

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT de Génie Electrique

N° :



FILIERE : Electromécanique

OPTION : Maintenance Industrielle

Mémoire

Présenté pour l'obtention Du
diplôme de Master Académique

Par :

SAOUDI SOUFIONE
MESSAOUDI AYMEN

Intitulé

**Etude expérimentale de l'influence des paramètres opératoires
sur la fatigue des matériaux en contact mécanique**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr Ghemari Zine	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr Djalab Abdelhakim	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr Cherif Bilal Djamal Eddine	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2023 /2024



Dédicace

A mon cher père et ma chère mère

A tous mes frères ;Ammar, Brahim,

Abd ElJabbar;

A tous mes sœurs.

*A tous les enseignants et les éducateurs qui ont
contribué à ma formation*

*Durant tout le parcours de mes études jusqu'à
ce jour ;*

...je dédie ce modeste travail

SAOUDI SOUFIANE.



Dédicace

A mon cher père et ma chère mère

A tous mes frères

A tous mes oncles.

*A tous les enseignants et les éducateurs qui ont
contribué à ma formation*

*Durant tout le parcours de mes études jusqu'à
ce jour ;*

...je dédie ce modeste travail

**AYMAN
MUSSAOUDI.**



Remerciements

Remerciements à Dieu -le tout puissant- qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail. Nous tenons remercier notre promoteur MR Djalab Abdelhakim d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période. Nous tenons aussi à remercier le personnel du Département de Génie électrique de M'sila, sous la direction de Mr Zaglash

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous ont fait l'honneur de participer au jury de ce travail.

Et enfin nous remercions l'ensemble des enseignants et des collègues de notre promotion, qui nous ont aidé à réaliser ce modeste travail dans lequel nous avons mis tout notre cœur et toute notre énergie dans l'espoir d'être à la hauteur des attentes du jury et d'honorer notre promoteur

Table des matières

Liste des Figures.....	A
Liste des Tableaux.....	B
<i>Nomenclature.....</i>	C
Introduction générale	1
Chapitre I : Traitement Thermique des aciers	
I.1. Introduction:	3
I.2. Composition des aciers.....	3
I.3. Elaboration des aciers et des fers	4
I.4. Propriétés des matériaux	5
I.5. Constitution des aciers au carbone.....	6
I.6. Classification des aciers	6
I.6.1. Classification par emplois.....	6
I.6.2. Classification par composition chimique	7
I.7. Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	8
I.8. Cycle d'un traitement thermique	9
I.9. principaux type de traitement thermique	9
I.10. Gammes des traitements thermiques de l'acier	10
I.11. Trempe	10
I.11.1. Différents types de trempe	10
I.11.2. Technologies de chauffage	11
I.11.3. Milieux de trempe	12

I.11.4. Choix de temps de maintien.....	13
I.12.Revenu	14
I.12.1.Revenu de relaxation ou de détente	15
I.12.2. Revenu de structure ou classique.....	15
I.12.3.Revenu de durcissement	15
I.12.4.Revenu à basse température	15
I.12.5. Revenu à température intermédiaire.....	15
I.12.6. Revenu à haute température	16
I.13. Recuit.....	16
I.13.1 . Cycle thermique d'un recuit comprend.....	16
I.13.2 . Recuit d'homogénéisation	17
I.13.3. Recuit d'adoucissement.....	17
I.13.4 . Recuit régénération.....	18
I.13.5 . Recuit complet.....	18
I.13.6 . Recuit de détente	18
I.13.7 . Recuit de recristallisation	18
I.13.8 . Recuit de coalescence	19
I.13. En conclusion.....	19

Chapitre II: Généralité sur le phénomène de la fatigue

II.1 Introduction:	21
II.2. fatigue et endurance	21
II.2.1.Définitions	21

II.2.2.Limite de fatigue.....	22
II.2.3.Limite d’endurance.....	23
II.2.4.Durée de vie.....	23
II.2.5.Contraintes appliquées.....	23
II.2.5.1.Contrainte nominale.....	24
II.2.5.2.Cycle de contrainte.....	24
II.2.5.3.Types de cycles de contraintes.....	25
II.3.Diagrammes représentatifs.....	26
II.3.1.Courbe de Wöhler.....	26
II.3.2.Courbes d’équiprobabilité de rupture.....	28
II.3.3.Diagramme de Haigh.....	28
II.3.4.Diagramme de Goodman-Smith.....	29
II.3.5.Diagramme de Ros.....	30
II.4.Facteurs influant la fatigue.....	31
II.4.1.Facteurs métallurgiques.....	31
II.4.2. Facteurs liés à l’élaboration du matériau.....	31
II.4.3.Facteurs liés à la mise en forme.....	31
II.4.4.Facteurs liés aux traitements thermiques.....	31
II.4.5 .Influence de la corrosion.....	32
II.4 .6.Influence de la fréquence des sollicitations.....	32
II.4. 7.Facteurs géométriques.....	32
II.5.Fissuration par fatigue.....	32
II.5.1.Courbes de propagation des fissures.....	32
II.5 .2.Expression de la vitesse de fissuration.....	33

II .6- Facteurs de l’endurance des pièces	33
II .6-1- Facteurs métallurgiques.....	34
II .6-2- Facteurs géométriques.....	34
II .6-3- Facteurs de surfaces	34
II .6-4- Facteur de l’environnement	34
II .6-5- Facteurs de sollicitation	34
II . 7-Mécanique de la rupture.....	35
II . 8. En conclusion	36
Chapitre III: Etude expérimentale	
III.1 Introduction	38
III.2 Outils expérimentaux	38
III.2.1 Dispositif expérimental	38
III.2.2 Matériel utilisé	40
III.2.3 Usinage des éprouvettes	40
III.2.3.1 Acier C45 (XC48)	41
III.2.3.1.1 Composition chimique	41
III.2.3.1.2 Caractéristiques mécaniques	42
III.3 Les paramètres de fonctionnements utilisés	42
III.3.1 L’état de surface (La rugosité)	42
III.3.2 La dureté	43
III.3.3 La charge appliquée	44
III.4 Procédure expérimentale et résultat	46
III.4.1 Déroulement de l’essai	46
III.4.2 Application des plans d’expériences	46

III.4.3 Mesures expérimentales	47
III.4.3.1 Déroulement de l'essai	47
III.4.3.2 Analyse statistique des résultats	48
III.4.3.2.1 Analyse de variance de la durée de vie (ANOVA)	49
III.5 Photographies et les photomicrographies des éprouvettes après fonctionnement.....	50
III.6. Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	57
Références bibliographiques.....	60

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1- Schéma de la fabrication du fer et de l'acier	5
Figure I.2- Diagramme fer-carbone	8
Figure I.3- Cycle de traitement thermique	9
Figure I.4- Cycle thermique lors d'une trempe	12
Figure I.5- Cycle thermique complet d'une trempe et revenu.	14
Figure. I.6. Cycle thermique d'un recuit comprend.....	17

Chapitre II

Figure II.1 cycle de contrainte defatigue.....	22
Figure II.2- Limite d'endurance ou limite de fatigue	23
Figure II.3- cycle de contrainte en fatigue	25
Figure II.4- . Différents types de sollicitations.....	25
Figure II.5- Représentation schématique d'une courbe de Wöhler	26
Figure II.6- Représentation schématique d'une courbe de Wöhler.....	26
Figure II.7- Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques).....	28
Figure II.8- . Diagramme de Haigh	29
Figure II.9- Diagramme de Goodman-Smith (résultats théoriques)	30
Figure II.10- . Diagramme de Ros (résultats théoriques).....	30
Figure II.11- . Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycle set le niveau de contrainte.....	33

Chapitre III

Figure III.1. La machine d'essai de fatigue GUNT WP 140	39
Figure III.2 Schéma de l'éprouvette.	40
Figure III.3 Les étapes de fabrication de l'éprouvette.	41
Figure III.4: Rugosimètre PCE-RT 1200.....	42
Figure III.5 Duromètre modèle : Zwick/Roell.....	43
Figure III.6 Four type Nabertherm.....	44
Figure III.7 point d'application de la charge F	45
Figure III.8 Entrées et sorties d'une expérience	47
Figure III.9 Graphique des effets sur la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N))	50
Figure III.10 Microscope optique : Euromex	51
Figure III.11 Photographies des éprouvettes avant fonctionnement.....	52
Figure III.12 Photographies des éprouvettes après fonctionnement.....	52
Figure III.13 Caractéristiques des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative	53
Figure III.14 Photomicrographie optique (grossissement, x20) de faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 180 N et $R_a=0.075\mu\text{m}$ après 18400 cycles (acier brut $H_v = 202$)	54
Figure III.15 Photomicrographie optique (grossissement, x20) de faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 180 N et $R_a = 0.075$ après 48623 cycles de l'acier XC 48 trempé à 850 °C et revenu à 570°C ($H_v=247$).	54
Figure III.16 Photomicrographie optique (grossissement, x20) de faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 150 N et $R_a = 0.1$ après 30000 cycles de l'acier XC 48 trempé à 850 °C et revenu à 200°C ($H_v=325$). ..	55

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 – La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe	12
Tableau I.2. Durée approchée d'austénitisation dans différents types de fours.....	14

Chapitre III

Tableau III.1 et donnent la composition chimique des échantillons.....	41
Tableau III.2. Les caractéristiques mécaniques sont présentées dans	42
Tableau III.3 Les variables du problème	47
Tableau III.4 Résultats expérimentaux d'usure (W) selon le plan orthogonal L9 de Taguchi.....	48
Tableau III.5 Les principaux résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'évolution de nombre de rotation (N) de l'éprouvette.....	49

Nomenclature

Symbole	Définition
E	Module d'élasticité ou module d'Young
ϵ	Déformation
F	Force
I	Moment d'inertie
K_f	Facteur effectif de concentration de contrainte
K_t	Facteur théorique de concentration de contrainte
M_f	Moment de flexion
V	distance de la fibre externe à la fibre neutre
N	Nombre de cycles à rupture
n	Nombre de cycles
q	Facteur de sensibilité à l'entaille
R_e	Limite d'élasticité
R_m	Résistance à la traction
R_σ	Rapport de contrainte
σ_{moy}	Contrainte moyenne
σ_α	Amplitude de la contrainte alternée
σ_{max}	Contrainte maximale
σ_{min}	Contrainte minimale
σ_D	Limite de fatigue
$\sigma_{D(N)}$	Limite d'endurance à N cycles

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La fatigue des matériaux représente un domaine crucial dans l'ingénierie moderne, étant donné son incidence significative sur la durabilité et la fiabilité des composants mécaniques dans une multitude d'applications industrielles. Comprendre les mécanismes de la fatigue et son comportement sous diverses conditions opératoires est essentiel pour concevoir des systèmes robustes et durables.

La fatigue est définie comme un processus de dégradation des matériaux soumis à des chargements répétés, avec des conséquences potentiellement dommageables. L'importance de la fatigue réside dans sa contribution significative aux défaillances des composants et structures, ce qui nécessite une attention particulière dans la conception, l'analyse et la maintenance.

Le traitement thermique des aciers est une branche fondamentale de la métallurgie qui consiste à modifier les propriétés physiques et mécaniques des aciers en les soumettant à des cycles de chauffage et de refroidissement contrôlés. Cette discipline joue un rôle essentiel dans la fabrication de divers produits industriels, allant des pièces automobiles aux outils de coupe en passant par les composants de machines. L'objectif principal du traitement thermique est d'optimiser les caractéristiques des aciers en ajustant leur microstructure, leur dureté, leur résistance mécanique, leur ténacité et leur ductilité selon les besoins spécifiques de l'application finale.

Dans cette étude, nous nous intéressons spécifiquement à l'influence des paramètres opératoires sur la fatigue par flexion rotative de l'acier C45 (XC48) avant et après traitements thermiques. Les paramètres opératoires, tels que la charge, la dureté et la rugosité de surface jouent un rôle crucial dans la progression de la fatigue. Et enfin analysé statistiquement de l'effet de ce paramètre de fonctionnement sur l'évolution de la durée de vie de l'éprouvette (nombre de rotation (N)).

Ce travail que nous présentons est divisé en trois chapitres :

Le premier consacré à l'étude bibliographique et expose généralités sur l'effet des différents traitements thermiques sur les propriétés mécaniques des aciers.

Le deuxième chapitre se concentre sur une étude bibliographique portant sur le comportement en fatigue des différents matériaux, et plus particulièrement des matériaux ferreux.

Le troisième chapitre se concentre sur les aspects expérimentaux de l'étude et la présentation des résultats. Les résultats obtenus ont été analysés statistiquement en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA).

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale regroupe tous les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

Traitement thermique des aciers

I.1. Introduction

Les aciers sont les matériaux métalliques les plus utilisés dans les différentes branches de l'industrie. L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ 2,14 % en masse). La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés physiques de l'acier: en dessous de 0,008 %, l'alliage est plutôt malléable et on parle de " fer " ; au-delà de 2,14 %, les inclusions de carbone sous forme de graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte.

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage, de maintien suivi d'un refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus appropriées pour son emploi. Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques d'un acier à composition déterminée. D'une façon générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique de l'alliage, mais apporte les modifications suivantes :

- Constitution (état de carbone et forme allotropique du fer).
- Structure (grosseur du grain et répartition des constituants).
- Propriétés mécaniques.

Dont le but d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à l'emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

I.2. Composition des aciers

Les aciers de construction contiennent de 0,008 à 2,14 % de carbone en fonction des propriétés recherchées, et, selon les cas, des éléments d'addition tels que manganèse, nickel, chrome, molybdène, titane, tungstène (augmentation des caractéristiques mécaniques), cuivre (contre la corrosion), silicium (désoxydation), aluminium (affinage du grain) ... Ils contiennent également une faible proportion d'azote résiduel, du soufre et du phosphore (impuretés résiduelles défavorables aux caractéristiques mécaniques et à la soudabilité). En fonction de ses composants lors de la mise en nuance et des traitements thermiques subis par les alliages lors de leur élaboration, l'acier a des propriétés mécaniques et technologiques variables. D'une manière générale, on peut dire qu'en augmentant la teneur en carbone ou la teneur en éléments d'alliages, on augmente les caractéristiques de résistance des aciers, mais on nuit à leur soudabilité. Pour des aciers non alliés et non traités, on peut établir une correspondance entre les taux de carbone et la résistance à la traction des aciers. C'est ainsi que plus la teneur en carbone est élevée, plus la limite de rupture constatée lors d'un essai de traction est élevée.[2]

I.3. Elaboration des aciers et des fers

- **Fabrication de fer** : La fabrication du fer s'organise essentiellement autour du haut fourneau à l'intérieur duquel s'opère la fusion (réduction) du minerai pour produire de la fonte. Le haut-fourneau est chargé par le gueulard en minerai, en coke et en castine, tandis que de l'air chaud, souvent enrichi en oxygène, est injecté par le bas. Le monoxyde de carbone produit grâce à la combustion du coke transforme le minerai en fonte, la castine jouant le rôle de fondant. A la température de 1 600 °C, la fonte se fluidifie et s'accumule à la partie inférieure du haut-fourneau, tandis que la castine se combine à la gangue pour former le laitier. La fonte est soutirée périodiquement du haut-fourneau pour être coulée sous forme de gueuses qui seront transformées ultérieurement (par exemple, dans des fonderies) ou déversée dans des poches qui permettent son transfert, à l'état liquide, jusqu'à l'aciérie.[3]

- **Fabrication de l'acier** : La fonte brute a une forte teneur en carbone et en autres impuretés (principalement du soufre et du phosphore). Il faut donc l'affiner, c'est-à-dire réduire sa teneur en carbone, oxyder et éliminer les impuretés pour la transformer en un métal très malléable pouvant être forgé et façonné. C'est l'objet de l'élaboration de l'acier, qui peut s'effectuer dans trois types de fours: le four à sole, le convertisseur à oxygène et le four à arc. La plupart des fours à sole ont été remplacés par des convertisseurs à oxygène, dans lesquels l'air ou l'oxygène sont injectés dans le fer en fusion, ou par des fours à arc alimentés en ferraille ou en boulettes de fer spongieux.[3]

Les aciers spéciaux sont des alliages auxquels on incorpore d'autres éléments métalliques pour leur conférer des propriétés particulières dans un but précis (du chrome pour éviter la corrosion, du tungstène pour augmenter la dureté et la résistance à haute température, du nickel pour améliorer la résilience, la ductilité et la résistance à la corrosion). Ces éléments peuvent être ajoutés dans la charge du haut-fourneau ou bien dans l'acier en fusion (dans le four ou la poche de coulée). L'acier en fusion est déversé dans des installations de coulée continue pour former des billettes, des blooms ou des brames. Il peut également être coulé dans des moules pour former des lingots. La majorité de l'acier est produit en coulée continue, ce qui offre à la fois un rendement accru, une meilleure qualité, des économies d'énergie et une réduction des coûts d'investissement et d'exploitation.

Les lingots sont stockés dans des pits, c'est-à-dire des fours en sous-sol équipés de portes, où ils peuvent être réchauffés avant de passer aux laminoirs ou de subir d'autres transformations.[4]

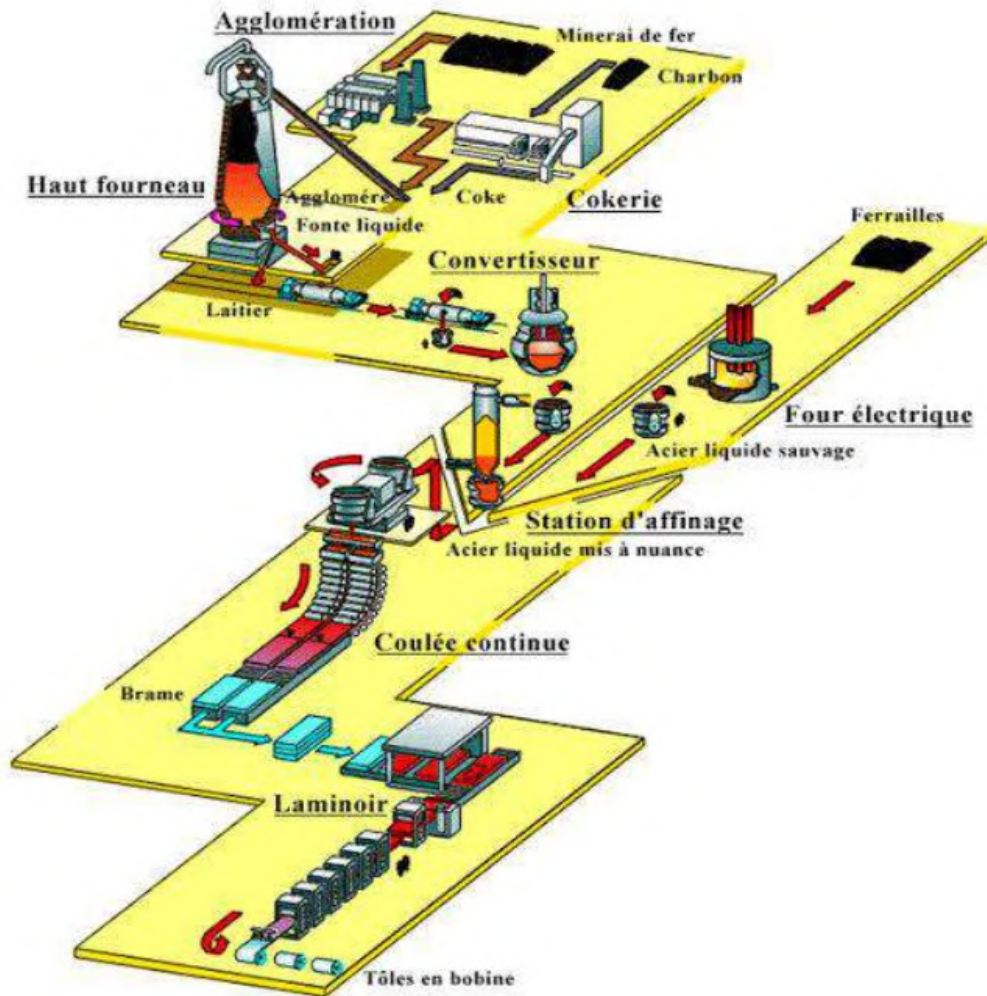


Figure. I.1. Schéma de la fabrication du fer et de l'acier.[4]

I.4. Propriétés des matériaux

On peut décrire les propriétés des matériaux en trois grandes catégories :

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux est essentielle à la conception et à la fabrication d'objets techniques. Il est en effet important de sélectionner les matériaux adéquats afin que la pièce créée puisse résister aux contraintes qu'elle subit.

