

Chapitre 6 :**Traitements Thermiques et thermochimiques**

- **Objectifs spécifiques :**
 - Connaitre les types des traitements thermiques
 - Identifier les phénomènes microstructurales dues aux traitements thermiques

- **Pré-requis :**

Niveau BAC, notions élémentaires de chimie, diagramme d'équilibre, diagramme Fer-Carbone

- **Eléments de contenus :**
 1. *Trempe*
 2. *Revenu*
 3. *Recuit*

CHAPITRE6

Traitements Thermiques et thermochimiques**I- Introduction :**

Les traitements thermiques ont pour but d'améliorer les performances des caractéristiques mécaniques. Les principaux traitements thermiques sont:

La Trempe

Le Revenu

Le Recuit

II- La Trempe**II-1- Trempe de masse.**

1-1-1- But : La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté par transformation de **l'austénite** en martensite.

1-1-2- Principe : Une trempe se compose de trois phases principales :

a- Chauffage : destiné à amener l'acier à l'état austénitique.

i. Acier hypoeutectoïde (de 0 à 0,85% de carbone)

Température de chauffage (**Ac3** + 50°C). La ligne Ac3 va de 721°C à 906°C, le chauffage d'un acier hypoeutectoïde dépend donc de sa teneur en carbone.

ii. Acier **eutectoïde** (0,85 % de carbone)

Température de chauffage (**Ac1** + 50°C) soit environ 780°C.

iii. Acier hypereutectoïde (de 0,85 à 1,7% de carbone)

Température de chauffage (Ac1 + 50°C) soit environ 780°C.

b- Maintien à température d'austénisation. Dépend :

iv. Des dimensions et des formes de la pièce.

v. Des types d'aciers, 15 min pour les aciers ordinaires, 30 min pour les aciers alliés, en particulier pour ceux contenant des carbures.

c- Refroidissement (air, eau ou huile) : C'est lui qui conditionne la structure finale. De lui dépend l'apparition de nouveaux constituants tels que : (dans l'ordre croissant de dureté) troostite, bainite, martensite.

d- Fluide de trempe

La trempe s'effectue par immersion dans l'eau, par pulvérisation d'eau ou par soufflage d'air. Le fluide le plus utilisé est l'**eau** froide ($T < 40^{\circ}\text{C}$). Dans certains cas, l'eau froide génère un refroidissement trop rapide (exemple : pièces de formes compliquées) et génère des contraintes internes préjudiciables à l'utilisation de la pièce (déformations, risque de **corrosion sous contrainte** ou même rupture de la pièce si les contraintes sont trop élevées). Dans ce cas, on peut utiliser de l'eau chaude ($T > 50^{\circ}\text{C}$) ou de l'**huile**. Dans certains cas assez rares, il est possible d'utiliser d'autres fluides comme des liquides à base de **glycol** pour minimiser la formation des contraintes internes. Il est possible également de relaxer les contraintes en effectuant un travail à froid immédiatement après la trempe (sur *trempe fraîche*). On peut ainsi étirer la pièce ou la comprimer.

Pour éviter la formation d'un film de vapeur d'eau autour de la pièce (phénomène de caléfaction) on peut revêtir la pièce d'un revêtement. Cette opération s'appelle le potéyage

II-2- Trempe superficielle ou localisée.

1-2-1- But : C'est obtenir une grande dureté en surface tout en conservant un bon allongement dans la zone sous-jacente jusqu'au centre de la section.

1-2-2- Principe : Elle consiste à chauffer (ou par induction ou à la flamme) localement la surface d'une pièce en acier jusqu'à la température d'austénisation, à la refroidir ensuite à une vitesse suffisante. Le refroidissement s'effectue le plus souvent par jet d'eau sous pression.

1-2-3- Matériaux utilisés : Aciers ordinaires du type C42 ou faiblement alliés.

III- Le REVENU

III-1. Principe et But de Revenu :

La trempe anisotherme est en général un traitement énergétique conduisant à un métal à R_m , R_e , H élevées du fait de la présence recherchée de martensite, mais dont la ductilité ($A\%$) et la résilience (K) sont très faibles pour la même raison. Si on tient compte également d'un niveau de contraintes propres souvent important, il est évident qu'un acier ne peut être utilisé en service directement à l'état trempé.

L'opération de revenu est destinée à corriger plus ou moins complètement ces inconvénients. Elle conduit à un métal de caractéristiques convenables présentant un compromis satisfaisant entre R_m , R_e , d'une part et $A\%$, K d'autre part. Contrairement à la trempe qui est une opération rapide et de contrôle difficile, le revenu permet un contrôle aisé des transformations et des propriétés du métal.

Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe en continu, il consiste en :

- Un réchauffage à une température $T_R < A_{c1}$,
- Un maintien de durée t_R à T_R ?
- Un refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement.

Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physico-chimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. Le choix de T_R et t_R permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre.

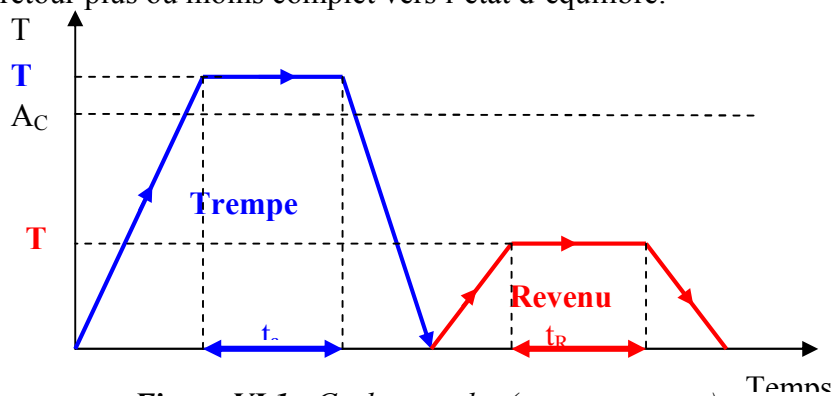


Figure VI.1 : Cycle complet (trempe, revenu)

III-2. DIFFERENTS TYPES DE REVENU :

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

- ✓ Revenu de relaxation ou de détente,
- ✓ Revenu de structure ou classique,
- ✓ Revenu de durcissement.

III-2.1. Revenu de relaxation ou de détente :

Il s'effectue entre 180°C et 220°C -250°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 → 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...

III-2.2. Revenu de structure ou classique :

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et A_{c1} . On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, R_m et R_e . Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

III-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).

