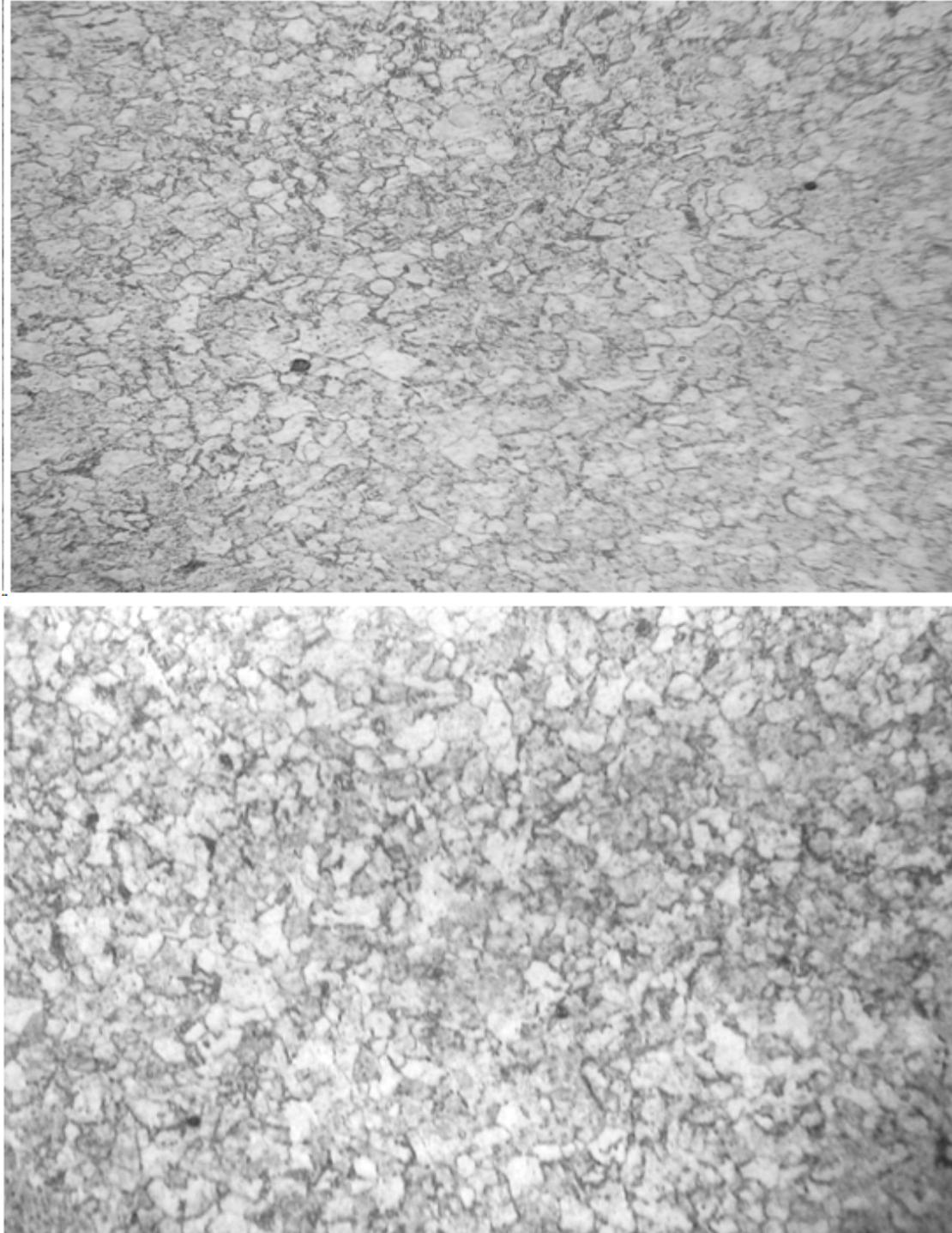
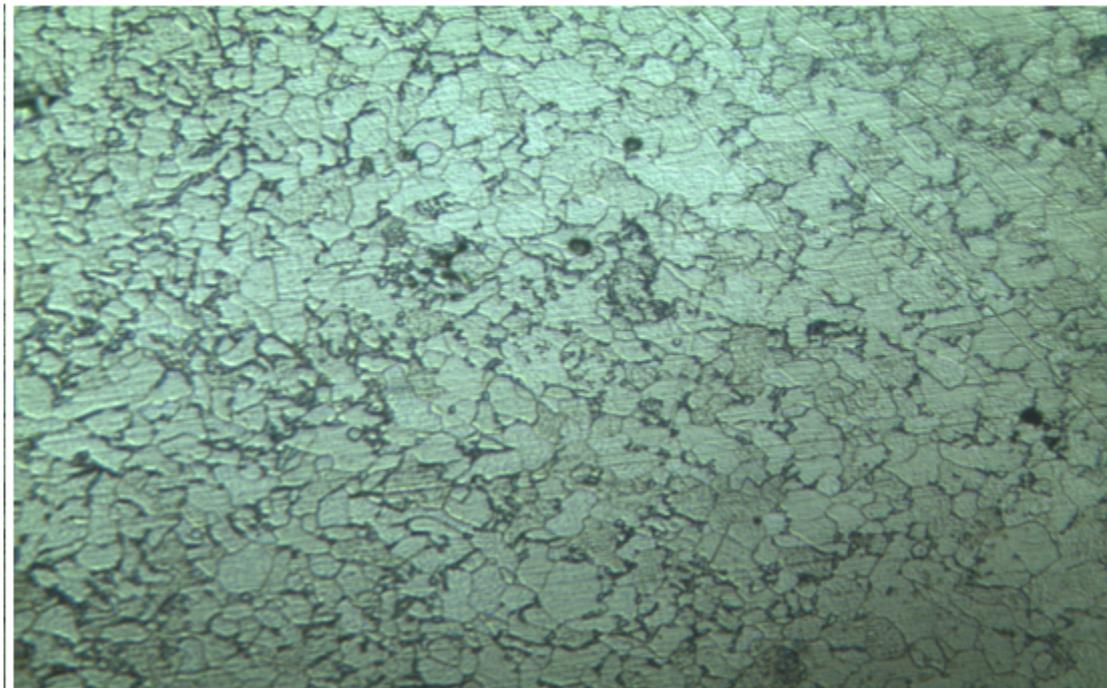


Figure III.5 Microstructures de l'acier BS₂ de la tôle emboutie après recuit de 120 mn à 650°C.

