



**REPUBLIQUE ALGERIENNE**  
**DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**



**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE**  
**LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**Mémoire de projet de  
fin d'étude pour  
l'obtention du  
diplôme de Master**

*Spécialité : Ingénierie des matériaux et surfaces*

**THEME :**

***Etude du traitement thermique de l'acier H13***

***Présenté par :***

***Semsari Mohamed***

***Kerdiene Youcef***

***Yahiaoui Youcef***

***Encadré par :***

***Mr.Djeghjough U.S.D.B***

***Soutenu le : 28-11-2021***

**ANNEE UNIVERSITAIRE: 2021/2022**

## **Remerciement**

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre gratitude.

Nous voudrions tout d'abord adresser toute notre reconnaissance au chef de département Monsieur Mustapha Temmar, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous désirons aussi remercier les professeurs de l'université de Saad Dahleb Blida 1, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

Enfin, Un grand merci à Monsieur DJEGHJOUGH pour ses conseils concernant notre style d'écriture, informations et organisation, ils ont grandement facilité notre travail.

## ملخص

الفولاذ عبارة عن سبيكة معدنية حديدية ، والتي تتكون بشكل أساسي من الحديد ، والعنصر الإضافي هو الكربون ، والذي يوجد فقط في آثار صغيرة. اعتماداً على الفولاذ ، يتراوح محتوى الكربون تقريباً بين 0.005% و 1.5% بالكتلة. نادراً جداً ترتفع إلى 2%. ومع ذلك ، فإن محتوى الكربون هذا ، مهما كان صغيراً ، هو الذي يمنح الفولاذ - بطريقة معقدة نوعاً ما - الخصائص التي نتعرف عليها. على سبيل المثال ، كلما زاد محتوى الكربون في الفولاذ (ضمن الحدود الواردة في الفصل 1) ، زادت صلابة الفولاذ.

الهدف من المعالجة الحرارية للفولاذ هو الحصول على مارتنسيت ، وهي مرحلة صعبة. إن التغيير من المرحلة الأوستنيتية إلى الطور الحديدي مصحوب بزيادة في الحجم ، والأهم من ذلك في حالة التحول المارتنسيطي. في الواقع ، يتسبب الكربون الموجود في المحلول في تمدد الشبكة. دعونا نعود بمزيد من التفصيل إلى الظواهر في مراحل التسخين (الأوستنيتيشن) من ناحية والإخماد من ناحية أخرى.

يمكن أن يؤدي الفولاذ H13 المصنوع من عملية إعادة الصهر الكهربائي (ESR) إلى تحسين البنية المجهرية المنخفضة وتكثيف الفولاذ بشكل فعال ، وتحسين الخواص المتناحية للفولاذ. يمكن لعملية الحدادة المعقولة والمعالجة الحرارية أن تحسن الجودة والأداء وعمر الخدمة لفولاذ H13.

كلمات البحث: صلب ، بنية مجهرية ، صلابة ، معالجة حرارية ...

## Résumé

L'acier est un alliage métallique ferreux, qui est d'ailleurs principalement composé de fer, l'élément additionnel étant le carbone, qui n'est présent qu'à l'état de traces infimes. Selon les aciers, la teneur en carbone est comprise entre environ 0,005 % et 1,5 % en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2 %. Pourtant, c'est bien cette teneur en carbone, si infime soit-elle, qui confère à l'acier -- de manière assez complexe -- les propriétés que l'on lui reconnaît. Par exemple, plus la teneur en carbone d'un acier est importante (dans les limites indiquées au chapitre 1), plus l'acier est dur.

Le but du traitement thermique des aciers est d'obtenir de la martensite, phase dure. Le passage de la phase austénitique à la phase ferritique s'accompagne d'une augmentation de volume, d'autant plus importante dans le cas de la transformation martensitique. En effet, le carbone en solution provoque une dilatation de la maille. Revenons plus en détail sur les phénomènes aux étapes du chauffage (austénitisation) d'une part et de la trempe d'autre part.

L'acier H13 fabriqué par un procédé de refusion par électro-affaîssement (ESR) peut améliorer efficacement la faible microstructure et la densification de l'acier, et améliorer l'isotropie de l'acier de filière. Un processus de forgeage et un traitement thermique raisonnables peuvent améliorer la qualité, les performances et la durée de vie de l'acier H13.

Mots clés : Acier, Microstructure, Dureté, traitement thermique...

## **Abstract**

Steel is a ferrous metal alloy, which is moreover mainly composed of iron, the additional element being carbon, which is only present in tiny traces. Depending on the steel, the carbon content is between approximately 0.005% and 1.5% by mass. It very rarely rises to 2%. However, it is this carbon content, however small it may be, which gives steel - in a rather complex way - the properties that we recognize. For example, the higher the carbon content of a steel (within the limits given in Chapter 1), the harder the steel.

The goal of heat treatment of steels is to obtain martensite, a hard phase. The transition from the austenitic phase to the ferritic phase is accompanied by an increase in volume, all the more important in the case of martensitic transformation. Indeed, the carbon in solution causes an expansion of the mesh. Let us return in more detail to the phenomena at the stages of heating (austenitization) on the one hand and of the quenching on the other hand.

H13 steel made by electro-slag remelting (ESR) process can effectively improve low microstructure and densification of steel, and improve isotropy of die steel. Reasonable forging process and heat treatment can improve the quality, performance and service life of H13 steel.

Keywords: Steel, Microstructure, Hardness, heat treatment ...

# Contents

Liste des tableaux  
Liste des figures  
Liste des abréviations

<b>Liste des tableaux</b> .....	VIII
<b>Liste des figures</b> .....	IX
Introduction générale .....	2
<b>1 Chapitre 1 : Généralités sur les aciers</b> .....	<b>4</b>
1.1 Introduction.....	4
1.2 Définition.....	5
1.3 Classification .....	5
1.3.1 Aciers alliés et non alliés .....	5
1.3.2 Aciers de qualité .....	6
1.3.2.1 Aciers de qualités non alliés .....	6
1.3.2.1.1 Aciers au carbone pour appareils à pression .....	6
1.3.2.1.2 Aciers pour emboutissage et pliage à froid .....	6
1.3.2.2 Aciers de qualités alliés .....	6
1.3.3 Aciers spéciaux .....	7
1.3.3.1 Aciers spéciaux non alliés .....	7
1.3.3.2 Aciers spéciaux alliés .....	7
1.3.4 Aciers inoxydables .....	7
1.3.5 Aciers à outils .....	8
1.4 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone .....	9
1.5 Points de transformation.....	11
1.6 Constituants et microstructures des aciers et fontes.....	11
1.7 Conclusion .....	12
<b>2 Chapitre 2 : Traitement thermique des aciers</b> .....	<b>14</b>
2.1 Introduction.....	14
2.2 Types de traitement thermique : .....	14
2.2.1 Trempe.....	15
2.2.1.1 Définition, But et Cycle : .....	15
2.2.1.2 Types de Trempe.....	15
2.2.1.2.1 Trempe martensitique .....	15

2.2.1.2.2	Trempe bainitique .....	16
2.2.1.2.3	Trempe d'aciers austénitique ou hypertrempe .....	16
2.2.2	Recuit.....	16
2.2.2.1	Définition et But .....	16
2.2.2.2	Les principe du recuit.....	16
2.2.2.2.1	Chauffage.....	16
2.2.2.2.2	Maintenue .....	17
2.2.2.2.3	Refroidissement.....	17
2.2.2.3	Types de recuit.....	18
2.2.2.3.1	Recuit complet .....	18
2.2.2.3.2	Recuit d'adoucissement .....	18
2.2.2.3.3	Recuit de coalescence .....	18
2.2.2.3.4	Recuit d'homogénéisation .....	19
2.2.2.3.5	Recuit de normalisation .....	19
2.2.2.3.6	Recuit de détente ou de stabilisation .....	19
2.2.2.3.7	Recuit de récrystallisation ou de restauration.....	19
2.2.3	Revenu.....	20
2.2.3.1	Définition et But .....	20
2.2.3.2	Types de revenus.....	20
2.2.3.2.1	Revenu de relaxation ou de détente.....	20
2.2.3.2.2	Revenu de structure ou classique .....	21
2.2.3.2.3	Revenu de durcissement .....	21
2.3	Traitement thermique pour les aciers à outils H13 .....	21
2.3.1	Recuit.....	21
2.3.2	Déstressant.....	21
2.3.3	Préchauffer avant durcissement .....	21
2.3.4	Durcissement .....	22
2.3.5	Trempe.....	22
2.4	Les effets du traitement thermique pour le H13 .....	23
2.4.1	Structure des grains et dureté.....	23
2.5	Conclusion .....	24
<b>3</b>	<b>Chapitre 3 : Traitement thermique du H 13.....</b>	<b>26</b>
3.1	Introduction.....	26
3.2	Présentation du matériau utilisé .....	26
3.3	Propriétés .....	27
3.4	Application .....	27

3.5	Caractéristiques physique et mécanique.....	28
3.5.1	Taille H13 .....	29
3.6	Procédure expérimentale .....	31
3.6.1	Analyse de la dureté de l'acier à outils de travail à chaud H13 .....	31
3.6.1.1	Première séquence.....	32
3.6.1.2	Seconde séquence .....	32
3.6.1.3	Séquence trois .....	33
3.6.1.4	Séquence quatre .....	33
3.7	Conclusion .....	36
<b>4</b>	<b>Chapitre 4 : Résultats et discussion du traitement.....</b>	<b>38</b>
4.1	Introdction.....	38
4.1.1	Spécimen sans traitement thermique.....	38
4.1.2	Premier traitement (Austénisation) .....	39
4.1.3	Deuxième traitement (Revenu à 400°C) .....	40
4.1.4	Troisième traitement (Revenu à 500°C).....	41
4.1.5	Quatrième traitement (Revenu à 600°C) .....	42
	Conclusion générale.....	45
	Références bibliographiques .....	47

## Liste des tableaux

Tableau 1.1	microstructures des aciers et fontes.....	11
-------------	---	----



Tableau 3.1 composition du H13 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tableau 3.2 Application de l'acier H13.....	27
Tableau 3.3 Caractéristiques mécanique et physique du H13. ....	28
Tableau 3.4 Valeurs de résistance à la fatigue et de dureté de toutes les séquences	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Tableau 4.1 valeurs du HRC originale du spécimen sans traitement thermique .....	38
Tableau 4.2 Resultats d'austénisation .....	39
Tableau 4.3 Résultats du revenu à 400°C.....	40
Tableau 4.4 Résultats du revenu à 500°C.....	41
Tableau 4.5 Résultats du revenu à 600°C.....	42

## Liste des figures

Figure 1.1 la première armure d'acier fut réalisée en Espagne vers 1410.....	4
Figure 1.2 Les hauts fourneaux des usines du Creusot, 1914.....	5
Figure 1.3 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone.....	9
Figure 1.4 étude du refroidissement de l'acier hypoeutectoïde à 0.4%C.....	9
Figure 1.5 étude du refroidissement de l'acier hypereutectoïdes à 1.2%C .....	10
Figure 1.6 étude de refroidissement de l'acier eutectoïde à 0.77%C.....	10
Figure 1.7 transformation allotropique du fer.....	11
Figure 2.1 Les modes principaux du traitement thermique .....	14
Figure 2.2 Cycle de la Trempe.....	15
Figure 2.3 Cycle thermique du recuit.....	17
Figure 2.4 illustration principes et diagramme du recuit.....	18
Figure 2.5 Cycle thermique des différents recuits .....	20
Figure 3.1 barres H13 laminées à chaud/barre ronde en acier.....	26
Figure 3.2 Courbe de temperature HRC.....	22
Figure 3.3 L'effet du traitement thermique sur le durcissement de la zone de surface de l'acier à outils H13.....	23
Figure 3.4 Analyse XRD. ....	24
Figure 3.5 échantillons HRC ou dureté.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 3.6 Microstructure sans traitement thermique .....	32
Figure 3.7 Microstructure du premier traitement thermique. ....	32
Figure 3.8 microsturcture du second traitement thermique. ....	33
Figure 3.9 troisième microstructure du traitement thermique. ....	33
Figure 3.10 Quatrième microstructure du traitement thermique. ....	34
Figure 3.11 Images de la surface du point de rupture d'échantillon sans traitement thermique a) Macro image de la surface du point de rupture. b) Zone de fatigue, c) Zone de rupture.....	34
Figure 3.12 Images de la surface du point de rupture des échantillons de la première séquence de traitement thermique a) Image macro de la surface du point de rupture, b) Zone de fatigue, c) Zone du point de rupture. ....	34

Figure 3.13 Images de la surface du point de rupture des échantillons de la seconde séquence de traitement thermique a) Image macro de la surface du point de rupture, b) Zone de fatigue, c) Zone du point de rupture. ....	35
Figure 3.14 Images de la surface du point de rupture des échantillons de la 3e séquence de traitement thermique a) Image macro de la surface du point de rupture, b). Zone de fatigue, c) Zone du point de rupture. ....	35
Figure 3.15 Figures de la surface du point de rupture des échantillons de la 4e séquence de traitement thermique a) Macro image de la surface du point de rupture, b). Zone de fatigue, c) Zone de rupture. ....	35
Figure 4.1 microstructure originale sans traitement thermique .....	38
Figure 4.2 microstructure d'austénisation .....	39
Figure 4.3 microstructure du revenu à 400°C.....	40
Figure 4.4 microstructures du revenu à 500°C .....	42
Figure 4.5 microstructure du revenu à 600°C.....	43

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Le traitement thermique n'est qu'une succession d'opérations au cours desquelles un produit ferreux solide est soumis en totalité ou partiellement à des cycles thermiques pour obtenir un changement de ses propriétés et/ou de sa structure. En d'autres termes, le traitement thermique consiste à faire subir à un matériau un cycle thermique comprenant le chauffage, le maintien à une ou plusieurs températures, puis le refroidissement à une vitesse déterminée. Il est destiné à modifier les propriétés mécaniques (dureté, élasticité, résistance à la rupture, aux chocs) des matériaux métalliques.

