



Département de Génie Mécanique
Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

En Génie Mécanique
Option : Construction Mécanique

Thème :

**SIMULATION DE LA FATIGUE DES
MATÉRIAUX PAR LA MÉTHODE DES
ÉLÉMENT FINIS**

Soutenu devant le jury composé de :

Debih .A

Président

Benkharbeche . H

Encadreur

Latrache .M

Examineur

Bedda .A

Examineur

Présenté :

GEURGIT Elbachir

LAMINE Abd Errahmane

Année Universitaire : 2017 / 2018

N° d'ordre : GM/...../2016

Remerciements

A la fin de l'élaboration de ce travail et avant tout nous remercions "Dieu" le tout puissant qui nous a guidé et nous a donné la volonté et la patience pour atteindre ce but.

*Nos remerciements vont à notre encadreur Dr. " **Ben kherbeche.H**" d'avoir accepté l'encadrement de ce mémoire et de nous avoir éclairé par ses précieux conseils et ses encouragements continus et aussi de la confiance quelle nous a donné durant les étapes de l'élaboration de ce travail en nous motivant avec ses précieuses remarques,*

*Nous remercions également Mr. "**Latrache MOHAMED**" , pour son aide lors de l'utilisation du logiciel ANSYS . Nous présentons aussi nos remerciements à tous les professeurs de l'université mohamed-boudiaf qui ont contribué à notre formation durant tout le cycle universitaire et notamment ceux qui appartiennent au département de génie mécanique et tout ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.*

En fin Nos remerciements aussi aux membres du jury qui nous ont honoré d'avoir accepté l'examen et la valorisation de ce travail. Dieu accorde la réussite.

À tous nous disons merci !

Introduction Générale :

Le mot fatigue vient d'un mot latin fatigare qui signifie 'tiredness' en Anglais. Ce terme est utilisé fréquemment en science de l'ingénierie pour montrer l'endommagement, la fissuration et la rupture des matériaux sous une sollicitation mécanique cyclique. Cette définition a été adoptée et affichée en 1964 par une Organisation Internationale de standardisation à Genève.

Elle correspond aux matériaux métalliques et non-métalliques. La première étude en fatigue a été réalisée sur des matériaux métalliques en 1829 par W.A. J. Albert qui était un ingénieur des mines allemand. Cependant, ce domaine a commencé à se développer avec l'augmentation de l'usage des structures en fer particulièrement dans la fabrication des ponts et des chemins fer.

Le premier vrai travail de recherche sur métal a commencé en 1842 à cause d'un accident de chemin de fer à coté de Versailles en France. Cet accident a causé 1500 à 1800 morts à l'époque [1].

Devant cette nécessité compétitive, ils se sont orientés vers l'étude du domaine de l'endurance limitée. Ce domaine qui intéressait peu de chercheurs, constitue actuellement un axe important de leurs recherches devant la forte demande industrielle.

La fatigue des métaux est un phénomène souvent méconnu qui est responsable d'environ 75% des bris de pièces en service [2].

Les industriels recherchent un modèle de prédiction de durée de vie de leurs composants, qui est d'utilisation simple, d'une grande applicabilité sur les matériaux métalliques et qui traite presque tous les cas de charges possibles. Dans le domaine de l'endurance limitée, très peu de critères sont proposés[3].

La fatigue est une des principales causes de ruine des structures industrielles.

Elle résulte de contraintes ou déformations répétitives qui ne peuvent normalement pas causer d'endommagement structurel du matériau en une seule application [4].

La simulation numérique fait maintenant partie intégrante du processus de conception et validation de structures mécaniques. Les outils de simulations sont de plus en plus performants permettant une description très fine des phénomènes.

De plus ces outils ne se limitent plus à la mécanique linéaire, mais sont développés pour décrire des comportements plus compliqués allant jusqu'à la ruine des structures, ce qui

intéresse le domaine de la sécurité . en chargement dynamique ou statique. La dynamique rapide permet de simuler des phénomènes "rapides" tels que des explosions, des chocs et impacts sur structure. Le domaine d'application est très varié.

La méthode des éléments finis est actuellement reconnue comme étant une technique très puissante pour l'analyse des structures discrètes ou continues, dans le domaine d'engineering. Elle est utilisée par presque la plupart des logiciels de simulation dans de nombreux secteurs de l'industrie tel que, la mécanique, le génie civil, l'aérospatial et la robotique.

La compréhension de cette méthode donne nécessité à l'élaboration de certaines connaissances scientifiques telles que : la théorie d'élasticité, la mécanique des milieux continus, la résistance des matériaux, la dynamique des structures, de plus les notions de base de mathématique appliquée.

Dans ce travail nous essayons de faire une simulation de la fatigue des matériaux par flexion rotative et les comparer avec des travaux expérimentaux déjà obtenus au département de génie mécanique.

IL comporte quatre chapitres :

- **Premier chapitre** : est une recherche bibliographique, des généralités sur le phénomène de fatigue des matériaux et l'endommagement par fatigue et ainsi la fissuration.
- **deuxième chapitre** : rassemble les rappels de définitions, la courbe de Wöhler et son approximation mathématique.
- **Troisième chapitre** : comporte des concepts généraux sur les éléments finis, ainsi la simulation numérique, ainsi que la relation entre la simulation et les éléments finis
- **Quatrième chapitre** : traite du travail expérimental et de la simulation en utilisant un logiciel « ANSYS 18.1 » qui permet de faire la simulation et en comparant les résultats du programme avec les résultats expérimentaux au sein du laboratoire.
- une conclusion générale finalise le travail.

Table des matières

Notations principales

Introduction générale.....1

Chapitre I**Étude phénomène de la fatigue**

I.1.introduction.....	3
I.2.Fatigue et endurance.....	3
I.2.1. Définition.....	3
I.2.2.Limite d'endurance.....	4
I.2.3.Durée de vie	4
I.3.Contraintes Appliquées.....	4
I.3.1.Contrainte nominale.....	5
I.3.2.Cycle de contrainte en fatigue :	5
I.3.3. Types de cycles de contraintes :	7
I.4.Facteurs influant la fatigue.....	8
I.4.1.Facteurs métallurgiques.....	8
I.4.2. Facteurs liés à l'élaboration du matériau.....	9
I.4.3.Facteurs liés à la mise en forme.....	9
I.4.4.Facteurs liés aux traitements thermiques.....	9
I.4.5.Influence de la charge à la rupture en traction « Rr ».....	9
I.4.6.Facteurs géométriques	10
I.4.7.Influence de la fréquence des sollicitations... ..	10
I.4.8.Influence de la température.....	11
I.4.9. Influence de la corrosion.....	11
I.5.Facteurs liés à la nature des surfaces usinées.....	11
I.5.1.Influence de la rugosité.....	11
I.5.2.Influence de la lubrification durant l'usinage.....	12
I.6.Fatigue et endommagement	12
I.6.1.Définition d'endommagement :	12
I.6.2.Description.....	12

I.6.3. Les étapes de l'endommagement par fatigue.....	13
I.7. Mécanique de la rupture.....	13
I.8. La fissuration.....	14
I.8.1. Modes de fissuration.....	14

Chapitre II

Étude analytique

II.1. étude et analyse du phénomène de la fatigue.....	15
II.2. Courbe de Wöhler ($\sigma - N_f$).....	15
II.3. Étude de la courbe de Wöhler.....	16
II.4. Approximation analytique de la courbe de Wöhler.....	17
II.5. Valeurs approximatives de la limite d'endurance.....	18
II.7. Les différents types d'essais de fatigue :.....	22
II.7.1. Essai de Wöhler.....	22
II.7.2. Essai de torsion.....	22
II.7.3. Essai de Moore.....	23

CHAPITRE III

Simulation numérique

II.1. Introduction.....	24
III.2. Généralités	
III.3. Applications de la méthode des éléments finis.....	25
III.4. Déroulement d'une étude.....	26
III.4.1. Analyse du problème.....	26
III.4.2. Choix du modèle.....	26
III.4.3. Choix du type d'éléments.....	26
III.4.4. Choix du maillage.....	26
III.5. Discrétisation géométrique.....	27
III.6. Notion d'optimalité du maillage.....	27

III.7.Utilisation d'un logiciel éléments finis.....	28
III.8.Organigramme d'un logiciel éléments finis.....	29,30

CHAPITRE IV

Partie pratique

IV.1. Introduction	31
IV.2. les étapes de simulation.....	32
IV. 2.1.dimensionnement de l'éprouvette....	32
IV.2.2.Les conditions aux limites.....	32
IV.3.Déroulement de la simulation.....	33
IV.3.1.Simulation de la première éprouvette en Acier XC38.....	33
La géométrie.....	33
maillage de l'éprouvette.....	34
configuration.....	36
solution.....	36
IV.3.2.simulation l'éprouvette Acier XC38(C35)	39
Interprétation des graphes	43
IV.3. 3.simulation de l'éprouvette Acier A60	44
Interprétation des graphes	47
Conclusion générale.....	48
Bibliographie.....	49-50-51

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Limite d'endurance ou limite de fatigue.....	4
Figure I.2. cycle de contrainte en fatigue.....	6
Figure I.3. Forme de cycle de contrainte.....	6
Figure I.4. Différents types de sollicitations.....	7

Figure I.5. Représentation schématique d'une courbe de Wöhler.....	8
Figure I.6. Relation entre la limite d'endurance σ_D et la charge à la rupture R_r en flexion rotative.....	10
Figure I.5. Les différents modes de sollicitation.....	14

Chapitre II

Figure II.1. courbe de Wöhler.....	16
Figure II.2. Partitionnement de la courbe de Wöhler.....	17
Figure II.3. Forme générale des courbes de fatigue des métaux ferreux et non ferreux.....	17
Figure II.4. Courbe de Wöhler approximée.....	18
Figure II.5. Courbe de Wöhler de l'acier S235JR.....	20
Figure II.6. la machine d'essai de fatigue en flexion rotative.....	21
Figure II.7. Éprouvette d'essai de fatigue.....	22
Figure I.8. Principe de l'essai de Wöhler.....	22
Figure II.9. Principe de l'essai de torsion alternée.....	22
Figure II.10. Schéma de principe de la machine d'essai de Moore.....	23

Chapitre III

Figure III.1. Maillage du problème.....	27
Fig. III.2 - Erreur de discrétisation géométrique.....	27
Figure III.5. Organigramme d'un logiciel éléments finis.....	29

Chapitre IV

Figure IV.1. La fenêtre de code « ANSYS .V18.1-workbench ».....	31
Figure IV.2. Éprouvette d'essai de fatigue la machine GUNT WP 140.....	32

Figure IV.4. géométrie de l'éprouvette étudié par le code « ANSYS »	34
Figure IV.5. Maillage de l'éprouvette.....	35
Figure IV.6. Système de coordonnées « OX , OY ,OZ ».....	36
Figure IV.7. vitesse de rotation autour de l'axe « OZ ».....	37
Figure IV.8. la charge appliquée F suivant l'axe «OY».....	38
Figure IV.9. Fenêtre de validation les force.....	38.
Figure IV.10. Déplacement selon les axes.....	38
Figure IV.11. contrainte principale maximale	39
Figure IV.12. contrainte principale maximale	41
Figure IV.13. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier XC35(R=2mm).....	41
Figure IV.14. contrainte principale maximale (F=200N).....	42
Figure IV.15. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier XC35(R=0,5mm).....	43
Figure IV.16. contrainte principale maximale (F=200N).....	44
Figure IV.17. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier A60(R=2mm).....	45
Figure IV.19. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier A60 (R=0,5mm).....	46

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Influence de certaines méthodes sidérurgiques sur l'endurance de l'acier16CD17.....	9
Tableau II.1 : Valeurs de σ'_D et R_m de quelques matériaux connus.....	19
Tableau IV.1 : les types d'éprouvettes utilisées par « ANSYS ».....	33
Tableau IV.2 : les résultats obtenus lors de simulation.....	40
Tableau IV.3 : les résultats obtenus lors de simulation.....	42

Tableau IV.4 : les résultats obtenus par la simulation.....44

Tableau IV.5 : les résultats obtenus lors de simulation.....45

CHAPITRE

I

I.1.Introduction

Une structure est conçue dans le but d'accomplir une ou plusieurs fonctions, on distingue deux types :

les unes qui sont soumises à des chargements mécaniques statiques et les autres qui sont soumises à des chargements dynamiques. Pratiquement les structures de la première catégorie durent plus longtemps ce qui justifie le dimensionnement en fonction de la résistance ou la rigidité lors la phase de conception.

Un chargement dynamique de causes variables peut se traduire par des variations cycliques de contraintes. Malheureusement la ruine d'un nombre important de structures a été souvent observée et l'est encore aujourd'hui, elle peut, même parfois, être catastrophique en termes de pertes humaines. Il est à constater que les sollicitations dynamiques qui sont à l'origine de ces ruines sont beaucoup inférieures à la limite d'élasticité du matériau constituant la structure, c'est le phénomène de fatigue.

Ce phénomène est caractérisé par l'apparition d'un défaut au niveau de la surface ou à l'intérieur de la pièce (la conception est l'une des causes favorisant l'endommagement).

Il est imprédictible en effet il se développe lentement (voire des années) dans le temps sans donner un signe, autrement dit on ne constate aucune modification macroscopique au niveau de la structure. [5]

I.2.Fatigue et endurance

I.2.1. Définition

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 étapes principales de la fatigue sont :

- Amorçage de fissures,
- Propagation des fissures,

Elle suit d'abord approximativement le plan de scission maximale. La vitesse de propagation est alors très faible. Les défauts ne sont décelables qu'au laboratoire, Puis elle suit le plan perpendiculaire à la contrainte de tension maximale. La vitesse de propagation s'accélère. Pendant cette période, les contrôles décèlent la fissure.

- La rupture finale[6].

I.2.2.Limite d'endurance

La limite d'endurance correspond à la valeur limite vers laquelle tend l'amplitude de contrainte lorsque le nombre de cycles devient très grand. Dans le cas des aciers, cette limite d'endurance peut être réellement approchée avec 10^7 cycles [6].

Cette valeur peut être déterminée à l'aide de méthodes statistiques. Dans le cas des aciers, la censure est généralement de 10^7 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 10^7 cycles pour un rail de chemin de fer, $2 \cdot 10^6$ cycles Pour une pièce soudée d'après plusieurs auteurs et particulièrement de la référence [7].

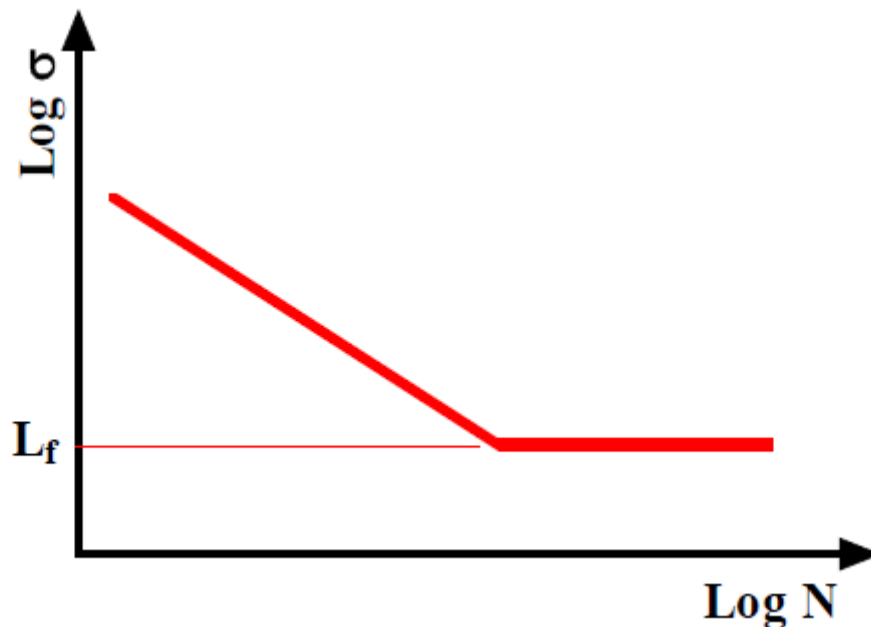


Figure I.1.Limite d'endurance ou limite de fatigue. [8]

I.2.3.Durée de vie :

C'est le nombre de cycles au bout duquel l'éprouvette rompt.

I.3.Contraintes Appliquées

Généralement au cours de l'essai de fatigue, la contrainte appliquée, approximativement sinusoïdale, varie en fonction du temps, en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines ou pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats.

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). Elle est exprimée en N/mm² ou en MPa [6].

I.3.1. 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 [7].

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

I.3.2. Cycle de contrainte en fatigue :

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 le cadre de ce travail, nous étudions les sollicitations de types sinusoïdales de Flexion rotative dont le cycle est

On en déduit :

La contrainte moyenne

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

L'amplitude de contrainte

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

L'étendue de variation de contrainte

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a$$

Rapport de charge R

C'est le rapport de la contrainte minimale sur la contrainte maximale. $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

Dans figure I.2, nous présentons les termes et symboles utilisés pour décrire le cycle de contrainte.