III-3. EVOLUTION DES PROPRIETES AU COURS DE REVENU :

Les modifications structurales au cours de revenu ont des conséquences importantes sur les propriétés mécaniques. La variété des structures obtenues explique que le revenu constitue un moyen efficace et très souple pour obtenir un ensemble de propriétés ajustées aux exigences de fonctionnement et il faut envisager des interférences possibles pour expliquer finalement les variations des propriétés obtenues.

Les propriétés des aciers sont sensibles au revenu par l'influence de deux principaux facteurs : le premier est intrinsèque aux aciers et le deuxième leur est extrinsèque.

III-3.1. Influence de la composition chimique de l'acier :

La composition chimique de l'acier est un facteur intrinsèque qui doit être connu avec une très grande précision pour pouvoir prédire et prévoir son comportement sous l'effet de revenu.

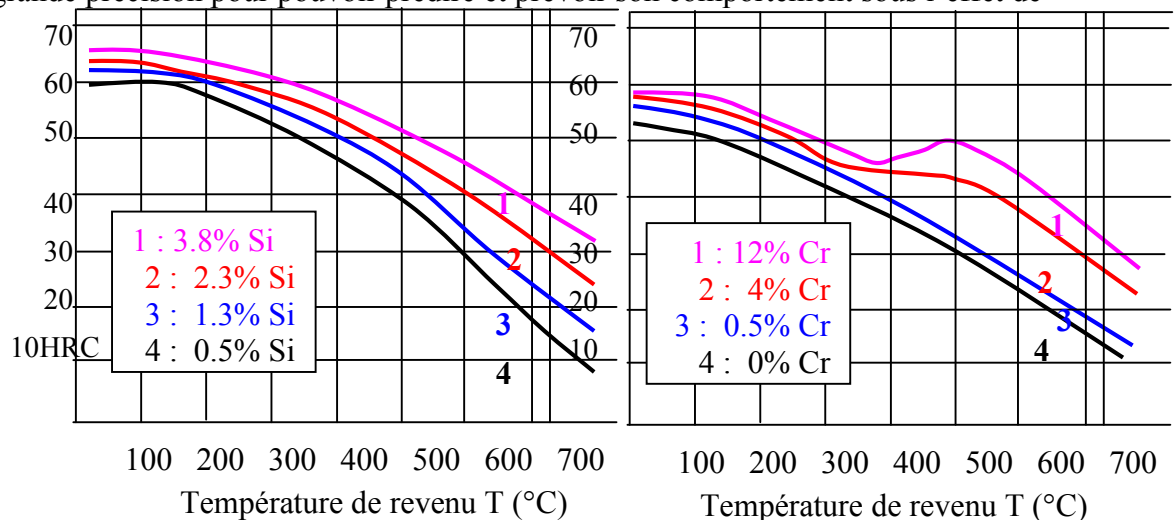


Figure VI.2 : Influence de la teneur en éléments d'alliages sur la dureté des aciers à 0.35%C avec la température de revenu.

III-3.2. Influence de la température et du temps de revenu :

La température de revenu n'est pas la seule responsable de la diminution de la dureté. Elle se trouve justement soutenue par le temps de maintien. La figure (VI.3) montre l'effet de ce facteur sur la dureté de l'acier eutectoïde (0.8% de carbone) revenu à plusieurs températures. Pour chaque température, la courbe caractéristique est marquée par une baisse notable de la dureté pendant quelques minutes suivie ensuite d'une diminution progressive mais très lente.

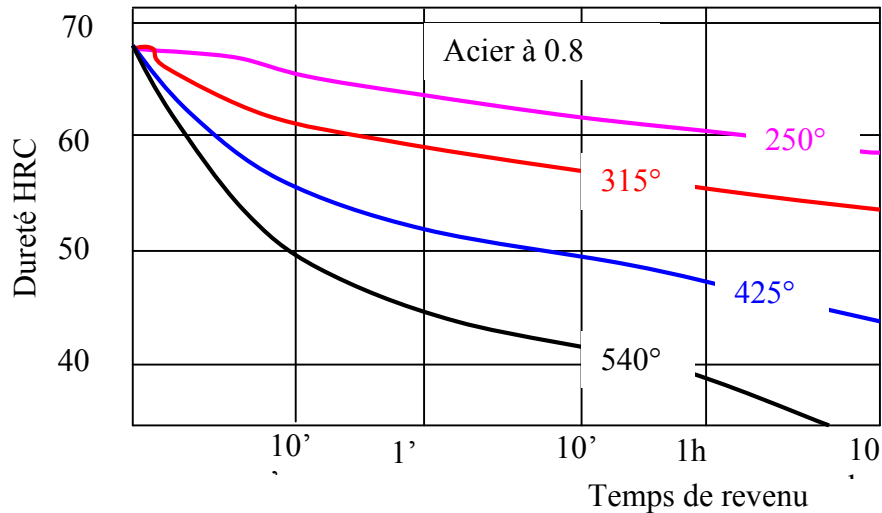


Figure VI.3 : Variation de la dureté en fonction du temps de maintien pour quatre températures de revenu de l'acier à 0.8%C.

III-4-Comportement des caractéristiques mécaniques après traitement thermique :

Il s'avère donc que le revenu est un traitement qui a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. La variation de ces dernières présente une allure qui se répète dans toutes nuances d'aciers (figure VI.4)