- Les résultats obtenus par cette structure a température 650°C avec temps de maintien 150 min (figure III.6) nous avons observé la taille des grains hétérogènes est due le réarrangement des atomes de grains déformés en un assemblage de grains entièrement nouveaux s'accompagne d'une diminution considérable de la densité de dislocations.

X50



X100

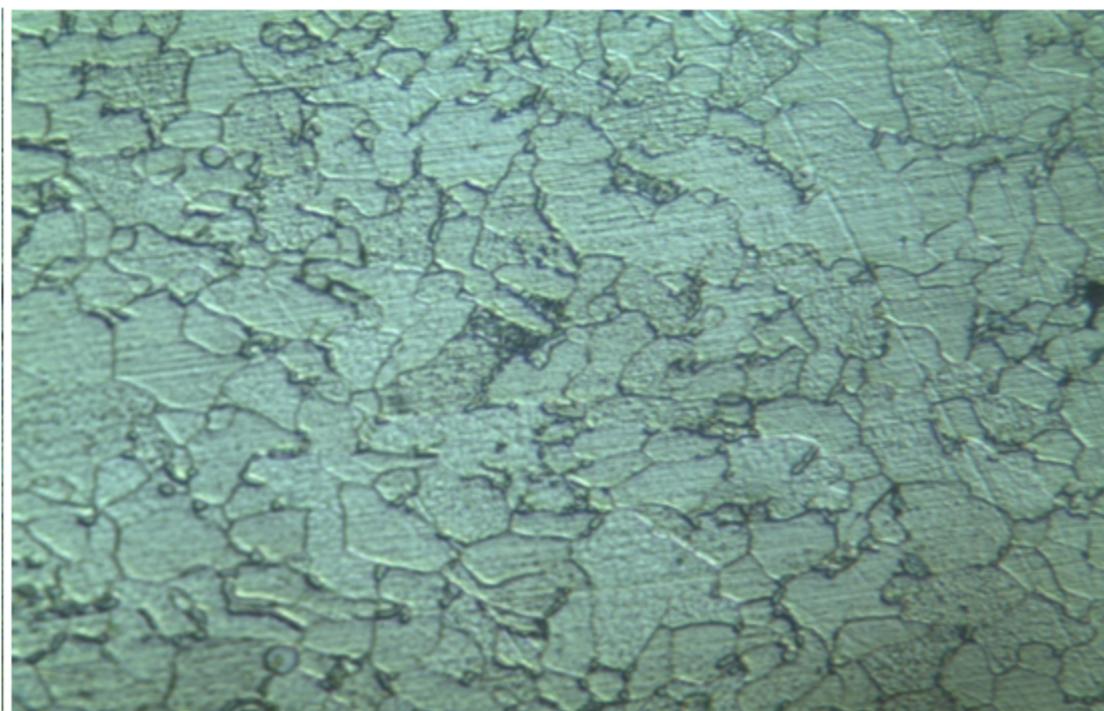
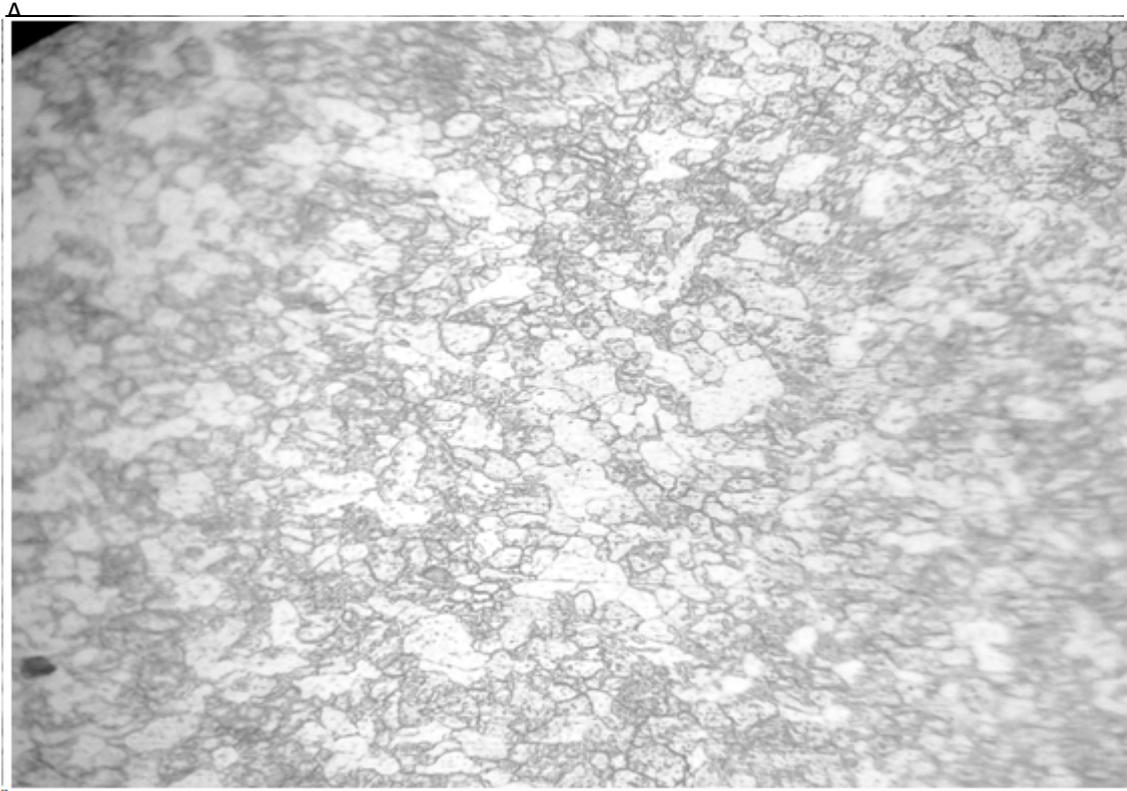


Figure III.6 Microstructures de l'acier BS₂ de la tôle emboutie après recuit de 150 mn à 650°C .

