



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE «ABBES LAGHROUR» DE KHENCHELA  
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

## Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité :** Génie Mécanique

**Option :** Génie Mécanique et Productique

# Influence des traitements thermochimiques sur l'état de surface des aciers

Par:

- REDDAH Ilias
- LAGHA Ali

Devant le jury

DJEBAILI Hamid	Professeur	Université Abbés laghrou	Président
GHELANI Laala	MCA	Université Abbés laghrou	Examineur
TOUATI Sofiane	MCB	Université Abbés laghrou	Encadreur

## Remerciements

### *Remerciement*

*Tout d'abord nous remercions le bon Dieu tout puissant de la santé, de la volonté, la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre cursus.*

*Nous tenons à remercier très vivement :*

*Notre encadreur : Dr \*Touati sofiane \* pour son aide qui nous a fait aimer notre travail.*

*Je remercie aussi le Professeur DJEBAILI Hamid, et le docteur Ghilani Laala (MCA) pour l'intérêt qu'ils ont accordé à notre travail et pour avoir accepté d'être examinateurs de notre mémoire.*

*Je remercie également toute l'équipe du de l'usine 'ECMK', qui m'a apporté leur aide lors de la réalisation de mes essais.*

*N'oublions pas de remercier les enseignants de l'université Abbés LAGHROUR et toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de cette étude.*

***Reddah Ilias***

## Remerciements

### *Remerciement*

*Je loue Dieu tout puissant qui m'a donné force et Courage pour  
achever ce travail.*

*Je remercie particulièrement notre encadrant Touati Sofiane*

*Je remercie aussi le Professeur DJEBAILI Hamid, et le docteur  
Ghilani Laala (MCA) pour l'intérêt qu'ils ont accordé à notre  
travail et pour avoir accepté d'être examinateurs de notre mémoire.*

*Je remercie également toute l'équipe du de l'usine 'ECMK', qui m'a  
apporté leur aide lors de la réalisation de mes essais.*

*Un grand merci à :*

*Ceux que personne ne peut compenser les sacrifices qu'ils ont  
consentis pour mon éducation et mon bien-être : Mes très chers  
parents Sans oublier Mon épouse, Mon fils, tous mes frères*

*Tous mes amis sans exception*

*Et L'équipe de Génie Mécanique*

***Lagha Ali***

# **RESUME**

### **ملخص :**

ان الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المعالجات الكيميوحرارية (الكربنة) على خشونة سطح فولاذ منخفض الكربون XC10 في هذه الدراسة اخترنا العمل مع هذا الفولاذ لانه موجه في أغلب الأحيان الى الكربنة و استجابته الكبيرة لها المعالجة الكيميوحرارية في هذه الدراسة تمت تحت تغيير درجة الحرارة ، زمن المعالجة و تدفق الكربون من أجل اجراء تحليل لبعض الخصائص الميكانيكية و الميغالوغرافية. أظهرت النتائج ان هذه المعالجة تحسن في خشونة السطح للفولاذ. ولترتيب هذه العوامل او المتغيرات الأكثر فعالية في عملية الكربنة تطرقنا لدراسة احصائية تعالج نتائج دراستنا. و في الأخير تم استخلاص المعالجة الأفضل لأفضل خشونة سطح.

**الكلمات المفتاحية** الفولاذ، الكربنة، درجة الحرارة، زمن المعالجة، تدفق الكربون ، خشونة السطح.

### **Abstract:**

The aim of this work is to study the influence of the thermochemical treatments (carburizing) on the surface roughness of the low carbon steel XC10.

In this study we have choose this steel because it is destined to carburizing treatment and because of his aptitude for it.

The thermochemical treatment in this study was carried out under the conditioning parameters: temperature, holding time and carbon flow, in order to analyze the some mechanical and metallographic structures changes after the processing.

The results obtained show that there is amelioration in the surface roughness steel after carburizing process, and to determine the most efficient setting in the carburizing process we realized a statistic study. Finlay we could conclude the optimum carburizing treatment regime for the optimal surface roughness.

**Keywords:** steel, carburizing, temperature, holding time, carbon low, surface roughness.

### **Résumé :**

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des traitements thermochimiques (cémentation) sur l'état de surface un acier de faible teneur en carbone XC10.

Dans cette étude nous avons choisi cet acier grâce à sa grande aptitude de cémentation et parce qu'il est souvent destiné à ce genre de traitement

Le traitement thermochimique dans cette étude a été réalisé en variant ses paramètres : la température, le temps de maintien et le débit de carbone ; dans le but de faire une analyse métallographique et une analyse des caractéristiques mécaniques.

Les résultats obtenus après le traitement ont montré que ce procédé thermochimique influence sur l'état de surface des aciers. Et pour trier l'efficacité de ces paramètres, on s'est soutenu d'une étude statistique qui traite nos résultats. Enfin on a pu conclure le régime de traitement optimal pour une meilleure rugosité.

**Mots clés :** acier, cémentation, température, temps de maintien, débit de carbone, rugosité.

## **Table de matière**

<i>Introduction générale</i> :.....	1
<b>CHAPITRE I : ACIERS, TRAITEMENT THERMIQUE ET RUGOSITE (SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE)</b> .....	3
<b>I.1 NATURE ET PROPRIETES DES ACIERS</b> :.....	4
I.1.1 Introduction :.....	4
I.1.2 Les aciers : .....	4
I.1.3 Les propriétés Mécanique des aciers : .....	4
<b>I.2 LES TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES</b> :.....	5
I.2.1 Introduction :.....	5
I.2.2 Cémentation :.....	6
I.2.3 Techniques de cémentation :.....	7
I.2.4 Profondeur cémentée : .....	9
I.2.5 Traitements thermiques après la cémentation :.....	9
I.2.6 Aciers pour cémentation : .....	10
I.2.7 Le diagramme d'équilibre fer-carbone : .....	10
I.2.8 Les alliages fer-carbone :.....	11
I.2.9 La constitution des aciers au carbone : .....	11
<b>I.3 L'ETAT DE SURFACE</b> :.....	14
I.3.1 Introduction :.....	14
I.3.2 Paramètres de mesure des irrégularités.....	15
I.3.3 Les paramètres de la rugosité :.....	19
I.3.4 Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface : .....	21
I.3.5 Inscription normalisée d'un état de surface : .....	21
<b>I.4 Conclusion</b> .....	22
<b>Chapitre II : PREPARATION DES EXPERIENCES</b> .....	23
<b>II.1 Introduction</b> : .....	24
<b>II.2 Objectifs</b> :.....	24
<b>II.3 Environnement expérimental</b> :.....	24
II.3.1 Matériau d'étude : .....	24
II.3.2 Préparation des échantillons pour le traitement : .....	25
II.3.3 Technique de traitement thermochimique et thermique :.....	25
II.3.4 Caractérisation d'état de surface des échantillons après traitement :.....	27
II.3.5 Préparation des échantillons après traitement : .....	28
II.3.6 Caractérisation des couches cémentées par dureté :.....	30

II.3.7	Caractérisation des couches cimentées par analyse chimique : .....	31
II.4	Conclusion : .....	31
	<b>CHAPITRE III : RESULTAT DES EXPERIENCES, TRAITEMENT ET ANALYSES .....</b>	<b>32</b>
III.1	Introduction.....	33
III.2	Analyse de la variance ANOVA.....	34
III.2.1	Analyse de la variance ANOVA pour de la Dureté .....	34
III.2.2	Analyse de la variance ANOVA pour l'épaisseur de la couche cimentée .....	35
III.2.3	Analyse de la variance ANOVA pour la rugosité Ra .....	35
III.3	Analyse de la régression linéaire .....	36
III.3.1	Analyse de régression de la dureté .....	36
III.3.2	Analyse de régression de l'épaisseur EP .....	36
III.3.3	Analyse de régression de la rugosité Ra.....	36
III.4	Les graphes résiduels .....	36
III.4.1	Les graphes résiduels de la dureté .....	36
III.4.2	Les graphes résiduels de l'épaisseur EP .....	37
III.4.3	Les graphes résiduels de l'épaisseur Ra .....	38
III.5	Graphique des effets paramètres du traitement pour les réponses.....	38
III.5.1	Graphique des effets paramètres du traitement pour la dureté .....	38
III.5.2	Graphique des effets paramètres du traitement pour la l'épaisseur EP .....	39
III.5.3	Graphique des effets paramètres du traitement pour la rugosité Ra.....	39
III.6	Graphiques de surface.....	40
III.6.1	Graphiques de surface pour la Dureté .....	40
III.6.2	Graphiques de surface pour l'épaisseur de la couche EP .....	41
III.6.3	Graphiques de surface pour la rugosité Ra.....	43
III.7	Effet de débit de carbone sur la composition chimique du matériau.....	44
III.8	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites.....	45
III.8.1	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la dureté .....	45
III.8.2	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour l'épaisseur.....	45
III.8.3	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la rugosité .....	46
III.9	Optimisation multi-réponses : .....	46
III.10	Conclusion .....	47
	<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>51</b>

# **LISTE DES FIGURES**

## Liste des figures du chapitre I :

<b>Figure I.1</b> Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe [15].....	8
<b>Figure I.2</b> Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier SUS 316 L [16]. .....	8
<b>Figure I.3</b> profondeur conventionnelle de cémentation [17].....	8
<b>Figure I.4</b> Le diagramme de phase fer-carbone [1].....	11
<b>Figure I.5</b> La solution solide d'insertion .....	12
<b>Figure I.6</b> Micrographie représentant de la ferrite .....	12
<b>Figure I.7</b> Micrographie représentant de l'austénite .....	13
<b>Figure I.8</b> La molécule de cémentite (ou carbure de fer) .....	13
<b>Figure I.9</b> Micrographie représentant de la cémentite globulaire après un traitement de sphéroïdisation .....	13
<b>Figure I.10</b> Motif de rugosité [21].....	16
<b>Figure I.11</b> Exemple de détermination des motifs de rugosité.....	16
<b>Figure I.12</b> Exemple de détermination des motifs d'ondulation.....	16
<b>Figure I.13</b> Ligne moyenne du profil. ....	17
<b>Figure I.14</b> Définitions des paramètres liés à la courbe de portance.....	19
<b>Figure I.15</b> : rugosité moyenne Ra .....	19
<b>Figure I.16</b> : Hauteur maximale moyenne Rz. ....	20
<b>Figure I.17</b> : Hauteur maximale du profil Rt.....	21
<b>Figure I.18</b> : Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface.....	21
<b>Figure I.19</b> : symbole graphique de l'état de surface. ....	22
<b>Figure I.20</b> : Symbolisation.....	22

## Liste des figures du chapitre II :

<b>Figure II.1:</b> spectromètre SPECTROMAX.....	24
<b>Figure II.2</b> : Tour parallèle.....	25
<b>Figure II.3</b> : Echantillons primaires .....	25
<b>Figure II.4</b> : Rectifieuse plane. ....	25
<b>Figure II.5:</b> chaine de traitement thermique SOLO. ....	26
<b>Figure II.6</b> : Poste de mesure combiné MarSurf XCR 20.....	28
<b>Figure II.7</b> : Machine de fil coupant ONA et échantillon secondaire.....	28
<b>Figure II.8</b> : Polisseuse mécanique+ Machine de polissage fin.....	29
<b>Figure II.9</b> : Procédé d'attaque chimique.....	29
<b>Figure II.10</b> : Equipement de microscope optique Leika.....	30
<b>Figure II.11</b> : Duromètre SHANDONG YEXIAN HR 150 A.....	31

## Liste des figures du chapitre III :

<b>Figure. III.1</b> La droite de Henry pour la dureté. ....	37
<b>Figure. III.2</b> La droite de Henry pour EP.....	37
<b>Figure. III.3</b> La droite de Henry pour EP.....	38
<b>Figure III.4</b> l'effet des paramètres (D, T, TM) sur la dureté.....	38
<b>Figure III.5</b> l'effet des paramètres (D, T, TM) sur EP.....	39
<b>Figure III.6</b> l'effet des paramètres (D, T, TM) sur Ra .....	40
<b>Figure III.7</b> Effet de l'interaction du débit de carbone et le temps de maintien sur la dureté. ....	40
<b>Figure III.8</b> Effet de l'interaction du débit de carbone et temps de maintien sur la dureté .....	41

<b>Figure III.9</b>	Effet de l'interaction de la température et le temps de maintien sur la dureté. ....	41
<b>Figure III.10</b>	Effet de l'interaction du débit de carbone et la température sur EP. ....	42
<b>Figure III.11</b>	Effet de l'interaction du débit de carbone et temps de maintien sur EP.....	42
<b>Figure III.12</b>	Effet de l'interaction de la température et temps de maintien sur EP .....	43
<b>Figure III.13</b>	Effet de l'interaction du débit de carbone et la température sur Ra. ....	43
<b>Figure III.14</b>	Effet de l'interaction du débit de carbone et temps de maintien sur Ra.....	44
<b>Figure III.15</b>	Effet de l'interaction de la température et temps de maintien sur Ra. ....	44
<b>Figure III.16</b>	Effet de débit de carbone sur le composant chimique (C).....	45
<b>Figure III.17</b>	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la dureté. ....	45
<b>Figure III.18</b>	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour EP. ....	46
<b>Figure III.19</b>	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour Ra.....	46
<b>Figure III.20</b>	Optimisation des paramètres de cémentation .....	47

# **LISTE DES TABLEAUX**

## Liste des tableaux du chapitre I :

<b>Tableau I.1</b> Les propriétés mécaniques de l'acier selon le taux de carbone. [1] .....	5
<b>Tableau I.2</b> Ordres de grandeur des irrégularités géométriques [21].....	15
<b>Tableau I.3</b> Classement pratique des différents écarts géométriques [21].....	15
<b>Tableau I.4</b> Principaux paramètres liés aux motifs [23]. .....	17
<b>Tableau I.5</b> Principaux paramètres liés à la ligne moyenne [23]. .....	18
<b>Tableau I.6</b> Principaux paramètres liés à la courbe de portance [23]. .....	19

## Liste des tableaux du chapitre II :

<b>Tableau II.1:</b> composition chimique de l'acier XC10.....	25
<b>Tableau II.2:</b> Paramètres de traitement. ....	26

## Liste des tableaux du chapitre III :

<b>Tableau III.1</b> Attribution des niveaux de facteurs .....	33
<b>Tableau III.2</b> : Matrice de planification pour un plan de 09 essais .....	34
<b>Tableau III.3</b> Analyse de la variance ANOVA pour la dureté(HRC). .....	34
<b>Tableau III.4</b> Analyse de la variance ANOVA pour EP.....	35
<b>Tableau III.4</b> Analyse de la variance ANOVA pour Ra.....	35
<b>Tableau III .5</b> Combinaison optimale. ....	47

# **INTRODUCTION GENERALE**

## *Introduction générale*

Les traitements thermiques dans la masse améliorent les propriétés mécaniques des aciers, mais ils s'accompagnent d'une diminution de leur ténacité. Or, pour de nombreuses utilisations, ce sont surtout les propriétés des surfaces qui sont importantes (dureté superficielle et résistances à l'usure, par exemple) Dans ces cas, il est donc préférable de ne traiter que la surface de la pièce, afin que son cœur, de résistance moyenne, conserve une bonne ténacité. Le résultat est une modification de la constitution physico-chimique d'une zone superficielle de faible épaisseur de quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres tout en préservant les propriétés de la zone centrale. On distingue dans la pratique, deux types de traitement de surface : les trempes superficielles, appliquées uniquement à la surface des pièces, et les traitements thermo-chimiques, qui modifient la composition de la surface. Dans les deux cas toutefois, la pièce traitée est hétérogène, car, entre le cœur et la surface, il s'établit un gradient de structure et de propriétés.

La qualité de surface est une exigence essentielle des consommateurs en raison de son impact sur la performance des produits. Les caractéristiques des surfaces usinées ont une influence significative sur la capacité d'un matériau à résister aux contraintes de température, de frottement et à la corrosion.

Des travaux ont montré que la qualité de la surface est influée par la dureté et les propriétés du matériau usiné, il est prouvé que la rugosité de surface diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce.

Grâce au déploiement de la qualité dans les entreprises et à un accès facilité aux moyens de calcul, les plans d'expériences prennent une place plus importante. Les applications des plans d'expériences deviennent de plus en plus nombreuses. La méthodologie des plans d'expériences permet une recherche expérimentale planifiée appelée « plans d'expériences ».

Nous utilisons l'analyse de la régression linéaire pour optimiser l'effet des paramètres du traitement thermo-chimique (cémentation par carbone) sur la dureté, l'épaisseur de la couche superficielle et la rugosité de surface.

L'objectif de cette étude est, d'une part d'étudier les effets des paramètres de la cémentation (débit de carbone, température et temps de maintien) sur l'état de surface des pièces usinées, d'autre part d'en choisir les optimaux dans le cas d'un acier (XC10) pour une configuration choisie à partir d'un minimum d'essais.

Pour atteindre cet objectif, une combinaison de plusieurs méthodes : statistiques, analytiques et expérimentales a été mise en œuvre. La méthode de régression linéaire a permis d'obtenir une modélisation mathématique des paramètres de cémentation. Pour chacun des modèles, un test de « Student » a été appliqué pour sélectionner les paramètres les plus significatifs. Puis, l'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour vérifier la validité des modèles. Enfin, l'algorithme d'optimisation choisi est un algorithme génétique d'optimisation multi-objectif.

Ce mémoire s'articule sur trois chapitres.

- Le premier sera consacré à des rappels théoriques sur la notion ACIERS, traitements thermiques et thermo-chimiques et l'état de surface.

## *INTRODUCTION GENERALE*

- Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation du matériau, objectifs, et à la description des traitements appliqués et aux procédures expérimentales utilisées après notre traitement conditionné pour les caractérisations microstructurales et mécaniques.
  
- Enfin le troisième chapitre sera destiné à une présentation d'un état d'art sur la méthode des plans d'expérience. Une préparation des résultats du traitement appliqué à notre matériau d'étude nous a conduits à déterminer les effets des paramètres de cémentation sur la rugosité de surface, la dureté superficielle et la profondeur de cémentation. Des modèles mathématiques ont été établis à partir de la régression linéaire.

**CHAPITRE I : ACIERS, TRAITEMENT  
THERMIQUE ET RUGOSITE (SYNTHESE  
BIBLIOGRAPHIQUE)**

## I.1 NATURE ET PROPRIETES DES ACIERS :

### I.1.1 Introduction :

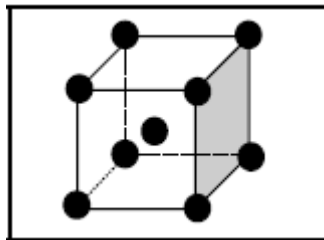
Les aciers sont des matériaux contenant en masse plus de fer que tout autre élément et dont la teneur en carbone est inférieure à 2 % (ou 2,1 %), limite courante les séparant des fontes. La normalisation (NF EN 10020) retient trois familles principales d'aciers, les aciers non alliés (aucun élément d'alliage ne dépasse 0,6 % ; sauf 1,65 % pour Mn), les aciers inoxydables (10,5% de chrome minimum et 1,2 % de carbone maxi) et les autres aciers alliés.

### I.1.2 Les aciers :

On appelle acier, l'alliage ferreux contenant moins de 2,06 % C sous forme de cémentite. Le fer, principal constituant de l'acier, a comme caractéristique de posséder deux structures cristallines différentes. Tous les atomes de fer sont sphériques et jointifs. Ils se présentent sous forme d'empilements réguliers dont le motif de base est la maille. Ces empilements prennent le nom de réseau. [1]

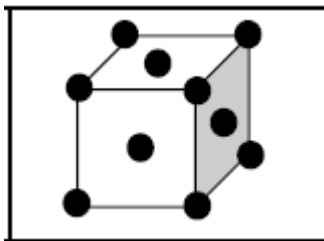
#### ❖ Le réseau cubique centré (c.c.)