Le mémoire est divisé en quatre chapitres qui traitent des différents thèmes liés au traitement thermique. Le chapitre 1 présente d'abord quelques notions importantes sur la structure de l'acier principalement la classification et la composition chimique (teneur en carbone, points de transformation ...etc), ce chapitre est un préambule du reste du mémoire. Le chapitre 2 est consacré aux différents traitements thermiques associés plus spécifiquement à l'acier, en l'occurrence les divers types de recuits, les trempes et les revenus, tandis que le chapitre 3 s'attarde aux principaux traitements thermiques de l'acier H13. Ces trois chapitres sont d'avantage de nature théorique. Le chapitre 4 s'intéresse à la préparation des pièces destinées aux traitements thermiques, ainsi qu'aux divers testes appliqués sur nos spécimens.

Tous les traitements thermiques appliqués ont entraîné une certaine amélioration de la résistance à la fatigue du matériau. Il existe différents types de traitement dont les plus fréquemment réalisés sont les trempes, les revenus, les recuits, la cémentation, la nitruration et la carbonitruration. Chacun des traitements possède sa spécificité. Au même titre qu'il existe diverses technologies de chauffe : four sous vide, four sous atmosphère contrôlée, four ambiant, four à bain de sel, four à cloche, etc. Cela dit, le tout réalisé sur divers matériaux métalliques : acier doux, acier allié, acier inoxydable, fonte, aluminium, titane, etc.

# Chapitre 1

## 1 Chapitre 1 : Généralités sur les aciers

### 1.1 Introduction

La production de fer par l'homme a probablement commencé quelque temps après 2000 avant notre ère dans le sud-ouest ou le centre-sud de l'Asie, peut-être dans la région du Caucase. C'est ainsi qu'a débuté l'âge du fer, lorsque le fer a remplacé le bronze dans les outils et les armes.[1]

Cette évolution s'explique par le fait que le fer allié à un peu de carbone, est plus dur, plus durable et plus tranchant que le bronze. Pendant plus de trois mille ans, jusqu'à son remplacement par l'acier après 1870. Les meilleurs aciers au Moyen âge sont ceux d'Espagne (Tolède) et de Syrie (Damas). Les Wallons (limite de la France, de la Flandre, de l'Angleterre et de l'Allemagne) transportent au XVIe siècle leur industrie sidérurgique en Scandinavie. Le mot « acier » vient du latin et désigne un fer coupant, « acéré ».[1,2]

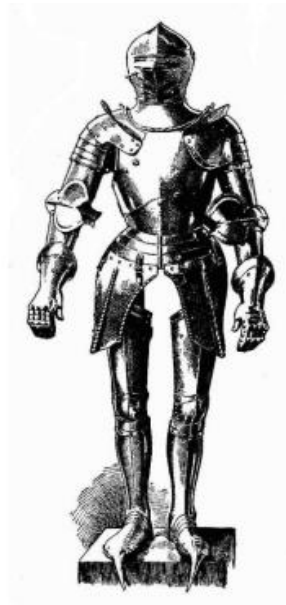


Figure 1.1 la première armure d'acier fut réalisée en Espagne vers 1410.[1]



Figure 1.2 Les hauts fourneaux des usines du Creusot, 1914.[1]

## 1.2 Définition

C'est est un alliage de fer et de carbone contenant moins de 2 % de carbone et 1 % de manganèse et de petites quantités de silicium, de phosphore, de soufre et d'oxygène. Les aciers se définissent principalement par leur composition chimique, ce sont des alliages composés de fer et d'autres éléments ; le carbone est un élément d'alliage essentiel, de négligeable à environ 0.04% et 2 % en poids. À la lecture de ces deux définitions, on constate que la limite supérieure des aciers est délicate à préciser r. C'est la raison pour laquelle il peut être préférable d'adopter un point de vue plus métallurgique en prenant en compte la différence intervenant lors de la solidification de ces alliages.[2,3]

## 1.3 Classification

Les familles d'aciers sont classées en deux critères : La composition chimique, nature et teneur des éléments d'alliage, aciers non alliés ( $\leq 1\%$  d'éléments d'alliage), aciers peu alliés (teneur de chaque éléments d'alliage  $\leq 5\%$ ), aciers très alliés. Propriétés d'usage ou qualité aciers de qualité, aciers spéciaux, (aciers d'usage général, aciers de construction mécanique, aciers pour appareils à pression, aciers à outils, aciers inoxydables).[3]

### 1.3.1 Aciers alliés et non 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 et des aciers alliés sont indiquées dans le tableau 2.
- Un acier est considéré comme allié dès qu'une de ces limites est atteinte.[4]

### **1.3.2 Aciers de qualité**

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

#### **1.3.2.1 Aciers de qualités non alliés**

##### **1.3.2.1.1 Aciers au carbone pour appareils à pression**

Aciers de qualité non alliés (Fe/C ou Fe/C/Mn) auxquels il est demandé de retrouver leur structure d'emploi par normalisation (et éventuellement revenu) après mise en forme à chaud (à l'état austénitique). Ces aciers doivent satisfaire à des exigences particulières relatives à leur résistance à la rupture fragile et, lorsqu'ils sont employés à température supérieure à l'ambiante, à leur limite d'élasticité à chaud et à leur tenue au fluage.[3,4]

##### **1.3.2.1.2 Aciers pour emboutissage et pliage à froid**

Aciers de qualité livrés en produits plats auxquels il est demandé de présenter des propriétés particulières de ductilité, d'emboutissage et d'état de surface. En général, les teneurs en éléments interstitiels de ces aciers sont réduites le plus possible (sauf parfois en phosphore ajouté pour augmenter la limite d'élasticité). Parmi ces aciers, on peut classer les aciers pour emballages, aciers de qualité auxquels, outre l'aptitude à l'emboutissage, on demande une propreté inclusionnaire particulière et, dans certain cas, une protection spécifique contre la corrosion (fer blanc et fer chromé notamment).[4]

##### **1.3.2.2 Aciers de qualités alliés**

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

- des aciers à grains fins soudables de construction métallique;
- des aciers pour tôles magnétiques;
- des aciers pour rails, palplanches ou cadres de mine ;



## 1.3.3 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]

### 1.3.3.1 Aciers spéciaux non alliés

Ils font partie de cette catégorie :

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

### 1.3.3.2 Aciers spéciaux alliés

Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers de qualité ni des aciers inoxydables. Font partie de cette catégorie :

- les aciers de construction mécanique.
- certains aciers soudables à grains fins pour appareils à pression.
- certains aciers résistant au fluage.
- les aciers pour roulement.
- les aciers à outils et les aciers à coupe rapide.
- des aciers à propriétés physiques spéciales. [5]

## 1.3.4 Aciers inoxydables

On appelle aciers inoxydables des aciers qui résistent à la corrosion atmosphérique et à la corrosion électrochimique Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5

% de chrome et au maximum 1,2 % de carbone (pour éviter la précipitation de carbures de chrome). Bien qu'un certain nombre tels que Mo, Cu, Si, Ti, Nb, etc., soient ajoutés pour améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques, l'essentiel des propriétés des aciers inoxydables est lié à la connaissance des diagrammes de phases et des diagrammes TRC des alliages ternaires Fe-Cr et quaternaires Fe-C-Cr-Ni.[4,5,6]

### 1.3.5 Aciers à outils

Les aciers à outils constituent un très large groupe d'alliages complexes qui ont évolué pour de nombreuses applications de formage à chaud et à froid. Leur importance industrielle et leur complexité ont conduit à une littérature considérable de textes et de manuels sur leur développement, leur traitement et leur application. Il est intéressant de classer ces aciers selon la température atteinte par la partie active en cours de service, c'est-à-dire d'utiliser comme critère la résistance à l'adoucissement en fonction de la température (ou la dureté à chaud). La norme NF EN ISO 4957 range les aciers en quatre classes :

- A. Aciers non alliés pour travail à froid.
- B. Aciers alliés pour travail à froid.
- C. Aciers alliés pour travail à chaud.
- D. Les aciers rapides : Les éléments d'alliage de base sont W, Mo, V, Cr

1.4 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

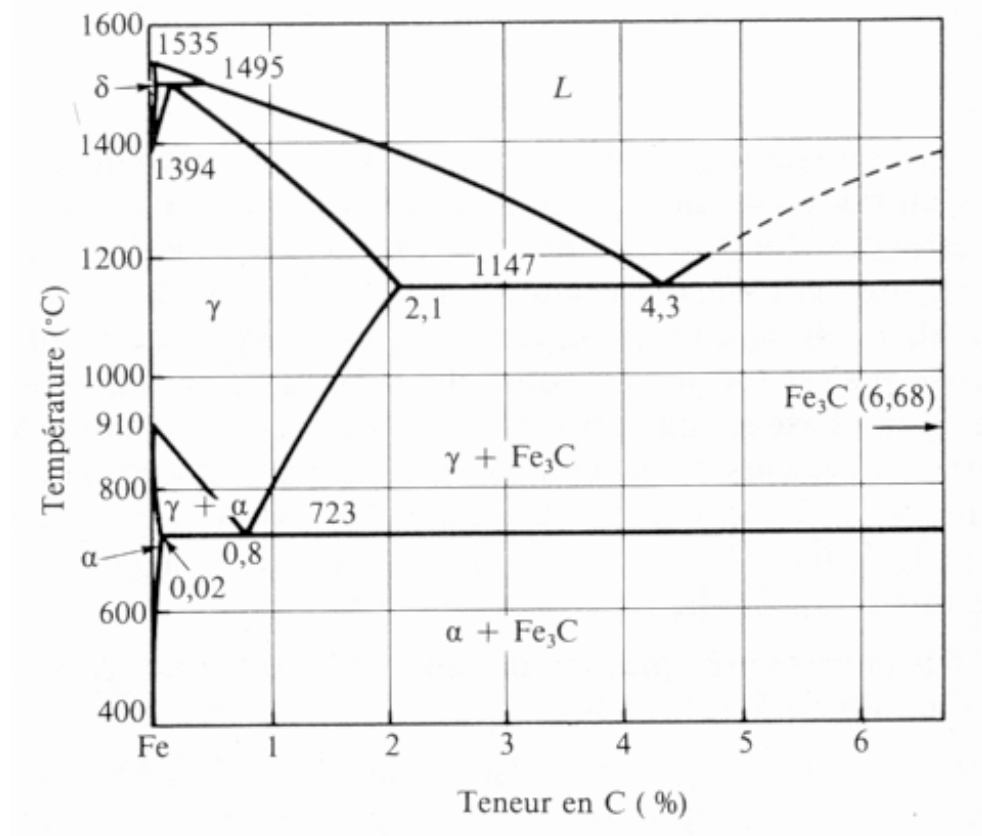


Figure 1.3 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone.[6]