- Dans le cas de l'échantillon recuit 650°C pendant 180min (la figure III.7) nous avons remarqué clairement un grossissement des grains par rapport aux autres temps

X50



B)

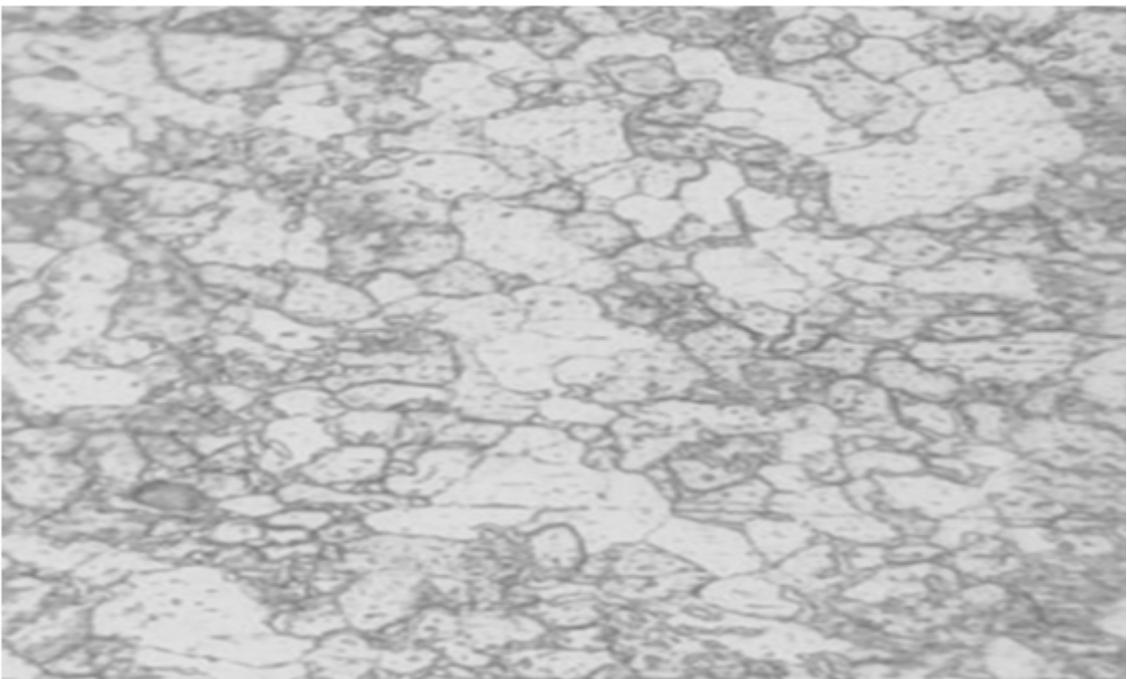


Figure III.7 Microstructures de l'acier BS₂ de la tôle emboutie après recuit de 180 mn à 650°C .

III.3 Analyse par la diffraction des rayons X :

Dans cette partie d'étude, nous présentons les spectres de diffraction des rayons x à l'état embouti et l'état trait.

Nous commençons par l'acier BS2 à l'état embouti : après la comparaison avec ICDD, nous avons observé dans la figure III.8 clairement les pics (110) et (211) de la structure cubique de la ferrite (α) ainsi que le pic (111) de la structure cubique à face centrée de l'austénite (γ) et un pic à $2\theta = 51^\circ$ qui illustre la phase de cémentite, Où le pic le plus intense est le pic (110).

Dans le cas de l'échantillon de l'acier BS2 emboutie et recuit 150min à température 650°C nous avons remarqué la présence des pics de la phase ferrite et la phase d'austénite par rapport à l'état emboutie avec une petites diminution des intensités des pics, nous remarquons la disparition de pic de la phase cémentite, nous avons observé un petit changement des formes des pics est due au grossissement des grains.

