
Université ABBES LAGHROUR Khenchela



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



Mémoire

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

Spécialité : Génie Mécanique
Option : Génie des Matériaux

Thème

Etude expérimentale de l'effet de
trempabilité après un traitement de
cémentation de l'acier 90 MnCrW4

Réalisé par :

- LOUAFI Mohamed Salah
- HOGGAS Rafik

Encadreur : Dr. SAOUDI Abdenour

Membres de jury

- Dr. ALLAOUI Abdelhalim
- Dr. CHERMIME Brahim

Année universitaire : 2020-2021

Remerciements

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

Nous exprimons notre gratitude à notre encadreur Mr. SAOUDI.A pour sa disponibilité, ses conseils et son aide pour accomplir ce travail.

Nous remercierons également Dr. ALLAOU Abdelhalim pour m'avoir fait l'honneur d'être le président du jury, ainsi que Dr. CHERMIME Brahim pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour avoir accepté de l'examiner.

Nous remercierons aussi toutes mes amies de spécialités « Génie mécanique productique spécialisé ». Et tous nos enseignants du département de Génie Mécanique qui m'ont encouragé à donner le meilleur de nous-même en assurer une formation aussi meilleure que possible.

Sans oublier tout le personnel de L'unité ECMK, pour leurs Coopérations et leurs gentillesse.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents de toujours marcher à mes côtés, de m'encourager chaque jours, merci de m'aider, pour leurs sacrifices, leurs prières au long de ma vie.

Grand merci à ma femme Krikrou Imene qui mon aide dans cet effort et ma soutenu.

Merci à mes sœurs, Ikram, Soumia, Sara et ses enfants Ali et Arwa et mon frère Salime, pour leurs tendresses, les amours et soutien moral.

Merci à mes amis de mon group G.M.P Rafik, Mounire, Firese, Souhila, Saida et mes amis de l'université Amir, Akrem, Jalil.

Merci à mes collègues de travail walid, Djemai, Bachir, Yacine, Ibtissame, Amina et tous les gens qui travaille avec moi.

Med Salah

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents de toujours marcher à mes côtés, de m'encourager chaque jours, merci de m'aider, pour leurs sacrifices, leurs prières au long de ma vie.

Merci à mes frères et mes sœurs qui m'encouragent pour arriver à ce niveau.

Grand merci à Lilia qui mon aide dans cet effort et ma soutenu.

Merci à mes amis de mon group G.M.P Med Salah, Mounire, Firese,

Souhila, Saida et mes amis de l'université Amir, Akrem, Jalil.

Merci à mes amis Hichem, Islame et Yakoub.

Rafik

Résumé

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence du débit de cémentation sur la cinétique de diffusion du carbone à la surface de l'éprouvette de trempabilité de l'acier 90 MnCrW4, afin d'analyser les changements chimiques et structuraux de l'acier 90 MnCrW4 après la trempabilité. Nous avons réalisé une série d'essais physicochimique (dureté, structure) après cémentation pour les éprouvettes E₁ (en acier 90 MnCrW4 débit de cémentation C=0.5%), E₂ (en acier 90MnCrW4 débit de cémentation C=0.8%). Les résultats obtenus montrent qu'il existe une modification de la quantité des compositions chimiques dans la couche superficielle cémentée, ce qui permet de modifier les propriétés physicochimique de l'acier 90 MnCrW4 (la quantité du carbone et fer, la dureté HRC, la structure,...). Finalement, l'acier 90 MnCrW4 cémenté (C=0.5% ou C=0.8%) est résultant l'augmentation de la dureté et le pourcentage de carbone dans l'éprouvette de trempabilité par zone.

Abstract:

The objective of our work is to study the influence of the carburizing flow rate on the kinetics of carbon diffusion at the surface of the hardenability test piece of 90 MnCrW4 steel, in order to analyze the chemical and structural change of 90MnCrW4 steel after hardenability. we carried out a series of physicochemical tests (hardness, structure) after cementation for the E1 test specimens; (in steel 90 MnCrW4 cementation rate C=0.5%), E2(in steel 90 MnCrW4 cementation rate C=0.8%). The results obtained show that there is a modification of the quantity of chemical composition in the hardened surface layer, which makes it possible to modify the physicochemical properties of the 90 MnCrW4 steel (the amount of carbon and iron., the HRC hardness, the structure,). Finally, the hardened 90 MnCrW4 steel (C=0.5% or C=0.8%) results in the percentage of carbon in the hardenability test specimen test by zone.

ملخص

الهدف من عملنا هو دراسة تأثير معدل تدفق الكربون على سطح قطعة اختبار الصلابة من فولاد 90 MnCrW4 من اجل تحليل التغيرات الكيميائية والهيكلية لصلب 90 MnCrW4 بعد الصلابة. أجرينا سلسلة من الاختبارات الفيزيائية والكيميائية(الصلابة الهيكل) بعد تدعيم عينات اختبار E₁(في الصلب 90 MnCrW4 معدل التدعيم C=0.5%)، E₂(في الصلب 90 MnCrW4 معدل التدعيم C=0.8%) النتائج التي تم الحصول عليها تظهر أن هناك تعديل لكمية التركيبات الكيميائية في الطبقة السطحية المتصلبة، مما يجعل من الممكن تعديل الخصائص الفيزيائية والكيميائية لصلب 90 MnCrW4 (كمية الكربون والحديد، صلابة، HRC الهيكل،). أخيرا ينتج عن الفولاذ المقوى 90 MnCrW4 (C=0.5% أو C=0.8%) زيادة في الصلابة ونسبة الكربون في اختبار الصلابة حسب المنطقة.



Introduction
générale

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, l'acier est l'un des matériaux les plus utilisés dans les diverses activités industrielles, mais certains aciers présentent des propriétés chimico-physiques et mécaniques moins importantes. La couche superficielle est la zone d'un composant la plus exposée et sollicitée aux attaques chimiques, aux frottements et aux forces extérieures. L'utilité d'application des traitements thermiques sur les aciers reste limitée, car ce genre de traitement n'améliore pas suffisamment les propriétés superficielles (dureté, résistance à l'usure et au choc, fatigue, etc.) pour répondre aux exigences sévères des pièces en contact et en mouvement.

La cémentation est l'un des traitements les plus utilisés de la saturation de la surface de l'acier par la diffusion du carbone. Elle est utilisée afin d'améliorer les propriétés surfaciques. L'objectif de notre étude est de mettre en évidence l'effet de la vitesse de refroidissement (trempabilité) sur les propriétés obtenues après cémentation, nous avons réalisé une série des essais de Jominy sur deux éprouvettes E_1 et E_2 en acier 90 MnCrW4.

Notre mémoire se compose de trois chapitres :

- Le premier chapitre : présente une généralité sur les aciers en déterminant ses compositions chimiques, les microstructures et leurs propriétés mécaniques.
- Le deuxième chapitre : s'articule sur une étude théorique sur les traitements de surface, en particulièrement sur le durcissement superficiel par la cémentation en définissant les paramètres opératoires de ce traitement et leurs effets, et le principe de l'essai de Jominy (trempabilité).
- Le troisième chapitre : destiné à l'étude expérimentale en analysant l'influence du débit de carbone (CP) durant la cémentation sur la cinétique de croissance de la couche cémentée de l'acier 90 MnCrW4 dans les éprouvettes E_1 et E_2 . En outre, l'effet de la trempabilité sur la morphologie de différentes zones. Finalement, nous discutons les résultats obtenus.

An orange oval with a black outline, centered on a white background. Inside the oval, the text 'Chapitre I' and 'Généralité sur les aciers' is written in a black serif font.

Chapitre I

Généralité sur les aciers

Sommaire

Chapitre I : Généralité sur les aciers

I. 1. Introduction	4
I.2. Définition d'acier	4
I.3. Historique de l'acier	7
I. 4. Éléments d'alliage présents dans les aciers	8
I.4.1. Solubilité des éléments d'alliage	8
I.4.2. Influence des éléments d'alliage sur les structures d'équilibre	8
I.4.2.1. Les éléments alphagènes	8
a. Le chrome (Cr)	9
b. Le molybdène (Mo)	9
c. Le silicium (Si)	9
d. Le vanadium (V)	9
e. Le titane (Ti)	9
f. Le niobium (Nb)	10
I.4.2.2. Les éléments gammagènes	10
a. Le nickel (Ni)	10
b. Le manganèse (Mn)	10
c. Le carbone (C)	10
d. L'azote (N)	10
e. Le soufre (S)	11
f. Le cuivre (Cu)	11
I.4.3. Influence des éléments d'alliage sur les propriétés chimiques des aciers	12
I.5. Performances mécaniques des aciers	13

Sommaire

I.5. 1. Caractéristiques de résistance statique.....	13
I.5.2. Caractéristiques de ductilité	13
I.5.3. Ténacité	13
I.5.4. Dureté	13
I. 6. Différents type d'aciers.....	14
I. 6. 1. Aciers non alliés.....	14
I. 6. 2. Aciers alliés	15
I. 6. 3. Aciers de cémentation	15
I.7.Les différentes phases du diagramme fer-carbone	15
I.7.1. La ferrite α	15
I.7.2. La ferrite δ	15
I.7.3. L'austénite γ	16
I.7.4. La cémentite	16
I.7.5. La perlite.....	16
I.8.Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	17
I.8.1. Diagramme stable et diagramme métastable	17
I.8.2. Analyse du diagramme Fer-carbone à cémentite	18
a. Courbes	18
b. Les transformations	19
I.9. Mise en œuvre des aciers	19
I.10. Les défauts des aciers.....	19
I. 11. Conclusion	21

Liste des figures (chapitre I)

Figure I.1. Diagramme fer-carbone	5
Figure I.2. Coupe pseudo binaire du diagramme fer-carbone-chrome à 17 % de chrome.	6
Figure I.3. Coupe pseudo binaire du diagramme fer-carbone-silicium à 2,4 % de silicium	6
Figure I.4. Influence du molybdène sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma dans le système fer-carbone-molybdène	11
Figure I.5. Influence du manganèse sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma dans le système fer-carbone-manganèse	12
Figure I.6. Illustration schématique des principaux constituants du diagramme Fe ₃ C	16
Figure I.7. Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe -Fe ₃ C.....	17
Figure I.8. Diagramme métastable Fe ₃ C	18

I. 1. Introduction

Malgré toutes ces nouveautés dans le domaine des matériaux, l'acier et la fonte demeureront les métaux les plus utilisés dans l'industrie. Aujourd'hui les aciers sont des matériaux d'un grand intérêt industriel en raison de leur large gamme d'emploi. La métallurgie, l'industrie mécanique, l'industrie du bâtiment considèrent l'acier comme un matériau de base. La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser des traitements thermomécaniques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large. Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure de l'alliage, donc à sa composition et aux traitements thermiques appliqués. Enfin, leurs faibles coûts présentent un grand intérêt pour leurs utilisations. Les éléments d'alliages jouent un rôle prépondérant dans les différentes transformations de phases des aciers. L'étude de leur rôle, de leur influence et des conditions dans lesquelles elles surviennent constitue donc une étape incontournable dans la compréhension des différentes propriétés d'un alliage. Ces éléments influent sur les différentes propriétés en modifiant les transformations, leur cinétique, et par conséquent, les microstructures obtenues [1].

I.2. Définition d'acier

Un acier est un « alliage de fer et de carbone (moins de 1,5 %) auquel on donne, par traitement mécanique ou thermique, des propriétés variées (malléabilité, résistance...) ».

Selon la norme NF EN 10020, un acier est un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte.

À la lecture de ces deux définitions, on constate que la limite supérieure de la teneur en carbone des alliages Fe-C susceptibles de s'appeler des aciers (par différence avec les fontes) est délicate à préciser. 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 (figure 01) :

- La solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique qui inclut la précipitation de carbure de fer et/ou de graphite.
- La solidification d'un acier s'achève en conservant tout le carbone en solution solide dans la structure qui peut être δ , $\delta + \gamma$ ou γ .

Généralité sur les aciers

On peut donc appeler acier un alliage à base de fer, éventuellement allié, et contenant du carbone en quantité telle qu'à haute température, lors de l'achèvement de la solidification (à la température du solidus donc), cet élément soit dissous (et donc pas du tout précipité sous forme de carbure ou de graphite). La teneur limite en carbone correspond alors à la limite de solubilité de cet élément dans le fer γ (c. f. c) et peut donc varier avec les éléments d'alliage présents comme le montrent la figure 02 (Fe-C-Cr à 17 % Cr : C % limite = 0,7) et la figure 03 (Fe-C-Si à 2,4 % Si : C % limite = 1,4).

Par ailleurs, il est utile de distinguer, à partir des états d'équilibre à 20 °C, les aciers qui, à côté de l'agrégat eutectoïde (perlite) contiennent :

- Soit de la ferrite proeutectoïde ; ils sont alors dits hypoeutectoïdes ;
- Soit de la cémentite proeutectoïde ; ils sont alors dits hypereutectoïdes.

Les aciers étant des alliages à base fer, nous allons donc examiner tout d'abord quelles sont les propriétés de ce métal [2].

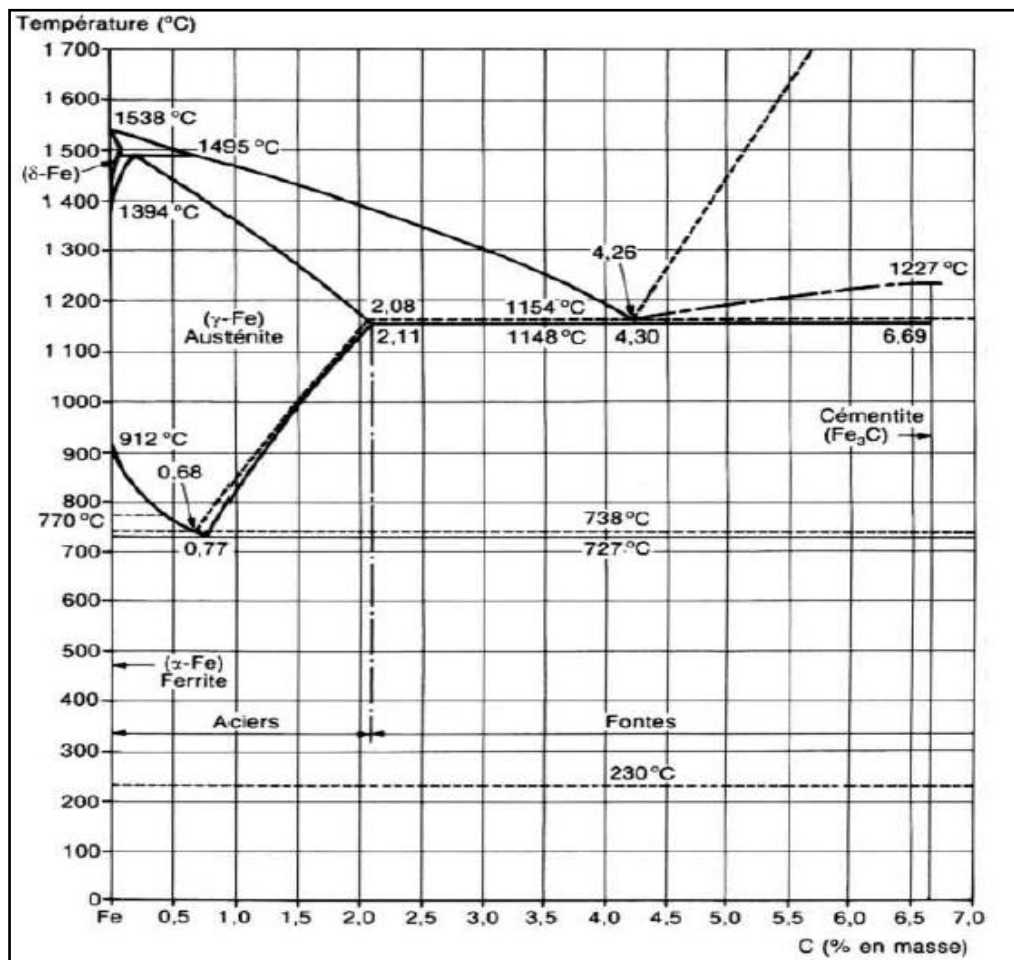
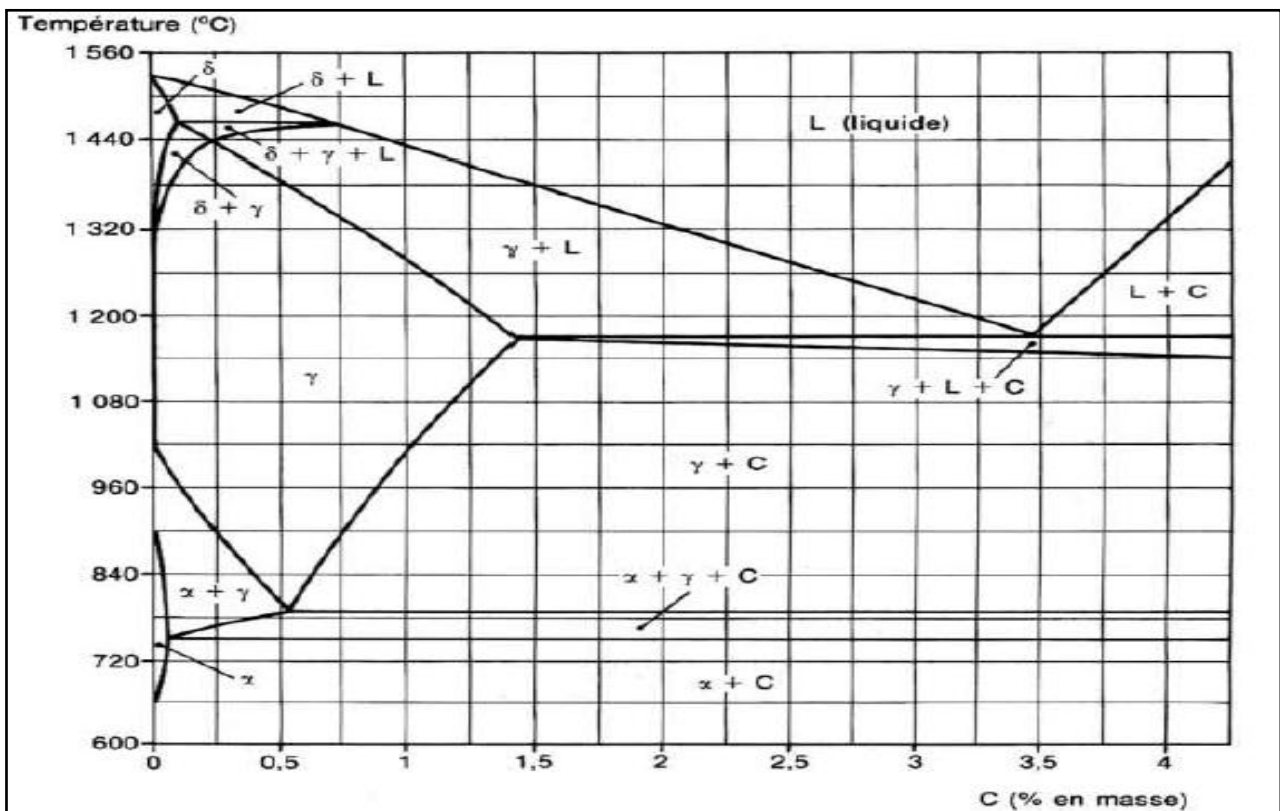
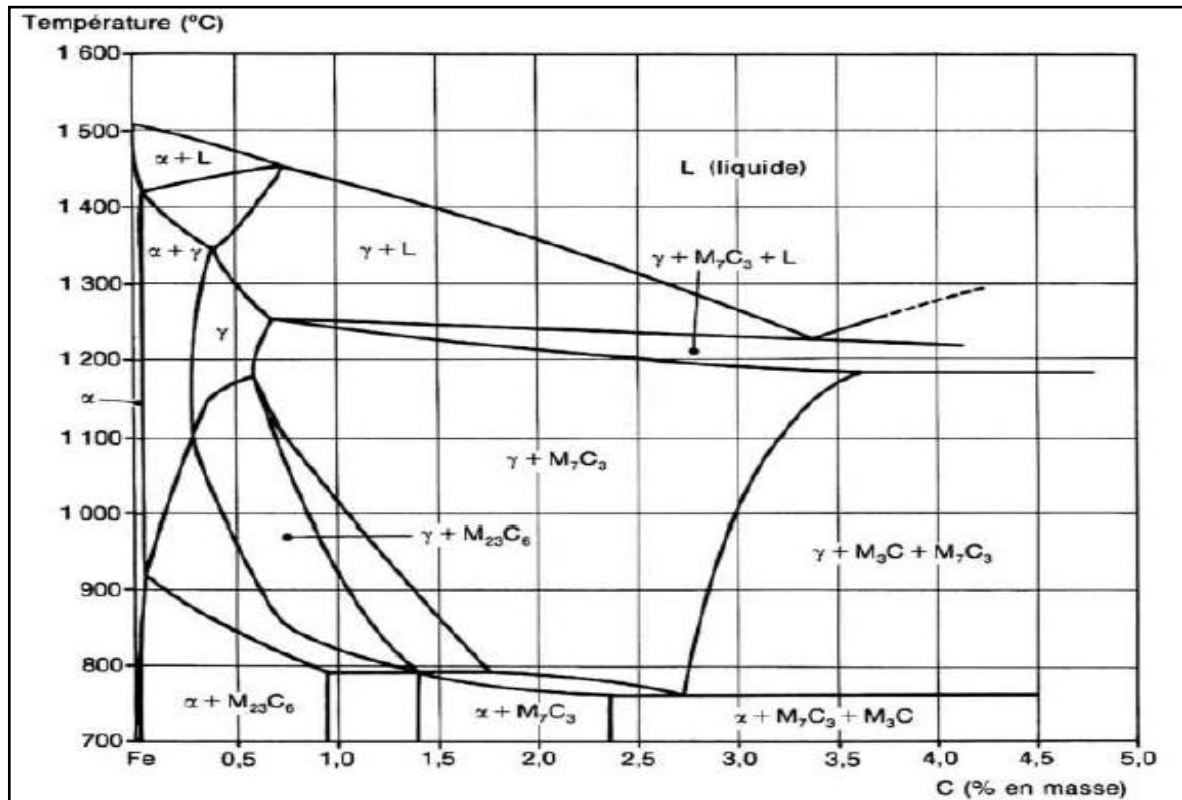


Figure I.1. Diagramme fer-carbone [2].