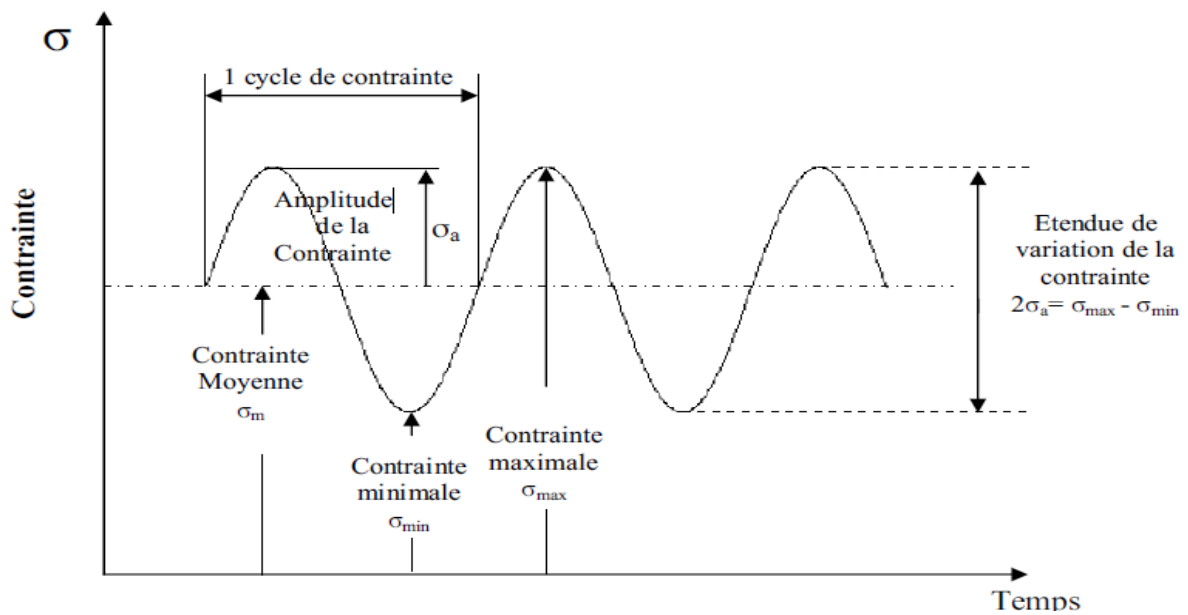


Figure I.2. cycle de contrainte en fatigue [6].

Les formes possibles de cycle de contraintes sont présentées dans la figure I.3

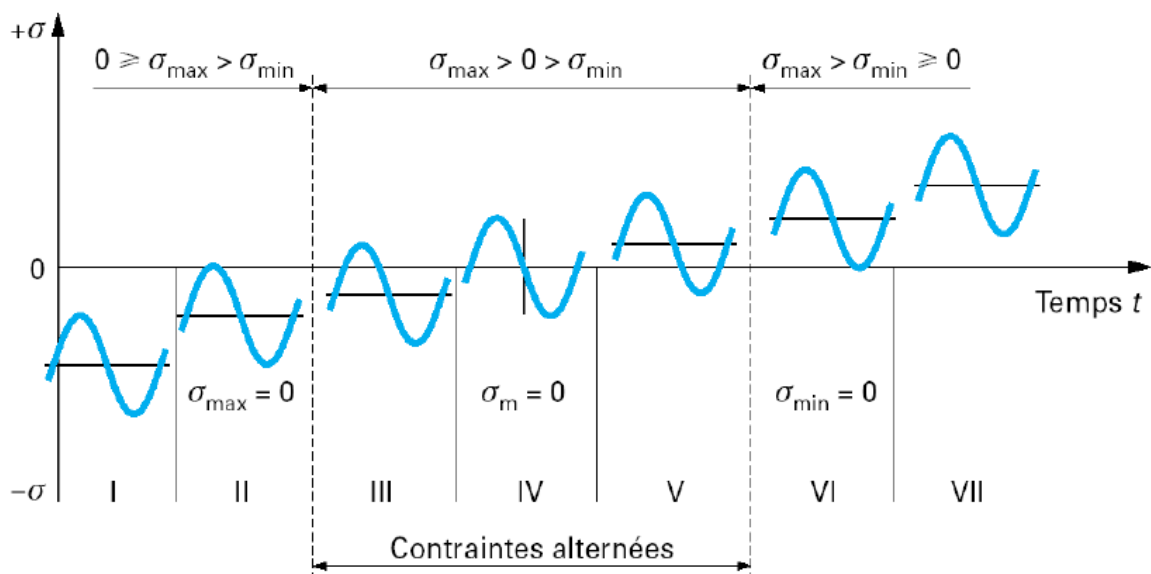


Figure I.3. Forme de cycle de contrainte [6].

I. Contrainte ondulée de compression : $1 < R_{\sigma} < +\infty$;

II. Contrainte répétée de compression : $R_{\sigma} \rightarrow \infty$;

III. Contrainte alternée dissymétrique : $\infty > R_{\sigma} < -1$;

IV. Contrainte purement alternée : $R_{\sigma} = -1$;

V. Contrainte alternée dissymétrique : $-1 < R_{\sigma} < 0$;

VI. Contrainte répétée de traction : $R_{\sigma} = 0$;

VII. Contrainte ondulée de traction : $0 < R_{\sigma} < 1$.

I.3.3. Types de cycles de contraintes :

On trouve :

- contrainte purement alternée : contrainte qui varie entre des valeurs égales, dans le sens positif et négatif [7] ;
- 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 ($\sigma_a = \sigma_m$) ;
- contrainte ondulée : contrainte qui varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe ($\sigma_m > \sigma_a$).

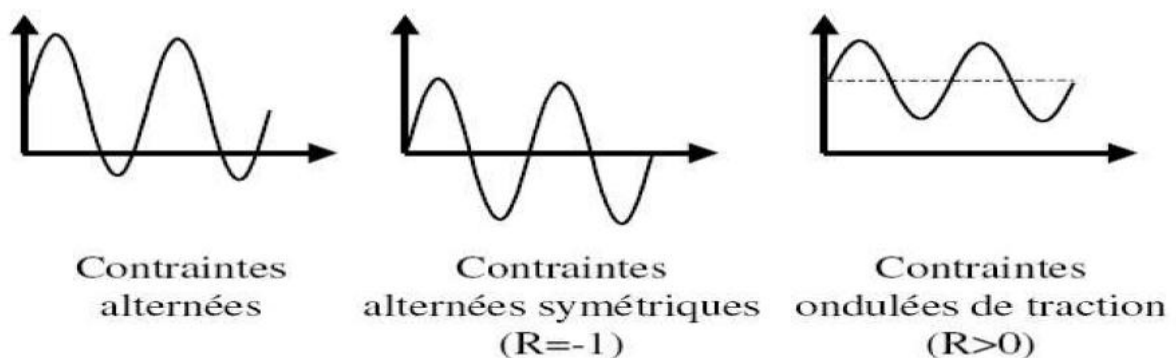


Figure I.4. Différents types de sollicitations [21].

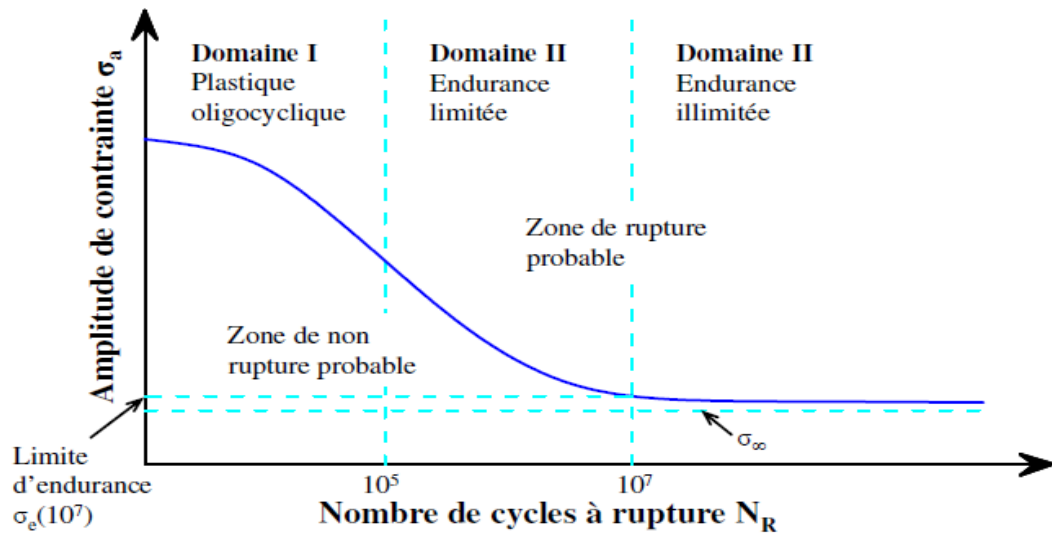


Figure I.5. Représentation schématique d'une courbe de Wöhler [19].

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, l'étude de cette courbe ce fera dans le prochaine chapitre.

I.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 [9].

I.4.1. Facteurs métallurgiques

La réalisation d'une pièce passe toujours par des opérations mécaniques et thermiques, qui agissent sur l'état métallurgique du matériau utilisé donc sur ses caractéristiques mécaniques d'utilisation. On peut ranger dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure métallographique), à son élaboration et à sa mise en forme (inclusions, défauts, fibrage), ainsi qu'aux traitements thermiques (structure métallographique et caractéristiques mécaniques subis par le matériau de la pièce). Afin d'évaluer l'influence des différentes opérations mécaniques et thermiques, qui conduisent à l'obtention des caractéristiques mécaniques finales de la pièce sur la tenue en fatigue, on peut raisonner à partir de la microstructure de la pièce finale. Les défauts éventuels qui peuvent apparaître lors de ces opérations sont susceptibles de se retrouver au stade final,

et de jouer sur la tenue en fatigue.

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

Le type d'élaboration utilisé pour la fabrication du matériau influe sur sa tenue en fatigue, Les méthodes sidérurgiques les plus fines permettent l'obtention des faibles taux d'inclusion, telles que les refusions sous vide ou sous laitier conduisent à des hautes caractéristiques de fatigue (**Tab. I.1**).

Tableau I.1. Influence de certaines méthodes sidérurgiques sur l'endurance de l'acier 16CD17 [10].

Acier 16CD17	Rm (N/mm²)	Endurance (N/mm²)
Avant refusions	1450	482
Refondu sous laitier	1450	549
Refondu sous vide	1450	629

I.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[10].

I.4.4. Facteurs liés aux traitements thermiques

Les traitements thermiques permettent la réalisation de la structure finale demandée.

Pour les basses valeurs de résistance à la fatigue, exemple dans le cas de l'acier on pourra utiliser des aciers à l'état recuit.

Alors que pour des grandes valeurs un traitement de durcissement devient nécessaire [10].

I.4.5. Influence de la charge à la rupture en traction « Rr »

Il est connu que la limite d'endurance d'un acier peut être appréciée à partir des caractéristiques mécaniques simples telles que la charge à la rupture Rr. Un nombre important que présentent les diagrammes reliant la limite d'endurance à la charge à la rupture

que présentent les diagrammes reliant la limite d'endurance à la charge à la rupture.

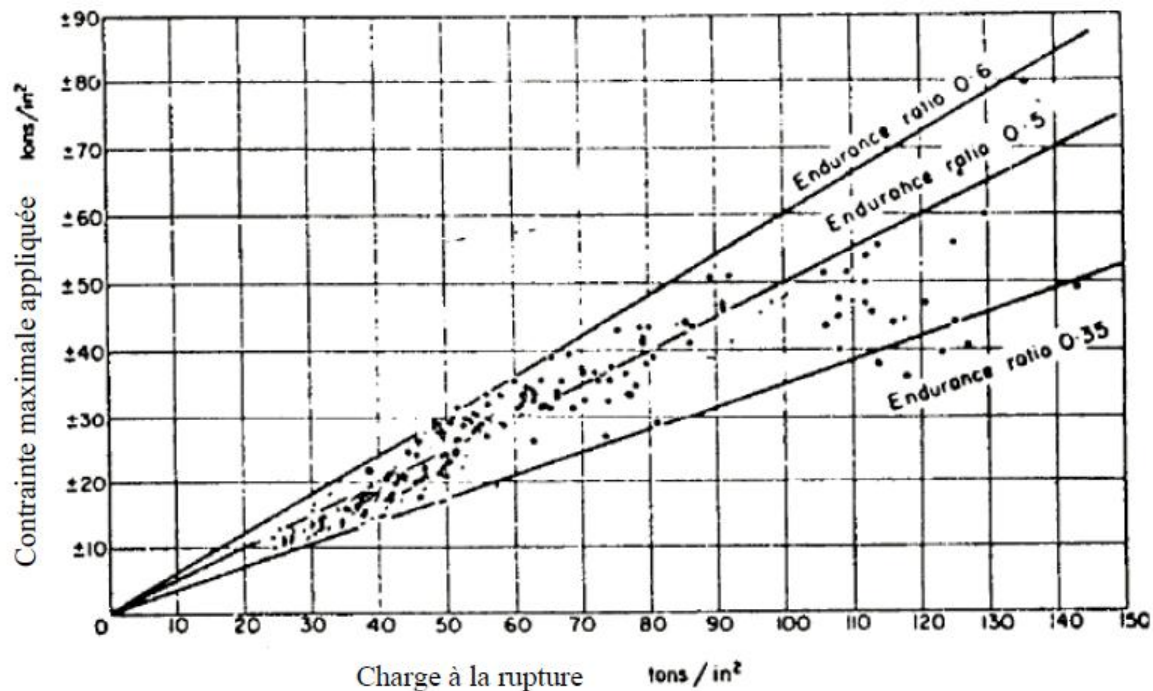


Figure I.6. Relation entre la limite d'endurance σ_D et la charge à la rupture R_f en flexion rotative [10].

Lors de la mise en forme à froid (étirage, emboutissage, etc.), l'acier subit un écrouissage ce qui conduit généralement à une augmentation de la charge de rupture et des caractéristiques de fatigue. Les travaux cités dans [10] montrent qu'avec une barre d'acier XC45 recuit puis étirée donne une limite de fatigue supérieure à celle d'une barre en acier recuit seulement. La comparaison des rapports d'endurance (0.50 à l'état recuit et 0.48 à l'état étiré) permet à l'auteur de déduire que l'augmentation de la tenue en fatigue est surtout liée à l'augmentation de la charge de rupture de l'acier.

I.4.6. 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_{D_0} mesurée sur éprouvette de faible diamètre ($5 < d < 10$ mm) [10].

I.4.7. 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 [9]. 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 [10].

I.4.8. Influence de la température

La limite d'élasticité et la résistance à la traction diminuant lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance qui leur est proportionnelle.

L'augmentation des possibilités d'écoulement avec l'élévation de température cependant diminue la sensibilité à l'effet d'entaille. C'est pourquoi pour étudier l'effet de l'élévation de la température sur la limite d'endurance à partir des courbes de variation de la résistance à la traction ou de dureté, il faut tenir compte des vitesses de déformation [9]. A plus haute température, il peut y avoir fluage, ce qui entraîne une baisse rapide de la limite apparente d'endurance [09,10].

I.4.9 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 [10].

I.5. Facteurs liés à la nature des surfaces usinées

I.5.1.1 Influence de la rugosité

La rugosité est qualifiée par son grand effet sur les propriétés fonctionnelles, telles que la résistance à la fatigue, la fatigue de contact, frottement et usure. Les résultats trouvés par plusieurs chercheurs [11] dans le cas du tournage montrent que l'augmentation notable de la fatigue en flexion alternée peut être obtenue par l'usinage de la pièce préchauffée à une température de 300° C. Cette amélioration de la limite en fatigue en flexion est attribuée à la

diminution de la rugosité.

Les essais conduits par l'auteur de la référence [9] ont montré qu'à partir d'une certaine valeur de rugosité on pourrait obtenir des réductions anormalement élevées de la limite d'endurance. Il convient d'éliminer les rugosités de grande importance dans les pièces sollicitées. Il est toutefois admissible que les rugosités obtenues par rectification sont plus faibles que celles obtenues par tournage (1,3 à 1,8 μm) [11].

I.5.2. Influence de la lubrification durant l'usinage

La lubrification de l'arête de coupe permet d'améliorer l'état de surface, surtout à faible vitesse, en évitant la formation d'une arête rapportée. D'autre part, le mode d'usinage influe notamment sur la température superficielle de la pièce, ce qui affecte l'état de surface. Dans le cas du travail à sec les températures à la surface usinée sont très élevées, et de ce fait peuvent provoquer des effets indésirables à la surface (durcissement ou adoucissement structural) selon la température atteinte.

I.6. Fatigue et endommagement :

I.6.1. Définition d'endommagement :

L'endommagement est l'apparition de dommages dans un matériau caractérisé par une extension de surface libre à l'intérieur du matériau, accompagnée d'une augmentation de fraction volumique de vide. Cette apparition est causée par une attaque physique ou chimique. Il conduit à une dégradation de ses capacités physiques pouvant conduire à la rupture. Un niveau d'endommagement peut être relié directement à des propriétés physiques parce que l'endommagement est caractérisé par des modifications en principe observables. Les phénomènes d'endommagement tels que les microdéformations, la dégradation des surfaces, les microfissures, les microcavités, la corrosion, et le vieillissement. Sont tous observables, mais parfois ils sont difficiles à mettre en évidence [12].

I.6.2. Description

En général, lorsque l'on déforme un matériau depuis un état initial jusqu'à un état pré déformé, sa capacité de déformation ou ductilité résiduelle jusqu'à rupture décroît. En cours de déformation, le matériau subit donc un endommagement progressif, qui aboutit à sa rupture.