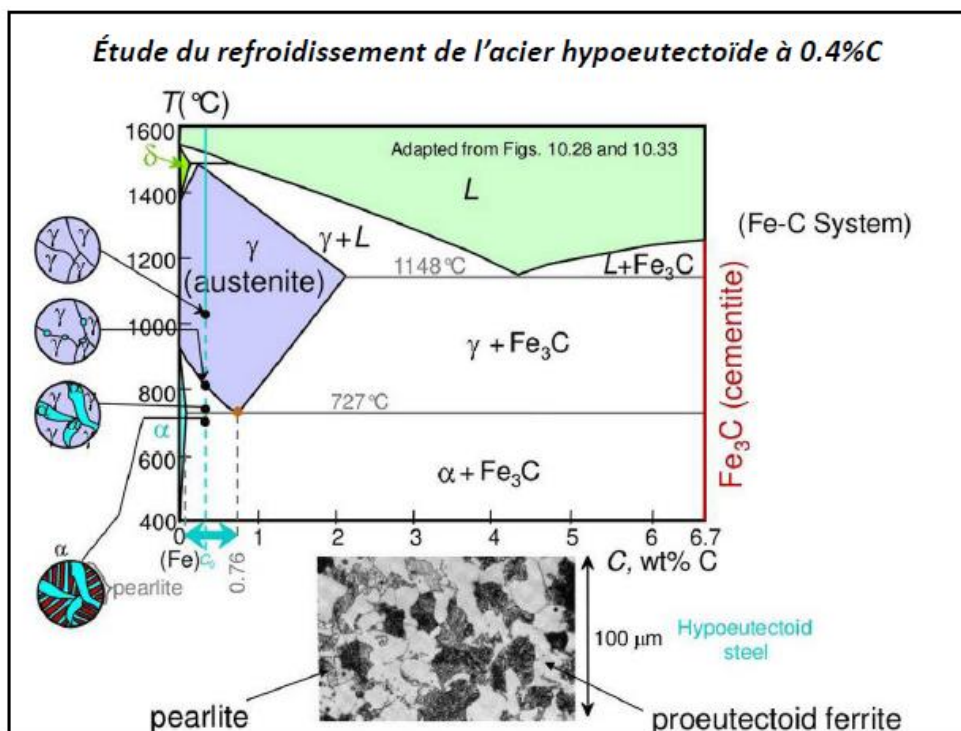


Figure 1.4 étude du refroidissement de l'acier hypoeutectoïde à 0.4%C.[7]

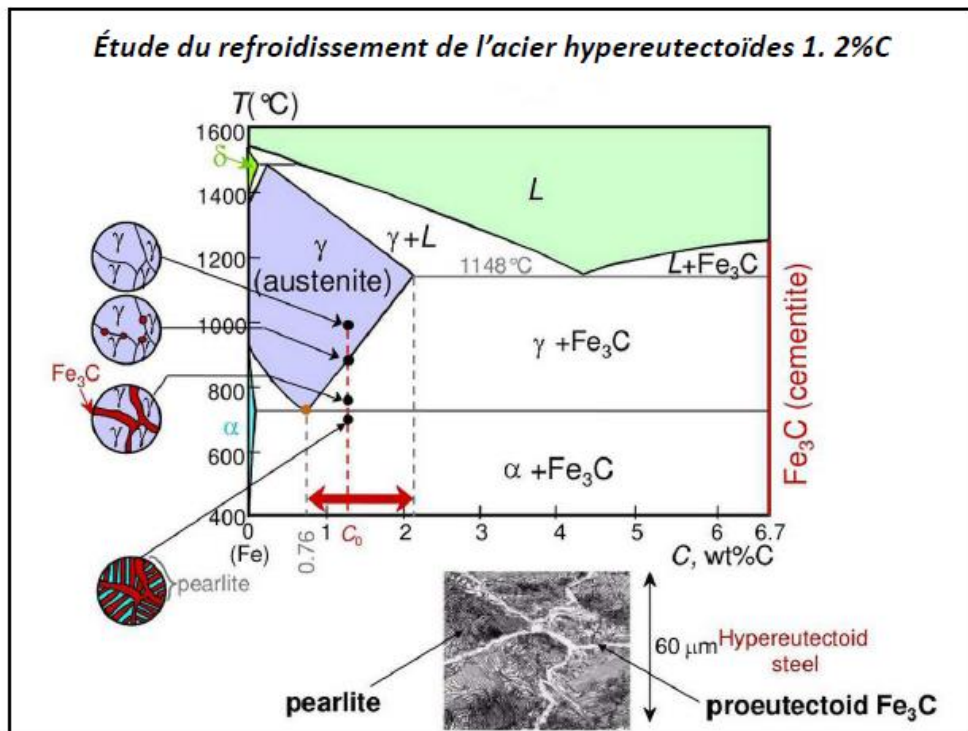


Figure 1.5 étude du refroidissement de l'acier hypereutectoïdes à 1.2%C.[7]

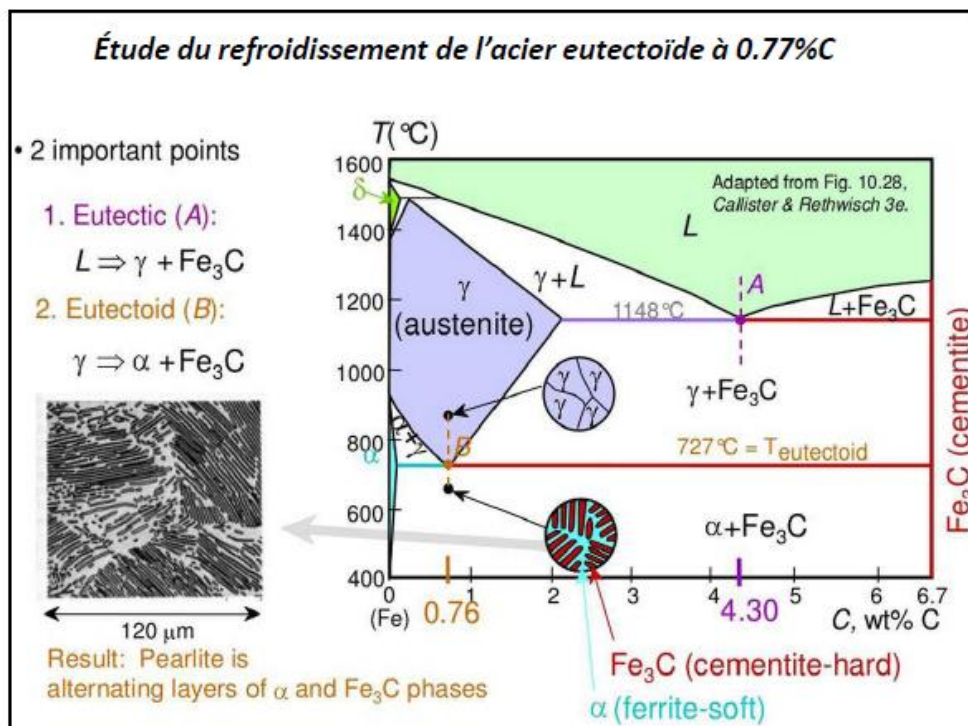


Figure 1.6 étude de refroidissement de l'acier eutectoïde à 0.77%C.[7]

### 1.5 Points de transformation

a) Transformation eutectique dans le système métastable :



b) Transformation eutectoïde dans le système métastable :



c) Transformation peritectique dans le système métastable :

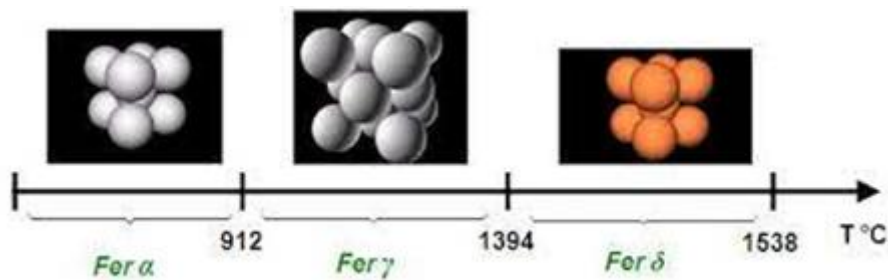
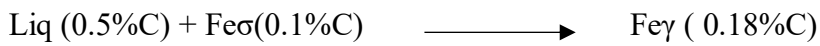


Figure 1.7 transformation allotropique du fer.[8]

### 1.6 Constituants et microstructures des aciers et fontes

Tableau 1.1 microstructures des aciers et fontes.[9]

Désignation	% de carbone
Aciers hypoeutectoides	0.02 à 0.8
Aciers eutectoïdes	0.8
Aciers hypereutectoides	0.8 à 2.06
Fontes hypoeutectiques	2.06 à 4.3
Fontes eutectiques	4.3
Fontes hypereutectiques	4.3 à 6.67

### **1.7 Conclusion**

Le fer a constitué la base matérielle de la civilisation humaine en Europe, en Asie et en Afrique. Les anciens supputent que l'acier est un fer dur aux molécules réarrangées en rangs serrés. Pour les armes, on recherche à la fin du Moyen Age les meilleurs gisements et certains fondeurs sont connus pour leur art de réaliser des pièces remarquables.[1]

# **Chapitre 2**

## 2 Chapitre 2 : Traitement thermique des aciers

### 2.1 Introduction

Le traitement thermique de l'acier est défini comme le processus consistant à chauffer et à refroidir l'acier pour améliorer des propriétés telles que la ténacité, l'usinabilité, la dureté, ductilité, ainsi que l'élimination des contraintes résiduelles, la résistance à l'usure, l'affinement du grain, etc. et ainsi de suite.[10]

### 2.2 Types de traitement thermique :

Il existe essentiellement trois types de traitements thermiques : le recuit, la trempe, et le revenu.

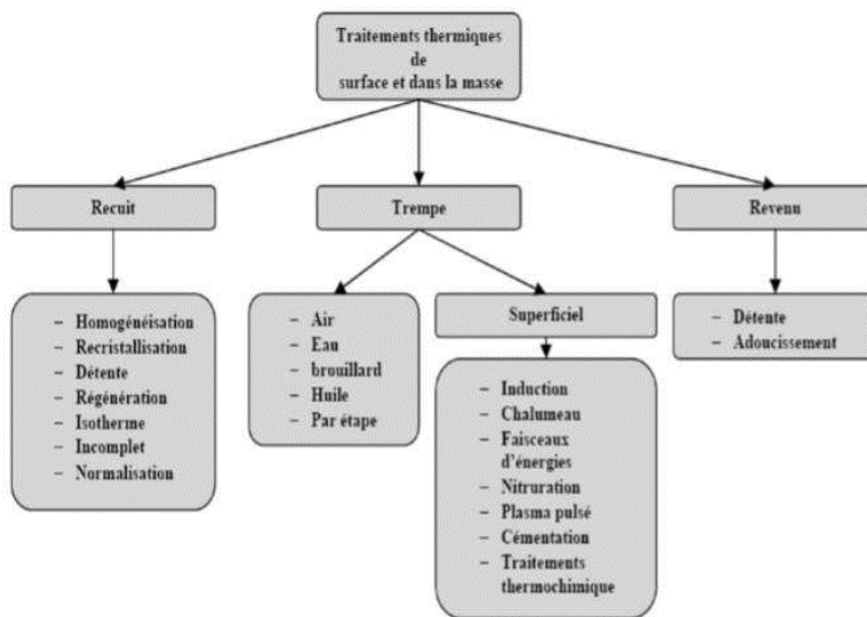


Figure 2.1 Les modes principaux du traitement thermique.[10]

Les spécifications des matériaux indiquent les traitements thermiques spécifiques permettant d'obtenir les propriétés du matériau ou de l'application en question. Le traitement thermique dépend fortement des méthodes de fabrication utilisées pour ce produit et les exigences peuvent aller de l'absence de traitement thermique à des traitements thermiques sous-critiques (tels que le traitement thermique par précipitation, la trempe ou la détente) jusqu'aux traitements thermiques à haute température ; trempe, recuit ou normalisation) qui peuvent être suivis d'un traitement thermique de revenu.[10,11]

Les descriptions des traitements thermiques courants sont décrites dans les sections suivantes :



## 2.2.1 Trempe

### 2.2.1.1 Définition, But et Cycle :

La trempe d'un objet en acier consiste à l'austénitiser et à le refroidir assez rapidement pour qu'une partie ou la totalité de l'austénite se transforme en martensite suffisamment rapidement pour qu'une partie ou la totalité de l'austénite se transforme en martensite." Le site refroidissement rapide supprime la formation d'austénite en  $\alpha + Fe_3C$ , au contraire il produit de la martensite dure pour les applications qui exigent un matériau dur (par exemple, les couteaux, les lames de rasoir, les outils chirurgicaux, les outils de coupe, etc.).[11]

Seule l'austénite se transforme en martensite, si l'austénite + la ferrite sont trempées, toute l'austénite se transforme en martensite. l'austénite se transforme complètement en martensite, tandis que la ferrite reste inchangée. reste inchangée. De même, lorsque l'austénite + la cémentite est trempée, encore une fois toute l'austénite se transforme complètement en martensite tandis que la cémentite reste inchangée. Par conséquent, l'austénitisation complète est l'étape importante du processus de du la trempe .étape importante du processus de la trempe.[11,12]