Généralité sur les aciers



I.3. Historique de l'acier

L'Âge du fer se caractérise par l'adaptation du bas fourneau à la réduction du fer [1,2]. Ce bas fourneau produit une loupe, un mélange hétérogène de fer, d'acier et de laitier, dont les meilleurs morceaux doivent être sélectionnés, puis cinglés pour en chasser le laitier[3].

En poussant le vent, on attise la combustion et la température de fusion du métal est atteinte. On extrait le métal par vidange du creuset : c'est la production au haut fourneau. On obtient alors de la fonte, le fer liquide se chargeant de carbone au contact du charbon de bois. En effet, deux phénomènes complémentaires se déroulent dans le creuset du haut fourneau : le fer se charge de carbone lorsqu'il arrive au contact du charbon de bois, ce qui abaisse son point de fusion. Puis ce métal fondu continue à s'enrichir en carbone, en dissolvant le charbon de bois [4]. Les premières coulées de fonte ont été réalisées par les Chinois durant la période des Royaumes combattants (entre -453 et -221)[5]. Ceux-ci savent aussi brûler le carbone de la fonte, en le faisant réagir avec de l'air, pour obtenir de l'acier. Il s'agit du procédé indirect, car l'élaboration de l'acier se fait après l'obtention de la fonte[6,7]. En Europe et en Asie, durant l'Antiquité, on produisait également de l'acier en recarburant le fer avec des gaz de combustion et du charbon de bois (acier de cémentation).

René-Antoine Ferchault de Réaumur, en réalisant de très nombreuses expériences et en publiant les résultats de ses observations en 1722, fonde la sidérurgie moderne : il est le premier à théoriser le fait que l'acier est un état intermédiaire entre la fonte et le fer pur, mais les connaissances du temps ne lui permettent pas d'être scientifiquement précis[8]. Il faut attendre 1786 pour que la métallurgie devienne scientifique : Lavoisier, Berthollet, Monge et Vandermonde présentent devant l'académie royale des sciences un mémoire sur le fer dans lequel ils définissent les trois types de produits ferreux : le fer, la fonte et l'acier[9]. L'acier est alors obtenu à partir du fer, lui-même produit par affinage de la fonte issue du haut fourneau. L'acier est plus tenace que le fer et moins fragile que la fonte, mais chaque transformation intermédiaire pour l'obtenir augmente son coût.

La révolution industrielle apparaît grâce à la mise au point de nouvelles méthodes de fabrication et conversion de la fonte en acier. En 1856, le procédé Bessemer est capable d'élaborer directement l'acier à partir de la fonte. Son amélioration par Thomas et Gilchrist permet sa généralisation [10,11]. Ces découvertes mènent à la fabrication en masse d'un acier de qualité (pour l'époque). Enfin, vers la seconde moitié du XIX^e siècle, Dmitri Tchernov découvre les

transformations polymorphes de l'acier et établit le diagramme binaire fer/carbone, faisant passer la métallurgie de l'état d'artisanat à celui de science.

I. 4. Éléments d'alliage présents dans les aciers

Les influences des éléments d'alliage susceptibles d'être introduits dans les aciers doivent être étudiées en fonction de divers paramètres [12] :

- Leur solubilité ;
- Leur action sur les structures d'équilibre ;
- Leur aptitude à former certains composés (nitrides, oxydes, sulfures et intermétalliques) ;
- Leur action sur les transformations hors équilibre.

I.4.1. Solubilité des éléments d'alliage

Sans être totalement déterminante, la solubilité d'un élément d'alliage dans le fer γ fournit une première information sur les quantités qui peuvent être incorporées dans un acier et solubilisées dans l'austénite. Bien entendu, au-delà de cette première estimation, il faut examiner les solubilités dans le fer α pour prévoir les tendances d'évolution au cours ou à la suite des transformations allotropiques et, par ailleurs, prendre en compte les composés qui peuvent se former et dont il est nécessaire de considérer la solubilité propre [12].

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

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

I.4.2.1. Les éléments alphas

Les éléments alphas qui augmentent la surface du domaine dans lequel la phase α est stable et, de ce fait, diminuent la surface du domaine de stabilité de la phase γ comme l'illustre la figure 04 en ce qui concerne le molybdène ; la liste des éléments alphas comprend presque tous les éléments habituels tels que Si, Al, Cr, Mo, Ti, W[13].

a. Le chrome (Cr)

Élément de base de tous les aciers inoxydables qui offre la résistance à la corrosion par la formation d'un film passif en se combinant avec l'oxygène et augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud. Lorsqu'il est associé avec le molybdène et le nickel, il confère de bonnes propriétés mécaniques à des températures allant jusqu'à 500°C [13].

b. Le molybdène (Mo)

C'est un élément alphas qui, ajouté à raison de quelques pourcents, améliore la qualité du film passif, en particulier en milieux chlorurés et acides, à l'exception des solutions nitriques bouillantes. Le molybdène augmente la résistance au fluage des aciers au chrome. Il diminue la fragilité au revenu. Il améliore sensiblement la résistance à la corrosion inter cristalline et par piqure. Il confère une plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation pour des maintiens entre 1000 et 1100°C. De plus, il augmente la résistance mécanique à chaud. M. K. AHN et al ont étudié l'effet du Mo sur l'acier inoxydable ferritique et ont montré que la présence du Mo augmente la résistance à la corrosion par piqure et la résistance à la corrosion sous contrainte [13]. Les travaux de SeokJooDoh et al sur l'influence du Mo sur les aciers inoxydables type 430 et 444 ont montré que son addition améliore la passivation, qui est principalement due à la substitution de l'oxyde de Cr par l'oxyde de Mo dans le film passif [14].

c. Le silicium (Si)

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

d. Le vanadium (V)

Il est un fort stabilisateur de ferrite. Avec la présence du nickel, il augmente la résistance mécanique [15].

e. Le titane (Ti)

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

f. Le niobium (Nb)

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

I.4.2.2. Les éléments gammagènes

Les éléments gammagènes qui augmentent la surface du domaine d'existence dans lequel la phase γ est stable figure 05 ; la liste des éléments gammagènes est relativement courte : Ni, Mn et Cu (dont l'action est assez faible) [16].

a. Le nickel (Ni)

Au-delà de 6 % à 8 %, sa présence se traduit par un effet gammagènes et l'acier devient austénitique à toutes températures. Il élargit ainsi le domaine d'existence de l'austénite. Il favorise la mise en œuvre par déformation plastique, améliore la résistance à la corrosion, en particulier la résistance à la corrosion sous tension, il affine le grain et améliore la ductilité. Le nickel a une influence favorable sur la trempabilité, la résistance au choc et la ténacité des calamines [17].

b. Le manganèse (Mn)

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

c. Le carbone (C)

Il stabilise la structure austénitique introduit pour accroître les propriétés mécaniques de l'acier (dureté, charge à la rupture, fluage...), particulièrement sous l'effet des traitements thermiques, le carbone joue cependant un rôle néfaste vis-à-vis de la résistance à la corrosion (précipitation de carbures de chrome lorsque la teneur en carbone dépasse 0,030 % conduisant à la corrosion inter granulaire). Ceci a encouragé le développement de nuances d'aciers inoxydables à très faible teneur en carbone (inférieur à 0,03%) [17].

d. L'azote (N)

Stabilisateur d'austénite, associé à une basse teneur de carbone, l'azote permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans diminuer la résistance à la corrosion intergranulaire. Il a une influence bénéfique sur la résistance à la corrosion par piqûres et la résistance à la corrosion par crevasse par précipitation du nitrure de chrome Cr_2N moins riche en chrome que Cr_2C_6 provoquant

un moindre appauvrissement en chrome au voisinage des joints de grains. L'azote augmente aussi la résistance à la traction et diminue la ductilité des aciers inoxydables austénitiques [18].

e. Le soufre (S)

À des teneurs de l'ordre de 0,2 %, il améliore considérablement l'usinabilité (tournage, fraisage, perçage, etc.) mais cela se fait au détriment de la résistance à la corrosion par piqûres [19].

f. Le cuivre (Cu)

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

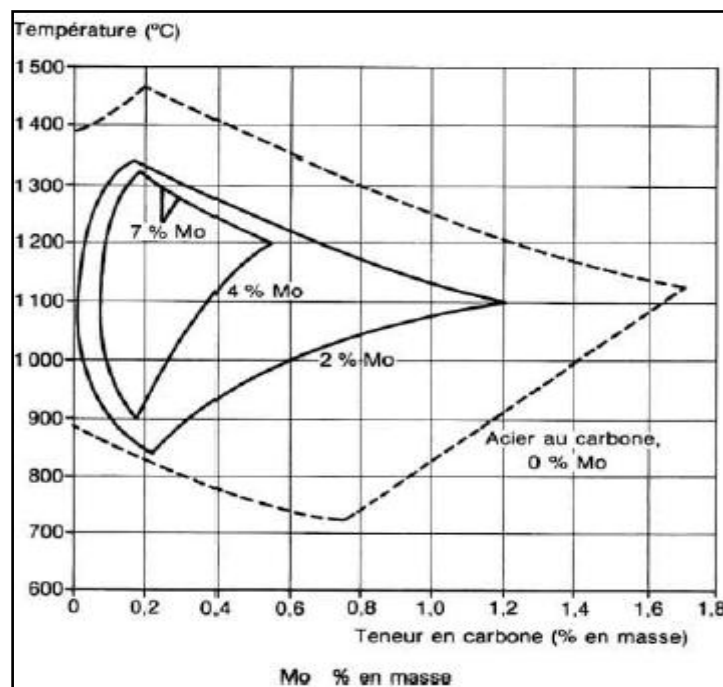


Figure I.4. Influence du molybdène sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma dans le système fer-carbone-molybdène [19].

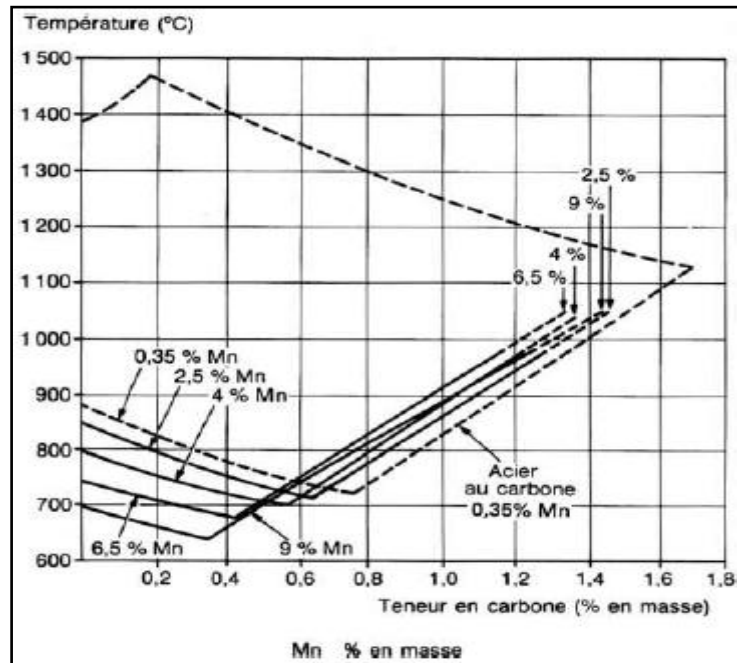


Figure I.5. Influence du manganèse sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma dans le système fer-carbone-manganèse [20].

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

Il ne reste pratiquement à citer que le chrome qui est l'élément d'addition essentiel qui permet de conférer aux aciers un caractère d'inoxydabilité, c'est-à-dire une aptitude à s'auto protéger par formation d'une couche protectrice qui, après sa formation, arrête ou ralentit très fortement la progression de la corrosion. En corrosion aqueuse, cette couche dite passive a une composition très complexe qui dépend de celle de l'acier et de celle du milieu agressif ; elle contient généralement des ions hydroxydes, des cations des métaux oxydables contenus dans l'acier et des anions issus du milieu corrosif. En corrosion sèche à chaud, cette couche est essentiellement formée d'oxyde de chrome Cr_2O_3 [20].

D'autres éléments peuvent, à des degrés moindres, augmenter la résistance des aciers aux agressions chimiques ; ce sont :

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

I.5. Performances mécaniques des aciers

Les propriétés mécaniques des aciers sont mesurées à l'aide de divers essais (traction, rupture par choc, mécanique de la rupture, fatigue...) qui permettent de connaître les niveaux atteints par les caractéristiques de [21] :

- Résistance statique ;
- Ductilité ;
- Ténacité ;
- Dureté.

I.5. 1. Caractéristiques de résistance statique

- Limites d'élasticité ;
- Résistance à la traction ;
- Variations de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction avec la vitesse de traction ;
- Variations de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction avec la température ;
- Coefficient d'écroutissage.

I.5.2. Caractéristiques de ductilité

- Allongement après rupture ;
- Coefficient de striction ;
- Allongement non proportionnel sous charge maximale.

I.5.3. Ténacité

- Capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture.

I.5.4. Dureté

- Résistance d'un matériau à la pénétration [22].

I. 6. Différents type d'aciers

Différentes classifications sont utilisées pour décrire la gamme des aciers. Elles font référence à la composition chimique, aux modes de transformation, aux propriétés ou aux emplois.

D'une part :

Les aciers de base : aciers ne faisant l'objet d'aucune prescription nécessitant des précautions spéciales durant la fabrication ;

Les aciers de qualité : aciers répondant à des prescriptions plus sévères que celles relatives aux aciers de base et demandant donc certaines précautions lors de la fabrication ; toutefois de tels aciers ne satisfont à aucune exigence concernant la réponse au traitement thermique et l'état inclusionnaire.

Les aciers spéciaux : aciers présentant une plus grande pureté que les aciers de qualité et généralement destinés à subir un traitement thermique pour lequel ils assurent une régularité de réponse ; l'ajustement soigné de leur composition et les conditions spéciales de leur élaboration leur confèrent des propriétés particulières de mise en œuvre et d'emploi.

D'autre part :

Les aciers non alliés : aciers pour lesquels la teneur minimale imposée ou 70 % de la teneur maximale imposée en chaque élément est inférieure aux limites fixées par la norme.

Les aciers alliés : aciers pour lesquels la teneur minimale imposée ou 70 % de la teneur maximale imposée en chaque élément est égale ou supérieure aux limites fixées par la norme[23].

I. 6. 1. Aciers non alliés

- Aciers de construction métallique ;
- Aciers au carbone pour appareils à pression ;
- Aciers pour armature du béton ;
- Aciers pour emboutissage et pliage à froid ;
- Aciers non alliés pour tôles magnétiques ;
- Aciers non alliés de construction mécanique.

I. 6. 2. Aciers alliés

- Aciers alliés pour appareils à pression ;
- Aciers de construction mécanique ;
- Aciers inoxydables ;
- Aciers à outils alliés ;
- Aciers alliés pour tôles magnétiques [24].

I. 6. 3. Aciers de cémentation

L'acier de cémentation désigne le métal issu d'un procédé historique de transformation du fer en acier par une cémentation pénétrant profondément dans le métal (à la différence de la cémentation moderne, qui ne cherche qu'à durcir superficiellement).

Ce procédé a été utilisé en Europe du XVII^{ème} siècle au XX^{ème} siècle. L'acier de cémentation étant très hétérogène (plus riche en carbone en surface qu'au cœur du produit), il était souvent refondu pour devenir un acier au creuset. Ces procédés, lents et coûteux, disparaissent dès que les convertisseurs sont mis au point [25].

Ce sont des aciers à faible teneur en carbone inférieur à 0.3 %.

Exemple : **3 Cr 13**

- Acier faiblement allié ;
- 0.03% de carbone ;
- 3% de chrome.

I.7. Les différentes phases du diagramme fer-carbone

I.7.1. La ferrite α

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre (HB \approx 80), peu tenace (R \approx 300 MPa), mais très ductile (A \approx 35%).

I.7.2. La ferrite δ

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centré CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

I.7.3.L'austénite γ

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint environ de 2% de carbone à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

I.7.4.La cémentite

(Carbure de fer Fe_3C) La cémentite est un composé chimiquement défini CC. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanches. Elle est très dure et très fragile.

I.7.5.La perlite

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure ($\text{HB} \approx 200$), résistante ($R_m \approx 850 \text{ MPa}$) et assez ductile ($A\% \approx 10$) [26].

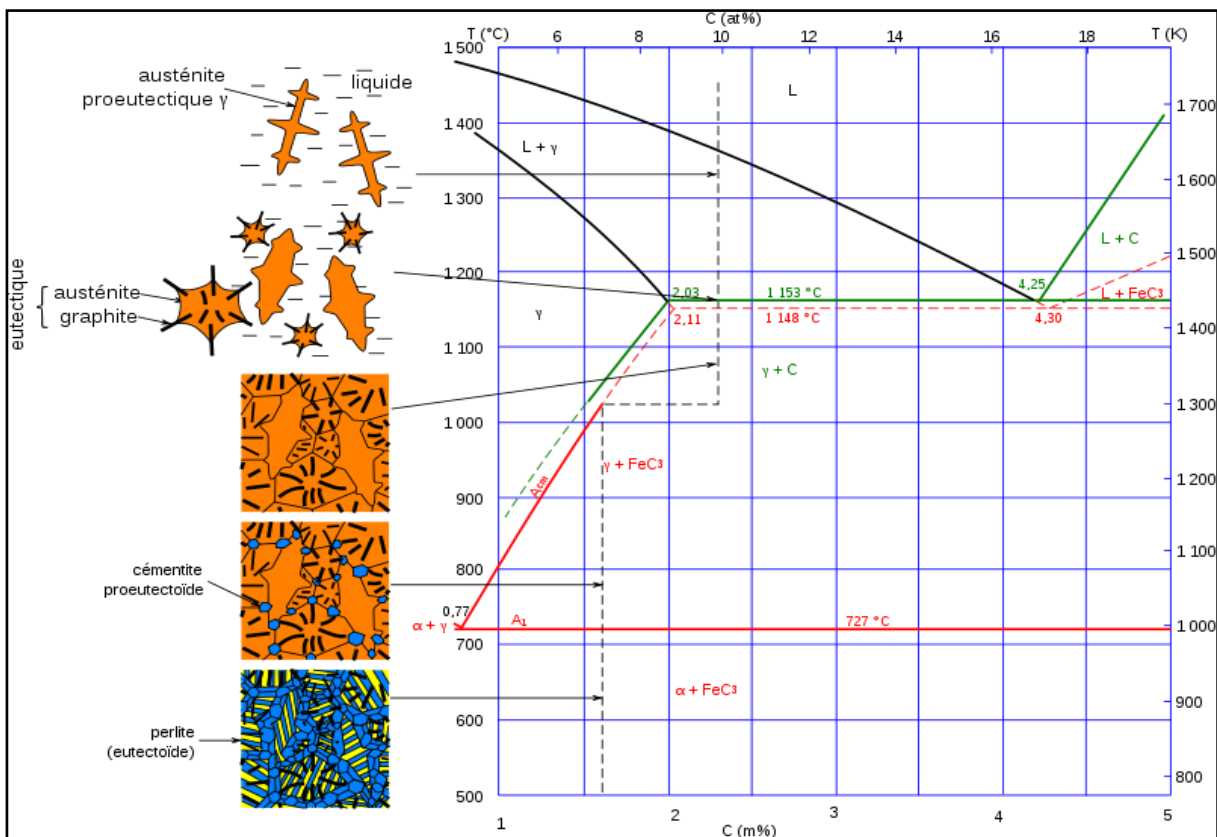


Figure I.6. Illustration schématique des principaux constituants du diagramme Fe₃C [26].

I.8. Diagramme d'équilibre fer-carbone

I.8.1. Diagramme stable et diagramme métastable

L'étude dans les conditions d'équilibre des alliages Fe-C, montre qu'ils subissent deux types d'évolution : La première produit une phase riche en carbone de formule Fe₃C appelé carbone de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit métastable ou à cémentite. La deuxième forme une phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur Cgr, qui a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. Son obtention exige la décomposition du carbone Fe₃C en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium [27].