En dessous de 906 °C, le fer possède une structure cristalline cubique centrée. Les atomes sont disposés dans des couches identiques superposés. La maille de cet empilement est le cube centré. Le fer porte le nom de fer  $\alpha$  et correspond à la phase  $\alpha$ . [1]



#### ❖ Le réseau cubique à faces centrées (c.f.c.)

De 906 à 1 401 °C, le fer possède une structure à maille cubique à faces centrées. L'arrangement des atomes de fer consiste également en couches identiques superposés. Dans ce cas, la maille est un cube à faces centrées. Le fer porte alors le nom de fer  $\gamma$  et correspond à la phase  $\gamma$ . Au-delà de 1 401 °C et jusqu'à la température de fusion, le fer retrouve sa structure cristalline cubique centrée (c.c.). [1]



### I.1.3 Les propriétés Mécanique des aciers :

L'acier constitue l'un des deux principaux métaux que les opérateurs en traitement thermique sont appelés à traiter dans le cadre de leur travail quotidien, l'autre étant l'aluminium. L'acier est un alliage de fer et de carbone. Les propriétés mécaniques sont en relation directe avec le contenu en carbone. Selon sa teneur en carbone, ses propriétés en seront passablement modifiées. [1]

Taux de carbone	Composition	Propriétés	Utilisations typiques	Remarques
Bas carbone (ferrite)	0,10 à 0,25 % C	60 000 psi	Produits en feuilles, Clous, tuyaux; Pièces forgées, vis, Tôles, profilés structuraux.	Ductilité
Moyen carbone (ferrite et perlite)	0,30 à 0,60 % C	40 HRC	vilebrequins forgés, engrenage ; rails, matrices de forgeage, lames de ressorts, burins, Marteaux, scies à ruban	Compromis en la ductilité et la résistance à l'usure
Haut Carbone (perlite et cémentite)	0,80 à 1,20 % C	170 HB	acier à outils (ressorts à boudins, poinçons, matrices, mèches, outils de tour, lames, billes de roulement.	Résistance à l'usure

**Tableau I.1** Les propriétés mécaniques de l'acier selon le taux de carbone. [1]

L'augmentation du taux de carbone dans un acier aura pour effet : [1]

- *D'augmenter la dureté ;*
- *D'augmenter la résistance en traction ;*
- *D'augmenter la limite d'élasticité ;*
- *De réduire la résistance à l'impact ;*
- *De réduire la ductilité (% d'allongement).*

## **I.2 LES TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES :**

### **I.2.1 Introduction :**

On les définit comme suit : « traitement consistant à chauffer une pièce jusqu'à la température donnée dans un milieu solide, liquide ou gazeux, qui dégage facilement l'élément de diffusion à l'état atomique, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir. Donc à la différence d'un traitement thermique, un traitement thermochimique change non seulement la structure de l'acier, mais aussi la composition chimique des couches superficielles, ce qui permet de modifier dans de plus larges limites ses propriétés. » [2]

En clair, lorsqu'on a besoin d'une dureté superficielle plus élevée et une ductilité encore plus grande, on utilise les traitements thermochimiques. Cette modification se fait par l'insertion de divers

gaz en fonction des types de traitements désirés : carbone, azote, ammoniac, oxyde de carbone, méthane, etc.

Un traitement thermochimique compte trois stades élémentaires :

- Un processus dont le siège est le milieu extérieur et qui assure le dégagement de l'élément diffusant à l'état atomique ;
- Un contact des atomes d'élément diffusant avec la surface de la pièce en acier et formation des liaisons chimiques avec les atomes de fer (absorption) ;
- Une pénétration de l'élément saturant en profondeur dans le métal de base, c'est à dire, le stade de diffusion.

L'espèce diffusant peut-être le carbone, l'azote ou le bore, ainsi les processus sont nommés cémentation, carbonitruration, nitruration, nitrocarburation ou boruration. Ces traitements de surfaces ont une grande importance industrielle parce que les propriétés mécaniques et chimiques des couches extérieures des pièces traitées peuvent être améliorées. Selon le processus choisi, la surface traitée présentera une résistance à l'usure et à la corrosion améliorée avec une dureté élevée [3][4].

### **I.2.2 Cémentation :**

La cémentation est le procédé le plus ancien de la saturation de la superficie de l'acier par le carbone. Elle est utilisée afin d'obtenir une dureté et une résistance à l'usure élevées des couches superficielles tout en conservant un cœur doux et tenace. L'opération est réalisée dans un milieu susceptible de céder du carbone à l'acier porté à une température supérieure à AC3, le plus souvent entre 850 °C et 1000 °C [5]. Le durcissement est accompli lorsque la couche enrichie en carbone est trempée pour former de la martensite conduisant à une bonne résistance à l'usure et à la fatigue [6][7].

La trempe est réalisée soit directement après cémentation (trempe directe) soit après refroidissement du métal et réchauffage ultérieur. La couche cémentée atteint le maximum de dureté (environ 800 à 900 HV) après la trempe martensitique pour des teneurs en carbone voisines de l'eutectoïde. Un éventuel revenu de détente (entre 180°C et 200 °C) après trempe ramènerait la dureté aux environs de 600 HV à 760 HV [8].

La profondeur de cémentation est fonction du temps, de la température et du potentiel de carbone en surface. La profondeur de cémentation est plus grande après un long temps de maintien et un potentiel élevé de carbone produit une quantité élevée de carbone en surface. Le choix de l'atmosphère a également une grande influence sur le processus de cémentation. Les différentes atmosphères employées dans l'industrie de cémentation impliquent la dissociation des composants de l'atmosphère en surface de l'acier ; ainsi le carbone libéré est aisément dissous par la phase d'austénite et peut diffuser dans la pièce [9]. En outre, certains éléments d'alliage peuvent agir d'une manière sensible sur la vitesse de diffusion du carbone au cours de la cémentation [10].

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 [1].

**I.2.3 Techniques de cémentation :**

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

**I.2.3.1 Cémentation solide :**

L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, le plus souvent le charbon de bois. Pour accélérer la cémentation, on ajoute au charbon des activateurs dont le carbonate de baryum  $BaCO_3$  et le carbonate de sodium  $Na_2CO_3$  à raison de 10 à 40 % du poids du charbon. Le ciment solide largement utilisé se compose de charbon de bois, de 20 à 25% de  $BaCO_3$  et jusqu'à 3.5% de  $CaCO_3$ .

Les pièces sont placées dans des caisses soudées en acier, ou plus rarement, en fonte. La température de cémentation varie de 900 à 940 °C. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C. Le carbone atomique est obtenu de la manière suivante : [11]



L'addition du carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone : [11]

**I.2.3.2 Cémentation liquide :**

Les pièces sont plongées dans un bain de sel fondu à base de cyanure de baryum et de sodium vers 980°C. Cette technique relativement simple de mise en œuvre permet un chauffage homogène et une action chimique régulière. [11]

**I.2.3.3 Cémentation gazeuse :**

La cémentation gazeuse est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par installation et décomposition à chaud (combustion) d'hydrocarbures, atmosphères qui sont caractérisées par leur potentiel carbone. Le potentiel carbone d'une atmosphère est défini comme étant « la teneur en carbone à la surface d'un échantillon de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation considérée dans les conditions retenues ». Il y a carburation si, initialement l'activité du carbone dans le métal est inférieure au potentiel carbone de l'atmosphère. Dans le cas inverse, il y a décarburation du métal. Quand ces deux variables sont égales le système est à l'équilibre et n'évolue pas. Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libre s'insère dans le réseau cubique à face centrée du fer. [11]

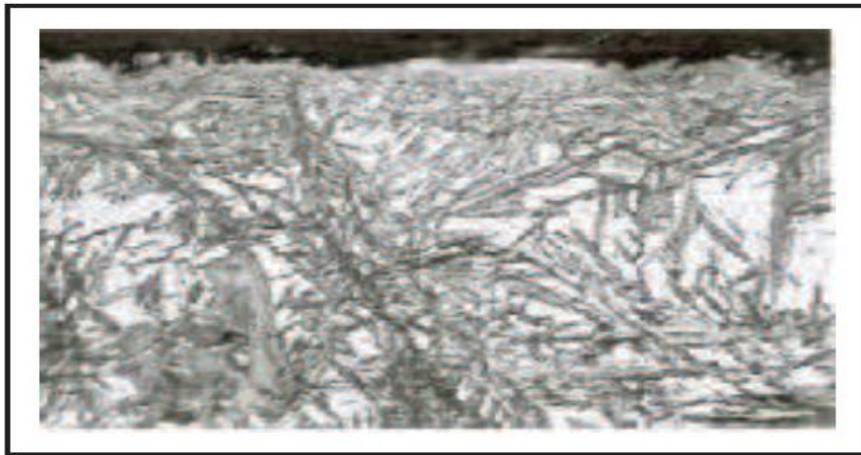


Au cours de la cémentation, il peut y avoir dans la partie superficielle de la couche enrichie, une oxydation des éléments manganèse, chrome et silicium présents dans l'acier. Par suite de la diminution de la trempabilité qui en résulte, il peut y avoir au cours de la trempe formation de constituants autres que la martensite qui auront pour effet d'abaisser notablement la résistance à la fatigue [12].

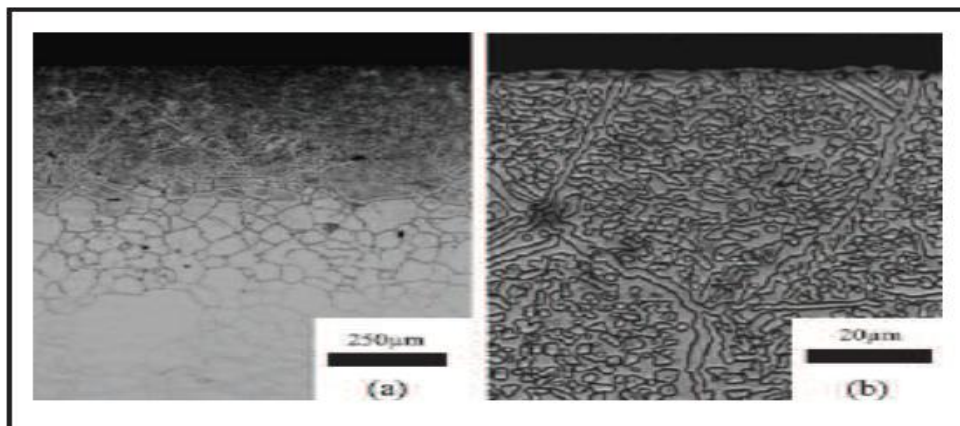
La formation des oxydes internes est un phénomène typique dans la cémentation gazeuse [13-14].la quantité des oxydes internes formés et leur profondeur dépend des conditions de la cémentation

(température, temps...), plus la profondeur de la couche cémentée est grande, plus la profondeur des oxydes internes est importante.

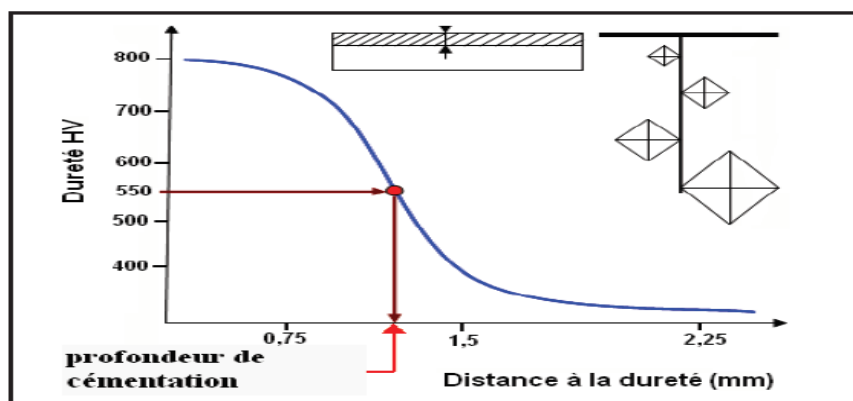
Les oxydes peuvent être formés soit au niveau des joints de grains austénitiques soit à l'intérieur des grains. Ceci peut influencer sur la résistance à la fatigue des outils. La **Figure I.2** représente la structure d'une couche cémentée à 980°C pendant 2h (33%  $H_2$ , 28%  $CO$ , 0.8%  $CH_4$ , enrichi avec propane  $C_3H_8$ ), indiquant la présence d'un oxydation interne [15].



**Figure I.1** Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe [15].



**Figure I.2** Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier SUS 316 L [16].



**Figure I.3** profondeur conventionnelle de cémentation [17].

### I.2.3.4 Cémentation ionique :

Les pièces à cémenter sont placées en position de cathode à l'intérieur d'une enceinte contenant un hydrocarbure sous pression réduite. L'application d'une différence de potentiel électrique entre une anode et une cathode (la pièce) conduit à la formation d'une décharge électrique dans l'enceinte et d'une couche luminescente qui entoure la pièce, dont le chauffage est assuré par le plasma.

De façon très simplifiée, les gaz carburants sont dissociés pour fournir du C libre selon l'expression :



Par rapport aux autres techniques de cémentation, la cémentation par plasma présente les avantages suivants :

- Possibilité d'effectuer un décapage ionique préalable de la surface à cémenter afin de la nettoyer ;
- Transfert plus rapide de carbone dans l'acier ;
- Meilleur contrôle des paramètres de traitement et de la productibilité ;
- Plus basse consommation de gaz et d'énergie ;
- Absence de pollution de l'environnement ;
- Plus grande propreté et absence d'oxydation superficielle des pièces traitées ;
- Possibilité de réaliser des zones cémentées très précisément délimitées [18].

La figure I.2 représente une couche cémentée par plasma d'un acier SUS 316L.

### I.2.4 Profondeur cémentée :

La couche traitée peut être caractérisée par le profil de microdureté qui permet de mesurer l'épaisseur efficace de la couche, appelée "profondeur conventionnelle de cémentation". Elle est définie par la distance à la surface du point pour lequel la dureté a une valeur égale à 550 HV, **Fig I.3 [17]**. La profondeur de durcissement par cémentation dépend partiellement de la trempabilité des aciers, mais surtout des conditions du traitement. L'épaisseur visée pour la couche cémentée varie selon la destination et le volume de la pièce. Les épaisseurs importantes (0.8mm à 1.8 mm ou plus) sont réservées à des pièces devant résister à l'usure et des pièces de forte section. Pour les pièces moyennes de faibles sections, tels que les engrenages d'automobile, des épaisseurs de 0.2 mm à 0.8 mm peuvent être suffisantes [14].

K. Olga [16] a montré que les aciers ayant des concentrations élevées en éléments gammagène (Si, Ni) augmentent la diffusivité du carbone dans l'austénite mais réduisent la cinétique de transfert du carbone à partir de l'atmosphère vers la surface de l'acier, par contre, les aciers avec des éléments carburigène (Cr, Mo) augmentent le coefficient de transfert de masse dans l'atmosphère en améliorant l'évolution du profil de carbone.

### I.2.5 Traitements thermiques après la cémentation :

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

- De corriger la structure et d'affiner le grain au cœur et dans la couche cémentée.
- D'obtenir une dureté élevée de la couche cémentée et de bonnes propriétés mécaniques de cœur.
- D'éliminer le réseau de carbure dans la couche cémentée, qui peut apparaître par suite de la sursaturation en C [12].

Le traitement thermique conduit dans la couche cémentée à une structure composée de martensite d'une certaine quantité d'austénite résiduelle et des carbures. L'opération terminale des pièces ayant subi la cémentation est un revenu à basse température à 160 ou 180 °C, qui transforme la martensite de trempe de la couche superficielle en martensite de revenu assurant ainsi un adoucissement.

Dans le cas d'une trempe d'aciers fortement alliés, la structure de la couche cémentée garde en quantité (jusqu'à 50%) de l'austénite résiduelle qui altère la propriété de dureté. Après trempe, ces aciers sont traités à froid contribuant à la transformation de la plus grande partie de cette austénite en martensite.

La quantité d'austénite résiduelle peut être diminuée en réduisant la quantité de carbone dans la couche ou en ajoutant dans le four, avant l'achèvement du processus, de l'ammoniac pour former des nitrures des éléments d'alliages.

La cémentation suivie d'un traitement thermique élève la limite de fatigue des pièces par suite de la formation dans la couche cémentée de contraintes de compression résiduelles importantes. La limite à la fatigue peut être encore élevée par écrouissage réalisé par grenailage [19].

### I.2.6 Aciers pour cémentation :

Ce sont des aciers à grains fins et à basse teneur en carbone (0.10% et 0.20 %). Les éléments d'alliage sont choisis en fonction de la massivité des pièces et des caractéristiques à cœur visées, ce sont :

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

### I.2.7 Le diagramme d'équilibre fer-carbone :

Le diagramme d'équilibre est fabriqué à partir des courbes de refroidissement des différents alliages de fer et de carbone. Dans la courbe de refroidissement, chaque changement d'état de structures cristallines ou de solubilités apparaissent comme une discontinuité. Lorsqu'on définit les traitements thermiques, particulièrement les températures de traitement, il est important de connaître les températures de transformations.

La ligne HJK, correspond à la transformation eutectoïde. Lorsque l'alliage refroidit, il traverse cette ligne. À ce moment, la solution solide de fer gamma, austénite (CFC), se transforme en solution solide de fer alpha, ferrite (CC). Puisque la solubilité maximum du carbone passe de 2 % dans le fer gamma à 0,025 % dans le fer alpha, il y a rejet de carbone sous forme de cémentite. Donc lors du passage de la ligne HJK, l'austénite se transforme en perlite (agrégat de ferrite et de cémentite).

Si on désire modifier la microstructure (et ainsi les propriétés mécaniques) de l'alliage, on doit modifier les transformations qui surviennent normalement dans l'alliage [1].