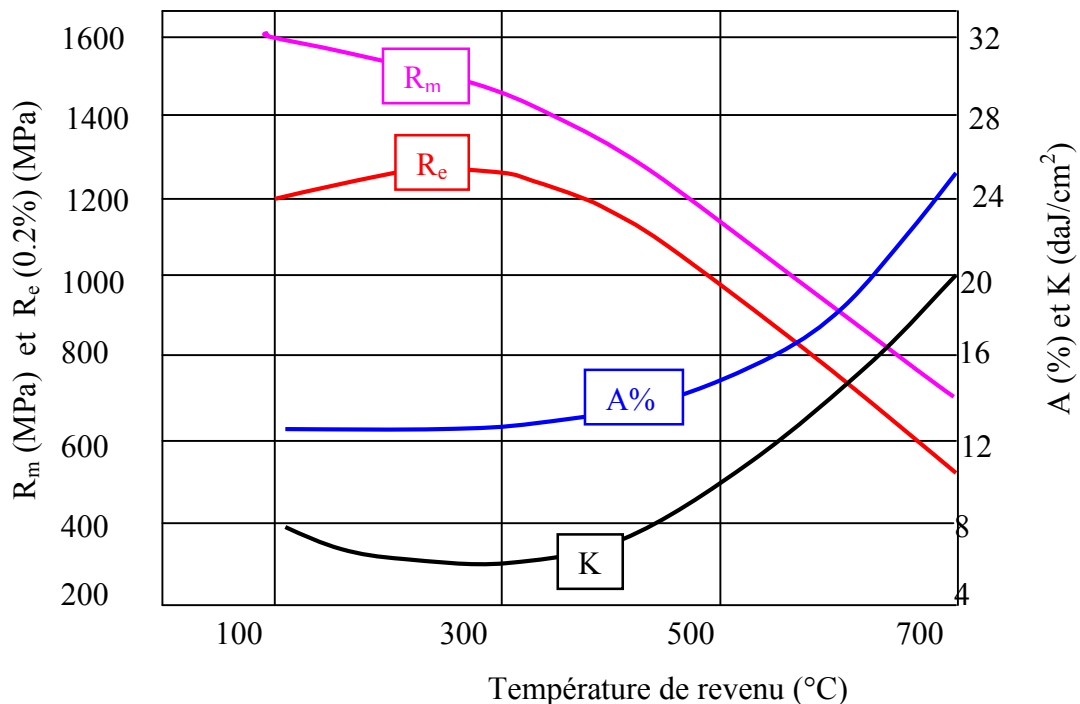


Figure VI.4 : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu de l'acier 25CrMo4.

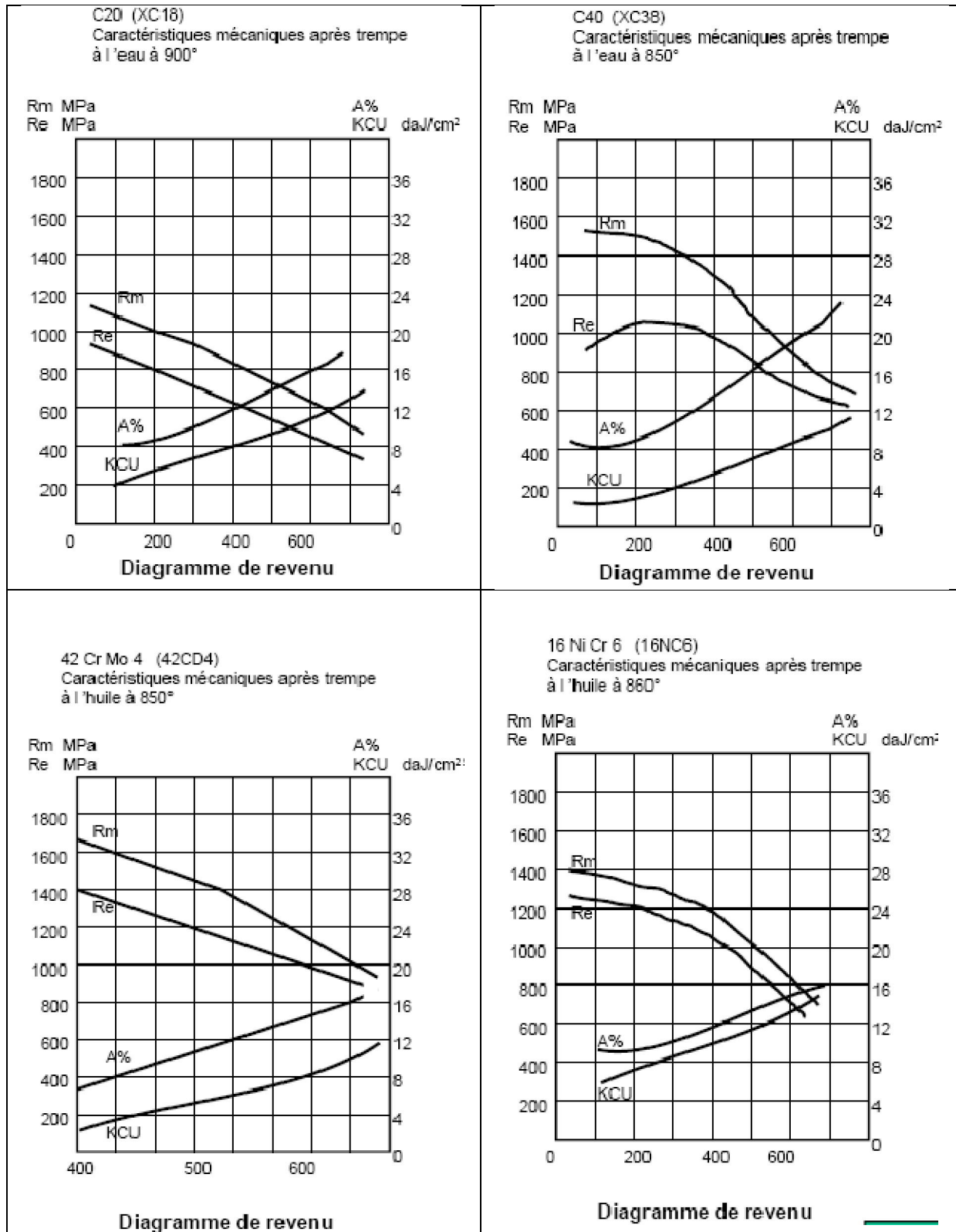


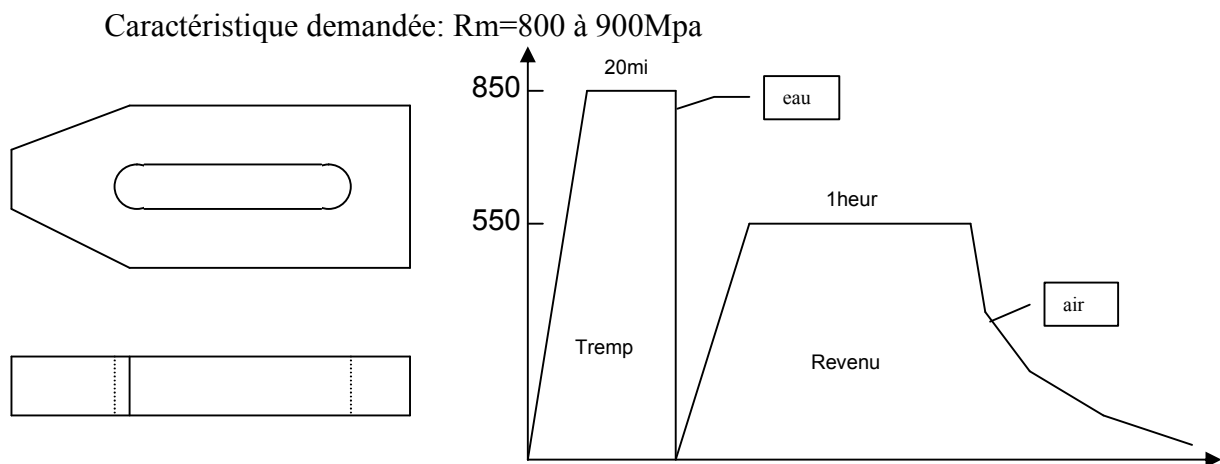
Figure VI.5 : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu de quelques métaux

III-5-EN résumée :

le revenu est un cycle thermique que subit la pièce, consistant en un chauffage entre 200° et 600°, puis d'un maintien à température suivi d'un refroidissement lent.