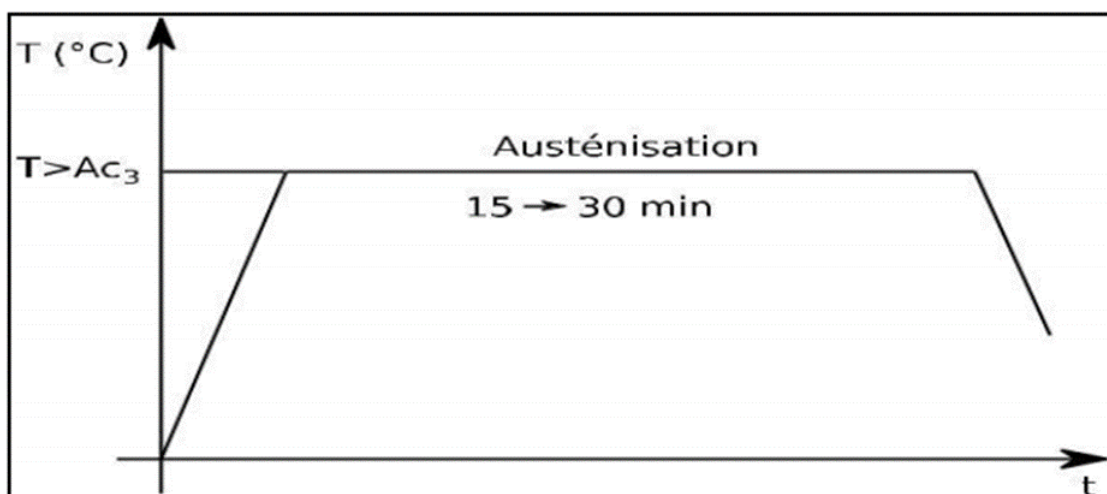


Figure 2.2 Cycle de la Trempe.[11]

### 2.2.1.2 Types de Trempe

#### 2.2.1.2.1 Trempe martensitique

La trempe est un procédé de traitement d'un matériau. Il concerne surtout les métaux et le verre. Ce traitement peut être thermique (refroidissement rapide) ou chimique (immersion

dans un bain de sel fondu), il peut aussi être dans la masse du matériau ou uniquement à sa surface.[12]

### **2.2.1.2.2 Trempe bainitique**

C'est une austénisation suivie d'un refroidissement rapide jusqu'à  $\theta_b$  (température de trempe bainitique), maintenue pendant le temps nécessaire à la transformation complète de l'austénite. On refroidit ensuite jusqu'à température ambiante.[13,14]

### **2.2.1.2.3 Trempe d'aciers austénitiques ou hypertrempe**

Sur certains aciers austénitiques, cette trempe crée une structure d'austénite homogène à température ambiante. Elle provoque l'adoucissement du matériau (comme certains aciers inox). Elle se produit si la température de trempe est trop élevée.[14]

## **2.2.2 Recuit**

### **2.2.2.1 Définition et But**

Le recuit est un terme très large utilisé pour décrire une variété de traitements thermiques. Il s'agit d'un procédé habituellement appliqué pour éliminer les contraintes ou l'écaillage. Le recuit de durcissement est défini comme " le recuit d'un objet en acier en l'austénisant puis en le refroidissant lentement à travers la gamme de transformation. Il en résulte une transformation maximale en ferrite et en perlite grossière, ce qui donne la dureté et la résistance les plus faibles. Dans tous les cas, la température d'austénitisation est supérieure de 50°C à la température d'austénitisation déterminée à partir de l'analyse de l'acier déterminée à partir du diagramme fer-carbone afin d'obtenir une structure homogène et d'annuler l'effet de la vitesse de chauffage.[14,15]

### **2.2.2.2 Les principes du recuit**

#### **2.2.2.2.1 Chauffage**

Le chauffage se fera à vitesse modérée. Certains aciers "difficiles" demanderont des paliers intermédiaires ou des vitesses de montée en température précises. La température de recuit (TR sur le graphe) est spécifique à chaque acier. Une fourchette est généralement donnée par le fournisseur d'acier. A défaut, il sera toujours possible d'utiliser les données techniques d'un acier proche ou similaire. En général, cette température est de l'ordre de :

> Pour les aciers hypoeutectoïdes =  $AC_3 + 50^\circ C$ .

> Pour les aciers hypereutectoïdes =  $AC1+50^{\circ}C$

### 2.2.2.2 Maintenu

La température de recuit sera maintenue pendant un moment. Les ouvrages théoriques donnent en général des durées genre 1 minute par millimètre de la pièce. Si la montée en température n'a pas été trop rapide, la température est relativement homogène (surtout sur une pièce de 3 ou 4 millimètres d'épaisseur) et on peut diminuer le temps de maintien en température.[14,15]

### 2.2.2.3 Refroidissement

Idéalement, le refroidissement devrait être le plus lent possible. Dans la pratique, il doit être adapté à l'acier. Certains aciers (particulièrement ceux avec du Chrome) exigent un refroidissement très lent. Le meilleur compromis, influant directement sur les moyens à mettre en œuvre, découle de l'expérience acquise avec un acier.[15]

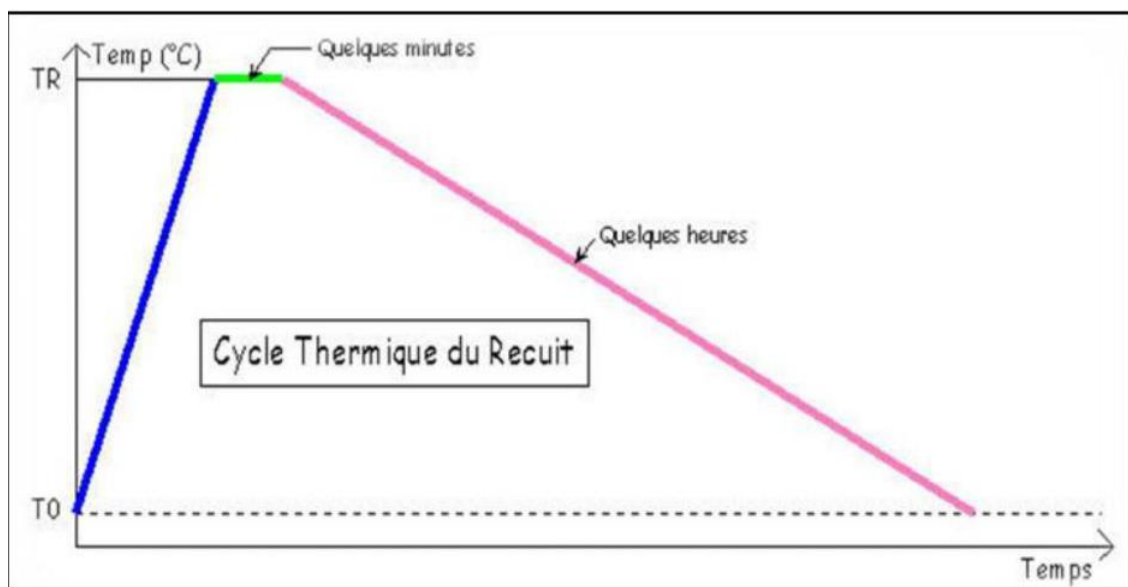


Figure 2.3 Cycle thermique du recuit.[15]

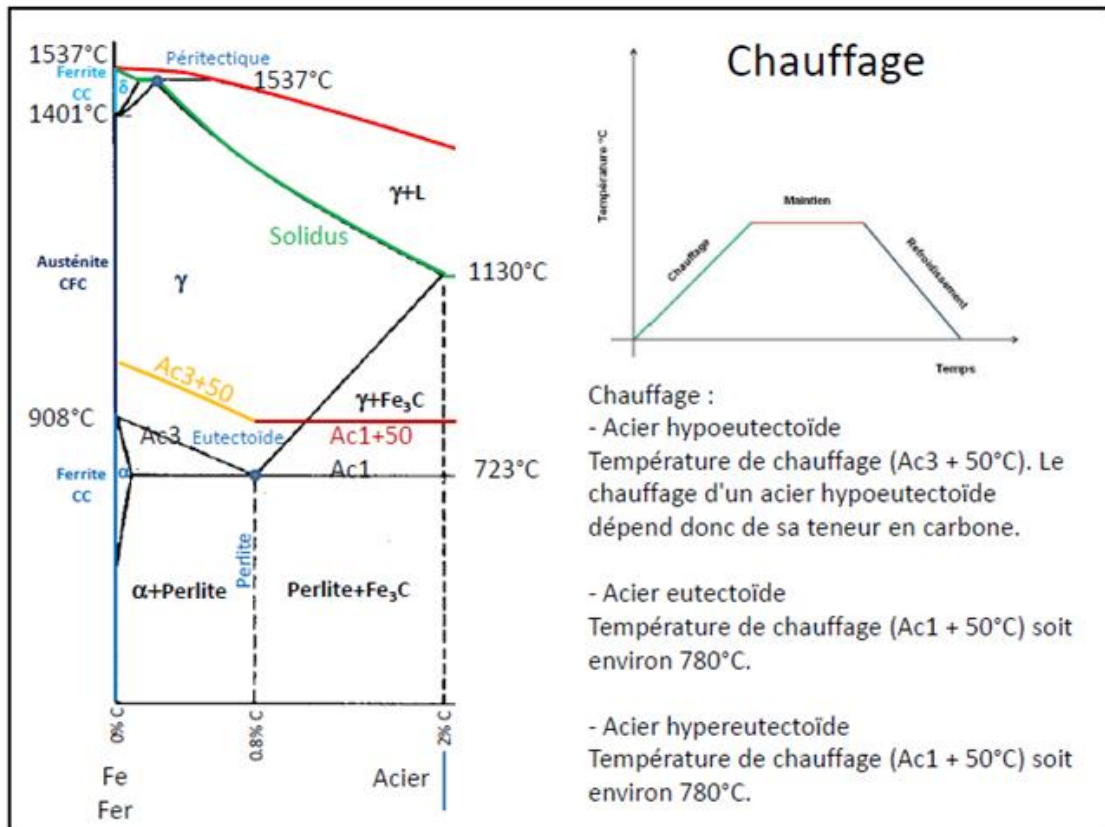


Figure 2.4 illustration principes et diagramme du recuit.[16]

### 2.2.2.3 Types de recuit

#### 2.2.2.3.1 Recuit complet

Couramment appelé recuit. Il est effectué sur des pièces ayant subi des traitements thermiques ou mécaniques dont on désire supprimer les effets (constituants durs) pour en faciliter l'usinage. La pièce est portée à AC3 + 50°C environ 30mn puis refroidie lentement à l'air ou au four.[15,16]

#### 2.2.2.3.2 Recuit d'adoucissement

Il est effectué sur des aciers auto - trempant. La pièce est chauffée à une température inférieure à AC1 pendant 6 à 8 heures puis refroidie à l'air libre. Cette basse température évite la réalisation d'une trempe.[15]

#### 2.2.2.3.3 Recuit de coalescence

Il est effectué sur des pièces à fort pourcentage de carbone (exemple: Z200C13-100C6), dans le but d'obtenir l'adoucissement maximal. La pièce est chauffée en dessous de AC1 pendant 30mn puis refroidie à l'air libre.[16]

#### **2.2.2.3.4 Recuit d'homogénéisation**

Aussi appelé recuit de diffusion il est surtout effectué sur des aciers bruts de coulée ou sur des aciers moulés aux dimensions importantes pour supprimer l'hétérogénéité chimique. La pièce est portée à une température aussi élevée que possible sans atteindre le solidus réel. Pratiquement, la température est de l'ordre de  $AC3 + 200^{\circ}C$  La durée de ce traitement est de plusieurs heures. Le métal qui a été surchauffé est suivi d'un recuit de régénération. [15,16]

#### **2.2.2.3.5 Recuit de normalisation**

C'est une variante du recuit de régénération qui s'applique aux pièces brutes de forgeage ou de laminage. Il s'effectue dans les mêmes conditions de chauffe ; la pièce est ensuite refroidie à l'air calme. [16]

#### **2.2.2.3.6 Recuit de détente ou de stabilisation**

Il est effectué sur des pièces après moulage ou soudage pour éliminer les tensions internes avant l'usinage. La pièce est chauffée vers  $600^{\circ}C$  pendant environ une heure puis refroidie à l'air libre. [17]

#### **2.2.2.3.7 Recuit de récrystallisation ou de restauration**

Il est effectué sur des pièces écrouies à une température de l'ordre de  $600^{\circ}C$ . L'écrouissage provoque une grande augmentation de la fragilité et dans certains cas, il est impossible de continuer le travail de l'acier (tréfilage par exemple). [16,17]