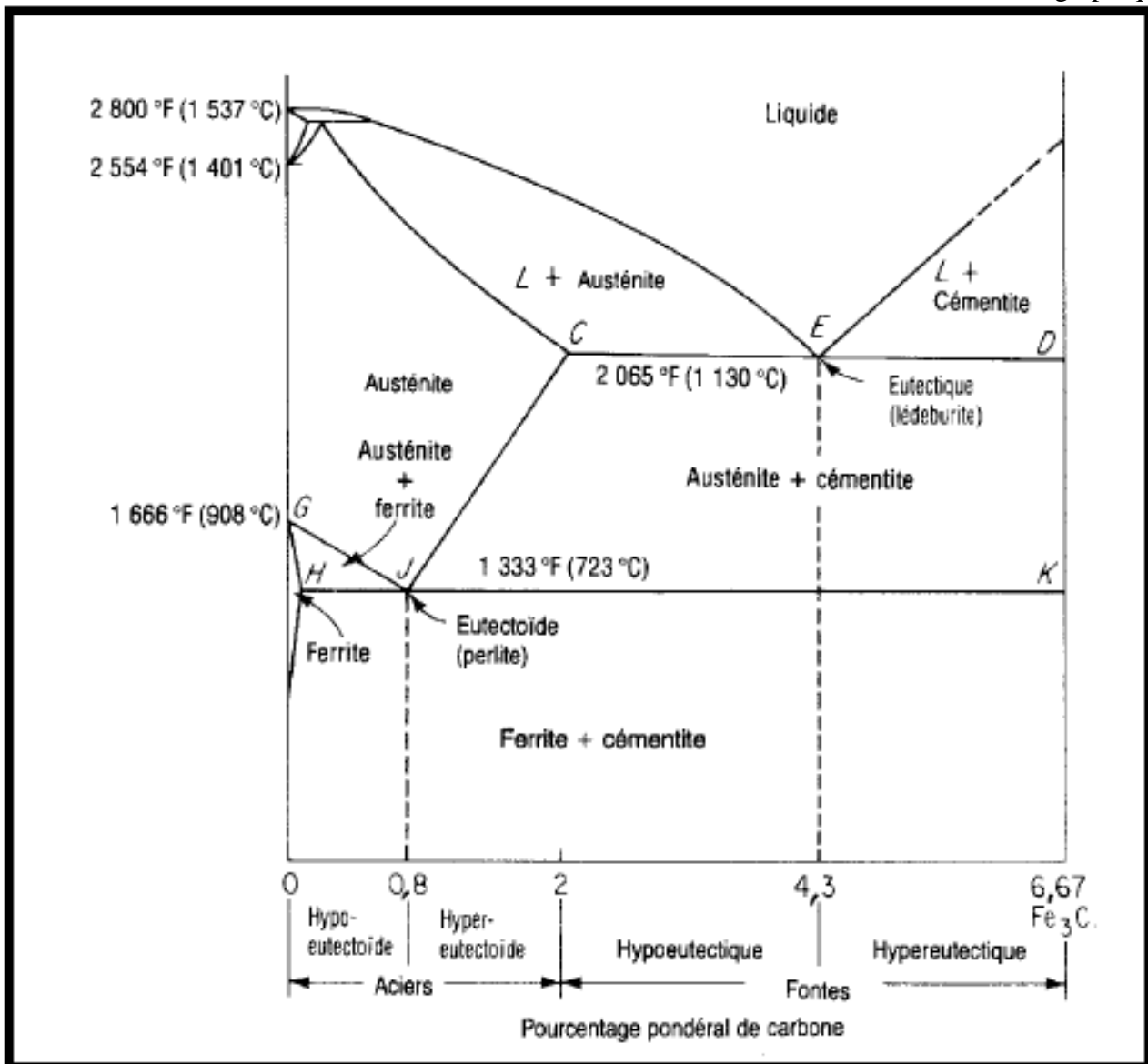


Figure I.4 Le diagramme de phase fer-carbone [1]

### I.2.8 Les alliages fer-carbone :

On rencontre deux types d'alliages fer-carbone :

- ❖ Ceux qui contiennent du carbone à l'état libre sous forme de graphite (fonte) ;
- ❖ Ceux où l'on trouve le carbone dissous dans un composé intermétallique appelé carbure de fer ou cémentite,  $Fe_3C$  (acier).

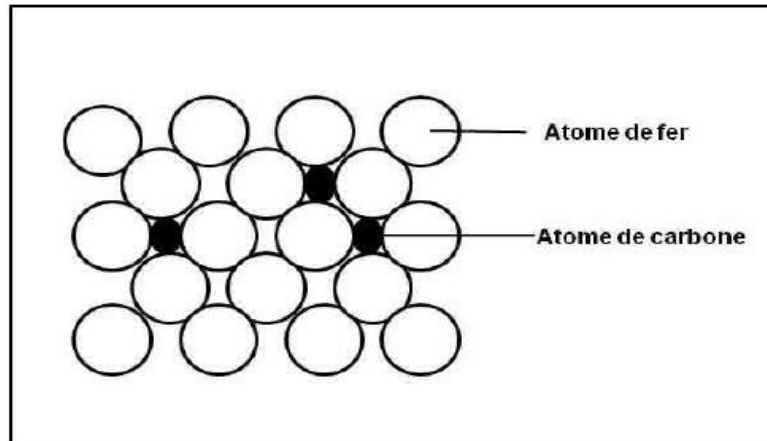
Dans l'acier ou la fonte blanche, on trouve le carbone sous forme de cémentite. Dans la fonte grise, il y a cohabitation des deux formes de carbone (graphite et cémentite). [1]

### I.2.9 La constitution des aciers au carbone :

Trois solutions solides de base constituent les aciers au carbone.

### I.2.9.1 La ferrite

La ferrite est une solution solide de carbone dans le fer  $\alpha$ . Les atomes de carbone s'insèrent au hasard dans les espaces interatomiques du réseau cristallin (c.c.). Dans la matière, elle se présente sous forme de grains. On parle d'une structure tendre et souple et sa dureté est de l'ordre 10 à 15 HRC [1].

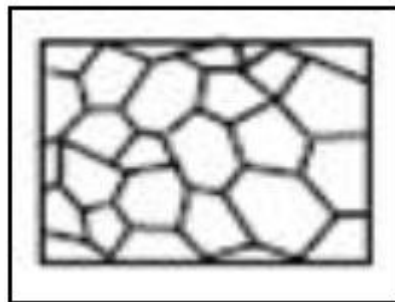


**Figure I.5** La solution solide d'insertion

Les dimensions réduites de ces espaces limitent de façon très importantes le nombre d'atomes de carbone insérés. Le pourcentage maximal de carbone dissous dans la ferrite est de :

- ❖ 0,006 % à 20 °C ;
- ❖ 0,020 % à 723 °C.

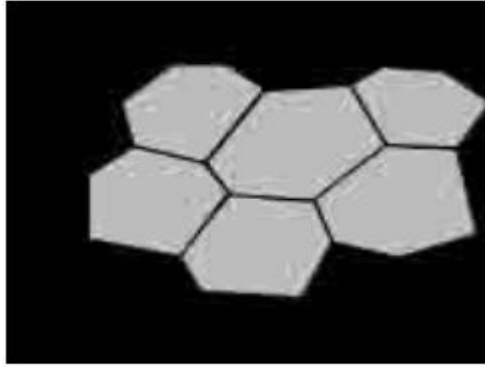
Comme sa teneur de carbone est négligeable, on peut considérer la ferrite comme du fer  $\alpha$ .



**Figure I.6** Micrographie représentant de la ferrite

### I.2.9.2 L'austénite

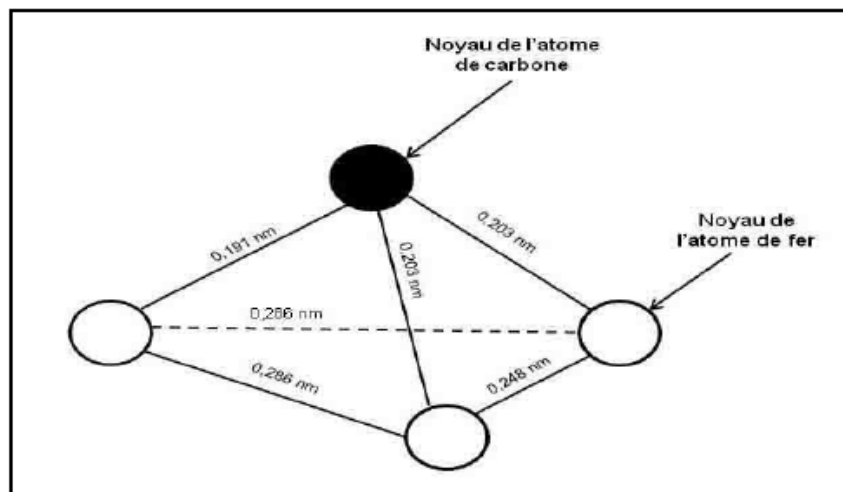
L'austénite est une solution solide de carbone dans le fer  $\gamma$ . Les dimensions plus importantes des espaces interatomiques du réseau cristallin (c.f.c.) permettent à l'austénite de dissoudre jusqu'à 2,06 % de carbone à 1 145 °C. L'austénite est aussi une solution solide d'insertion. L'austénite est paramagnétique [1].



**Figure I.7** Micrographie représentant de l'austénite

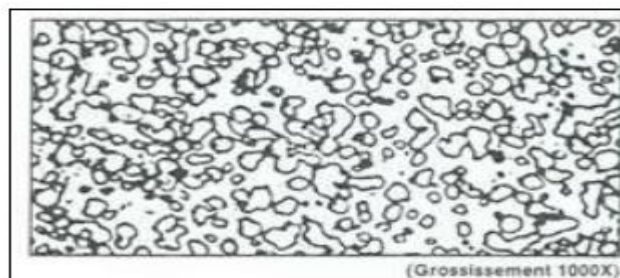
### I.2.9.3 Cémentite (ou carbure de fer)

La cémentite est constituée de molécules composées d'atome de fer et d'atomes de carbone. Trois atomes de fer pour un atome de carbone,  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Elle contient 6,67 % de Carbone (en masse). La cémentite ne forme pas de grain à l'échelle macroscopique, et elle peut se retrouver sous diverses formes : fines aiguilles, plaquettes, dans les joints de grain des aciers hypereutectoïdes, etc. [1].



**Figure I.8** La molécule de cémentite (ou carbure de fer)

Ce composé intermétallique a une concentration de carbone de 6,67 % (en masse). Il possède la caractéristique d'être très dure et très fragile.



**Figure I.9** Micrographie représentant de la cémentite globulaire après un traitement de sphéroïdisation

**I.3 L'ETAT DE SURFACE :**

**I.3.1 Introduction :**

Le phénomène « État de surface », est les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont le plus souvent mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profil mètres, qui relèvent le profil de la surface.

Un profil de surface, est composé de différents écarts géométriques, auxquels correspondent différents profils (**Tableau I.2**).

❖ **Profil primaire (ordre 1 + 2 + 3 + 4)**

On appelle aussi profil P, sur lequel sont définis les paramètres de structure, désignés par un symbole P, par exemple  $P_t$ ,  $P_a$  ...

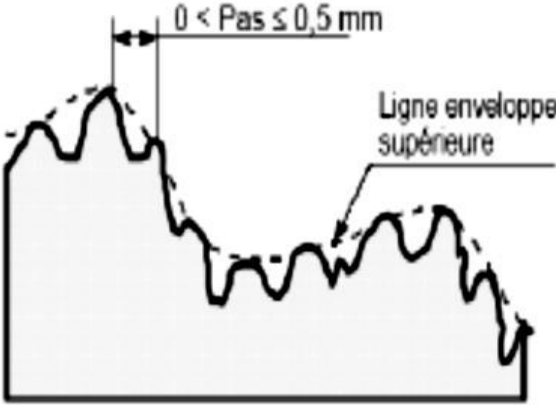

❖ **Profil d'ondulation (ordre 2)**

On appelle aussi profil W, sur lequel sont définis les paramètres de structure, désignés par un symbole W, par exemple  $W_t$ ,  $W_a$ ...

❖ **Profil de rugosité (ordre 3 + 4)**

On appelle aussi profil R, sur lequel sont définis les paramètres de structure, désignés par un symbole R, par exemple  $R_a$ ,  $R_z$ ...

Différents ordres de grandeur des irrégularités géométriques			
Ordres	Écarts géométriques	Croquis	Origines possibles
1	<p><b>Écarts géométriques :</b> Défauts de planité ; de rectitude ; de circularité ; de cylindricité, etc.</p>		<p>Défaut de bridage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Flexion des éléments de la machine</li> <li>➤ Qualité du guidage des éléments coulissants.</li> <li>➤ Usure des organes.</li> <li>➤ Déformation de la pièce :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pendant l'usinage, indépendamment du procédé.</li> <li>✓ Après l'usinage, dépendant du matériau (libérations des contraintes internes).</li> </ul> </li> </ul>
2	<p><b>Ondulation :</b> Irrégularités géométriques, telle que la distance entre deux sommets d'irrégularités soit comprise entre 500 μm et 2 500 μm</p>		<p>Vibrations basses fréquences :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ De la pièce.</li> <li>➤ De l'outil.</li> <li>➤ Les deux,</li> </ul> <p>dues aux flexions, au mauvais guidage et équilibrage des éléments de la machine, et également à l'insuffisance de l'installation de l'isolation passive et active</p>

<p>3</p>	<p><b>Rugosité :</b> Irrégularités géométriques, telle que la distance entre deux pics de ces irrégularités soit comprise entre 0 et 500 µm (1).</p>		<p>Vibrations hautes fréquences (causes analogues à celles énumérées ci-dessus).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Installation de lubrification:</li> <li>✓ Lubrifiant : nature, qualité lubrifiante, action de refroidissement, stabilité dans le temps.</li> <li>✓ Mode d'arrosage.</li> <li>✓ Filtre : efficacité du système (entre autres fréquences de nettoyage).</li> <li>➤ Procédés par enlèvement de copeaux : STRIES, SILLONS dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil ; à l'avance par tour de la pièce ou de la meule, etc.</li> <li>➤ Qualité de la géométrie de l'outil.</li> <li>➤ Hétérogénéité, plasticité du matériau.</li> </ul>
<p>4</p>	<p><b>Arrachement :</b> Marque d'outil, fente, piqure,... (irrégularités aperiodiques)</p>		<p>Ensemble des écarts de profil dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une ou plusieurs fonctions données.</p>

**Tableau I.2** Ordres de grandeur des irrégularités géométriques [21].

La frontière entre la rugosité et l'ondulation est arbitraire, aucune définition absolue n'existe. En pratique, le classement s'effectue à partir de la distance entre les pics (**Tableau I.3**).

Ecart géométrique	Distance entre les pics (en µm)
Ecart de forme (ordre 1)	Entre 2 500 à 8 000 et longueur de l'élément
Ondulation (ordre 2)	Entre 250 à 800 et 2 500 à 8 000
Rugosité (ordre 3 et 4)	Entre 2 et 250 à 800

**Tableau I.3** Classement pratique des différents écarts géométriques [21].

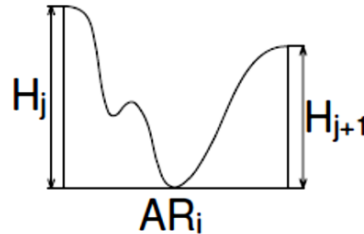
**I.3.2 Paramètres de mesure des irrégularités.**

**I.3.2.1 Paramètres liés aux motifs**

Un motif est une portion du profil situé entre les points les plus hauts de 2 saillies locales du profil, consécutives ou non. Il est caractérisé par sa longueur et par la hauteur de chacun de ses côtés (**Figure I.10**) [22]. On distingue les motifs de rugosité et les motifs d'ondulation à l'aide de deux opérateurs : l'opérateur A, qui est la limite entre un motif de rugosité et un motif d'ondulation et l'opérateur B, qui est la limite entre un motif d'ondulation et un écart de forme. Bien que non définis précisément, les valeurs conventionnelles et recommandées par la norme ISO 12085 de ces opérateurs sont A=0,5mm et B=2,5mm.

Un motif de rugosité (**Figure I.11**) est calculé en utilisant l'opérateur A. Par définition, un motif de rugosité a une longueur  $AR$  inférieure ou égale à  $A$ . Il est caractérisé par son pas  $AR_i$  et ses profondeurs élémentaires  $H_j$  et  $H_{j+1}$ .

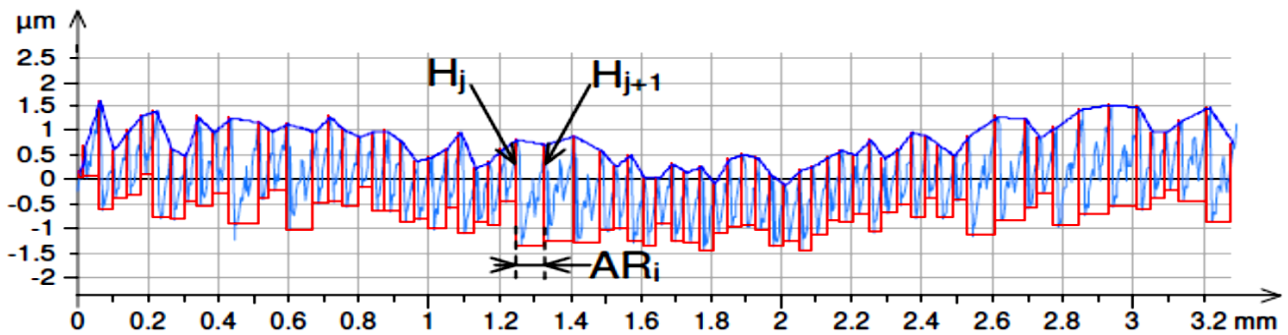
Un motif d'ondulation (**Figure I.12**) est déterminé sur la ligne enveloppe supérieure du profil en utilisant l'opérateur B. Il est caractérisé par son pas  $AW_i$  et ses profondeurs élémentaires  $Hw_j$  et  $Hw_{j+1}$ .



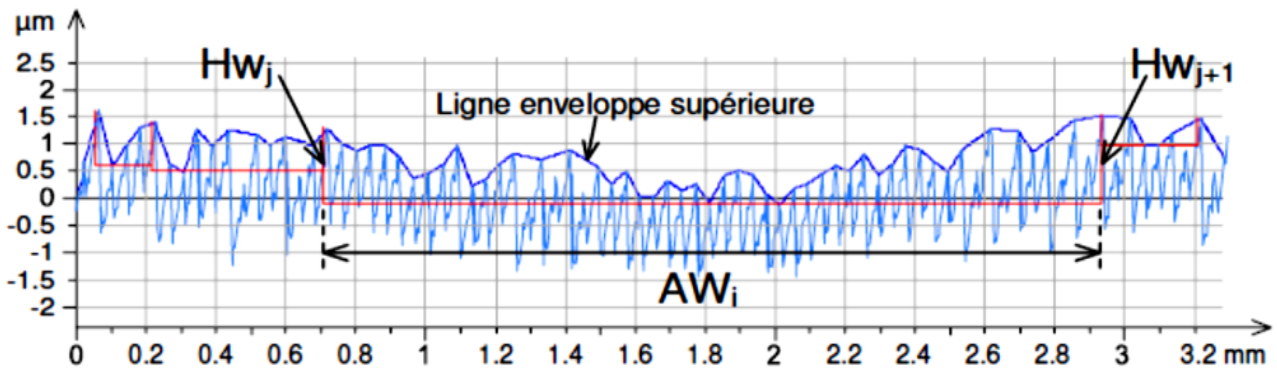
**Figure I.10** Motif de rugosité [21].

$AR_i$  = Pas élémentaire du motif.

$H_j$  et  $H_{j+1}$  = Profondeurs élémentaires du motif.



**Figure I.11** Exemple de détermination des motifs de rugosité.



**Figure I.12** Exemple de détermination des motifs d'ondulation.

La définition des principaux paramètres liés aux motifs est présentée dans le **Tableau I.4**.

Définitions des paramètres liés aux motifs			
Intitulé	Définition	Profil de rugosité	Profil d'ondulation
Pas moyen des motifs	Moyenne arithmétique des longueurs des motifs	$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i$	$AW = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m AW_i$
		n= nombre de motifs de rugosité	m= nombre de motifs d'ondulation
Profondeur moyenne des motifs	Moyenne arithmétique des profondeurs des motifs	$R = \frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} H_j$	$W = \frac{1}{m+1} \sum_{j=1}^{m+1} H_{Wj}$
		n= nombre de motifs de rugosité	m= nombre de motifs d'ondulation

Tableau I.4 Principaux paramètres liés aux motifs [23].

I.3.2.2 Paramètres liés à la ligne moyenne

La référence pour le calcul des paramètres est la ligne des moindres carrés calculée sur une longueur de base. La valeur moyenne des paramètres est calculée en effectuant la moyenne des valeurs trouvées sur toutes les longueurs de base (Figure I.13).