- a) -chauffage à 200° mini pour éliminer les **tensions internes** dues au refroidissement brutal de la périphérie de la pièce sur le cœur dilaté. La contraction brutale de la périphérie, lors de la trempe, engendre des tensions entre le cœur et la périphérie.
- entre 200° et 600° pour rechercher une valeur de caractéristique mécanique précise.
- b) - maintien à température pendant une heure mini pour permettre l'élimination des tensions dans toute la masse.
- c) - refroidissement lent pour éviter la formation de nouvelles contraintes ou tensions internes.

Exemple de Traitement Thermique pour une bride en C40 de longueur =120mm, et d'épaisseur =20mm.



Commentaires: Trempe

- a) chauffage à 850° pour mettre l'acier dans le réseau cristallin cubique à face centrée correspondant au Fer γ
- b) maintien pendant 20 minutes à 850° pour dissoudre les carbures dans toute la masse de la pièce. Les atomes de carbone de carbure se dissocient et s'insèrent au centre des mailles du réseau du Fer γ .

c) refroidissement rapide en plongeant la pièce dans un bac d'eau. Le réseau cristallin (Fer γ) revient en Fer α de manière quasi instantané tout en gardant les atomes de carbone en solution forcée dans ce Fer α . Ce nouveau constituant est appelé: MARTENSITE.

Revenu

- a) chauffage à 550° pour atteindre la température permettant l'obtention des 800 à 900 Mpa.
- b) maintien pendant 1 h à 550° pour libérer toutes les tensions et garantir que la dureté à cœur soit la même que celle en surface
- c) refroidissement lent pour éviter la formation de nouvelles contraintes.

III-6. APPLICATION :

Soit l'acier à 0.8%C dont la courbe de dureté en fonction des paramètres de revenu (temps et température) est donnée dans la figure VII.3.

1- Etant donné le temps de revenu t_r égal à 1 heure, déterminer les duretés respectives pour les températures de revenu 250, 315, 425 et 540. Conclure.

2- Dans un milieu de température 300°C , peut on utiliser cet acier pendant 8h tout en gardant une dureté supérieure ou égale 50HRC. Expliquer.

IV- Le Recuit :

IV-1- But :

Le but est de mettre l'acier dans une certaine structure pour permettre l'usinage ou la mise en forme par déformation plastique ou de régénérer la structure.

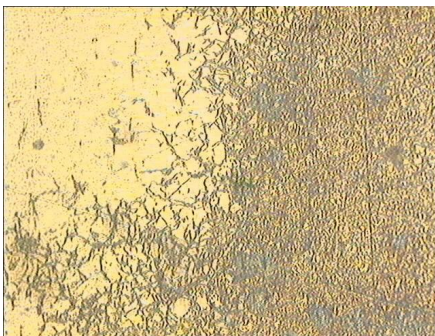
IV-2- Principe :

Cycle thermique que subit la pièce, consistant en un chauffage entre 700° et 1000°, puis d'un maintien à température suivi d'un refroidissement lent.

Exemple de structures observées au microscope avec un grossissement de: x 500 sur un acier C40 contenant 0,40% de Carbone.



Etat Recuit : on distingue des grains sombres constitués de « PERLITE » et des grains clairs constitués de



Etat Trempé : on distingue des aiguilles noires sur un fond clair caractérisant la « MARTENSITE »

Dans la pratique industrielle, un recuit se définit essentiellement par deux points principaux :

- La température de chauffage.
- La durée du traitement.

En fait il ne faut pas négliger deux autres éléments d'importance qui sont :

- La vitesse de chauffage.
- La vitesse de refroidissement.

Avec toutes les précautions que ces deux facteurs englobent, en particulier lors du passage des points de transformation eutectoïdes qui doivent être l'objet de soins attentifs.

Le recuit est un traitement thermique appliqué pour obtenir un état d'équilibre thermodynamique. Son cycle comprend les opérations suivantes :

- Chauffage à vitesse contrôlée jusqu'à une température dite de recuit (T_{Rc}), variable selon la nature du recuit.
- Maintien isotherme contrôlé à cette température. Ce temps varie selon les traitements antérieurs, le volume de la pièce et enfin des effets à réaliser.
- Refroidissement obligatoirement lent à l'air calme ou au four selon une loi programmée.

Le recuit produit certains effets qui conditionnent l'acier après traitement.

- Il élimine les effets de traitements antérieurs, soit de nature mécanique (tréfilage, laminage, forgeage...), soit de nature thermique (trempe). Autrement dit, il fait disparaître les états hors d'équilibre.
- Il confère aux matériaux un équilibre physico-chimique, mécanique et structural de par le refroidissement lent. Ainsi, la structure obtenue est celle portée sur les diagrammes d'équilibre à la température ambiante.
- Il confère également aux matériaux de meilleures caractéristiques de ductilité, c'est à dire il augmente au maximum les valeurs de résilience (K) (résistance au choc), l'allongement pourcent (A%) et la striction (Z), et en contre partie il diminue au minimum de leurs valeurs la résistance à la rupture (Rr), la limite élastique (Re), la dureté (H).

Il existe une classification technique des différents recuits, en fonction des objectifs visés, mais il convient de reconnaître que le gradient de température utilisé gravite autour des lignes A1 et A3 du diagramme ci-dessous, il faut convenir également qu'un certain recuit peut remédier à plusieurs défauts à la fois, donc englober plusieurs objectifs.