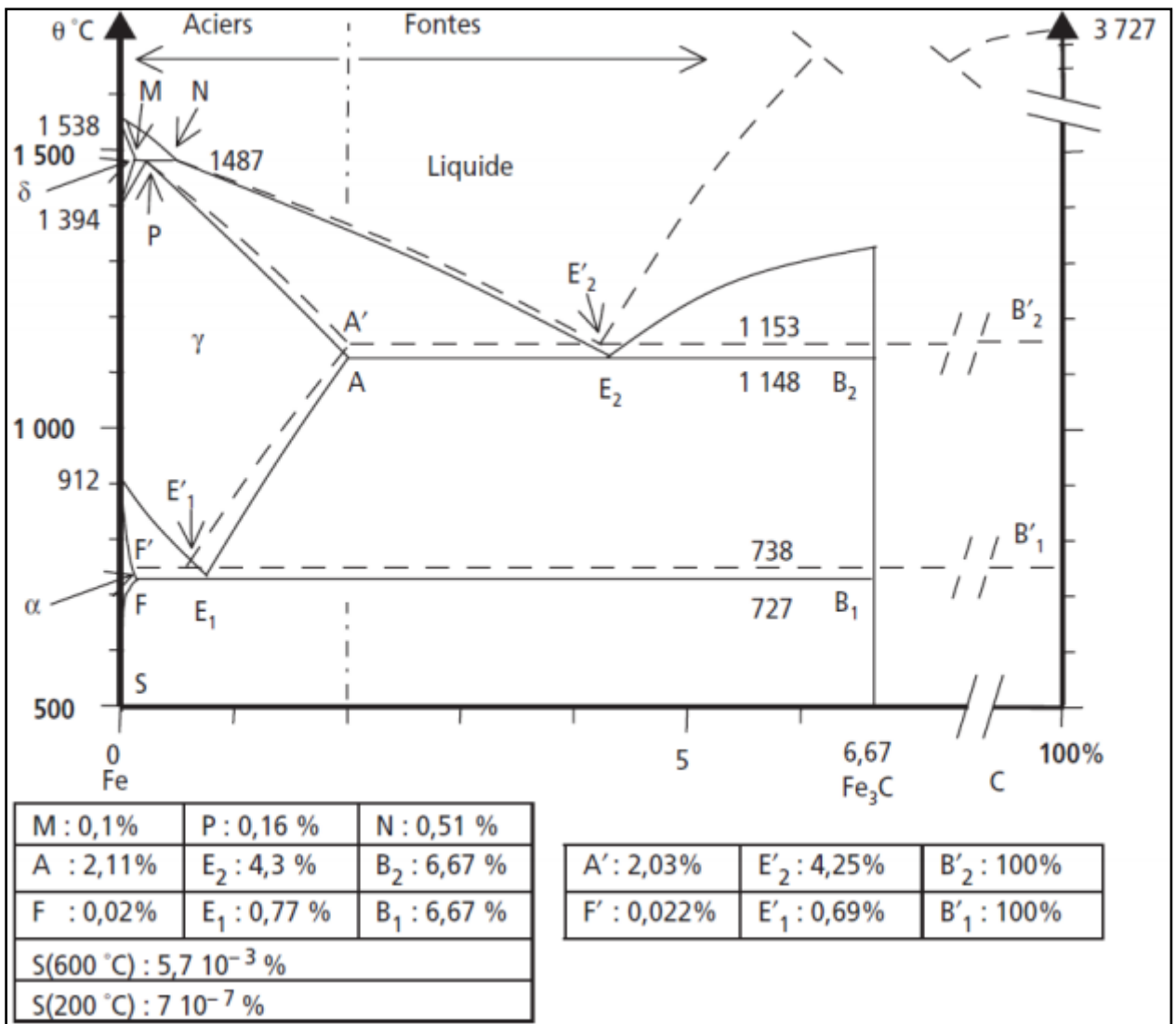


Figure I.7. Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe -Fe₃C [27].

I.8.2. Analyse du diagramme Fer-carbone à cémentite

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite Fe_3C (6.67%C) est fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008%C et 2%C) et les fontes (de 2%C à 6.67%C).

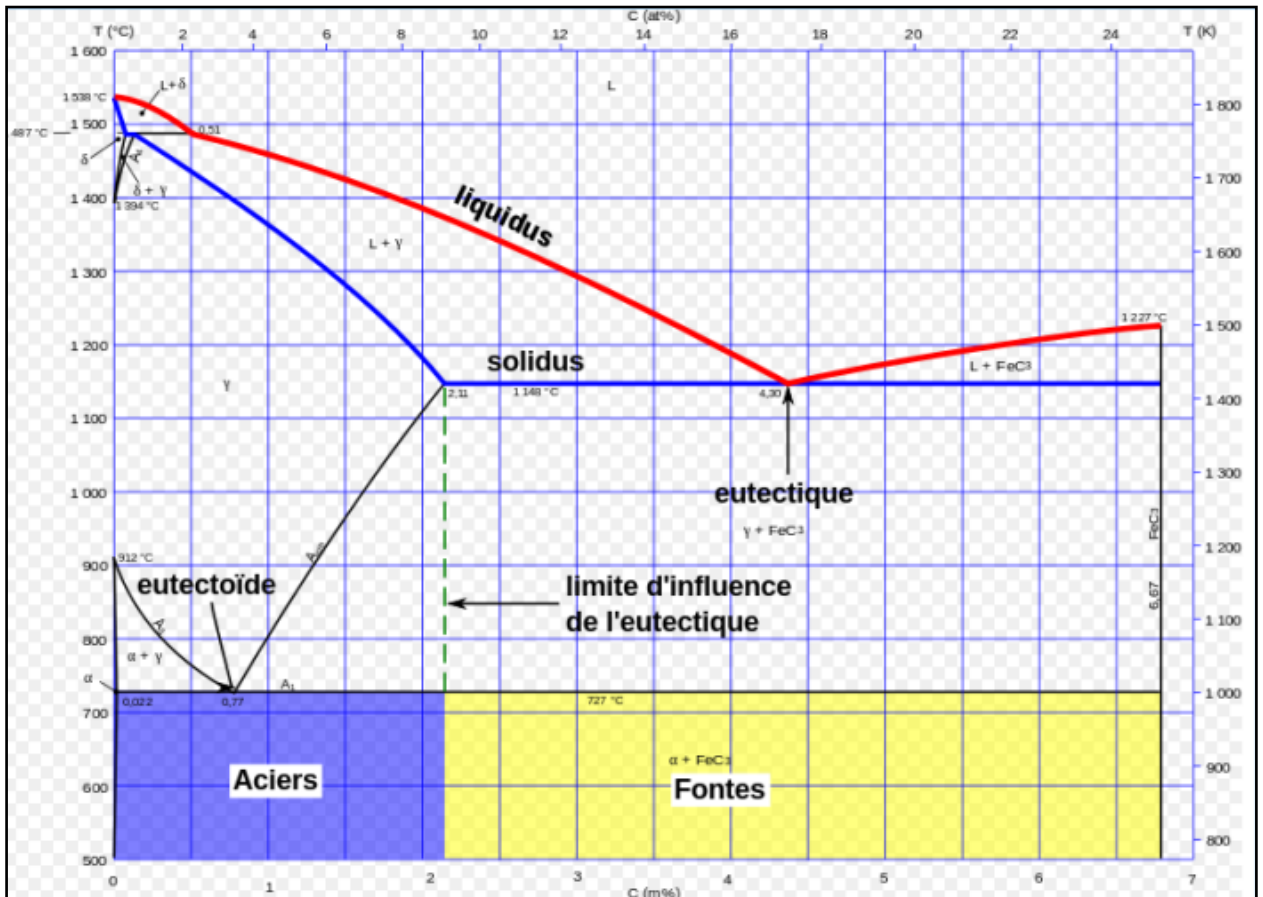


Figure I.8. Diagramme métastable Fe₃C [28].

a. Courbes

- A_{cm} : indique la fin de la dissolution après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.
- A_0 : (210°C) précise la température de la transformation magnétique de la cémentite.
- A_1 : précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austénite n'existe plus au-dessous de cette ligne.
- A_2 : (point de Curie $\approx 768^\circ\text{C}$) précise la température de la perte de magnétisme du Fer α . engénérale ce point ne figure pas sur le diagramme Fer-C.

- A_3 : précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite. La ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.
- A_4 : précise la fin de la transformation au chauffage de l'austénite en ferrite δ et/ou liquide. L'austénite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

On peut trouver Ac_3 , Ac_4 ... pour indiquer que le point est tracé en chauffage, ou Ar_3 , Ar_4 lorsqu'il s'agit de refroidissement [29].

b. Les transformations

Le diagramme Fer-carbone Contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers :

- Eutectique à 1147°C : il marque la température minimale d'existence du liquide.
- Eutectoïde à 723°C (A_1). Il marque la fin de la transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de 723°C , la perlite n'existe plus.
- Péritectique à 1487°C , mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.

I.9. Mise en œuvre des aciers

- Découpage.
- Formage.
- Usinage.
- Soudage.
- Traitements thermiques.
- Le rivetage.
- Le collage.

I.10. Les défauts des aciers

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

Généralité sur les aciers

lors des transformations et traitements ultérieurs. Ces ségrégations, parfois liées à des dégagements gazeux, persistent dans l'acier et peuvent être à l'origine de divers autres défauts [30].

Les inclusions non métalliques que l'on rencontre dans tous les aciers normalement élaborés constituent également un défaut pouvant avoir des conséquences graves. Les plus grosses proviennent d'entraînement de laitier ou de réfractaire : elles sont accidentelles et doivent pouvoir être évitées grâce à des précautions spéciales. Les plus petites, les plus nombreuses d'ailleurs, sont, au contraire, inhérentes à l'acier et sont liées au processus même d'élaboration et surtout à la phase de désoxydation ; leur formation peut continuer même pendant la solidification. Si leurs inconvénients sont moins graves, elles n'en ont pas moins une influence profonde sur les propriétés de l'acier. En fait, les progrès réalisés depuis le début de la décennie quatre-vingt au niveau des procédés d'élaboration et de coulée sont considérables et permettent l'obtention d'aciers homogènes de haute pureté : les problèmes qui viennent d'être évoqués sont donc largement minimisés.

Des criques et des tapures peuvent se produire soit au cours de la solidification, soit pendant les transformations ultérieures. Si elles n'ont pas pu être éliminées dès leur formation, elles entraînent le rejet de l'acier en cours de fabrication, et l'utilisateur ne les rencontre guère. On peut cependant observer des fissures internes se produisant à l'occasion du forgeage ou du laminage. Elles sont souvent liées à des ségrégations et parfois à des dégagements gazeux (hydrogène). À ce dernier type de défauts se rattachent les flocons [31].

Des défauts peuvent également apparaître lors des traitements thermiques. Nous ne parlons pas là des malfaçons de traitement telles qu'un cycle de température incorrect, mais de défauts tels que la décarburation ou la carburation superficielle ou encore de tapures provenant d'un mode de refroidissement mal adapté à la forme de la pièce ou à la nuance de l'acier. Il peut se produire encore une altération des caractéristiques mécaniques (fragilisation), soit parce que l'acier a été chauffé à trop haute température (surchauffe), soit par suite d'un revenu dans une zone de température ne convenant pas pour l'acier traité (fragilité de revenu).

Bien d'autres défauts encore peuvent être rencontrés dans les aciers. Il est donc évident que la détermination des grandeurs mesurables ne peut pas suffire pour apprécier la qualité. Outre ces déterminations, le contrôle de la qualité comportera l'examen de l'acier ou de la pièce à l'aide de méthodes faisant appel aux ressources de la technique la plus évoluée. On utilisera des méthodes magnétiques ou électromagnétiques pour l'examen des surfaces, des rayonnements ultrasonores pour sonder l'intérieur du métal et mettre en évidence des inclusions ou des fissures internes. L'examen par transparence, à l'aide de rayons X ou de rayonnement γ provenant de substances

radioactives, permet également de s'assurer de l'absence de défauts internes et même de les observer à distance à l'aide de caméras de télévision. La perfection des méthodes de contrôle permet maintenant d'utiliser l'acier avec une grande sécurité [32].

I. 11. Conclusion

Dans ce chapitre, on a mise en évidence les notions fondamentales de fabrication des aciers en démontrant le rôle primordial qu'ils jouent dans le développement de l'industrie d'une manière générale, de plus souligner leurs importances dans l'industrie mécanique d'une manière précise. Par la suite nous avons mentionné (identité) certains défauts caractéristiques suite au manque d'homogénéité à l'instar des pailles, les retassures...etc. Finalement le choix de l'acier dépend essentiellement des propriétés mécaniques souhaitées et le domaine d'application.

Références bibliographique (chapitre I)

- [1] S. Bensaada. Élaboration des métaux ferreux p n° 5.
- [2] T. Paul Craddock, *Early Metal Mining and Production*, Edinburgh, Prentice Hall & IBD, 1995, 383 p. (ISBN 9781560985358), p. 258-259.
- [3] M. Anthony. Snodgrass, *The Coming of the Age of Iron*, Theodore A. Wertime and James D. Mulhy, 1980 (ISBN 0300024258 et 0-300-02425-8), - Iron and Early Metallurgy in the Mediterranean- p. 336-337.
- [4] M. Burteaux, - Le tatare -[archive], Soleil d'acier, 1er octobre 2004.
- [5] R. Temple -préf. Joseph Needham-, *The Genius of China: 3,000 Years of Science, Discovery, and Invention*, Simon and Schuster (New York), 1986, 254 p. -ISBN 0671620282-, p. 49-50.
- [6] Z. Wang, *Han Civilization*, New Haven and London: Yale University Press, 1982, 261 p. -ISBN 0-300-02723-0-, p. 125.
- [7] R. Adrienne. Weill, -Métallurgie -Acier au creuset et fonte de qualité au xviii^e siècle) - [archive], Encyclopædia Universalis -consulté le 6 août 2011-.
- [8] R. Eluerd, *Les Mots du fer et des Lumières*, Paris, Honoré Champion, Genève, Slatkine, 1993, p. 29-42.
- [9] Science et Vie, no 1106, novembre 2009, p. 130-131.
- [10] A. Théophile Vandermonde, Claude-Louis Berthollet, Gaspard Monge, *Mémoire sur le fer considéré dans ses différents états métalliques*, [lire en ligne [archive]], « Lû à l'Académie Royale des Sciences, au mois de mai 1786.
- [11] A. Aron, - Les conséquences économiques de l'invention de Sidney Gilchrist Thomas (allocution) -, *La revue de métallurgie*, no 12, décembre 1950, p. 18-22.
- [12] (E.C.) BAIN et (H.W.) PAXTON. *Les éléments d'addition dans l'acier* -traduction par C. Leymonie-. Dunod (1968).
- [13] (K.W.) ANDREWS. - Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures. *J. of the Iron and Steel Institut*, juil. 1965.
- [14] M. K. AHN, H.S. Know & H.M. Lee : *Quantitative comparison of the influences of tungsten and molybdenum on the passivity of Fe-29Cr ferritic stainless steels*, Elsevier (1998).

Références bibliographique (chapitre I)

- [15] J. Seok Joo Doh, Ho Je, Jim Suk Kim : Influence of Cr and Mo on the passivation of stainless steel of stainless steel 430 -18Cr- and 444 -18Cr-2Mo-: In situ XANES study, Elsevier (2003).
- [16] S.M. Addasi, A. Shokuhfar : Improvement of Mechanical Properties of Cr-Ni-Mo-Cu-Ti Stainless Steel With Addition of Vanadium, Journal of iron and steel research, International (2007).
- [17] Jean VARRIOT : Chaudronnerie en aciers inoxydables, Techniques de l'Ingénieur, A 869.
- [18] J. Zhou-hua, ZHANG Zu-mi, XU Bao-yu, LIU Fu-bin: Mechanical properties of nickel free high nitrogen austenitic stainless steels, Materials Symposium (2007).
- [19] Wu Di & Li Zhuang : A new Ph-free machinable austenitic stainless steel, Journal of iron and steel research, International (2010).
- [20] T. Sourisseau, E. Chauveau, & B. Baroux, : Mechanism of copper action on pitting phenomena observed on stainless steels in chloride media. Corrosion Science (2005).
- [21] D. Beaulieu, A. Picard, R. Tremblay, B. Massicotte et G. Grondin, Calcul des charpentes d'acier, t. I, cisc-icca, Institut canadien de la construction en acier, 2003, 794 p.
- [22] D. Beaulieu, A. Picard, R. Tremblay, B. Massicotte et G. Grondin, Calcul des charpentes d'acier, t. I, cisc-icca, Institut canadien de la construction en acier, 2003, 798 p.
- [23] metalblog.ctif.com/2020/02/17/les-mecanismes-de-solidification/.
- [24] Technique de l'ingénieur M 1145.
- [25] A. Aron, - Les conséquences économiques de l'invention de Sidney Gilchrist Thomas (allocution) -, La revue de métallurgie
- [26] Ch. Bouchy, F. Gobin, - Métallurgie, 1- Métallurgie Structurale"-, ARMAND COLIN 109.
- [27] D. Bernache-Assollant et Jean-Pierre Bonnet : Frittage : Aspects physico chimique : partie 1 : Frittage en phase solide. AF6620. Techniques de l'ingénieur.
- [28] C. Chaussin et G. Hilly « Technologie et métallurgie C/T/Science et génie des matériaux », Ed. Dunod, Paris 1974.
- [29] R. Mayer - Généralités sur la métallurgie -, Technique de l'Ingénieur ; M860 – M862.
- [30] D.M. STEFANESCU casting, volume 15 in ASM Hand book, Edition, American Society for Metals, USA, 1988.

Références bibliographique (chapitre I)

[31] Couteaux.free.fr/acier_technique/acier.html#defauts.

[32] Prat. Ind. Méc. Louis Gasquel, Volume 38, Number 12, Décembre 1955, Page(s): 323 - 323.

An orange oval with a thin black border, centered on a white background. Inside the oval, the text 'Chapitre II' and 'Les traitements de surface' is written in a black serif font.

Chapitre II

Les traitements de surface

Sommaire

Chapitre II : Les traitements de surface.

II. 1. Introduction.....	30
II. 3. Domaine d’application des traitements des surface	32
II. 4. Classification des procédés de traitements de surface.....	33
II. 5. Mécanismes de traitement de surface	33
II. 5. 1. Les revêtements	33
II. 5. 2. Les traitements par conversion chimique	33
II. 5. 3. Les traitements thermochimiques avec diffusion	33
II. 5. 3. Les traitements superficiels avec transformation structurale	33
II. 6. Nettoyage des surfaces	34
II. 6. 1. Dégraissage	34
II. 6. 2. Décapage	34
II. 7. Les revêtements	34
II. 7. 1. Classification des revêtements	35
II. 7. 1. 1. Revêtement métalliques	35
II. 7. 1. 2. Revêtement par minéraux (émail)	36
II. 7. 1. 3. Revêtement organique (par peinture)	36
II. 8. Traitement par transformation structurale.....	37
II. 8. 1. Par voies thermique	37
II. 8. 1. 1. La trempe.....	39
II. 8. 1. 2. Le Revenu.....	39
II. 8. 1. 3. Le Recuit	39
II. 8. 1. 4. Trempabilité (Essai de Jominy).....	39

Sommaire

II. 8. 2. Par voies mécanique	40
II. 8. 2. 1. Le Grenailage	40
II. 8. 2. 1. Le Polissage.....	40
II. 9. Traitement de surface thermochimique	40
II. 9. 1. Nitruration	40
II. 9. 2. Carbonitruration.....	41
II. 9. 3. Nitrocarburation.....	41
II. 9. 4. Cémentation.....	41
II. 9. 4. 1. But de la cémentation	41
II. 9. 4. 2. Domaine d'application de cémentation	42
II. 9. 4. 3. Cycle thermique de cémentation	42
II. 9. 4. 4. Technologies de chauffe	43
II. 9. 4. 5. Les procédés de cémentation	43
II. 10. Traitement de conversion	45
II. 10. 1. Par voie chimique (La Phosphatation).....	46
II. 10. 2. Par voie électrochimique.....	46
II. 11. Conclusion	46

Liste des figures (chapitre II)

Figure II.1. Propriétés fonctionnelles d'une surface.	31
Figure II.2. Domaine d'application des traitements de surfaces.	32
Figure II.3. Répartition par fonction d'utilisation des traitements de surface.....	34
Figure II.4. Couche revêtement.	34
Figure II.5. Bain de nickelage chimique industriel.	35
Figure II.6. Cuivrage des ustensiles de cuisine.....	35
Figure II.7. Dorure électrolytique.....	35
Figure II.8. L'émail dentaire.	36
Figure II.9. Casserole en fonte émaillée.	36
Figure II.10. Schéma de traitement thermique.....	38
Figure II.11. Diagramme de base de traitement thermique.....	38
Figure II.12. Schéma de la couche nitrurée.	40
Figure II.13. Microstructure d'une pièce nitrurée.....	40
Figure II.14. Diagramme de thermique de cémentation.....	42
Figure II.15. La couche cémentée.....	43
Figure II.16. Cémentation en caisse.....	45

Liste des tableaux (chapitre II)

Tableau II.1. Procédés de traitements de surface.....	33
--	----

II. 1. Introduction

Dans une majorité de cas, dès que se pose le problème de l'optimisation des propriétés d'un matériau, métallique ou non, il apparaît que les phénomènes de surface jouent un rôle déterminant dans cette démarche. Quelques exemples industriels permettent d'illustrer cette forte influence : économie de matière et respect de l'environnement par le choix de matériaux à résistance accrue vis-à-vis des agressions subies en service, optimisation des propriétés catalytiques des surfaces impliquées dans les procédés du génie chimique, réduction du frottement et de l'usure dans la transmission de puissance utilisée dans l'industrie du transport, biocompatibilité et résistance à l'usure des biomatériaux prothétiques, structure et propriétés des interfaces dans les constituants actifs et passifs de la micro-électronique. De nombreux phénomènes métallurgiques sont liés à un rôle déterminant des surfaces, on peut citer à titre indicatif :

- En élaboration, le processus de solidification, la croissance cristalline, le frittage et la réalisation d'un dépôt ;
- En évaluation des propriétés d'usage, les modes de fissuration et de rupture en fatigue, la résistance à l'érosion et à la cavitation, l'aptitude à l'usinage avec ou sans enlèvement de copeaux, le comportement au frottement et à l'usure, l'adhérence et l'aptitude au collage, l'influence de la lubrification ;
- En réactivité physico-chimique, la corrosion et l'oxydation, la catalyse, les processus de recristallisation, de transformation de phases et de coalescence, la liaison céramique métal ou polymère métal, la biocompatibilité ;
- En évaluation des propriétés physiques, le pouvoir réflecteur et la résistance de contact.