- **Dureté** : propriété d'un matériau de résister à la pénétration d'un autre matériau.
- **Ductilité** : propriété d'un matériau de s'étirer sans se rompre.
- **Elasticité** : propriété d'un matériau de se déformer puis de reprendre sa forme initiale par la suite.
- **Rigidité** : propriété d'un matériau de garder sa forme, même lorsqu'il est soumis à diverses contraintes.
- **Résilience** : propriété d'un matériau de résister aux chocs sans se rompre.

I.5. Constitution des aciers au carbone

Trois solutions de base constituent les aciers au carbone :

- **Ferrite:** C'est une solution solide de carbone dans le fer α , c'est à dire la ferrite est constituée par le fer α renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone, inférieure à 0,02%), ainsi que d'autres inclusions. On distingue la ferrite α à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02 % et la ferrite δ à haute température et à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1 %. La ferrite est peu tendre et très ductile (HV = 90, RM= 300 N/mm², K=300J/cm²), Elle est magnétique à la température ordinaire, au microscope la ferrite a l'aspect d'égrains homogènes polyédriques. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'a 760°C.[5]
- **Austénite:** C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer. La solubilité limite du carbone dans le fer γ est de 2,14 %. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable (HB = 300). La microstructure de l'austénite est composée de gains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est antiferromagnétique. [5]
- **Cémentite:** Carbure de Fer, Fe₃C, la limite de solubilité du carbone dans la cémentite est de 6.67% de C. D'un point de vue morphologique la cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche hyper eutectiques. On la trouve sous trois formes : Primaire (au-dessus de 1147°C) secondaire (entre 1147°C et 723°C) et tertiaire (au-dessous de 723°C). Magnétique jusqu'à 210 °C. Ce constituant est très dur (HB=700) et très fragile. On doit à ce composé défini les grandes performances des aciers de point de vue dureté et résistance. [6]

I.6. Classification des aciers

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone avec éventuellement des éléments d'addition.

I.6.1. Classification par emplois

La désignation commence par la lettre « S » pour les aciers d'usage général et par la lettre «E» pour les aciers de construction mécanique. Le nombre qui suit indique la valeur minimale de limite élastique en Méga Pascals.

Exemples

S235 (acier d'usage général, de limite élastique 235MPa).E320 (acier de construction mécanique, de limite élastique 320MPa).S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « G ».

I.6.2. Classification par composition chimique

- **Aciers non alliés**

Ils contiennent une faible teneur en carbone. Ils sont très utilisés en construction mécanique. La majorité est disponible sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, ...) aux dimensions normalisées.

Utilisation : ce sont des aciers dont l'élaboration n'a pas été conduite en vue d'une application déterminée.

Désignation : la lettre « C » suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100.

Exemple:

C 35 (acier avec 0.35% de carbone).

- **Aciers faiblement alliés**

Pour ces aciers, aucun élément d'addition dépasse 5% en masse.

Utilisation : ils sont choisis lorsque l'on a besoin d'une haute résistance.

Désignation

- un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone.
- les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- les teneurs des principaux éléments d'addition multipliés par 4, 10, 100 ou 1000.
- éventuellement, des indications supplémentaires concernant la soudabilité (S), l'aptitude au moulage (M), ou à la déformation à froid (DF).

Exemple

35 Cr Mo 4S (acier avec 0.35% de Carbone, 1% de chrome, moins de 1% de Molybdène. Cet acier est soudable).

- **Aciers fortement alliés**

Les aciers fortement alliés possèdent au moins un élément d'addition dont la teneur dépasse 5% en masse.

Utilisation

Ces aciers sont réservés à des usages particuliers. Par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui est un acier fortement allié avec du chrome (%chrome > 11%)

Désignation

- La lettre « X »,
- Un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone.
- Les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Dans le même ordre, les teneurs des principaux éléments.

Exemple

- X6 Cr Ni Mo Ti 17-12 (acier fortement allié avec 0.06% de Carbone, 17% de Chrome, 12% de Nickel, du Molybdène et du Titane (moins de 12%).
- X4 Cr Mo S 18(acier fortement allié avec 0.04% de Carbone, 18% de Chrome, du Molybdène et du Soufre (moins de 18%).[7]

I.7. Diagramme d'équilibre fer-carbone.

L'exploitation du diagramme fer-carbone (Figure I.2) permet de comprendre la modification de la structure cristalline du matériau par traitements thermiques, permettant d'améliorer les caractéristiques des matériaux.

En fonction de la température certains métaux ou alliages possèdent des propriétés différentes qui dépendent de leur structure cristalline. Jusqu'à 912 °C, le fer α possède une maille cubique centrée(CC) et entre 912 °C et 1394 °C, le fer γ possède une maille cubique face centrée (CFC). Deux grandes familles sont définies en fonction du pourcentage de carbone :

- Les aciers, avec un pourcentage de carbone compris entre 0,008 et 1,7. Dans ces aciers, on distingue des aciers hypoeutectoïdes constitués de ferrite et de perlite (les plus utilisés dans l'industrie) et des aciers hypereutectoïdes constitués de cémentite et de perlite.
- Les fontes, avec un pourcentage de carbone compris entre 2,11 et 6,67.

Le diagramme fer-carbone est limité à droite par la cémentite (6.67% de carbone). Dans cette zone, le matériau est fragile et cassant.[8]

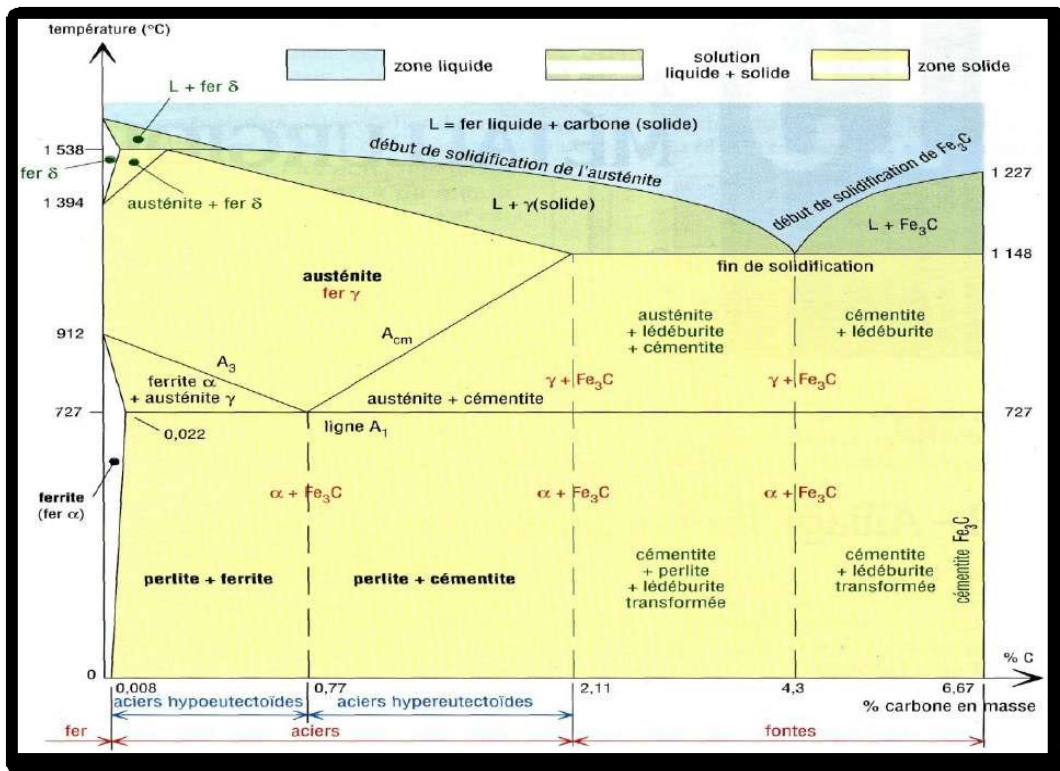


Figure. I.2. Diagramme fer-carbone.[8]

I.8.Cycle d'un traitement thermique.

En générale le traitement thermique comprend trois étapes :

- Un chauffage jusqu'à une température qui dépend de types de traitement voulu.
- Maintient isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.

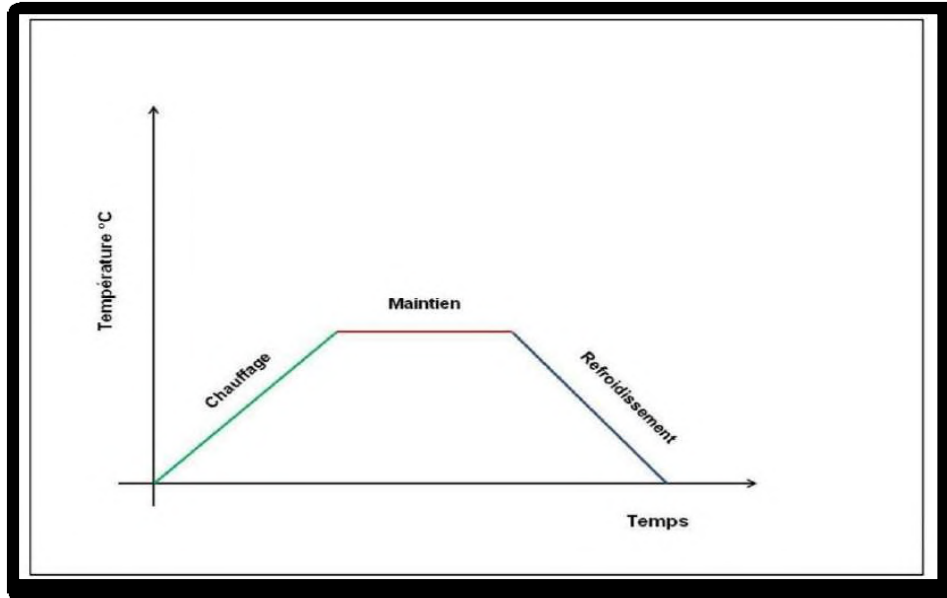


Figure. I.3.Cycle de traitement thermique.[9]

Eléments d'un traitement thermique

Un traitement thermique consiste à jouer sur trois éléments :

- la température.
- le temps le milieu de séjour durant le maintien en température (neutre ou réactif).

En général, la phase déterminante et critique est le refroidissement. La vitesse appropriée pour obtenir les caractéristiques voulues amène à choisir un milieu de refroidissement (par exemple air, eau, bain de sel, huile, gaz ou mélanges gazeux sous pression) en fonction de la dimension de lapièce à traiter et la trempabilité.[9]

I.9.principaux type de traitement thermique.

Les traitements thermiques appliqués aux aciers peuvent être classés en trois types principaux :

- Les traitements d'homogénéisation, généralement appliques sur les produits coulés avant leurs transformations ou également sur les produits déjà corroyés.
- Les traitements d'adoucissements par recuit ou restauration généralement appliqués en cours ou enfin de transformation.

Les traitements de trempe structurale comportent :

- Une mise en solution.
- Une trempe.
- Une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement.

I.10. Gammes des traitements thermiques de l'acier.

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

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

Les principaux facteurs qui permettent de distinguer entre les différents types de traitements thermiques sont la température de maintien et la vitesse de refroidissement.[10]

I.11. Trempe

Après chauffage et maintien, les pièces sont soumises à un refroidissement selon le mode approprié, dont la vitesse est réglée par le milieu de trempe utilisé, refroidissement qui peut se faire en air calme, air soufflé, dans l'huile, en bains de sels, ... etc. Et suivant les alliages des pièces et les caractéristiques recherchées. Pour obtenir une trempe efficace, on est amené à chauffer le métal à une température assez élevée jusqu'au domaine austénitique.[11]

I.11.1. Différents types de trempe.

On distingue différents types de trempe, soit la trempe martensitique, la trempe bain tique, la trempe austénitique (aussi appelée hypertrempe)

Trempe martensitique

La trempe martensitique consiste à amener rapidement le métal à une température inférieure à la valeur critique M_s , généralement inférieure ou égale à 20 °C. Le refroidissement rapide de l'austénite provoque un blocage des atomes de carbone insérés dans le réseau gamma. Ce réseau devient quadratique centré instantanément. Cette nouvelle structure (solution solide d'insertion) se nomme martensite. Afin de pouvoir obtenir une structure martensitique, il faut que la vitesse de refroidissement soit supérieure à la vitesse critique de trempe martensitique. Il est évident que cette condition n'est pas réalisée en tous les points d'une pièce. En effet, la loi de refroidissement en un point d'une pièce dépend de la conductivité thermique du métal, de la forme et des dimensions de la pièce, ainsi que du pouvoir de refroidissement du fluide de trempe qui, lui, dépend de l'agitation du fluide.[12]

Trempe bain tique

Pour obtenir la bain ite par trempe, l'acier austénites est refroidi à une température choisie, à vitesse suffisante pour éviter la transformation en ferrite ou perlite. On maintient à cette température (240°C à 450 °C) pour obtenir une transformation totale et l'on refroidit ensuite à la température ambiante. La température choisie pour la trempe bain tique dépend de la microstructure désirée (etla dureté recherchée) et de la vitesse de transformation de l'acier.

Les propriétés de la bainite confèrent certaines qualités aux aciers, malgré les inconvénients signalés, en particulier, une meilleure ductilité (pour les fortes teneurs en carbone) que pour la trempe martensitique, et de meilleures propriétés de fluage, (aux températures de 400 °C à 500°C) que la martensite revenue .Dans les deux cas, les structures obtenues (martensite ou bain ite) présentent une dureté élevée.[12]

Trempe austénitique (ou hypertrempe)

Les aciers austénitiques dont la structure ne change pas, aussi bien par chauffage que par refroidissement, ne « prennent » pas la trempe. Le procédé d'hypertrempe permet d'adoucir ces aciers et consiste à chauffer les pièces vers 1 100 °C. Le refroidissement doit être rapide pour éviter la précipitation des carbures vers 600 °C à 800 °C. Il est généralement effectué à l'eau. L'huile est utilisée comme fluide de trempe pour les aciers à forte teneur en nickel. Cette technique est appliquée plus particulièrement au traitement des aciers inoxydables et des aciers ferromanganèse, pour permettre d'effectuer un usinage ultérieur ou maintenir, voire remettre en solution dans l'austénite, les carbures dont la précipitation dans les espaces inter-grains favoriserait la corrosion cristalline.[12]

I.11.2. Technologies de chauffage

Les trois types de trempe peuvent être exécutés dans à peu près tous les milieux de chauffage possible : four sous atmosphère contrôlée, four sous vide, bain de sel, etc. En somme, le choix de la technologie de chauffe est établi en fonction de la nature des pièces, sa grosseur, sa conductibilité...etc. Ci-joint un graphique illustrant de manière générale le cycle d'un traitement par trempe. Précisons ici qu'un traitement de trempe est toujours suivi d'un ou de plusieurs traitements de revenu afin d'enlever la fragilité du matériel, d'éliminer les contraintes et d'ajuster la dureté finale.[12]

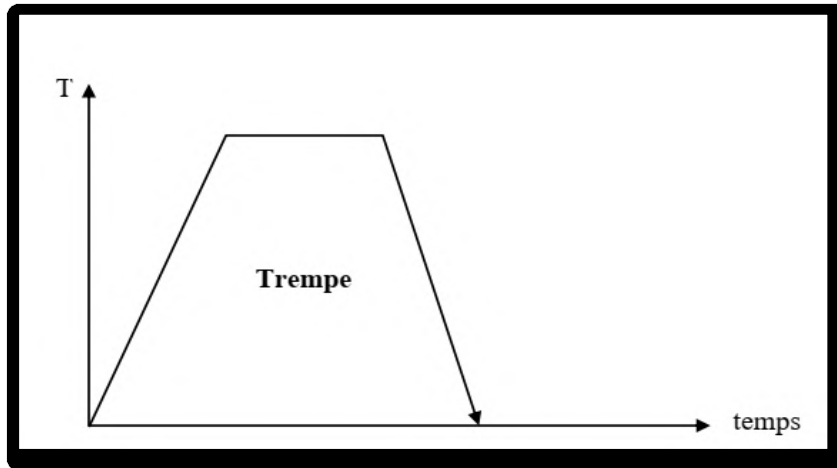


Figure. I.4. Cycle thermique lors d'une trempe.[12]

I.11.3. Milieux de trempe

La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier. La nature du bain de trempe (eau, huile...etc.) caractérise la vitesse de refroidissement de la pièce immergée après chauffage.

Nature du bain	Vitesse de refroidissement
Saumure	220 °C/seconde
Eau froide	160 °C/seconde
Eau tiède	150 °C/seconde
Eau chaude	140°C/seconde
Huile de trempe	70 °C/seconde
Air soufflé	20 °C/seconde
Air calme	2 °C/seconde
Dans un moule de sable	0.05 °C/seconde
Dans le four	220 °C/seconde(ou selon la programmation du cycle)

Tableau. I.1. La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe.[13]

L'essai Jominy

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

Cet essai est réalisé en trois étapes :

- l'austénitisation d'une éprouvette normalisée prélevée dans l'acier à tester.
- le refroidissement en bout par un jet d'eau dans des conditions imposées.