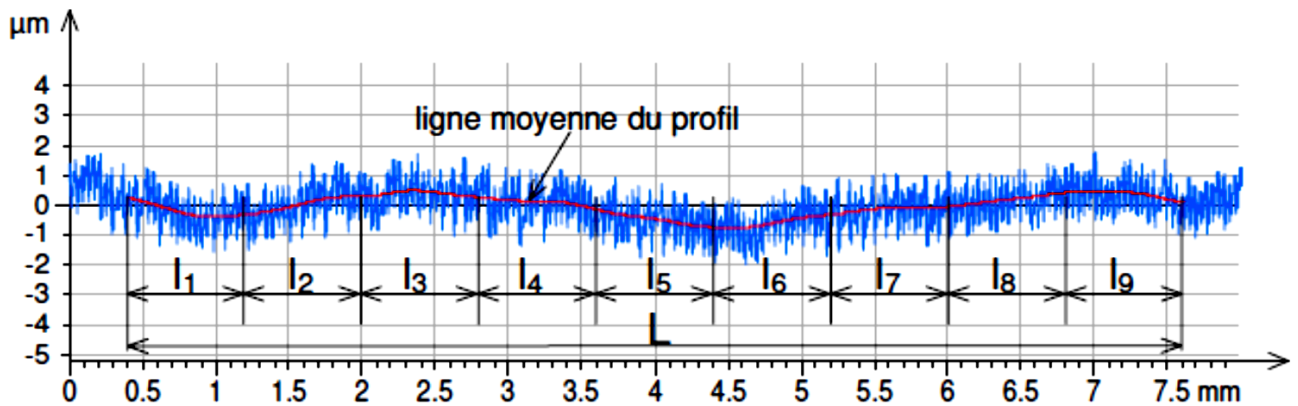


Figure I.13 Ligne moyenne du profil.

La définition des principaux paramètres liés à la ligne moyenne est présentée dans le Tableau I.5.

Définition des paramètres liés à la ligne moyenne		
Intitulé	Symbole	Définition
Hauteur totale du profil	$R_t$	Somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, $Z_p$ , et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, $Z_v$ , à l'intérieur de la longueur d'évaluation
	$W_t$	
Écart moyen	$R_a$	Moyenne arithmétique des valeurs absolues des

arithmétique du profil évalué	$W_a$	ordonnées $Z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base : $Ra_i, Wa_i = \frac{1}{l} \int_0^l  Z(x)  \cdot dx$ $Ra = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K Ra_i, Wa = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K Wa_i$ Avec k=nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)
Hauteur maximale du profil	$R_z$ $W_z$	$Rz_i$ : Somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, $Z_p$ , et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, $Z_v$ , à l'intérieur de la longueur de base $Rz = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K Rz_i$ Avec k=nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)

**Tableau I.5** Principaux paramètres liés à la ligne moyenne [23].

### I.3.2.3 Paramètres liés à la courbe de portance

Lorsque la surface mesurée présente des creux relativement profonds sous un plateau dont le fini est plus fin, avec une faible ondulation, le profil de rugosité engendré par filtrage subit certaines distorsions indésirables. Une autre méthode de filtrage a été développée pour réduire ces distorsions permettant ainsi la définition de paramètres de rugosité liés à la courbe de taux de portance ou courbe d'Abbott-Firestone (définie dans la norme ISO 4287). Cette courbe décrit l'augmentation du taux de longueur portante  $T_p$  en fonction de l'augmentation de la profondeur du profil de rugosité.

Ces paramètres constituent une classe de paramètres d'état de surface caractérisant l'aspect fonctionnel d'une surface, à savoir le contact, le rodage et la lubrification.

Ces points d'intersection permettent de diviser horizontalement la courbe en trois secteurs (**Figure I.14**)

- La zone des pics, jouant un rôle dans les rodages mécaniques.
- La zone centrale, jouant un rôle dans les contacts.
- La zone des creux, jouant un rôle dans la lubrification.

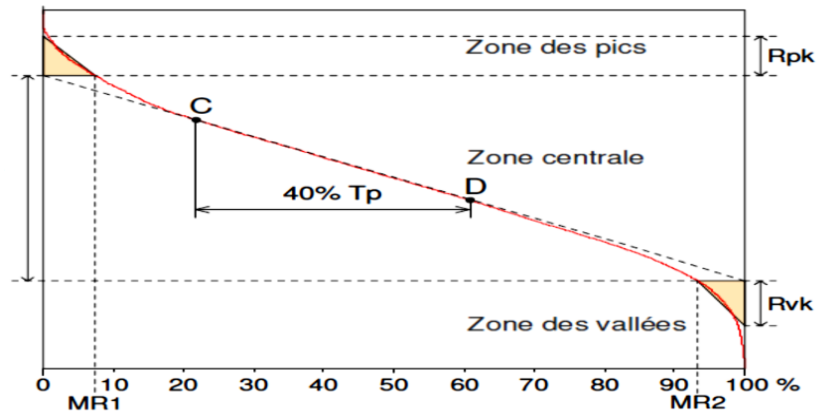


Figure I.14 Définitions des paramètres liés à la courbe de portance.

Les paramètres déterminés par rapport à la courbe de portance sont définis dans le **Tableau I.6**

Définition des paramètres liés à la courbe de portance		
Intitulé	symbole	Définition
Profondeur du profil écrêté	Rk	Profondeur de la partie centrale du profil de rugosité.
Hauteur des pics éliminés	Rpk	Hauteur moyenne des pics saillants situés au-dessus du profil écrêté
Hauteur des creux éliminés	Rvk	Hauteur moyenne des creux situés au-dessus du profil écrêté.
Taux de longueur portante MR1	MR1	Taux (%) déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les pics saillants du profil écrêté.
Taux de longueur portante MR2	MR2	Taux (%) déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les creux du profil écrêté.

Tableau I.6 Principaux paramètres liés à la courbe de portance [23].

### I.3.3 Les paramètres de la rugosité :

Il existe un grand nombre de paramètres pour la définition de la rugosité, certains sont pourtant beaucoup plus employés que d'autres :

❖ **Ra : rugosité moyenne du profil :**

Valeur moyenne de tous les écarts par rapport à une ligne droite, dans la longueur d'évaluation, indifféremment de la direction verticale. [24]

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |r_j| \tag{I.6}$$



Figure I.15 : rugosité moyenne Ra

❖ **Rq : rugosité moyenne quadratique :**

Moyenne quadratique des écarts de hauteur sur la longueur d'évaluation et mesurées par rapport à la ligne moyenne

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j^2} \quad (\text{I.7})$$

❖ **Rz : hauteur maximale moyenne :**

C'est la moyenne des différentes hauteurs de profil entre la hauteur de crête la plus élevée et la profondeur de creux la plus importante sur des longueurs de référence comprises dans la longueur d'évaluation

- Il y a couramment cinq longueur de référence
- La valeur affichant la plus grande déviation dans la longueur de référence = Rmax ou Rz max [24]

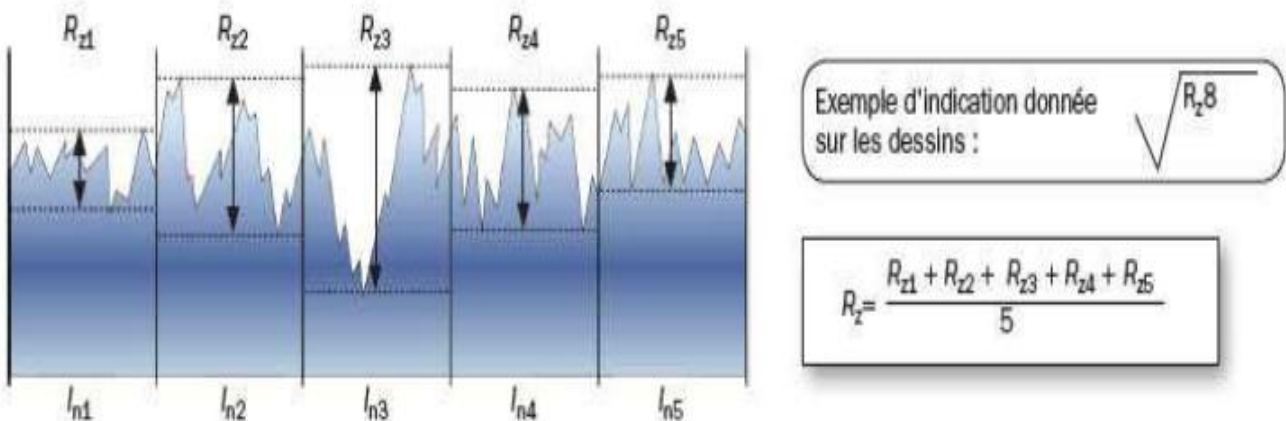


Figure I.16 : Hauteur maximale moyenne Rz.

❖ **Rt : Hauteur maximale du profil :**

C'est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation

- ✚ Une seule valeur Rt, non combinée à un Rz ou Ra est l'une des exigences les plus strictes du profil R. [24]

$$R_t = |\min_{1 \leq j \leq N} r_j| + |\max_{1 \leq j \leq N} r_j| \quad (\text{I.8})$$

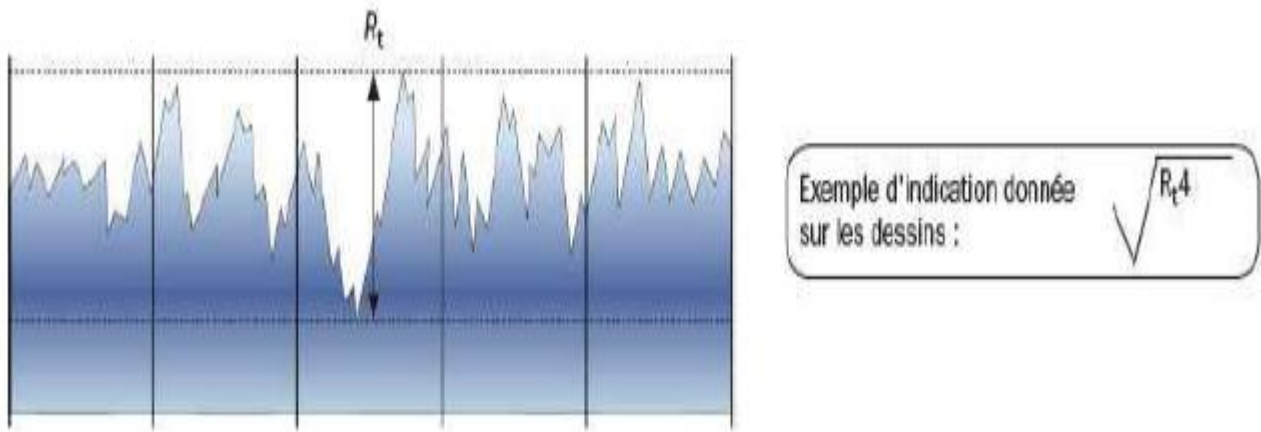


Figure I.17 : Hauteur maximale du profil  $R_t$ .

**I.3.4 Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface :**

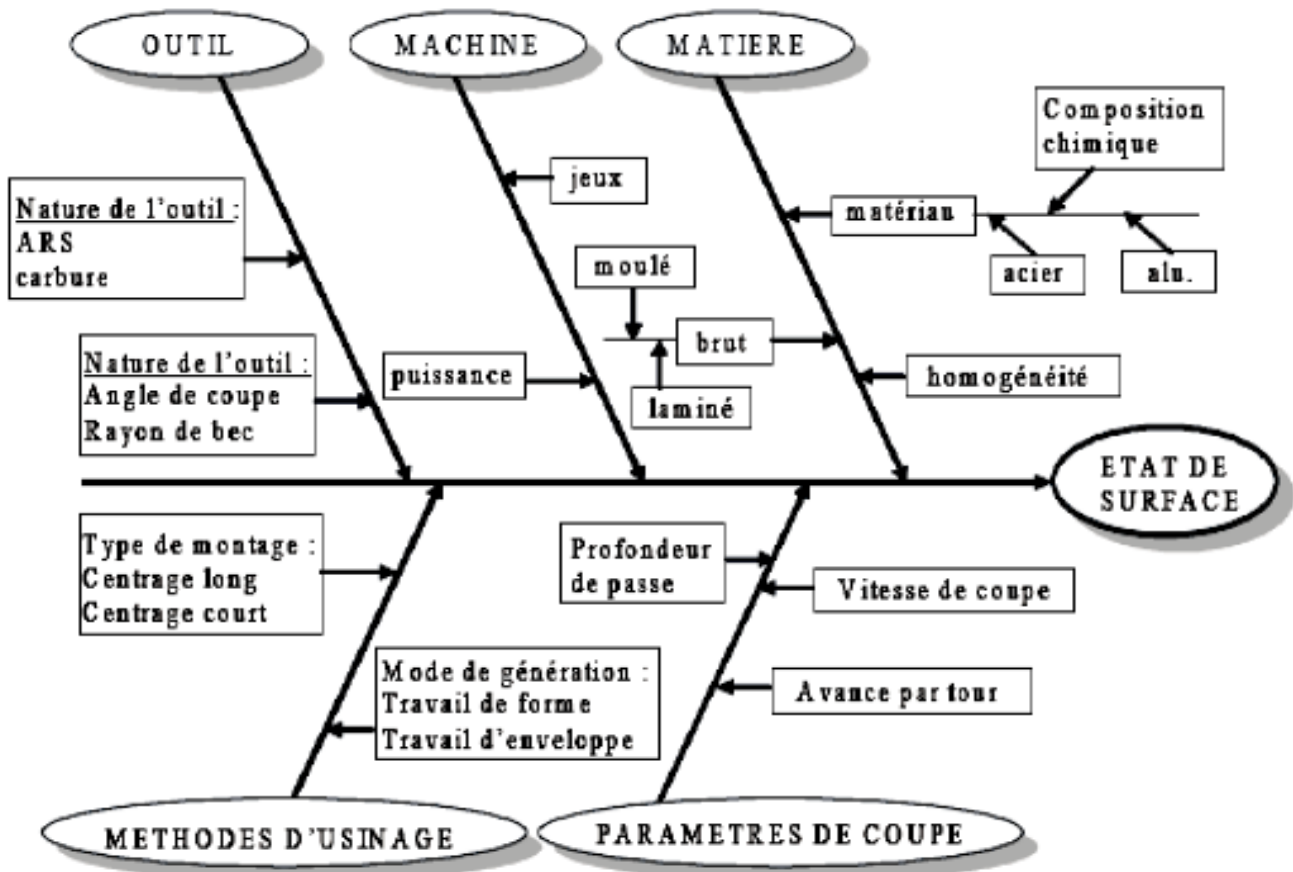


Figure I.18 : Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface.

**I.3.5 Inscription normalisée d'un état de surface :**

Sur les dessins de définition, les états de surface peuvent faire l'objet de spécifications. Un symbole graphique est utilisé : [25]

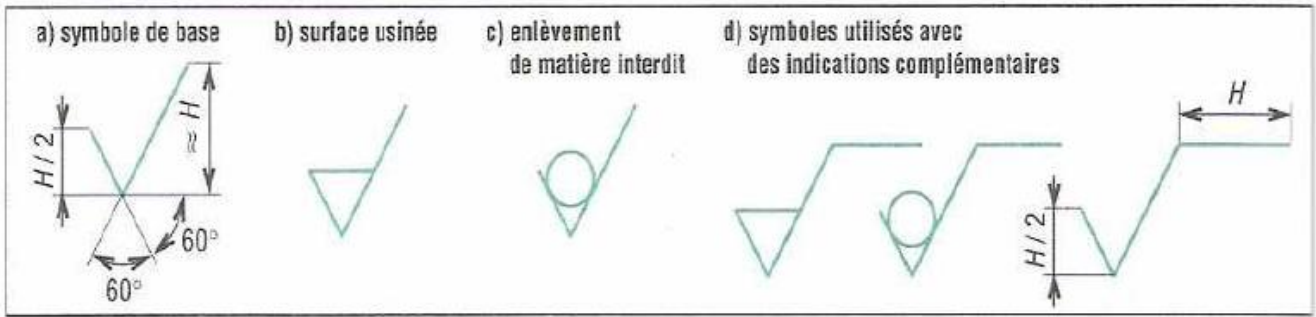


Figure I.19 : symbole graphique de l'état de surface.

Ce symbole est complété d'indications relatives au paramètres de rugosité retenu, au procédé de fabrication éventuellement, ... [26]

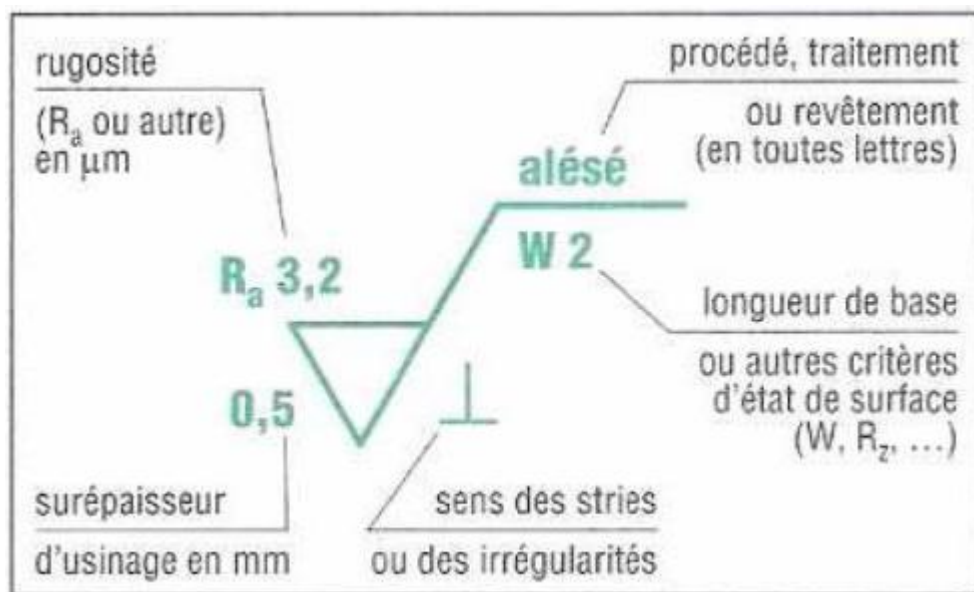


Figure I.20 : Symbolisation

#### I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évoqué les principales notions de base de l'acier, traitement thermiques et thermochimiques et la rugosité pour pouvoir comprendre les procédés réalisés dans notre partie expérimentale et bien assimiler les objectifs ciblés.

## **Chapitre II : PREPARATION DES EXPERIENCES**

### II.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent une synthèse bibliographique a montré que les traitements thermiques sont par définition un moyen de durcissement opérationnel surfacique en premier ordre, influençant sur la surface des aciers et ses caractéristiques mécanique et physico-chimiques.

Donc une mise à vérification de ces caractérisations a suscité notre intérêt. À l'aide de méthodes expérimentales appropriées, nous avons réalisé le développement de cette partie du mémoire qui va décrire nos méthodes expérimentales et acheminer vers le résultat de notre étude.

### II.2 Objectifs :

L'objectif de cette étude est, d'une part d'étudier les effets des paramètres de la cémentation (débit du carbone, la température et le temps de maintien) sur l'état de surface Ra, la dureté, le pourcentage massique du carbone et l'épaisseur de la surface traitée, d'autre part de choisir les paramètres optimaux en cémentant un acier extra doux (XC10) pour une configuration choisie à partir d'un minimum d'essais.

### II.3 Environnement expérimental :

L'environnement expérimental renferme tous les facteurs maintenus constants pendant les essais, il est composé principalement de :

#### II.3.1 Matériau d'étude :

Le matériau faisant l'objet de cette étude est un acier de faible teneur en carbone dont la composition chimique est reportée dans le Tableau II.1 qui a été réalisée à l'aide d'un spectromètre de type SPECTROMAX (**Figure II.1**), au niveau du laboratoire des analyses physico-chimiques.