Tous ces critères spécifiques des surfaces liés aux propriétés de mise en œuvre et d'usage des matériaux peuvent être représentés schématiquement sur la figure II.1. La surface est effectivement une discontinuité dans l'arrangement des atomes d'un solide, ce qui lui confère une énergie supérieure à celle du volume; il en résulte une grande réactivité des atomes et un réarrangement de leur distribution, avec formation de figures géométriques comme par exemple les striations qui apparaissent dans les premiers stades de l'oxydation, des ségrégations d'éléments résiduels ou d'additions mineures qui vont migrer du volume vers la surface, comme par exemple l'étain qui peut perturber les phénomènes diffusionnels liés à un traitement thermo-chimique comme la cémentation ou la carbonituration. La notion de surface est donc par essence pluridisciplinaire ; elle concerne le mécanicien, le chimiste, le physicien et le métallurgiste. Seule, une approche globale permet

d'aboutir à une description complète d'une surface et d'appréhender l'ensemble de ses propriétés fonctionnelles [1].

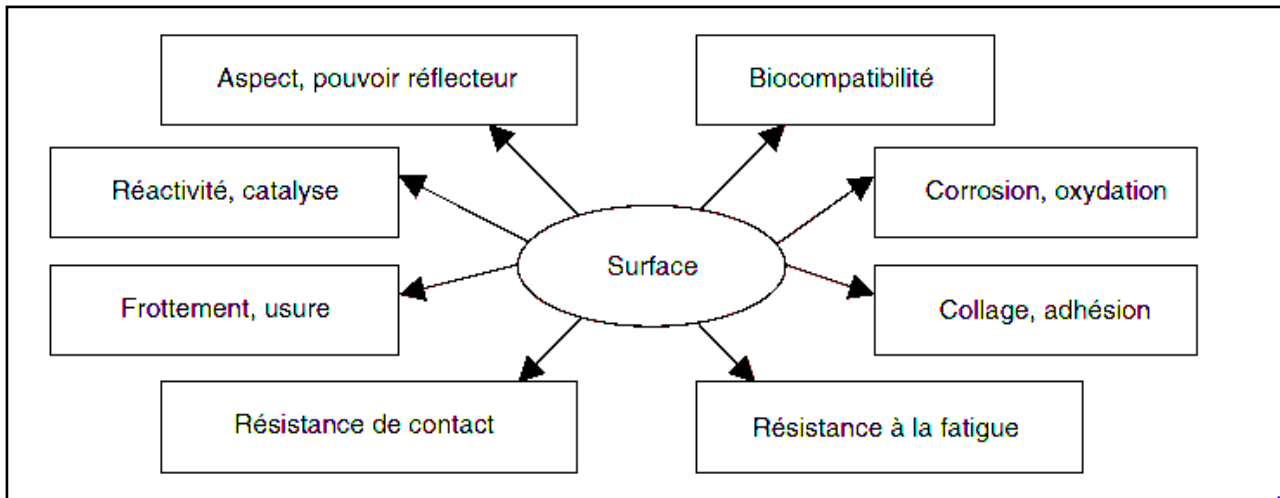


Figure II.1. Propriétés fonctionnelles d'une surface [1].

II. 2. Traitement des surfaces des métaux

Les « Traitements de surface » sont l'ensemble de différents procédés réalisés à la surface d'une pièce, généralement de l'ordre de quelques microns, qui confèrent au matériau des propriétés de surface différentes de celles qui existent à l'intérieur du matériau.

Le traitement de surface des métaux et par les métaux remonte à la naissance de l'utilisation de l'or dans un but décoratif, avant 4 000 avant J.C. La dorure et l'argenture (y compris leur dépôt à partir d'amalgames) étaient connues au 13^{ème} siècle après J.C., et l'on procédait déjà au dépôt d'étain sur du fer en Bohême en 1200 après J. C. Au milieu du 19^{ème} siècle, l'électrodéposition des métaux fut découverte ceci ouvrant la voie à de nouvelles possibilités, qui sont toujours en cours de développement [2].

Les propriétés de surface des métaux sont généralement modifiées pour :

- L'aspect décoratif et/ou le pouvoir de réflexion ;
- L'amélioration de la dureté (pour le maintien de bords coupants et pour résister aux dégâts et à l'usure) ;
- La prévention de la corrosion.

Actuellement, les principaux domaines d'application sont : l'automobile et les transports, les emballages, le bâtiment et la construction Depuis les années soixante, deux domaines d'application commerciale supplémentaires sont apparus :

- En microélectronique, en particulier avec l'avènement des télécommunications et des commandes à microprocesseur dans de nombreux appareils d'utilisation courante. Ces appareils nécessitent des composants fabriqués en série, à conductivité élevée et pouvant transporter des courants électriques extrêmement faibles. On obtient de tels composants par l'application d'un revêtement de métaux précieux sur des substrats moins chers ;
- En imprimerie, où l'aluminium est généralement le substrat privilégié pour les plaques offset. L'aluminium est d'abord traité par grenage électrochimique et oxydation anodique (anodisation) avant que ne commencent les traitements photosensibles.

II. 3. Domaine d'application des traitements des surface

- Anti corrosion ;
- Anti-usure ;
- Amélioration de l'aspect (Décoration) ;
- Amélioration de la dureté ;
- Soudabilité [3].

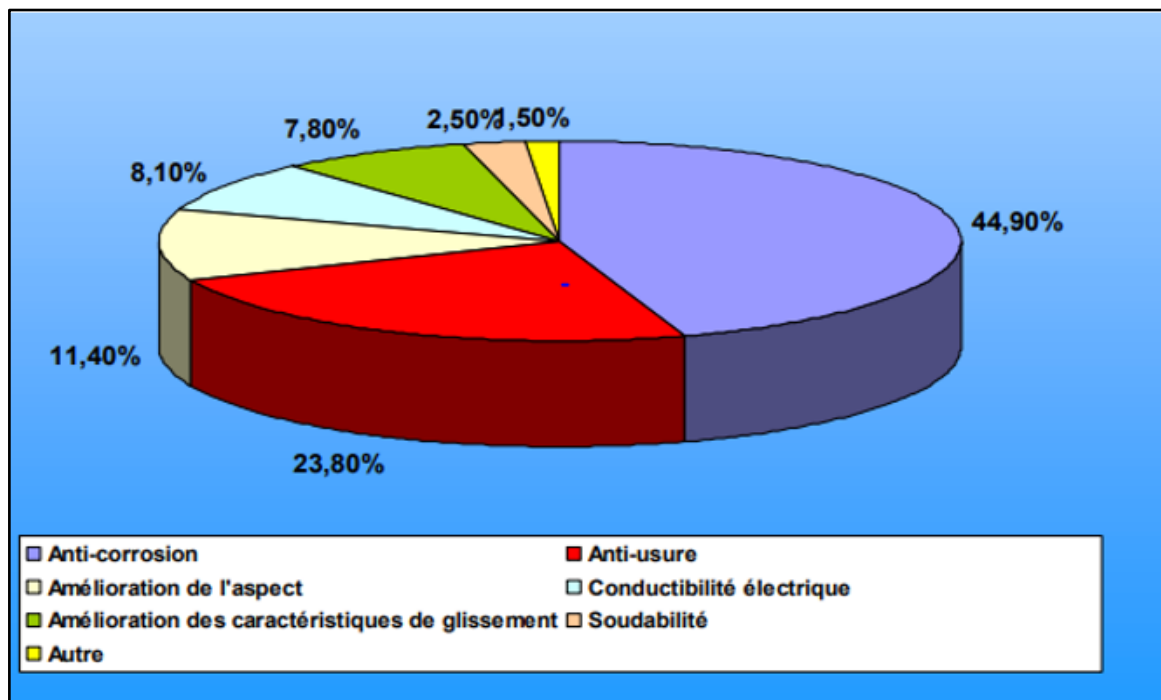


Figure II.2. Domaine d'application des Traitements de Surfaces [3].

II. 4. Classification des procédés de traitements de surface

Revêtement métallique	Dépôt par voie humide	<ul style="list-style-type: none"> • Dépôt électrolytique • Dépôt chimique • Immersion en métal fondu
	Dépôt par voie sèche	<ul style="list-style-type: none"> • Projection thermique • Phase vapeur • Faisceau énergétique • Rechargement métallique
Traitement de conversion	Electrolytique	<ul style="list-style-type: none"> • Anodisation • Sulfuration
	Chimique	<ul style="list-style-type: none"> • Phosphatation • Chromisation
Traitement thermochimique	Diffusion d'éléments non métallique	<ul style="list-style-type: none"> • Cémentation • Nitration • Carbonitruration
	Diffusion d'éléments métallique	<ul style="list-style-type: none"> • Chromisation • Aluminisation
Traitement par transformation structural	Vois thermique	<ul style="list-style-type: none"> • Fusion et trempe superficielle
	Vois mécanique	<ul style="list-style-type: none"> • Grenailage. • Galetage.

Tableau II.1. Procédés de traitements de surface [4].

II. 5. Mécanismes de traitement de surface

II. 5. 1. Les revêtements

Le matériau d'apport ne réagit pas ou peu avec le substrat.

II. 5. 2. Les traitements par conversion chimique

Le matériau d'apport réagit superficiellement avec le substrat.

II. 5. 3. Les traitements thermochimiques avec diffusion

Le matériau d'apport diffuse dans le substrat.

II. 5. 3. Les traitements superficiels avec transformation structurale

La structure métallurgique du substrat est modifiée.

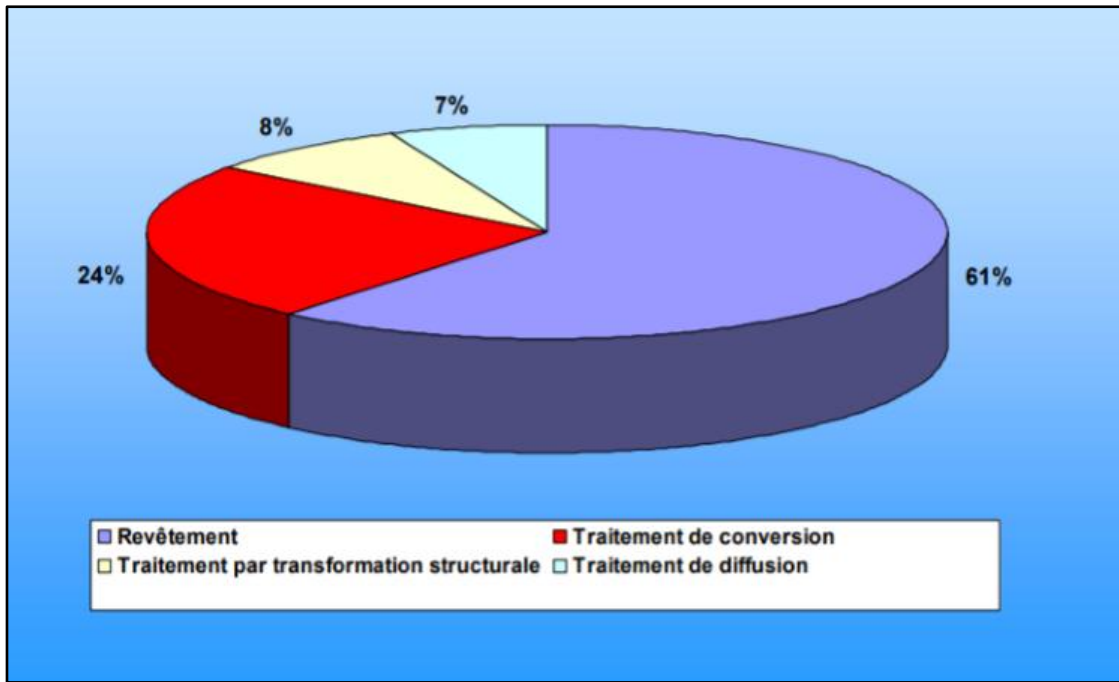


Figure II.3. Répartition par fonction d'utilisation des traitements de surface [5].

II. 6. Nettoyage des surfaces

Avant tout traitement, le nettoyage des surfaces est une phase essentielle qui a pour objet d'enlever les souillures existant à la surface des pièces et qui comprend deux opérations distinctes.

Ces opérations sont toujours suivies d'un rinçage [6].

II. 6. 1. Dégraissage

Élimine les corps gras : par des actions mécaniques, chimiques, électrolytiques.

II. 6. 2. Décapage

Enlève toute trace de corrosion et d'oxyde qui adhèrent à la surface des pièces par une action mécanique (sablage ou grenailage), chimique ou électrolytique.

II. 7. Les revêtements

Toute couche métallique, organique ou minérale déposée sur une surface par un procédé de recouvrement. La surface du matériau d'apport doit être assez homogène et continue [7].

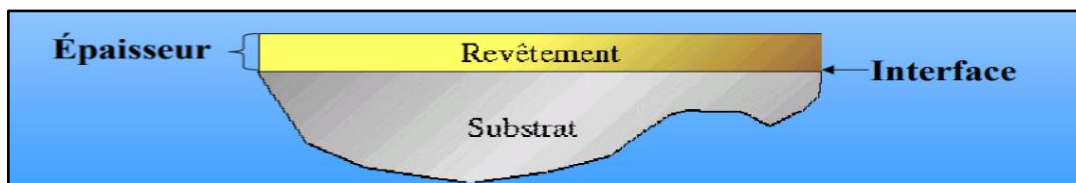


Figure II.4. Couche revêtement [7].

II. 7. 1. Classification des revêtements

- Revêtement métallique ;
- Revêtement minéraux (émaux) ;
- Revêtement organiques.

II. 7. 1. 1. Revêtement métalliques

Par voie humide :

- Dépôt électrolytique ;
- Matoplastie dépôt chimique ;
- Immersion en métal fondu ;
- Immersion à froid.

Exemple de revêtement métallique par voie humide :

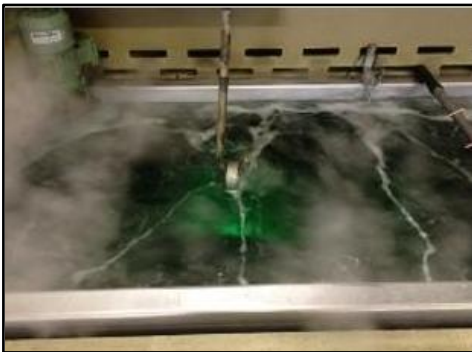


Figure II.5. Bain de nickelage chimique industriel [8].



Figure II.6. Cuivrage des ustensiles de cuisine [9].



Figure II.7. Dorure électrolytique [10].

Par Voie sèche :

- Placage ;
- Projection thermique ;
- Phase vapeur (PVD, CVD) ;
- Rechargement métallique.

II. 7. 1. 2. Revêtement par minéraux (émail)

L'émaillage est un procédé de fabrication consistant à déposer sur un métal, ou un autre support, une couche vitreuse, transparente ou colorée, l'émail. Les pièces émaillées ont une grande durabilité, une grande résistance aux rayures et aux agents chimiques, et sont faciles à nettoyer [11].



Figure II.8.L'émail dentaire [12].



Figure II.9.Casserole en fonte émaillée [13].

II. 7. 1. 3. Revêtement organique (par peinture)

C'est l'un des plus utilisés au monde. Il est principalement composé de matériaux polymères ainsi que de pigments qui donnent la couleur au revêtement.

Le revêtement organique est fabriqué à base de peinture. Le principal avantage de ce type de revêtement demeure dans sa durabilité. Il s'applique sur divers substrats notamment l'acier au carbone, l'acier inoxydable, l'acier au silicium et l'aluminium [14].

II. 7. 1. 3. 1. Composition des peintures

Les principaux constituants sont [14] :

a. Liant et/ou mélange de liants

Partie non volatile du milieu.

b. Pigments

Sous forme de fines particules.

c. Matières de charges

Substances en poudre, pratiquement insolubles dans les milieux de suspension, souvent blanches ou faiblement colorées, employées en raison de certaines de leurs propriétés chimiques ou physiques.

d. Solvant

Constituant liquide ayant la propriété de dissoudre totalement le liant, même à forte concentration.

e. Diluant

Liquide simple, volatil dans des conditions normales de séchage, incorporé en cours de fabrication ou ajouté au moment de l'emploi, pour obtenir les caractéristiques d'application requises sans entraîner de perturbations.

f. Additifs

Substances souvent incorporées à faible dose dans les liants, vernis, peintures pour y développer certaines qualités propres à en améliorer, soit les conditions de fabrication et/ou de conservation et/ou d'application, soit certaines propriétés spécifiques.

II. 8. Traitement par transformation structurale

II. 8. 1. Par voies thermique

Les traitements thermiques se définissent comme étant (l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé) appliqués à des métaux et alliage.

De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance à la corrosion).

En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement) [14].

Les traitements de surface

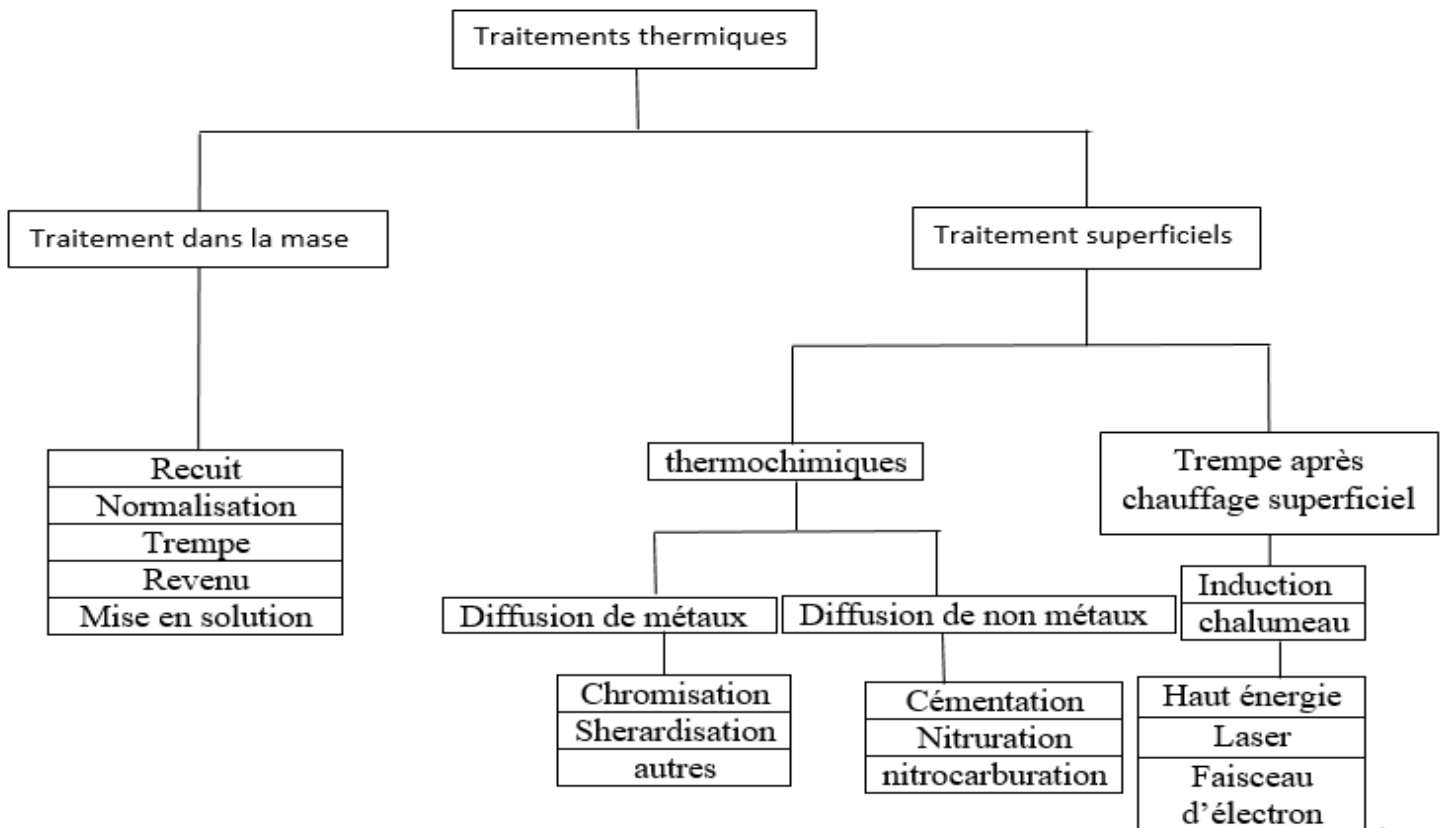


Figure II.10. Schéma de traitement thermique [14].