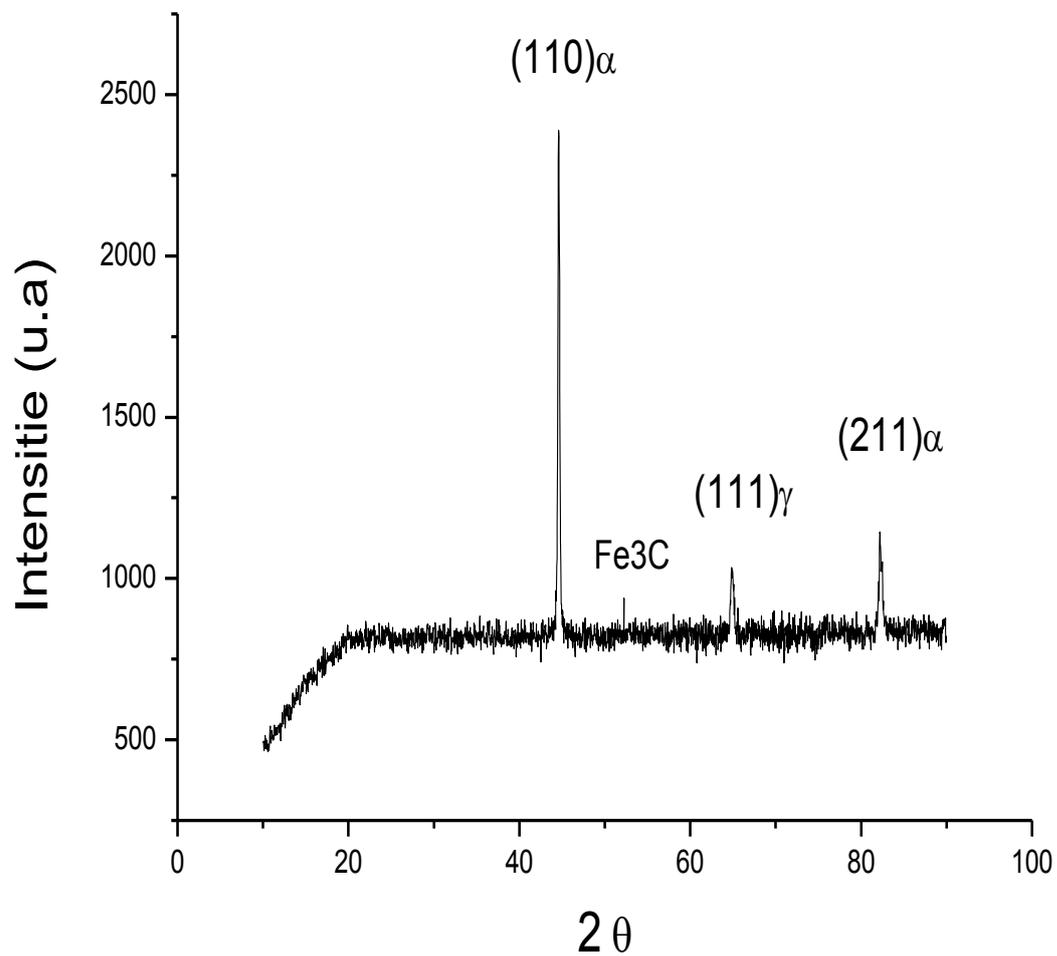


Figure III. 8 : Spectre de diffraction des rayons X de l'acier BS2 à l'état embouti.

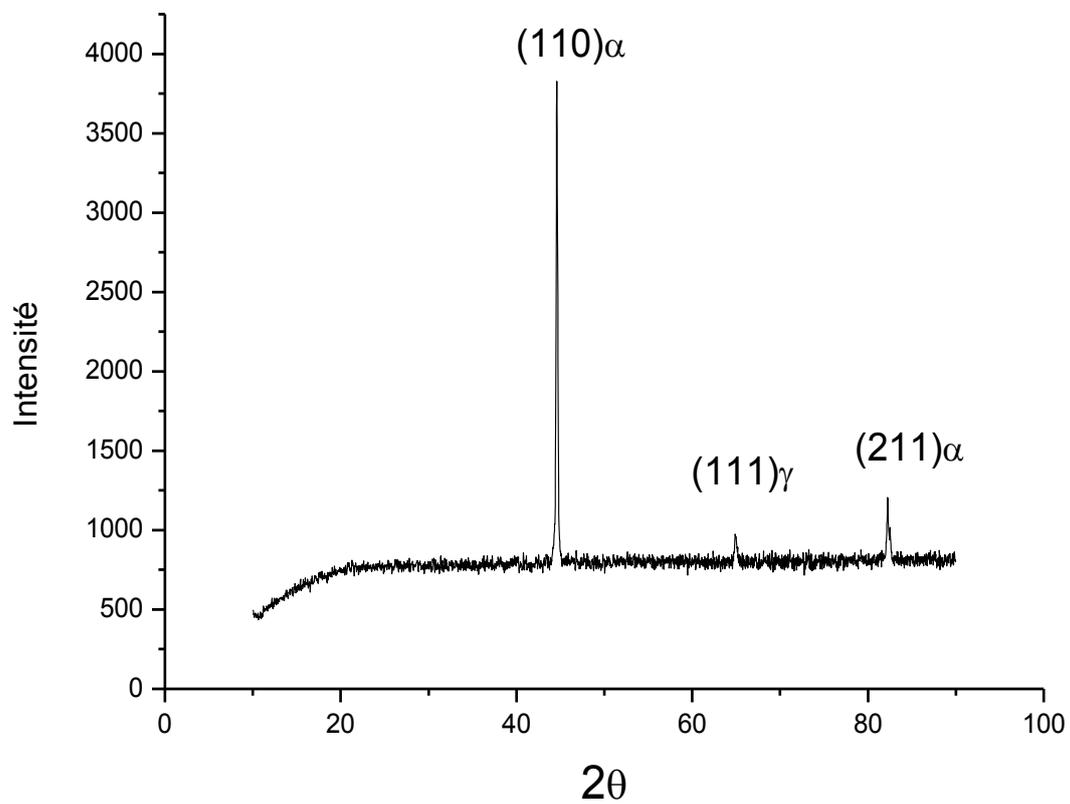


Figure III.9 : Spectre de diffraction des rayons X état recuits à 650°C 150min de maintiens.

III.3.1 La microdureté

Pour déterminer les cinétiques de recristallisation, des échantillons de notre acier, déformés et recuits à 650°C pendant des temps de maintiens compris entre 30min et 180min, ont été caractérisés par microdureté Vickers. Nous rappelons que les mesures ont été réalisées, pour les différents temps de maintien, pour chaque échantillon, où 3 empreintes espacées ont été relevées.

La figure III.8 montre la dépendance de la moyenne la dureté de Vickers (HV) et le temps de recuit (t). nous avons remarqué que la microdureté stable après les premiers temps de recuit [30 – 60min], cette dureté diminue progressivement avec l'augmentation du temps de recuit. Il est connu que le fer α est caractérisé par un réarrangement facile des dislocations lors de la restauration, c'est pourquoi, nous constatons dans notre échantillon déformé une chute de dureté lors l'augmentation du temps des maintiens [90 – 150min]. La courbe d'évolution de la microdureté lors de temps de recuit confirment bien le retour à l'état ductile après 180 minute de recuit du notre échantillon cette évolution est en accord avec le changement structural (stade de restauration), c'est-à-dire avec la variation de la taille des grains (augmentation de la taille des grains).