**Figure II.1:** spectromètre SPECTROMAX.

Composition chimique														
%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%AL	%Ti	%Ni	%Cr	%Mo	%V	%Sn	%B	%W
0.10	0.50	0.31	0.003	0.010	0.047	0.003	0.003	0.033	0.087	0.012	0.006	0.015	0.002	0.018

**Tableau II.1:** composition chimique de l'acier XC10.

### II.3.2 Préparation des échantillons pour le traitement :

#### II.3.2.1 La phase de Découpage :

L'obtention de nos échantillons primaires a été réalisée par un découpage lubrifié d'un bâton de diamètre 55 mm en cylindres de longueur de 10 mm, à l'aide d'un tour parallèle.



**Figure II.2 :** Tour parallèle.



**Figure II.3 :** Echantillons primaires.

#### II.3.2.2 La phase de Rectification :

Grace à une rectifieuse comme montre la figure II.4 on a mis les surfaces de base des cylindres obtenus par découpage dans les mêmes conditions (rectification similaire).



**Figure II.4 :** Rectifieuse plane.

### II.3.3 Technique de traitement thermochimique et thermique :

Le traitement de cémentation et après cémentation que nos échantillons ont subi, a été expérimenté à l'échelle industrielle dans un atelier de traitement thermique équipé d'une ligne automatique de traitements thermiques fournie par la société SOLO switzerland spécialisée dans la conception et la

fabrication des fours industriels. Cette ligne de traitement comporte comme éléments sept machines essentielles comme la **figure II.5** illustre



**Figure II.5:** chaîne de traitement thermique SOLO.

Ces fours mis à notre disposition peuvent procurer une atmosphère de traitement isotherme configurable de l'ordre de 950°C au maximum. Nos échantillons primaires rectifiés et numérotés ont été chauffés à des températures différentes, à des temps de maintien de 4,5 et 6 heures sous une variation du débit de carbone comme le montre le **Tableau II.2** des paramètres opératoires prédéterminés.

Température (°C)	Temps de maintien (heures)	Débit de Carbone %
900/920 /940	4/5/6	0.9/1.0/1.2

**Tableau II.2:** Paramètres de traitement.

### II.3.3.1 La phase de Cémentation :

Une cémentation gazeuse a été adoptée lors de notre expérience comme processus thermochimique conféré à notre acier (XC10), permettant l'obtention des surfaces dures, riches en carbone et résistantes à l'usure. L'atmosphère du four est constituée par un gaz porteur de composition 39.36% H<sub>2</sub>, 0.23% CO<sub>2</sub>, 19.83% CO, 0.76 % H<sub>2</sub>O, enrichie par du propane C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>.

On commence par préparer notre four de cémentation qui est celui de la trempe couplée à une source de cément sous forme de gaz de propane. Cela consiste à faire chauffer le four jusqu'à la température d'austénisation préconisée pour chaque numéro d'essai, et le maintenir à cette température-là afin d'assurer une atmosphère isotherme.

Le robot s'oriente automatiquement avec la charge (constituée de l'échantillon déterminée) vers le four commandé. Le four s'ouvre, se charge et s'enferme et la température est abaissée. La température remonte et stagnante comme s'est opérée dans chaque essai et le potentiel carbonique de l'atmosphère isotherme commence à s'élever jusqu'au débit conditionnée dans chaque essai.

Le traitement est maintenu pendant les heures opératoire de l'essai pour que les surfaces des échantillons s'enrichissent du carbone. Après enrichissement, une étape de diffusion de carbone est nécessaire en diminuant le débit du gaz pendant des durées indiquées sur les graphes des cycles thermiques fournies par le logiciel de la partie de commande. Cela est pour laisser le carbone propager d'une façon équilibrée à la superficie de la pièce à traiter.

### II.3.3.2 La phase de la trempe

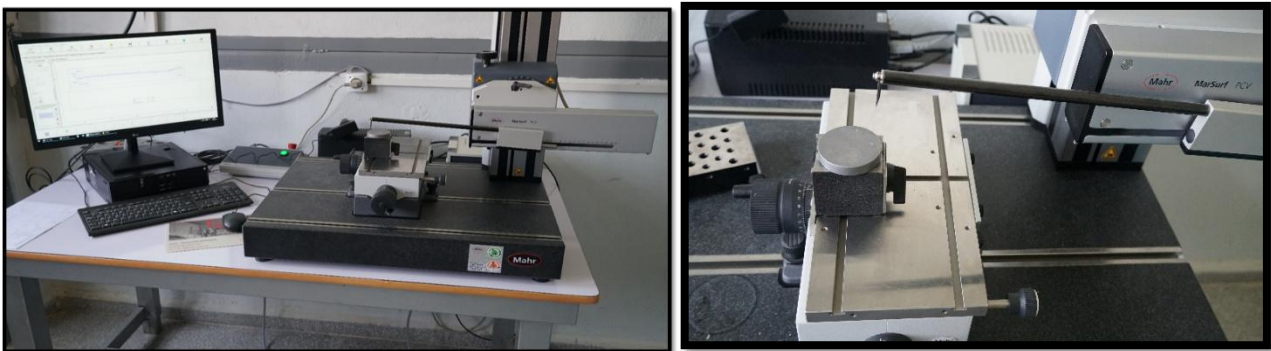
Après avoir parvenu à l'achèvement du chauffage complet jusqu'à la transformation des phases (de l'austénitique à la martensitique). Ce présent processus thermo-chimique a pour but de réaliser le cycle de refroidissement rapide afin de maximiser la dureté des pièces. À cette étape il est préalable de mettre notre bac d'huile de trempe (température de la trempe a huile 830°). L'échantillon reste trempé dans l'huile avec agitation pendant 8 minutes dans une atmosphère isotherme grâce à un système de refroidissement équipé au bac de trempe. La charge sort automatiquement du bac de trempe à l'air. Enfin Faire égoutter les échantillons de la solution de trempe pendant 10 min, et grâce à la ligne automatique l'échantillon va être nettoyé pour enlever le reste d'huile et des impuretés

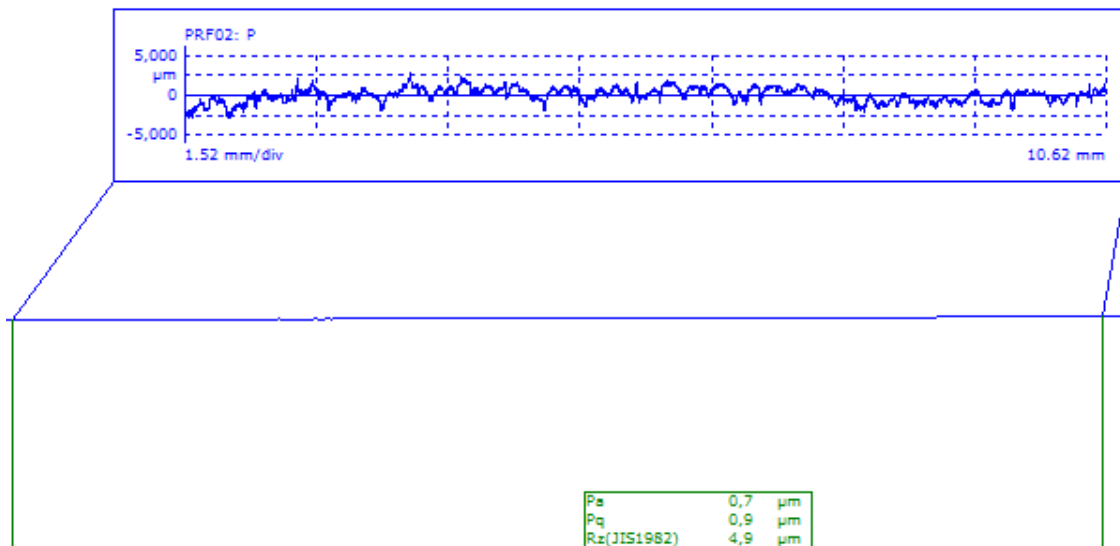
### II.3.3.3 La phase du revenu :

Cette opération consiste en fait à engendrer une évolution structurale d'un état métastable à un état proche de l'équilibre physico-chimique pour objet de provoquer une précipitation du carbone afin d'optimiser le durcissement des pièces. Le revenu de détente réduit les tensions internes de trempe mais n'affecte pas la dureté superficielle des pièces, et dans notre cas nous avons déjà opéré ce traitement automatiquement dans la gamme par configurer le four de revenu à une température de 180°C et le tout se traite sous cette atmosphère isotherme maintenue durant 2 heures.

### II.3.4 Caractérisation d'état de surface des échantillons après traitement :

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'étude de la variation de l'état de surface des échantillons après traitement sous différentes conditions. Donc un poste de mesure combiné **MarSurf XCR 20** permet de réaliser des mesures de rugosité et de contour sur un seul poste de mesure. Pour avoir des mesures correctes, des conditions d'utilisation ont été suivies: étalonnage, essuyage de l'échantillon avec de l'alcool pour dépoussiérer de toute impureté, travaillé dans un environnement acoustique calme et une température ambiante. La Figure **II.6** représente le profilomètre utilisé.





**Figure II.6 :** Poste de mesure combiné MarSurf XCR 20.

### II.3.5 Préparation des échantillons après traitement :

Pour la mesure de la couche cimentée de nos échantillons cylindriques il était nécessaire de réaliser les préparations étape par étape.

#### II.3.5.1 La phase de Découpage :

Cette toute première étape permet l'obtention des nouveaux échantillons (**Figure II.7**) facilitant la manipulation de la suite du travail. Et ils sont obtenus facilement par découpage à l'aide d'un fil coupant sur machine d'électroérosion de marque **ONA filière A25-35**.



**Figure II.7 :** Machine de fil coupant ONA et échantillon secondaire.

#### II.3.5.2 La phase de Polissage

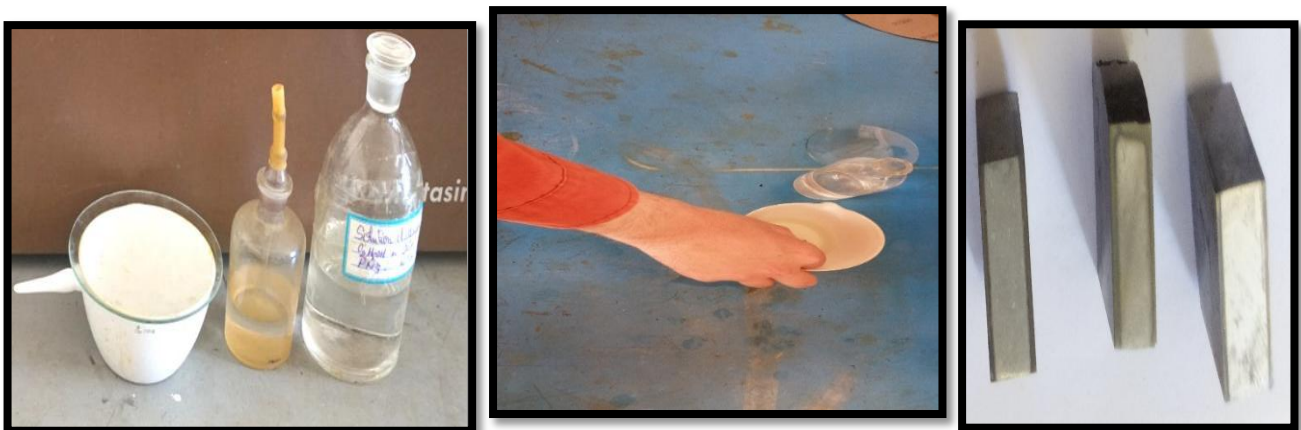
Après le découpage des échantillons. Une opération de polissage à l'aide d'une polisseuse mécanique avec des papiers abrasifs de différentes granulométrie (P180, P320, P400, P600, P800 et enfin P1200), en présence d'une lubrification afin d'éviter la surchauffe des pièces. Sur chaque papier, on maintient en contact l'échantillon pendant 2 à 5 minutes. Pour éviter le problème de la corrosion. Tout de suite après avoir poli l'échantillon avec le papier abrasif P1200, à l'aide d'une pâte en diamant et un rinçage courant, on doit passer au le polissage fin avec le papier feutre jusqu'à l'obtention d'une surface bien miroir.



**Figure II.8 :** Polisseuse mécanique+ Machine de polissage fin.

### II.3.5.3 La phase d'Attaque chimique :

L'attaque chimique dépend des détails microstructuraux recherchés, nous avons opté comme réactif d'attaque chimique une solution qui a la composition suivante : 96 % d'alcool éthanol  $C_2H_5OH$  + 4 % de nitrate  $HNO_3$ . La procédure s'est effectuée comme suit : Une fois on termine du polissage fin avec de l'eau distillée et le coton on lave la surface polie pour recevoir quelque goutte d'alcool éthanol ( $C_2H_5OH$ ) pour éviter l'oxydation d'eau, puis un séchage est recommandé. Ensuite, on plonge l'échantillon pendant 25 à 30 secondes dans la solution d'attaque et enfin un autre lavage puis quelques



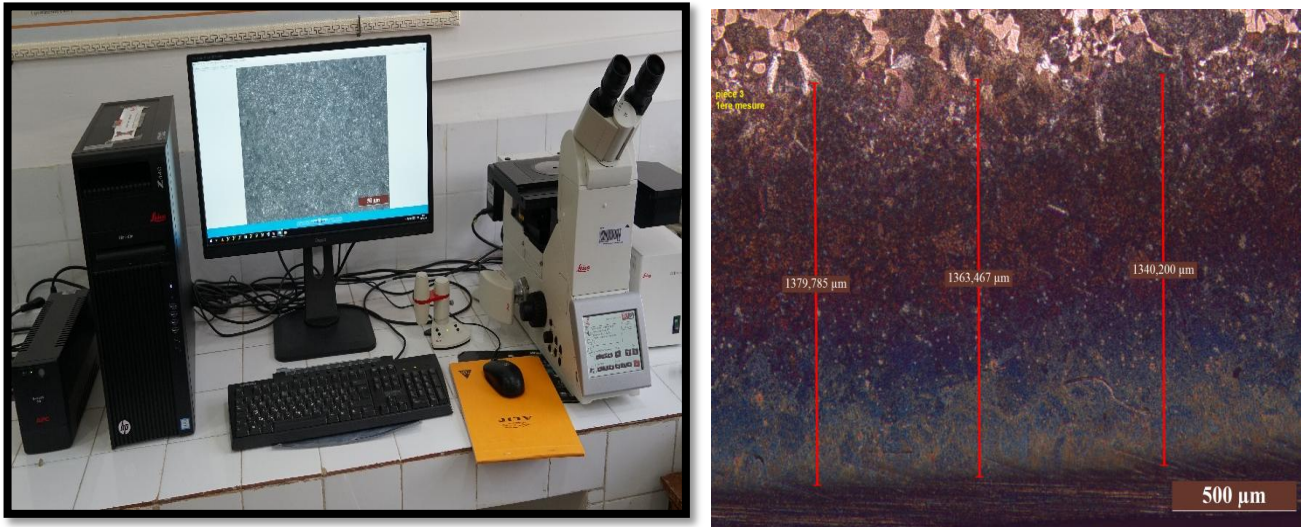
gouttes de l'alcool d'éthanol et une prise à la main sans plus toucher à la surface attaquée

**Figure II.9 :** Procédé d'attaque chimique.

### II.3.5.4 Analyse et mesurage des couches cémentées par microscope optique :

Le microscope est lié d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions. Le but de l'examen métallographique des métaux et des alliages est de définir leur structure avec précision.

Pour pouvoir mesurer et mettre en évidence les microstructures des couches cimentées des échantillons traités et préparés comme au préalable pour l'analyse microscopique, ce procédé a été réalisé sur un microscope **Leika** (**Figure II.10**) équipé d'une caméra numérique avec logiciel (**AXIO Cam MRc**) permettant l'acquisition, traitement et la sauvegarde des différentes images en utilisant 5 objectifs ( $\times 5$ ,  $\times 10$ ,  $\times 20$ ,  $\times 50$ ,  $\times 100$ ) et grandissement totale oculaire ( $\times 10000$ ).



**Figure II.10** : Equipement de microscope optique Leika.

### II.3.6 Caractérisation des couches cimentées par dureté :

La dureté, de symbole général H, caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures...), à l'usure et à l'érosion. Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell) mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore pour élastomères et plastiques).

La Dureté Rockwell (symbole HRC) selon NF EN 150 6508, consiste à imprimer en deux étapes un pénétrateur, **bille d'acier** ou **cône de diamant**, dans le matériau à tester en exerçant deux charges d'intensité connue F0 et F1. Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur, bille acier, (S : exemple 60 HRBS) ou carbure (W : exemple 60 HRBW) et cône diamant (A, C, D, et N). Une précharge (F0) permet de faire une empreinte initiale, pour éliminer les incertitudes propres aux défauts de la surface.

Les mesures des duretés des échantillons traités ont été réalisées à l'aide de la méthode Rockwell (HRC) utilisant un duromètre universel de type **SHANDONG YEXIAN HR 150 A**. L'essai consiste à imprimer, dans la couche superficielle des échantillons, un pénétrateur au cône de diamant.



**Figure II.11** : Duromètre SHANDONG YEXIAN HR 150 A.

### **II.3.7 Caractérisation des couches cémentées par analyse chimique :**

Afin révéler la composition chimique variable des couches cémentées, nous avons procédé à un examen d'analyse chimique de nos échantillons traités sur un spectromètre **SPECTROMAX** à émission optique assisté par un ordinateur et un logiciel qui y est installé (Figure II.1). Par deux ou trois test. Les données reçues via le système du couplage spectromètre-ordinateur se traitent par logiciel et les résultats sortent en moyenne.

### **II.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons décrit les procédés et des approches expérimentales de l'obtention des échantillons de notre acier XC10 ; sa composition chimique, son traitement thermochimique conditionné, ensuite passer aux caractérisations après traitement pour avoir les résultats du changement que nous lui avons attribué dans cette expérience à l'aide des équipements ; tel que le profilomètre, le duromètre, qui seront clairement présentés dans le suivant chapitre afin de les analyser, traiter et synthétiser l'objectif du travail.

**CHAPITRE III : RESULTAT DES  
EXPERIENCES, TRAITEMENT ET  
ANALYSES**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthode de planification qui a été utilisée pour la réalisation des essais est la méthode multifactorielle, cette méthode permet d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes. Afin d'atteindre notre objectif, l'analyse statistique des résultats expérimentaux a été faite à l'aide de logiciel Minitab 19. L'analyse de régression permet d'estimer la contribution relative de chacun des facteurs de contrôle sur la réponse globale mesurée pour l'optimiser.

La méthode des plans d'expérience permet en effet d'obtenir un maximum d'informations à un coût minimal. Les méthodes de régression linéaire ont permis d'obtenir une modélisation mathématique (les équations de régression pour les critères de rugosité et de la dureté en fonction des paramètres de du traitement. Pour chacun des modèles, des tests statistiques ont été appliqués pour sélectionner les paramètres les plus significatifs. Puis, l'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour vérifier la validité des modèles.

Les tableaux ANOVA liés aux paramètres étudiés montrent les degrés de liberté (DF), la somme des carrés (SS), les carrés moyens (MS), la probabilité (P-VAL.) et la contribution en pourcentage (Contr. %) de chaque facteur et des différentes interactions.

Une faible valeur P ( $\leq 0,05$ ) ou niveau de confiance 95% indique que les modèles obtenus sont considérés comme significatifs, ce qui est souhaitable.

Le coefficient de détermination  $R^2$ , est défini comme le rapport de la variation expliquée de la variation totale. On a une très bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites, Lorsque  $R^2$  approche l'unité

Dans la partie optimisation, plusieurs méthodes d'optimisation comme les algorithmes génétiques et les surfaces de réponse ont été utilisées en fonction des besoins et des objectifs recherchés.

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre  $S_y$ .