On peut considérer l'endommagement comme l'ensemble des phénomènes liés aux cavités qui se forment dans le matériau en cours de déformation. Ceci le différencie de l'écrasement

par exemple, vu au chapitre précédent, qui est principalement dû dans les métaux à l'arrangement et à la multiplication des dislocations.

Une analyse détaillée de la physique et de la mécanique de l'endommagement a été réalisée dans [13].

I.6.3. Les étapes de l'endommagement par fatigue

Il existe différents stades de l'endommagement par fatigue dans une pièce mécanique où les défauts peuvent se développer dans une partie initialement saine (non endommagée) puis se propager de façon stable jusqu'à la rupture catastrophique. Le développement de cet endommagement peut schématiquement se décrire de la façon suivante :

- 1) Des modifications microstructurales engendrent l'apparition d'un dommage irréversible ;
- 2) L'apparition de microfissures ;
- 3) La croissance et la coalescence de défauts microscopiques forment des fissures principales qui peuvent éventuellement mener à la rupture catastrophique ;
- 4) La propagation stable d'une fissure principale ;
- 5) La rupture finale.

Ainsi l'examen d'une surface rompue fait ressortir généralement trois zones :

- Un site d'amorçage ;
- Une zone de propagation stable ;
- Une surface de rupture finale.

Les sites préférentiels pour l'amorçage sont le plus souvent situés en surface, dans des zones de fortes contraintes comme les entailles, les rayures, les pics de corrosion, sur une inclusion etc. [14].

I.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 [15].

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 [16].

I.8.La fissuration

La fissuration est le résultat de l'endommagement local des plans cristallographiques provoqué, généralement, par une sollicitation mécanique répétée. Malgré le fait que la contrainte maximale ne dépasse pas la contrainte d'écoulement du matériau, des déformations plastiques permanentes. Ces dernières se traduisent par une cession des plans cristallographiques menant à une décohésion du grain. Suite à cette décohésion, des vallées sont produites d'où peuvent s'amorcer les fissures [17],[18].

I.9.Modes de fissuration

D'après la proposition classique d'Irwin, on distingue trois modes de rupture par rapport au chargement et au mouvement des lèvres de fissure (Fig. I.5) :

En mode I, le déplacement relatif des deux lèvres de la fissure est perpendiculaire à la surface de rupture ; en mode II, le déplacement relatif est dans le plan de fissure, et perpendiculaire à la ligne du front de fissure en mode III, le déplacement relatif est dans le plan de fissure, et parallèle à la ligne du front de fissure [15].

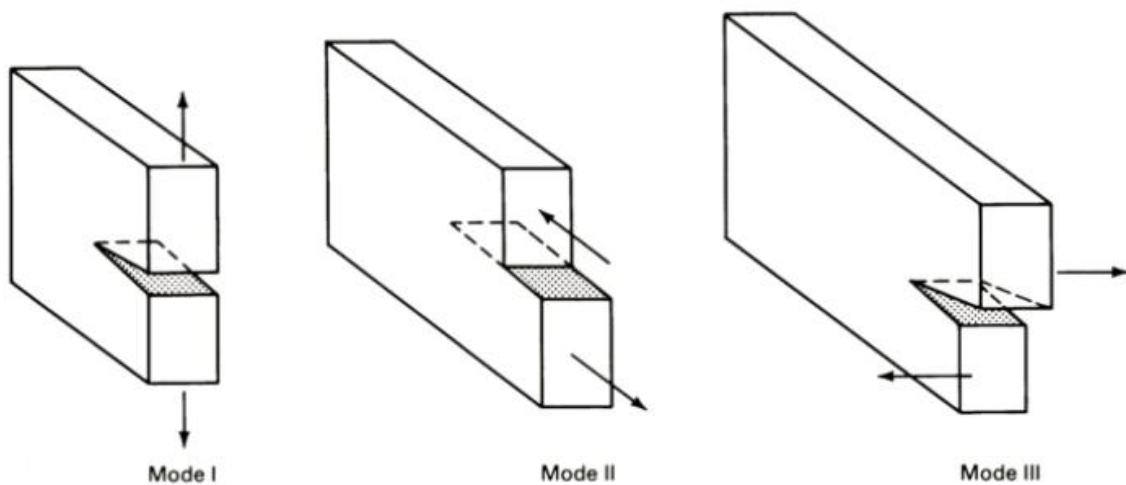


Figure I.5. Les différents modes de sollicitation [20].

- (I) mode d'ouverture ;
- (II) mode de cisaillement plan ;
- (III) mode de cisaillement anti plan [15].

II.1. étude et analyse du phénomène de la fatigue

L'ensemble des résultats des essais de fatigue est représentée par une courbe σ -N (Contrainte-Nombre de cycles) appelée **courbe de Wöhler**.

Les valeurs de contraintes et du nombre de cycles sont représentées en échelle semi-logarithmique cette courbe de Wöhler nous permet de connaître les caractéristiques des matériaux utilisés dans l'industrie, la résistance en fatigue ou la limite d'endurance.

La courbe σ -N est couramment divisé en 3 parties dans la littérature, cependant des travaux récents concernant la fatigue à grand et très grand nombre de cycles[22].

II.2.Courbe de Wöhler ($\sigma - N_r$)

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule permettant de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans le domaine de fatigue. Elle définit une relation entre la contrainte appliquée σ_a et le nombre de cycles à rupture N_r .

Pour la tracer, on réalise généralement des essais simples, qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude de chargement constante fluctuant autour d'une valeur moyenne fixée, et de noter le nombre de cycles à rupture N_r .

Pour plus de commodité, ce nombre N_r est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique, et l'amplitude de contrainte σ_a est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire. Ainsi, à chaque éprouvette testée, correspond un point du plan (N_r, σ_a) . A partir d'un certain nombre d'essais, nous établissons la courbe de Wöhler [6]. (Fig. II.1)

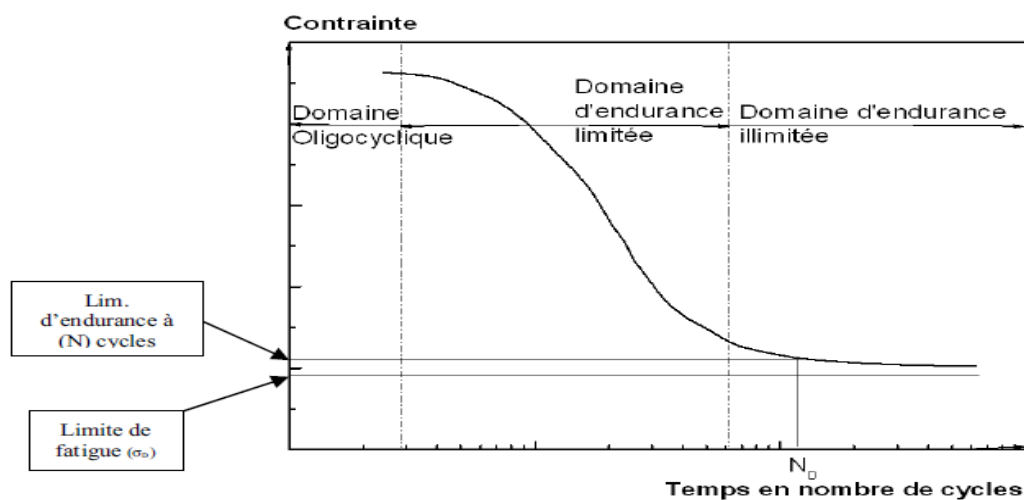


Figure II.1.courbe de Wöhler (σ -N)[6].

II.3. Étude de la courbe de Wöhler

La dispersion des résultats peut provenir de plusieurs sources, on en peut citer :

- La géométrie de l'éprouvette
- L'état de surface
- Les dimensions
- L'homogénéité du matériau des éprouvettes

La courbe de Wöhler divisée en 3 zones : (Fig. II.2)[34].

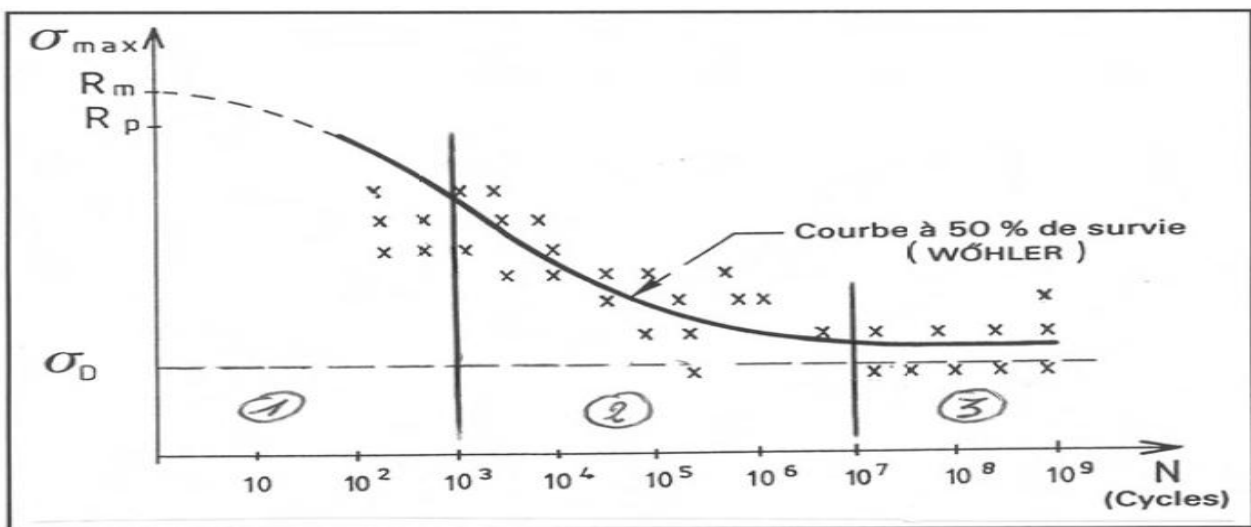


Figure II.2. Partitionnement de la courbe de Wöhler [34].

Ce phénomène de la décroissance de la résistance du matériau aux efforts variables dans la temps s'appelle : fatigue

- 1) Domaine de la fatigue oligocyclique :** où les ruptures surviennent après un Petit nombre de cycle ($N \leq 10^3 \dots 10^5$ cycles) ;
- 2) Domaine de l'endurance limitée :** où les ruptures surviennent après un nombre de cycles croissant avec la décroissance de la contrainte ($10^3 \dots 10^5 \leq N \leq 10^7 \dots 10^8 \dots$) ;
- 3) Domaine de l'endurance illimité:** où les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce ($N \geq 10^7 \dots 10^8 \dots$).

II.4.Approximation analytique de la courbe de Wöhler

Les résultats des essais de fatigue illustrés par la courbe de Wöhler ont un aspect statistique, pour permettre une exploitation de la courbe dans l'engineering on procède à une approximation linéaire de la courbe [5].

Par comparaison les courbes de Wöhler des alliages ferreux et non ferreux possèdent les limites pouvant être représentées par la figure suivante (Fig. II.3) :

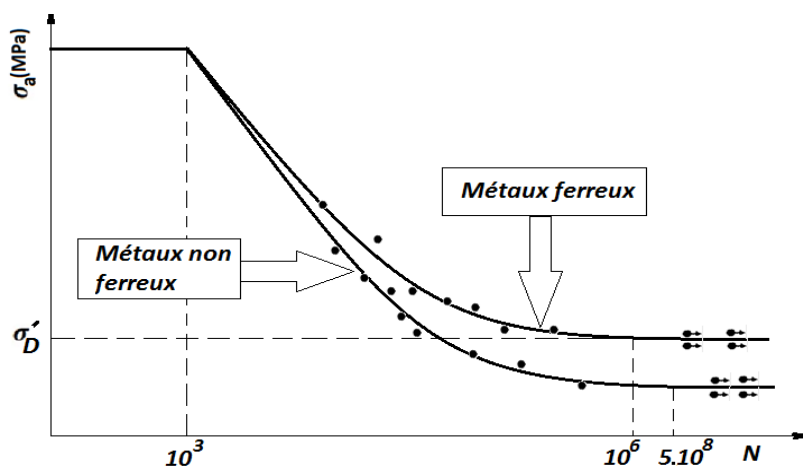


Figure II.3.Forme générale des courbes de fatigue des métaux ferreux et non ferreux [5]

En approximant linéairement la partie de la courbe ($10^3 < N < 10^6$) et en utilisant l'échelle logarithmique on aura : (Fig. II.4)

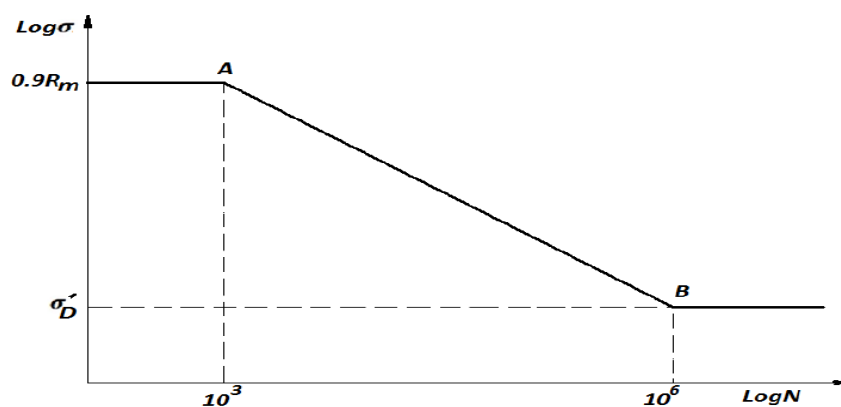


Figure II.4. Courbe de Wöhler approximée [5].

Les coordonnées des points A et B sont respectivement: $(10^3, R_m)$ et $(10^6, \sigma'_D)$ et la droite (AB) aura pour équation :

$$\text{Log} \sigma = \text{Log} a \cdot \text{Log} N + \text{Log} b$$

Où Log représente le logarithme décimal et a et b sont positifs non nuls. peut s'écrire :

$$\text{Log} \sigma = \text{Log} a^{\text{Log} N} + \text{Log} b = \text{Log}(b \cdot a^{\text{Log} N})$$

Les équations reliant alors la contrainte symétrique a et le nombre de cycles a la rupture N sont : [23]

$$\sigma = \frac{\sigma_R}{\left[\frac{N}{1000} \right]^{\frac{1}{3} \lg \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{-1}} \right)}}$$

On obtient :

$$N = 1000 \left[\frac{\sigma_R}{\sigma_a} \right]^{\frac{3}{\lg \frac{\sigma_R}{\sigma_{-1}}}}$$

Où :

σ_R : Résistance à la rupture ;

σ_a : Contrainte normale alternée symétrique ;

σ_{-1} : Limite de fatigue en flexion alternée ;

II.5. Valeurs approximatives de la limite d'endurance

Précédemment on a effectué une approximation linéaire à la courbe expérimentale de fatigue, parmi les caractéristiques importantes déduites de la courbe il y a la limite d'endurance expérimentale σ'_D . Vu le coût des essais de fatigue, la diversité et l'aspect statistique des valeurs de cette caractéristique, on a intérêt à trouver des approximations à ses valeurs en fonction de l'une des caractéristiques mécaniques conventionnelles, soit la résistance mécanique R_m . Dans cette partie on continue avec l'approximation mais cette fois-ci avec la limite d'endurance. [5]

II.5.1. Valeurs de σ'_D et R_m de quelques matériaux connus

Ces valeurs sont données selon les normes américaines.

Tableau II.1. Valeurs de σ'_D et R_m de quelques matériaux connus.[5]

Matériau	Résistance mécanique (Mpa)	Limite d'endurance σ'_D
Alliages ferreux		
ASTM 1010, normalisé	364	186
ASTM 1025, normalisé	441	182
ASTM 1035, normalisé	539	238
ASTM 1045, normalisé	630	273
ASTM 1060, normalisé	735	315
ASTM 1060, trempé (huile) et	1295	574
ASTM 3325, trempé (huile) et	854	469
ASTM 4340, trempé (huile) et	952	512
ASTM 8640, trempé (huile) et	875	476
ASTM 9314, trempé (huile) et	812	476

Le matériel exigé pour réaliser un essai de fatigue doit comporter:

- Une machine convenable
- Une série d'éprouvettes conformes aux normes
- Un compteur de cycles

On distingue plusieurs machines d'essai de fatigue, selon le mode de sollicitation (flexion plane, flexion rotative, torsion, traction compression, etc.), et selon les facteurs d'influence (température, fatigue sous corrosion, etc.).