Numéro d'échantillons	Temps de maintien	Valeurs HV [kg _f mm ⁻²]
Échantillon de référence	/	195.33
01	30min	149
02	60min	149
03	90min	144.66
04	120min	139.66
05	150min	129.33
06	180min	154

Tableau III.1: les valeurs de mesures la dureté de l'acier BS2 à 650° C Suivi par un temps de maintien varie.

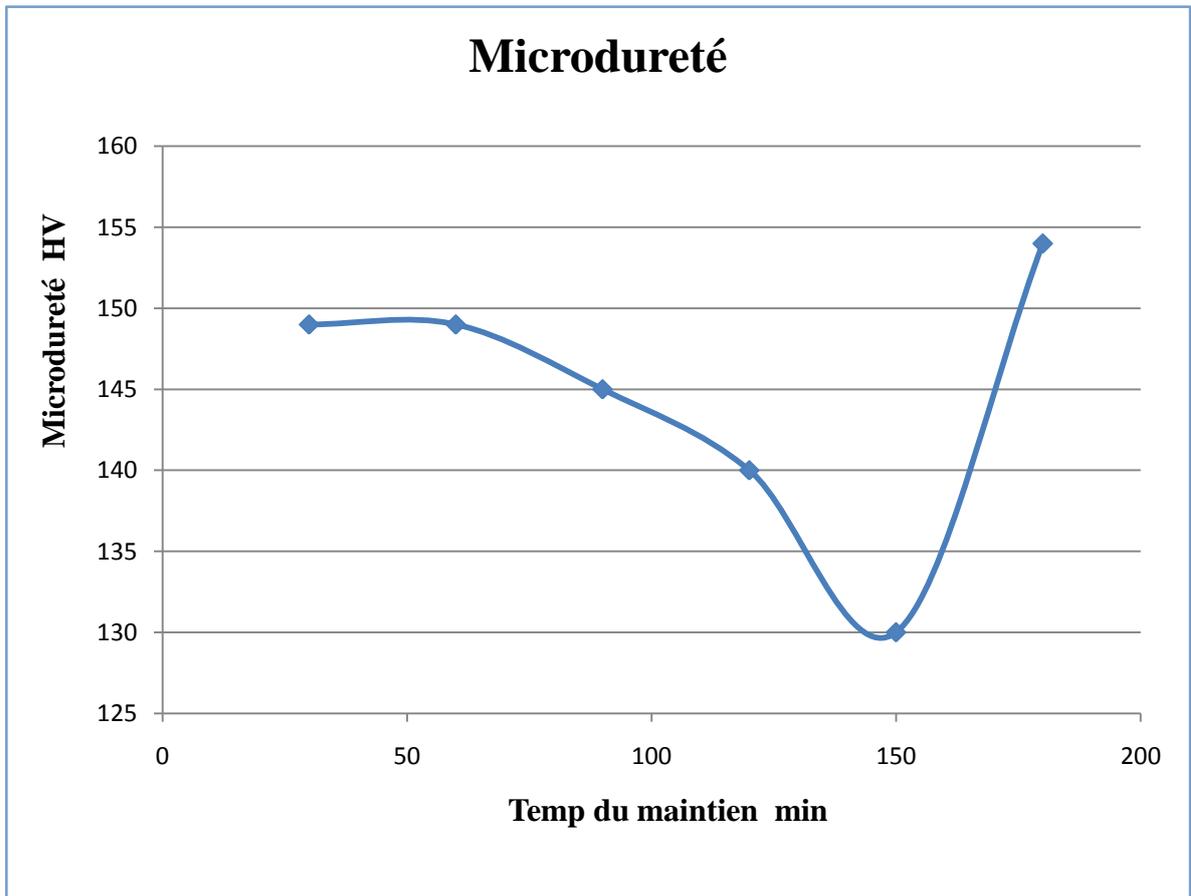


Figure III.10 : La variation de la microdureté Vickers en fonction de temps de maintien de l'acier BS2 à recuit $T = 650^{\circ}\text{C}$.

CONCLUSION GENERAL

L'objectif de ce travail était d'élucider l'étude de l'effet de temps de maintien sur l'acier BS2 après l'emboutissage.

Pour cela nous avons utilisé plusieurs techniques expérimentales essentielles, la microscopie optique, la diffraction des rayons X, la microduromètre. Il s'est avéré que cette étude a nécessité une connaissance approfondie des différentes transformations de phases se produisant au cours de recuit à température 650°C.

Les principaux résultats de ce travail peuvent se résumer de la manière suivante :

- L'acier BS2 à l'état embouti à une structure ferrito perlitique
- Le recuit à température 650°C provoque la formation de la ferrite et bainite
- Le meilleur durcissement est obtenu au temps de recuit 120 min
- Plus le temps de maintien de recuit est court plus la taille des grains de l'acier augmente, la taille de grains la plus petite est obtenue pour un échantillon déformé.
- Comparant les résultats après recuit à une températures de 650°C avec différente temps de maintiens par rapporte à l'état de livraison, on a constaté : Un baissement de la dureté.
- L'analyse de l'acier BS2 à l'état emboutie par la diffraction des rayons X à mis en évidence la présence des pics correspondent à la structure C.F.C et CC de la matrice ferrite et austénite respectivement
- L'analyse de diffraction des rayons X à l'était recuit montre que le décalage des pics vers le petit 2θ est liée à le grossissement des grains.