- la mesure de dureté sur un méplat le long d'une génératrice et dont l'usinage ne doit pas provoquer un échauffement excessif. Les points de mesure de la dureté sont situés à : 1,5 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 - 13 - 15 - 20 - 30 - 40 - 50 - 60 - 70 - 80 mm de l'extrémité arrosée et sont désignés par J1,5- J3 - J5 - Jx.[14]

Trempe à l'eau

Ce traitement est réservé à des aciers peu alliés qui ont besoin de ce médium pour atteindre les caractéristiques recherchées (1045, W1). Le taux de refroidissement dans l'eau étant très élevé, ce traitement présente des risques importants de distorsion, voire de fissuration.[14]

Trempe à l'huile

Ce traitement est réservée utilisée pour des aciers faiblement alliés comme 1045, 4140, 4340, 8620, 9310, 52100 ou des aciers outils tel que le O1.

Trempe sous vide

Ce type de traitement s'adresse essentiellement aux aciers outils (A2, D2 S7, H13, H21, T1, M2) et aux aciers inoxydables martensitiques.

Trempe à l'air forcé

Ce traitement est surtout utilisé sur des aciers dont les dimensions sont supérieures à la capacité des fours sous vide (par exemple, aciers inoxydables 410, 420, 431 et acier outil H13).[14]

I.11.4. Choix de temps de maintien.

Le maintien du métal à la température de trempe doit assurer le chauffage à cœur et l'achèvement des transformations de phase, sans qu'il soit trop lent pour éviter le grossissement des grains et la décarburation des couches superficielles des pièces.

La durée totale du chauffage t_t dépend:

- du temps d'échauffement à cœur " t_{ec} " jusqu'à la température demandée. Ce temps dépend de la forme et des dimensions des pièces, de la nuance de métal, du type de fours, ...etc.
- du temps de maintien isotherme " t_{im} " qui dépend de la composition et de l'état initial de métal.

Donc: $t_t = t_{ec} + t_{im}$

En réalité pour déterminer t_t , on se réfère aux données expérimentales. Le tableau. (I.2) résume la durée moyenne rapportée à 1 mm d'épaisseur dans différents types de fours.

Moyen de chauffage	Durée en (s/mm) d'épaisseur de pièce		
	Ronde	Carrée	Rectangulaire
Four électrique	40-50	50-60	60-75
Four à flamme	35-40	45-50	55-60
Bain de sel	12-15	15-18	18-22
Bain de plomb	6-8	8-10	10-12

Tableau. I.2. Durée approchée d'austénitisation dans différents types de fours.[13]

I.12. Revenu

Le revenu est une opération finale du traitement thermique qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe. Il consiste à chauffer le métal trempé à une température inférieure à A_{c1} , à le maintenir à cette température et enfin à le refroidir jusqu'à la température ambiante. Le revenu provoque une évolution de la structure du matériau vers un état plus proche de l'état physicochimique d'équilibre, sans toutefois l'atteindre. Il permet d'avoir un compromis satisfaisant entre les propriétés de résistance (RM, RE, H) et de plasticité (A, Z et K).

L'impact de la vitesse de refroidissement après le revenu sur l'état des contraintes résiduelles est très limité. Cependant, une diminution de la vitesse de refroidissement entraîne une réduction plus importante des contraintes résiduelles.

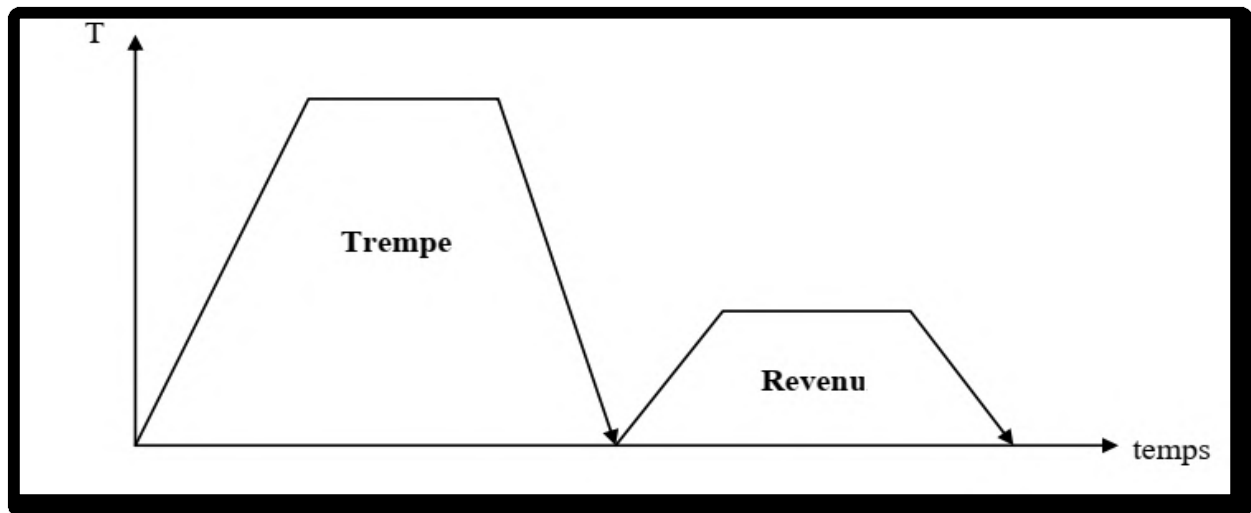


Figure. I.5. Cycle thermique complet d'une trempe et revenu.[15]

I.12.1. Revenu de relaxation ou de détente

La transition se produit dans la plage de température comprise entre 180°C et 220°C. Elle ne provoque aucune altération de la structure, mais plutôt une relaxation des multiples contraintes induites par le refroidissement rapide de la trempe et la transformation de l'austénite en martensite. Cette procédure entraîne une légère réduction de la dureté et une légère augmentation de la résilience. Elle est appliquée aux pièces soumises à des contraintes élevées, sans incidence sur leur intégrité ou nécessitant le maintien d'une dureté superficielle élevée.

I.12.2. Revenu de structure ou classique

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et Ac1. On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, RM et RE. Ce mode de revenu permet de trouver un équilibre entre les propriétés mécaniques selon l'utilisation des aciers.

I.12.3. Revenu de durcissement

Les revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent entraîner des durcissements appelés durcissements secondaires (comme dans le cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Tout d'abord, il y a la précipitation des carbures complexes qui étaient maintenus en solution dans une austénite résiduelle, suivie par une déstabilisation de cette dernière, se transformant en martensite lors du refroidissement.

I.12.4. Revenu à basse température

Il s'effectue avec un chauffage vers 250°C et permet de diminuer les contraintes internes. Il transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Ce revenu augmente la résistance et améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté (58 + 63 HRC), d'où une bonne tenue à l'usure. Il s'applique aux outils de coupe et aux instruments de mesure en acier au carbone et faiblement alliés. La durée de ce revenu varie de 1 à 3 heures.[15]

I.12.5. Revenu à température intermédiaire

Ce processus se déroule dans une fourchette de température comprise entre 350 et 500°C et est utilisé pour divers types de ressorts et d'étapes. Il permet d'atteindre une résistance à la fatigue et une limite élastique élevées. La structure obtenue est de type troostite ou troostite-martensite, avec des duretés variant de 40 à 50 HRC. Le refroidissement après revenu à 400 ou 450°C se fait à l'eau, ce qui favorise la formation de contraintes de compression résiduelles en surface, augmentant ainsi la résistance à la fatigue des ressorts.

I.12.6. Revenu à haute température

La transformation a lieu entre 500 et 680°C. Cela confère à l'acier la structure obtenue d'après revenu. Ce type de traitement thermique améliore le rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier. La combinaison de trempe et de revenu à haute température (appelée traitement double ou amélioration) améliore les limites de rupture et d'élasticité par rapport à l'état normalisé ou recuit. Cela concerne particulièrement la ductilité et surtout la résilience. L'amélioration est principalement utilisée pour les aciers de construction à teneur en carbone moyenne (0,3 à 0,5%).[15]

I.13. Recuit

Les aciers ont la capacité d'acquiescer, grâce à divers traitements thermiques, toute une gamme de propriétés très différentes.

En général, les recuits permettent aux alliages d'atteindre un équilibre physico-chimique et mécanique, favorisant ainsi la disparition des états hors d'équilibre résultant des traitements thermiques et mécaniques précédents.

Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (Résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Le recuit a pour but de :

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- Homogénéiser les textures hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes.

I.13.1. Cycle thermique d'un recuit comprend

- a. Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- b. Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- c. Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit, voir (fig.I.6).

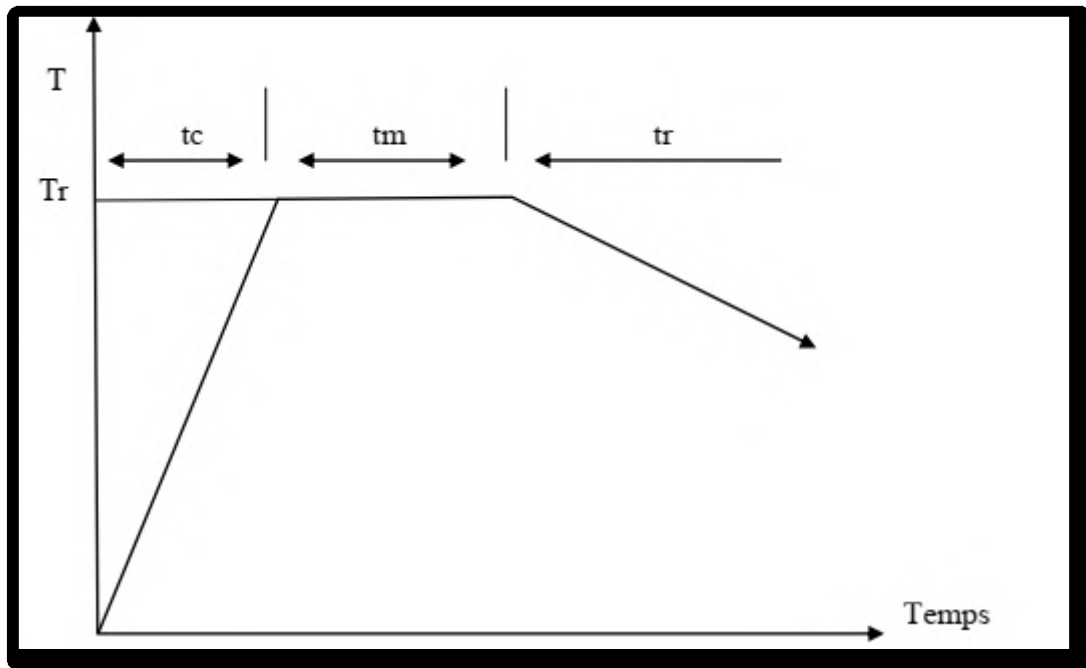


Figure. I.6. Cycle thermique d'un recuit comprend.[16]

Tr : température de recuit

Tc : temps de chauffage

Tm : temps de maintien

tr : temps de refroidissement

I.13.2. Recuit d'homogénéisation

Ce traitement est principalement destiné aux produits bruts de coulée en alliages ayant un large intervalle de solidification (comme eu pro-étain, eu pro-béryllium), dans le but de faciliter leur transformation ou d'améliorer les propriétés technologiques des demi-produits.

Il a pour effet d'atténuer ou de supprimer la ségrégation dendritique, de dissoudre les phases hors d'équilibre, de précipiter les éléments en solution sursaturée et de répartir uniformément les constituants.

I.13.3. Recuit d'adoucissement

Ce type de recuit consiste au chauffage de longue durée de l'acier aux températures près de AC1(650 - 680°C) suivi d'un refroidissement lent d'environ 10°C/h. Pour les aciers à carbone, la température de chauffage étant de 650 à 750°C.

Pour le domaine de phase $\gamma + Fe_3C$, si on refroidit lentement à partir de la température un peu plus supérieure à AC1, au point AR1, se cristallise le carbure précipité directement en grains globulaires, ce qui détourne la formation de la perlite lamellaire.

I.13.4. Recuit régénération

Ce traitement de recuit est utilisé pour restaurer la structure normale après un traitement thermique défectueux, mais il ne peut être appliqué qu'aux métaux et alliages présentant un changement de phase.

Il consiste à chauffer les pièces pendant une courte période juste au-dessus du point de transformation.

La situation la plus fréquente est la détérioration de la structure provoquée par la surchauffe, ce qui favorise la fragilité inter granulaire. Ce processus est pratiquement impossible à appliquer aux alliages cuivreux industriels, car la régénération du grain après surchauffe ne peut être obtenue que par un processus d'écrouissage suivi d'un recuit de recristallisation.

I.13.5. Recuit complet

Il comporte un chauffage et un maintien vers ($Ac_3 + 50^\circ C$) suivis d'un refroidissement au four à de faible degrés de surfusion afin d'assurer la décomposition de l'austénite et de parer à la formation des structures à grande dureté (martensite, bain ite).

Ce recuit s'effectue sur des pièces ayant subies des traitements thermiques et mécaniques variés afin de faciliter leur usinage ou leur déformation à froid. C'est ce qu'on désigne généralement sous le terme "recuit".[16]

I.13.6. Recuit de détente

Ce traitement thermique est principalement utilisé pour éliminer ou réduire les contraintes internes des produits formés à froid.

Il est réalisé à une température inférieure à celle du recuit de recristallisation, afin de ne pas compromettre significativement les caractéristiques mécaniques acquises par écrouissage. Le recuit de détente est également employé pour stabiliser certaines pièces pendant l'usinage, lorsque la coupe asymétrique des fibres perturbe l'équilibre des contraintes internes et entraîne des déformations.

I.13.7. Recuit de recristallisation

Le travail à froid d'un métal par déformation plastique (laminage, tréfilage, etc.) entraîne un phénomène d'écrouissage. Une structure écrouie se caractérise par une forte déformation orientée des grains et une densité élevée de défauts cristallins. Cette structure devient fragile et se traduit par une augmentation des propriétés de résistance et une diminution des propriétés plastiques.

Le recuit de cette structure s'effectue dans la zone de recristallisation, située au-dessus d'une température dépendante de la nuance de l'acier et de son degré d'écrouissage. Durant ce processus, de nouveaux grains germent puis croissent jusqu'à se toucher mutuellement.

I.13.8. Recuit de coalescence

Ce traitement thermique implique le chauffage de l'acier à une température légèrement inférieure à A_{c1} , le maintien à cette température pendant un certain temps, puis un refroidissement lent pour atteindre un état aussi doux que possible et exempt de contraintes.

Ce processus vise également à modifier la forme géométrique des carbures, tels que les lamelles de cémentite, en une forme sphérique stable, tout en améliorant la capacité de déformation à froid du matériau traité.

I.14. Conclusion

Le traitement thermique des aciers est une pratique essentielle dans l'industrie métallurgique, permettant de modifier les propriétés physiques et mécaniques des aciers pour répondre aux exigences spécifiques de diverses applications. Grâce à des techniques telles que le chauffage, le refroidissement et le maintien à des températures contrôlées, les ingénieurs peuvent ajuster la structure cristalline des aciers, influençant ainsi leur dureté, leur résistance, leur ductilité et d'autres caractéristiques importantes.

CHAPITRE II

Généralité sur le phénomène de la fatigue

II .1. Introduction

L'expérience industrielle démontre que les ruptures de pièces de machines ou de structures en fonctionnement normal sont le plus souvent causées par la fatigue.

Généralement, la fatigue est présentée comme un processus par lequel des dommages s'accumulent dans le matériau lors de l'application de charges variables. Ces dommages peuvent éventuellement entraîner une rupture, même si la charge maximale est bien inférieure à celle requise pour atteindre la limite d'élasticité du matériau.

En réalité, la fatigue est un phénomène qui entraîne localement une diminution de la résistance du matériau de construction, qu'il s'agisse d'un alliage métallique, d'un polymère ou d'un matériau composite tel que le béton armé ou un plastique renforcé de fibres.

Afin de préciser les différents aspects de la fatigue des métaux, nous donnons les définitions nécessaires du phénomène de fatigue des éprouvettes de petites dimensions, sollicitées dans des conditions simples, permettant de distinguer les différents domaines où la fatigue peut apparaître ou non. Nous décrirons ensuite les modifications des propriétés physiques et structurales qui accompagnent la répétition des cycles d'efforts et qui conduisent à la fissuration du métal. Enfin, nous énumérerons brièvement les principaux facteurs dont dépend l'endurance d'une pièce, qu'ils soient d'ordre métallurgique, géométrique, liés aux conditions de sollicitation, ou dépendants des conditions d'environnement [17].

II.2. Fatigue et endurance

II.2.1. Définitions

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux, consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux [17].

La fatigue est un processus qui, sous l'action de contraintes ou déformations cycliques, répétées ou alternées, modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure.

Les contraintes sont définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle σ_{max} par la valeur moyenne de la contrainte σ_{met} et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ [17].

En générale, la fatigue se produit sans déformation, plastique d'ensemble, mais avec une déformation plastique très localisée, d'abord autour des défauts à fond d'entaille ou en surface, ensuite à l'extrémité de la fissure une fois que celle-ci s'est formée. Il en résulte que la mesure de cette déformation est extrêmement difficile.

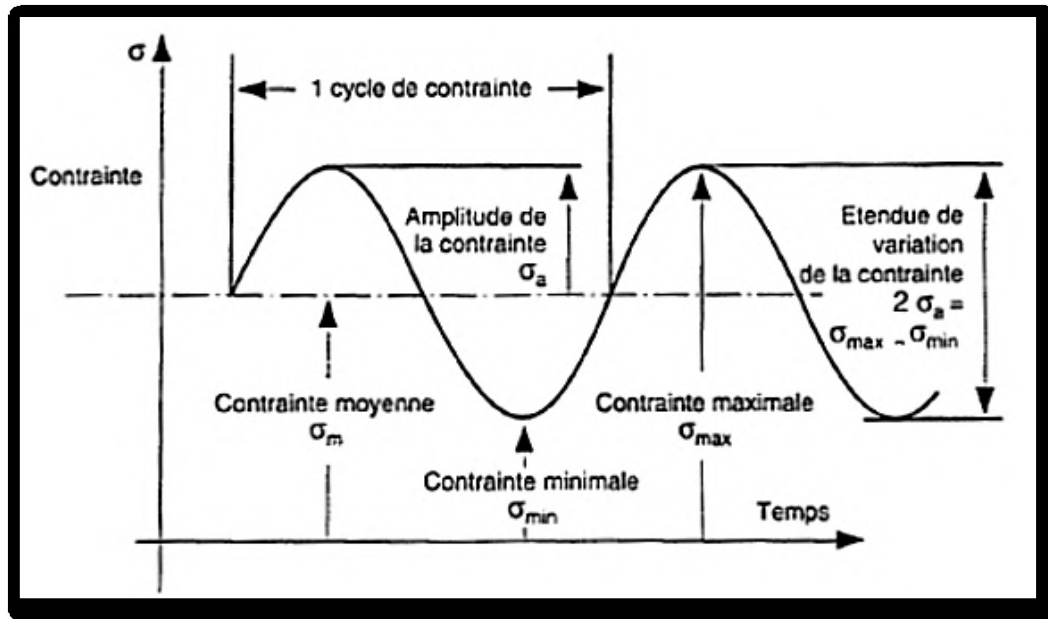


Figure II.1 cycle de contrainte de fatigue.[18]

Les contraintes sont définies par :

- L'amplitude maxi σ_a atteinte au cours d'un cycle
- La valeur de la contrainte moyenne σ_m
- La différence entre les contraintes $\Delta\sigma$
- Le rapport de la contrainte σ_{\min} à la contrainte σ_{\max} : $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

En général, la fatigue a lieu lorsqu'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue et qui en fait le danger, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent bien inférieures à la traction et même à la limite d'élasticité du métal, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois [17].