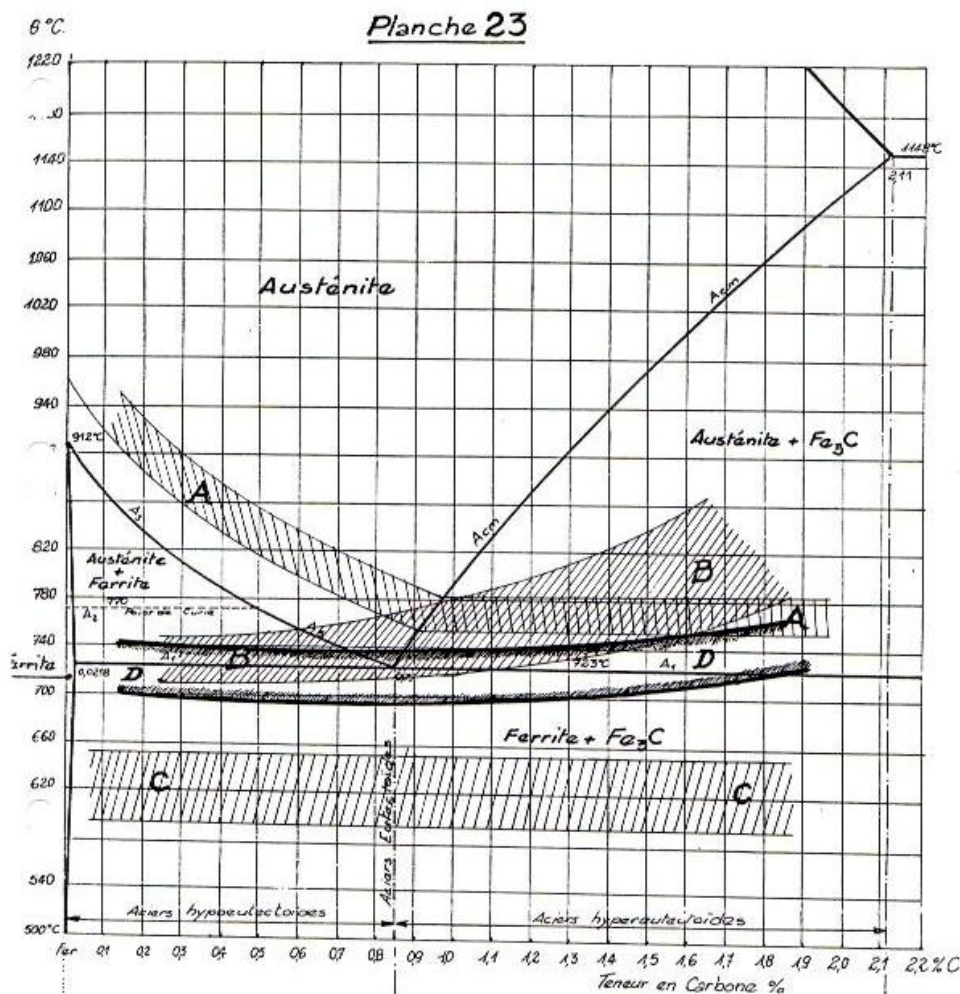


fig 67: Zones des températures les plus favorables pour les différents recuits

- A** : Recuits de normalisation et de recristallisation
- B** : Recuits d'adoucissement
- C** : Recuits de détente
- D** : Recuits d'homogénéisation ou de diffusion

IV-3- Différents types de recuit :

En pratique, on distingue quatre types élémentaires de recuits :

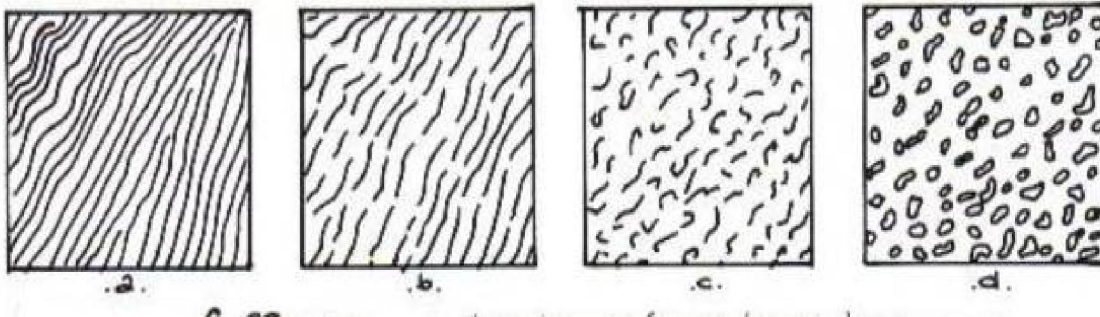
- Le recuit d'adoucissement
- Le recuit de normalisation
- Le recuit de détente
- Le recuit de diffusion.

Il existe des nuances même de ces types de recuits, ce qui fait que l'on rencontrera d'autres dénominations. Ces quatre familles étant déterminées en fonction des bandes de températures qu'elles recouvrent sur le diagramme d'équilibre (voir graphique ci-dessus).

A) Le recuit d'adoucissement :

Ce recuit s'effectue soit sur des pièces trempées pour faciliter leur usinage (chauffage à $A1+80$) avec maintien 15 à 20 minutes, le refroidissement intervenant lentement à l'air (ou au four), c'est le recuit intégral, généralement, si poussé assez loin, ce recuit entraîne le retour à la structure d'origine.

Une deuxième variante de ce recuit se nomme « recuit de coalescence » conduisant à la structure globulaire des carbures dans une matrice ferritique (voir ci-dessous).



Ce recuit d'adoucissement par coalescence de la perlite donne un acier présentant une meilleure aptitude à la déformation par pliage, laminage à froid, estampage, et dans le cas des aciers à plus de 0.5% de carbone la meilleure usinabilité à la scie, à la fraise, au tour,.. Pour les aciers à plus faible teneur en carbone, le recuit est défavorable à ce genre d'usinage, parce que les copeaux se détachent mal, ce qui donne des surfaces usinées rugueuses, il est préférable de conserver une structure perlitique normale (lamellaire) pour ces aciers

Cette structure n'est pas souhaitable avant trempe, car elle retarde la mise en solution de la cémentite dans l'austénite.

B) Recuit de normalisation :

Le recuit de normalisation a pour but d'obtenir un état de référence pour l'acier avec une structure à grains fins et des propriétés mécaniques aussi intéressante que possible pour les applications les plus courantes.