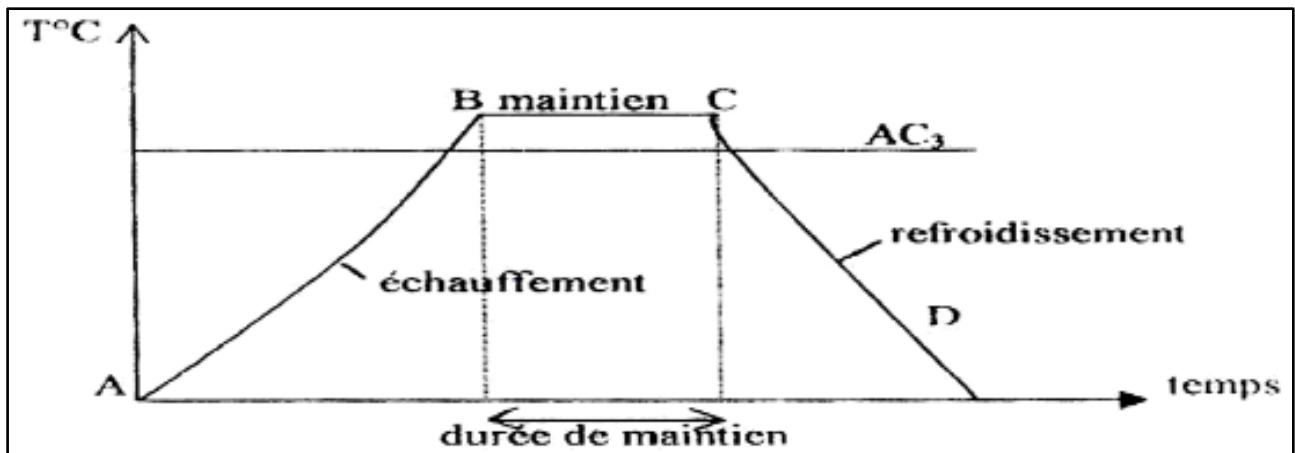


Figure II.11. Diagramme de base de traitement thermique [14].

- AB : l'échauffement a des températures supérieures aux températures de transformation.
- BC : maintient à une température définie.
- CD : refroidissement avec une vitesse donnée :
 - Lent (dans le four à l'air) ;
 - Assez rapide (dans l'huile) ;
 - Très rapide (dans l'eau).

II. 8. 1. 1. La trempe

La trempe consiste à chauffer un matériau à une température dite de changement de phase pendant le temps nécessaire à la transformation de toute la masse chauffée puis à refroidir toute cette masse très rapidement. La trempe peut suivant la composition du matériau s'effectuer à l'air ou dans l'huile... [15].

Influence de la trempe sur les propriétés mécaniques :

- Augmentation de la limite élastique (R_e) ;
- Augmentation de la dureté (H) ;
- Augmentation de la résistance à la rupture (R_r) ;
- Diminution de l'allongement ($A\%$) ;
- Diminution de la résilience (K).

II. 8. 1. 2. Le Revenu

Cette technique se pratique après une trempe, par chauffage à une température inférieure à celle de la trempe. Le revenu a pour but de diminuer les effets de la trempe.

Le revenu permet d'améliorer la ténacité et diminue les tensions internes, en partie responsables de la fragilité de l'acier trempé, en diminuant très peu la dureté [15].

II. 8. 1. 3. Le Recuit

Le recuit est utilisé pour réduire la dureté, augmenter la ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes. L'acier est chauffé pendant un temps plus ou moins long, puis est refroidi lentement [15].

Cette technique se fait aussi après un traitement mécanique, une opération de soudage, etc.

II.8.1.4. Trempabilité (Essai de Jominy)

Il a pour but d'obtenir, en une seule opération sur une éprouvette normalisée des indications globales sur la trempabilité d'un acier, sous forme d'une courbe appelée courbe Jominy [16].

Cet essai est réalisé en trois étapes :

L'austénitisation d'une éprouvette normalisée prélevée dans l'acier à tester. Le refroidissement en bout par un jet d'eau dans des conditions imposées. La mesure de dureté sur un méplat le long d'une génératrice et dont l'usinage ne doit pas provoquer un échauffement excessif.

Les points de mesure de la dureté sont situés à : 1,5 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 - 13 - 15 mm de l'extrémité arrosée et sont désignés par J1,5 - J3 - J5 - Jx [16].

II. 8. 2. Par voies mécanique

II. 8. 2. 1. Le Grenailage

Consiste à projeter à grande vitesse des billes sur la pièce à traiter. On utilise couramment des billes en acier ou céramique.

But de nettoyage (enlèvement de rouille, calamine...). L'opération de grenailage de précontrainte est un traitement mécanique destiné à améliorer les propriétés d'une pièce métallique par durcissement superficiel. On cherche par cette opération à améliorer la résistance à la fatigue et à la corrosion.

II. 8. 2. 1. Le Polissage

Technique de « nettoyage » ou d'abrasion de pièce en métaux. On réalise le polissage grâce à des disques de différents matériaux tournant à grande vitesse, avec ou sans pâte à polir.

Bien réalisé, le polissage permet de renforcer une pièce en supprimant les zones à risques de rupture.

II. 9. Traitement de surface thermochimique

II. 9. 1. Nitruration

C'est une méthode obtenue par diffusion d'azote en surface, suivi d'un refroidissement lent, généralement traitées au préalable par trempe et revenu [17].

Elle donne une plus grande dureté que la cémentation.

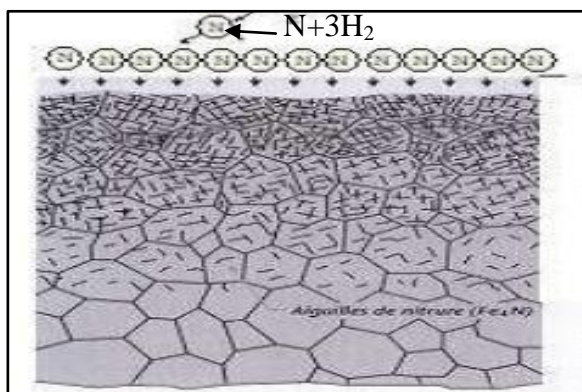


Figure II.12. Schéma de la couche nitrurée [17].

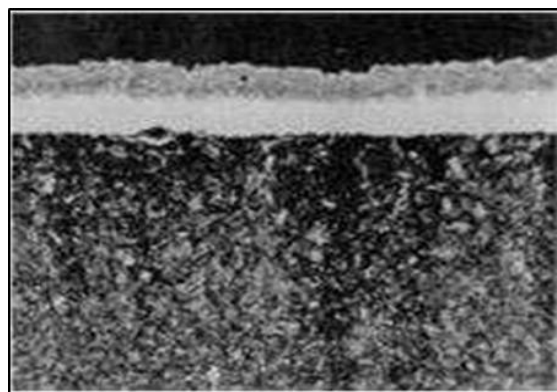


Figure II.13. Microstructure d'une pièce nitrurée [17].

II. 9. 2. Carbonitruration

Ce traitement est un mélange de cémentation et de nitruration.

Apport en surface de carbone et d'azote par chauffage dans une atmosphère gazeuse entre 600 et 900 degrés C. L'opération est généralement suivie par une trempe.

II. 9. 3. Nitrocarburation

La nitrocarburation est une variante du processus de nitruration. Il s'agit d'un processus de diffusion thermochimique où des atomes d'azote, de carbone et, dans une très faible proportion, d'oxygène sont diffusés dans la surface de la pièce en acier, formant une couche de combinaison en surface et une couche de diffusion. Ce processus est réalisé principalement afin d'obtenir une résistance à l'usure de la couche superficielle et améliorer la résistance à la fatigue, car la surface est en compression. Les avantages du processus incluent la capacité de durcir les matériaux qui ne sont pas prétraités, la température relativement basse du processus qui minimise la déformation et le coût relativement économique par rapport à la cémentation.

Les industries concernées par ce type de traitement sont entre autres : pétrole et gaz, soupape, pompe, équipement agricole, automobile, emboutissage, textile, extrusion et moulage par injection et composants d'armes à feu. Les pièces principalement concernées sont : les engrenages et arbres de pignon, les robinets, sièges, billes, tiges, régulateurs, les composants de pompe - pistons, cylindre, les hacheurs de moissonneuse-batteuse, séparateurs, transfert de récolte, composants de coupe, les axes de boîte de vitesse, pièces d'embrayages, pompes à huile de moteur diesel, engrenages, vilebrequins et arbres à cames, etc.

La couche de combinaison est résistante à la corrosion et à l'usure, sans être fragilisée, contrairement à son équivalent dans le processus de nitruration. Étant donné qu'elle fournit une partie essentielle des propriétés requises par le processus, elle ne doit pas être éliminée par rectification ultérieure. En dessous de la couche de combinaison, la couche nitrurée améliore de façon significative la résistance à la fatigue du composant [18].

II. 9. 4. Cémentation

II. 9. 4. 1. But de la cémentation

La cémentation est le plus ancien traitement thermochimique maîtrisé par l'homme pour augmenter la dureté superficielle des pièces en acier. Pour cela, on augmente la teneur superficielle en carbone. La diffusion est toujours suivie de trempe à l'huile pour former des structures dures de martensite dans la couche enrichie [18].

II. 9. 4. 2. Domaine d'application de cémentation

- Pièces d'usinage contenant des éléments tels que : Cr, Mo, Ni, B) ;
- Les arbres, les portées de roulement à bille, les engrenages, les plaques d'usure ;
- Aciers : 8620, 4320, 9310 et 17CrMo/ acier à faible teneur en carbone.

II. 9. 4. 3. Cycle thermique de cémentation

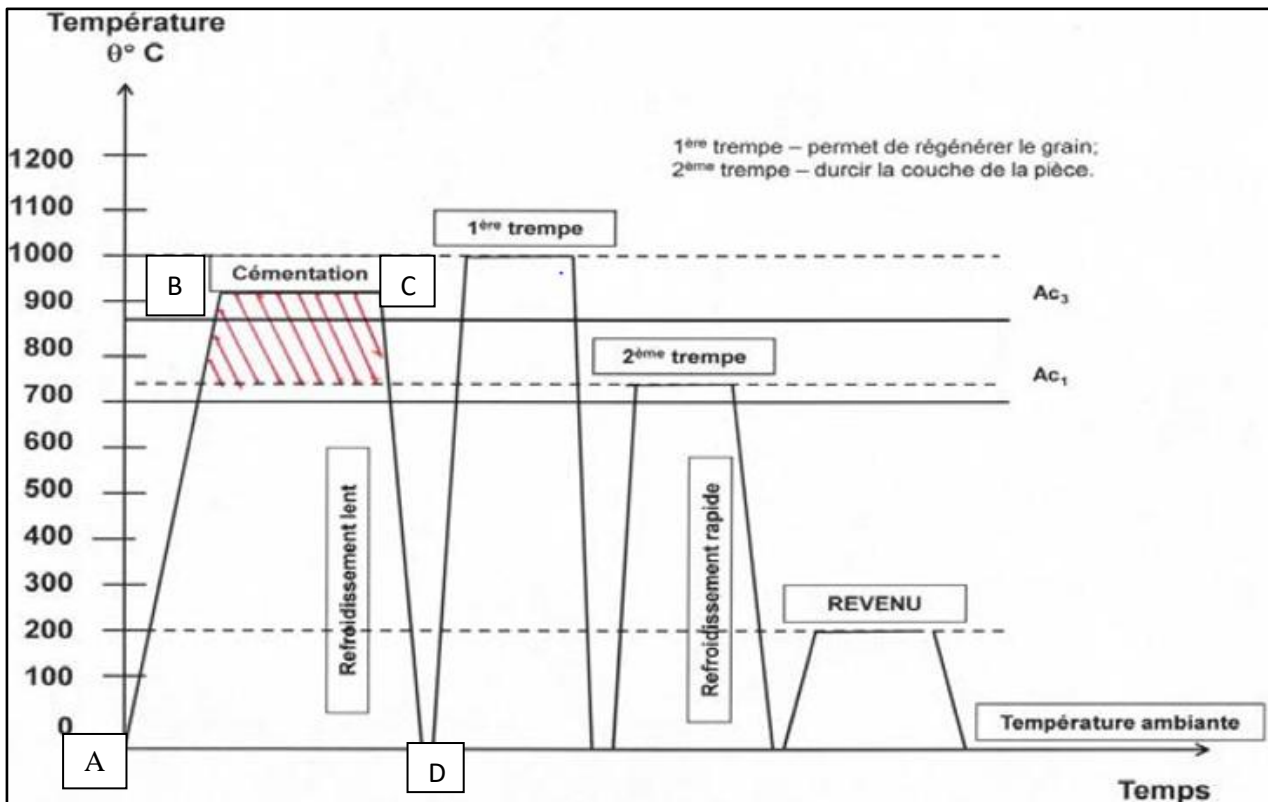


Figure II.14. Diagramme thermique de cémentation [18].

AB : Chauffage ;

BC : Plus une pièce demande une couche cémentée profonde, plus la pièce reste longtemps dans la fournaise, ce qui permet de faire diffuser plus de carbone ;

CD : Pour détendre les contraintes induites par le refroidissement rapide et ajuster la dureté finale, un ou deux revenus sont toujours effectués.

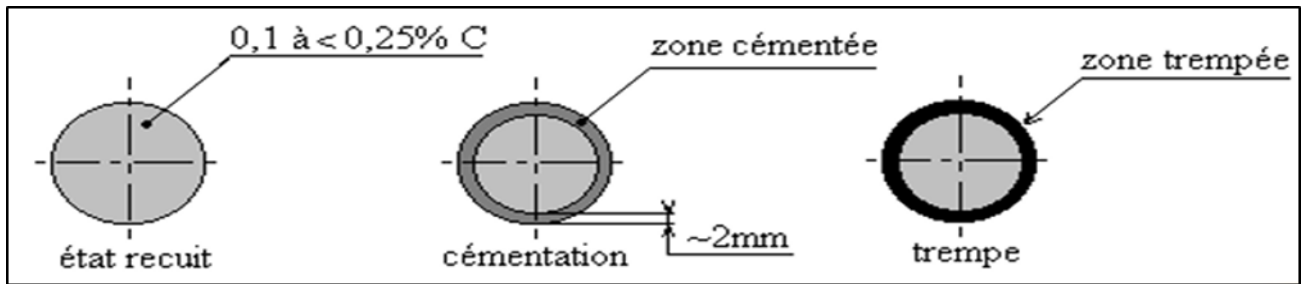


Figure II.15. La couche de cémentée [19].

II. 9. 4. 4. Technologies de chauffe

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

Quelques précautions particulières sont à retenir lors d'un traitement thermochimique de cémentation. Tout d'abord, un nettoyage insuffisant peut entraîner des déformations après trempe pour les raisons qui suivent. Les déformations seront d'autant plus réduites que la profondeur de cémentation et la teneur en carbone seront homogènes. Des résidus d'huile de coupe peuvent constituer un obstacle local à la diffusion du carbone, créant ainsi des points à trempabilité différente. Le soufre contenu dans ces huiles peut modifier l'équilibre thermochimique en abaissant le potentiel carbone. La rouille est aussi un élément qui tend à abaisser ce potentiel carbone. Ensuite, dans certains cas, lors de la préparation des pièces, il faudra appliquer une peinture (Stop-off / No-Carb) pour éviter la déformation à certains endroits [20].

II. 9. 4. 5. Les procédés de cémentation

On distingue trois autres procédés de cémentation, en l'occurrence la cémentation gazeuse, la cémentation dite « sous vide » et la cémentation en caisse.

II. 9. 4. 5. 1. Cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse utilise soit le procédé à l'azote et méthanol, soit le procédé par générateur endothermique. Dans les deux cas, il se forme dans le four une atmosphère composée de monoxyde de carbone et d'hydrogène. L'opération s'effectue entre 900 °C et 950 °C et dure plusieurs heures.

Il s'agit là d'un procédé chimique de traitement superficiel, qui améliore la dureté de la pièce par diffusion de carbone aux couches superficielles, et qui améliore aussi la résistance à l'usure et à la fatigue. Les pièces de fabrication sont maintenues à une température élevée et sont mises en contact avec une atmosphère riche en carbone, de telle sorte que le carbone puisse se diffuser dans les couches superficielles de la pièce. Ce procédé est généralement réalisé dans un four de trempe sous atmosphère au sein duquel les pièces sont immédiatement trempées après le procédé de diffusion pour transformation martensitique.

Les conditions pour produire une atmosphère de potentiel carbone sont générées en ajoutant du gaz enrichi (gaz naturel ou de l'air dilué sur un gaz porteur endothermique pouvant être constitué à 40 % d'azote – 40 % d'hydrogène – 20 % de monoxyde de carbone (CO) – et moins de 0,1 % de dioxyde de carbone (CO₂).

Enfin, la cémentation gazeuse permet de contrôler très exactement la profondeur de cémentation et elle est plus rapide que la cémentation en caisse, car le temps nécessaire pour chauffer le matériel se trouve économisé. Autre avantage, la cémentation peut être suivie par un cycle de diffusion au cours duquel il n'y a pas admission de gaz, ce qui fait baisser la teneur du carbone en surface et permet d'obtenir une meilleure graduation de la couche de cémentation. Ce procédé nécessite toutefois des investissements importants et son emploi ne peut donc être envisagé que pour des traitements de grandes séries de pièces [21].

II. 9. 4. 5. 2. Cémentation basse pression

Les cémentations « basse pression » et « assistée plasma ou ionique » sont utilisées pour le traitement de petites ou moyennes pièces. Elles permettent d'obtenir une bonne qualité de la couche cémentée qui conduit, grâce à l'absence d'oxydation interne, à des caractéristiques de tenue en fatigue supérieures à celles obtenues avec les autres procédés. Il est possible de le réaliser par ce procédé des surcarburations (résistance à l'usure).

Il s'agit d'un procédé relativement moderne utilisé pour cémenter les pièces dans un environnement sans oxydant. Le procédé est réalisé à température élevée dans un four à vide utilisant des gaz pulsés d'hydrocarbure tels que le propane, l'éthylène et l'acétylène en tant que milieu de cémentation. Les avantages principaux sont les suivants : une surface sans oxydant (IGD), une faible distorsion, une bonne finition, une bonne pénétration pour les formes complexes et les trous, des performances de traitement régulières et des temps de traitement améliorés. Ce procédé ne s'applique pas à tous les aciers ; il est principalement utilisé pour les pièces d'injection et de transmission dans les secteurs de l'automobile et de l'aérospatial. Étant donné la pression de trempe

relativement faible, le traitement n'est pas universellement appliqué à tous les types d'alliages et d'aciers. Il existe toutefois des fours sous vide avec trempe à l'huile, et qui sont de plus en plus populaires en termes d'utilisation pour l'exécution de ce traitement [22].

II. 9. 4. 5. 3 .Cémentation en caisse

Ce procédé n'est cité que pour mémoire, il n'est pratiquement plus utilisé industriellement. Le principe est de noyer les pièces à traiter dans un ciment solide à base de charbon de bois,

Le tout étant maintenu dans une caisse fermée portée à la température de cémentation (900 °C et 950 °C). Le ciment est constitué de carbone amorphe, généralement du charbon de bois (provenant de bois sélectionnés, exempts d'écorces) additionné d'un activateur, le carbonate de baryum $BaCO_3$. Il se présente soit sous forme de granulés reconstitués à partir d'un mélange de charbon de bois (60 à 75 %) et de carbonate de baryum (25 à 40 %) en poudre, soit sous forme de morceaux de charbon de bois finement concassés enrobés de carbonate de baryum en présence d'un lait de chaux comme fixateur. En huit heures environ, on obtient une profondeur de cémentation pouvant atteindre 1,6 mm [23].

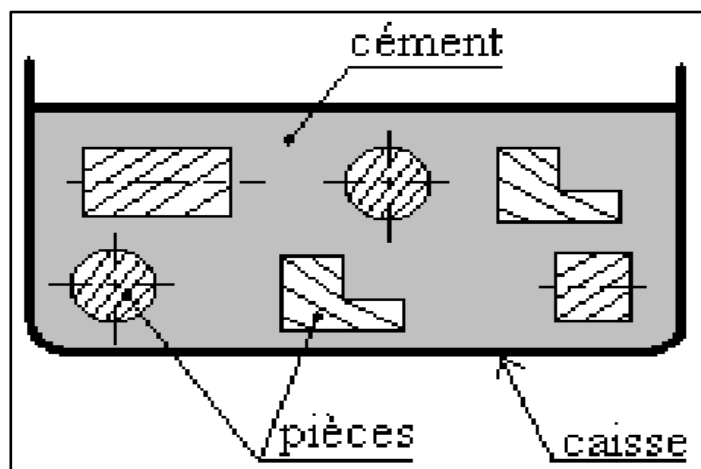


Figure II.16.Cémentation en caisse [23].

II. 10. Traitement de conversion

Les traitements de conversion produisent une couche de combinaison chimique entre le substrat et un réactif. Cette conversion est obtenue par réaction chimique ou par action électrochimique [24].

- La voie chimique comprend les phosphatations et passivations.
- La voie électrochimique comprend les oxydations anodiques des alliages d'aluminium et titane notamment.

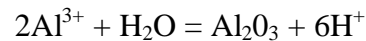
II. 10. 1. Par voie chimique (La Phosphatation)

La phosphatation consiste à décaper la surface d'un acier à l'aide d'une solution diluée et chaude d'acide phosphorique. Cela provoque la formation d'une pellicule d'environ 1 micron de phosphate de fer. Cette pellicule assure la résistance à la corrosion de la pièce [25].

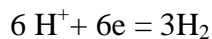
II. 10. 2. Par voie électrochimique

Utilisé surtout pour protéger l'aluminium et alliages d'aluminium (également pour magnésium, titane, inox) [25].

- Cas de l'Aluminium.
- Réaction anodique : dissolution et hydrolyse ;



- Réaction cathodique : dégagement d'hydrogène ;



On obtient des couches de 15 à 20 um dont on contrôle la porosité et la couleur (ajout de pigment).