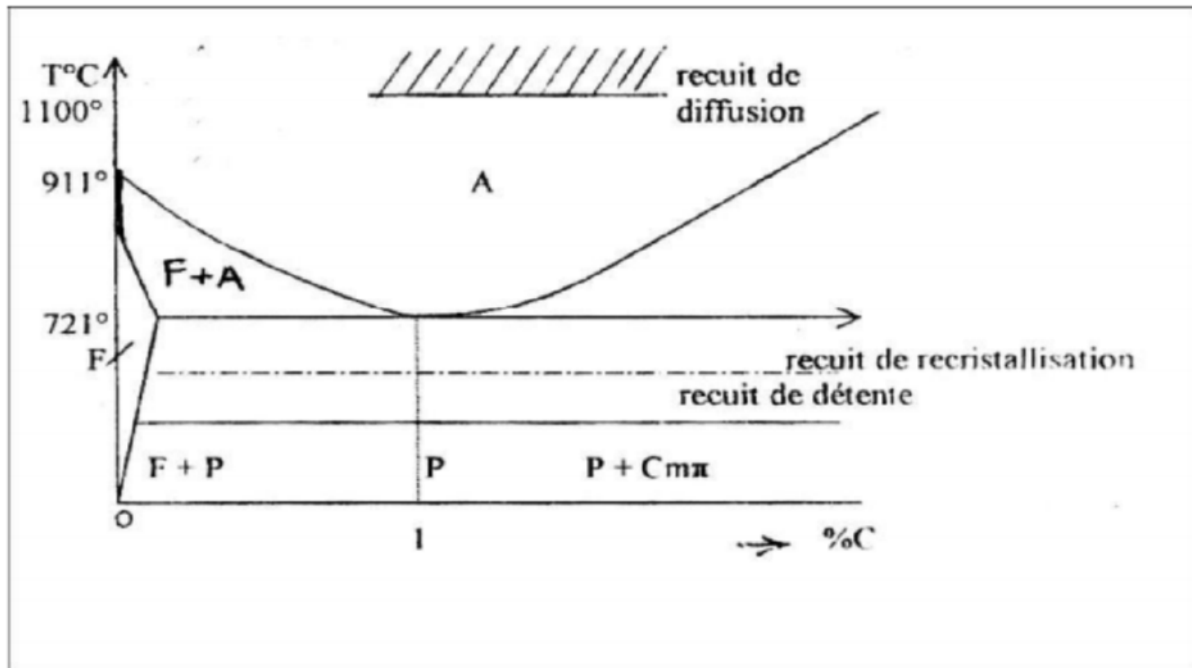


Figure 2.5 Cycle thermique des différents recuits.[17]

### 2.2.3 Revenu

#### 2.2.3.1 Définition et But

Le revenu est défini comme "le réchauffement de l'acier trempé soumis à une température inférieure à  $A_{c1}$ , puis le refroidir à la vitesse souhaitée pour augmenter la souplesse et la ductilité en réduisant la fragilité de la martensite". Le revenu permet à certains des atomes de carbone de la structure martensitique déformée de diffuser et de former des carbures de fer ou de la cémentite. Cela réduit la dureté, la résistance à la traction, la limite d'élasticité et le niveau de contrainte mais augmente la ductilité et la ténacité, interdépendantes, mais le revenu se fait normalement à des températures comprises entre  $175^{\circ}\text{C}$  à  $705^{\circ}\text{C}$  et pendant des durées allant de 30 minutes à 4 heures, selon la composition de l'acier.[18]

#### 2.2.3.2 Types de revenus

##### 2.2.3.2.1 Revenu de relaxation ou de détente

Il s'effectue entre  $180^{\circ}\text{C}$  et  $220^{\circ}\text{C}$  -  $250^{\circ}\text{C}$ . Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite et martensite. Il provoque une légère diminution

de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle.[18,19]

#### **2.2.3.2.2 Revenu de structure ou classique**

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et AC1. On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, Rm et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.[18]

#### **2.2.3.2.3 Revenu de durcissement**

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires) [18,19].

### **2.3 Traitement thermique pour les aciers à outils H13**

#### **2.3.1 Recuit**

Chauffer lentement à 1550-1650 °F, maintenir jusqu'à ce que la masse entière soit chauffée à travers, et refroidir lentement dans le four (40F par heure) à environ 1000°F, après quoi la vitesse de refroidissement peut être augmentée. Des précautions appropriées doivent être prises pour éviter une carburation ou une décarburation excessive[20,21].

#### **2.3.2 Déstressant**

Lorsque cela est souhaitable pour soulager les contraintes d'usinage, chauffer lentement à 1050°-1250°F, permettre d'égaliser, puis refroidir à l'air calme (Soulagement de la tension).

#### **2.3.3 Préchauffer avant durcissement**

Réchauffer légèrement avant de charger dans le four de préchauffage, qui devrait fonctionner à 1400°-1500°F.

### 2.3.4 Durcissement

L'acier à outils H13 est un acier à très haute trempabilité et doit être durci par refroidissement à l'air calme. L'utilisation d'un bain de sel ou d'un four à atmosphère contrôlée est souhaitable pour minimiser la décarburation, et si non disponible, le durcissement du pack dans le coke de brai usé est suggéré. La température utilisée est généralement de 1800°-1850°F, selon la section de taille [21].

### 2.3.5 Trempe

Trempe à l'air calme ou au jet d'air sec. Si des formes compliquées doivent être durcies, une trempe à l'huile interrompue peut être utilisée. Trempez la partie dans l'huile et retirez-la du bain lorsqu'elle perd juste sa couleur (1000°-1100°F). Terminer le refroidissement à moins de 150°-125°F dans l'air, puis tempérer immédiatement.[22]

La pratique de la trempe peut varier selon la taille et l'application, mais est généralement effectuée dans la plage de dureté secondaire maximale ou supérieure. La double trempe est recommandée. Les résultats ci-dessous sont H13 qui a été trempé à l'air à partir de 1800°F et revenu pour 4 heures à différentes températures. Les résultats peuvent servir de guide, en gardant à l'esprit que les parties de section ou de masse lourde peuvent avoir une dureté inférieure de plusieurs points.[22,23]

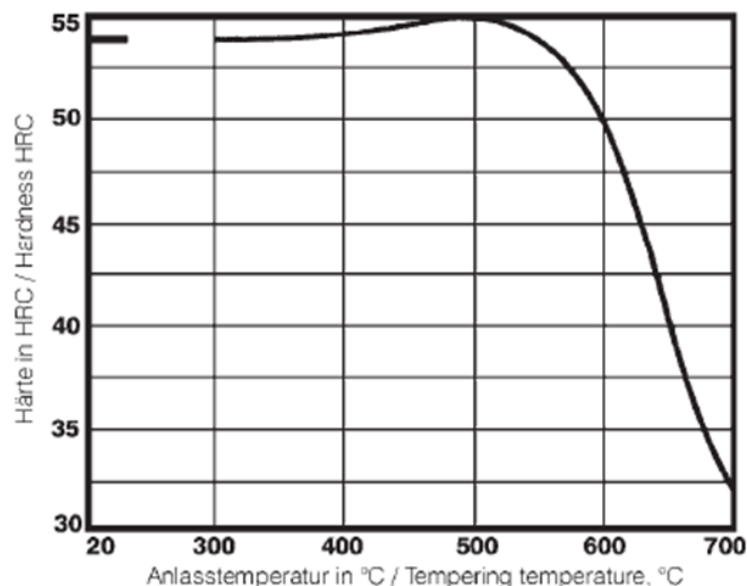


Figure 2.6 Courbe de temperature HRC.[22]



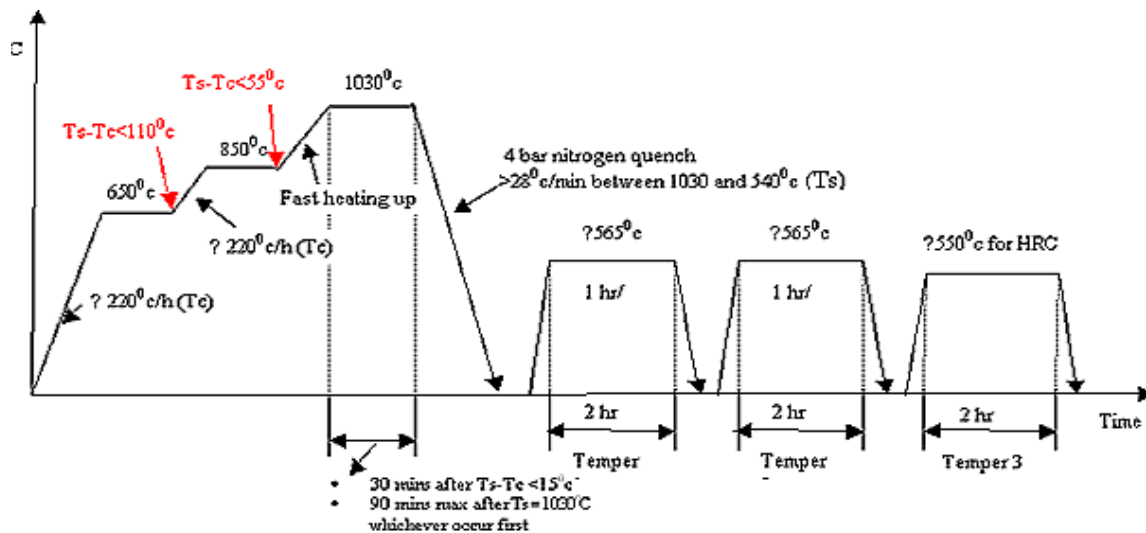


Figure 2.7 L'effet du traitement thermique sur le durcissement de la zone de surface de l'acier à outils H13.[23]

## 2.4 Les effets du traitement thermique pour le H13

### 2.4.1 Structure des grains et dureté

L'influence d'une série de traitements thermiques sur la résistance à la fatigue de l'acier H13 pour travail à chaud a été étudiée et a entraîné une certaine amélioration de la résistance à la fatigue. Résistance à la fatigue la plus élevée obtenue en appliquant un traitement thermique de double revenu Un traitement de revenu n'a pas amélioré de manière significative la résistance à la fatigue.[24]

La fatigue est un élément crucial qui limite la durée de vie des pièces de machines ainsi que d'autres mécanismes fondamentaux tels que l'usure, la déchirure et la déformation plastique. stress.[25]

Les propriétés reconnues pour permettre à un matériau de mieux résister à la fatigue thermique sont un faible coefficient de dilatation thermique, une conductivité thermique élevée, une limite d'élasticité à chaud élevée, une bonne résistance au revenu, une résistance élevée au fluage, une stabilité dimensionnelle élevée, une résistance aux chocs, une ductilité et une ténacité adéquates.[24,25]

A partir de l'analyse xrd ( voir figure), il y a aussi une augmentation de la densité des sommets du CrC et MoC après le traitement thermique.

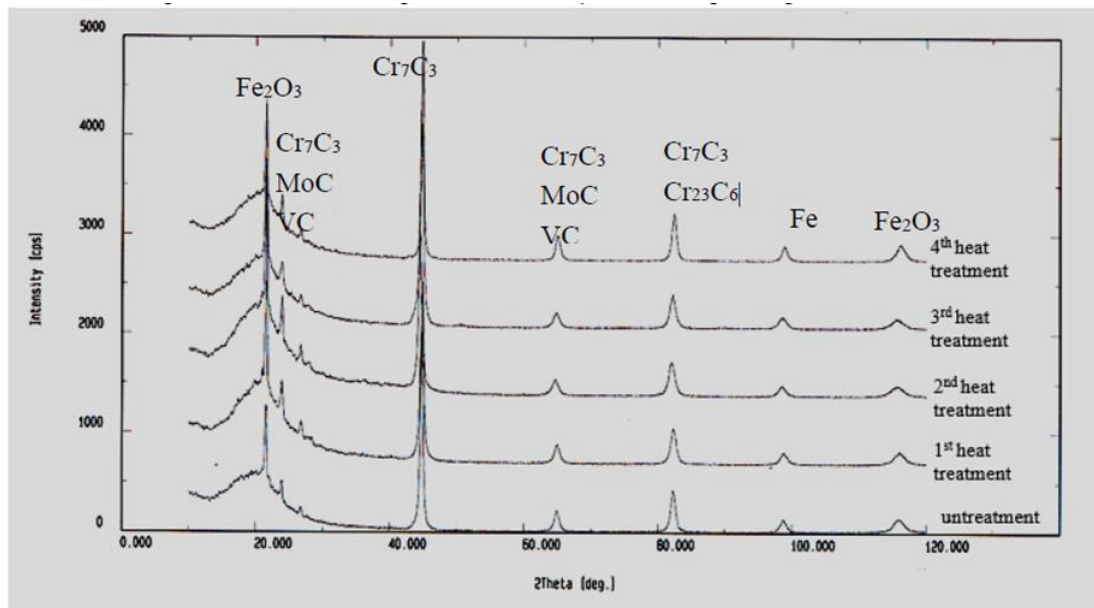


Figure 2.8 Analyse XRD.[25]

D'après la figure, on peut voir que la dureté de l'acier H13 augmente avec la température de trempe, l'augmentation de la température de traitement thermique augmente l'intégration des éléments d'alliage, Comme on le voit sur les les éléments d'alliage ont augmenté la dureté de la structure martensitique, pendant la transformation martensitique, les éléments de carbone et d'alliage restent dans la cage martensitique. Cette. situation augmente la dureté. lors de la transformation martensitique, les éléments de carbone et d'alliage restent dans la cage martensitique. Cette. situation augmente la dureté.[25,26]

## 2.5 Conclusion

Le traitement thermique est un processus contrôlé utilisé pour modifier la microstructure de matériaux tels que les métaux et alliages afin d'obtenir des propriétés qui améliorent la durée de vie d'un composant ; par exemple, en augmentant la dureté de surface, la résistance à la température, la ductilité et la résistance.[19]

# **Chapitre 3**

## 3 Chapitre 3 : Traitement thermique du H 13

### 3.1 Introduction

L'acier d'outil de travail à chaud est utilisé pour couper le matériau à des températures élevées. Le groupe H présente une résistance et une dureté accrues pour une exposition prolongée à des températures élevées. Ils sont faibles en carbone et moyennement élevés en alliages supplémentaires. AISI H1-H19 sont à base de 5% chrome, H20-H39 à base de tungstène et H40-59 à base de molybdène. H13(T20813) est l'acier pour outil de travail à chaud industriel le plus utilisé [20].