II.2.2.Limite de fatigue

Pour une contrainte moyenne σ_m donnée, c'est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas observé de rupture après un nombre infini de cycle.

Dans le cas particulier des aciers, il est expérimentalement constaté que ce nombre infini peut être ramené à 10^7 cycles.

En revanche, pour les aciers en présence de corrosion et pour certains alliages d'aluminium, de cuivre ou de titane, cette limite de fatigue reste théorique et sans intérêt puisque tous les mécanismes ont une durée de vie limitée par suite de l'usure, la corrosion ou d'autres causes inhérentes à leur service même; on est donc conduit à utiliser une autre grandeur appelée limite d'endurance [18].

II.2.3. Limite d'endurance

Pour une contrainte moyenne σ_m , la limite d'endurance est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N (appelé censure) de sollicitations. La limite d'endurance en contraintes purement alternées s'écrit $\sigma_D(N)$ [19].

Cette valeur peut être déterminée à l'aide de méthodes statistiques. Dans le cas des aciers, la censure est généralement de 107 cycles, mais on peut déterminer expérimentalement la limite d'endurance pour des censures différentes, suivant la nature du matériau ou de la pièce essayée. Ce sera par exemple 107 cycles pour un rail de chemin de fer, 2×10^6 cycles pour une pièce soudée d'après plusieurs auteurs et particulièrement de la référence [18].

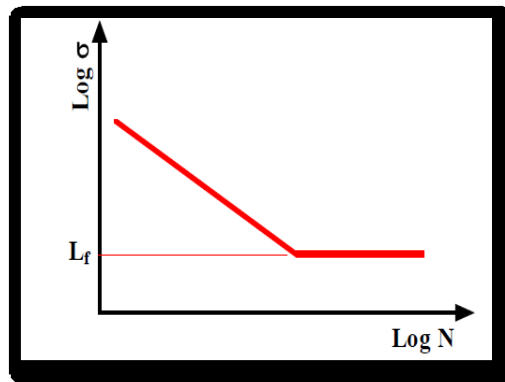


Figure II.2. Limite d'endurance ou limite de fatigue [20].

II.2.4. Durée de vie

La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture N . L'exécution de n cycles ($n < N$) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de chiffrer car il détermine sa capacité de vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident [17].

II.2.5. Contraintes appliquées

En service ou au cours d'essai de laboratoire, les efforts appliqués peuvent être des sollicitations de type simples, par exemple de traction-compression, de flexion ou de torsion, ou résulter d'une combinaison de ces sollicitations [17].

En général, lors des essais de fatigue, la contrainte appliquée varie selon une fonction sinusoïdale approximative dans le temps, soit en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines, soit pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats d'essai.

La contrainte, prise en compte lors d'un essai de fatigue, est une contrainte globale (calculée par rapport à la section de la pièce d'après la résistance des matériaux et relativement au domaine élastique).

II.2.5.1. Contrainte nominale

La contrainte prise en charge au cours de l'essai de fatigue est une contrainte nominale. Elle est calculée par rapport à la section nette de la pièce ou de l'éprouvette considérée, à l'aide de formules usuelles de la résistance des matériaux et relative au domaine élastique. Elle ne fait pas intervenir la concentration de contrainte due à des entailles, ou à d'autres causes [21].

La contrainte calculée est exprimée en newton par millimètre carré (N/ mm²) ou en Megapascal (1Pa= 1 N/ mm²).

II.2.5.2. Cycle de contrainte

Les essais de fatigue sont définis par des normes, et ils sont de plusieurs types :

- Traction – compression ;
- Flexion plane ;
- Flexion rotative ;
- Flexion trois points ;
- Torsion.

Les éprouvettes sont soumises à des sollicitations périodiques. La contrainte passe par un maximum σ_{\max} et par un minimum σ_{\min} .

Dans ce travail, nous étudions les sollicitations de types sinusoïdales de Flexion rotative dont le cycle est On en déduit :

La contrainte moyenne

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (\text{II.1})$$

L'amplitude de contrainte

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (\text{II.2})$$

L'étendue de variation de contrainte

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_a \quad (\text{II.3})$$

Rapport de charge RC 'est le rapport de la contrainte minimale sur la contrainte maximale.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (\text{II.4})$$

Dans la figure II.3, nous présentons les termes et symboles utilisés pour décrire le cycle de contrainte.

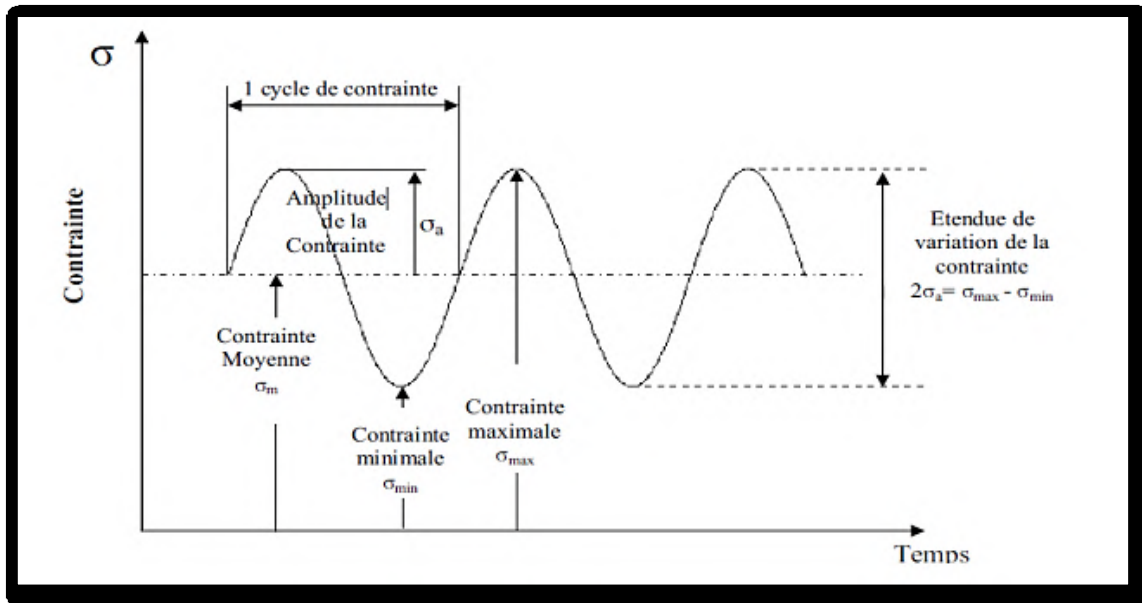


Figure II.3. Cycle de contrainte en fatigue [22].

II.2.5.3. Types de cycles de contraintes

- Contrainte purement alternée : contrainte qui varie entre des valeurs égales, dans le sens positif et négatif [18].
- Contrainte alternée : contrainte qui évolue entre une valeur maximale positive et une valeur minimale négative dont les valeurs absolues sont différentes ($0 < \sigma_m < \sigma_a$) ;
- Contrainte répétée : contrainte qui varie entre la valeur 0 et une valeur maximale positive, ou entre 0 et une valeur minimale négative ($\sigma_m = \sigma_a$) ;
- Contrainte ondulée : contrainte qui varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe ($\sigma_m > \sigma_a$)

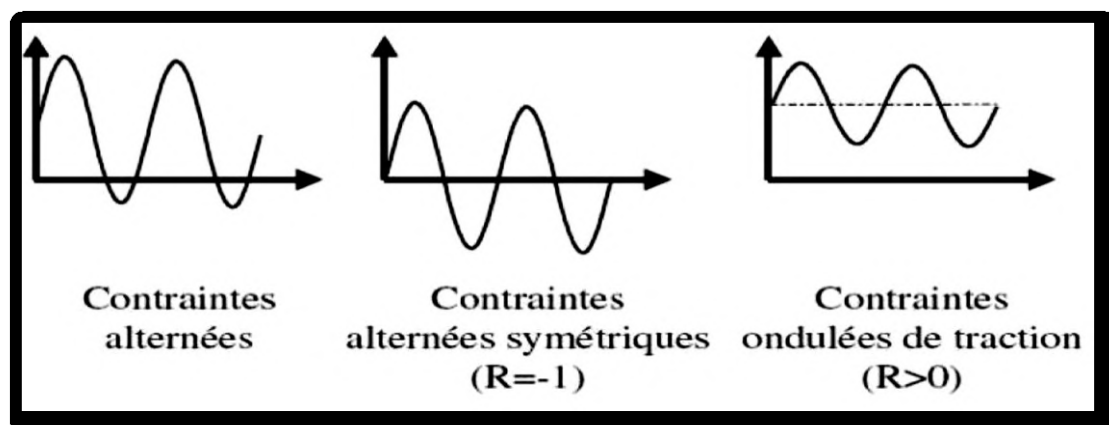


Figure II.4. Différents types de sollicitations [23]

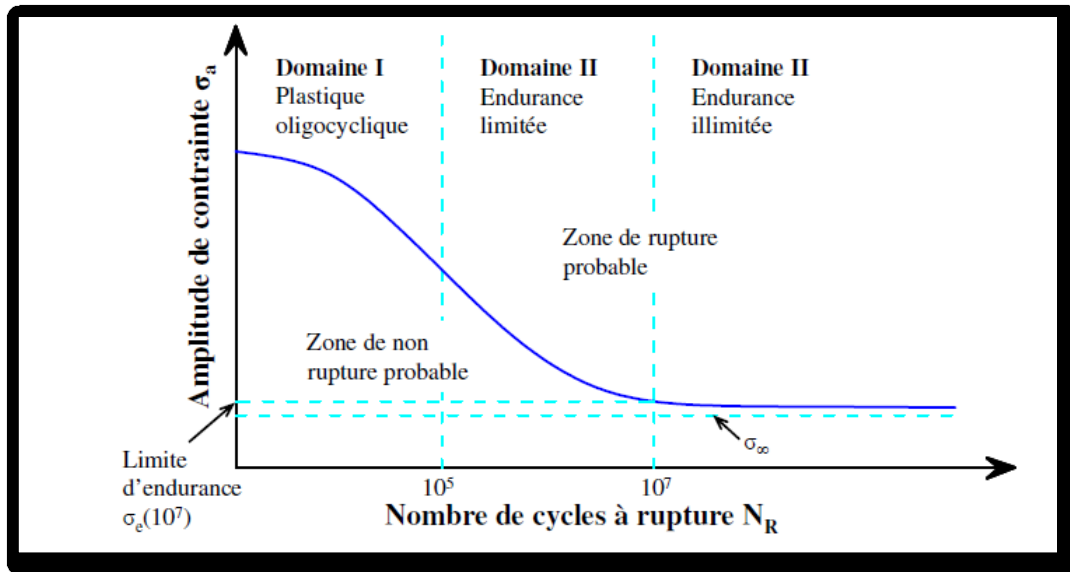


Figure II.5. Représentation schématique d'une courbe de Wöhler [24]

Remarque :

Cette figure est une représentation de la courbe de Wöhler qui définit la relation entre la contrainte de rupture et le nombre de cycles.

II.3. Diagrammes représentatifs

Pour présenter de manière facilement utilisable les résultats d'essais de fatigue, il existe un assez grand nombre de méthodes ou arrangement possibles, des paramètres utilisés en fatigue:

- Temps : sous la forme d'un nombre de cycles N ;[18]

- Contraintes :

- Statiques (R_e, R_m) ;
- Dynamiques ($\sigma_m, \sigma_a, \sigma_{max}, \sigma_{min}, \sigma_d$) ;

Parmi toutes les méthodes existantes, nous développerons les plus utilisées et les plus riches en renseignements [18]

II.3.1. Courbe de Wöhler

Cette courbe est appelée courbe S-N (Stress-number of cycles) dans les pays anglo-saxons.

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permet de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans tout le domaine de la fatigue.

Chaque pièce est soumise à des cycles d'efforts périodiques, N_R est le nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit. Pour plus de commodité, ce nombre N_R est reporté en

abscisse sur une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire [18].

Pour tracer une telle courbe, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée.

Ainsi, à chaque pièce essayée correspond donc un point du plan (T, N) et à partir d'un certain nombre d'essais à contraintes généralement décroissantes, on peut tracer une courbe qui a l'allure donnée sur la (figureII.6.)

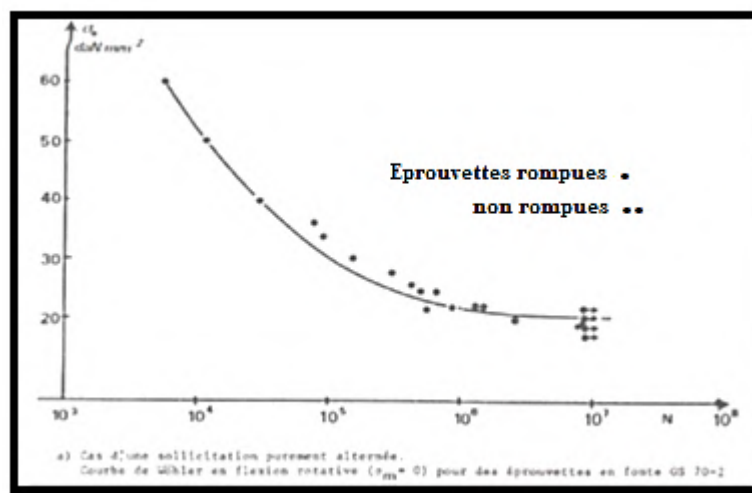


Figure II.6. Représentation schématique d'une courbe de Wöhler [18]

Dans le cas des aciers, la courbe de Wöhler présente en général une asymptote horizontale correspondant à une contrainte dont la valeur est, par définition, la limite de fatigue.

En revanche, pour certains alliages d'aluminium, de cuivre, ou titane et dans le cas d'essais de fatigue sous corrosion, la courbe de Wöhler ne prend pas d'asymptote pour les grands nombres de cycles et il n'est pas sûr que la limite de fatigue existe. Une courbe de Wöhler comprend trois domaines [18].

Le domaine de la fatigue oligocyclique où les ruptures, précédées d'une déformation plastique globale notable, surviennent après un petit nombre de cycles ($NR < 10^5$) ;

Le domaine d'endurance limitée ($NR > 10^5$ cycles) où les ruptures surviennent systématiquement après un nombre limité de cycles croissant, avec la décroissance de la contrainte.

Entre ces deux derniers domaines, la courbe de Wöhler présente un coude plus ou moins prononcé, compris entre 10^6 et 10^7 cycles. Pour certains alliages d'aluminium, ce coude est beaucoup moins net.

II.3.2. Courbes d'équiprobabilité de rupture

La courbe de Wöhler est une courbe moyenne, son utilisation peut s'avérer délicate du fait que les valeurs relevées indiquent seulement que la pièce a autant de chances de se rompre que de ne pas se rompre [19].

Les courbes d'équiprobabilité de rupture, dont la courbe de Wöhler constitue un cas particulier ($p = 50\%$ de rupture), sont alors tracées en soustrayant à la valeur moyenne une certaine valeur, fonction de la probabilité de rupture recherchée, du nombre d'essais et du niveau de confiance accordé (figure II.7)

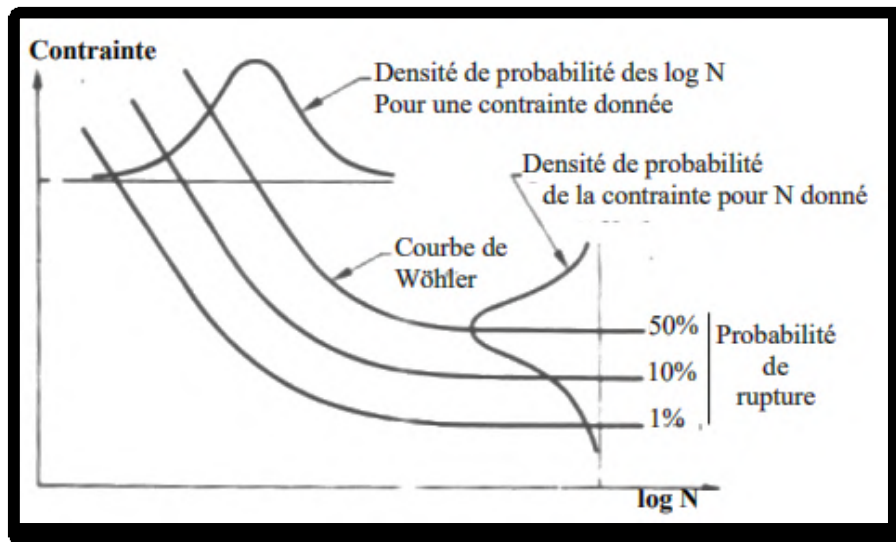


Figure II.7. Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques) [19]

II.3.3. Diagramme de Haigh

Sur ce diagramme, l'amplitude de contrainte σ_a est portée en fonction de la contrainte moyenne à laquelle a été réalisé l'essai de fatigue [18].

Deux points particuliers sont à considérer :

- Le point A, qui représente la limite d'endurance σ_D en sollicitation purement alternée σ_D ($\sigma_D = OA$) ;
- Le point B, qui représente le comportement limite du matériau pour une contrainte alternée nulle. Ce point correspond donc, à la contrainte de rupture du matériau au cours d'un essai statique.

L'ensemble des limites d'endurance observées pour diverses valeurs de la contrainte moyenne, se placent alors sur une courbe AB ajustée en fonction des résultats d'essais. Le domaine limité par cette courbe AB et les deux axes de coordonnées, représentent le domaine de fonctionnement autorisé avec le matériau pour avoir une durée de vie supérieure ou égale aux nombres de cycles pour lequel a été déterminée la limite d'endurance.