II. 11. Conclusion

Les traitements de surface constituent une étape essentielle de la conception d'une pièce, en vue de répondre à l'ensemble des propriétés exigées par les conditions d'utilisation.

Les propriétés d'ensemble de la pièce seront améliorées pour un coût souvent raisonnable, en faisant le choix d'un traitement de surface plutôt que de tenter de trouver un autre matériau de base répondant à toutes les exigences.

Les opérations de traitements de surfaces sont effectuées de nos jours par une multitude de petites entreprises sous-traitantes pour le compte de grands groupes industriels dans les domaines : automobile, des bâtiments, aérospatiale, maritime, armement, nucléaire, mécanique....

Références bibliographique (chapitre II)

- [1] S. Nicolas. Réalisation et caractérisation de revêtements épais réalisés par voie sèche destinés à remplacer des dépôts électrolytiques l'université de Strasbourg, 274p.
- [2] J. Henshaw ; G. Armstrong. In Relation to REACH. Document PowerPoint réalisé par l'entreprise GoodRich et RollsRoyce, 14p
- [3] F. Leray ; A. Jacq ; R. Lebreton travail. Etude née de la collaboration entre la Fédération des Services de Santé au Travail et la Carsat de 2009 à 2013, 48p.
- [4] Traitement de surface chrome hexavalent. Etude menée par la Caisse Régionale d'Assurance Maladie d'IleFrance, éditée en 2010, 45p.
- [5] C. Quintelas ; T. Tavares. Solution by a bactériale biofilm supportée de l'université de Minho, publiée en 2001, 5p.
- [6] P. prevention in the chromium electroplating industrie limites d'émissions, 15p.
- [7] M. Trifi. Etude de l'élimination du chrome VI par adsorption sur l'alumine activée par dialyse ionique croisée Manar en 2012, 168.
- [8] Replacement of Toxic Hexavalent Chromium in the Plating Process Faraday Technology, Inc publiée en 2013, 2p.
- [9] C. Berry ; A. McNeely; K. Beauregard; J. Edgar Geddie; Ph.D. chromium for industry ». Etude de N.C. Department of Labor, publiée en 2013, 16p.
- [10] J.-M. BRIGNON ; A. GOUZY. en 2010, 97p.
- [11] Services BODYCOTE – Traitement thermique de la méthode d'implantation ionique utilisée par l'entreprise BODYCOTE. (Brevetée ImplantecR).
- [12] Services BODYCOTE – Traitement des surfaces descriptive de la méthode de projection par combustion utilisée par l'entreprise BODYCOTE.
- [13] Services BODYCOTE – méthode de revêtement K-Tech utilisée par l'entreprise BODYCOTE.
- [14] Services BODYCOTE – méthode Corr.-I-DurR utilisée par l'entreprise BODYCOTE. (Brevetée).
- [15] Termier-SP - DURCISSEMENT DE SURFACE ALLIAGES. Fiche technique concernant la méthode par diffusion d'atome brevetée par le groupe TERMI-LYON.
- [16] C. HOLTERBACH surfaces de Christophe holterbacha guide to hexavalent C – Projection par Combustion descriptive Traitement des surfaces Traite Corr.-I-Dur. Fiche descriptive de l'acier inoxydable Les Traitements de Surface. Cours sur les traitements de (CETIM-CERMAT).
- [17] D. Ghiglione, Claude Leroux et Christian Tournier, -Pratique des traitements thermo-chimiques-, Éditions techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques.
- [18] F. Bächle. et P. Niemz., « Traitement thermique du bois », WSL, 2011.

Références bibliographique (chapitre II)

- [19] M. Dupeux, « Aide-mémoire de science des matériaux », Dunod, 2005.
- [20] T. Kootz, Arch. Eisenhüttenweis, vol. 15, 1941.
- [21] A. H. Satir - Kolurz et H. K. Feichtinger, Z. Metallkde, Bd. 82, H. 9, 1993.
- [22] C. H. Lupis, Chemical Thermodynamics of Materials, North-Holland, New-York, 1983.
- [23] J. Kunze, "Nitrogen and carbon in steel- Thermodynamics" Akademie- Verlag Berlin 1990.
- [24] R. J. Brigham et J. S. Kirkaldy, Trans. AIME, vol. 227, 1963.
- [25] A. J. Kechler et P. G. Wicell, Trans. AIME, vol. 227, 1963.

Chapitre III

Etude expérimentale de Cémentation-Trempabilité

Chapitre III : Etude expérimentale de Cémentation-Trempabilité.

III. 1. Introduction	56
III. 2. Matériau étudié (acier (90 MnCrW4))	56
III. 3. Préparation d'éprouvettes.....	56
III. 4. Techniques de cémentation	57
III. 5. Technique de trempabilité.....	58
III. 6. Préparation des éprouvettes E₁ et E₂ après la trempabilité.....	60
III. 6. 1. Le découpage	60
III. 6. 2. Le Polissage	61
III. 6. 2. 1. Pratique succincte du polissage	61
III. 6. 3. L'attaque chimique.....	62
III. 7. Analyse chimique des éprouvettes E₁ et E₂.....	63
III. 7. 1. Epreuve E ₁ cémentée avec CP =0.5%	63
III. 7. 2. Epreuve E ₂ cémentée avec CP=0.8%	64
III. 8. Caractérisation métallographique	65
III. 8. 1. Microscope optique	65
III. 8. 2. Microstructure de la couche superficielle de l'éprouvette E ₁	66
III. 8. 3. Microstructure de la couche superficielle de l'éprouvette E ₂	66
III. 8. 4. Les différentes zones de trempabilité en E ₁ et E ₂	67
III. 8. 4. 1. Microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E ₁	67
III. 8. 4. 2. Microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E ₁	68
III. 8. 4. 3. Microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E ₁	69
III. 8. 4. 4. Microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E ₁	69

Sommaire

III. 8. 5. Microstructure de différentes zones de l'éprouvette E ₂	70
III. 8. 5. 1. Microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E ₂	70
III. 8. 5. 2. Microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E ₂	70
III. 8. 5. 3. Microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E ₂	71
III. 8. 5. 4. Microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E ₂	72
III. 9. Essai de dureté	72
III. 9. 1. La dureté de l'éprouvette E ₁	74
III. 9. 2. La dureté de l'éprouvette E ₂	74
III. 10. Conclusion	75

Liste des figures (chapitre III)

Figure III.1. Dessin d'éprouvette de trempabilité.....	57
Figure III.2. Machine de tournage.....	57
Figure III.3. Diagramme de cycle de cémentation.....	58
Figure III.4. Four de cémentation gazeuse.....	58
Figure III.5. Four d'austinisation.....	59
Figure III.6. Essai de Jominy de l'éprouvette de Jominy.....	59
Figure III.7. Diagramme du cycle de trempabilité.....	60
Figure III.8. La machine de tronçonnage.....	61
Figure III.9. Papier abrasif.....	62
Figure III.10. Machine de plissage.....	62
Figure III.11. La solution d'attaque chimique.....	63
Figure III.12. Spectromètre à émission optique.....	63
Figure III.13. Évolution de la quantité du carbone dans la couche cémentée de E1.....	64
Figure III.14. Évolution de la quantité du carbone dans la couche cémentée de E2.....	64
Figure III.15. Microscope optique.....	65
Figure III.16. L'épaisseur de la couche superficielle cémentée de l'éprouvette E ₁	66
Figure III.17. L'épaisseur de la couche superficielle cémentée de l'éprouvette E ₂	67
Figure III.18. Les défèrent zone de l'éprouvette de trempabilité E ₁ et E ₂	67

Liste des figures (chapitre III)

Figure III.19. La microstructure de l'acier 90 MCrW4 de l'éprouvette E ₁ zone N°01.....	68
Figure III.20. La microstructure de l'acier 90 MCrW4 de l'éprouvette E ₁ zone N°02.....	68
Figure III.21. La microstructure de l'acier 90 MCrW4 de l'éprouvette E ₁ zone N°03.....	69
Figure III.22. La microstructure de l'acier 90 MCrW4 de l'éprouvette E ₁ zone N°04.....	69
Figure III.23. La microstructure de l'acier 90 MCrW4 de l'éprouvette E ₂ zone N°01.....	70
Figure III.24. La microstructure de l'acier 90 MCrW4 de l'éprouvette E ₂ zone N°02.....	71
Figure III.25. La microstructure de l'acier 90 MCrW4 de l'éprouvette E ₂ zone N°03.....	71
Figure III.26. La microstructure de l'acier 90 MCrW4 de l'éprouvette E ₂ zone N°04.....	72
Figure III.27. D'uroomètre Rockwell.....	73
Figure III.28. Diagramme de dureté de trempabilité de l'éprouvette E ₁	74
Figure III.29. Diagramme de dureté de trempabilité de l'éprouvette E ₂	75

Liste des tableaux (chapitre III)

Tableau III.1. Évolution de la quantité du carbone de l'acier 90 MnCrW4.....	56
Tableau III.2. Paramètres opératoires de cémentation.....	57

III. 1. Introduction

L'objectif de ce travail expérimental est de mettre en évidence l'effet de la vitesse de refroidissement (trempabilité) après un traitement de cémentation des éprouvettes E₁ et E₂ en acier 90 MnCrW4 pour différents potentiels du carbone (CP). Nous avons étudié les propriétés mécaniques (la dureté HRC) et structurales de l'acier 90 MnCrW4 dans 04 zones en fonction de la vitesse de trempabilité.

III. 2. Matériau étudié (acier (90 MnCrW4))

Le matériau étudié dans ce travail est l'acier 90 MnCrW4 qui appartient aux aciers fortement alliés à grand teneur en carbone (C=0.90%) pour un traitement thermique. Il possède une très bonne résistance à l'usure. L'acier 90MnCrW4 comporte des compositions chimiques de base généralement équilibrées pour lui conférer une solide propriété mécanique.

Eléments	Composition chimique en %
C	0.95
Mn	1.2
Cr	0.6
W	0.55
Si	0.23
Ni	0.11
V	0.10
Fe	96.15

Tableau III.1. Évolution de la quantité du carbone de l'acier 90 MnCrW4.

III. 3. Préparation d'éprouvettes

Nous avons élaboré deux éprouvettes de trempabilité E₁ et E₂ en acier 90 MnCrW4. Les éprouvettes que nous avons utilisées dans notre étude pour faire nos essais sont issus de barreau cylindrique, de 25 mm de diamètre avec une tête de 30mm de diamètre, de nuance.

Les éprouvettes ont été découpées à l'aide d'une machine de tournage (découpage à chaud) indiquée dans la figure (III.1). Le découpage se fait en présence d'eau pour éviter une hausse de température, nous évitons ainsi en conséquence le changement de la structure. Les éprouvettes cémentées ont été découpées dans le sens parallèle au flux de carbone, afin de pouvoir observer les microstructures induites par ce flux.

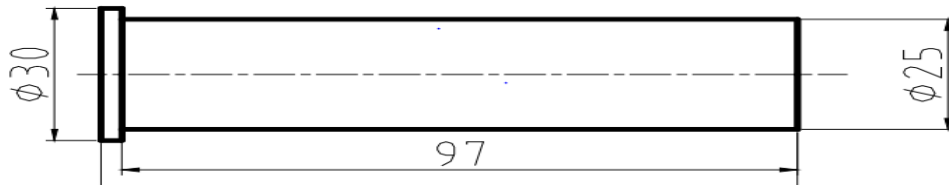


Figure III.1. Dessin d'éprouvette de trempabilité.



Figure III.2. Machine de tournage.

III. 4. Techniques de cémentation

La cémentation consiste à enrichir la couche superficielle des éprouvettes E₁ et E₂ en acier 90 MnCrW4 en variant le débit du carbone et avec un temps de cémentation constant (voir le tableau III.2) par une technique moderne de plasma carboné en méthane. Pour cette étude, les cycles de traitement de cémentation comprennent les étapes suivantes :

Eprouvette	Débit de carbone	Durée de cémentation	Durée de diffusion du carbone	Température de cémentation
E ₁	0.5%	4 heures	1 heures	910°C
E ₂	0.8%	4 heures	1 heures	910°C

Tableau III.2. Paramètres opératoires de cémentation.

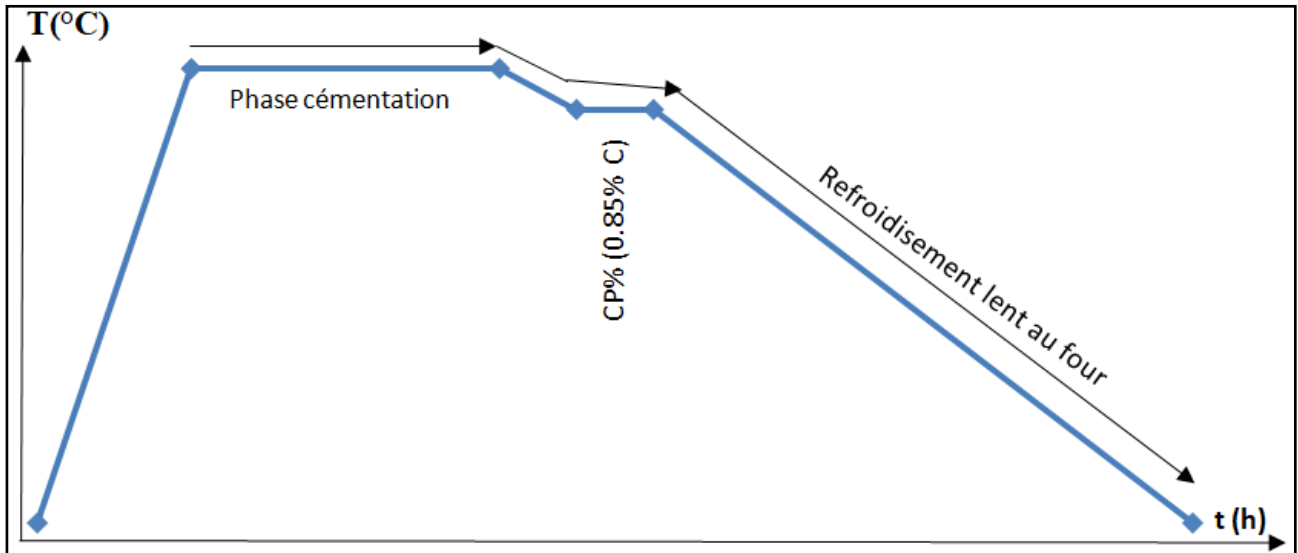


Figure III.3. Diagramme de cycle de cémentation.



Figure III.4. Four de cémentation gazeuse.

III. 5. Technique de trempabilité

Après un traitement de cémentation des E_1 et E_2 en acier 90 MnCrW4 en variant le débit du carbone et avec un temps de maintien constant $t=4$ heures, et pour étudier l'effet de la vitesse de refroidissement depuis la température d'austénitisation $T=850^{\circ}\text{C}$ en utilisant la technique Jominy (trempabilité) en suivant les étapes suivantes :

- Réchauffage des éprouvettes E_1 , E_2 jusqu'au domaine austénitique $T_1=850^{\circ}\text{C}$, pour une durée de 50 minutes ;

- Refroidir la base inférieure de ces éprouvettes, tenue à l'aide d'un support approprié, par un jet d'eau courante de température comprise entre $T_2=15$ à 25°C jusqu'à son refroidissement total par conduction durant 10 minutes.



Figure III.5. Four d'austénisation.

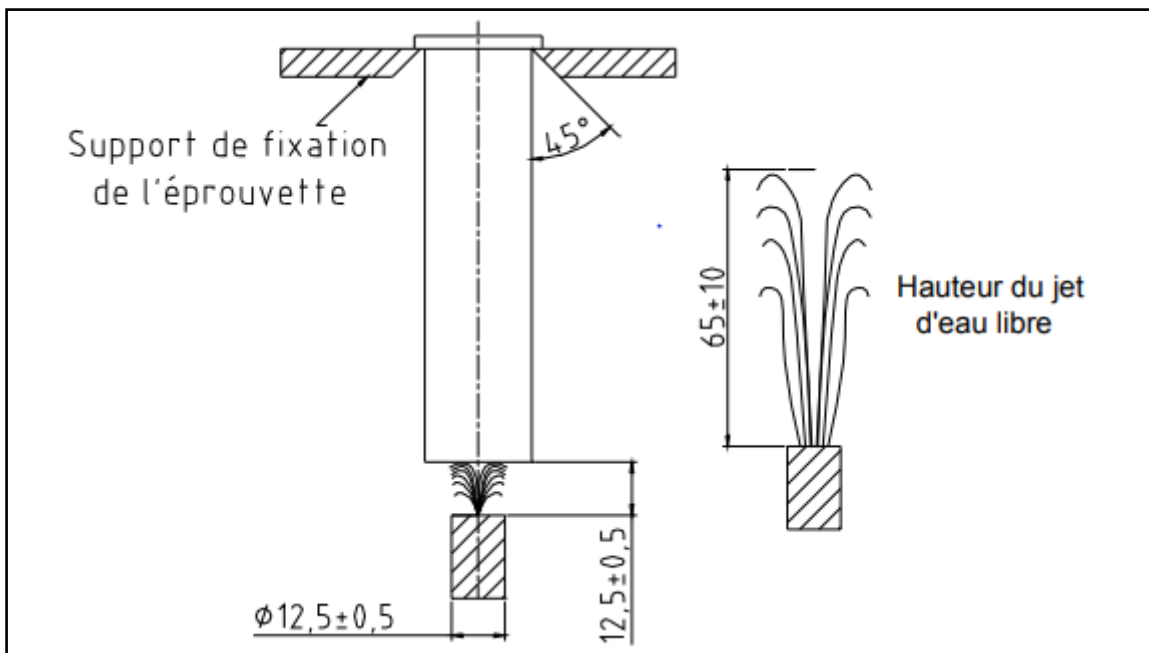


Figure III.6. Essai de Jominy de l'éprouvette de Jominy.

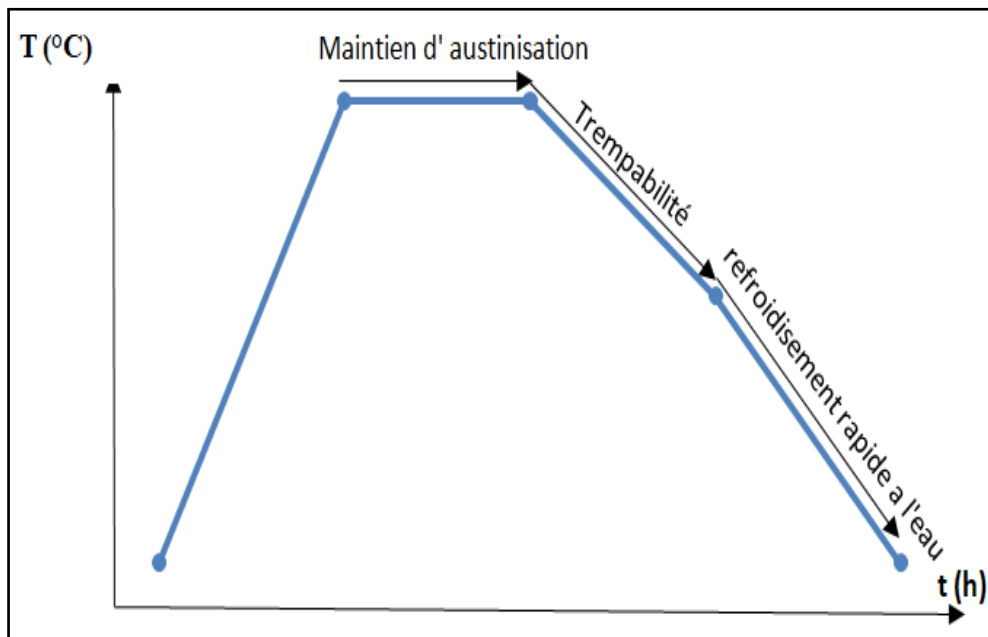


Figure III.7. Diagramme du cycle de trempabilité.

III. 6. Préparation des éprouvettes E_1 et E_2 après la trempabilité

III. 6. 1. Le découpage

Après un traitement de cémentation et de trempabilité, la première étape consiste à enlever la tête supérieure des éprouvettes E_1 et E_2 pour couper les pièces longitudinalement à l'aide d'une tronçonneuse présentée dans la figure III.8, elle est utilisée pour découper des éprouvettes de faibles dimensions par un découpage au jet d'eau (pour éviter tout échauffement des pièces). Ensuite, L'éprouvette subissent une rectification plane pour l'essai de dureté, un polissage mécanique se terminant lorsque la surface est en état miroir. Les éprouvettes sont ensuite attaquées en vue d'observer leurs structures et leurs couches superficielles au microscope métallographique qui permet de révéler la structure et la profondeur de la couche cémentée et les différentes zones structurales qui sont obtenues après cémentation-trempabilité. On va voir tout cela aux étapes suivantes :



Figure III.8. La machine de tronçonnage.

III. 6. 2. Le Polissage

Ce travail expérimental a pour objectif de présenter une courte introduction dans les techniques de polissage et d'attaque chimique, pour l'étude métallographie.

Opération de polissage avec du papier verre avec un grain de différente grosseur tel que :

- Indice grand = petit grain ou grain fin ;
- Indice petit = gros grain du papier.

Ou le numéro derrière le papier verre implique le nombre de grain par unité de surface. On a commencé par le papier p120 puis p320 ; p400 ; p600 ; p800 ; p1200 ; p2400 ; p4000 et lors du polissage, on verse de l'eau la lubrification et l'évacuation des copeaux.