### 3.2 Présentation du matériau utilisé

La nuance d'acier AISI H13 pour travail à chaud a été utilisée pour cette étude, qui a une composition chimique nominale de (% en poids) 0,47 C, 0,87 Si, 0,35 Mn, 5,22 Cr, 1,37 Mo, 0,25 Ni, 0,85 V, 0,01 F, 0,001 S, 0,02 Al, 0,03 Co, 0,09 Cu 0,005 Ti et 0,07 W. L'acier de qualité AISI H13 a une ténacité élevée et il est capable de conserver sa conductivité thermique, sa dureté et sa résistance à l'usure à haute température. Il a une haute résistance au démarrage et à l'amorçage des fissures. Il peut être trempé dans une certaine mesure et est généralement utilisé dans les moules de compression de métaux légers et les presses à extrusion comme matrice, cylindre, alimentateur, matrice, poinçon et chemise après nitruration. Il est également utilisé comme matériau de fabrication pour les plastiques très abrasifs et les petites matrices de forge [22].



Figure 3.1 barres H13 laminées à chaud/barre ronde en acier [21]

### 3.3 Propriétés

- Haute trempabilité et haute ténacité.
- Excellente résistance à la fissuration thermique, qui peut être refroidie à l'eau sur le lieu de travail.
- Une résistance modérée à l'usure et un procédé de cémentation ou de nitruration peuvent être utilisés pour augmenter sa dureté de surface, mais avec une légère réduction de la résistance à la fissuration thermique.
- Faible capacité de durcissement secondaire lors du revenu en raison de sa faible teneur en carbone.
- résistance au ramollissement à des températures plus élevées, mais une diminution rapide de la dureté se produit à des températures de fonctionnement supérieures à 540 ° C (1000 ° F) (c'est-à-dire que la température de travail qui peut être tolérée est de 540 ° C).
- Faible déformation du traitement thermique.
- Usinabilité moyenne et élevée.
- Résistance modérée à la décarburation.
- Plus particulièrement, il peut également être utilisé pour fabriquer des composants importants dans l'industrie aérospatiale [20,21].

### 3.4 Application

Tableau 3.1 Application de l'acier H13.[21]

Applications	Température d'austénitisation	CRH
Poinçonnage à froid sévère, cisailles à ferraille	1,870-1,885°F	50-52
	(1,020-1,030°C)	
	Trempe à 480 °F (250°C)	
Cisaillement à chaud	1,870-1,885°F	
	(1,020-1,030°C)	50-52
	Trempe à 480 °F (250°C) ou	
	1,070-1,110°F	45-50
	(575-600°C)	

Anneaux rétractables (par exemple. pour matrices en carbure cémenté)	1,870-1,885°F	45-50
	(1,020-1,030°C)	
	Tempéage 1 070-1 110 °F	
	(575–600°C)	
Pièces résistantes à l'usure	1,870-1,885°F	Coeur 50-52 Surface ~1000HV1
	(1,020-1,030°C)	
	Trempe 1,070°F (575°C)	
	nitruré	

### 3.5 Caractéristiques physique et mécanique

Acier de matrice H13 pour la fabrication de matrice de grande charge d'impact, filière d'extrusion à chaud, fine matrice de forgeage ; Moules de coulée sous pression pour l'aluminium, cuivre et ses alliages. Acier de matrice de travail à chaud trempé à l'air H13 importé des états-unis. Ses performances, l'utilisation et l'acier 4Cr5MoSiV sont fondamentalement les mêmes, mais en raison de sa teneur élevée en vanadium, donc la performance de la température moyenne (600 degrés) est meilleur que l'acier 4Cr5MoSiV, est un acier représentatif dans l'acier de matrice de travail à chaud est largement utilisé [20,21].

Tableau 3.2 Caractéristiques mécanique et physique du H13.[21]

Propriétés	Métrique	Impérial
Résistance à la traction, ultime (@20°C/68°F, varie avec le traitement thermique)	1200 – 1590 MPa	174000 – 231000 psi
Résistance à la traction, rendement (@20°C/68°F, varie avec le traitement thermique)	1000 – 1380 MPa	145000 – 200000 psi

Réduction de la superficie (@20°C/68°F)	50.00%	50.00%
Module d'élasticité (@20°C/68°F)	215 GPa	31200 ksi
Coefficient de Poisson	0.27-0.30	0.27-0.30

### 3.5.1 Taille H13

- Barre ronde en acier H13: diamètre 8mm – 400mm
- Plaque d'acier H13: épaisseur 16mm – 500mm x largeur 200mm – 800mm
- Dalle d'acier H13: 200mm x 500-800 mm
- Largeur de plaque d'acier de matrice H13 (210-610) \* épaisseur (6-80) laminé à chaud
- Diamètre extérieur du tube en acier moulé H13 (6-219) \* Épaisseur du mur (0.5-25)
- Moule H13 lingot d'acier lingot d'électroscorie 0,35 t 0,5 t 0,75 t 1,0 t 1,5 t 1,8 t 2,0 t 2,5 t 2,8 t (3.0-8.0) T

## 3.6 Matériels expérimentaux

### 3.6.1 Four programmable

Le four utilisé est d'un type programmable de laboratoire « Nbertherm ».



Figure 3.2 Four utilisé dans le traitement thermique [23]

### 3.6.2 Polisseuse

Les échantillons destinés à la métallographie sont polis sur du papier abrasif aux carbures de silicium de différentes granulométries. Dans notre, on a utilisé les papiers 1000, 1200, 2400. A la fin du polissage, les échantillons doivent être lavés à l'eau pour éliminer toute particule solide retenue en surface, Puis les sécher à l'aide d'un séchoir électrique.



Figure 3.3 Polisseuse

### 3.6.3 Attaque chimique

L'utilisation des réactifs d'attaques a pour objectif de révéler la structure d'un matériau suite à la préparation de sa surface (révéler les joints des grains). Elle a été réalisée avec le réactif de KELLER de composition chimique suivante :

- 2 ml d'HF (48%).
- 5 ml de HNO<sub>3</sub> (concentré).
- 3 ml de HCL (concentré).
- 190 ml de H<sub>2</sub>O.

On immerge les échantillons pendant 30 a40 secondes dans le réactif puis ils sont lavés à l'eau et séchés à l'aide d'un séchoir.

### 3.6.4 Microscopie optique

Après polissage et attaque chimique nous avons fait recours à la microscopie optique afin de procéder à des observations métallographiques. Le Microscope utilisé avec un agrandissement de 100 à 1000. L'avantage de la microscopie optique, autre sa grande facilité d'utilisation, il permet l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.



### **3.7 Procédure expérimentale**

20 spécimens ont été préparés, et divisés en 4 ensembles et soumis à quatre séquences différentes de traitement thermique. Quatre ensembles de 3 spécimens ont été soumis à des séquences de trempe et de revenu comme indiqué ci-dessous. Les processus d'austénisation ont été effectués à 1060°C. Les processus de trempe ont été réalisés dans l'eau, Air et Huile. La première température de revenu a été choisie à 400 °C car l'acier H13 atteint sa ténacité maximale à cette température. La deuxième température de revenu a été choisie à 500 °C car à cette température, les échantillons ont atteint les valeurs de ténacité du matériau qui sont couramment utilisées dans les filières d'extrusion et d'injection sur le marché. La troisième température du revenu, en revanche, a été choisie pour être de 600 °C, car à cette température, les échantillons atteignent les valeurs de ténacité du matériau qui est couramment utilisé dans les matrices de forgeage sur le marché. Comme on le voit, tous les traitements sont des traitements courants sur le marché et leurs effets sur le comportement en fatigue thermique du métal H13 ont été étudiés. Un cinquième spécimen non traité thermiquement a également été inclus.

#### **3.7.1 Étapes et Analyse de la dureté de l'acier H13**

La teneur en carbone de l'acier détermine la dureté de la matrice de l'acier trempé. Selon la courbe de relation entre la teneur en carbone de l'acier et la dureté de l'acier trempé, la dureté de trempe de l'acier H13 est d'environ 55HRC. Pour les aciers à outils, une partie du carbone de l'acier pénètre dans la matrice d'acier et provoque le renforcement de la solution. L'autre partie du carbone se combinera avec l'élément de formation de carbure de l'élément d'alliage pour former le carbure d'alliage. Pour les aciers à matrice pour travail à chaud, en plus une petite quantité du carbure d'alliage reste, il est également nécessaire qu'il se disperse et précipite sur la matrice de martensite trempée pour produire deux phénomènes de durcissement pendant le processus de revenu. Ainsi, les propriétés des aciers pour matrices pour travail à chaud sont déterminées par la répartition uniforme des composés de carbone d'alliage résiduels et la microstructure de la martensite trempée. Ainsi, la teneur en C dans l'acier ne doit pas être trop faible.

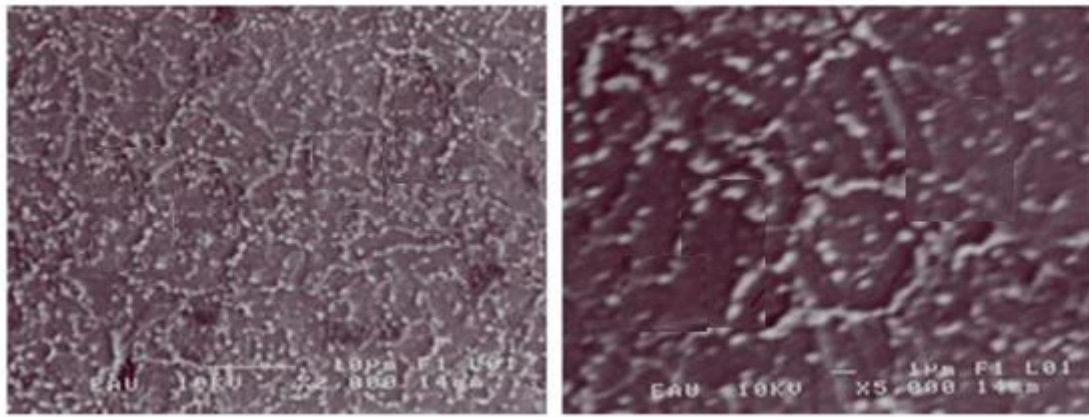


Figure 3.4 Microstructure sans traitement thermique

### 3.7.1.1 Première séquence

Le premier traitement thermique d'austénisation a été effectué à 1060°C, et a été refroidie à travers l'eau, l'air et l'huile. On a évidemment testé la dureté (HRC) des trois spécimens et on a éventuellement effectué une microstructure après la procédure de polissage et d'attaque chimique avec produit Keller.

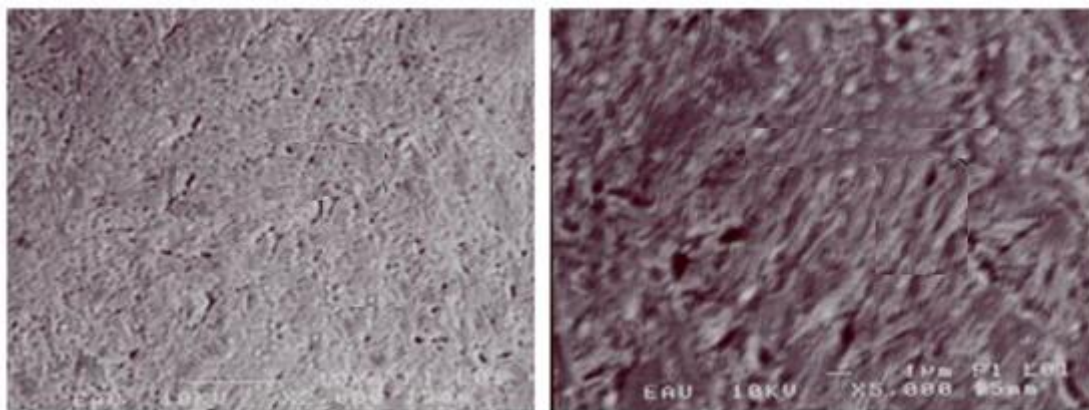


Figure 3.5 Microstructure du premier traitement thermique

### 3.7.1.2 Deuxième séquence

Le Deuxième traitement thermique de revenu a été effectué à 400°C, et a été refroidie à travers l'eau, l'air et l'huile. On a évidemment effectué une microstructure après la procédure de polissage et d'attaque chimique avec produit Keller.