C'est une relation qui a la forme :

$$S_y = F(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (\text{III.1})$$

Dans notre cas de la première série, nous avons trois facteurs de base ( $k=3$ ), ( $D$ ,  $T$ ,  $TM$ ) et chaque facteur à trois niveaux de variation (niveau 1, niveau 2, niveau 3). Nous avons alors :  $N=9$  (**Tableau II.1**).

niveau	Température (°)	Debit (%)	Temps de maintien (Hrs)
1 (minimum)	900	0.9	4
2 (moyen)	920	1.0	5
3 (maximum)	940	1.2	6

**Tableau III.1** Attribution des niveaux de facteurs

Les essais sont numérotés de 1 à 64. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le **Tableau II.2**

N° d'essais	Valeurs codifiées			Valeurs réelles		
	X1	X2	X3	T (°C)	D (%)	TM (hrs)
1	-1	-1	-1	900	0.9	4
2	-1	0	0	900	1.0	5
3	-1	1	1	900	1.2	6
4	0	-1	0	920	0.9	5
5	0	0	1	920	1.0	6
6	0	1	-1	920	1.2	4
7	1	-1	1	940	0.9	6
8	1	0	-1	940	1.0	4
9	1	1	0	940	1.2	5

**Tableau III.2** : Matrice de planification pour un plan de 09 essais.

### III.2 Analyse de la variance ANOVA

#### III.2.1 Analyse de la variance ANOVA pour de la Dureté

Selon les résultats de l'analyse de la variance pour la dureté présentés dans le **Tableau III.3**, la température et le temps de maintien ont un effet statistique significatif avec des valeurs de contribution de 42.22 % et 36.60% respectivement. L'effet du débit de carbone est également significatif avec une contribution de 19.36%.

Analyse de la variance pour la dureté HRC							
Source	DL	Som Car ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	Cont %	Observation
<b>Régression</b>	3	81,488	27,1627	89,83	0,000	98.18%	
<b>D</b>	1	16,071	16,0714	53,15	0,001	19.36%	significatif
<b>T</b>	1	35,042	35,0417	115,89	0,000	42.22%	significatif
<b>TM</b>	1	30,375	30,3750	100,45	0,000	36.60%	significatif
<b>Erreur</b>	5	1,512	0,3024				
<b>Total</b>	8	83,000					
<b>R<sup>2</sup> = 98.18% R<sup>2</sup> (adj) =97.09%</b>							

**Tableau III.3** Analyse de la variance ANOVA pour la dureté(HRC).

### III.2.2 Analyse de la variance ANOVA pour l'épaisseur de la couche cimentée

Selon les résultats de l'analyse de la variance pour de l'épaisseur de la couche cimenté **EP** présentés dans le **Tableau III.4**, la température a un effet statistique significatif avec une plus grande valeur de contribution de 50.62 %. L'effet du temps de maintien et le débit de carbone également significatif avec une contribution égale a 25.69% et 23.23 % respectivement.

Analyse de la variance ANOVA pour l'épaisseur de la couche cimentée							observation
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	% C	
Régression	3	111077	37025,7	369,35	0,000	99.55%	
D	1	25926	25926,0	258,62	0,000	23.23%	significatif
T	1	56483	56482,7	563,44	0,000	50.62%	significatif
TM	1	28668	28668,3	285,98	0,000	25.69%	significatif
Erreur	5	501	100,2				
Total	8	111578					
<b><math>R^2 = 99.55\%</math> <math>R^2</math> (adj) =99.28%</b>							

**Tableau III.4** Analyse de la variance ANOVA pour EP.

### III.2.3 Analyse de la variance ANOVA pour la rugosité Ra

Selon les résultats de l'analyse de la variance pour la rugosité présentés dans le **Tableau III.5**, le temps de maintien a un effet statistique significatif avec une plus grande valeur de contribution de 49.10 %. L'effet de la température et le débit de carbone également significatif avec une contribution égale a 34.10% et 12.72 % respectivement.

Analyse de la variance ANOVA pour la rugosité Ra							observation
Source	D L	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	%C	
Régression	3	0,117222	0,039074	39,07	0,001	95.91%	
D	1	0,015556	0,015556	15,56	0,011	12.72%	significatif
T	1	0,041667	0,041667	41,67	0,001	34.10%	significatif
TM	1	0,060000	0,060000	60,00	0,001	49.10%	significatif
Erreur	5	0,005000	0,001000				

Total	8	0,122222					
$R^2 = 95.91\%$ $R^2$ (adj) =93.45%							

**Tableau III.5** Analyse de la variance ANOVA pour Ra

### III.3 Analyse de la régression linéaire

#### III.3.1 Analyse de régression de la dureté

L'équation de régression pour les critères de la dureté en fonction des termes qui ont un effet significatif est donnée par l'équation (III.2).

$$\text{Dureté} = -73,3 + 10,71 D + 0,1208 T + 2,250 TM \quad (\text{III.2})$$

Le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) présente la proportion de la variation de la réponse expliquée par le modèle est d'environ 98.18%, ce qui le rend en raisonnable accord avec ( $R^2$ ) *ajusté* de 97.09%.

#### III.3.2 Analyse de régression de l'épaisseur EP

L'équation de régression pour les critères de la dureté en fonction des termes qui ont un effet significatif est donnée par l'équation (III.3).

$$\text{EP} = -4022 + 430.3 D + 4,851 T + 69,12 TM \quad (\text{III.3})$$

Le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) présente la proportion de la variation de la réponse expliquée par le modèle est d'environ 99.55%, ce qui le rend en raisonnable accord avec ( $R^2$ ) *ajusté* de 99.28%.

#### III.3.3 Analyse de régression de la rugosité Ra

L'équation de régression pour les critères de la dureté en fonction des termes qui ont un effet significatif est donnée par l'équation (III.4).

$$\text{Ra} = 5,333 - 0,3333 D + 0,004167 T - 0,1000 TM \quad (\text{III.4})$$

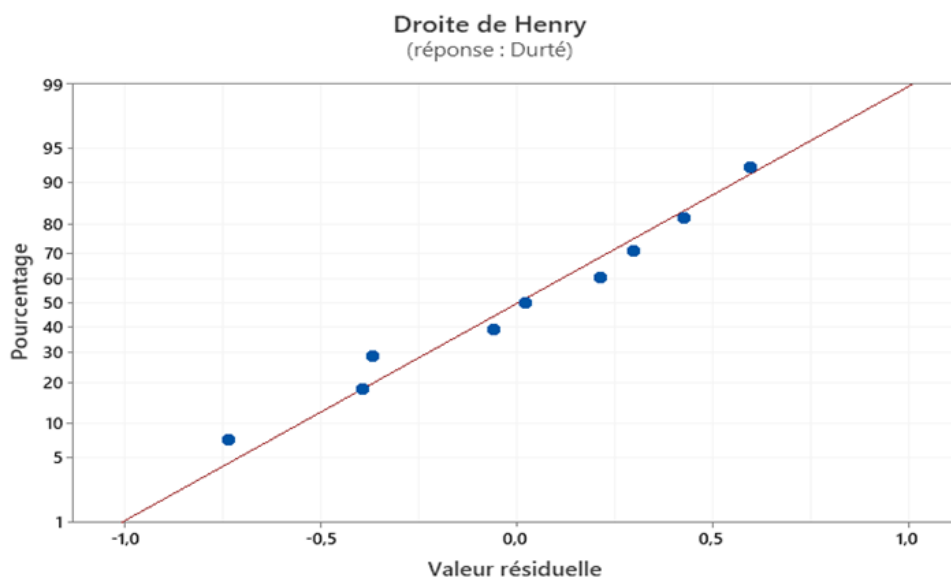
Le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) présente la proportion de la variation de la réponse expliquée par le modèle est d'environ 95.91%, ce qui le rend en raisonnable accord avec ( $R^2$ ) *ajusté* de 93.45%.

### III.4 Les graphes résiduels

#### III.4.1 Les graphes résiduels de la dureté

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de la dureté est :  $R^2 = 98.18\%$ . La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une haute signification du modèle et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales. Pour valider ce modèle, il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différence entre les valeurs expérimentales de dureté et celles obtenues à partir du modèle de prédiction).

La Droite de Henry nous dit que si les points forment à peu près une ligne droite, cela veut dire que les valeurs résiduelles sont réparties normalement, donc d'après la **Figure. III.1**, les résidus du modèle de la dureté peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant.

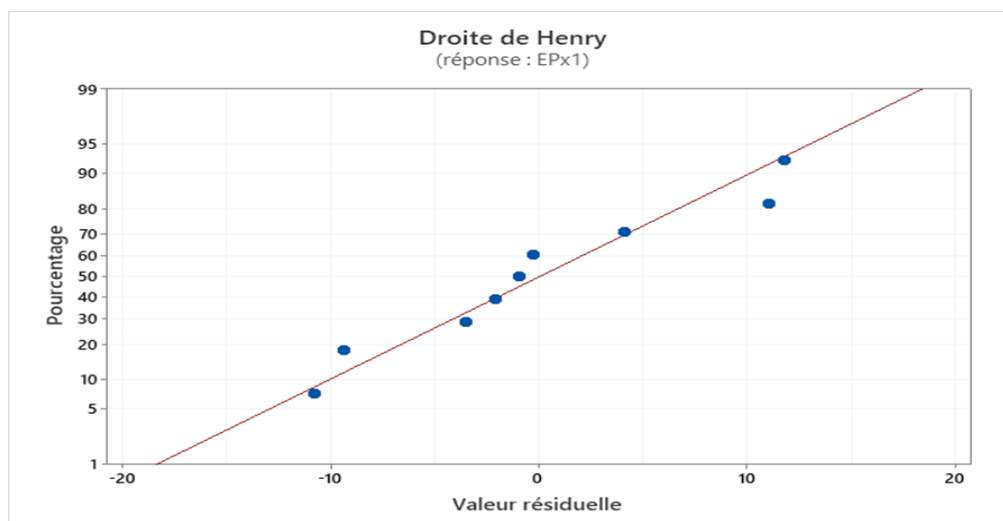


**Figure. III.1** La droite de Henry pour la dureté.

#### III.4.2 Les graphes résiduels de l'épaisseur EP

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de l'épaisseur **EP** est :  $R^2 = 99,55\%$ . La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une haute signification du modèle et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.

La **Figure. III.2**, montre que les résidus du modèle de **EP** peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant.

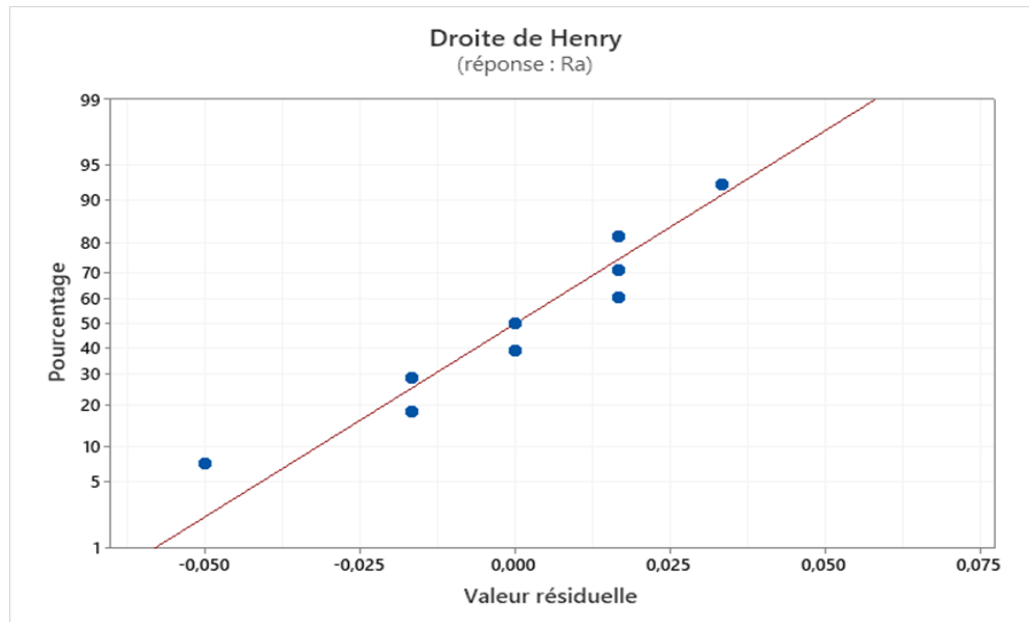


**Figure. III.2** La droite de Henry pour EP.

### III.4.3 Les graphes résiduels de l'épaisseur Ra

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de **Ra** est :  $R^2=95.91\%$ . La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une haute signification du modèle et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.

La **Figure. III.3**, montre que les résidus du modèle de **Ra** peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant.



**Figure. III.3** La droite de Henry pour EP.

## III.5 Graphique des effets paramètres du traitement pour les réponses

### III.5.1 Graphique des effets paramètres du traitement pour la dureté

La **figure III.4** montre l'effet des paramètres du traitement thermochimique (D, T, TM) sur la dureté de la couche superficielle. Cette figure montre que la température et le temps de maintien ont un effet significatif sur la dureté. En effet, on remarque que les paramètres (*T et TM*) ont les plus grandes pentes que celle du débit de carbone. L'analyse des résultats de la (**Figure. III.4**) montre que l'augmentation de la température et le temps de maintien entraîne une augmentation de la dureté. Aussi l'augmentation du débit de carbone donne une dureté élevée (moins effet par rapport au temps de maintien et la température).

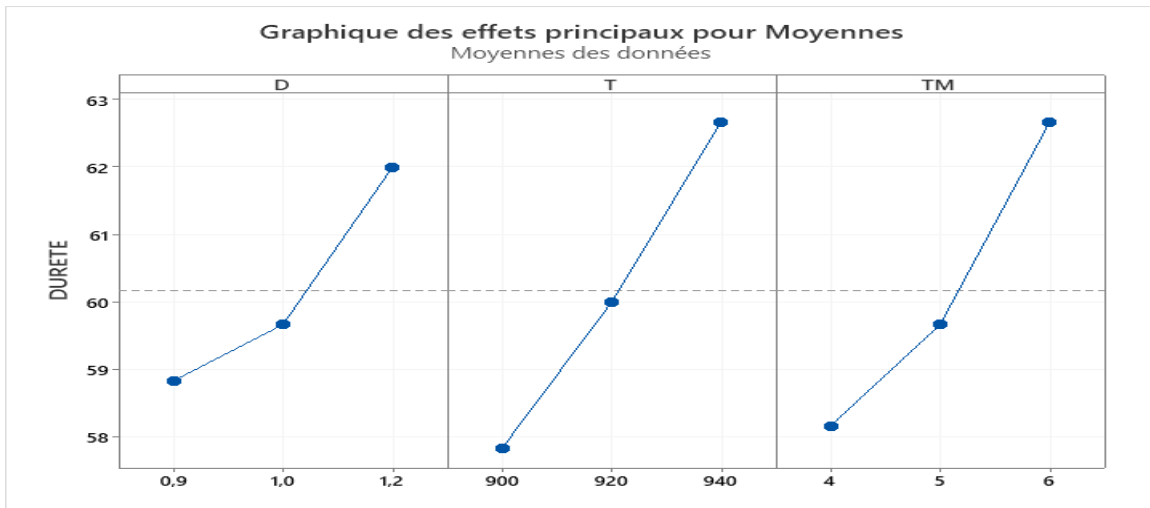


Figure III.4 L'effet des paramètres (D, T, TM) sur la dureté

**III.5.2 Graphique des effets paramètres du traitement pour la l'épaisseur EP**

La figure III.5 montre l'effet des paramètres du traitement thermochimique (D, T, TM) sur la l'épaisseur de la couche superficielle. Cette figure montre que la température et le temps de maintien ont un effet significatif sur la l'épaisseur de la couche superficielle. L'analyse des résultats de la (Figure. III.4) montre que l'augmentation de la température et le temps de maintien entraine une augmentation de l'épaisseur de la couche. Aussi l'augmentation du débit de carbone donne une épaisseur de couche élevé (moins effet par rapport au temps de maintien et la température).

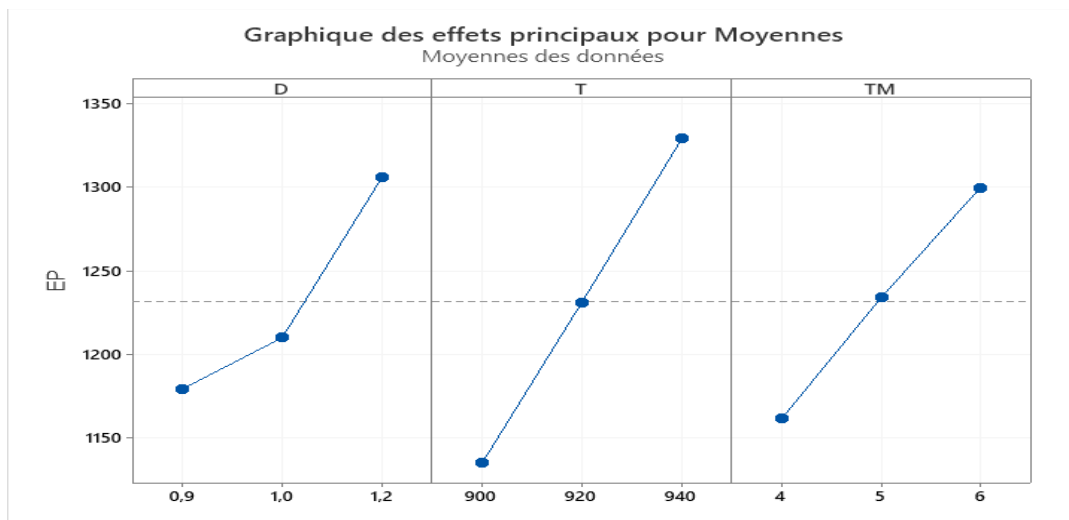


Figure III.5 L'effet des paramètres (D, T, TM) sur EP

**III.5.3 Graphique des effets paramètres du traitement pour la rugosité Ra**

La figure (III.6) montre l'effet des paramètres du traitement thermochimique (D, T, TM) sur la rugosité de surface. Cette figure montre que le temps de maintien et la température ont un effet significatif sur la rugosité de surface. L'analyse des résultats de la (Figure. III.6) montre que l'augmentation de la température et le temps de maintien entraine une diminution de rugosité de

surface. Aussi l'augmentation du débit de carbone donne une rugosité assez faible (moins effet par rapport au temps de maintien et la température).