Exemple la machine d'essai de fatigue en flexion rotative de modèle :

GUNT, de type : **WP 140**. (Figure II.6)

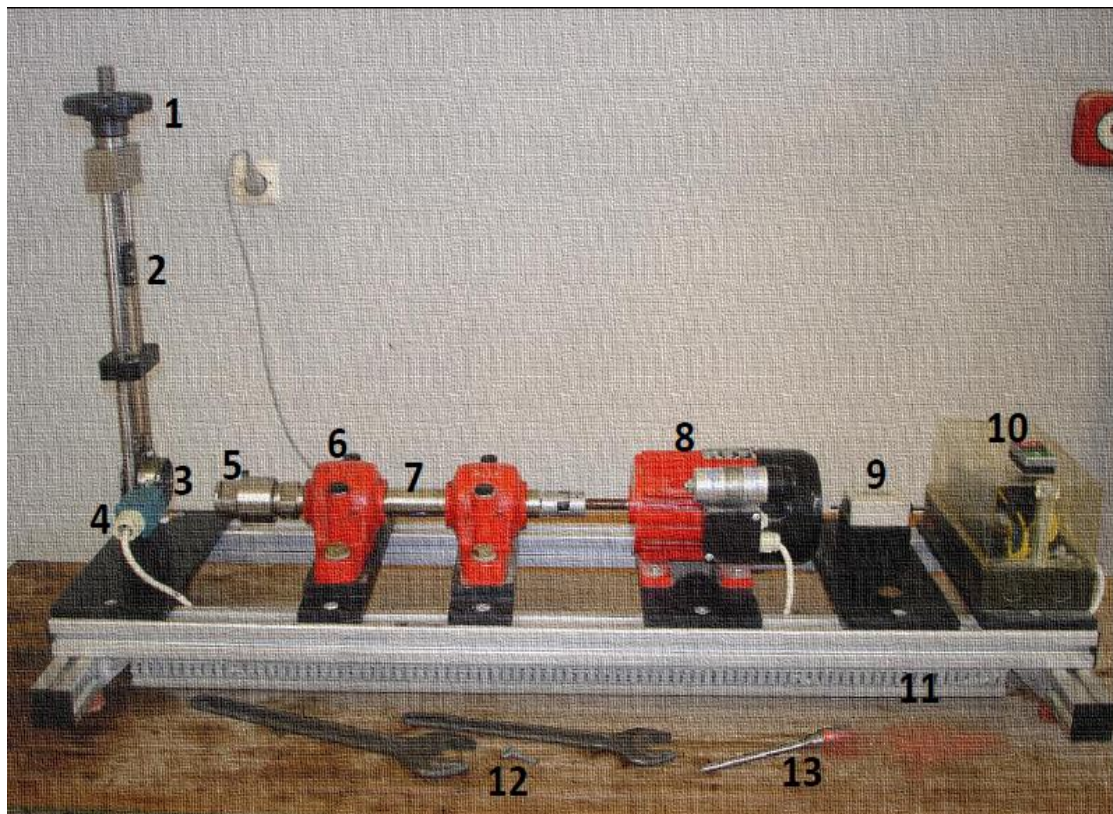


FIGURE II.6. la machine d'essai de fatigue en flexion rotative **GUNT** , **WP 140**.

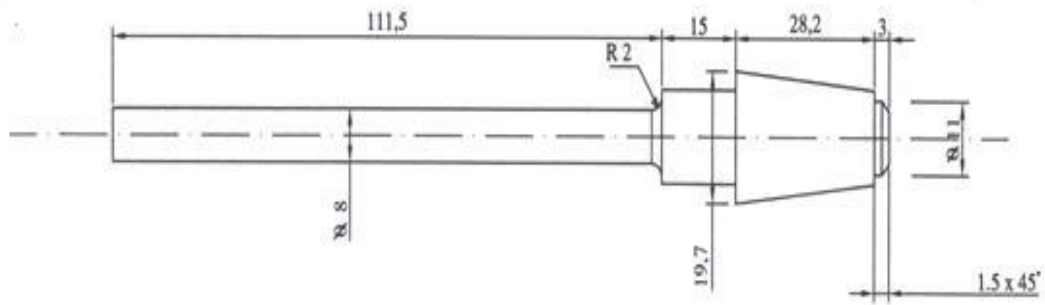


Figure II.7. Éprouvette d'essai de fatigue.

II.7. Les différents types d'essais de fatigue :

II.7.1. Essai de Wöhler

L'éprouvette est encastrée à un bout et soumise à un effort à l'autre bout donc on a une flexion rotative. (Figure.II.8)[5].

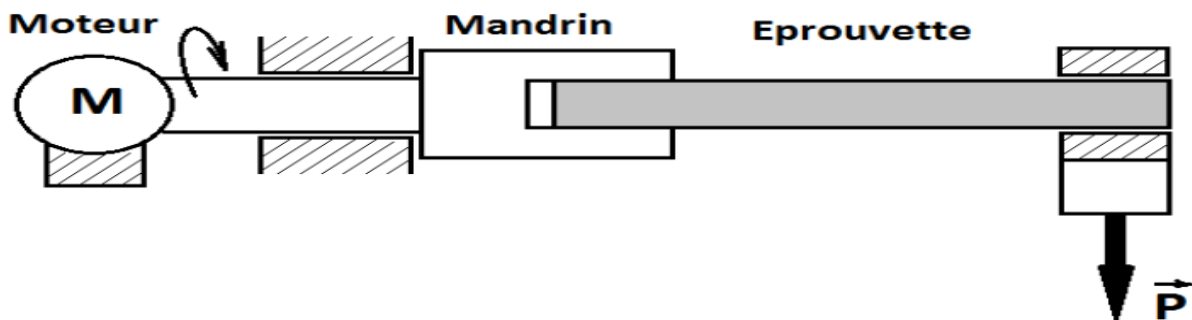


Figure I.8. Principe de l'essai de Wöhler[5]

II.7.2. Essai de torsion

L'éprouvette est fixée à un côté et l'autre côté est soumis à une rotation alternative imposée.

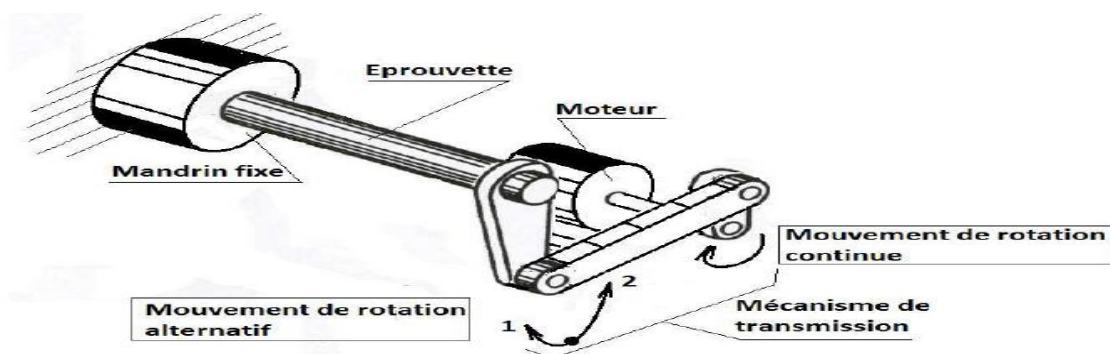


Figure II.9. Principe de l'essai de torsion alternée.[5]

II.7.3. Essai de Moore

Dans cet essai l'éprouvette est soumise à une flexion rotative (4 points) mais l'avantage essentiel c'est la simplicité de la machine. L'éprouvette est en rotation continue mais soumise à des poids qu'on peut faire varier.

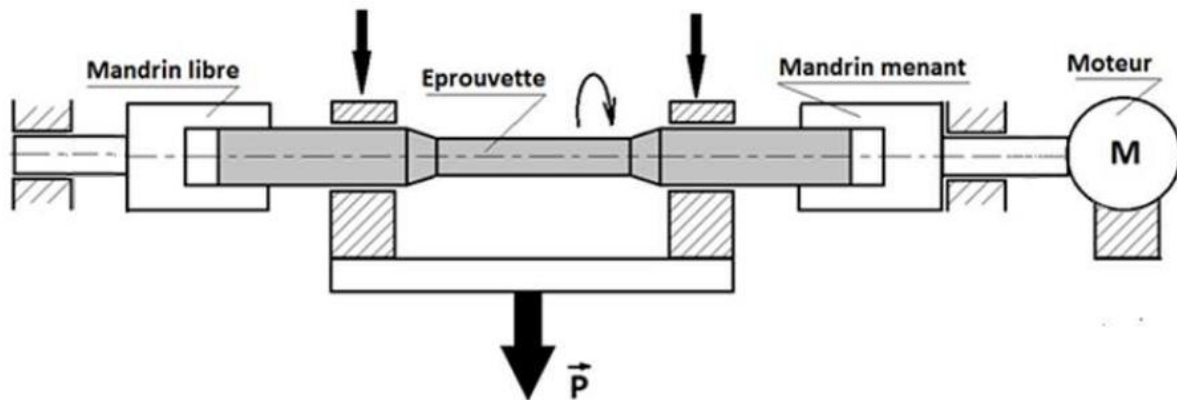


Figure II.10. Schéma de principe de la machine d'essai de Moore.[5]

III.1.Introduction

La simulation numérique fait maintenant partie intégrante du processus de conception et validation de structures mécaniques. Les outils de simulations sont de plus en plus performants permettant une description très fine des phénomènes. De plus ces outils ne se limitent plus à la mécanique linéaire, mais sont développés pour décrire des comportements plus compliqués allant jusqu'à la ruine des structures, ce qui intéresse le domaine de la sécurité, sous un chargement dynamique ou statique. La dynamique rapide permet de simuler des phénomènes "rapides" tels que des explosions, des chocs et impacts sur structure. Le domaine d'application est très varié.

Il concerne par exemple l'étude de la durée de vie et les scénarios d'accidents. Il est alors très intéressant pour les codes de dynamique rapide de pouvoir prédire de façon robuste et stable de tels phénomènes d'évaluation de l'endommagement dans la structure et la simulation de propagation de fissure constituent un enjeu essentiel.

La simulation numérique est aujourd'hui un outil très utilisé lors des différentes phases de conception et de validation des pièces et structures industrielles. Elle permet d'évaluer avec plus de précisions les comportements des structures et des matériaux permettant ainsi aux industriels un gain de coût. Les coûts de calcul restent cependant une limitation à l'utilisation industrielle systématique de codes. Aussi les techniques numériques sont elles continûment améliorées[24].

III.2.Généralités

La nécessité de calculer les déformations des structures et des terrains sous diverses sollicitations impose le recours à des méthodes numériques et à des lois de comportement des matériaux relativement compliquées. Les codes de calcul par éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés lors de la conception et à l'analyse des produits industriels. Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes. Si l'utilisation de la méthode se caractérise par la simplicité croissante de mise en oeuvre, la fiabilité des algorithmes et la robustesse de la méthode, il reste néanmoins des questions essentielles auxquelles l'ingénieur devra répondre s'il veut effectuer une analyse par éléments finis dans de bonnes conditions :

- évaluer la confiance qu'il accorde aux résultats produits ;
- analyser les conséquences de ces résultats par rapport aux objectifs visés.

L'idée fondamentale de cette méthode est de discrétiser le problème en décomposant le domaine matériel à étudier en éléments de forme géométrique simple. Sur chacun de ces éléments il sera plus simple de définir une approximation[25].

En pratique, les logiciels de calcul par éléments finis sont devenus des outils pour l'ingénieur, au même titre que les méthodes de calcul traditionnelles de la mécanique. L'utilisation d'un code de calcul a été rendue très facile par le développement de pré- et de post-processeurs convenables et simples d'emploi. Les meilleurs automatiques offrent des possibilités très intéressantes, mais la construction du maillage d'éléments finis dépend encore pour beaucoup des choix de l'ingénieur.

Cette étape est fondamentale dans la mise au point du modèle d'éléments finis, et il n'est pas toujours évident de savoir jusqu'à quel point il faut aller dans la discrétisation et le raffinement[26].

- **Avantages des éléments finis :**

- Traitement possible de géométries complexes,
- détermination plus naturelle des conditions aux limites,
- possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs [3].

- **Inconvénients des éléments finis :**

Complexité de mise en œuvre et coût en temps de calcul[27].

III.3.Applications de la méthode des éléments finis

On retrouve les premières applications véritables de la méthode des éléments finis en 1956 en mécanique des structures. Un groupe de chercheurs [28] de Boeing utilisent cette méthode pour calculer la voilure d'un avion.

La méthode des éléments finis est maintenant reconnue comme l'une des principales méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) dans des géométries quelconques, que ce soit en dimension un, deux ou trois. On trouve même des méthodes d'éléments finis en dimension quatre, soit en espace-temps...

Les applications sont toutes aussi nombreuses et variées. Les ingénieurs de diverses disciplines utilisent les éléments finis, que ce soit en mécanique des fluides ou des solides, mais aussi pour les problèmes thermiques, électromagnétiques, chimiques, etc. On retrouve aussi des applications en physique, et notamment en astrophysique.

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, sont les suivantes :

- discrétisation du milieu continu en sous domaines ;

- construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- assemblage des matrices élémentaires ;
- prise en compte des conditions aux limites ;
- résolution du système d'équations.

III.4.Déroulement d'une étude

Pour réaliser une étude par éléments finis, il faut que les objectifs de l'étude soient bien définis . Le cadre de l'étude, c'est-à-dire le temps et les moyens disponibles, doit être compatible avec les objectifs et la précision cherchée. Supposons toutes ces conditions remplies, l'étude proprement dite est organisée de façon logique selon les étapes suivantes [29]:

III.4.1.Analyse du problème

Cette analyse doit fixer les paramètres du calcul et conduire à la réalisation d'un maillage. Cette phase basée sur l'expérience personnelle acquise dépend de nombreuses considérations. La difficulté essentielle est de trouver un bon compromis entre les paramètres propres au problème et ceux relatifs à l'environnement de travail. L'analyse du problème nous conduit à préciser un certain nombre d'hypothèses, et à effectuer des choix qui conditionnent les résultats.

III.4.2.Choix du modèle

En calcul des structures, les plus classiques sont de type : poutre, élasticité plane, axisymétrique, coques mince ou épaisse, tridimensionnel. . . À ces modèles mathématiques correspondent des familles d'éléments finis.

III.4.3.Choix du type d'éléments

Il est fonction de la précision voulue, de la nature du problème, mais aussi du temps disponible. On choisira les éléments les mieux adaptés dans les familles disponibles.

III.4.4.Choix du maillage

Il dépend essentiellement de la géométrie, des sollicitations extérieures, des conditions aux limites à imposer, mais aussi des informations recherchées : locales ou globales. Sans oublier bien entendu le type d'outils dont on dispose pour réaliser ce maillage.

On divise arbitrairement en trois mailles de même [30] taille (voir la .figure III.1):

$$\Omega_1 = \left[0, \frac{1}{3}\right] ; \quad \Omega_2 = \left[\frac{1}{3}, \frac{2}{3}\right] ; \quad \Omega_3 = \left[\frac{2}{3}, 1\right]$$

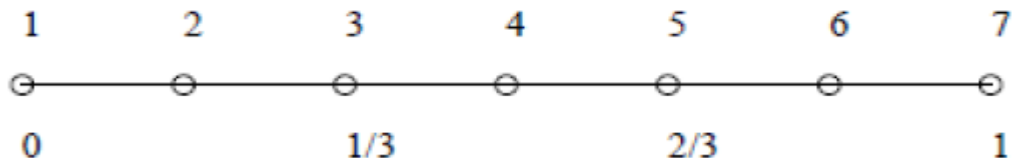


Figure III.1. Maillage du problème [30].

III.5. Discrétisation géométrique

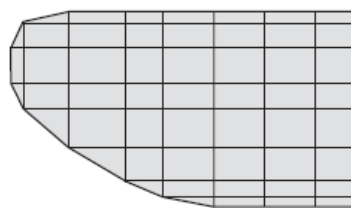
Cette opération consiste à procéder à un découpage du domaine continu en sous domaine :

Il faut pouvoir représenter au mieux la géométrie souvent complexe du domaine étudié par des éléments de forme géométrique simple. Il ne doit y avoir ni recouvrement ni trou entre deux éléments ayant une frontière commune.

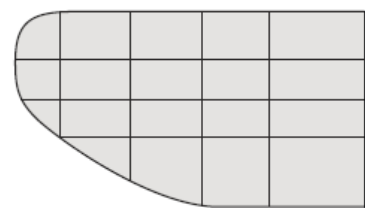
Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable. Cette erreur doit être estimée, et éventuellement réduite en modifiant la forme ou en diminuant la taille des éléments concernés (Fig.III.2). Sur chaque élément nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution.[29]



(a) pièce à étudier et présentant des congés de raccordement



(b) modifier la taille des éléments et raffiner au niveau des courbures



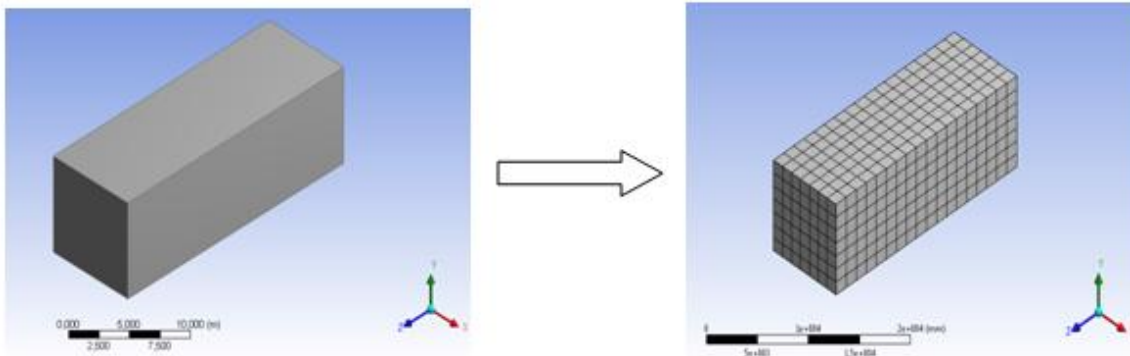
(c) utiliser des éléments à frontière courbe

Figure.III.2. Erreur de discrétisation géométrique [29].