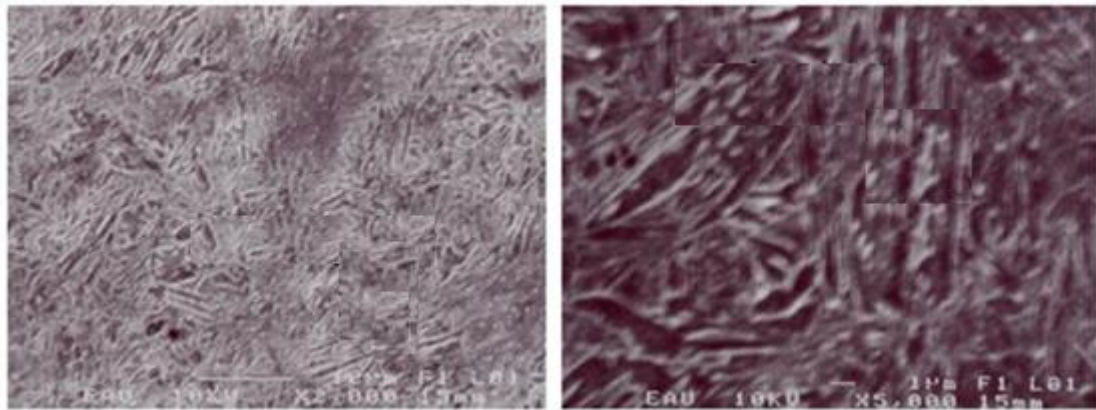


Figure 3.6 microstructure du second traitement thermique

### 3.7.1.3 Séquence trois

Le troisième traitement thermique de revenu a été effectué à 500°C. et a été refroidie à travers l'eau, l'air et l'huile. On a évidemment testé la dureté (HRC) des trois spécimens et on a éventuellement effectué une microstructure après la procédure de polissage et d'attaque chimique avec produit Keller.

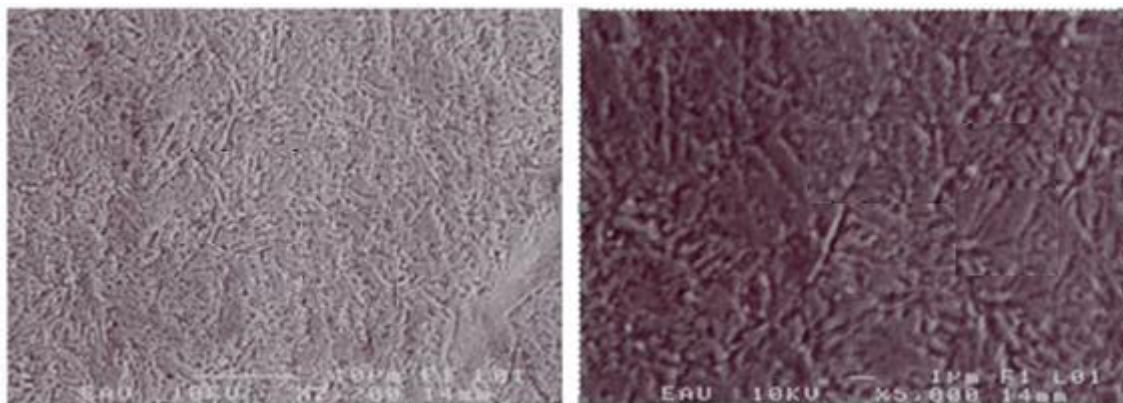


Figure 3.7 troisième microstructure du traitement thermique

### 3.7.1.4 Séquence quatre

Le quatrième traitement thermique de revenu a été effectué à 600°C, et a été refroidie à travers l'eau, l'air et l'huile. On a évidemment testé la dureté (HRC) des trois spécimens et éventuellement effectué une microstructure après la procédure de polissage et d'attaque chimique avec produit Keller.

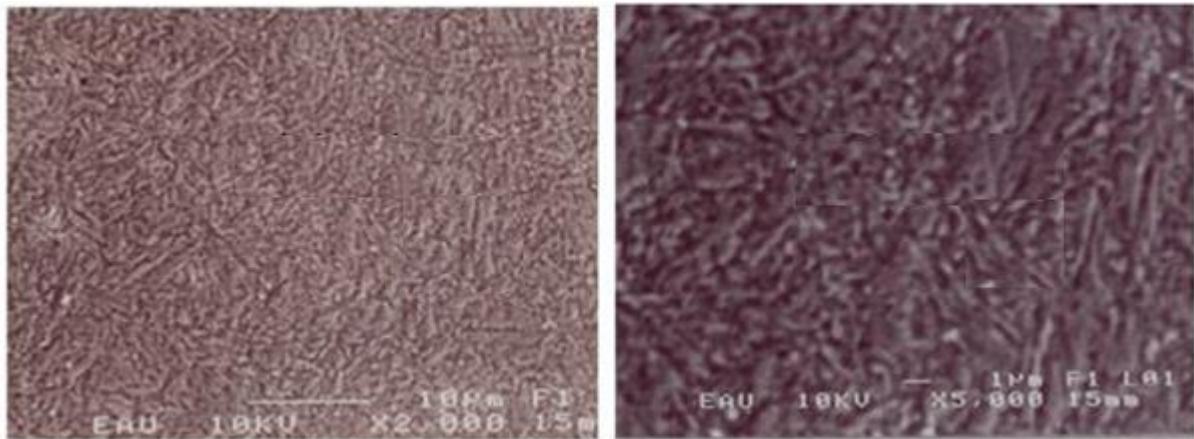


Figure 3.8 Quatrième microstructure du traitement thermique

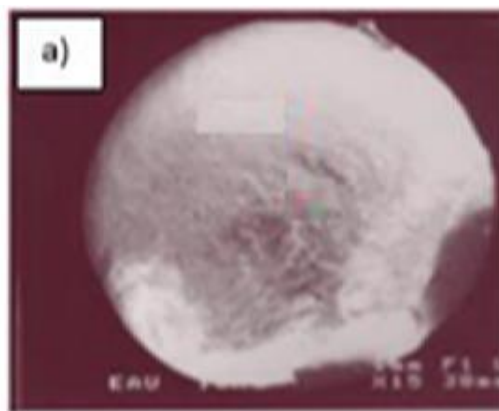


Figure 3.9 Surface du point de rupture d'échantillon sans traitement thermique [24]

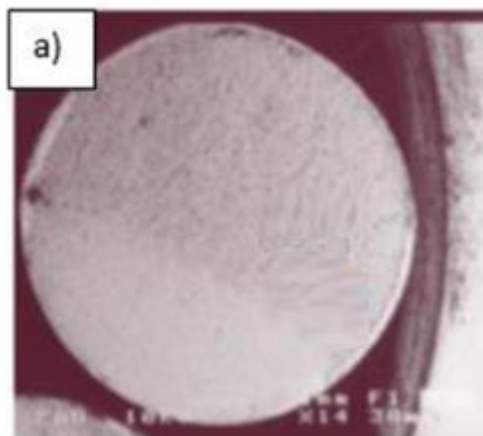


Figure 3.10 Surface du point de rupture d'échantillon de la première séquence de traitement thermique [24]

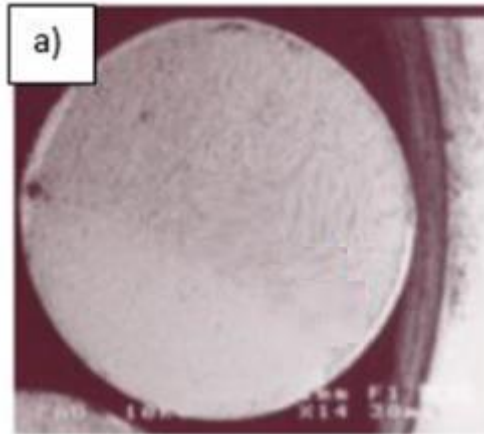


Figure 3.11 Surface du point de rupture d'échantillon de la seconde séquence de traitement thermique [24]

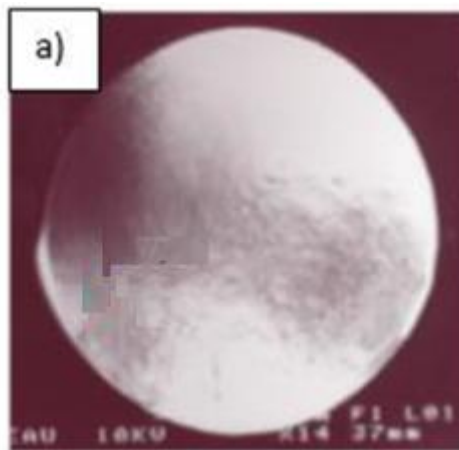


Figure 3.12 Surface du point de rupture d'échantillon de la 3ème séquence de traitement thermique [24]

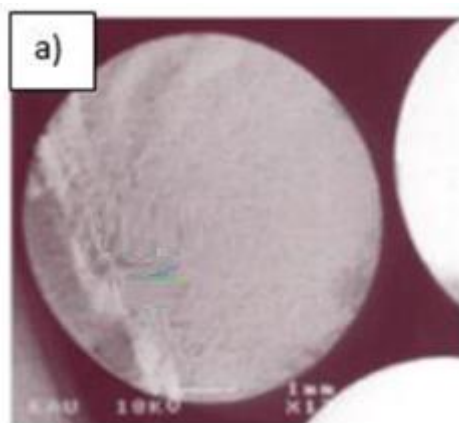


Figure 3.13 Surface du point de rupture d'échantillon de la 4ème séquence de traitement thermique [24]

### **3.8 Conclusion**

Les surfaces de rupture de tous les groupes ont des caractéristiques communes. Le type de fracture et le schéma de propagation de la fracture sont intergranulaires dans tous les groupes. Comme l'historique de chargement de la pièce n'a pas changé, la fréquence de chargement n'a pas changé et les phases n'ont pas été soumises à une répétition de charge. Par conséquent, aucune ligne de fatigue n'a été observée sur les surfaces de rupture. Sur la surface de fracture du groupe O (sans traitement thermique), des lignes de marche se sont formées en raison du fait qu'un grand nombre de fissures se confondent pour former un seul front fissuré. En général les surfaces de rupture de tous les groupes ont des caractéristiques communes. Le type de fracture et le schéma de propagation de la fracture sont intergranulaires dans tous les groupes. Sur la surface de fracture du groupe O (sans traitement thermique), des lignes de marche se sont formées en raison du fait qu'un grand nombre de fissures se confondent pour former un seul front fissuré.

# **Chapitre 4**

## 4 Chapitre 4 : Résultats et discussion du traitement

### 4.1 Introduction

Le traitement thermique est constitué d'un certain nombre d'opérations de chauffage et de refroidissement afin d'augmenter la résistance à la rupture à la fois augmenter la dureté des pièces, c'est-à-dire régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage, permettant à ce métal de mieux résister à l'usure ou aux chocs [25].

#### 4.1.1 Spécimen sans traitement thermique

Tableau 4.1 valeurs du HRC originale du spécimen sans traitement thermique

Echantillon sans traitement thermique	1 point (HRC)	2 point (HRC)	3 point (HRC)	4 point (HRC)
	6.0	8.9	6.1	6.8

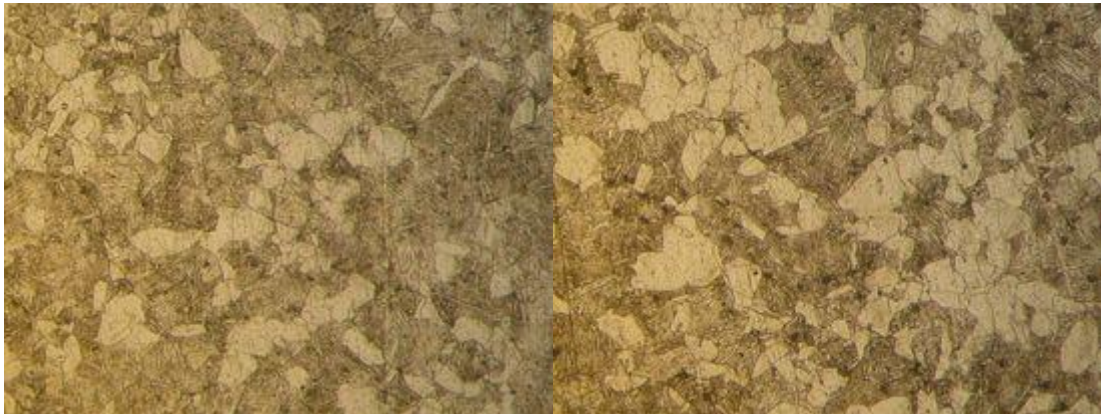


Figure 4.1 microstructure originale sans traitement thermique (1µm/x5000/14mm)

- le grain de carbure est un grain de ferre également observé avec une taille de grain de 8µm à 10µm.
- grains de perlite observés.