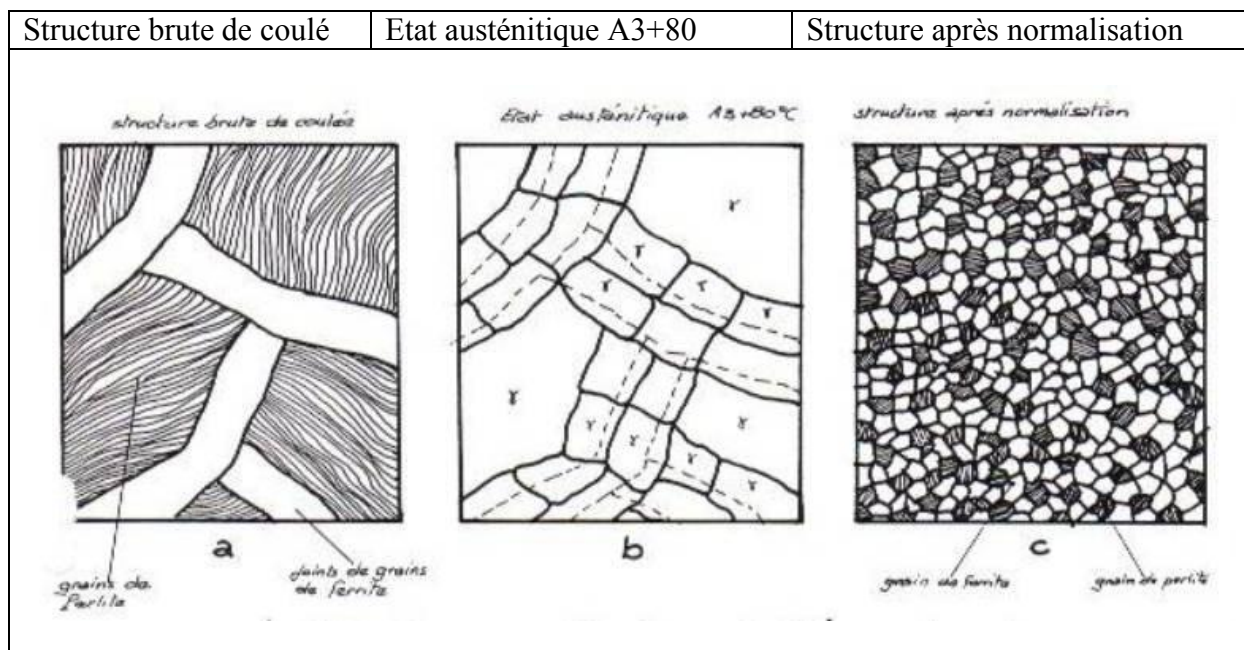
Ce traitement consiste à réaliser les opérations suivantes :

- Chauffage à vitesse contrôlée mais la plus économique possible jusqu'à une température juste au début du domaine austénitique soit $A_{C3}+50^\circ$ pour les aciers hypoeutectoides et $A_{Cm}+50^\circ$ pour les aciers hypereutectoides.

- ❑ Maintien isotherme à cette température pendant une durée relativement courte fonction des dimensions de la pièce.
- ❑ Refroidissement en général à l'air calme.

Ce type de recuit est utilisé principalement pour les aciers eutectoïdes et hypoeutectoïdes. Il consiste en un chauffage au-dessus de A_3 suivi d'un refroidissement à vitesse bien définie.

Ce recuit (appelé également perlitisation) a pour objectif de produire une structure perlitique à grains fins régulièrement repartis, ce qui, pour un acier perlitique, correspond aux propriétés mécaniques optimales. Par cette opération, on élimine les hétérogénéités mécaniques et cristallographiques provenant des structures brutes de coulée très grossières ou éventuellement de laminage (Voir ci-dessous).



La normalisation comprend en fait deux recristallisations :

- Transformation de la ferrite et de la perlite en austénite.
- Puis transformation, avec une répartition différente de l'austénite en perlite et ferrite. Chaque transformation entraînant une recristallisation et un affinage du grain.

Les deux allures : chauffe et refroidissement, additionnant leur effet d'affinage. Ce processus produit un nombre accru de petits grains de ferrite et de perlite.

L'affinage du grain dépend dans une large mesure des vitesses de chauffe et de refroidissement. Il ne faut pas non plus maintenir trop longtemps les pièces au-dessus de A_3 , ni dépasser beaucoup A_3 , cette situation entraînant dans les deux cas un gonflement du grain d'austénite, ce qui est l'opposé du but recherché.

Les vitesses de chauffage et de refroidissement sont importantes, plus elles sont grandes, plus le grain est fin.

C) Le recuit de détente :

on peut considérer le recuit de détente comme un revenu à hautes températures, en effet tous les traitements de ce groupe sont effectués à des températures inférieures à A_1 . Ils ont surtout pour but de supprimer les contraintes internes provenant de la solidification des

pièces du refroidissement, des déformations à froid, de la mécano-soudure, et également de certains traitements thermiques.

Ces types de recuits ne sont pas uniquement destinés à l'acier mais aussi pour les fontes moulées en particulier.

Les températures sont très variables selon la nature de l'état d'origine de même que les temps de maintien. Les contraintes sont décroissantes du temps et de la température et ne disparaissent entièrement qu'au moment où la pièce atteint la température de recristallisation de la ferrite.

Cette opération visant à supprimer les contraintes résiduelles est également nommée relaxation. Ce recuit peut être effectué en plusieurs phases alternées avec des opérations d'usinage.

On distingue ici :

C-1- Recuit de régénération :

Le maintien prolongé aux hautes températures du domaine γ provoque une surchauffe de l'acier. Ce phénomène est observé dans un certain nombre de cas notamment après recuit d'homogénéisation, après cémentation, après forgeage à chaud, après soudage dans les zones affectées thermiquement (ZAT).

Ce problème est corrigé par un nouveau traitement destiné à affiner les grains γ . Il s'agit du recuit de régénération qui regroupe les conditions suivantes :

- ❑ Chauffage à une vitesse convenable jusqu'à une température légèrement supérieure à A_{C3} pour les aciers hypoeutectoides et légèrement supérieure à A_{C1} pour les hypereutectoides.
- ❑ Maintien isotherme à cette température pendant une durée relativement courte (15 à 30 mn) fonction des dimensions de la pièce.
- ❑ Refroidissement à vitesse légèrement inférieure à V_{CRc} pour récupérer une structure ferrito-perlitique fine. La vitesse de refroidissement ne doit pas être faible au voisinage de A_{F1} pour éviter le grossissement des grains de la ferrite.