Le but de ce polissage est d'enlever les oxydes et les déchets sur la surface et de donner une surface polie. Le polissage modifie les surfaces préparées, (finesse du polissage), c'est-à-dire la micro géométrie de surface, Un élément de quelques dixièmes de millimètre est toléré pour un dégrossissage au papier. Par contre, les éléments plus fins exigent un polissage miroir (appelé poli spéculaire).

III. 6. 2. 1. Pratique succincte du polissage

Les appareils peuvent être très simples : un marbre en matière dure et indéformable pour le polissage manuel (mouvements linéaires allié et retour), ou bien des disques tournants. Les éprouvettes étant tenus à la main (polissage semi-automatique) ou tenus par un bras mécanique tournant ou vibrant (polissage automatique).

Les papiers abrasifs de grosseur décroissante sont utilisés pour le pré-polissage avec aspersion d'eau permettant de limiter l'échauffement et d'éliminer les copeaux et abrasifs usés. Dans le cas où l'échantillon est tenu à la main, il est utile de croiser les raies en passant d'un grade de papier à un autre afin d'observer la disparition des raies produites par le papier précédent.



Figure III.9. Papier abrasif.



Figure III.10. Machine de plissage.

III. 6. 3. L'attaque chimique

Une fois le polissage fin est terminé, nous procédons au bon nettoyage des pièces avec l'eau distillée et du coton et on met des gouttes d'alcool éthanol (C_2H_5OH) pour éviter l'oxydation d'eau (la corrosion) puis on les sèche bien, lorsque on termine on les met dans une solution d'attaque (96 % d'alcool éthanol C_2H_5OH + 4 % de nitrate HNO_3) pendant (25seconde) au cours de cette attaque une fine couche est formée sur la surface avec un certain épaisseur en fonction de la composition chimique de notre matériau (90 MnCrW4). Finalement un lavage des pièces pour la deuxième fois et on remet des gouttes d'alcool éthylique, on les sèche pour la dernière fois sans les toucher.



Figure III.11. La solution d'attaque chimique.

III. 7. Analyse chimique des éprouvettes E_1 et E_2

L'analyse chimique des éprouvettes a été réalisée grâce à l'utilisation d'une spectrométrie d'émission optique à source étincelle couplée à un ordinateur (voir la figure III.12), afin de déterminer les pourcentages de chaque élément contenu dans l'échantillon de l'acier 90 MnCrW4 avant et après cémentation. Ainsi, les informations obtenues sont envoyées à l'ordinateur qui traite les données à l'aide d'un programme afin d'identifier les éléments qui composent l'échantillon et de calculer les concentrations de ces éléments dans la couche superficielle de l'acier 90 MnCrW4 avant et après cémentation.



Figure III.12. Spectromètre à émission optique.

III. 7. 1. Eprouvette E_1 cémentée avec $CP = 0.5\%$

On constate que la quantité du carbone dans la couche superficielle cémentée durant 4 heures avec un potentiel du carbone $CP=0.5\%$ de l'éprouvette E_1 est augmentée de $C=0,90\%$ à $C=0,98\%$ à l'effet de l'absorption et de la diffusion du carbone de l'atmosphère carbonée à la surface de l'acier 90 MnCrW4 pendant le traitement de cémentation.

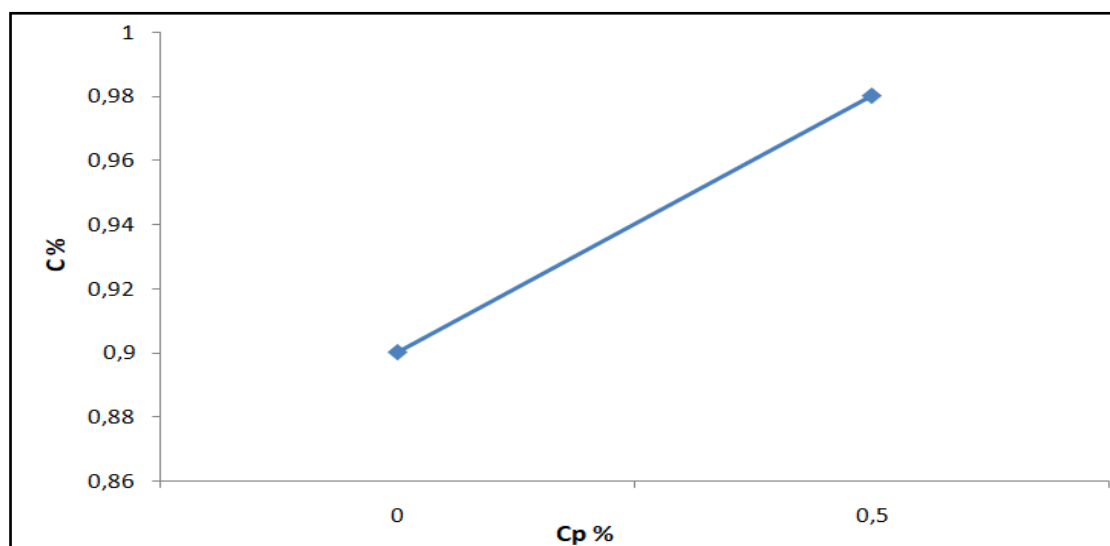


Figure III.13. Évolution de la quantité du carbone dans la couche cémentée d'E₁.

III. 7. 2. Epreuve E₂cémentée avec CP=0.8%

Après l'analyse chimique, on constate que la quantité du carbone devient plus élevée C=1.01% à cause de la continuation de l'absorption et de la diffusion du carbone de la source carbonée avec un CP= 0.8%. La trempabilité après un traitement de cémentation avec CP plus grand permet d'augmenter les carbures à la superficiel de l'éprouvette E₂, a conséquences de présence des éléments d'alliage (Mn-Cr-W).

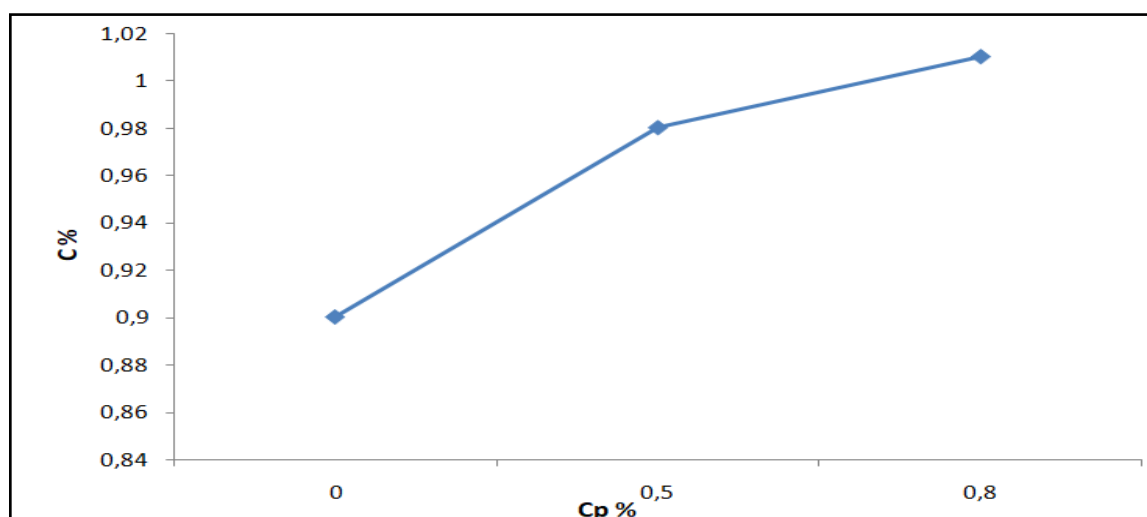


Figure III.14.Évolution de la quantité du carbone dans la couche cémentée d'E₂.

Après les résultats obtenus de l'analyse chimique des éprouvettes E₁ et E₂cémentées et trempées, nous concluons que la quantité du carbone augmente en fonction de l'augmentation du débit de carbone.

III. 8. Caractérisation métallographique

Le traitement thermochimique de cémentation modifie la structure globale de la couche superficielle des éprouvettes E_1 et E_2 traitées. Donc, nous allons analyser les changements structuraux provoqués par la trempabilité après le traitement de cémentation, en utilisant un microscope optique, et on va examiner la microstructure des couches et des zones formées après la cémentation-trempabilité.

III. 8. 1. Microscope optique

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (grossissement) et de séparer les détails de cette image afin qu'il soit observable à l'œil nu. Le but de l'examen métallographique des métaux et des alliages est de définir leur structure avec précision, c'est à dire de déterminer qualitativement la nature, la forme et la répartition de leurs constituants.

Les éprouvettes sont observés à l'aide d'un microscope optique (voir la figure III.15), muni de 5 objectifs ($\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 50$, $\times 100$) et grandissement totale oculaire ($\times 10000$). Équipé d'un appareil photo numérique, de longueur focale de 29 mm et de 7.0 giga-pixels. Cela nous permet d'avoir des différents grossissements en utilisant le zoom de l'appareil et les objectifs du microscope. La nature des microstructures obtenues après cémentation dépend de la répartition du carbone dans la couche et de la vitesse de refroidissement (trempabilité). Ces observations permettent d'évaluer qualitativement l'état de la microstructure des éprouvettes E_1 et E_2 , les différents constituants pouvant être observés sont les suivants : martensite, austénite résiduelle, carbures Fe_3C , bainite et ferrite [1].

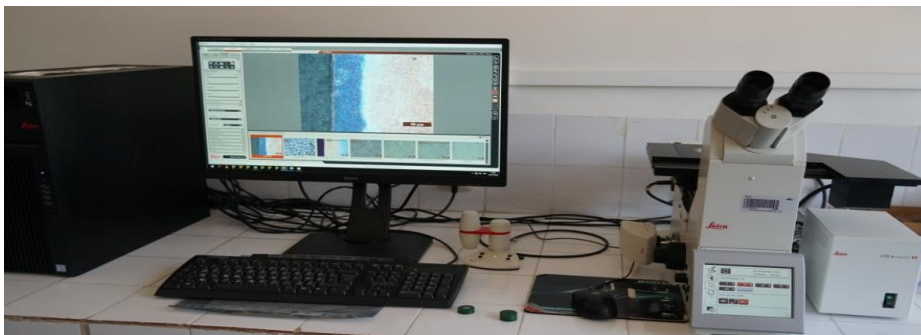


Figure III.15. Microscope optique.

III. 8. 2. Microstructure de la couche superficielle de l'éprouvette E₁

Après cémentation avec un CP=0.5% et trempabilité de l'éprouvette E₁, On observe une couche superficielle riche en carbone avec une profondeur moyenne mesurée $P_m=362.700\mu\text{m}$ (voir la figure III.16 ci-dessous). Une couche n'est pas assez grande, à cause d'un faible enrichissement et de diffusion du carbone d'une source carbonée à la surface de la pièce. Il est également observable que les carbures sont concentrés dans la superficielle de l'éprouvette E₁.

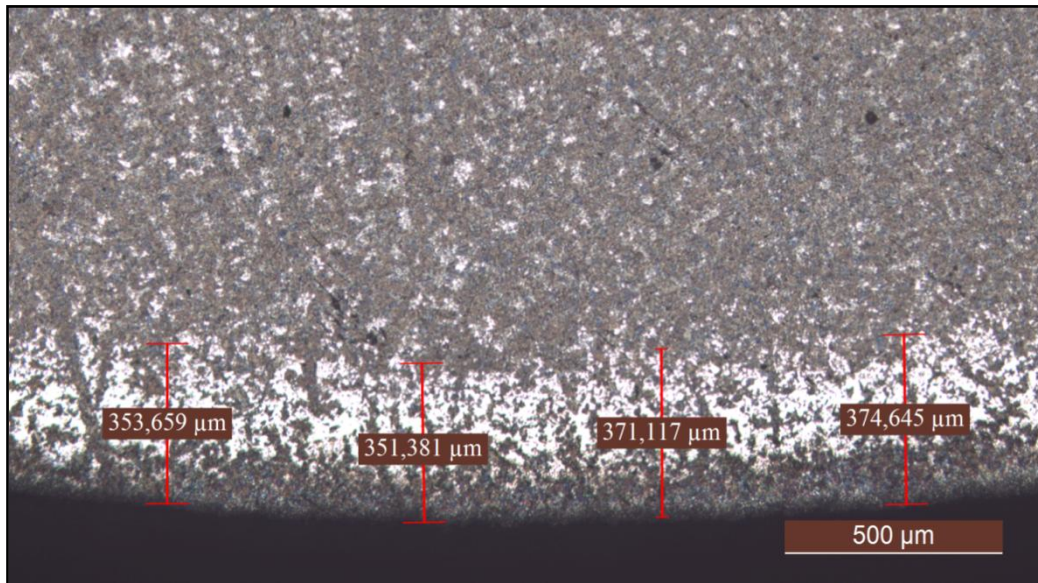


Figure III.16. Profondeur de la couche superficielle cémentée de l'éprouvette E₁.

III. 8. 3. Microstructure de la couche superficielle de l'éprouvette E₂

Après une cémentation à un CP=0.8% suivie d'une trempabilité, on observe que la profondeur de la couche superficielle cémentée devient plus grande par rapport celle de E₁ car la diffusivité du carbone dans l'austénite augmente en fonction de l'augmentation du débit de carbone et vice versa. La profondeur moyenne mesurée dans l'éprouvette E₂ est $P_m=948.202\mu\text{m}$ (voir la figure III.17 ci-dessous). En outre, on observe une augmentation progressive de la concentration superficielle en carbone du solide (en blanc).

Les résultats de la microstructure montrent que les profondeurs des couches cémentées augmentent avec l'augmentation du débit de carbone (CP) qui est l'un des principaux facteurs influençant sur le traitement de cémentation. La trempabilité permet d'augmenter la quantité des carbures dans la surface de l'acier 90 MnCrW4 en E₁ et E₂.

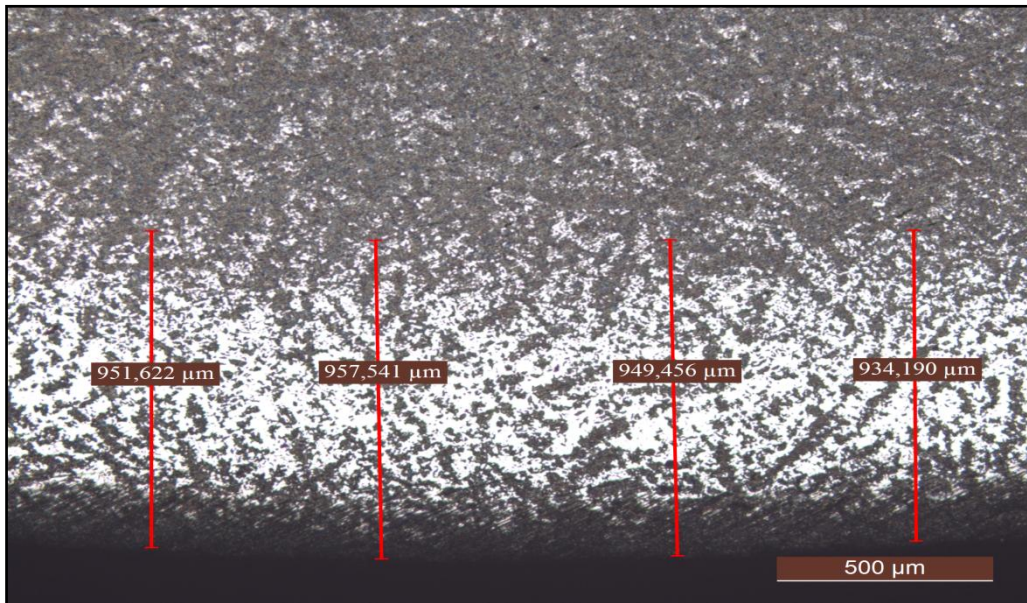


Figure III.17. Profondeur de la couche superficielle cémentée de l'éprouvette E₂.

III. 8. 4. Les différentes zones de trempabilité en E₁ et E₂

Les éprouvettes E₁ et E₂ sont réparties en 4 zones selon la vitesse de refroidissement durant l'essai de Jominy (trempabilité) (voir la figure III.18).

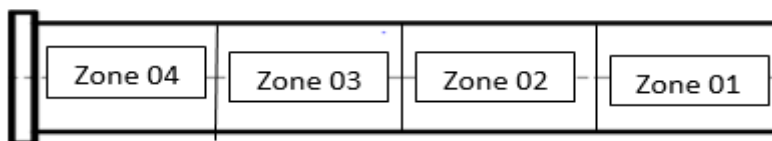


Figure III.18. Les différentes zones de trempabilité en E₁ et E₂

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

III. 8. 4. 1. Microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E₁

La première zone est refroidie directement par l'eau, pour cela, la vitesse de refroidissement est très élevée. On observe une structure martensitique en présence d'une quantité considérable de carbures en blanc (voir la figure III.19).

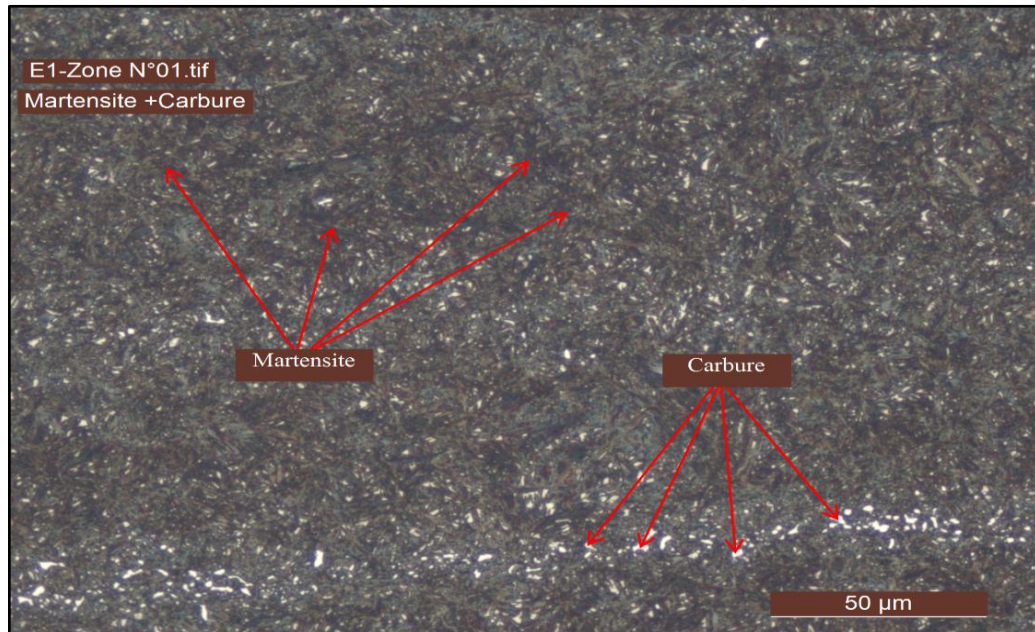


Figure III.19. La microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E₁.

III. 8. 4. 2. Microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E₁

A l'effet d'un refroidissement moyen par conduction, la zone 02 présente une structure mixte de martensite + carbures+ bainite. La vitesse de refroidissement n'est pas assez rapide, ce qui permet de la composition du bainite (voir la figure III.20).



Figure III.20. La microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E₁.

III. 8. 4. 3. Microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E₁

Lorsqu'on s'éloigne de la zone 01, la vitesse du refroidissement devient lente et la structure de la zone 03 compose d'une structure mixte de bainite-ferrite en présence de carbures car la quantité du carbone dans surface est élevée.

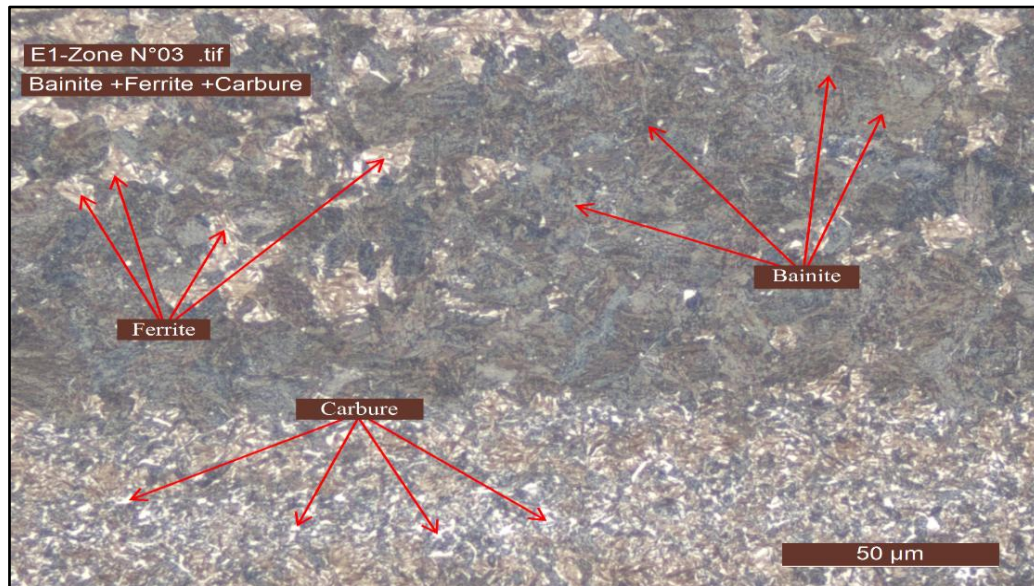


Figure III.21. La microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E₁.