III.6. Notion d'optimalité du maillage

Il est rapidement devenu évident que le maillage est une composante essentielle de la solution numérique par éléments finis. Optimiser le maillage, de manière à améliorer cette solution, est donc devenu un enjeu crucial. On a ainsi cherché à optimiser des maillages de différentes façons. Optimiser un maillage pour en maximiser la qualité des éléments est une première approche qui, malheureusement, ne tient aucun compte de la nature de la solution.

On peut formuler plus efficacement le problème d'optimisation en cherchant à obtenir, pour un nombre de nœuds donné, le maillage qui minimise une certaine norme de l'erreur. Bien entendu, on minimisera une erreur estimée seulement car la véritable erreur est généralement



inconnu.[31].

Figure III.4.Exemple de maillage d'une poutre

III.7. Utilisation d'un logiciel éléments finis

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CASTEM 2000, CESAR, SAMCEF, etc.

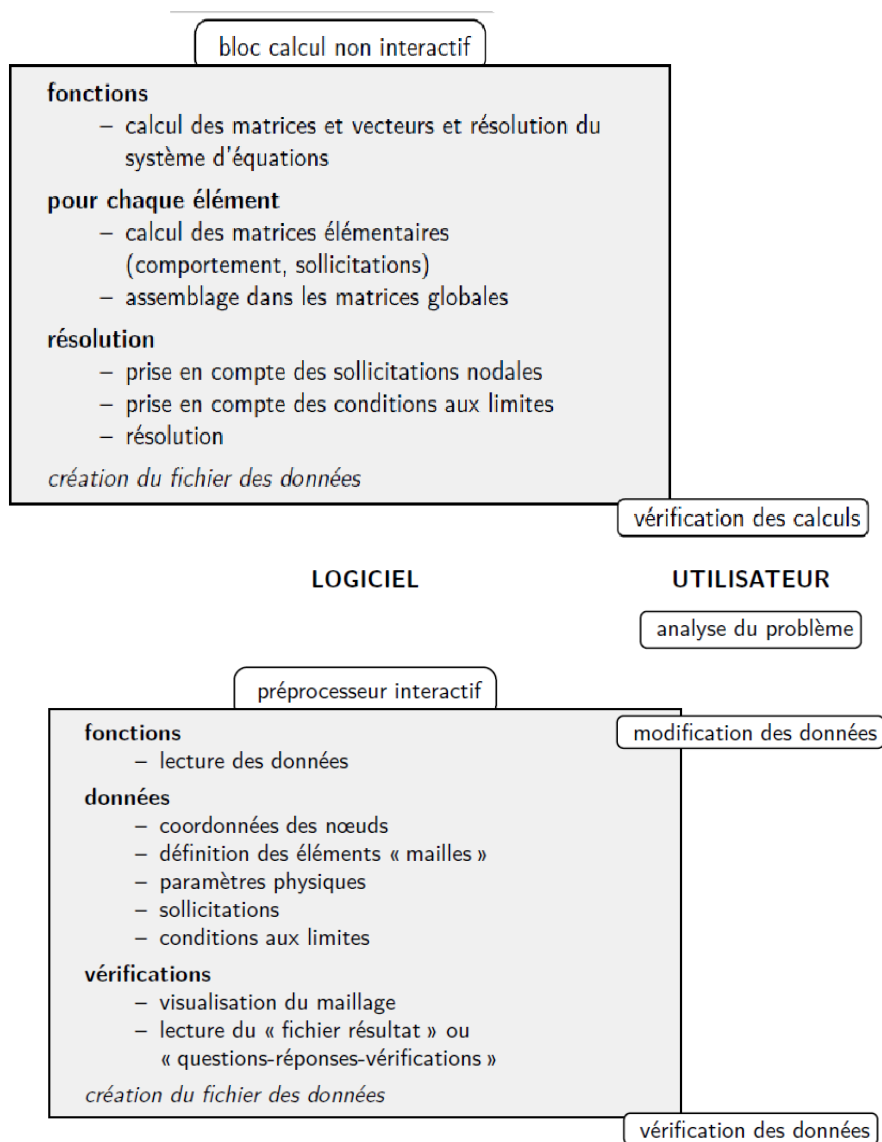
Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

- analyse linéaire ou non d'un système physique continu ;
- analyse statique ou dynamique

- prise en compte de lois de comportement complexes ;
- prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d'écoulement. . .) pouvant être couplés ;
- problèmes d'optimisation, etc. [29]

III.8. Organigramme d'un logiciel éléments finis

Tout logiciel de calcul par la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristiques ou blocs fonctionnels décrits (figure III.5) .



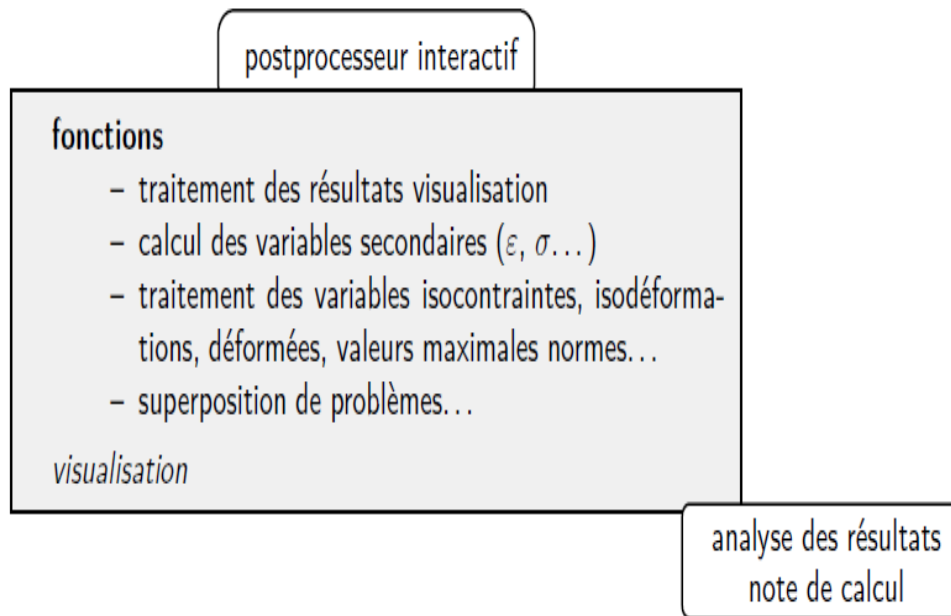


Figure III.5. Organigramme d'un logiciel éléments finis

IV.1. Introduction

Pour l'accomplissement de notre étude de simulation numérique, on a utilisé le code numérique « ANSYS », l'un des codes de calcul, par éléments finis, les plus utilisés actuellement dans le monde.

Le code « ANSYS » comprend plusieurs composantes telles que : ANSYS/Professionnel, ANSYS/Multiphasiques, ANSYS/Structural...etc. Chaque Composante est destinée à l'un des domaines d'ingénierie, et son choix met automatiquement à la disposition de l'utilisateur les processus adéquats (type d'élément, conditions aux limites, tracées,...etc.) [32].

le code ANSYS traite la majorité des problèmes soit dynamique ou statique.

Dans notre analyse, nous avons choisi « ANSYS.V18.1 », qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique des structures. Il offre des outils puissants pour l'analyse en deux et trois dimensions on peut faire l'étude soit par APDL(ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE) ou workbench .Dans notre travail nous avons utilisé ANSYS-workbench, dont la fenêtre principale est présenté par la figure IV.1

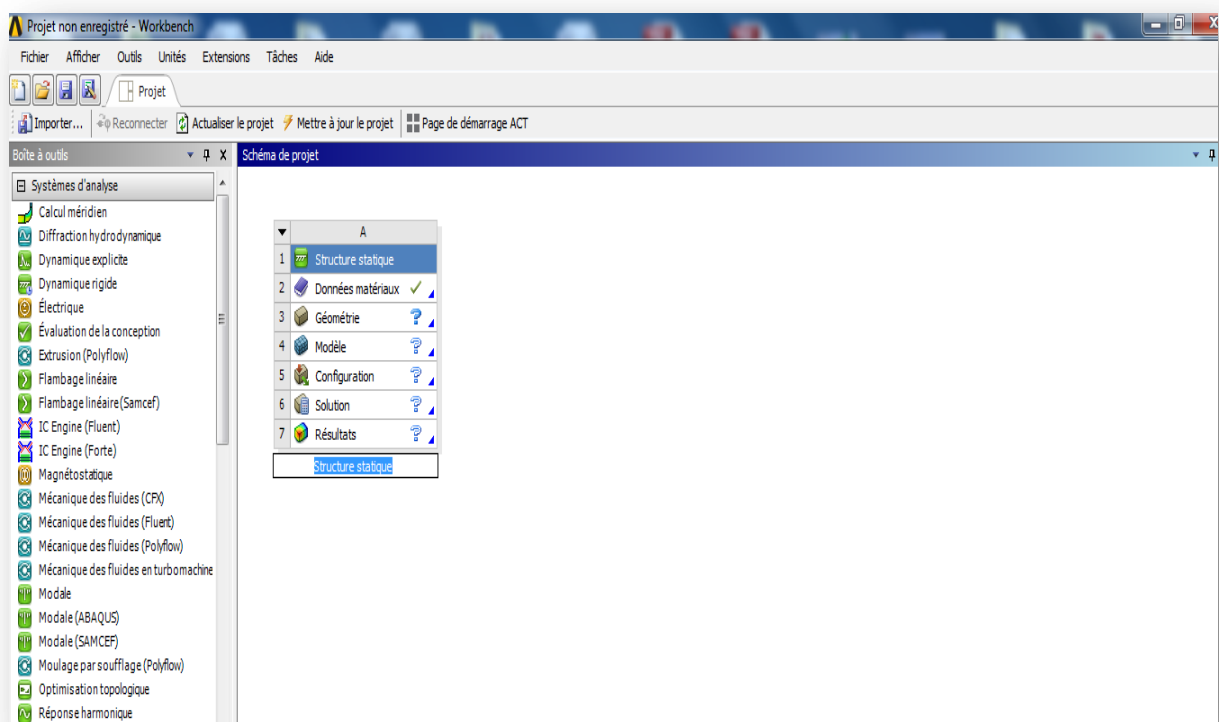


Figure IV.1. La fenêtre de code « ANSYS .V18.1-workbench »

IV.2. les étapes de simulation

La première étape consiste à faire la recherche par simulation numérique en utilisant le code ANSYS des contraintes principales maximales du phénomène de fatigue des éprouvettes et comparer nos résultats avec ceux recherchés expérimentalement par l'auteur de la référence[33].

Nous utiliserons donc les mêmes caractéristiques et propriétés des éprouvettes pendant notre travail de simulation (Dimensionnement de l'éprouvette, les propriétés de matériaux utilisées, les conditions aux Limites, la vitesse de rotation...etc.).

La simulation numérique effectuée est basée sur l'étude de la courbe de Wöhler sur la fatigue des matériaux, sollicités en flexion rotative.

IV. 2.1. dimensionnement de l'éprouvette

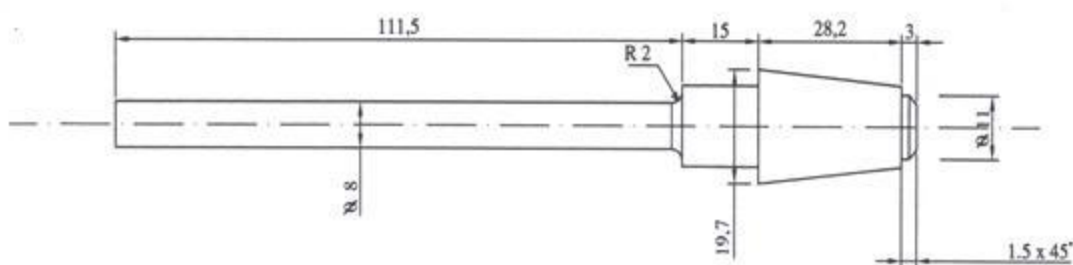


Figure IV.2. Éprouvette d'essai de fatigue la machine GUNT WP 140.

IV.2.2. Les conditions aux limites

On fixe l'éprouvette en une extrémité pour supprimer les déplacements en trois directions « OX, OY, OZ » ; il ne reste que la rotation autour de l'axe « OZ ».

Sur l'autre extrémité on applique une force verticale dans la direction « OY ».

Nous avons utilisé 2 types de matière :

- 1) Acier XC38 ;
- 2) Acier A60 .

Le tableau **IV.1** représente les différents types d'éprouvettes respectives à la machine de l'essai de fatigue **WP140**.

Tableau IV.1. Les types d'éprouvettes utilisées par « ANSYS »

Éprouvette N°	Rayon R (mm)	Matériaux
1	2	Acier XC38
	0,5	
2	2	Acier A60
	0,5	

IV.3.Déroulement de la simulation

IV.3.1.Simulation de la première éprouvette en Acier XC38

1^{ère} étape :

- La géométrie

Après l'ouverture du code ANSYS, et choix de wokrbench dans le menu de démarrage,

Il faut cliquer sur l'instruction géométrie pour la conception de l'éprouvette et les dimensions comme indiqué dans la figure suivante

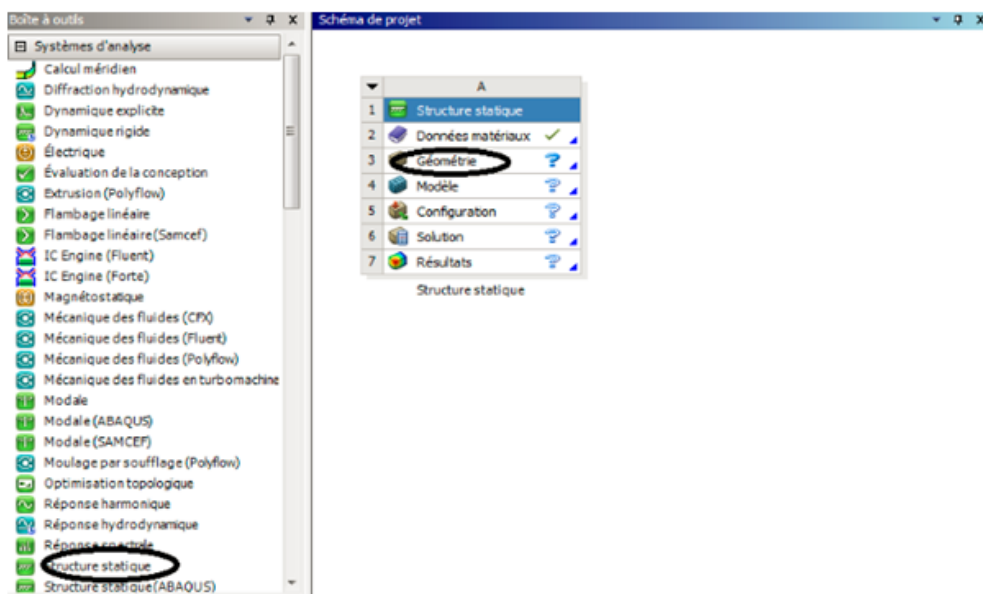


Figure IV.3. La fenêtre pour conception l'éprouvette « géométrie »

Après avoir appuyé sur l'instruction géométrie Nous appliquons les dimensions de l'éprouvette (**Fig. IV.4**)

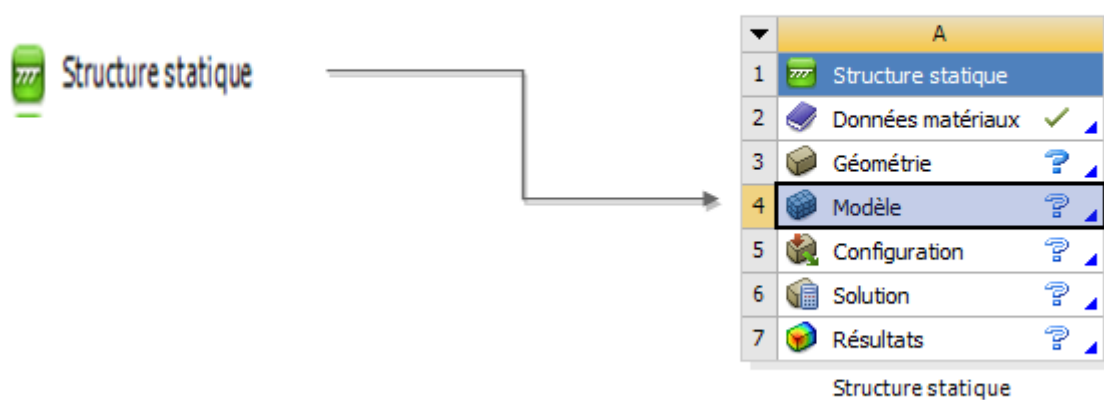


Figure IV.4.géométrie de l'éprouvette étudié par le code « ANSYS » .