La régénération des grains améliore les propriétés de ductilité de l'acier.

C-2- Recuit de recristallisation :

Les pièces d'acier déformées par des traitements mécaniques de formage à chaud ou encore à froid (laminage, tréfilage, ...) concèdent des taux d'écrouissage assez importants. Le réseau cristallin est distordu (déformé) et les grains sont écrasés et orientés suivant le sens de la déformation (figure II.1). Elles ne peuvent plus subir de nouveau de traitements mécaniques de mise en forme, sinon elles éclatent.

L'élimination de cet état hors d'équilibre est réalisée en effet par le traitement de recuit de recristallisation permettant de régénérer la forme et les dimensions de ses grains ce qui remet de nouveau l'état d'équilibre.

Ce type de traitement demande à réaliser les opérations suivantes :

- ❑ Chauffage à vitesse la plus économique possible jusqu'à une température située entre 500° et 700°C en général sous atmosphère contrôlée pour éviter l'oxydation.
- ❑ Maintien isotherme à cette température pendant une durée généralement longue (48 heures par exemple).
- ❑ Refroidissement lent.

D) Recuit d'homogénéisation ou de diffusion :

Les pièces coulées en acier sont soumises en général à une vitesse de refroidissement relativement rapide. Elle conduit en effet à une hétérogénéité chimique, où les éléments d'alliages ne sont pas répartis d'une façon régulière dans la structure. On est donc en présence du phénomène de ségrégation qui peut avoir une incidence négative sur les propriétés des aciers.

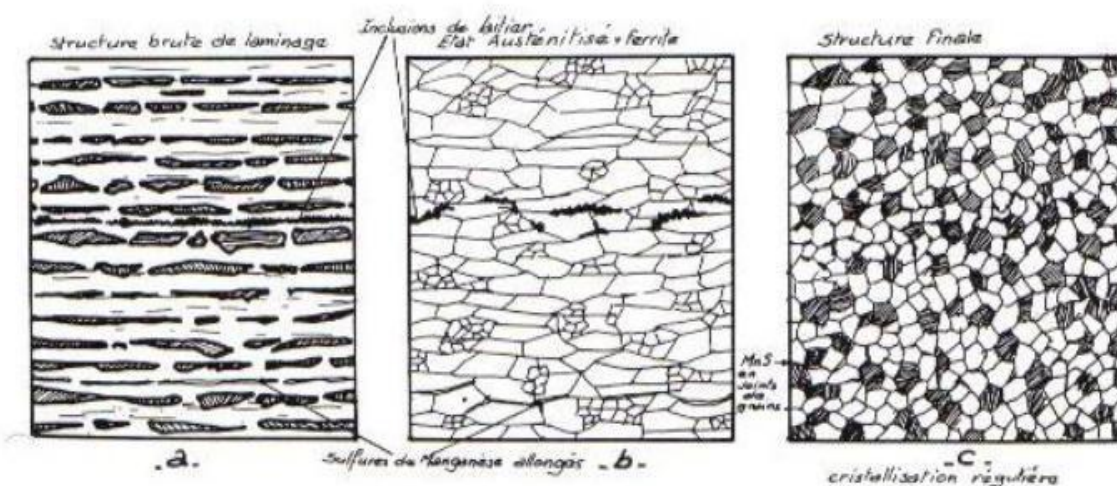
Le recuit d'homogénéisation est appliqué pour remédier à ce phénomène d'hétérogénéité. Il est caractérisé essentiellement par une diffusion accélérée des éléments dans la structure utilisant notamment une température élevée durant un temps prolongé. Il consiste en pratique aux opérations suivantes :

- ❖ Chauffage de la pièce avec une vitesse qui doit respecter l'état de l'acier (sa composition chimique, sa conductibilité thermique, sa forme et ses dimensions). La température du traitement doit être de son côté suffisamment élevée du domaine austénitique pour accélérer le processus de diffusion des éléments dans la structure de l'austénite. Elle est fixée à $(A_{C3} + 200^\circ)$ et $A_{Cm} + 200^\circ)$ respectivement pour les aciers hypoeutectoides et les aciers hypereutectoides.
- ❖ Maintien prolongé à cette température. Le temps est calculé à l'aide des lois de la diffusion selon la nature des éléments d'alliages et les dimensions de la pièce.
- ❖ Refroidissement à vitesse lente.

À la suite de ce traitement, l'acier devient homogène mais surchauffé. Son état demande une régénération de la taille de ses grains.

On l'applique également sur des aciers laminés à chaud afin de neutraliser simultanément les hétérogénéités chimiques et mécaniques souvent, dans ce cas, le traitement se prolonge par une recristallisation provenant du maintien prolongé à températures élevées.

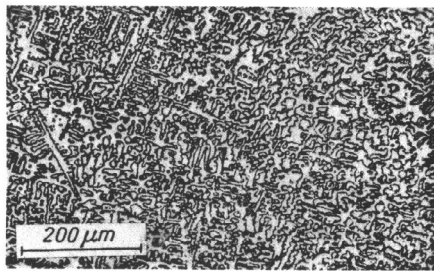
Une variante appliquant le même principe de diffusion, est le recuit de cémentation. Bien que l'aboutissement de la cémentation soit un phénomène de durcissement, la première phase de l'opération se fait dans les conditions de recuit sur le plan températures avec en plus la présence d'un milieu recarburant.



IV-4. APPLICATIONS :

A/ On se propose d'effectuer un recuit d'homogénéisation pour un acier C48. La figure I.3 montre la micrographie de cet acier pour différentes températures de recuit

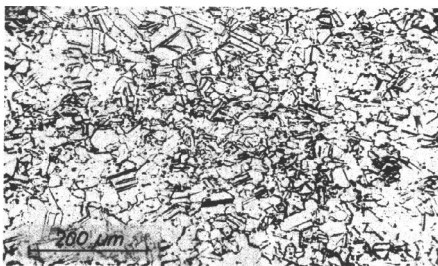
- 1- Calculer la composition de phase de cet acier à la température ambiante.
- 2- Tracer la courbe de refroidissement de cet acier.
- 3- Discuter ces résultats de micrographie.
- 4- Parmi ces différentes températures, quelle est la valeur adéquate pour le recuit d'homogénéisation.
- 5- Citer quelques cas dans lesquels on effectue ce type de recuit.
- 6- Quels sont les inconvénients et les avantages du recuit d'homogénéisation.
- 7- Comment remédier aux inconvénients du recuit d'homogénéisation.