III. 8. 4. 4. Microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E₁

La zone 04 présente la vitesse de refroidissement la plus lente, avec l'apparence de troostite mixte avec de ferrite qui n'est pas transformée lors de trempabilité. La zone 04 présente de traces de carbures de fers (Fe₃C) ou d'autres carbures de Cr ou de W.

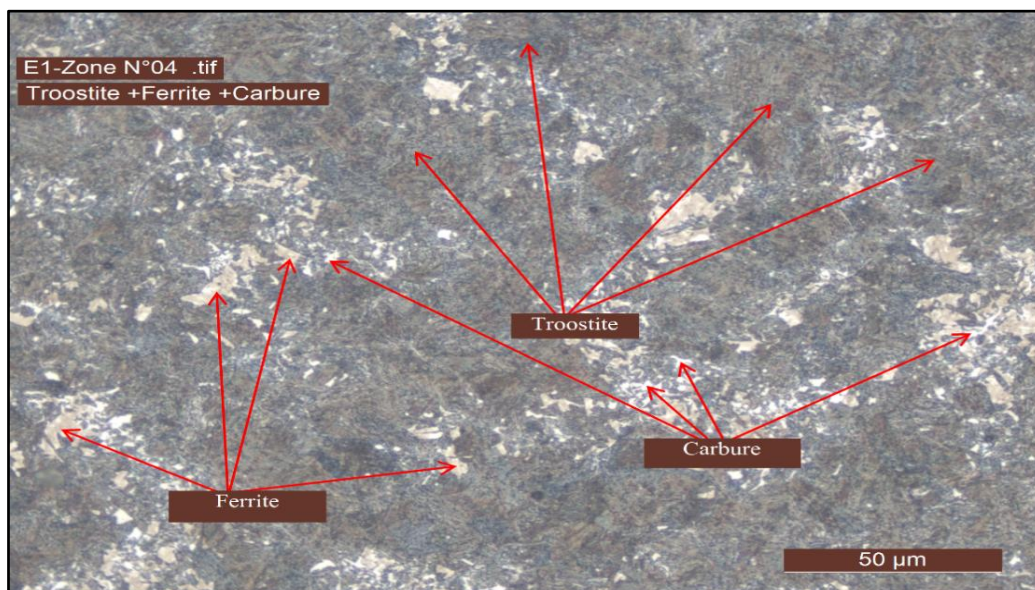


Figure III.22. La microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E₁.

D'après les résultats des structures composées, on constate que la vitesse de refroidissement a une influence directe sur la structure transformée après cémentation-trempabilité.

III. 8. 5. Microstructure de différentes zones de l'éprouvette E₂

III. 8. 5. 1. Microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E₂

La première zone est refroidie directement par le jet d'eau, pour cela la vitesse de refroidissement est plus élevée. On observe la composition d'une structure mixte de martensite sous forme aiguille, et de carbures en quantité élevée en blanc. Les carbures composés dans la zone 01 sont des carbures de fer, chrome et de tungstène (voir la figure III.23).



Figure III.23. La microstructure de la zone 01 de l'éprouvette E₂.

III. 8. 5. 2. Microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E₂

La zone 02 est refroidie par conduction de la zone 01. La structure transformée après un refroidissement depuis la phase austénitique est composée de martensite + bainite + carbures. Le début de l'apparence de la bainite dans cette zone due d'un refroidissement lent (voir la figure III.24).

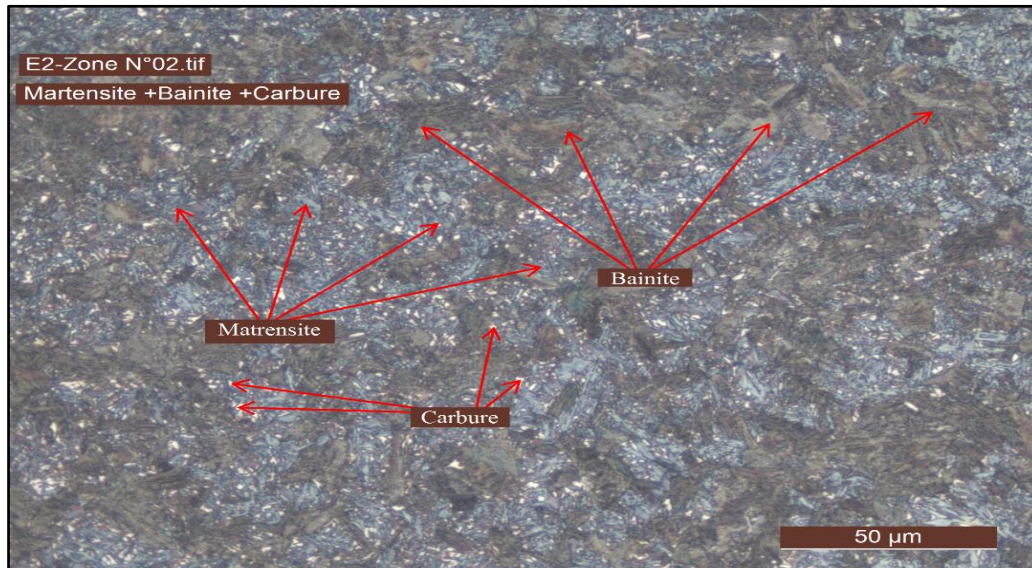


Figure III.24. La microstructure de la zone 02 de l'éprouvette E₂.

III. 8. 5. 3. Microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E₂

La figure III.25 présente la zone 03 de l'éprouvette E₂, on constate que la structure composée après cémentation-trempabilité depuis la phase austénitique est une structure mixte de martensite + bainite + ferrite. La transformation de toute quantité d'austénite en ferrite et en bainite à la vitesse de refroidissement qui reste par conduction.

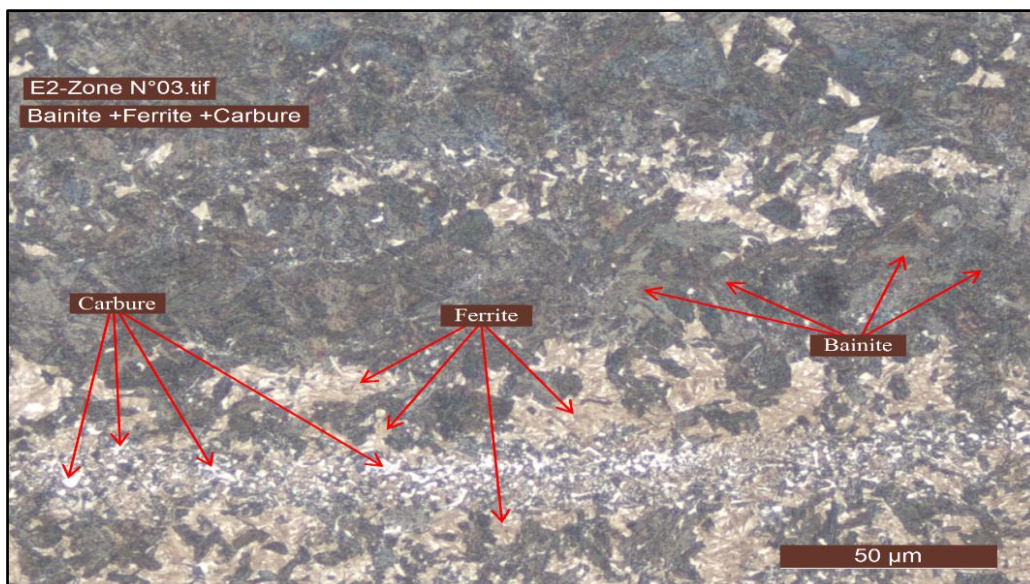


Figure III.25. La microstructure de la zone 03 de l'éprouvette E₂.

III. 8. 5. 4. Microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E₂

La vitesse de refroidissement par conduction dans la zone 04 a permis à la formation de troostite mélangé avec ferrite et des carbures de fer, chrome ou de tungstène depuis la phase austénitique.

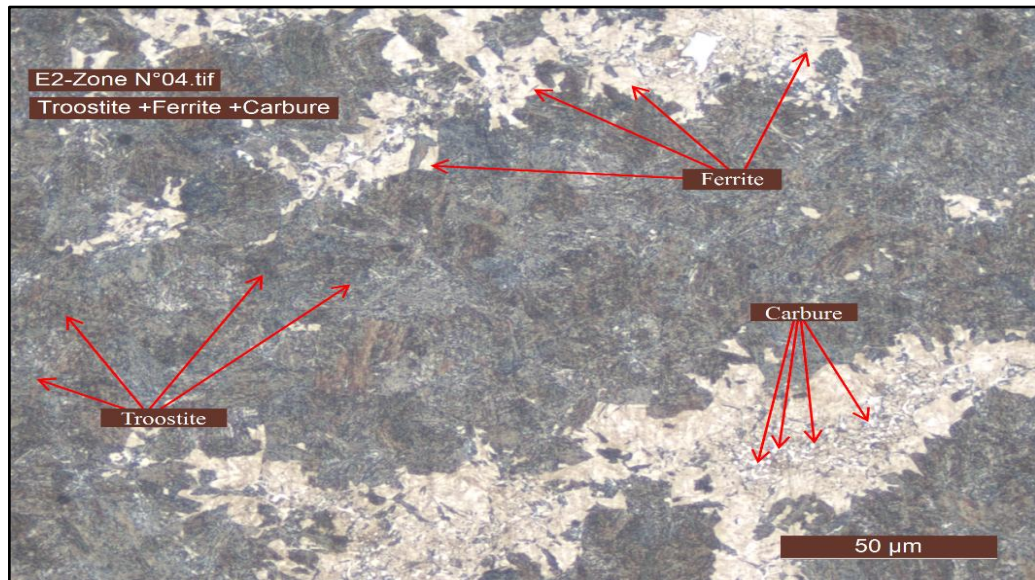


Figure III.26. La microstructure de la zone 04 de l'éprouvette E₂.

D'après les résultats obtenus des microstructures dans les différentes zones en E₁ et E₂ selon la vitesse de refroidissement de la phase austénitique, on constate que la couche superficielle cémentée augmente en fonction de l'augmentation du débit de carbone(CP). La vitesse de refroidissement par Conduction diminue lorsqu'on s'éloigne de la zone 01. La zone 04 présente l'absence totale de martensite en E₁ et E₂.

III. 9. Essai de dureté

La dureté est l'un des moyens essentiels nécessaire au métallurgiste pour caractériser un traitement thermique. La dureté est la capacité d'une matière à résister à la pénétration d'une matière plus dure qu'elle. Elle est aussi déterminée par sa résistance aux rayures. Le diamant constitue le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, un peu moins.

Mesure de la dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux, donnée en méga-pascal (MPa) puisqu'elle est le rapport d'une force en Newton (N) sur une surface calculée en millimètres carrés (mm²), mais, par convention ce chiffre sera sans dimension. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau on donne quelques échèles : essais Brinell, Rockwell et Vickers le symbole de dureté est respectivement HB, HR, HV [2].

- Essais Vickers, qui consiste à appliquer dans le matériau un pénétrateur diamant en forme de pyramide à basse carrée, d'angle au sommet 136° , sous l'action d'une charge F maintenue pendant 15 secondes, et à mesurer la diagonale d d'une empreinte après enlèvement de la charge. La dureté Vickers est proportionnelle au rapport F/S . Elle s'exprime par un nombre sans unité, HV, suivi de la valeur de la charge, par exemple : 255 HV 30. La dureté Vickers (HV) est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1,854 * F / D^2$$

Où :

F : est la charge appliquée en N :

D : la diagonale de l'empreinte en mm.

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

Cet essai est appliqué principalement aux métaux, mais peut l'être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges [3].



Figure III.27. Duromètre.

III. 9. 1. La dureté de l'éprouvette E₁

La figure III.28 montre le profil de dureté obtenue dans l'éprouvette E₁ après cémentation-trempabilité. On remarque que le premier point à 1.5mm de bord présente la dureté la plus élevée qui est de l'ordre de 65HRC. La valeur élevée de la dureté dans la première zone sont obtenues par l'effet de trempé après la diffusion d'une quantité importante du carbone dans la phase austénitique et par la suite, la transformation de l'austénite en martensite et la formation de carbures. Lorsqu'on s'éloigne de la zone 01, les valeurs de duretés sont décroissantes jusqu'au dernier point qui présente la zone 04 avec une valeur minimale de l'ordre de 45HRC en conséquence d'une faible transformation de l'austénite en martensite car le refroidissement est lent (transfert thermique par conduction) ce qui permet de la formation de troostite et ferrite.

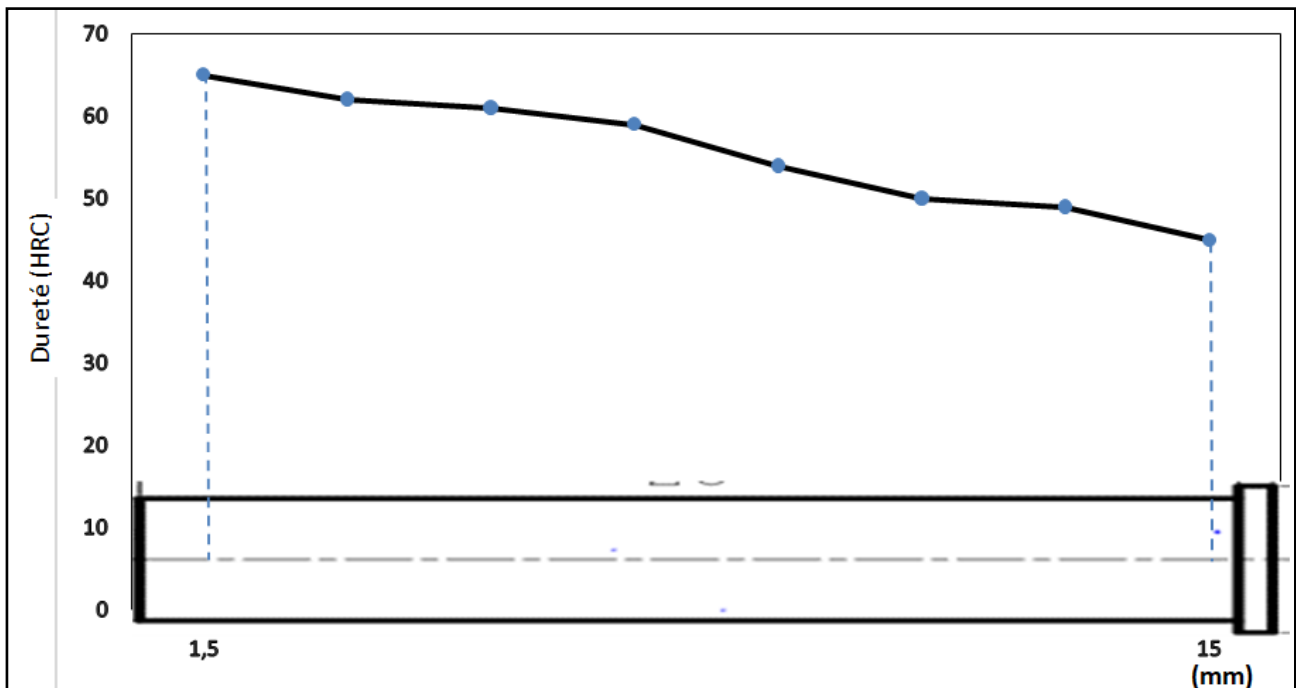


Figure III.28. Diagramme de dureté de trempabilité de l'éprouvette E₁.

III. 9. 2. La dureté de l'éprouvette E₂

La figure III.29 montre le profil de dureté obtenue dans l'éprouvette E₂ après cémentation-trempabilité. On remarque que le premier point à 1.5mm de bord présente la dureté la plus élevée qui est de l'ordre de 71HRC. La valeur élevée de la dureté dans la première zone sont obtenues par l'effet de trempé après la diffusion d'une quantité importante du carbone dans la phase austénitique avec CP=0.8% et par la suite, la transformation de l'austénite en martensite et la formation de carbures. Lorsqu'on s'éloigne de la zone 01, les valeurs de duretés sont décroissantes jusqu'au dernier point qui présente la zone 04 avec une valeur minimale de l'ordre de 45HRC en conséquence d'une faible transformation de l'austénite en martensite car le

refroidissement est lent (transfert thermique par conduction) ce qui permet de la formation de troostite et ferrite.

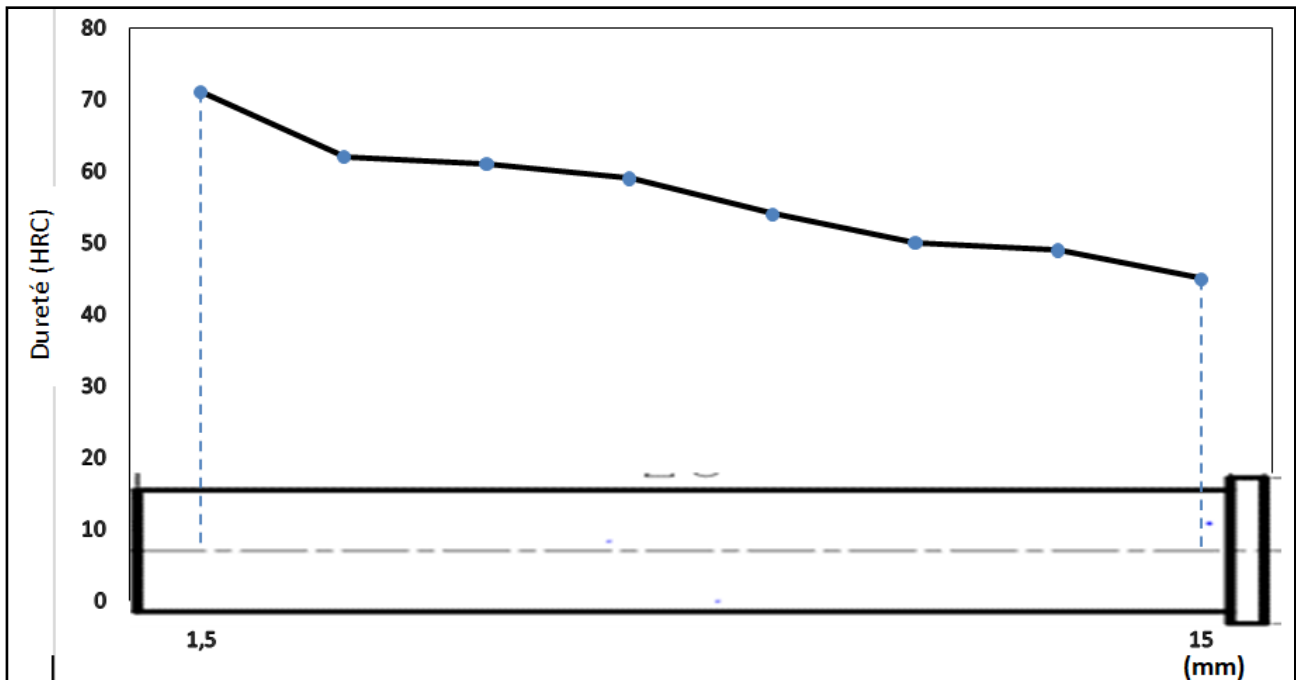


Figure III.29. Diagramme de dureté de trempabilité de l'éprouvette E₂.

III. 10. Conclusion

Nous concluons que les propriétés mécaniques de l'acier 90 MnCrW4 sont modifiées après cémentation-trempabilité et que le débit du carbone est parmi les paramètres opératoires qui ont une grande influence sur le traitement de cémentation.

- 1) La quantité du carbone diffusée à la surface de l'acier 90 MnCrW4 et la profondeur de la couche cémentée sont proportionnelles au potentiel du carbone;
- 2) La vitesse de refroidissement influe directement sur la morphologie de l'acier 90 MnCrW4;
- 3) Chaque zone présente des propriétés mécaniques et structurales distinctes;
- 4) Les valeurs de la dureté sont décroissantes de zone 01 vers la zone 04.

Références bibliographique (chapitre III)

- [1] R-baleh (flambage plastique quasi-statique et dynamique de structures tubulaires métalliques sous sollicitations simple et complexe-système d'absorptions d'énergie-via un nouveau dispositif expérimental) 2004.
- [2] J-barralis et gérardmeader (Précis métallurgique, afnor nathan), Paris 2000.
- [3] J.R. davis (surface hardening of steels -understanding the basics); asm international, 2002.
- [4]G.a (lausmann, electrodeposited hard chromium, surface and coatings technology) 86-87 (1996).
- [5]R.quatremeretj.phtigno (précis de construction mécanique, dessin conception et normalisation) 7^{eme} édition, afnor nathan.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

D'après notre étude, nous concluons que les propriétés structurales et mécaniques de l'acier 90 MnCrW4 sont modifiées après cémentation-trempabilité et que le potentiel du carbone a une influence significative sur la cémentation.

- 1) La quantité du carbone diffusée à la surface de l'acier 90 MnCrW4 et la profondeur de la couche cémentée sont proportionnelles au potentiel du carbone (CP) ;
- 2) La cémentation n'améliore pas les propriétés de l'acier 90 MnCrW4 sans passer par la phase de refroidissement (trempabilité) ;
- 3) La trempabilité a permis de transformer la structure de base après un chauffage jusqu'à la phase austénitique ;
- 4) Les structures transformées dans les différentes zones des éprouvettes E_1 et E_2 sont dépendants de la vitesse de refroidissement ;
- 5) Les valeurs de la dureté sont décroissantes de zone 01 (refroidie par jet d'eau) vers la zone 04 (refroidie par conduction depuis la zone 01) ;

Finalement, l'essai de Jominy nous a permis d'étudier l'influence de la vitesse de refroidissement depuis la phase austénitique après un traitement thermo-chimique de cémentation de l'acier 90MnCrW4.