2^{ème} étape :

- **maillage de l'éprouvette**

Après la conception de l'éprouvette on choisit la seconde instruction c'est le « modèle »
Pour faire le maillage de l'éprouvette (Fig. IV.5)



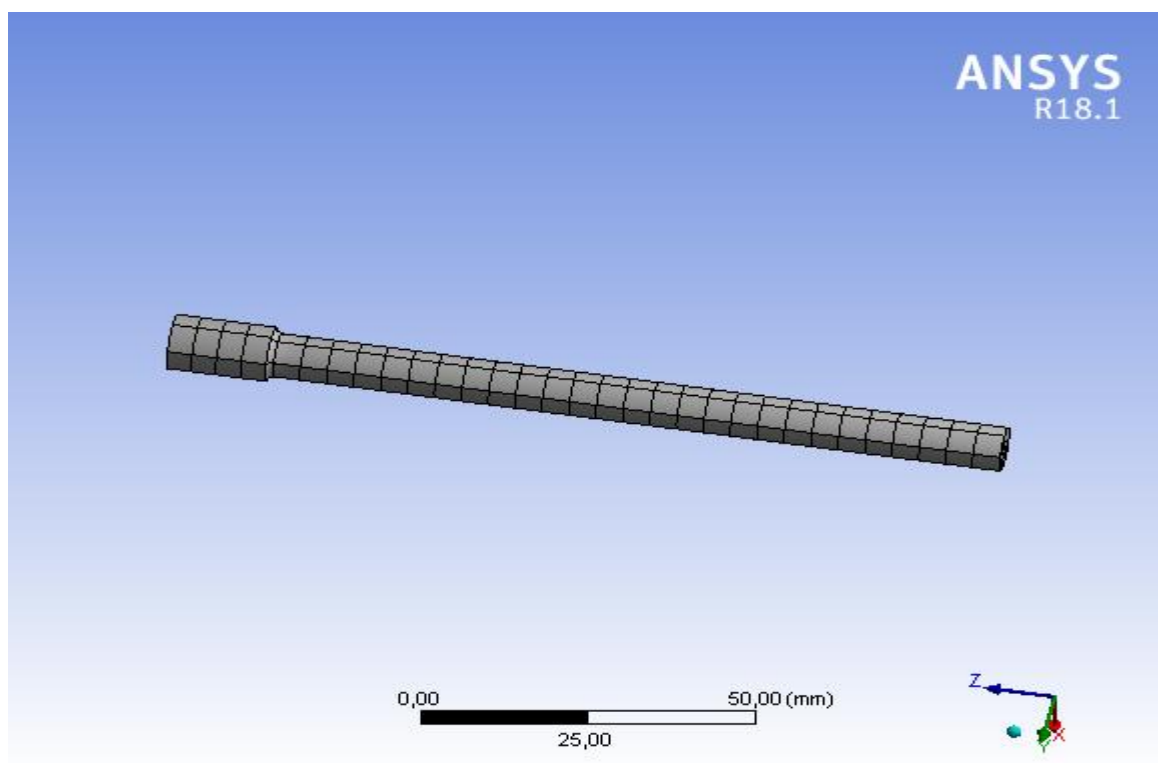


Figure IV.5. Maillage de l'éprouvette

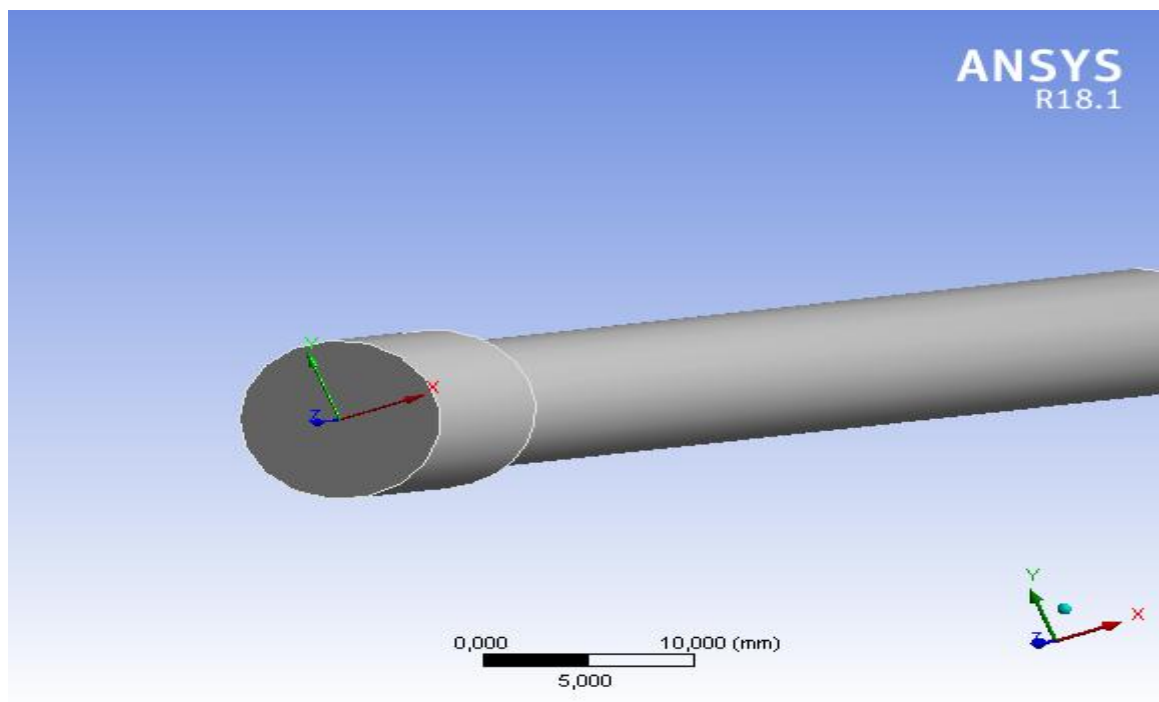
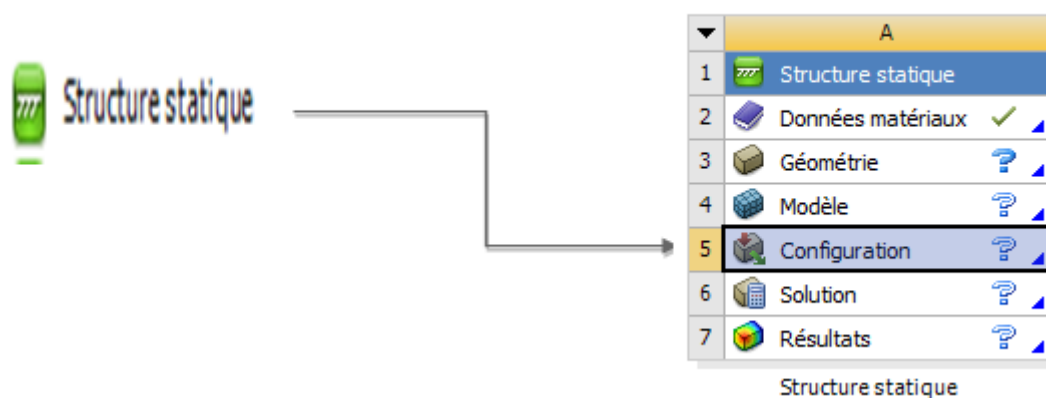


Figure IV.6. Système de coordonnées « OX , OY ,OZ »

3^{ème} étape :


- configuration

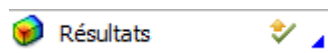
L'outil de configuration permet l'insertion des paramètres nécessaires comme (la vitesse de rotation, la charge appliquée ... etc.).



4^{ème} étape :

- **solution**

Instruction  Solution permet le choix des Opérations à collecter pour afficher les résultats recherchés ces derniers seront donnés à l'aide de l'instruction



Après fixation du déplacement sur les trois axes « OX, OY, OZ », Nous choisissons la vitesse de rotation à $t=2750$ tr/min.(Fig. IV.7) .

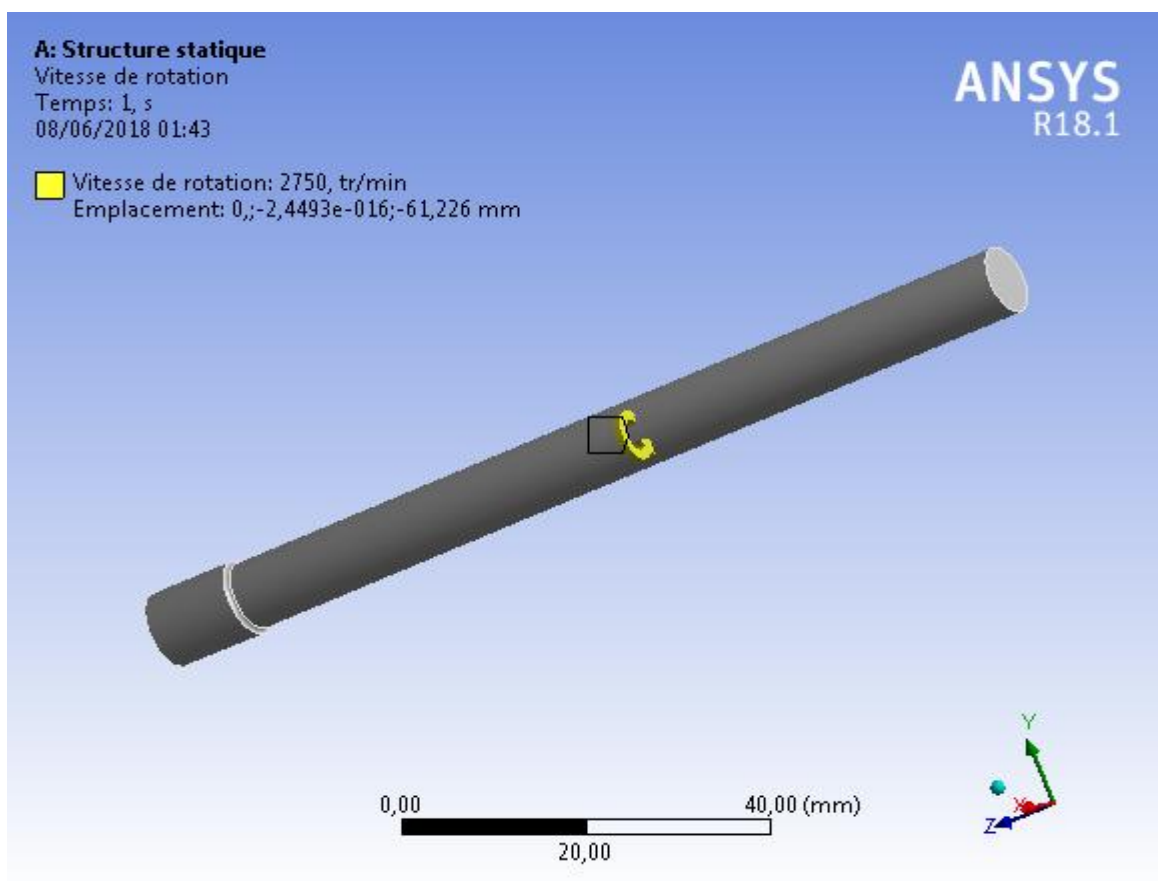


Figure IV.7. vitesse de rotation autour de l'axe « OZ »

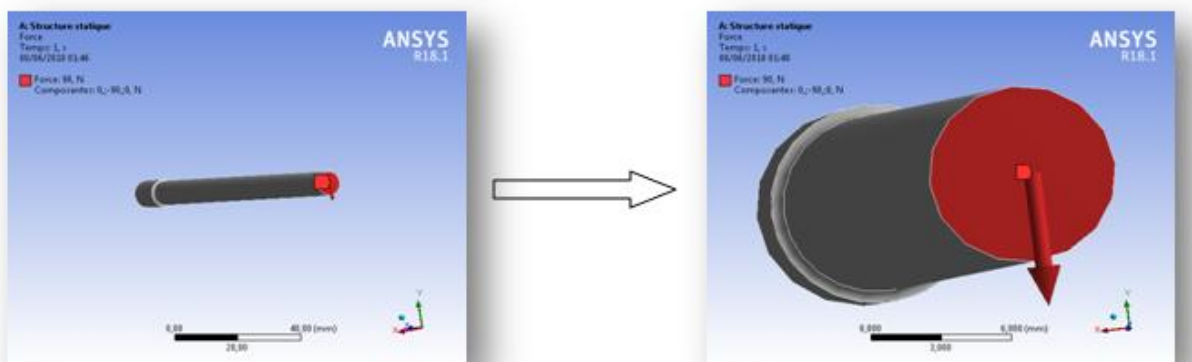


Figure IV.8. La charge appliquée F suivant l'axe y

Après application des forces F dans le code « ANSYS-workbench », (Fig. IV.1).

Nous calculons la contrainte principale maximale pour chaque force appliquée en cliquant sur

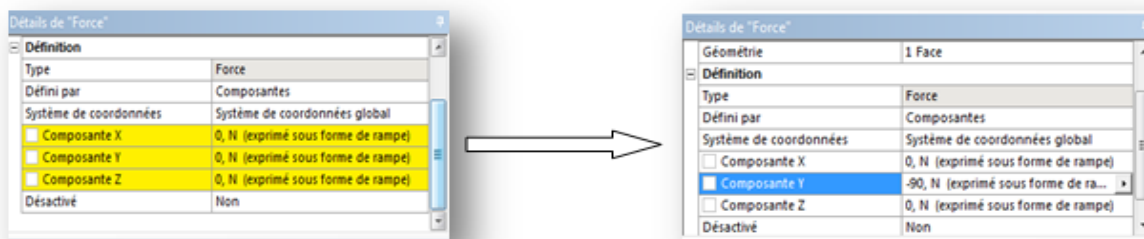
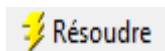


Figure IV.9. Fenêtre de validation les force.

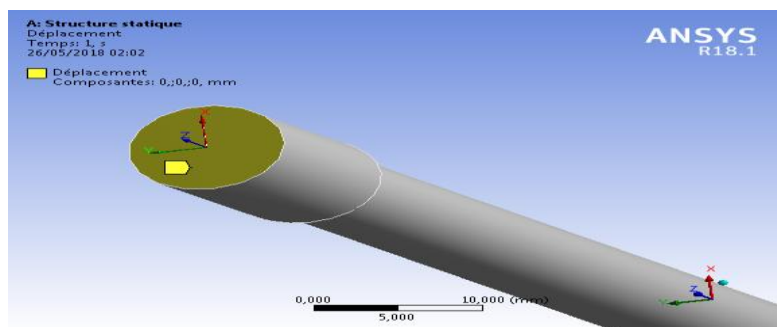


Figure IV.10. Déplacement selon les axes

IV.3.2.simulation l'éprouvette Acier XC38(C35) :

- La masse volumique : $\rho = 7850 \frac{kg}{m^3}$;
- Module de Young : $2 \cdot 10^5 \text{ Mpa}$;
- Coefficient de poisson : $\nu = 0,33$
- $R_m = 580 \text{ N/mm}^2$;
- $\sigma'_D = R_m \cdot 0,5 \text{ Mpa} \Rightarrow \sigma'_D = 290 \text{ Mpa}$;

La simulation s'effectue en introduisant la valeur de la charge F, la contrainte maximale est donnée par Ansys montrant ainsi le point critique sur l'éprouvette. (distribution des contraintes)

Exemple

$F_1 = 260 \text{ N}$;

On obtient :

$\sigma_1 = 563 \text{ MPa}$;

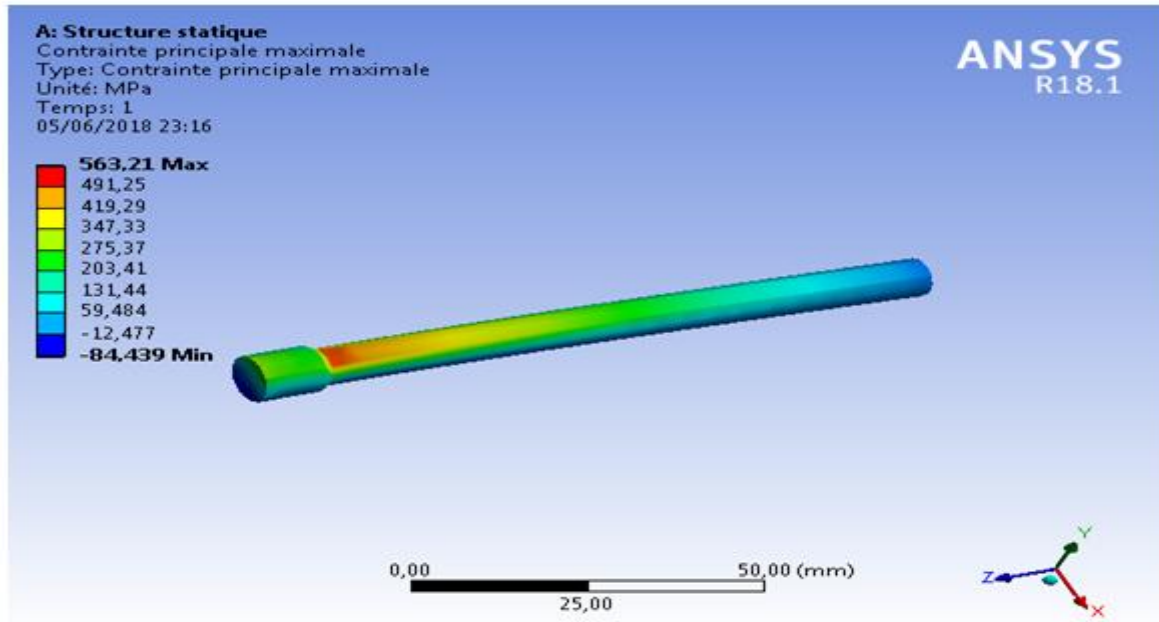


Figure IV.11. contrainte principale maximale (en rouge)

On obtient un ruban des contraintes différentes sur la pièce, nous considérons seulement la plus grande valeur (en rouge).