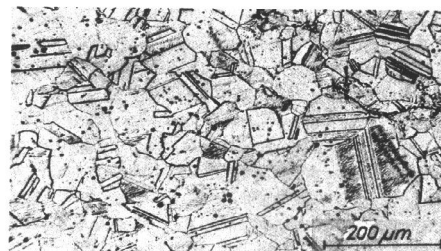
T recuit = 820 °C



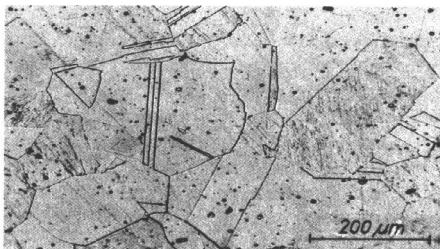
T recuit = 870 °C



T recuit = 920 °C



T recuit = 970 °C



T recuit = 1020°C

Figure I.3

B/ La figure I.4 montre la microstructure d'une pièce en acier **C48** suite à une opération de soudage.

- 1- Commenter les résultats au niveau de la microstructure du produit après soudage.
- 2- Décrire, en détail, l'influence du changement de la microstructure sur les caractéristiques mécaniques des aciers.
- 3- Proposer un traitement de correction de ce problème (donner les étapes et les paramètres).
- 4- Donner des autres traitements mécaniques ou thermiques dans lesquels se figure la même problématique.

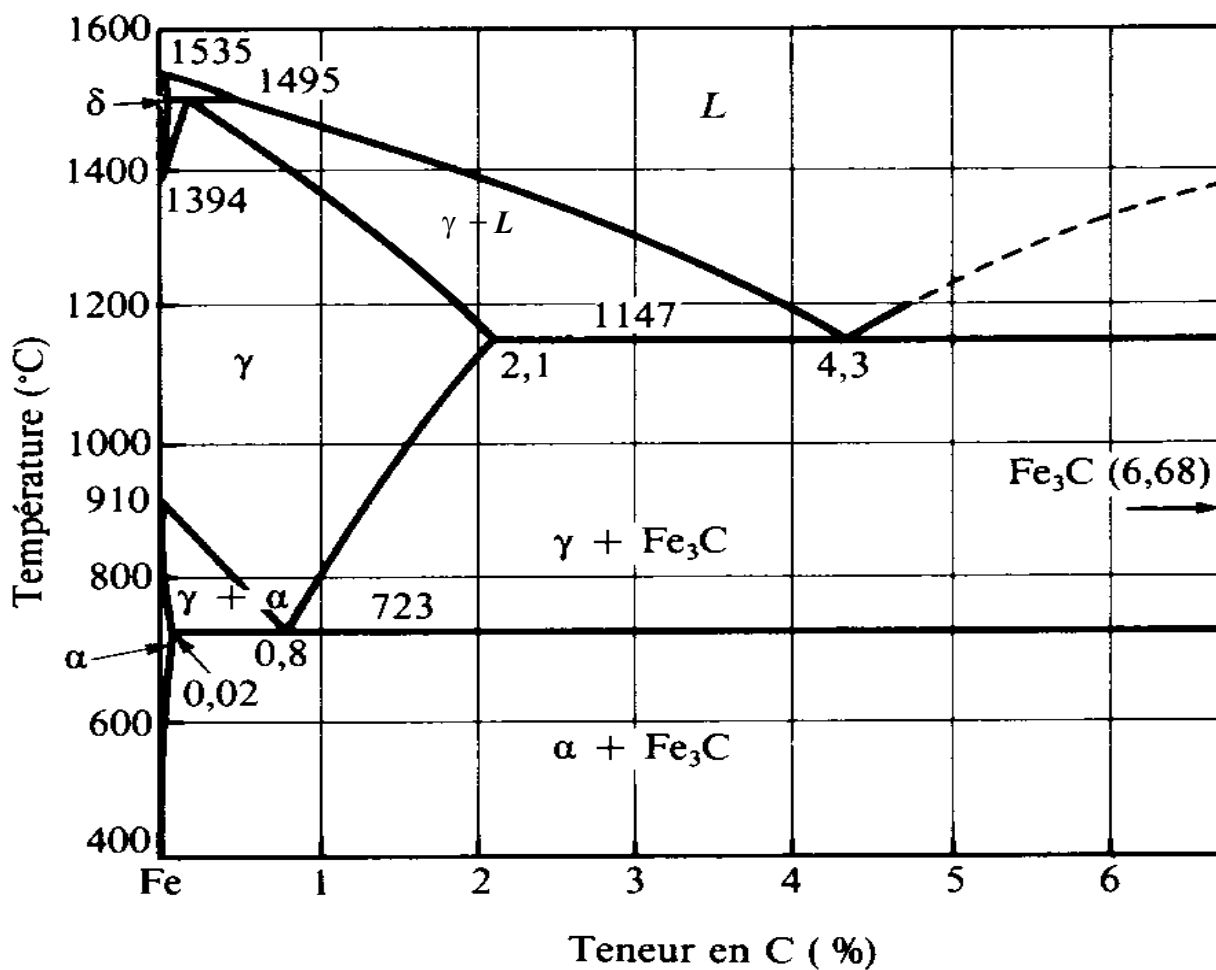
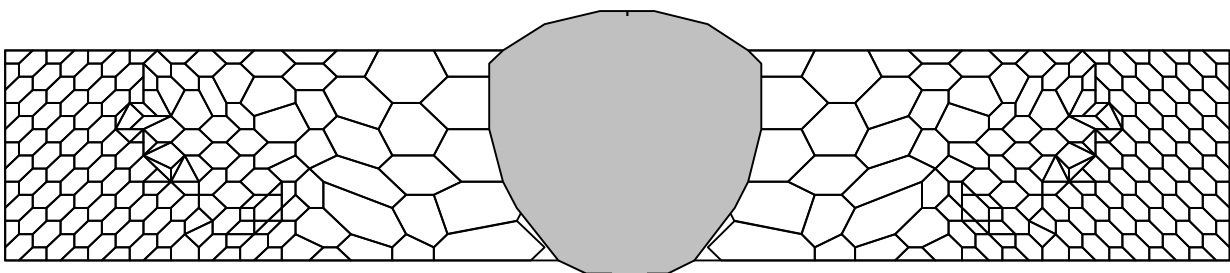


Figure I.5 : Diagramme d'équilibre métastable Fer-Cémentite.