Référence bibliographiques

- [1] **Fédération Française de l'Acier**, Comment fabrique-t-on l'Acier, juillet 2012.
- [2] **Michel Dupeux**, Aide-mémoire science des matériaux, DUNOD, Paris 2004.
- [3] **Guy Murry**, Aciers Généralités, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, M300, Centre français d'exploitation 2002.
- [4] **Fatima Zohra Lemmadi**, thèse de magistère, Rapporteur Mr. A. Chala, Univ. De Biskra.
- [5] **Guy Murry**, Aide-mémoire Métallurgie, Métaux • Alliages • Propriétés, DUNOD, Paris 2 édition, 2010.
- [6] **William D. Callister, Jr**, Science et génie des matériaux, MODULO, Canada 2001.
- [7] **I.Lakhtine** métallurgie et traitements thermiques des métaux Edition Mir, Moscou 1982.
- [8] **Guy Murry**, Transformations dans les aciers, Normalisation (AFNOR), Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M 1 115, Centre français d'exploitation 2002.
- [9] **Raymond Langevin** . GUIDE D'AUTO-APPRENTISSAGE pour les opérateurs en traitement thermique (CPMT). PERFORM) ;. Québec, 2015.
- [10] **J-barralis et G-maeder** précis de métallurgie ; élaboration, structure, propriétés et normalisation édition Nathan 1983
- [11] **Michel Colombie et Coll** Matériaux métalliques 2eme édition, DUNOD Paris 2001.
- [12] **Guy Murry**, Traitements thermiques dans la masse des aciers. Partie 1, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M 1 126, Centre français d'exploitation 2002.
- [13] **Felder E.**, Tribologie de l'emboutissage , Techniques de l'ingénieur, Traité Mécanique et Chaleur, B7535.

[14] **Toufik SEDRAT** Etude et conception d'un procédé d'emboutissage Appliqué aux moules d'emboutissage pour emballage métallique 2007 thèse de magistère.

[15] **P. Poloukhine, V. Tiourine, P. Davidkov, D. Vitanov**, Traitement des métaux par déformation. Mir Moscou, 1987.

[16] **Col A.**, Emboutissage des tôles : Importance des modes de déformation, Techniques de l'ingénieur, BM 7 510, 2002.

[17] **B. Wassilieff**, Emboutissage. Règles principales, calculs, exemples. Edition Dunod, Paris, 1970.

[18] Photos à l'usine de BAG BATNA

ANNEXE

Name and formula

Reference code: 01-089-7194
Mineral name: Iron
Compound name: Iron
ICSD name: Iron
Empirical formula: Fe
Chemical formula: Fe

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Im-3m
Space group number: 229
a (Å): 2,8664
b (Å): 2,8664
c (Å): 2,8664
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000
Calculated density (g/cm³): 7,87
Measured density (g/cm³): 7,87
Volume of cell (10⁶ pm³): 23,55
Z: 2,00
RIR: 10,77

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
ICSD Pattern
Inorganic
Mineral
Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 076747
Creation Date: 01/01/1970

Modification Date: 01/01/1970
ICSD Collection Code: 076747
Calculated Pattern Original Remarks: REM M PDF 00-006-0696
Temperature of Data Collection: REM TEM 20 C
Calculated Pattern Original Remarks: REM M Cell at 427 K: 2.8707, at 533 K: 2.8743, at 639 K: 2.8. Test from ICSD: No R value given. Test from ICSD: At least one TF missing. Investigation of thermal dilatation of cubic metals. Additional Patterns: See PDF 01-087-0721. a (IM3-M). N.

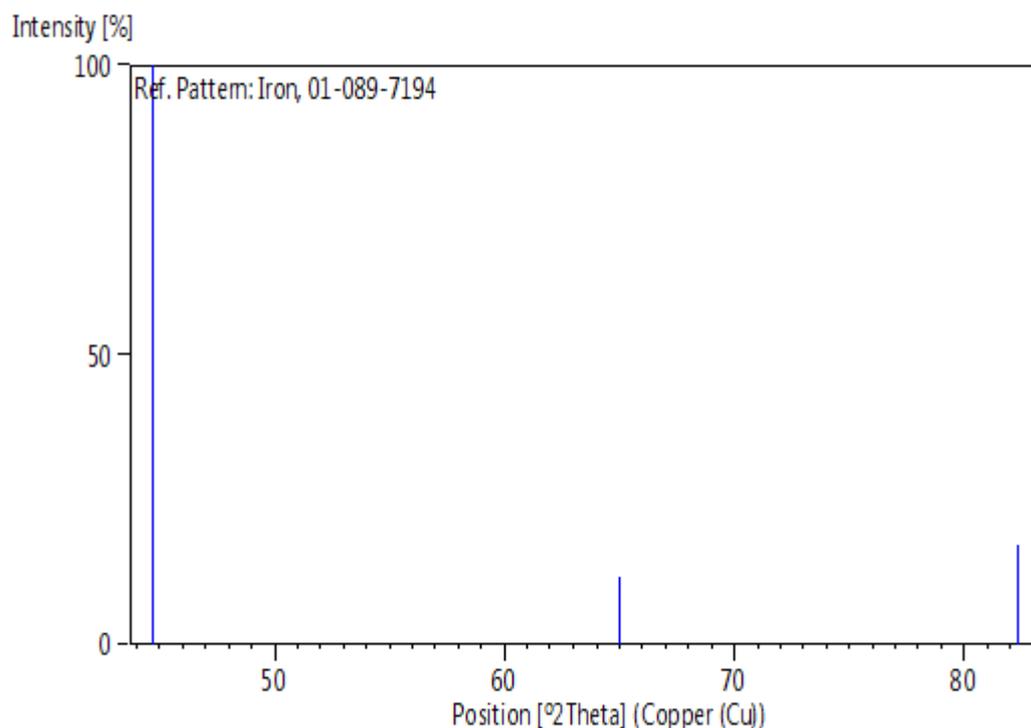
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*
Structure: Kochanovska, A., *Phys., Neder. Tijds. Natuur. (The Hague)*, **15**, 191, (1949)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2,02685	44,673	100,0
2	2	0	0	1,43320	65,023	11,5
3	2	1	1	1,17020	82,335	17,3

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 03-065-6169
Compound name: Iron Carbide
PDF index name: Iron Carbide
Empirical formula: C_2Fe_5
Chemical formula: Fe_5C_2

Crystallographic parameters

Crystal system: Monoclinic
Space group: $C2/c$
Space group number: 15
a (Å): 11,5620
b (Å): 4,5727
c (Å): 5,0595
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 97,7400
Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 7,60
Volume of cell (10⁶ pm³): 265,06
Z: 4,00

RIR: 1,98

Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Inorganic
NIST Pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
L 13317 11903 0. Temperature Factor: TF was not given, B set to 1.000 for calc
Sample Preparation: was carburized by the method known to give a fully crystalline Hagg carbide from iron
Temperature of Data Collection: 18. NATURE OF c-CARBIDE AND ITS POSSIBLE OCCURRENCE IN STEELS
Deleted Or Rejected By: Delete: same as 01-089-2544.