Nous effectuons la même travail pour tous les efforts appliqués, ils sont regroupés dans le tableau **Tab IV.2** donnant les forces(F), les contraintes (σ), et le nombre de cycles(N).

On calcule le nombre de cycle d'après la relation théorique [23] suivant :

$$N = 1000 \left[\frac{R_m}{\sigma_a} \right]^{\frac{3}{\log \frac{R_m}{\sigma'_D}}}$$

N : Nombre de cycles ;

σ_m : Contrainte nominale

σ_a : Contrainte normale alternée symétrique ;

σ'_D : Limite de fatigue en flexion alternée ;

1^{ère} cas : Acier XC38 ;

Pour rayon, **R=2mm ;**

Tableau IV.2 : les résultats obtenus lors de simulation

La force(N)	σ (N/mm ²)	Nombre de cycles(N)	σ (N/mm ²)	
			Résultats expérimentaux[33]	Résultats par « ANSYS »
F ₁ = 260	520	3958	563,21	1343
F ₂ =230	460	8734	498	4411
F ₃ =200	400	28340	433	17318
F ₄ =170	340	123137	368	57665
F ₅ =140	280	537095	303	613106
F ₆ =110	220	1342806	238	6340338
F ₇ =90	180	N>10 ⁷	194	42070723

Ces résultats sont illustrés sur la courbe dans la Figure IV.12.

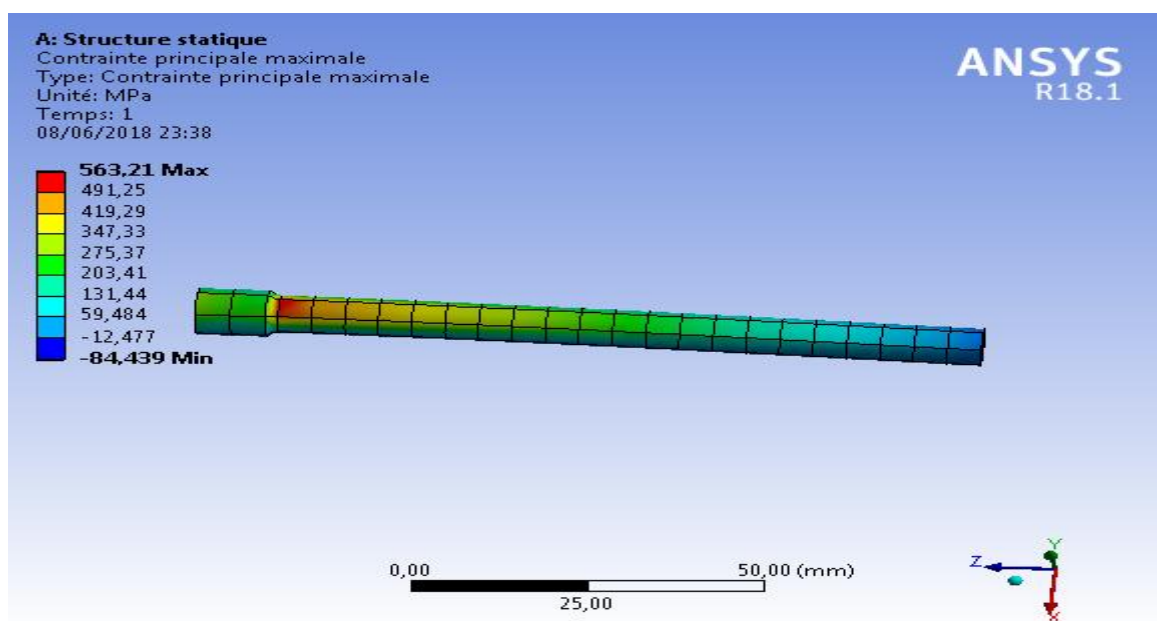


Figure IV.12. contrainte principale maximale

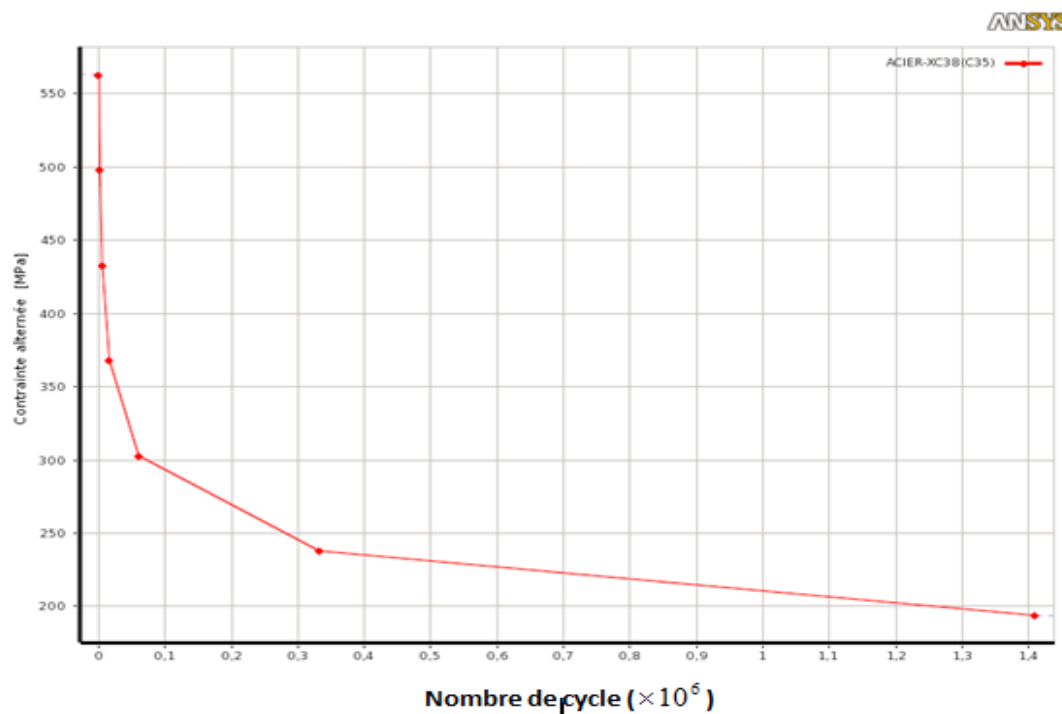


Figure IV.13. Représentation du diagramme d’endurance (σ -N)
 pour l’acier XC38(R=2mm)

2^{ème} cas : Acier XC38 ;

Pour rayon, $R=0,5\text{mm}$;

Tableau IV.3 : les résultats obtenus lors de simulation

La force(N)	σ (N/mm ²)	Nombre de cycles(N)	σ (N/mm ²)	Nombre de cycles(N)
	Résultats expérimentaux[33]		Résultats par « ANSYS »	
F ₁ = 260	520	2175	554	932
F ₂ =230	460	3677	490	2210
F ₃ =200	400	9942	426,73	5944
F ₄ =170	340	26312	362,72	17085
F ₅ =140	280	43079	298,7	61222
F ₆ =110	220	142815	234	395799
F ₇ =90	180	$N > 10^7$	192	1349292

Ces résultats sont illustrés sur la courbe dans la Figure IV.14.

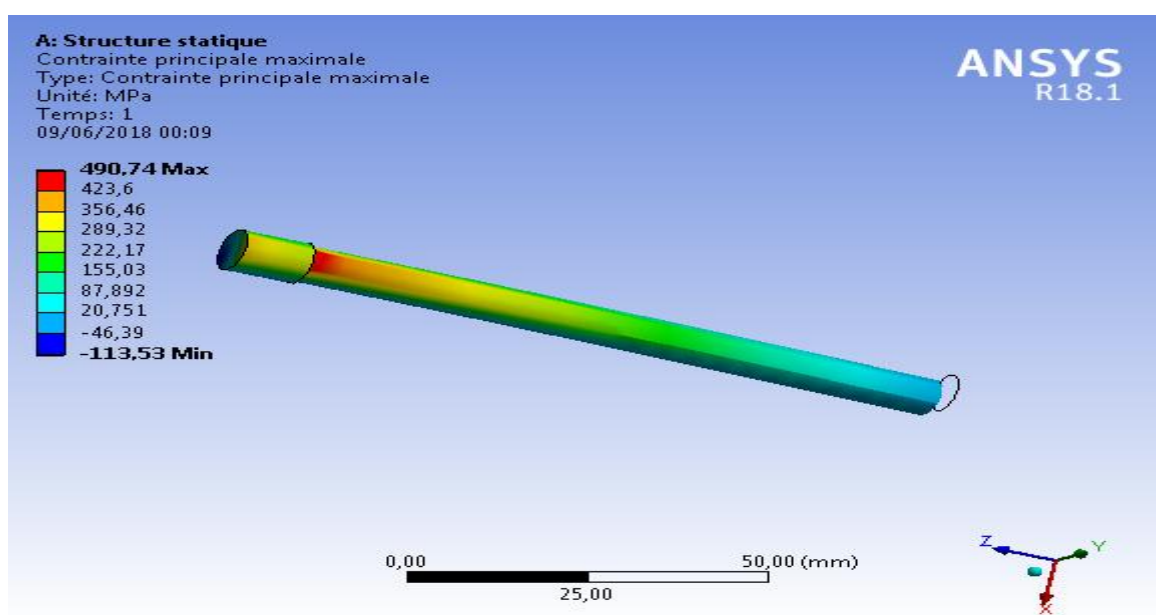


Figure IV.14.contrainte principale maximale (F=230N).

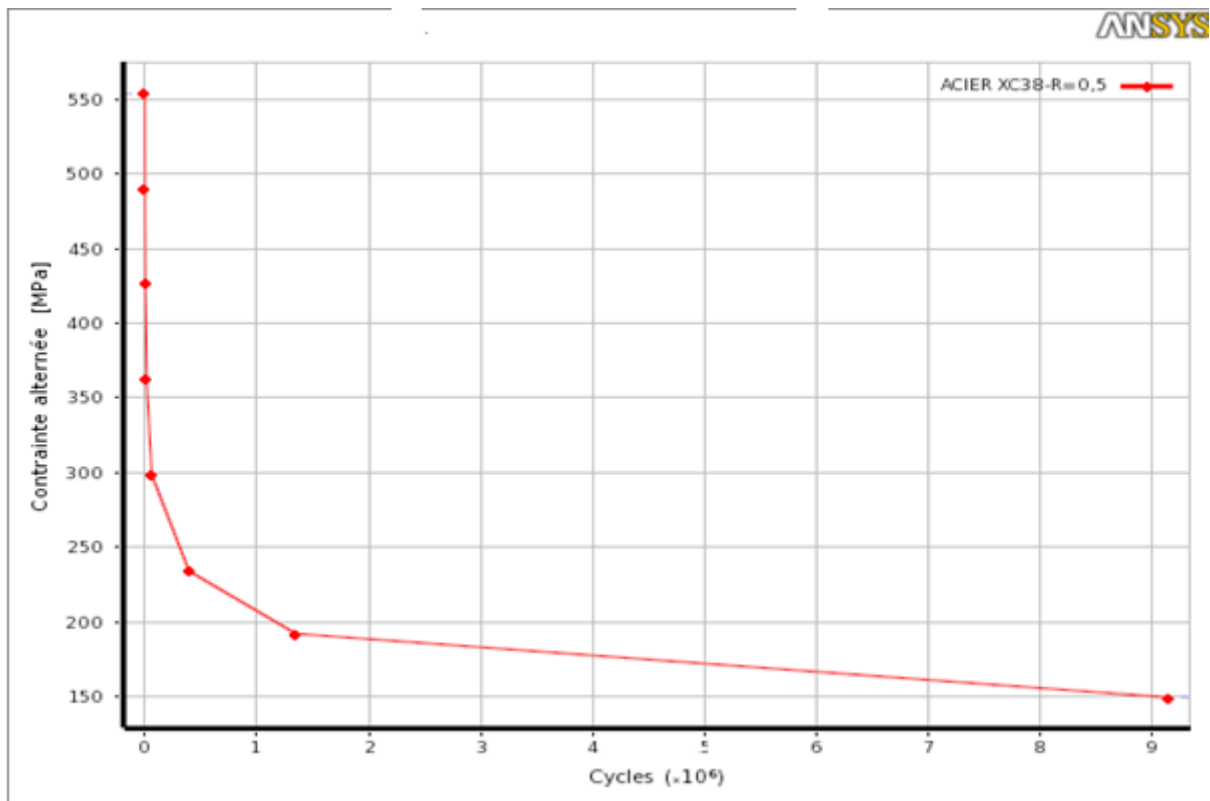


Figure IV.15. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier XC38(R=0,5mm)

Interprétation des graphes

Les résultats obtenus par simulations illustrés dans les courbes des figures IV.13 et IV.15 marque une légère différences des valeurs des contraintes et des nombres de cycles pour des rayons de courbure de la tête de l'éprouvette différents $R=2\text{mm}$ et $R=0,5\text{mm}$,

La limite d'endurance se situe pour $R=2\text{mm}$ à 194N/mm^2 pour $N=1,4 \cdot 10^6$ par contre pour $R=0,5\text{mm}$ elle est égale à $149,35\text{N/mm}^2$ pour un nombre de cycle $N=9,13 \cdot 10^6$. on peut dire que pour un rayon petit sur l'éprouvette la durée de vie de l'éprouvette est plus longue que pour un rayon plus grand ($R=2\text{mm}$). Les deux courbes ont la même allure décroissante pour des nombres de cycles croissants. Ces courbes ont l'allure de la courbe de Wöhler.

IV.3. 3.simulation de l'éprouvette Acier A60 :

- La masse volumique : $\rho = 7840 \frac{kg}{m^3}$;
- $R_m = 670 \text{ N/mm}^2$;
- Coefficient de poisson : $\nu = 0,33$
- module de Young : $2 \times 10^5 \text{ Mpa}$;

1^{ère} cas : Acier A60 ;

Pour rayon, $R = 2 \text{ mm}$;

Tableau IV.4 : les résultats obtenus par la simulation

La force(N)	σ (N/mm ²)	Nombre de cycles(N)	σ (N/mm ²)	Nombre de cycles(N)
	Résultats expérimentaux[33]		Résultats par « ANSYS »	
F ₁ = 260	520	4336	556	4070
F ₂ =230	460	8217	492	7539
F ₃ =200	400	22863	428	30694
F ₄ =170	340	59036	364	92384
F ₅ =140	280	60563	299	433166
F ₆ =110	220	477912	235	2774066
F ₇ =90	180	>9.10 ⁶	192,97	12370511

Ces résultats sont illustrés sur la courbe dans la Figure IV.17.

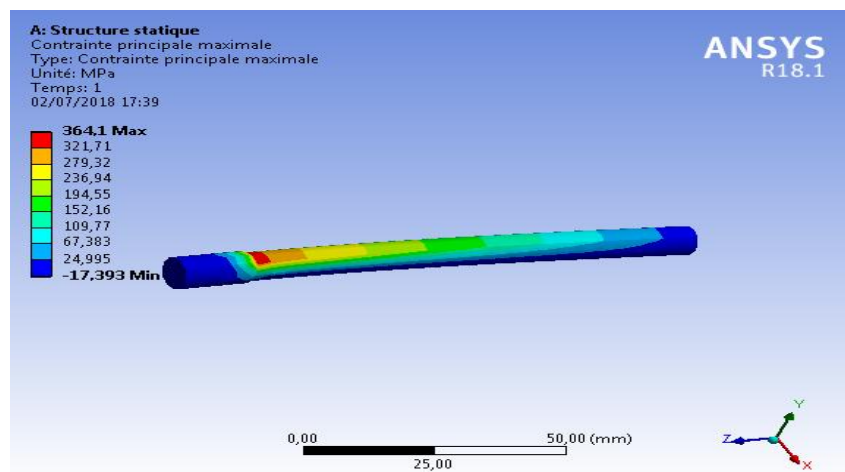


Figure IV.16.contrainte principale maximale (F=170N).