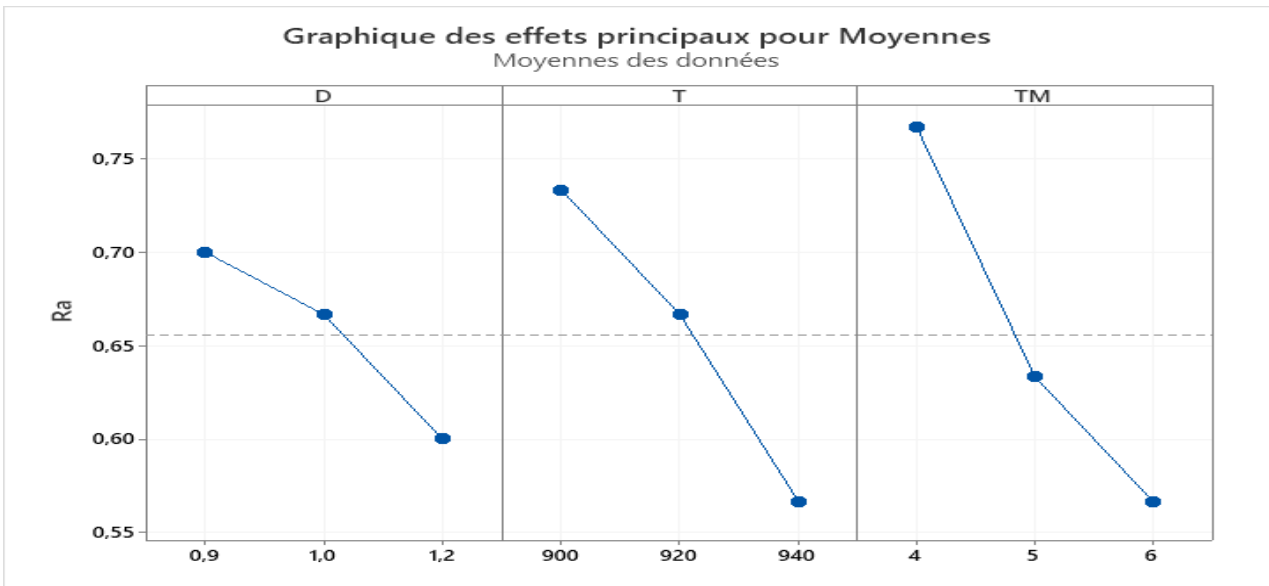


Figure III.6 L'effet des paramètres (D, T, TM) sur Ra

### III.6 Graphiques de surface

#### III.6.1 Graphiques de surface pour la Dureté

Ces figures ont été élaborées en utilisant le logiciel Origine. La figure III.7 montre l'effet de l'interaction du débit de carbone et le temps de maintien sur la dureté. Cette courbe Montre que l'augmentation du débit de carbone et la température augmente la dureté de la couche superficielle.

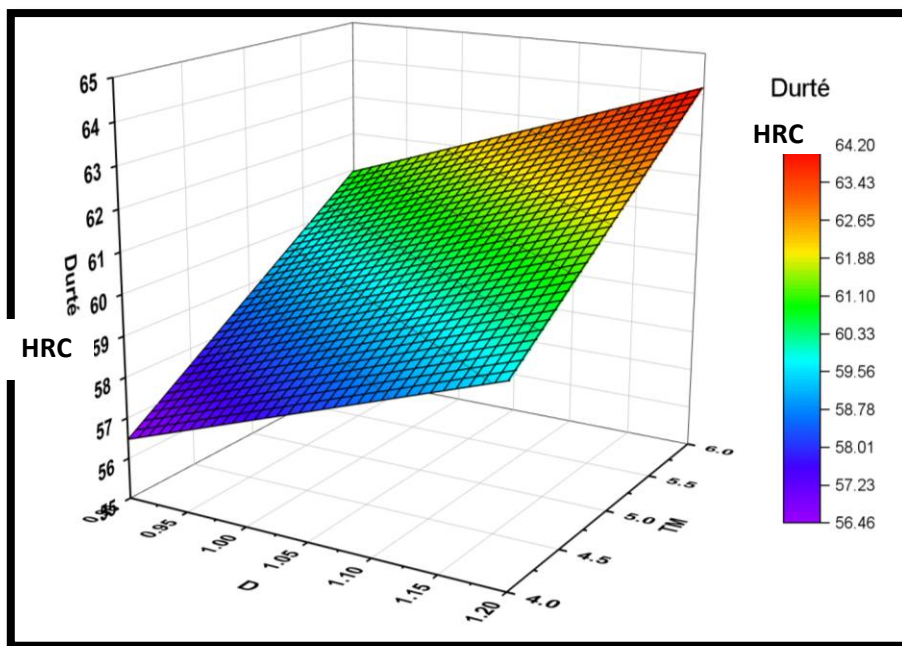


Figure III.7 Effet de l'interaction du débit de carbone et le temps de maintien sur la dureté.

La figure (III.8) montre l'effet de l'interaction du débit de carbone et temps de maintien sur la dureté. Cette courbe Montre que l'augmentation du débit de carbone et le temps de maintien augmente la dureté de la couche superficielle.

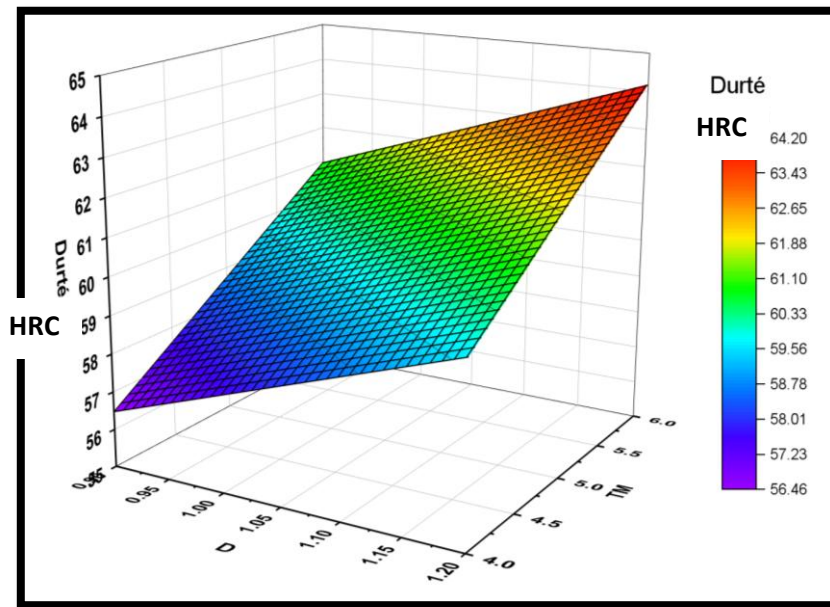


Figure III.8 Effet de l’interaction du débit de carbone et temps de maintien sur la durté.

La figure (III.9) montre l’effet de l’interaction de la température et temps de maintien sur la durté. Cette courbe Montre que l’augmentation du temps de maintien et la température augmente la durté de la couche superficielle.

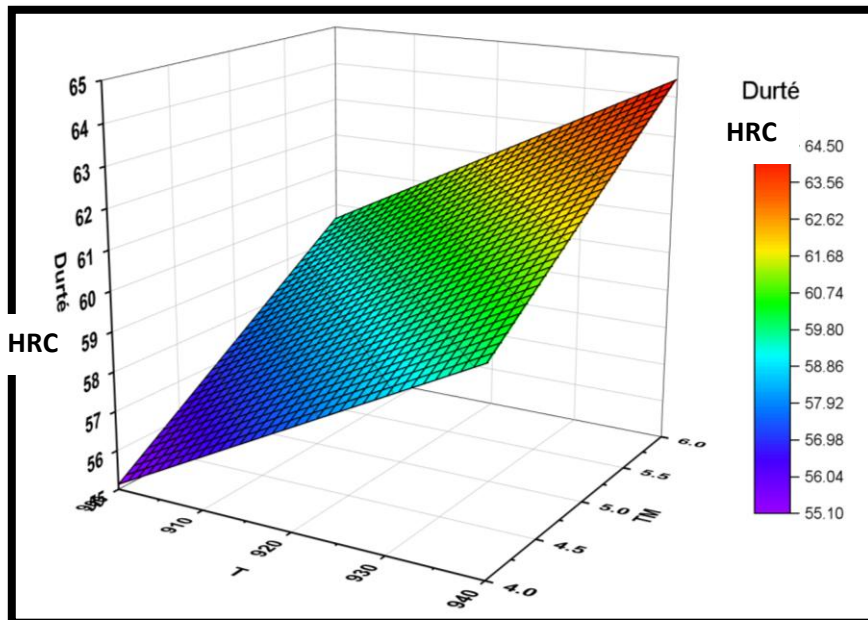


Figure III.9 Effet de l’interaction de la température et le temps de maintien sur la durté.

### III.6.2 Graphiques de surface pour l’épaisseur de la couche EP

L’influence du débit de carbone et la température sur EP est illustrée dans la figure (III.10). Cette courbe montre qu’avec des grandes valeurs de débit de carbone et aussi des valeurs élevées de la température donne la plus grande valeur de l’épaisseur de la couche.

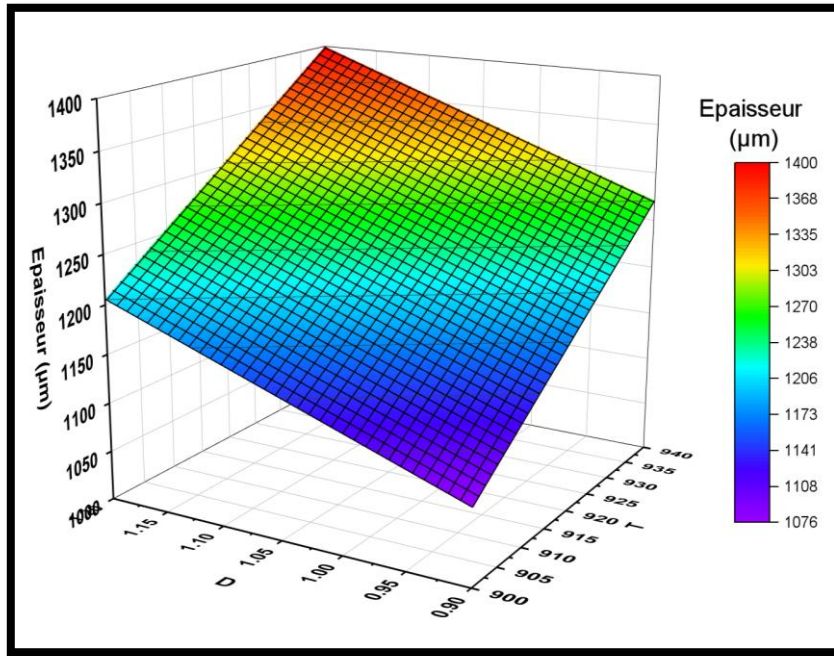


Figure III.10 Effet de l'interaction du débit de carbone et la température sur EP.

La figure (III.11) montre l'évolution la dureté en fonction de du débit de carbone et le temps de maintien. Des valeurs élevées de l'épaisseur de la couche sont obtenues lorsqu'en augmente la valeur du débit le temps de maintien.

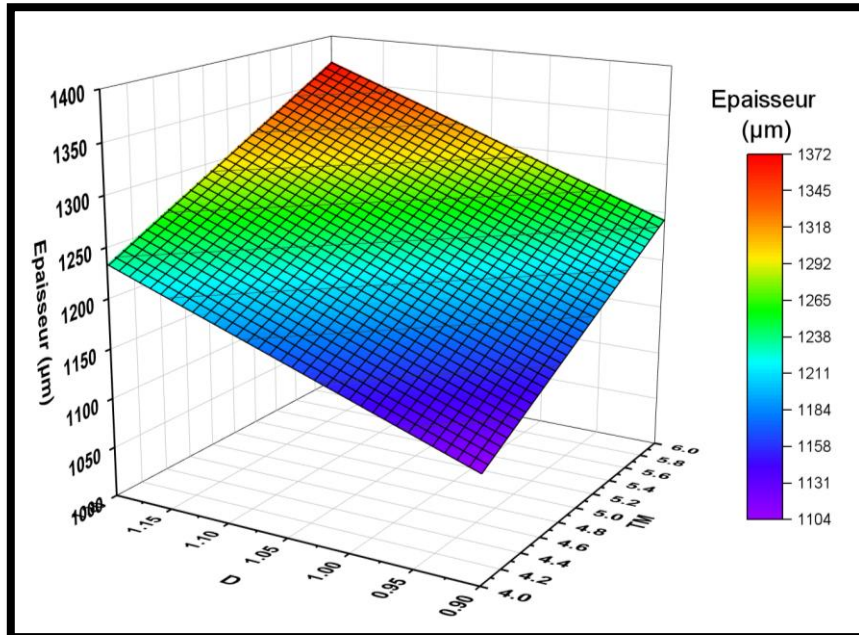


Figure III.11 Effet de l'interaction du débit de carbone et temps de maintien sur EP.

La figure (III.12) montre l'effet de la température et le temps de maintien sur l'épaisseur de la couche, on observe que lorsque les deux facteurs donnent des valeurs assez élevé, EP va augmenter.

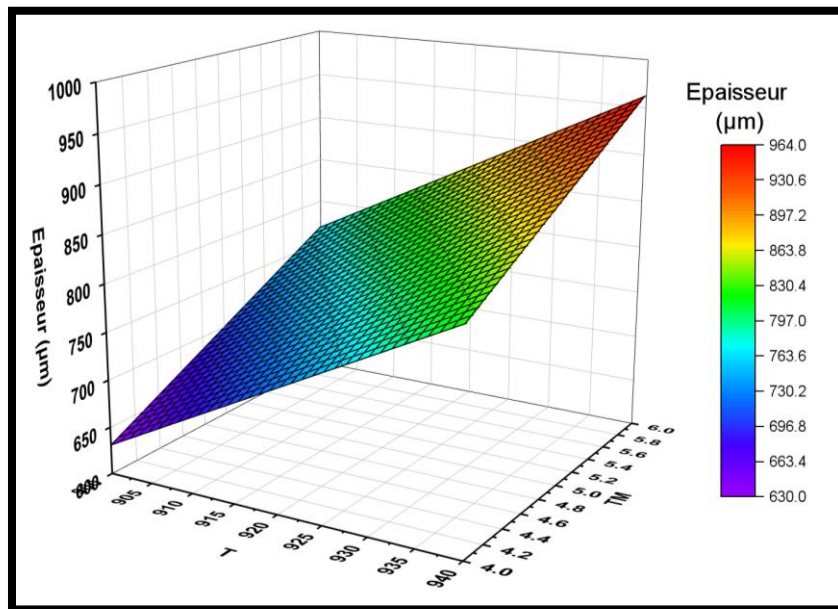


Figure III.12 Effet de l'interaction de la température et temps de maintien sur EP

### III.6.3 Graphiques de surface pour la rugosité Ra

La figure (III.13) montre l'effet de l'interaction de du débit de carbone et la température sur la rugosité de surface Ra. Cette courbe Montre que l'augmentation de débit de carbone et de la température diminue la rugosité de surface (Ra).

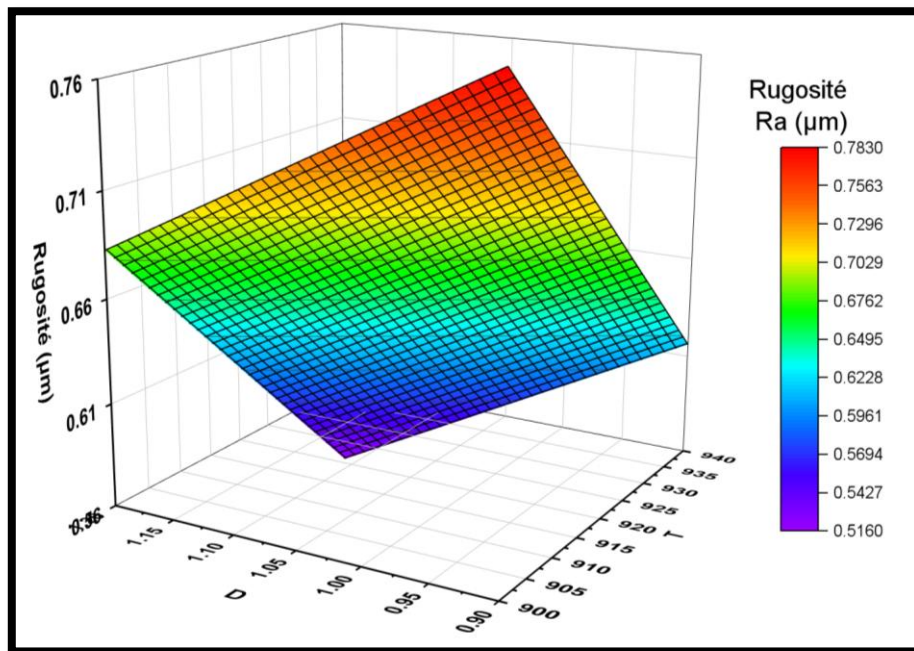


Figure III.13 Effet de l'interaction du débit de carbone et la température sur Ra.

La figure III.14 montre l'effet de l'interaction de du débit de carbone et le temps de maintien sur la rugosité de surface Ra. Cette courbe Montre que l'augmentation de débit de carbone et de la température diminue la rugosité de surface (Ra).

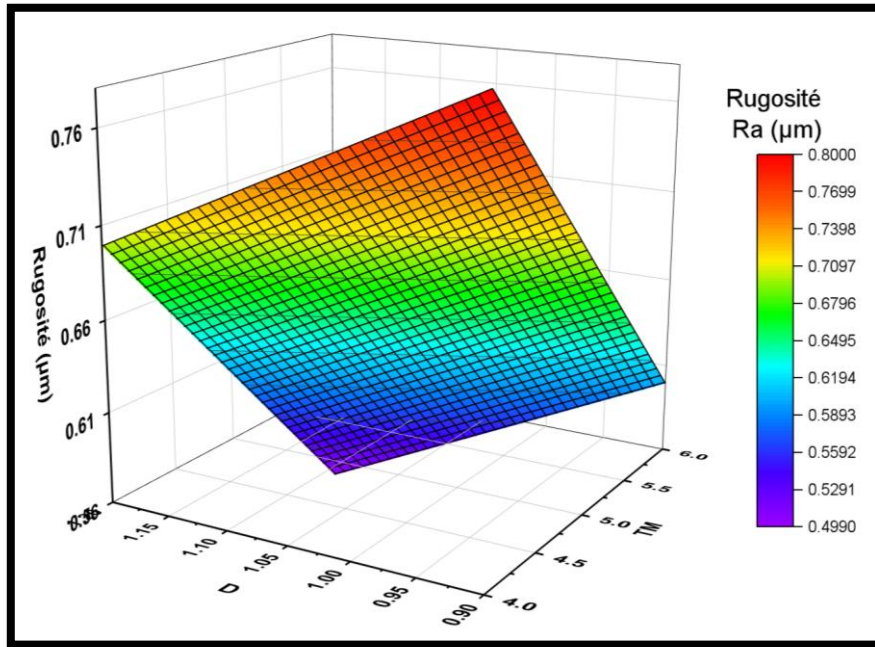


Figure III.14 Effet de l'interaction du débit de carbone et temps de maintien sur Ra.

La figure (III.15) montre l'effet de l'interaction de la température et le temps de maintien sur la rugosité de surface Ra. Cette courbe Montre qu'avec des grandes valeurs de températures et de temps de maintien la rugosité de surface (Ra) diminue.

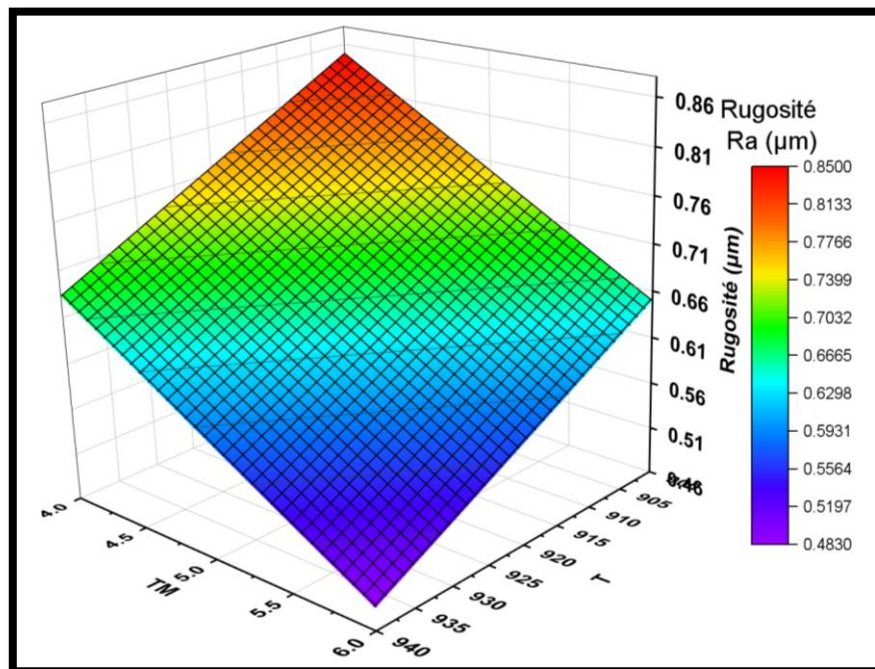


Figure III.15 Effet de l'interaction de la température et temps de maintien sur Ra.