References

Primary reference: *Calculated from NIST using POWD-12++*
Structure: Jack, K. H., Wild, S., *Nature (London)*, **212**, 248, (1966)

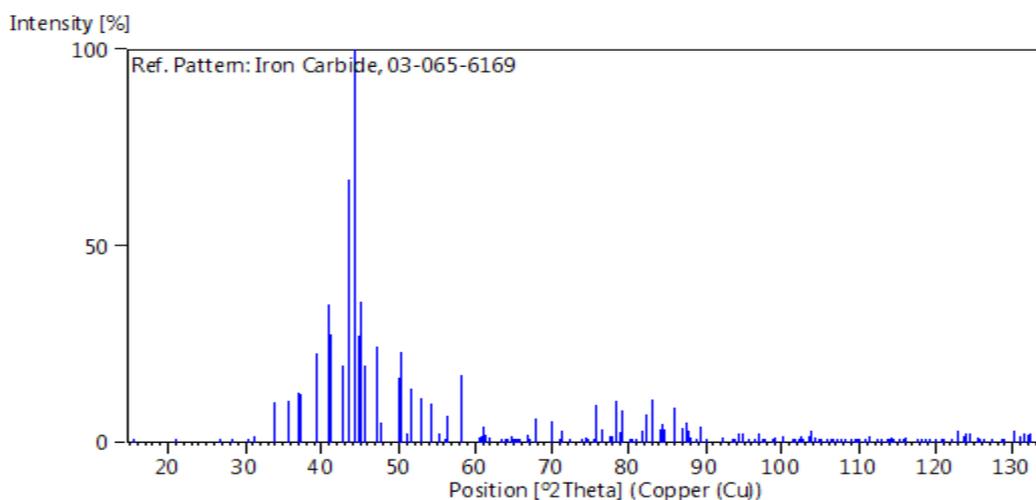
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	2	0	0	5,72833	15,456	0,1
2	1	1	0	4,24692	20,900	0,1
3	-1	1	1	3,32337	26,804	0,5
4	1	1	1	3,16355	28,186	0,1
5	3	1	0	2,93113	30,473	0,5
6	4	0	0	2,86417	31,203	1,6
7	-3	1	1	2,65269	33,762	10,3
8	0	0	2	2,50670	35,793	10,7
9	3	1	1	2,42358	37,064	12,6
10	-2	0	2	2,41923	37,133	12,3
11	0	2	0	2,28635	39,378	22,7
12	-1	1	2	2,20750	40,846	35,2
13	2	0	2	2,19065	41,174	27,6
14	1	1	2	2,11303	42,759	19,6
15	0	2	1	2,08024	43,467	67,1
16	5	1	0	2,04854	44,175	100,0
17	-4	0	2	2,02640	44,684	27,1
18	-3	1	2	2,01048	45,057	35,7
19	-2	2	1	1,99133	45,514	13,5
20	-5	1	1	1,98173	45,747	19,5
21	2	2	1	1,92116	47,276	24,5
22	6	0	0	1,90944	47,584	5,2
23	5	1	1	1,82111	50,046	16,6
24	3	1	2	1,81466	50,236	22,9
25	4	2	0	1,78685	51,074	2,5
26	4	0	2	1,77175	51,541	13,7
27	-4	2	1	1,72973	52,889	11,3
28	0	2	2	1,68900	54,267	10,0
29	-2	2	2	1,66168	55,235	2,5
30	4	2	1	1,64013	56,024	1,1
31	-6	0	2	1,62834	56,466	6,7
32	-1	1	3	1,58222	58,267	17,3
33	1	1	3	1,52928	60,490	1,2
34	-3	1	3	1,52099	60,855	1,7
35	-4	2	2	1,51649	61,055	4,0
36	1	3	0	1,51092	61,304	1,9
37	5	1	2	1,50018	61,791	1,4
38	6	2	0	1,46557	63,417	0,2
39	-1	3	1	1,45380	63,991	0,1
40	-6	2	1	1,44757	64,299	0,6
41	1	3	1	1,43960	64,699	1,6
42	8	0	0	1,43208	65,080	0,8
43	6	0	2	1,42902	65,237	0,9
44	7	1	1	1,42313	65,541	1,0
45	3	3	0	1,41564	65,931	0,2
46	4	2	2	1,40047	66,738	1,9
47	-7	1	2	1,39396	67,091	0,4
48	3	1	3	1,39120	67,242	0,3
49	-3	3	1	1,38051	67,833	6,2
50	-2	2	3	1,34492	69,884	5,5
51	-6	2	2	1,32634	71,010	0,8
52	-8	0	2	1,32255	71,244	2,9
53	-1	3	2	1,30431	72,396	0,2
54	2	2	3	1,28248	73,831	1,1
55	-4	2	3	1,27515	74,326	1,3
56	5	3	0	1,26909	74,742	0,1