**4.1.2 Premier traitement (Austénisation)**

1ère séquence de traitement thermique, fait disparaître les joints de grains et leur taille diminue de %50. Structure martensitique, obtenue par trempe, également figure montre que les grains d'austénite sont minuscules et uniformes. Les résultats sont le tableau et les figures présentées ci-dessous :

Tableau 4.2 Resultats d'austénisation

Echantillon a 1060°	1 point (HRC)	2 point (HRC)	3 point (HRC)	4 point (HRC)
Air	42.7	43.9	44.8	44.5
Eau	40.5	56.3	47.6	39.5
Huile	47.7	47.1	51.8	52.6

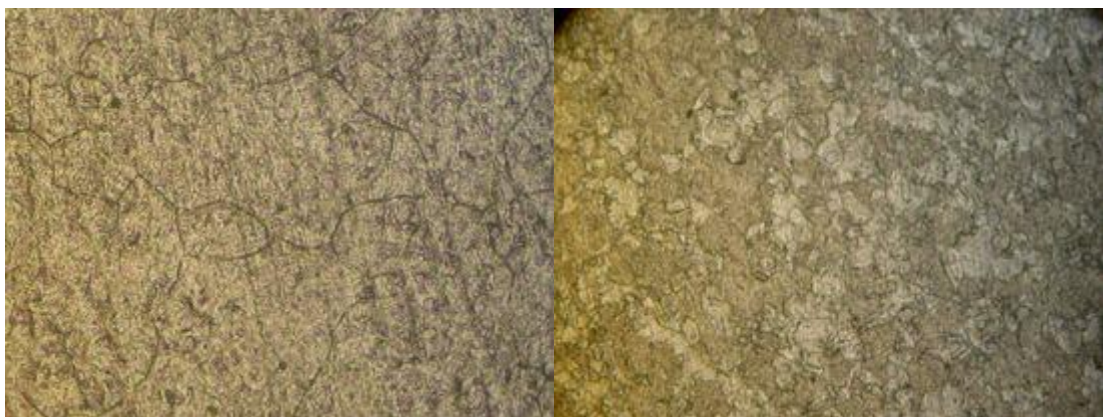


Figure 4.2 microstructure d'austénisation. (1µm/x5000/14mm)

- Les grains disparaissent et leur taille diminue.
- la structure de la martensite obtenue par trempe est également visible.
- Les grains d'austénite sont minuscules et uniformes.
- les grains d'austénite se transforment en martensite tempérée par double trempe.

**4.1.3 Deuxième traitement (Revenu à 400°C)**

En comparant les spécimens de la 2ème séquence avec les spécimens de la 1ère séquence, on peut constater que la taille des grains est plus visible et que les grains sont plus apparents dans le premier. Les caractéristiques de la structure martensitique sont également plus évidentes. Il semble évident que la formation d'un réseau dans les joints de grains épaissis se produit. Les types MC sont des carbures constitués d'éléments d'alliage V et Mo. Le type VC est prédominant [25]. Les résultats de l'analyse XRD de l'acier sont parallèles à cette information. Les résultats sont le tableau et la figure 4.3 présentée ci-dessous :

Tableau 4.3 Résultats du revenu à 400°C

Echantillon a 400° (revenu)	1 point (HRC)	2 point (HRC)	3 point (HRC)	4 point (HRC)
Air	39.7	39.7	42.9	40.5
Eau	29.4	48.7	45.3	42.9
Huile	51.2	48.3	54.4	49.4



Figure 4.3 microstructure du revenu à 400°C. (1µm/x5000/14mm)

- la taille du gain est plus visible.
- la structure martensitique est également plus évidente.
- La microstructure montre le type de ferrite M6C M23C6 M7C3.

**4.1.4 Troisième traitement (Revenu à 500°C)**

La troisième séquence montre la disparition des joints de grains par rapport à celle des échantillons de la 2ème séquence. La plupart des carbures sont dissous dans une solution solide lors de l'austénitisation. La microstructure révèle la martensite revenue dans la dispersion des carbures denses (carbures insolubles lors de l'austénisation) combinée à la dispersion des carbures fins (carbures qui empêchent la dissolution lors de la trempe). Les particules de carbure grossier devraient être M7C3 (par exemple CrC). Il ressort clairement de la figure 4 que les carbures grossiers restent un obstacle à la croissance des grains d'austénite. Cela provoque une résistance élevée à l'usure. De plus, la forme et la distribution de ces particules de carbure provoquent également des propriétés mécaniques anisotropes Les particules de carbure grossier sont des carbures de type M6C, M23C6, M7C3. Les carbures de type MC (VC) sont insolubles car ce sont des carbures plus résistants. Structure interne après durcissement; Le résidu est constitué d'austénite, de martensite et de carbure d'alliage [26]. Les résultats sont le tableau et la figure 4.4 présentée ci-dessous :

Tableau 4.4 Résultats du revenu à 500°C

Echantillon a 500° (revenu)	1 point (HRC)	2 point (HRC)	3 point (HRC)	4 point (HRC)
Air	47.3	46.5	48.6	45.8
Eau	42.6	53.1	44.7	47.6
Huile	52.4	54.4	53.2	52.8



Figure 4.4 microstructures du revenu à 500°C. (1µm/x5000/14mm)

- décomposition plus importante des limites du grain par rapport à la 2ème séquence.
- la plupart des carbures sont dissous en solution solide pendant l'austénitisation.
- La microstructure révèle la martensite trempée dans la dispersion des carbures denses.

#### 4.1.5 Quatrième traitement (Revenu à 600°C)

Il est évident, figure 4.5, que les spécimens des 3e et 4e séquences ont des microstructures similaires. Par rapport aux spécimens de la 2e séquence, cependant, les joints de grains sont moins apparents. La figure 4.5 montre que des grains plus petits se sont formés et que leur croissance a été réduite à la limite des grains pour permettre la formation d'une structure à grains fins. Après durcissement, les carbures de type M7C3 (Cr7C3) se dissolvent par revenu à 550 °C. Les carbures de type M7C3 présentent un effet de durcissement secondaire. Par conséquent, malgré la diminution du taux de carbone, la dureté ne diminue pas. Le résidu se transforme en austénite martensite. Comme le montre la figure 4.5, la martensite n'est pas plane mais linéaire. La martensite de type linéaire se forme en raison de la teneur réduite en carbone, causée par la décomposition des carbures. Les résultats sont le tableau et la figure présentée 4.5 ci-dessous :

Tableau 4.5 Résultats du revenu à 600°C

Echantillon a 600° (revenu)	1 point (HRC)	2 point (HRC)	3 point (HRC)	4 point (HRC)
Air	42.7	43.5	42.5	42.1
Eau	35.8	38.1	38.5	39.7
Huile	40.2	36.5	40.6	41.4



Figure 4.5 microstructure du revenu à 600°C. (1 $\mu$ m/x5000/14mm)

- les spécimens des 3ème et 4ème séquences ont des microstructures similaires par rapport aux spécimens de la 2e séquence.
- les limites de grain sont moins apparentes.
- des grains plus petits se sont formés et leur croissance a été réduite au niveau du joint de grain pour permettre la formation d'une structure à grain fin.
- malgré la diminution du ratio de carbone, la dureté ne diminue pas.
- Le résidu se transforme en austénite martenzite.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

La présence des éléments d'alliage modifie également la dureté ainsi que la dureté de l'acier H13 augmente avec la température de trempe. Tous les traitements thermiques appliqués ont entraîné une certaine amélioration de la résistance à la fatigue du matériau. Un seul revenu à 550 °C pendant deux heures après la trempe n'apporte pas d'amélioration significative de la résistance à la fatigue par rapport à la seule trempe. L'augmentation de la deuxième température de revenu de 610 °C à 635 °C n'a pas eu d'impacte particulière sur la résistance et à la fatigue, du fait que la résistance et la fatigue maximale de H 13 a été obtenue en appliquant un traitement thermique de double revenu (premier revenu à 550 °C pendant deux heures et deuxième revenu à 610 °C pendant deux heures) après le préchauffage initial et la trempe.

Le type de fracture et le schéma de propagation de la fracture sont intergranulaires dans tous les groupes. Comme l'historique de chargement de la pièce n'a pas changé, la fréquence de chargement n'a pas changé et les phases n'ont pas été soumises à une répétition de charge. Par conséquent, aucune ligne de fatigue n'a été observée sur les surfaces de rupture. Sur la surface de fracture du groupe O (sans traitement thermique), des lignes de marche se sont formées en raison du fait qu'un grand nombre de fissures se confondent pour former un seul front fissuré. La zone résultant de la progression de la fissure de fatigue est macroscopiquement plane et plus claire.

# **Références Bibliographiques**



## Références bibliographiques

- [1] Ref : A Brief History of Iron and Steel Production by Joseph Spoer.
- [2] Ref: the drama of steel amirecan educated documentary Charlie dean archives.
- [3] Ref : S T E E L S Processing, Structure, and Performance by George Krauss.
- [4] G. Murry, « Aide-mémoire Métallurgie 2eédition Métaux, Dunod », Paris, 2004, 2010.
- [5] Ref G.A. Roberts and R.A. Cary, Tool Steels, 4th ed., American Society for Metals, 1980
- [6] Ref Introduction to Steels Processing, Properties, and Applications P. C. Angelo B. Ravisankar
- [7] Ref. <https://www.technologuepro.com/cours-materiaux-metalliques/chapitre-3-etude-dudiagramme->
- [8] Ref A. ARFAOUI, A. CHAKER ; Matériaux métalliques isetkasserine ; Année 2009/2010.
- [9] Ref1 : J.C. Outeiro, in Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques, 2020
- [10] Ref 2 [Https:/ www.sciencedirect.com / traitement-thermique-acier-h13](https://www.sciencedirect.com/traitement-thermique-acier-h13)
- [11] Ref 3 AZO materials /article ID=9107
- [12] Ref Translated from Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov, No. 8, pp. 46 – 48, August, 2010.
- [13] Ref The Effect of Heat Treatments on the Fatigue Strength of H13 Hot Work Tool Steel.
- [14] Ref ZHANG, LL, LEI, LP, ZENG, P, Investigation of the Influence of Deep Rolling on the Thermal Fatigue Cracking for AISI H13 Steel, Frontiers of Mechanical Engineering and Materials Engineering II, PTS 1 and 2, 2014, 457-458, 127-130.
- [15] Ref ELLIZZARI M, MOLINARI A, STRAFFELINI G, Thermal fatigue resistance of plasma duplex-treated tool steel. Surface and Coating Technology, 2001, 142-144, 1109-1115.
- [16] Ref YJ SHI Y J, XA WU X A, JW LI J W, et al, Tempering stability of Fe-Cr-Mo-W-V hot forging die steels, International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2017, 24, 1145-1157

- [17] Ref GEORGE K, Steels: Heat treatment and processing principles". Published by ASM International, Materials Park, OHIO 44073
- [18] Ref QI-C, JIANG X, MIN Z.F, et al, The Relationship Between Oxidation and Thermal Fatigue of Martensitic Hot-Work Die Steels, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2018., 1.31, 692-698
- [19] Ref LIN M, ZHAO X, HAN L, et al, Microstructural Evolution and Carbide Precipitation in a Heat-Treated H13 Hot Work Mold Steel. Metallography, Microstructure and Analysis, 2016.
- [20] Ref SMITH W, Structure and Properties of Engineering Alloys, second ed., McGraw-Hill, New York, 1993.
- [21] M. Pérez, F.J. Belzunce, The effect of deep cryogenic treatments on the mechanical properties of an AISI H13 steel. Materials Science & Engineering, p. 32–40, 2015.
- [22] R. Wawszczak, A. Baczmański, M. Marciszko, M. Wróbel, T. Czeppe, K. Sztwiertnia, C. Braham, K. Berent, Evolution of microstructure and residual stress during annealing of austenitic and ferritic steels. Materials Characterization, vol. 112, p. 238–251, 2016.
- [23] A. Zouaghi, V. Velay, A. Soveja, R. Chieragatti, F. Rezai-Aria, Une étude multi-échelle du comportement en surface de l'acier X38CrMoV5 : approche numérique et expérimentale. 21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013, Bordeaux, France.
- [24] A. Zouaghi, V. Velay, A. Soveja, R. Chieragatti, F. Rezai-Aria, A numerical investigation on the heterogeneous and anisotropic mechanical behaviour of AISI H11 steel using various stress-strain formulations: a multi-scale approach. 11th World Congress on Computational Mechanics, 2014.
- [25] P. Lipinski, M. Berveiller. Int. J. Plast., Vol. 5, p. 149-172, 1989
- [26] V. Hounkpati, Analyse multi-échelle du comportement mécanique de matériaux métalliques biphasés, Thèse de doctorat en génie mécanique, 2015.