Sur ce diagramme on utilise parfois des « rayons » qui représentent le rapport entre σ_a et σ_m . Ces rayons sont alors paramétrés en fonction des valeurs que prend ce rapport.

Le diagramme de Haigh peut être ensuite limité par la droite représentant la limite d'élasticité du matériau.

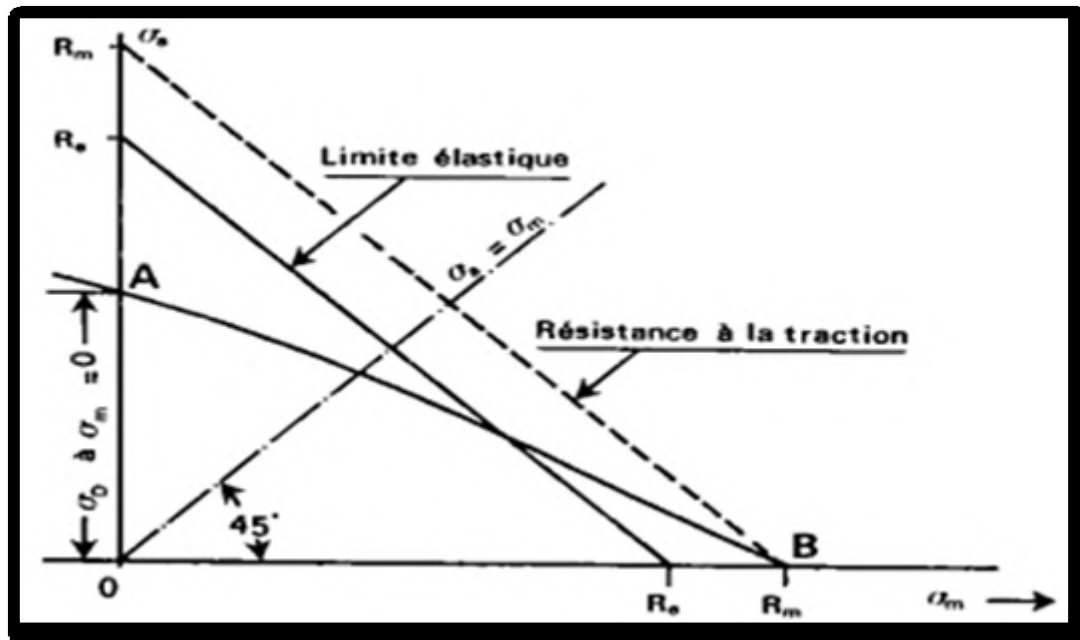


Figure II.8. Diagramme de Haigh [18]

Plusieurs représentations de la courbe AB ont été proposées et qui permettent de construire un diagramme d'endurance approché, lorsqu'on ne connaît que la limite d'endurance en sollicitation purement alternée et les caractéristiques mécaniques statistiques (R_e, R_m) du matériau.

II.3.4. Diagramme de Goodman-Smith

Sur ce diagramme les contraintes maximales σ_{max} et minimales σ_{min} sont représentées en fonction de la contrainte moyenne σ_m [18]

Les points particuliers A et B précités, se retrouvent ainsi que les différentes formes de courbes pouvant les relier (droite de Goodman, parabole de Gerber ou toute autre courbe représentative d'une fonction ajustée aux résultats d'essais).

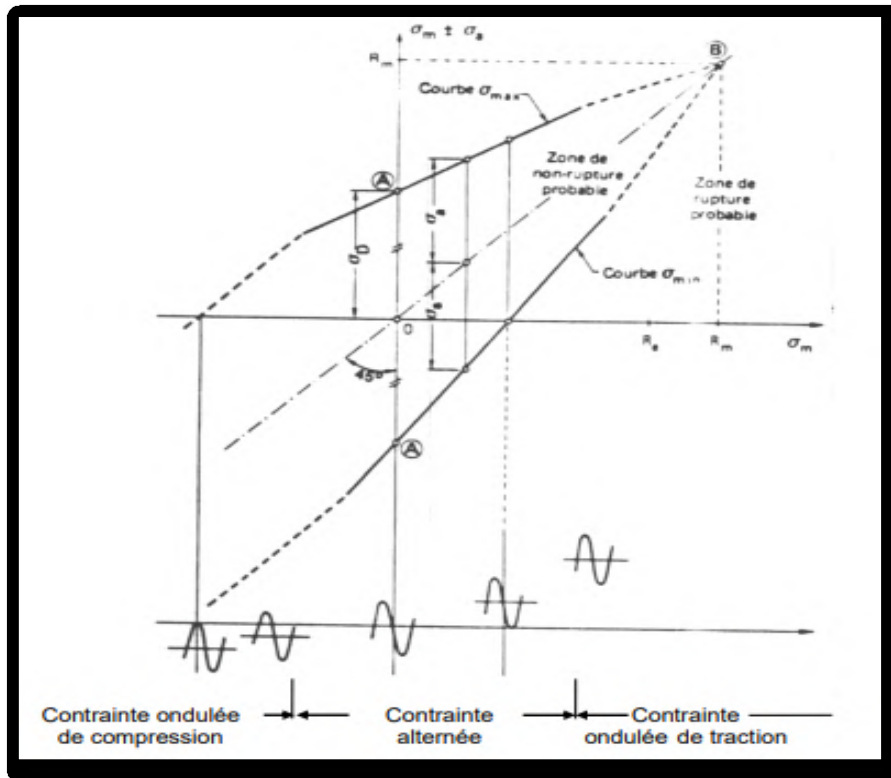


Figure II.9. Digramme de Goodman-Smith (résultats théoriques)[25]

II.3.5. Diagramme de Ros

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxons, ce diagramme représente la contrainte maximale σ_{max} en fonction de la contrainte minimale σ_{min} . En plus des deux points particuliers A et B précités, il apparaît un autre point particulier C pour lequel $\sigma_{min}=0$. [18]

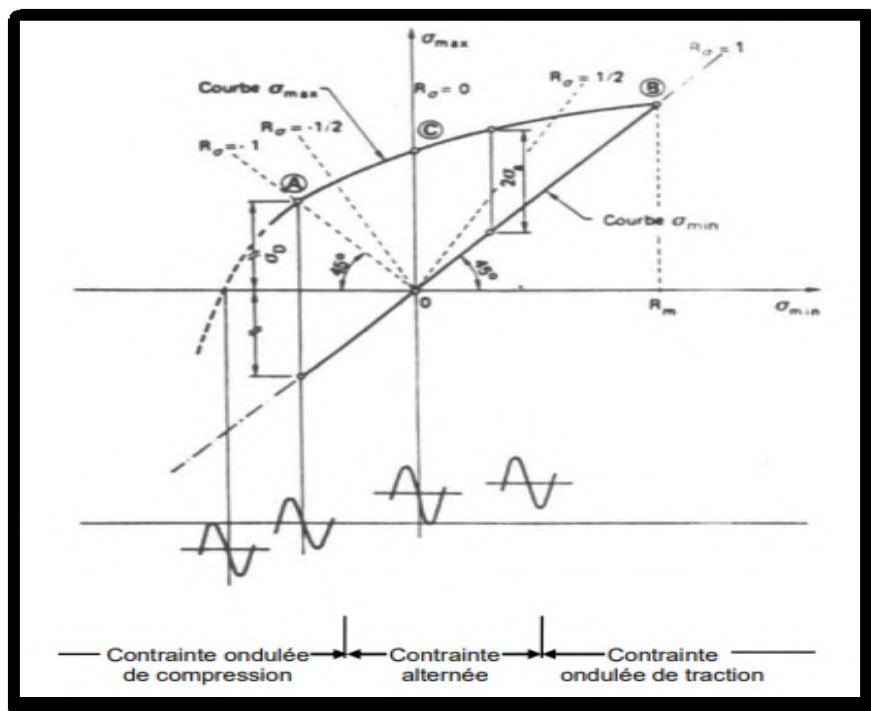


Figure II.10. Diagramme de Ros (résultats théoriques) [18]

II.4. Facteurs influant la fatigue

L'endurance des pièces est la résultante de plusieurs phénomènes compétitifs, l'existence des concentrations locales de contrainte entraîne des déformations plastiques, par conséquent entraînant aussi l'endommagement progressif du matériau, et de l'irréversibilité des glissements au cours des cycles successifs [22].

II.4.1. Facteurs métallurgiques

La réalisation d'une pièce implique toujours des opérations mécaniques et thermiques, qui affectent l'état métallurgique du matériau utilisé ainsi que ses propriétés mécaniques. Tous les éléments liés à la nature du métal constituant la pièce (sa composition chimique et sa structure métallographique), à sa fabrication et à sa mise en forme (comme les inclusions, les défauts et le fibrage), ainsi qu'aux traitements thermiques (impact sur la structure métallographique et les propriétés mécaniques du matériau de la pièce) peuvent être inclus dans cette catégorie. Pour évaluer l'impact des différentes opérations mécaniques et thermiques sur les propriétés mécaniques finales de la pièce en termes de résistance à la fatigue, il est possible de raisonner à partir de la microstructure de la pièce finale.

Les défauts éventuels qui surviennent lors de ces opérations peuvent potentiellement se retrouver à l'étape finale et d'influer sur la résistance à la fatigue.

II.4.2. Facteurs liés à l'élaboration du matériau

Le processus d'élaboration employé pour la fabrication du matériau a un impact sur sa résistance à la fatigue. Les techniques sidérurgiques les plus avancées, telles que la refusions sous vide ou sous laitier, permettent d'obtenir de faibles niveaux d'inclusions, ce qui conduit à de meilleures caractéristiques de fatigue.

II.4.3. Facteurs liés à la mise en forme

Lors de la mise en forme à froid, l'acier subit un écrouissage qui a pour effet de morceler les grains et d'engendrer des sous-grains invisibles au microscope optique, ce qui conduit généralement à une augmentation de la charge de rupture et des caractéristiques de fatigue. La comparaison des rapports d'endurance de l'état recuit à l'état étiré permet de déduire que l'augmentation de la tenue en fatigue est liée à l'augmentation de la charge à la rupture [21].

II.4.4. Facteurs liés aux traitements thermiques

Les traitements thermiques permettent d'atteindre la structure finale requise. Pour obtenir des valeurs basses de résistance à la fatigue, comme dans le cas de l'acier, on peut utiliser des aciers recuit.

Alors que pour des grandes valeurs un traitement de durcissement devient nécessaire [21].

II.4.5. Influence de la corrosion

La corrosion peut intervenir de plusieurs manières, En absence de sollicitation dynamique, la corrosion peut entraîner la fissuration progressive des pièces chargées statiquement dans un milieu agressif (corrosion sous contrainte).

En présence des efforts dynamiques sur la pièce qui a subi une corrosion préalable, il s'agit dans ce cas de rupture par fatigue seulement. Lorsque la fatigue et la corrosion agissent simultanément ceci conduit à la plus forte diminution de la résistance à la fatigue des matériaux métalliques [21].

II.4.6. Influence de la fréquence des sollicitations

A cause des frottements internes, il y a un retard de déformation sur la contrainte. Dans le cas des contraintes périodiques, on voit apparaître alors un cycle d'hystérésis de la déformation en fonction de la contrainte dont l'inclinaison varie avec la fréquence des cycles. Si cette fréquence augmente, la déformation plastique maximale atteinte pour une même amplitude de la contrainte diminue et, par suite l'endurance se trouve augmentée. Inversement, si la fréquence diminue, il en sera de même pour l'endurance [22]. Toutefois dans l'absence des échauffements ou de corrosion, la fréquence des vibrations des machines classiques (5 à 100Hz) n'a aucune influence sur la limite d'endurance des aciers [21]

II.4.7. Facteurs géométriques

L'influence de ces facteurs géométriques intervient à travers les dimensions des pièces (effet d'échelle) et surtout leurs formes (effet d'entaille). Les origines de l'effet d'échelle sont principalement mécaniques, statistiques ou encore technologiques. Pour tenir compte de l'effet d'échelle, il faut introduire le coefficient K_c rapport de la limite d'endurance σ_D .

Le coefficient K_c peut être déterminé expérimentalement pour un matériau et une dimension donnée avec σ_{D0} mesurée sur éprouvette de faible diamètre ($5 < d < 10$ mm)[21] .

II.5. Fissuration par fatigue

II.5.1. Courbes de propagation des fissures

L'interprétation de la courbe de dommage, repose sur l'existence d'une taille critique de la fissure, qui dépend de la contrainte maximale des cycles [25] .Et au-delà de laquelle leur propagation deviendrait irréversible (causant des dommages) et entraînerait la rupture. Ainsi, il a été recherché de suivre l'évolution des fissures pendant la fatigue.

On peut reporter les longueurs mesurées en fonction du nombre de cycle sous les différents niveaux de fissure (figure II.11). Ces courbes indiquent que l'importance relative des différentes étapes, amorçage et propagation, dépend de la contrainte maximale.

On peut également reporter la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle et tracer la courbe de fissuration de l'éprouvette ou des pièces considérées, soumises à la contrainte périodique maximale.

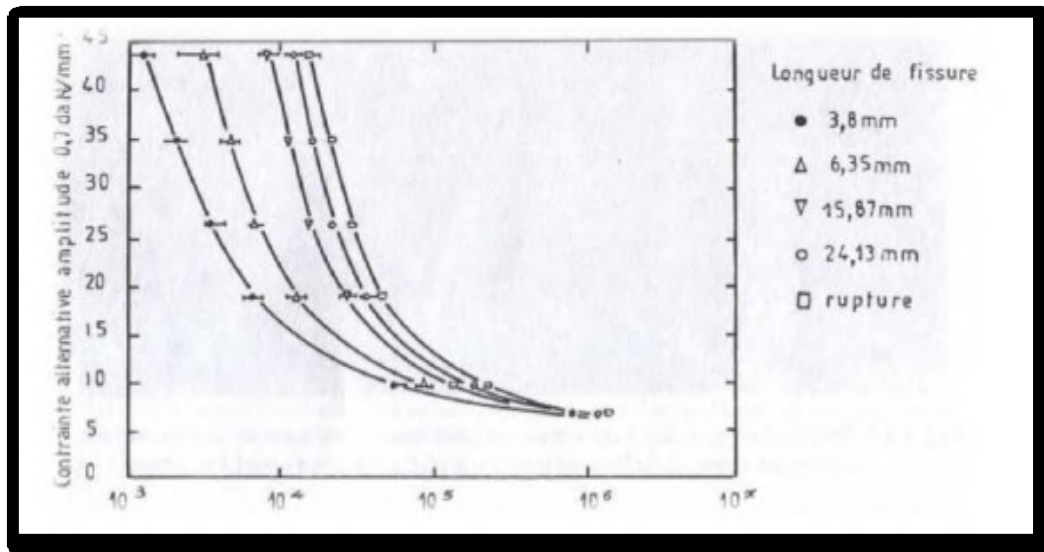


Figure II.11. Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte [26]

II.5.2. Expression de la vitesse de fissuration

A partir de la mesure des longueurs de fissures observées sur des éprouvettes en cours de fatigue, différentes formules ont été proposées pour la vitesse de propagation. La mécanique de la rupture permet d'étudier quantitativement les stades de propagation lente et de propagation brutale des fissures de fatigue mentionnées à l'occasion des courbes de fissuration. On a pu, en particulier, traiter de cette façon de nombreux cas pratiques où l'on a observé des fissurations préexistantes dans une structure.

II.6. Facteurs de l'endurance des pièces

On peut dire, pour simplifier, que l'endurance d'une pièce ou d'un élément de structure est la résultante de plusieurs phénomènes compétitifs :

- D'une part, l'endommagement progressif du métal par suite de l'existence des concentrations des contraintes, qui entraîne des déformations plastiques.
- D'autre part, l'adaptation, c'est à dire la modification du régime des contraintes internes par relaxation consécutive à la déformation plastique localisée.
- Les facteurs qui agissent sur la fatigue sont très nombreux et on peut les classer en quatre catégories.

II.6.1. Facteurs métallurgiques

On peut classer dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure cristallographique), à son élaboration et à sa mise en forme (inclusions, défauts...), ainsi qu'aux traitements thermiques (structure métallographique et caractéristiques mécaniques) subis par la pièce [27].

II.6.2. Facteurs géométriques

L'influence de ces facteurs intervient par la dimension des pièces (effet d'échelle) et surtout par leurs formes (effet d'entaille et coefficient de concentration des contraintes).

II.6.3. Facteurs de surfaces

Les fissures de fatigue prennent le plus souvent naissance dans les couches superficielles. Il convient donc, pour améliorer l'endurance des pièces, de relever dans la mesure du possible celle des couches superficielles, on peut y arriver en jouant soit sur la nature du métal, soit sur la résistance des couches superficielles par des traitements de durcissement et le développement de précontraintes.

II.6.4. Facteur de l'environnement

- **Influence de la température**: La limite d'élastique et la résistance à la traction diminuant lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance.
- **Fatigue sous corrosion**: On rencontre très fréquemment la fatigue-corrosion sur des pièces travaillant dans des conditions assez peu agressives en apparence, à titre d'exemple, les eaux saumâtres ou salées, les divers milieux acides [27].

II.6.5. Facteurs de sollicitation

- **Nature des efforts** : Pour une même éprouvette, essayée sous une même amplitude de la contrainte périodique, à la même fréquence et à la même température, les gradients de contraintes à travers la section la plus chargée seront différents selon la nature des efforts appliqués. Pour des efforts axiaux, traction ou compression les contraintes sont uniformes dans la section, tandis qu'en flexion ou en torsion elles sont maximales en surface et nulles au centre, sur la fibre neutre [28].
- **Effet de surcharge et de sous-charge** : Une surcharge temporaire peut conduire à dépasser localement la charge de rupture du matériau et produire un endommagement irréversible sous forme d'une fissure.
- **Contraintes résiduelles** : les contraintes résiduelles peuvent aggraver dangereusement les valeurs des contraintes, inversement des précontraintes de compression permettent d'augmenter le taux de travail admissible.

Les contraintes résiduelles ne peuvent être déterminées de façon directe, elles sont toujours à déduire grâce à la mesure des quantités physiques ou mécaniques distinctes qu'elles produisent. Et qui sont les suivantes [27] :

- Les déformations macroscopiques qui se relâchent quand une partie du matériau est enlevé de la partie soumise aux contraintes résiduelles.
- La distribution des déformations résiduelles homogène dans le réseau cristallographique. C'est la base des méthodes des diffractions de rayon X.
- La vitesse de propagation des ondes ultrasonores qui sont influencées par les contraintes résiduelles.
- Les caractéristiques magnétiques du matériau.