57	-2	0	4	1,25988	75,383	0,3
58	0	0	4	1,25271	75,890	9,7
59	7	1	2	1,24424	76,500	3,4
60	-9	1	1	1,22857	77,657	1,5
61	9	1	0	1,22633	77,825	1,8
62	-1	1	4	1,21873	78,403	10,8
63	6	2	2	1,21164	78,951	2,7
64	-4	0	4	1,20901	79,157	8,2
65	3	3	2	1,20712	79,305	3,8
66	-3	1	4	1,19806	80,025	0,4
67	2	0	4	1,19134	80,569	0,3
68	1	1	4	1,18613	80,996	0,6
69	8	0	2	1,17706	81,752	3,0
70	4	2	3	1,17238	82,149	7,3
71	-6	2	3	1,16307	82,951	10,9
72	8	2	1	1,14996	84,111	3,5
73	10	0	0	1,14567	84,499	4,7
74	0	4	0	1,14318	84,725	3,4
75	-5	1	4	1,13079	85,876	8,9
76	-6	0	4	1,11922	86,983	3,9
77	7	3	0	1,11457	87,437	5,2
78	3	1	4	1,11098	87,792	2,9
79	-3	3	3	1,10779	88,110	1,2
80	-2	4	1	1,10024	88,873	0,6
81	4	0	4	1,09533	89,378	4,2
82	2	4	1	1,08796	90,148	0,9
83	7	3	1	1,06822	92,292	1,4
84	-9	1	3	1,05621	93,656	0,9
85	3	3	3	1,05452	93,852	0,7
86	-4	4	1	1,04915	94,482	2,3
87	8	2	2	1,04652	94,793	2,4
88	0	4	2	1,04007	95,569	0,3
89	-7	1	4	1,03895	95,705	0,5
90	-2	4	2	1,03359	96,364	0,1
91	4	4	1	1,02811	97,049	2,3
92	10	2	0	1,02427	97,536	1,1
93	-11	1	1	1,02174	97,860	0,6
94	5	1	4	1,01551	98,670	1,0
95	2	4	2	1,01348	98,938	1,3
96	-6	2	4	1,00524	100,043	1,5
97	-4	4	2	0,99566	101,366	0,5
98	10	0	2	0,99268	101,789	0,3
99	-10	2	2	0,99086	102,047	0,4
100	4	2	4	0,98782	102,484	1,5
101	7	3	2	0,98603	102,744	0,8
102	10	2	1	0,98065	103,534	1,6
103	-9	3	1	0,97817	103,903	3,1
104	5	3	3	0,97622	104,196	1,3
105	-1	3	4	0,97319	104,656	0,1
106	11	1	1	0,97080	105,022	0,2
107	-7	3	3	0,96976	105,182	0,3
108	1	1	5	0,96514	105,903	0,5
109	-3	3	4	0,96256	106,310	0,3
110	4	4	2	0,96058	106,626	0,2
111	1	3	4	0,95634	107,310	0,1
112	12	0	0	0,95472	107,575	0,1
113	6	4	1	0,95027	108,311	0,1
114	-5	1	5	0,94673	108,908	0,6
115	-9	3	2	0,94395	109,380	0,3
116	-2	4	3	0,94255	109,621	0,1

117	9	3	1	0,94091	109,904	0,3
118	-9	1	4	0,93960	110,133	0,1
119	-6	4	2	0,93562	110,833	0,1
120	8	2	3	0,93265	111,365	1,8
121	-5	3	4	0,92632	112,521	0,1
122	-2	2	5	0,92428	112,901	0,3
123	-11	1	3	0,92331	113,082	0,6
124	3	1	5	0,91984	113,739	0,4
125	0	2	5	0,91826	114,042	0,5
126	-4	4	3	0,91712	114,261	1,2
127	3	3	4	0,91599	114,481	0,3
128	1	5	0	0,91164	115,335	0,1
129	-10	0	4	0,90876	115,911	0,6
130	-4	2	5	0,90757	116,153	1,2
131	11	1	2	0,90093	117,520	0,1
132	-1	5	1	0,89863	118,006	0,1
133	1	5	1	0,89525	118,731	0,1
134	6	4	2	0,89262	119,303	0,3
135	2	2	5	0,88970	119,949	0,9
136	-12	2	1	0,88669	120,624	0,3
137	8	0	4	0,88588	120,809	0,2
138	-9	3	3	0,88423	121,186	0,9
139	-3	5	1	0,88048	122,057	0,1
140	4	4	3	0,87657	122,988	3,0
141	-7	3	4	0,87403	123,603	1,6
142	-6	4	3	0,87266	123,941	2,5
143	3	5	1	0,87054	124,467	2,3
144	8	4	1	0,86708	125,343	1,2
145	13	1	0	0,86487	125,912	1,1
146	-11	3	1	0,86371	126,214	0,4
147	11	3	0	0,85970	127,276	0,8
148	12	0	2	0,85473	128,637	0,2
149	1	5	2	0,85381	128,896	0,5
150	12	2	1	0,84938	130,159	3,0
151	-2	4	4	0,84661	130,974	1,5
152	-11	1	4	0,84517	131,402	2,2
153	4	2	5	0,84466	131,558	2,4
154	-2	0	6	0,84320	132,001	2,1
155	-1	3	5	0,84237	132,252	2,4

Stick Pattern



Résumé

Le but de ce travail est l'étude de l'influence de temps du maintiens sur les propriétés microstructurales et mécaniques de l'acier BS₂ (0.19% C) utilisé généralement dans la fabrication des Bouteille a gaz. Pour suivre les évolutions structurales et mécaniques de cette nuance, plusieurs méthodes expérimentales ont été utilisées à savoir la microscopie optique, les mesures de microdureté et la diffraction des rayons X.

Les résultats obtenus ont permis de montrer que :

- Plus le temps de maintien de recuit est court plus la taille des grains de l'acier augmente, la taille de grains la plus petite est obtenue pour un échantillon déformé.
- Le meilleur temps de maintiens est 150min avec une température de recuit de recristallisation est $T = 650^{\circ}\text{C}$.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير وقت الصيانة على الخواص البنيوية والميكانيكية لسبيكة BS2 التي تستعمل في تصنيع قارورات الغاز. لمتابعة التطورات البنيوية و الميكانيكية لهذه العينات، تم استخدام عدة اجهزة، وهي المجهر الضوئي، وقياسات صلابة والتحليل بواسطة الأشعة السينية.

سمحت النتائج المتحصل عليها ببيان ما يلي :

- كلما يزيد الوقت في المعالجة الحرارية كلما يزيد حجم حبيبات السبيكة
- وقت الحفاظ الجيد هو 180 دقيقة لدرجة حرارة إعادة التبلور 650°C .