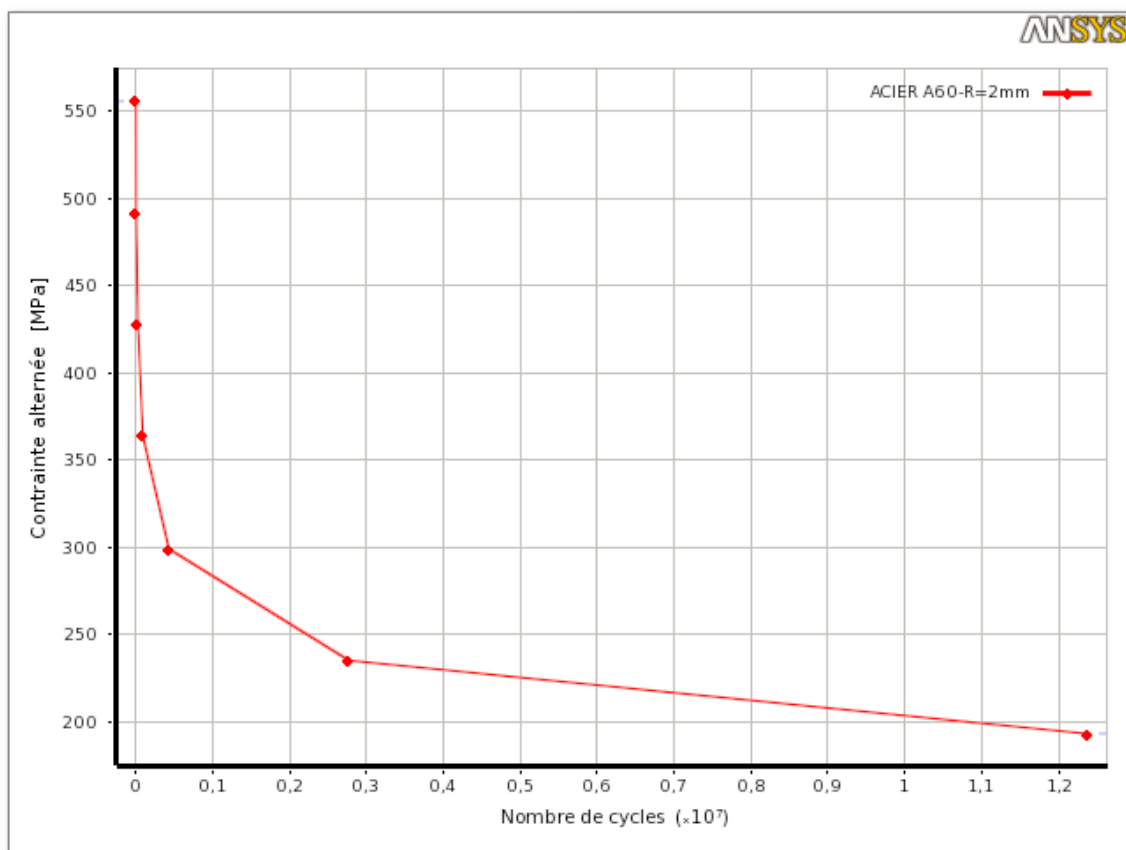


Figure IV.17 Représentation du diagramme d'endurance (σ -N)
pour l'acier A60(R=2mm)

2^{ème} cas : Acier A60 ;

$$\sigma_D = 0,4 R_m ;$$

Pour rayon, R= 0,5mm;

Tableau IV.5 : les résultats obtenus lors de simulation

La force(N)	σ (N/mm ²)	Nombre de cycles(N)	σ (N/mm ²)	Nombre de cycles(N)
	Résultats expérimentaux[33]		Résultats par « ANSYS »	
F ₁ = 260	520	3050	597	2393
F ₂ =230	460	4071	549	4200
F ₃ =200	400	20812	477	13000
F ₄ =170	340	33606	406	37301
F ₅ =140	280	51766	344	140088
F ₆ =110	220	80484	262	1159145
F ₇ =90	180	106>	214	4718822

Ces résultats sont illustrés sur la courbe dans la Figure IV.19.

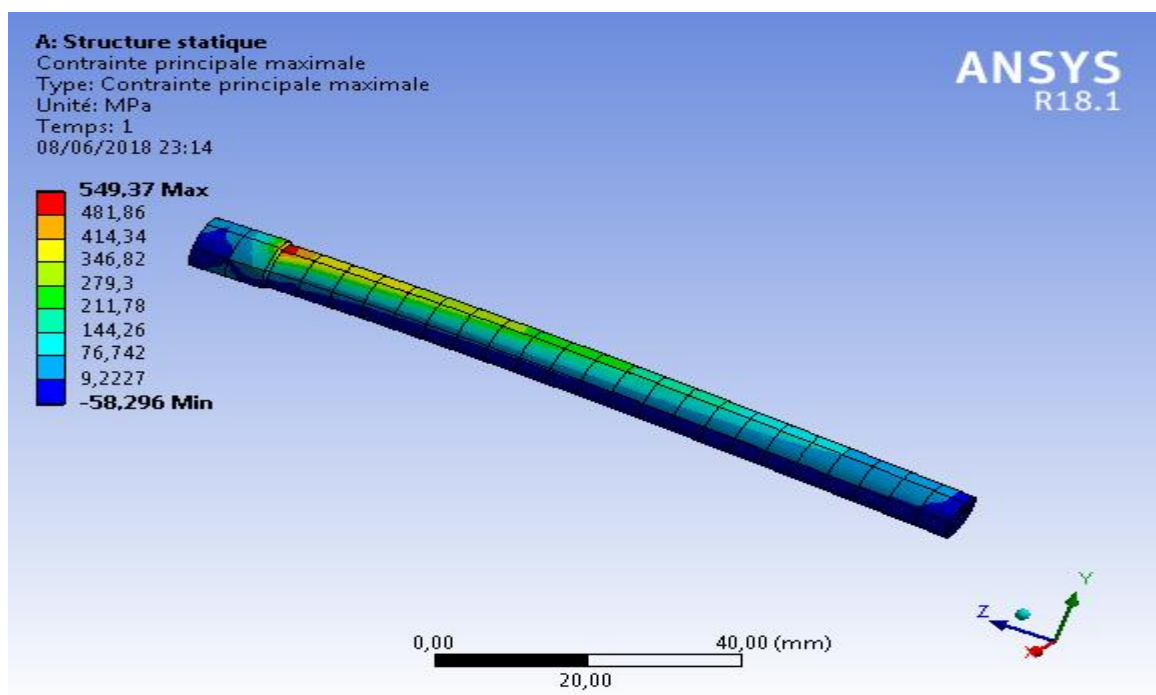


Figure IV.18. contrainte principale maximale (F=230N).

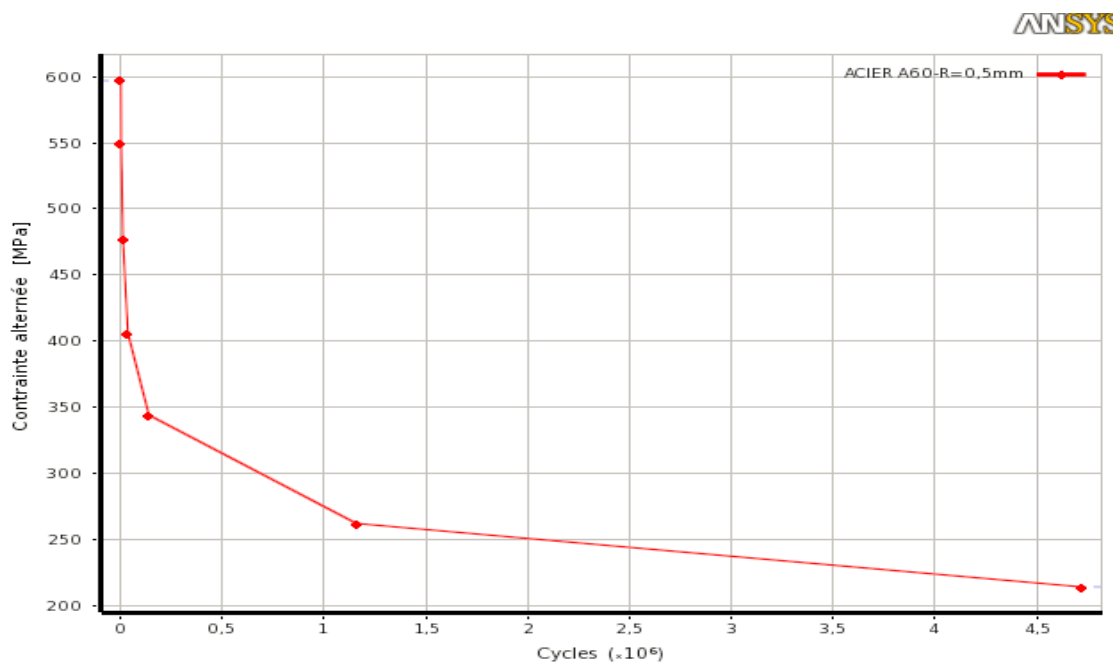


Figure IV.19. Représentation du diagramme d'endurance (σ -N) pour l'acier A60 (R=0,5mm)

Interprétation des graphes

Les figures **IV.17** et **IV.19** représentent graphiquement les courbes σ -N pour l'acier A60 avec des rayons différents sur l'éprouvette (2mm et 0,5mm). Nous remarquons que les deux courbes ont la même allure mais des valeurs légèrement différentes. En effet pour un rayon de courbure $R=0,5\text{mm}$ la plus grande contrainte est $\sigma = 597 \text{ N/mm}^2$ pour un nombre de cycle à rupture $N= 2,393.10^3$ et la plus petite valeur de $\sigma = 214 \text{ N/mm}^2$ avec un nombre de cycle $N=4,718822.10^6$ cependant pour un rayon $R= 2 \text{ mm}$, la contrainte supérieure est

$\sigma = 556 \text{ N/mm}^2$ pour $N= 4070$ et la plus petite valeur de $\sigma = 192 \text{ N/mm}^2$ pour $N=1,2.10^7$

Une comparaison de nos résultats numériques avec les résultats expérimentaux de [33], montre un rapprochement des valeurs avec la même forme de la courbe de Wöhler avec les trois zones : pour des cycles de 10^3 nous avons les grandes contraintes (ce qui représente la phase olégocyclique).

La 2^{ème} zone, la rupture des éprouvettes est atteinte après un nombre de cycle compris 10^3 et 10^6

La 3^{ème} zone dite zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité sous faible contrainte exprimant que la rupture n'a lieu que pour N cycle supérieur à 10^7 .

Conclusion générale

Ce travail de simulation est une contribution à l'étude de fatigue des matériaux.

Nous avons présenté des notions théoriques sur le phénomène de fatigue ainsi que les paramètres ayant une influence sur la limite d'endurance d'une pièce mécanique. et recherche bibliographique sur la courbe de Wöhler.

Nous avons effectué une simulation numérique par l'utilisation code « ANSYS –workbench » pour étudier le comportement de fatigue en flexion rotative de deux acier XC38 et A60.

Nous avons constaté que la variation du rayon de l'éprouvette, influe beaucoup sur la période de rupture puisque pour les mêmes contraintes les nombres de cycle sont différents.

Nos résultats numériques se rapprochent biens avec les résultats expérimentaux réalisé par [33]. En effet les valeurs des contraintes sont rapprochées, cependant celles des nombres de cycle sont un peu différents car les essais expérimentaux sont donnés après rupture des éprouvettes alors que la simulation nous donne la zone et la valeur de la contrainte critique ou aura lieu la rupture et le nombre de cycle est calculé analytiquement en fonction de cette contrainte pour les mêmes types d'acier ce qui prouvent que notre travail est bon et notre simulation concorde bien avec le travail expérimental à quelques différences prés.

Nous espérons que notre travail trouve un intérêt par les futurs étudiants.

Bibliographie

- [1]. Bardia ESMAEILLOU (2011) Approche cinétique du comportement en fatigue du Polyamide 66 renforcé par 30% de fibres de verre Thèse de Doctorat, ENSAM SMI de paris. École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur. Doctorat Paris Tech.
- [2].BOIVIN Y., Approche moderne de conception et d'analyse de durabilité d'un châssis de motoneige, Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences appliquées, Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 1999, p. 105
- [3]. Mohamad JABBADO (2006) Fatigue polycyclique des structures métalliques : durée de vie sous chargements variables Thèse de Doctorat, de l'Ecole Polytechnique Spécialité : Mécanique et Matériaux de Bordeaux.
- [4].Claude Bathias & André Pineau. Fatigue des matériaux et des structures 1. Hermes-Science and Lavoisier, 11 rue Lavoisier, Paris, 2008.
- [5]. Belkacem, Meddour. Fatigue des matériaux Cours & Exercices. KHENCHELA : Université de ABBAS Laghrou, 16 September 2016.
- [6].ZALT, Abdulkader. endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des joints soudés de type caisson. s.l. : Université de Lorraine, 18 octobre 2012.
- [7]. Introduction à la résistance des matériaux Cours RDM / A.U : 2012-2013x
- [8]. BAAJ, Hassan. comportement a la fatigue des materiaux granulaires traites aux liants hydrocarbonés. s.l. : l'institut national des sciences appliquees de lyon, 2002. :02 isal 0034
- [9]. C. BATHIAS et J. P. BALLON "Fatigue des matériaux et des structures", Edition Collection Université de Compiègne, 1er trimestre 1980.
- [10]. a. brand, j.f. flavenot, r. gregoire et c. tournier " données technologiques sur la fatigue", édition cetim, 1992
- [11].N. OVSEENKO and al "The effect of machining methods on the fatigue strength of rolling rolls", Russian Engin. Journal Vol.60 No.9, 1980, pp47-48.
- [12]. achour, toufik. étude des techniques de réparation. constantine : s.n., 2010/2011.
- [13]. f. montheillet and f. moussy. physique et mécanique de l'endommagement. Éditions de physique, 1986. travaux du gréco grandes déformations
- [14]. ABBOUCHI, Houssein. Etude de la fatigue de contact de roulement.Approche expérimentale dans un matériau fragile. s.l. : École Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur, 11 décembre 2008.

- [15]. sun, lingtao. étude numérique de l'amorçage et de la propagation. s.l. : institut des sciences et technologies, 04 mai 2012.
- [16].j. l. engerand. Mécanique de la rupture. Technique de l'ingénieur, b 5 060, 1990, 12 pages
- [17].Forsyth, P. J. E. (1957). Slip-Band Damage and Extrusion. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 242(1229), 198-202.
doi:10.1098/rspa.1957.0168
- [18].Wood, W. A. (1958). Formation of Fatigue Cracks. Phil. Mag, 3, 692-699.
Yamada,
- [19]. 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.
- [20].ASM. (1987). ASM Handbook (9e éd. vol. 12, Fractography): ASM International.
- [21]. Berrehili, Abdelmoutalib. Comportement cyclique et tenue en fatigue sous. s.l. : Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, 16juin2010.
- [22]. Bathias, C. et Pineau, A. (2008). Fatigue des matériaux et des structures : Introduction, endurance, amorçage et propagation des fissures, fatigue oligocyclique et gigacyclique. Numéro vol. 1 de Traité MIM : mécanique et ingénierie des matériaux. Matériaux et métallurgie. Hermès Science Publications
- [23]BOIVIN, J. BAHUAUD M. INTRODUCTION AU CALCUL DES STRUCTURES SOUMISES A LA FATIGUE. LYON : INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, 1971.
- [24].MENOUILARD, Thomas. DYNAMIQUE EXPLICITE POUR LA SIMULATION NUMÉRIQUE DE PROPAGATION DE FISSURE PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS ÉTENDUS. Lyon : l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
N°d'ordre 2007-ISAL-0048.
- [25]. MESTAT, Philippe. Modèles d'éléments finis et problèmes de convergence en comportement non linéaire. s.l. : Laboratoire central des Ponts et Chaussées, 1998 - RÉF. 4187 - pp 45-60.
- [26]. MESTAT, Philippe. Maillages d'éléments finis pour les ouvrages de géotechnique Conseils et recommandation. s.l. : LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES, NOVEMBRE-DÉCEMBRE 1997 RÉF. 4161 - PP. 39-64. 212.
- [27] .J-H SAIAC - Méthode des éléments finis. Analyse numérique des équations aux dérivées partielles – 08 06 2006

- [28] turner, m.j., r.w. clough, h.c. martin et l.c. topp: stiffness and deflection analysis of complex structures. journal of the aeronautical sciences, 23 :805–882, 1956.
- [29].Oudin, Hervé. Méthode des éléments finis. s.l. : Ecole Centrale de Nantes, 2008.
- [30] J. Grrigues; La méthode des élément finis; Écoule supérieure de mécanique de Marseille, janvier 2002.
- [31]. Garon, André, Fortin André. Les éléments finis :de la théorie à la pratique. s.l. : Université Laval ,École Polytechnique de Montréal, 4 novembre 2017.
- [32]. BENHAMOUDA, Ahmed. ETUDE DU COMPORTEMENT DES FISSURES DANS LES TUBES SOUS PRESSION INTERNE. CONSTANTINE : DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, 23 Juin 2010.
- [33]. A., Boudilmi. Contribution à l'étude de la fatigue des matériaux. M'sila : Département de Génie Mécanique, juin 2016.

ملخص

هذا العمل يتعلق بمحاكاة سلوك الإجهاد بواسطة الانحناء الدوراني لمادة معينة، محاكاة إجهاد القطع بمساعدة برنامج محاكاة وفقا لمعطيات آلة اختبار الانحناء الدوراني بقسم الهندسة الميكانيكية، عدد الدورات يحسب بواسطة علاقة حساب نظرية للمرجع باستعمال نتائج المحاكاة، هذه النتائج موضحة بيانيا عن طريق منحنى وولر الكلمات المفتاحية : الإجهاد، مدة الحياة، المحاكاة الرقمية، الانحناء الدوراني

Résumé

Ce travail concerne une simulation du comportement en fatigue par flexion rotative d'un certain matériau.

la contrainte de rupture est simulé à l'aide du code « ANSYS 18.1 » d'après les données de la machine de flexion rotative du département de génie mécanique. Le nombre de cycle est calculé d'après les formules théoriques de la bibliographie en utilisant les résultats de la simulation.

Les résultats de cette simulation est illustré graphiquement par la courbe de Wöhler σ -N.

Mots clés :

Fatigue, flexion rotative, endurance, durée de vie.