- Influence de la fréquence

Dans le cas des contraintes périodiques, on voit apparaître alors un cycle d'hystérésis de la déformation en fonction de la contrainte dont l'inclinaison varie avec la fréquence des cycles. Si cette fréquence augmente, la déformation plastique maximale atteinte pour une même amplitude de la contrainte diminue et, par suite, l'endurance se trouve augmentée, tout au moins tant que cette augmentation de fréquence n'entraîne par un échauffement de l'éprouvette. Inversement, si la fréquence diminue, il en sera de même de l'endurance, principalement à cause de l'effet d'environnement.

II.7. Mécanique de la rupture

Dans le domaine de la fissuration, la mécanique de la rupture est un outil d'analyse essentiel. Cette théorie, popularisée à partir des années 50, permet de caractériser le comportement d'une fissure au sein d'une structure. Elle fournit à la fois une analyse du champ de contraintes et de déformations au voisinage du front de fissure et des concepts globaux comme le taux d'énergie dissipé, dérivée partielle de l'énergie potentielle par rapport à l'avancée de fissure, ou le facteur d'intensité de contrainte [29].

Elle permet dans certains cas de prévoir, en fonction des dimensions d'une fissure et de l'état de chargement, la vitesse de propagation de la fissure et la dimension à partir de laquelle cette fissure peut entraîner une rupture brutale [30].

II.8. Conclusion

La fatigue des matériaux représente un défi majeur dans le domaine de l'ingénierie et de la science des matériaux. Son impact peut être dévastateur, allant de la défaillance structurale à des conséquences économiques et environnementales significatives. Cependant, grâce aux avancées dans la compréhension des mécanismes de la fatigue et aux progrès réalisés dans les méthodes de conception et de test, il est possible de développer des solutions durables et résistantes à la fatigue.

En définitive, la gestion efficace de la fatigue des matériaux est essentielle pour garantir la sécurité, la fiabilité et la durabilité des produits et des infrastructures dans divers secteurs industriels. En continuant à investir dans la recherche et le développement dans ce domaine crucial, nous pouvons contribuer à créer un avenir où les matériaux sont non seulement plus performants, mais aussi plus durables et résilients face aux défis de la fatigue.

CHAPITRE III

Etude expérimentale

III.1 Introduction

La fatigue des matériaux est un phénomène causé par des sollicitations cycliques sous le seuil élastique. Ce processus d'endommagement progressif mène à la rupture, en passant par l'initiation et la propagation de fissures.

Les paramètres locaux tels que la géométrie, le chargement et les propriétés des matériaux ont une influence majeure sur la résistance à la fatigue et la durée de vie des structures.

Ainsi, la compréhension des mécanismes de fatigue et la prise en compte des facteurs influents sont essentielles pour concevoir des structures durables soumises à des chargements cycliques.

Cette étude expérimentale s'intéresse au comportement en fatigue par flexion rotative d'un matériau de production nationale. Les principaux éléments sont : Détermination de la limite de fatigue pour un cycle de contrainte donné, ainsi que de la limite d'endurance. Caractérisation de la tenue en fatigue du matériau à travers des essais sur un ensemble d'éprouvettes identiques, soumises à des cycles de contrainte de forme donnée. . Enfin, une étude statistique de l'effet de ce paramètre de fonctionnement sur l'évolution de nombre de rotation (N) est réalisée. Les résultats obtenus ont été analysés statistiquement en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA) et la surface de réponse de la méthode (MSR).

Les résultats obtenus permettent de caractériser finement le comportement en fatigue de ce matériau de production nationale, en identifiant les paramètres clés et leurs effets sur la durée de vie en fatigue.

III.2 Outils expérimentaux

III.2.1 Dispositif expérimental

Il existe une variété de machines d'essai de fatigue, qui se différencient selon le mode de sollicitation appliqué et les facteurs d'influence pris en compte.

En termes de modes de sollicitation, on peut citer notamment la flexion plane, la flexion rotative, la torsion, ainsi que la traction-compression. Chacun de ces modes de chargement cyclique permet d'évaluer le comportement en fatigue du matériau sous des sollicitations spécifiques.

Par ailleurs, les machines d'essai peuvent aussi intégrer différents facteurs d'influence, comme la température ou la fatigue sous environnement corrosif.

Le laboratoire de résistance des matériaux du département de génie mécanique de l'université de M'sila dispose d'une machine d'essai de fatigue en flexion rotative.

Cette machine est de marque GUNT, de modèle WP 140. Elle présente les caractéristiques suivantes :

- courant alternatif : 220 V
- fréquence : 50 Hz

- charge maximale : 500 N
- échelle de graduation : 5 N
- environnement : air ambiant
- température : ambiante

La figure III.1 montre la machine d'essai de fatigue en flexion rotative WP 140

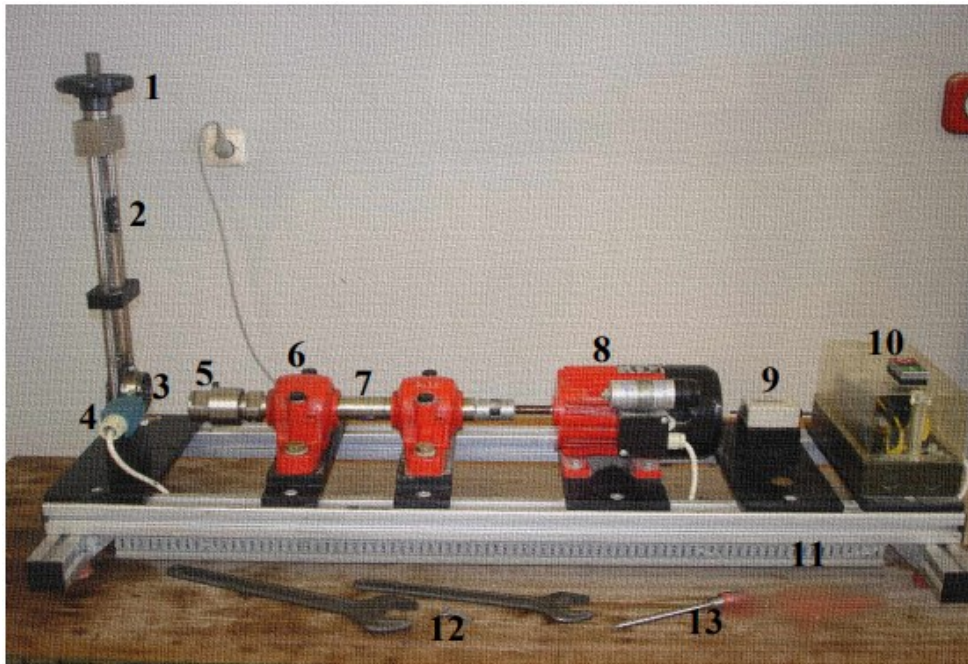


Figure III.1. La machine d'essai de fatigue GUNT WP 140

- 1 Volant
- 2 Chariot transversal gradué
- 3 Roulement
- 4 Fin de course
- 5 Mandrin
- 6 Palier lisse
- 7 Arbre de transmission
- 8 Moteur électrique
- 9 Compteur
- 10 Tableau de commande
- 11 Châssis
- 12 Clés
- 13 Epreuve

III.2.2 Matériel utilisé

Dans le but de réaliser les expériences, on a jugé utile de proposer le matériel suivant :

- Epreuve (pièce en acier C45 (XC48)) ;
- La machine d'essai de fatigue GUNT WP 140;
- Un tour parallèle;
- Un rugosimètre pour mesurer la rugosité.
- Microscope optique modèle: Euromex
- Duromètre modèle : Zwick/Roell

III.2.3 Usinage des éprouvettes

Les éprouvettes sont du type cylindrique en acier C45 (XC48). La réalisation de l'éprouvette a été effectuée sur un tour disponible au niveau du Hall de Technologie. Quant aux traitements thermiques des éprouvettes usinées, ils sont réalisés aussi au niveau du Hall de Technologie.

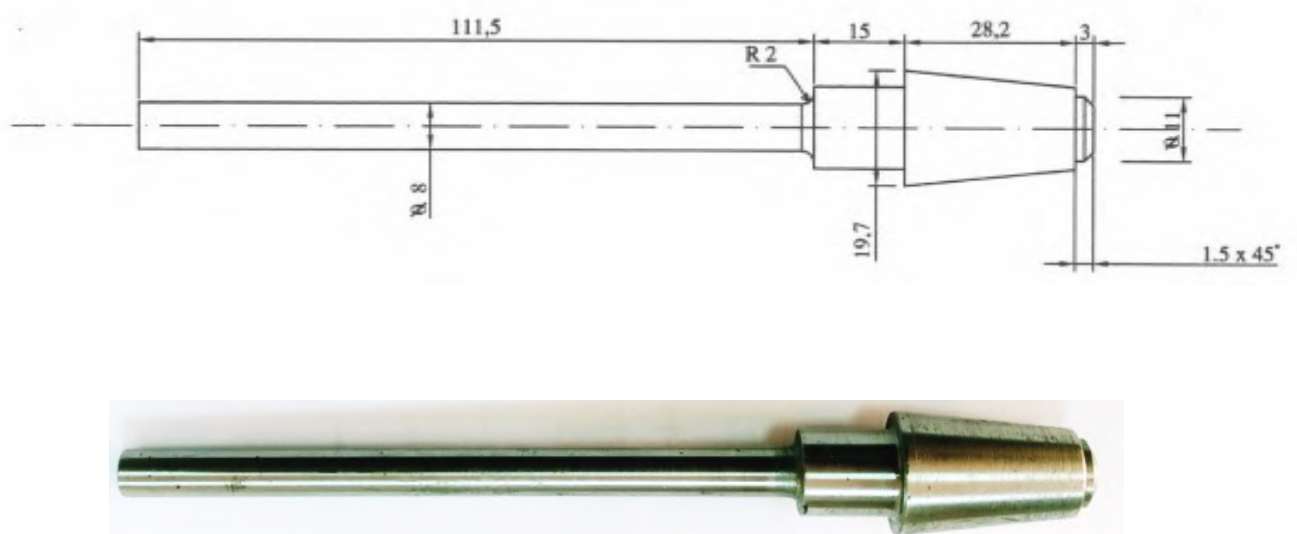


Figure III.2 Schéma de l'éprouvette.

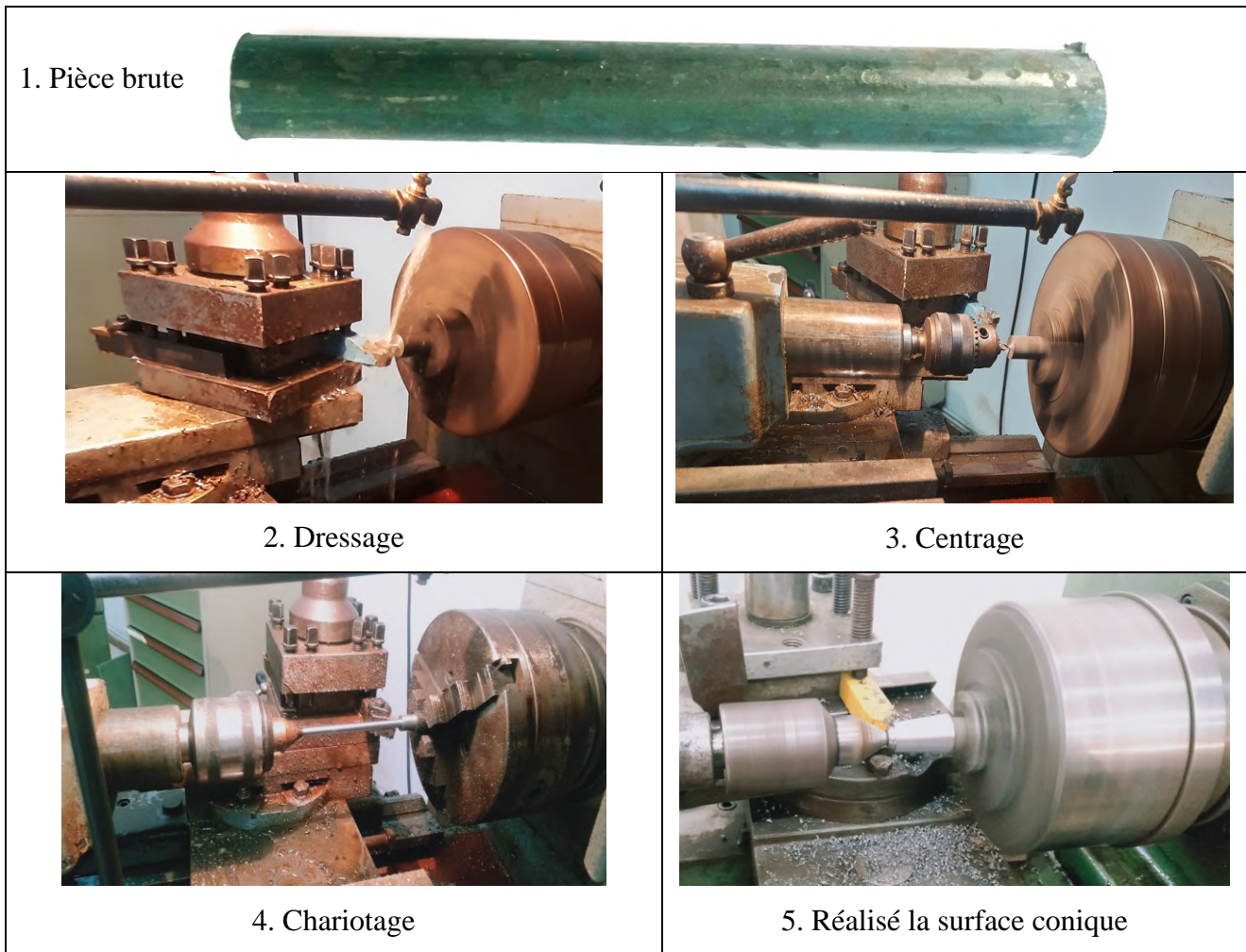


Figure III.3 Les étapes de fabrication de l'éprouvette.

III.2.3.1 Acier C45 (XC48)

C'est un acier de construction mécanique non allié pour traitement thermique défini essentiellement par sa composition chimique (0.45 à 0.52% de carbone). Il est largement utilisé dans la fabrication des bielles, essieux, tiges de piston, vilebrequins, arbres moyens, galets des ponts roulants, pièces d'armes ...etc. Il est employé lorsque les caractéristiques mécaniques demandées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques. Le pourcentage de carbone doit être connu avec précision [31,32].

III.2.3.1.1 Composition chimique

Le tableau III.1 et donnent la composition chimique des échantillons

Méthodes et normes d'essai	Analyse par fluorescence aux rayons X. Carbone et soufre par spectrométrie d'absorption en infrarouge.										
	Composés	C	Mo	Cu	Ni	Mn	Cr	P	Si	V	S
% de masse	0.520	0.007	0.082	0.056	0.625	< 0.05	0.009	0.454	< 0.01	0.0345	

Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier C 45. [33]

III.2.3.1.2 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau III.2.

	R_e (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	A % min	H _{v300}
C45	375	680	17	202

Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés. [34]

III.3 Les paramètres de fonctionnements utilisés

III.3.1 L'état de surface (La rugosité)

Lors de la détermination des caractéristiques fondamentales d'un métal en fatigue, il est important de minimiser autant que possible l'influence de l'état de surface de l'éprouvette sur le processus de fatigue oligocyclique menant à la rupture.

Cela permet de se concentrer sur les caractéristiques fondamentales du métal en fatigue, dépendamment des variations liées à l'état de surface des éprouvettes.

Pour étudier l'effet de l'état de surface sur le comportement en fatigue du métal étudié, les échantillons ont été réalisés par polissage manuelle à l'aide de papiers abrasifs de différents grains (P180, P320 et P600 dans le but de varier la rugosité de la surface des échantillons.

Dans cette étude, on utilise un rugosimètre à palpeur mécanique pour la mesure de rugosité arithmétique superficielle (**R_a**) tel que schématisé dans la (figure III.4).

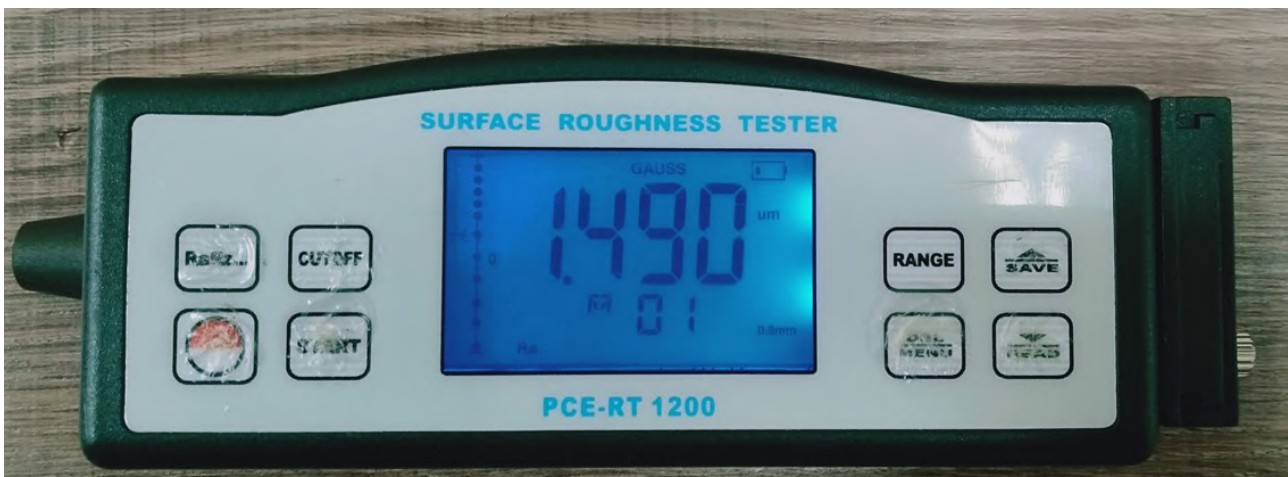


Figure III.4: Rugosimètre PCE-RT 1200

III.3.2 La dureté

La dureté est la résistance qu'offre un corps à sa pénétration par un autre corps plus dur [35].

La dureté HV (Essai de micro dureté Vickers mesurée dans le laboratoire de physique à l'université de M'sila en utilisant un duromètre modèle : Zwick/Roell).

- **Lot N° 1** : Ce lot est constitué des éprouvettes à l'état brut

$$H_{V_{\text{prut}}} = 202$$

- **Lot N° 2** : Ce lot est constitué des éprouvettes après traitement thermique (Température du traitement 850°C, trempe à l'eau avec un revenu à 570°C.

Résultat : Barre d'une micro dureté moyenne de $H_{V_{300}} = 247$.