**III.7 Effet de débit de carbone sur la composition chimique du matériau**

D'après les traitements thermochimiques sur notre acier, on a conclu qu'il y a une grande influence entre les paramètres débit de carbone et le composant chimique (C) par rapport aux autres paramètres (voir la figure III.16).

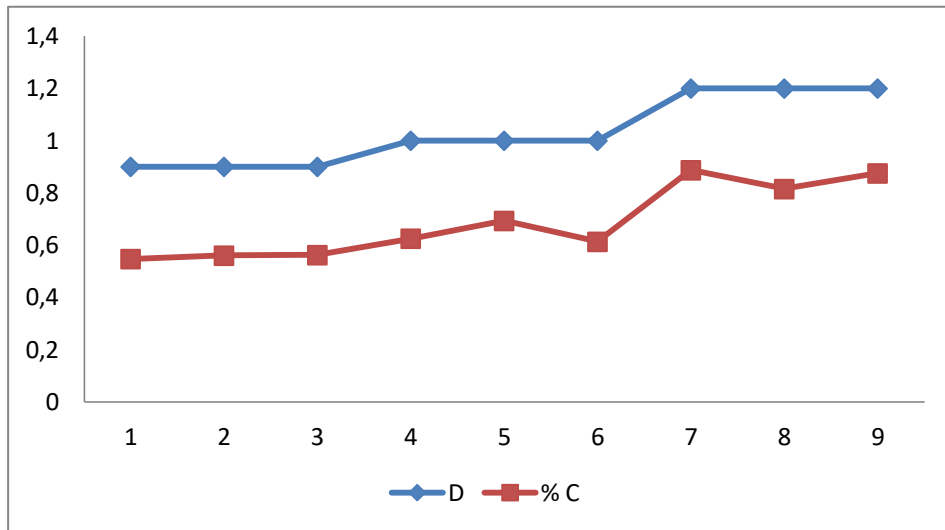


Figure III.16 Effet de débit de carbone sur le composant chimique (C)

### III.8 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites

#### III.8.1 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la dureté

La comparaison entre les valeurs expérimentales de la dureté et celles estimées par notre modèle est présentée sur la Figure III.17

Les valeurs prédites et les valeurs expérimentales de la dureté sont très proches les unes des autres. Une bonne corrélation a été montrée entre les deux courbes.

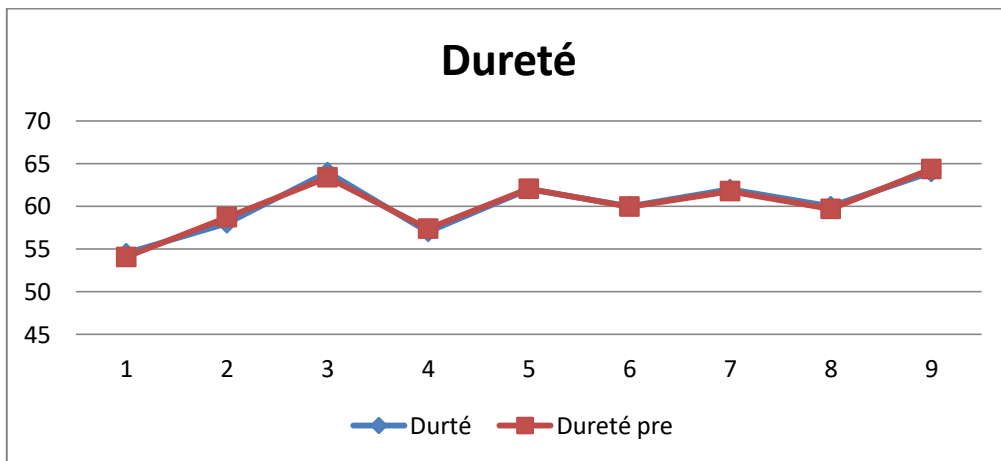


Figure III.17 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour la dureté.

#### III.8.2 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour l'épaisseur

La comparaison entre les valeurs expérimentales de l'épaisseur de la couche et celles estimées par notre modèle est présentée sur la Figure III.18

Il est clair que les deux courbes se confondent et les valeurs expérimentales et prédite sont très proches. Nous avons aussi observé qu'une bonne corrélation a été montrée entre les deux courbes.

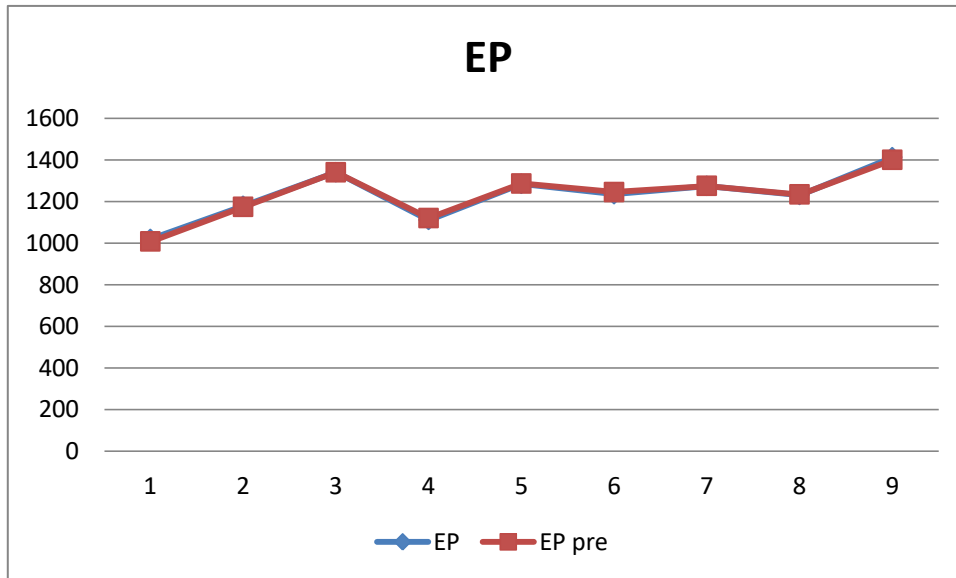


Figure III.18 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour EP.

**III.8.3 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la rugosité**

La comparaison entre les valeurs expérimentales de la rugosité Ra et celles estimées par notre modèle est présentée sur la Figure III.19

Il est clair que les deux courbes se confondent et les valeurs expérimentales et prédite sont très proches. Nous avons aussi observé qu’une bonne corrélation a été montrée entre les deux courbes.

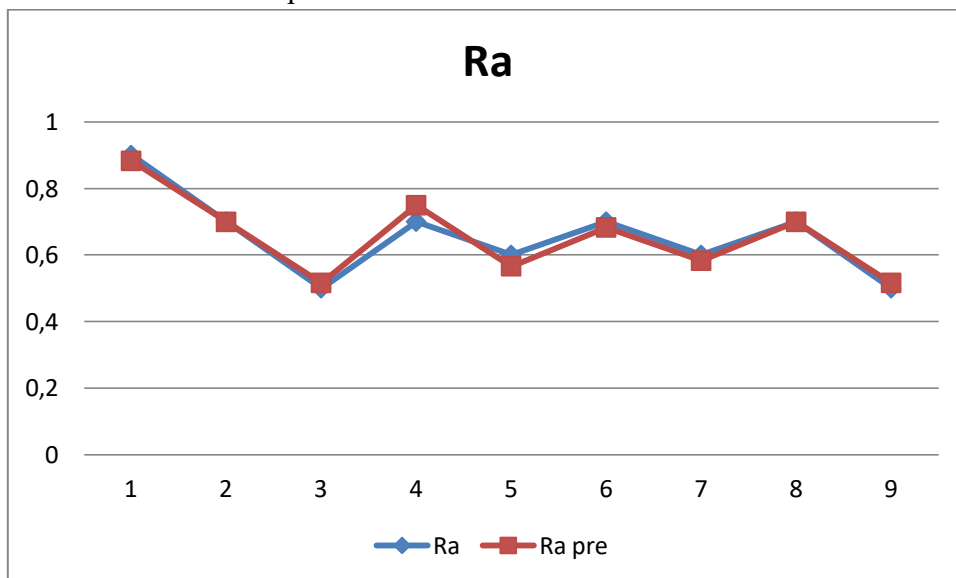


Figure III.19 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour Ra

**III.9 Optimisation multi-réponses :**

La méthode de la régression linéaire est une technique mathématique et statistique utilisées pour obtenir les conditions optimales du traitement de cémentation en utilisant comme réponses ; la dureté, l’épaisseur de la couche EP et la rugosité de surface Ra (Figure III.20).

Dans notre étude nous proposons de rechercher les paramètres optimaux, pour les objectifs suivants :

- *Bon état de surface (Ra mini).*

- Dureté enlevée maximale (Dureté max).
- Epaisseur de Couche maximale (EP max).

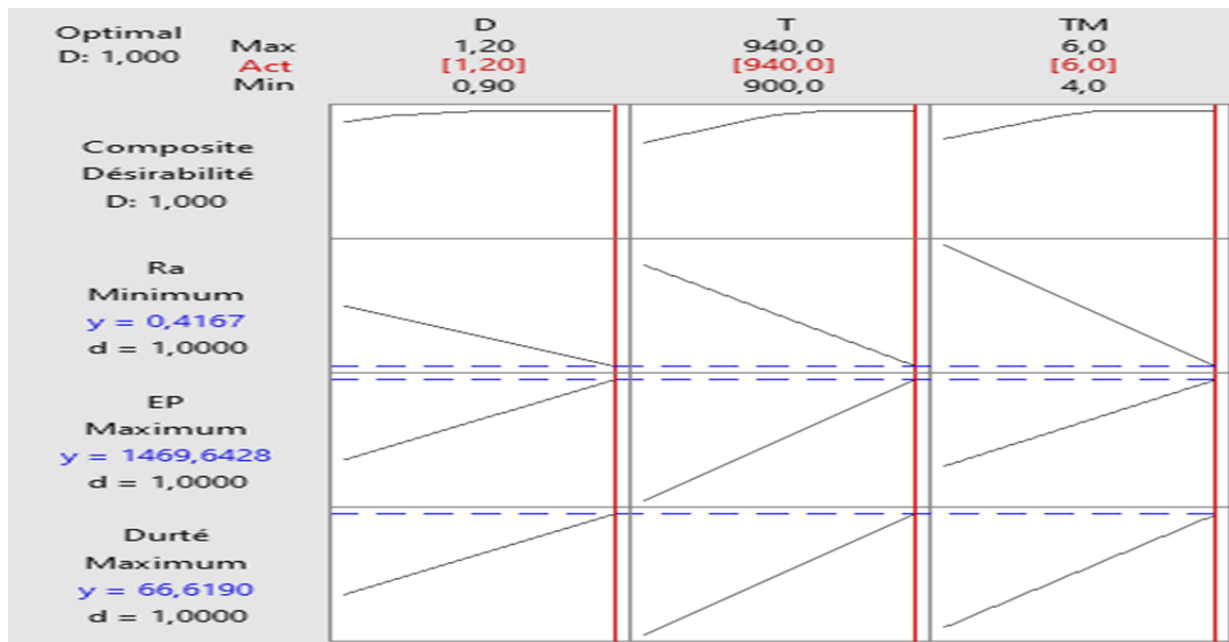


Figure III.20 Optimisation des paramètres de cémentation

Le **tableau III.5** montre les résultats d’optimisation, le régime du traitement optimal pour la dureté, l’épaisseur **EP** et la rugosité de surface **Ra** sont comme suit : **D**= 1.2%, **T**=940 °C et **TM**=6 heures. La dureté optimale est 66.6190 HRC, l’épaisseur optimale est 1469.64 µm, la valeur optimale de la rugosité de surface Ra 0.4166 µm, avec une désirabilité composite de 1.00.

Solution	D (%)	T (°)	TM (hrs)	Ra (µm) Valeur ajustée	EP (µm) Valeur ajustée	Dureté (HRC) Valeur ajustée	Désirabilité composite
1	1,2	940	6	0,416667	1469,64	66,6190	1

Tableau III .6 Combinaison optimale.

### III.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré l’influence des paramètres de traitement thermochimique (Débit, température et temps de maintien) sur les réponses ; la rugosité de surface Ra, l’épaisseur de la couche superficielle et la dureté, en utilisant la méthodologie de la régression linéaire associée à l’analyse de variance ANOVA. Les modèles mathématiques permettent de nous donner, simuler les valeurs de Dureté, EP et Ra et optimiser les conditions de traitement pour des meilleures valeurs de réponse.

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

## **Conclusion Générale**

L'application de la méthode de l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de la régression linéaire nous a permis de mettre en évidence l'impact des paramètres de traitement de cémentation (Débit de carbone, température et temps de maintien), sur la dureté, l'épaisseur de la couche superficielle et la rugosité des surfaces usinées.

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ❖ L'analyse de la régression linéaire, le plan des expériences, l'analyse statistique ANOVA et l'optimisation multi-réponses sont des outils très efficaces pour tous nos problèmes de traitement des résultats expérimentaux.
- ❖ L'analyse de la variance (ANOVA) a trouvé que le temps de maintien et la température ont un effet significatif sur l'évolution de la rugosité de surface Ra, suivie par le débit de carbone.
- ❖ D'après (ANOVA) le temps de maintien et la température ont une grande influence sur la dureté, suivie par le débit de carbone.
- ❖ L'analyse de la variance (ANOVA) a conclu que le temps de maintien et la température ont un effet significatif sur l'épaisseur EP, suivie par le débit de carbone.
- ❖ D'après nos expériences on a conclu qu'il y a une influence de débit de carbone D sur le composant chimique C par rapport aux autres paramètres.
- ❖ Les modèles mathématiques développés par la régression linéaire sont efficaces, ils permettent de faire une prédiction et une optimisation des réponses.
- ❖ Le coefficient de corrélation  $R^2$  et le coefficient de corrélation  $R^2$  ajusté des modèles de la dureté, EP, Ra ; montre que les trois modèles sont valables à une grande signification.
- ❖ Les graphes qui ont été élaborées en utilisant l'origine permettent d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.
- ❖ L'analyse de la régression linéaire a réussi d'optimiser les conditions de coupe, pour minimiser la rugosité de surface et maximiser la dureté et l'épaisseur de la couche superficielle.

## *Conclusion générale et perspectives*

### ***En perspectives :***

- ❖ Ajouter d'autre réponse tel que ; la ténacité, les tests de la résistance des matériaux (flexion, traction) et test d'usure sur l'expérimentation.
- ❖ D'autres traitements thermochimiques tels que la carbonituration et la nitruration seront aussi souhaitables en vue d'améliorer les propriétés de surface de ces outils.
- ❖ Faire une comparaison entre les différents traitements thermochimiques.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Références bibliographiques :**

- [1] **R. DESGAGNES, R. LANGEVIN**, « guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique », Le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (PERFORM), Bibliothèque et Archives Canada, 2015.
- [2] **S. BENZAADA**, « Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes », p.80 « en ligne » [www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/Traitement%20thermique.pdf](http://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/Traitement%20thermique.pdf)
- [3] **E.J MITTEMEIJER , J.T SLYCKE**, « Chemical potentials and activities of nitrogen and carbon imposed by gaseous nitriding and carburizing atmospheres », Surf. Eng, 12(2), 1996.
- [4] **J.R. DAVIS** : « Surface Hardening of Steels- Understanding the Basics'; ASM International, 2002.
- [5] **M.M.BCHAUPINIL, L.SERAPLIR , R.TRIWT**, « Analogies et différence entre les traitements de carbonituration et de cémentation », Aciers speciaux №13, 1975.
- [6] **R. LEVEQUE**, « Traitement superficiels des aciers à outils », Techniques de l'Ingénieur, 1993, M1135, Paris, France.
- [7] **H. HERNS, H. FR. HINZ AND I. M. HUCKLENBROICH**, « Progress in tool steel », Proceeding of the 4th international Conference on tooling, 1996, University Bochum.
- [8] **V.YAKUB, A.TIJANI**, « Modeling and Simulation of Thermochemical Heat Treatment Processes: A Phase Field Calculation of Nitriding in Steel », PHD thesis, university of Bremen 2008.
- [9] **D.GHIGLIONE, C.LEROUX**, « Pratique des traitements thermochimiques, cémentation, carbonituration » ; Technique de l'ingenieur M1226, page 2-20.
- [10] **X. AN, J. CAWLEY, W.M. RAINFORTH AND L. CHEN**, « Spectrochemica Acta-Part B», 58, 689-698, 2003,
- [11] **A. MOUUSA**, « Amélioration des propriétés de surface d'un acier à outils de travail à chaud par des traitements thermiques et thermochimiques (Cémentation) », Mémoire de Magister, Université Badji-Mokhtar Annaba, 2011.
- [12] **G. KRAUSS**, « Microstructure and properties of carburized steel', In: Metals handbook. Heat treating, vol. 4. Materials Park, OH: ASM International; p. 363–75, 1991.
- [13] **G. PARRISH**, «Carburizing: microstructures and properties», Materials Park, OH: ASM International; 1999.
- [14] **J.P.PEYRE, TOURNIER**, «Choix des traitements thermiques superficiels », RPM CETIM Senlis 1985.
- [15] **Y. UEDA, N. KANAYAMA, K. ICHII, T. OISHI**, « Surface and Coatings Technology »; p50, 193, 2005.
- [16] **K. OLGA, ROWAN AND RICHARD D, JR. Sisson**, « Effect of Alloy Composition on Carburizing Performance of Steel », Journal of Phase Equilibria and Diffusion, JPEDAV, ASM International, 2009.
- [17] **J.BANALIS, G.MEADER**, « Précis de métallurgie-Elaboration, structure, propriétés, normalisée» ; Edition Nathau 1997.
- [18] **A.CONSTANT, G.HENRY ET J.C.CHRBONNIER**, « Principes de base des traitements thermiques, thermomécaniques, et thermochimiques des aciers », Edition 1992.
- [19] **P. MICHAUD**, « Compréhension du rôle des éléments carburigènes dans la performance de nuances d'aciers destinées aux outillages pour l'injection d'alliages légers », aciers spéciaux N°35,1986.
- [20] **J. BLOUET, R. GRAS**, « Traitement et revêtement de surface pour application tribologique », P34, CETIM, 1994.

### *Références bibliographiques*

- [21] **A. CROLET**, « contribution à l'étude de l'influence du comportement vibratoire du système « pièce-outil-machine » sur la qualité de surface obtenue en tournage de super finition », thèse de doctorat de l'institut National Polytechnique de Lorraine, pp 28, 2008.
- [22] **C. BARLIER, L. GIRARDIN**, « Matériaux et usinage », Memotech Productique, pp 115-127, 1999.
- [23] **B. RAPHET**, « États de surface – Caractérisation », Techniques de l'Ingénieur -Sciences & Techniques, Vol. R 1230, pp. 22, 2005.
- [24] **Antoine SARAZIN**, « les solutions Sandvik coromantaux problématiques d'états de surface », 2010.
- [25] **Naima AKILAL**, « Etude de la corrosion de la soudure de l'acier A33 utilisé en construction navale », Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira Béjaia ,2007
- [26] **B. DALILA, K. BOUCHRA**, « influence de la géométrie de l'outil sur l'état de surface », mémoire de master, université de Saad Dahlab Blida, 2019.

## *Références bibliographiques*