- **Lot N° 3** : Ce lot est constitué des éprouvettes après traitement thermique (Température du traitement 850°C, trempe à l'eau avec un revenu à 200°C.

Résultat : Barre d'une micro dureté moyenne de $H_{V_{300}} = 325$.

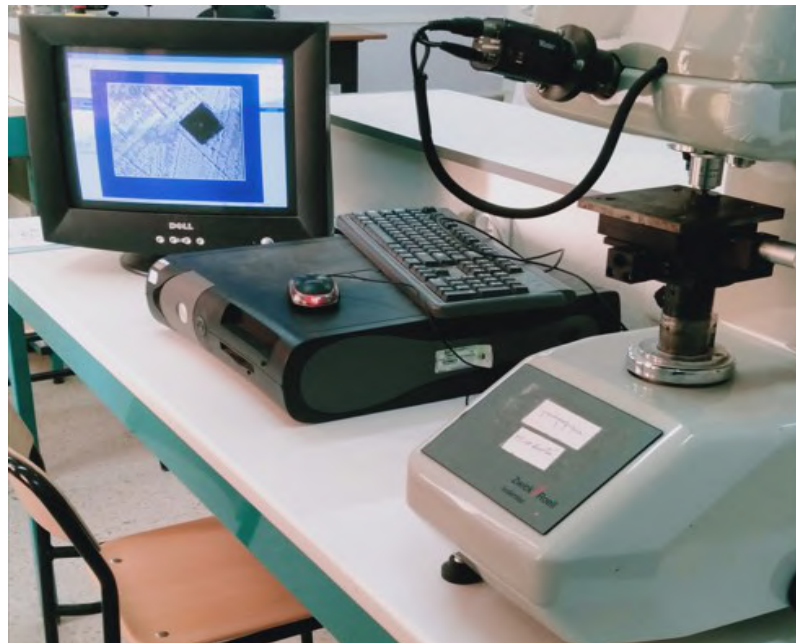


Figure III.5 Duromètre modèle : Zwick/Roell



Figure III.6 Four type Nabertherm

III.3.3 La charge appliquée

Pour effectuer les essais de fatigue, la procédure consiste à charger l'extrémité libre de l'éprouvette.

Plus précisément :

- L'éprouvette est montée sur la machine d'essai, avec son extrémité libre reposant sur un roulement.
- La charge souhaitée est alors appliquée sur cette extrémité libre de l'éprouvette.
- Pour ce faire, l'opérateur tourne le volant de la machine d'essai.
- Le fait de tourner ce volant permet d'appliquer la charge désirée à l'extrémité libre de l'éprouvette.

Cette manipulation permet de soumettre l'échantillon testé à la sollicitation en flexion rotative, conformément au mode de chargement cyclique étudié.

Le réglage de la charge appliquée se fait donc de manière manuelle, en actionnant le volant de la machine d'essai de fatigue.

Cela permet de contrôler précisément les conditions de chargement imposées à l'éprouvette lors des essais visant à déterminer les caractéristiques en fatigue du matériau.

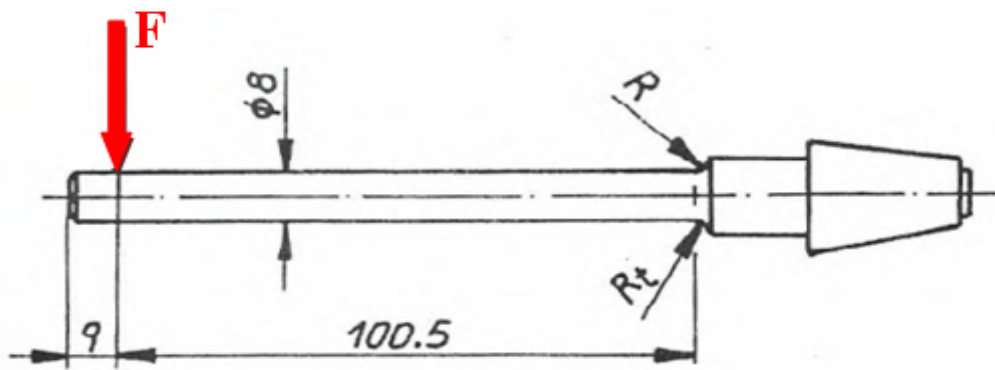


Figure III.7 point d'application de la charge F.

- **Contrainte maximale de flexion**

La contrainte maximale de flexion σ sur la fibre externe se calcule par la formule de Navier [36] :

$$\sigma = \frac{M_f}{M_I} \quad (\text{III. 1})$$

avec :

M_f : moment fléchissant par rapport à la section considérée ;

M_I : moment.

$$M_f = F * L \quad (\text{III.2})$$

F : la charge appliquée

L : longueur du bras de levier

et :

$$M_I = I / V \quad (\text{III.3})$$

I : moment d'inertie de la section par rapport à l'axe neutre,

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (\text{III. 4})$$

V : distance de la fibre externe à la fibre neutre.

$$V = \frac{D}{2} \quad (\text{III. 5})$$

Alors :

$$M_I = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (\text{III. 6})$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{M_f}{M_I} = \frac{32 F * L}{\pi \cdot d^3} \quad (\text{III. 7})$$

$$= \frac{32 F * 100.5}{\pi \cdot 8^3}$$

$$\sigma \approx 2F \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{III. 8})$$

III.4 Procédure expérimentale et résultats

III.4.1 Déroulement de l'essai

- A. Connecter la machine d'essai de fatigue à l'alimentation électrique.
- B. Tourner le volant dans le chariot transversal jusqu'au numéro "0" apparaît dans l'échelle des charges.
- C. Soit sûre que l'axe du roulement et celui de l'arbre de transmission sont en alignement.
- D. Insérer l'éprouvette désirée (figure III.2) donne les dimensions des éprouvettes appartiennent à cette machine).
 - Premièrement, desserrer le mandrin de l'arbre de transmission.
 - Puis, faire introduire la partie cylindrique de l'éprouvette à travers le trou du mandrin.
 - Après, insérer l'extrémité cylindrique de l'éprouvette dans la bague intérieure du roulement, et en fin, insérer l'extrémité conique de l'éprouvette dans le cône dans l'arbre de transmission on serrant bien le mandrin.
- E. Utiliser la clé pour retourner le compteur à "0" (le "0" de la dernière colonne du compteur peut retourner on tournant l'arbre de transmission à la main).
- F. Charger l'extrémité libre de l'éprouvette (sur le roulement) par la charge désirée on tournant le volant. G. Allumer la machine.
- H. A la rupture, la fin de course arrête automatiquement la machine, changer l'éprouvette rompue et recommencer les essais.

III.4.2 Application des plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences est au moins trois à quatre fois plus efficace que les démarches habituelles de conduite des essais, c'est-à-dire qu'elle permet d'arriver aux mêmes résultats avec trois à quatre fois moins d'essais. Ajoutons que cette méthode apporte à l'expérimentateur un puissant outil de réflexion et d'analyse qui lui permettra de conduire son expérimentation avec sûreté et précision [37].

Dans ce travail, une investigation statistique de l'effet des paramètres de fonctionnement, à savoir : la charge appliquée (Q), la rugosité arithmétique superficielle (R_a) et la dureté (H) sur la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)). Les essais planifiés sont réalisés en adoptant un plan d'essai orthogonal L_9 de Taguchi. Les résultats obtenus sont analysés statistiquement, en utilisant à la fois l'analyse de variance (ANOVA). Par ailleurs, des modèles mathématiques, caractérisant les réponses étudiées en fonction des facteurs (variables d'entrée), sont également développés.

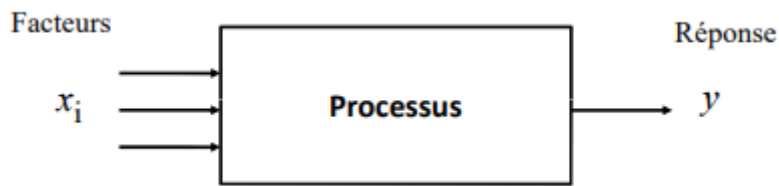


Figure III.8 Entrées et sorties d'une expérience

$$Y = f(Q, V, C) + \epsilon \quad (\text{III.9})$$

Où f est la fonction réponse.

ϵ est l'erreur du modèle

III.4.3 Mesures expérimentales

Après avoir établi le plan orthogonal L_9 de Taguchi, on a procédé à la réalisation des essais planifiés. Par ailleurs, le choix des Tables dépend essentiellement du choix de l'expérimentateur. Ce dernier est responsable sur le choix des paramètres de fonctionnement (variables d'entrée) avec leurs niveaux de variation. En effet, nous nous sommes intéressés à la réponse de la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)): le nombre de rotation (N) est mesuré par un compteur. Il est à noter qu'un minimum de trois mesures pour nombre de rotation, a été pris et c'est la valeur moyenne qui a été considérée.

III.4.3.1 Déroulement de l'essai

Paramètres d'entrée : Dans la présente étude qui concerne les effets des paramètres de fonctionnement, les facteurs sources (variables du problème) utilisés dans les essais sont, la charge appliquée (Q), la rugosité arithmétique superficielle (Ra) et la dureté (H). Chaque facteur d'entrée est varié sur trois niveaux codés comme suit : -1, 0 et + 1. Les niveaux de variation sont donnés par le Tableau III.3. (+1 pour le niveau supérieur. -1 pour le niveau inférieur. 0 pour le niveau de base).

Niveau	Dureté	La rugosité arithmétique, Ra (μm)	Charge Q (N)
-1	202	0.075	150
0	247	0.1	180
1	325	0.3	220

Tableau III.3 Les variables du problème

Paramètres de sortie : Les y_i sont les paramètres de sortie. La durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)): le nombre de rotation (N) est mesuré par un compteur. Il est

à noter qu'un minimum de trois mesures pour nombre de rotation jusqu'à la limite d'endurance (l'éprouvette rompue), a été pris et c'est la valeur moyenne qui a été considérée.

En plus des relations à établir entre réponses (paramètres de sortie) et variables d'entrée (Eqs. III.9), on s'intéresse également à la force de liaison entre ces paramètres et à l'analyse des résultats expérimentaux. Dans la présente étude nous avons choisi le modèle linéaire-interaction: [38]

$$\text{Modèle linéaire-interaction} \rightarrow Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot X_i + \sum_{i,j}^k a_{ij} X_i X_j \quad (\text{III.10})$$

Avec :

a_0 : Terme libre ;

$a_1, a_2 \dots a_k$: Termes linéaires;

$a_{12}, a_{13} \dots a_{ik}$: Termes d'interaction;

X_i : Paramètres d'entrée (H , Ra et Q).

Le modèle à déduire en fonction des variables (H , Ra et Q) ont la forme suivante :

- Modèle linéaire-interaction:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot H + a_2 \cdot Ra + a_3 \cdot Q + a_{12} H \cdot Ra + a_{13} H \cdot Q + a_{23} Ra \cdot Q \quad (\text{III.11})$$

Les résultats expérimentaux de la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)) pour différentes combinaisons entre les paramètres d'entrée (H , Ra et Q) avec le plan d'expérience Taguchi L_9 sont représentés dans le Tableau III.4.

N°	facteurs codés			Les paramètres de fonctionnement			facteur de réponse
	Tester	X1	X2	X3	H	Ra (μm)	
1	-1	-1	-1	202	0.075	150	21729
2	-1	0	0	202	0.1	180	18400
3	-1	1	1	202	0.3	220	1814
4	0	-1	0	247	0.075	180	48623
5	0	0	1	247	0.1	220	16224
6	0	1	-1	247	0.3	150	47503
7	1	-1	1	325	0.075	220	1444
8	1	0	-1	325	0.1	150	30000
9	1	1	0	325	0.3	180	1232

Tableau III.4 Résultats expérimentaux d'usure (W) selon le plan orthogonal L_9 de Taguchi

III.4.3.2 Analyse statistique des résultats

Le traitement des données expérimentales a été effectué par régression linéaire-interaction à l'aide du logiciel Minitap16, nous a permis de déterminer l'influence des paramètres de fonctionnement sur la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)).

III.4.3.2.1 Analyse de variance de la durée de vie (ANOVA)

Les principaux résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'évolution de nombre de rotation (N) de l'éprouvette, sont représentés dans le Tableau III.5.

Source de variance	DF	SS _d	MS	F-test	Prob	Pc (%)
H	1	83787171	342310775	1.03178	0.568226	3.08*
Ra	1	73605700	275473601	0.83033	0.458366	2.70*
Q	1	1075342328	667934981	2.01327	0.291725	39.57*
H.Ra	1	146929222	229265694	0.69105	0.493251	5.40*
H.Q	1	6283014	98160615	0.29587	0.641013	0.23*
Ra.Q	1	667917217	258550992	0.77932	0.470473	24.58*
Error	2	663531329	667917217	2.01322	0.291730	24.41*
Total	8	2717395982	331765665			

DF, degré de liberté; **SS_d**, somme des carrés; **MS**, moyenne des carrés; **F-test**, test de variance; **Prob**, probabilité; **Pc**, pourcentage de contribution (%).

Dans le Tableau III.5 de l'ANOVA, il est fortement constaté que la charge (contribution : 39,57%) est le principal facteur qui montre la plus grande influence sur l'évolution de nombre de rotation (N) suivie l'interaction de la charge et la rugosité arithmétique (Ra.Q) ont un effet très notable sur l'évolution de la durée de vie avec contribution 24,58%. Par contre, il est constaté que les effets de les autres paramètres sont très faibles (Leur contribution est H : 3.08 %, Ra : 2.70%, ...).

Les effets des principaux facteurs source sur les valeurs moyennes de la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)) sont visualisés dans la Figure III.9. En effet, il est bien clair que la durée de vie apparait comme une fonction décroissante de la charge (Q) et la rugosité (Ra). D'autre part, il apparait également que la durée de vie N est une fonction croissante de la dureté (H) ; tandis qu'à la dureté élevée, durée de vie N décroît.

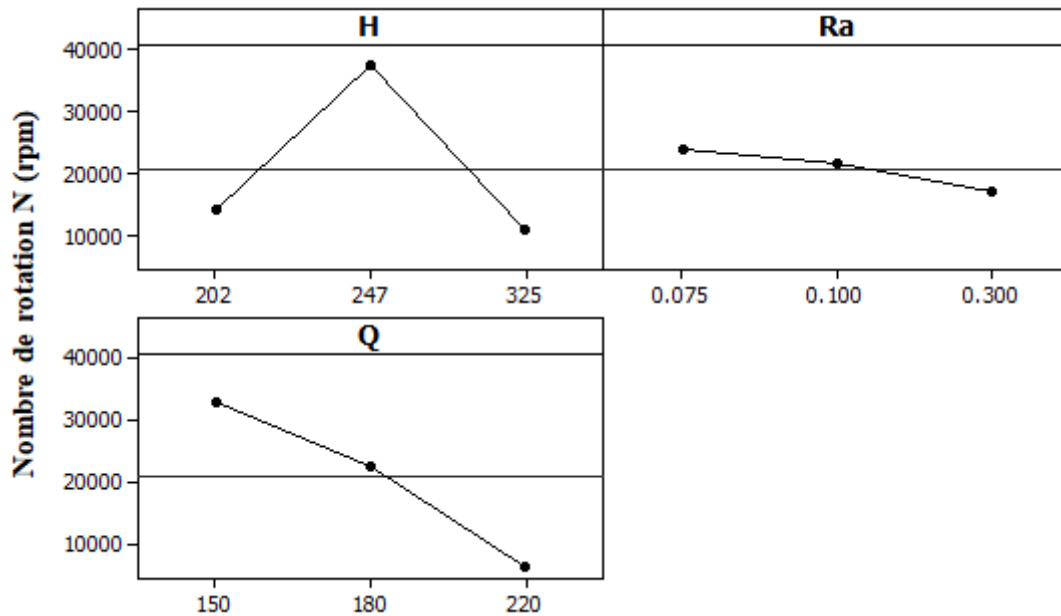


Figure III.9 Graphique des effets sur la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N))

Par ailleurs l'analyse de ces résultats nous a permis de dégager le modèle mathématique suivant:

$$\begin{aligned}
 N = & -231149 + 881.243 H + 841229 Ra + 1458.09 Q - 730.826 H*Ra - 4.94803 H*Q \\
 & - 3860.19 Ra*Q
 \end{aligned}
 \tag{III.12}$$

La mesure de la qualité du model (Equation III.12) établie pour la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)) à travers le coefficient de détermination R^2 signifie que les réponses sont très bien expliquées par le model proposé.

$$R^2 = 75.85\%$$

III.5 Photographies et les photomicrographies des éprouvettes après fonctionnement

Pour mieux comprendre le phénomène de fatigue sous l'effet des paramètres de fonctionnements (dureté, rugosité, charge), des photomicrographies à l'aide d'un microscope optique (Figure III.10) sont prises.



Figure III.10 Microscope optique : **Euromex**

Pour mieux comprendre le phénomène de fatigue des pièces mécaniques sous l'effet des paramètres de fonctionnement, des photographies des éprouvettes d'essai ont été prises. La figure (III.11) caractérise l'aspect de l'éprouvette avant fonctionnement et la figure (III.12) qui donne une image détaillée des éprouvettes après fonctionnement,

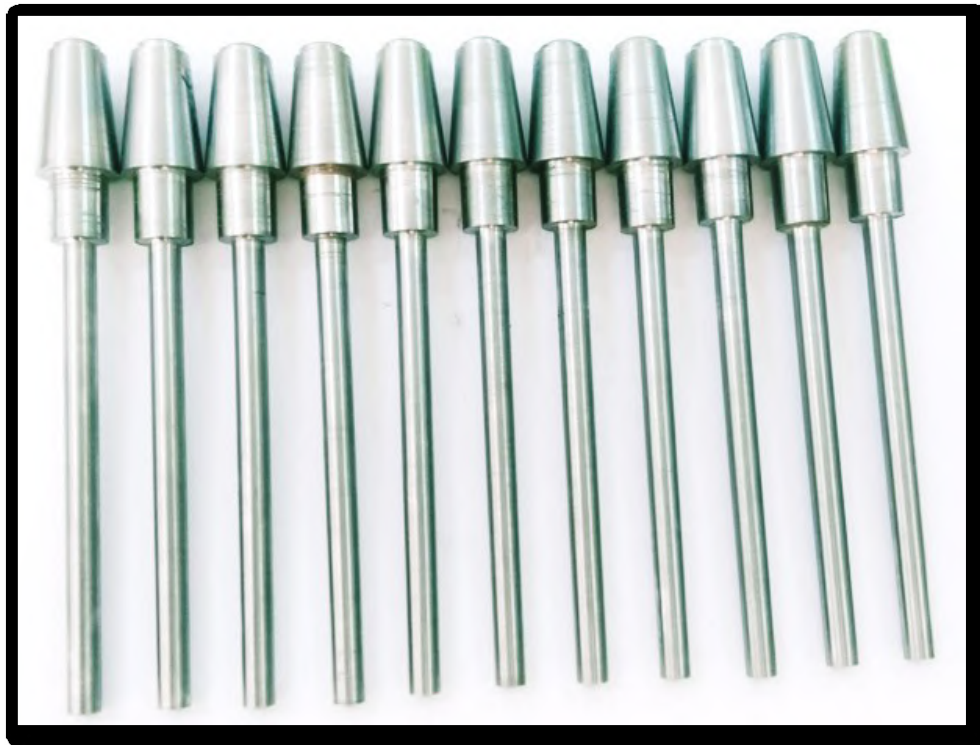


Figure III.11 Photographies des éprouvettes avant fonctionnement.



Figure III.12 Photographies des éprouvettes après fonctionnement.

La surface de rupture de l'éprouvette présente de nombreuses lignes radiales réparties sur tout son pourtour (Figure III.13). [36]

Cela indique que le processus de fatigue ayant conduit à la rupture de l'échantillon s'est initié à de multiples endroits en surface.

La zone de rupture finale est positionnée de manière centrale sur l'éprouvette. Cela indique que les plus fortes concentrations de contraintes se situaient à cet endroit, au niveau du congé, mais sa faible étendue indique que la pièce est peu chargée. L'examen de la zone d'amorçage permet enfin de constater la présence de nombreuses microfissures à la surface du congé.

L'observation de nombreuses microfissures en surface du congé montre que c'est à cet endroit que se sont initiées les fissures de fatigue (figure III.14 –III.16).

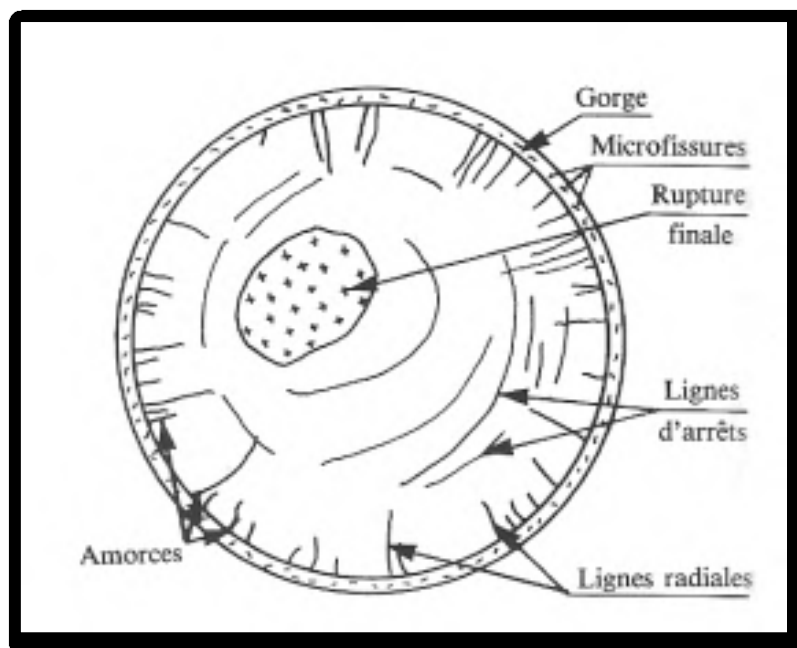


Figure III.13 Caractéristiques des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative [36]

Et voici quelques faciès de rupture observés lors des essais de fatigue :

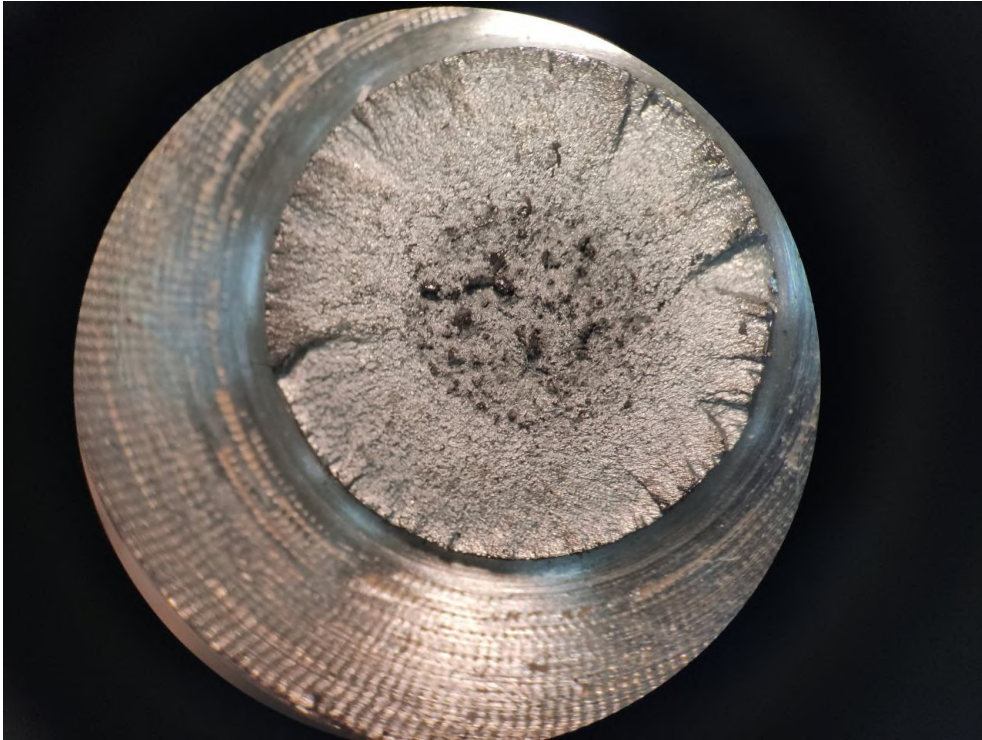


Figure III.14 Photomicrographie optique (grossissement, x20) de faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 180 N et $Ra=0.075\mu m$ après 18400 cycles (acier brut $Hv = 202$)



Figure III.15 Photomicrographie optique (grossissement, x20) de faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 180 N et $Ra = 0.075$ après 48623 cycles de l'acier XC 48 trempé à 850 °C et revenu à 570 °C ($Hv=247$).

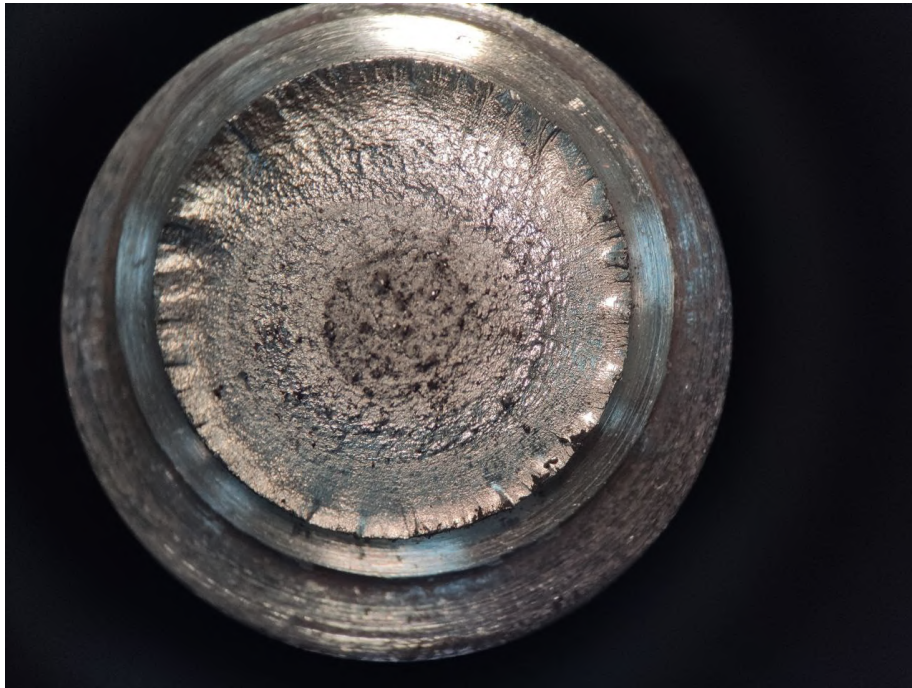


Figure III.16 Photomicrographie optique (grossissement, x20) de faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 150 N et $R_a = 0.1$ après 30000 cycles de l'acier XC 48 trempé à 850 °C et revenu à 200°C ($H_v=325$).

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes particulièrement intéressés dans un premier lieu à la présentation des outils et techniques nécessaires pour le bon déroulement des essais planifiés. Dans une seconde étape, on a procédé d'une part, à l'évaluation de la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)) dans les conditions de fonctionnement. Le traitement statistique de ces résultats donne la relation fonctionnelle entre le paramètre y et les facteurs x_i ($y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$). Dans ce cas et selon les résultats obtenus, le coefficient de détermination R^2 est proche de 1. En effet, il existe une fonction de corrélation linéaire-intéraction étroite.

En effet, les résultats obtenus montrent que le paramètre charge (Q) à la plus grande influence sur l'évolution l'évaluation de la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N))

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif principal de travail présenté dans cette mémoire est de mieux comprendre le phénomène de fatigue en flexion rotative d'un acier C45 (XC48) après traitement thermique par une étude purement expérimentale d'une part et son impact sur les systèmes mécanique d'autre part.

D'autre part, l'effet des paramètres de fonctionnement, à savoir : la dureté (H), la rugosité arithmétique (Ra) et la charge appliquée (Q) sur la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)), est exploré statistiquement par utilisation à l'analyse de variance (ANOVA).

Pour visualiser cet effet, une série d'expériences a été planifiée. Les essais, sont réalisés pour but de connaître les caractéristiques de fatigue en flexion rotative de cet acier avant et après traitements thermiques telle que la limite fatigue. Pour cela, nous avons réalisé des essais dynamiques sur des éprouvettes cylindriques lisses.

Les principales conclusions qu'on peut tirer de cette étude sont :

- Au cours du fonctionnement, les éprouvettes cylindriques se fatiguent. Cette fatigue est évaluée par l'évolution des paramètres étudiés (réduction de la durée de vie de l'éprouvette).
- la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)) décroît proportionnellement à la charge appliquée et à la rugosité arithmétique et elle est inversement proportionnelle à la dureté jusqu'à un 247.
- L'acier trempé à 850°C et revenu à 200°C présente une limite d'endurance plus élevée que l'acier trempé et revenu à 570°C et également que l'acier brut.
- L'état de surface, la rugosité et l'environnement sont des paramètres qui peuvent influencer significativement la limite d'endurance d'un matériau.
- L'analyse de la variance ANOVA ont montré que le type la charge (contribution : 39,57%) est le principal facteur qui montre la plus grande influence sur l'évolution de la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)) suivie de l'interaction de la charge et la rugosité arithmétique (Ra.Q) avec contribution 24,58%.

Par contre, il est constaté que les effets de les autres paramètres sont très faibles (Leur contribution est H : 3.08 %, Ra : 2.70%, ...).

- Le coefficient de détermination R^2 de la durée de vie déterminé par ANOVA est satisfaisant démontrant l'adéquation du modèle proposé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [01] Jean-Paul Baïlon, Jean-Marie Dorlot, Des matériaux, Presses inter Polytechnique, 3^{ème} édition, 2000.
- [02] J.BARALIS, G. MAEDER, Précis métallurgie, Nathan, Paris, 1997.
- [03] DJOUDI Chahrazad .HAMADOU Abdelmouhaimen amdjed. Mémoire MASTER. Génie mécanique, Université kasdi-merbah Ouargla 2020/2021.
- [04] S.BENSAADA, Elaboration des métaux ferreux (fontes et aciers), 2010.
- [05] TLILI Adnane, Matériaux métalliques, ISET-Nabeul, 2014/2015.
- [06] J.BARRALIS, G.MAEDER, précis de métallurgie, structure, propriétés, normalisation.
- [07] HIDOURI, cour de matériau, 2016/2017.
- [08] Lycée Jean Zay, Traitements thermiques des aciers, s2i.pinault-bigéard.com, 19/01/2021.
- [09] S.BENSAADA, COURS DE CORROSION, November 2019
- [10] C.EGOUIN, Manganese steel that don't require heat treatment, Climax Molybdenum Company of Michigan, 1976.
- [11] YOUNES R. COURS. Traitement Thermique 2020/2021
- [12] www.comiteperform.ca, 09/01/2021.
- [13] LOKHMIDE, Métallographie et traitement thermique des métaux, Edition mir, Moscow, 1986.
- [14] <http://copperalliance.fr>, 14/03/2021.
- [15] ARFAOUI Ali, CHAKER Med Amir, Matériaux Métalliques, 2009/2010.
- [16] www.researchgate.net, 14/03/2021.
- [17] A. Compa. Technologie professionnelle, paris 1984
- [18] Introduction à la résistance des matériaux Cours RDM / A.U : 2012-2013.
- [19] Charpy, G. (1904)- Sur l'essai des métaux par flexion de barreaux entaillés. Mémoires et comptes rendu de la société des ingénieurs civils de France, 468- 482.
- [20]. BAAJ, Hassan. Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traites aux liants hydrocarbonés. s.l. : l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2002. :02 sial 0034
- [21]. a. brand, j.f. flavenot, r. Grégoire et c. Tournier ‘ ‘ données technologiques sur la fatigue’ ’, edition cetim, 1992
- [22] C. BATHIAS et J. P. BALLON "Fatigue des matériaux et des structures", Edition Collection Université de Compiègne, 1er trimestre 1980.
- [23]. Sun, lingtao. Étude numérique de l'amorçage et de la propagation. s.l. : institut des sciences et technologies, 04 mai 2012.

- [24]. DAO, Ngoc Ha. Modélisation de la fatigue des systèmes de forage de puits à trajectoire complexe. Paris : l'École nationale supérieure des mines de Paris, 13 février 2014.
- [25] R. Manaa. Fatigue des matériaux. Cours de Génie des matériaux. UNIVERSITE BATNA 22019/2020.
- [26] A. BRAND, Calcul des pièces à la fatigue, CETIM (1980).
- [27] Didier DUPRAT (2004) Fatigue et mécanique de la rupture des pièces en alliage léger
- [28] François PLESSIER 2008 Approche mécanique multi-échelle des interactions hydrogène plasticité" LMP Université Bordeaux I.
- [29] Mécanique du solide et des matériaux Elasticité-Plasticité-Rupture Jean Claude Charmettes
- [30].j. l. enger and. Mécanique de la rupture. Technique de l'ingénieur, b 5 060, 1990, 12 pages
- [32] R. BUTIN & M. PINOT, Fabrications mécaniques, 1981, Technologie, tome 1, 223 p.
- [32] CETIM / CERMO, Catalogue tribologique de matériaux pour glissière, 1985, Première édition.
- [33] M. R. SARI, A. HAIAHEM & L. FLAMAND, Effect of lubricant contamination on friction and wear in an EHL sliding contact, 2010, MECHANIKA, Vol. 82, pp. 43-49.
- [34] A. MELHADI, Influence des paramètres mécaniques lors de l'endommagement par les phénomènes tribologiques des couples des matériaux XC48/XC55 et A60/XC55, 2006, mémoire de magister, université de Msila.
- [35] A.COMPA, "Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens", Tome 2
- [36] G. BARATTO, J-J. GUERIN, J. MONGIS, C. TOURNIER et A. VIEU, Analyse morphologique des défaillances d'organe de machines, CETIM (1996).
- [37] Jacques GOUPY, Plans d'expériences, Technique de l'ingénieur (PE 230).
- [38] A. Djalab, M. Rafik Sari, A. Haiahem, L. Flamand, Mathematical modeling and statistical analysis of wear and surface roughness in contaminated dry rolling contacts, Journal of the Balkan Tribological Association, 22 (2016) 4593-4617.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'étudier expérimentalement le comportement en fatigue cyclique de l'acier au carbone de nuance C45 (également appelé XC48). Ce type de sollicitation en fatigue est très répandu dans de nombreux dispositifs et pièces mécaniques soumis à de la flexion rotative ou des vibrations.

Les travaux expérimentaux se sont focalisés sur la réalisation d'essais de fatigue sur des éprouvettes lisses de forme cylindrique. Ces éprouvettes ont été testées sous l'effet des paramètres de opératoires sur la fatigue par flexion rotative de l'acier C45, à savoir : la dureté (H), la rugosité arithmétique (Ra) et la charge appliquée (Q) sur la durée de vie de l'éprouvette (l'évolution de nombre de rotation (N)), est analysé cette résulta statistiquement par utilisation à l'analyse de variance (ANOVA).

Enfin, les résultats obtenus par cette étude justifient les raisons de réduire la durée de vie des mécanismes.

Mots-clés: Fatigue - flexion rotative - ANOVA - Endurance - durée de vie - modèle mathématique.

Abstract

The objective of this dissertation is to experimentally study the cyclic fatigue behavior of carbon steel grade C45 (also called XC48). This type of fatigue stress is very common in many mechanical devices and parts subject to rotary bending or vibration.

The experimental work focused on carrying out fatigue tests on smooth cylindrical specimens. These specimens were tested under the effect of operating parameters on rotational bending fatigue of C45 steel, namely: hardness (H), arithmetic roughness (Ra) and applied load (Q) over time. life of the test piece (the evolution of the rotation number (N)), this result is analyzed statistically using analysis of variance (ANOVA).

Finally, the results obtained by this study justify the reasons for reducing the lifespan of the mechanisms.

Keywords: Fatigue - rotary flexion - ANOVA - Endurance - lifespan - mathematical model.

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو الدراسة التجريبية لسلوك الكلال الدوري للفولاذ الكربوني درجة C45 (ويسمى أيضاً XC48). هذا النوع من إجهاد الكلال شائع جداً في العديد من الأجهزة الميكانيكية والأجزاء المعرضة للانحناء أو الاهتزاز الدوراني.

ركز العمل التجريبي على إجراء اختبارات الكلال على العينات الأسطوانية الملساء. تم اختبار هذه العينات تحت تأثير عوامل التشغيل على كلال الانحناء الدوراني للفولاذ C45 وهي: الصلابة (H)، والخشونة الحسابية (Ra)، والحمل المطبق (Q) مع مرور الوقت لقطعة الاختبار (تطور الدوران). رقم ((N))، وتم تحليل هذه النتيجة إحصائياً باستخدام تحليل التباين (ANOVA).

وأخيراً، فإن النتائج التي حصلت عليها هذه الدراسة تبرر أسباب تقليل عمر الآليات.

الكلمات المفتاحية: التعب - الانحناء الدوراني - تحليل التباين - إجهاد حد التحمل - العمر الافتراضي - نموذج رياضي.