



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de : **MASTER**

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

ALLAL Yassine & MEKKI Aissa

Thème

CONTRIBUTION A LA CONCEPTION D'UNE MACHINE D'ESSAI DE FATIGUE POUR EPROUVETTES PLATES

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
MENASRI Nouredine	MCA	Président
MAKRI Hocine	MCA	Rapporteur
ROUABHI Youcef	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GM/...../2022

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier vivement mon promoteur le **docteur MAKRI Hocine** pour l'aide qu'il m'a apporté, ses précieux conseils et ainsi pour sa sympathie durant tout le déroulement de ce travail.

Je remercie bien évidemment mon père et ma mère, à qui je dédie ce travail .Elle m'a non seulement encouragé et supporté tout au long de mes études mais dans toutes les sphères de ma vie. Je remercie tous mes enseignants et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin l'aboutissement de ce travail.

Table des matières

Intodution générale

Chapitre I

I. Introduction	3
I.1. Esquisse sur le phénomène de la fatigue des matériaux.....	3
I.2. Définition de la fatigue	3
I.3. Phase de propagation d'une fissure en fatigue :	4
I.3.1. L'initiation (ou amorçage) de la fissure	4
I.3.2. La propagation stable	5
I.3.3. La propagation rapide	5
I.4. Fissuration par fatigue	5
I.4.1. Courbes de propagation des fissures :	5
I.4.2. Expression de la vitesse de fissuration	6
I.4.3. Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue :	7
I.4.4. Faciès de fatigue à l'examen optique :	7
I.4.5. Faciès de fatigue à l'examen microscopique :	8
I.5- Essai de fatigue ou d'endurance	10
I.5.1. Flexion en traction compression :	10
I.5.2- Flexion alternée :	11
I.5.3. Torsion alternée :	12
I.5.4. Essai de fatigue en flexion rotative ou Essai de Moore :	12
I.6. Diagrammes représentatifs de la fatigue:	13
I.6.1. Courbe de Wöhler	14
I.6.2. Courbes d'équiprobabilité de rupture	14
I.6.3. Diagramme de Haigh :	15
I.6.4. Diagramme de Goodman :	17
I.6.6. Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers :	18
I.7. Constituants des matériaux composites.....	20

Chapitre II

II. Introduction.....	20
II.1. La matrice	20
II.1.1. Matrices organiques	20
II.1.1.1. Les résines thermoplastiques (TP).....	21
II.1.1.2. Les résines thermostables (TS)	21
II.1.1.3. Les résines thermodurcissables (TD)	21
II.1.1.4. Les résines époxydes	21
II.1.1.5. Les résines polyesters insaturés	22
II.1.2. Matrices minérales	23
II.1.3. Matrices métalliques	23
II.1.4. Matrices céramiques	23
II.2. Les Renforts	24
II.2.1. Formes linéiques:	24
II.2.2. Formes surfaciques:	25
II.2.3. Mats	25
II.2.4. Tissus et rubans.....	25
II.2.5. Différents types de fibres Fibres de verre.....	26
II.2.6. Fibres de carbone:.....	27
II.2.7. Fibres d'aramide:	28
II.2.8. Fibres naturelles:.....	28
II.3. Architecture des matériaux composites :.....	29
II.3.1. Les Stratifiés :	29
II.3.2. Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels :	29
II.3.3. Structure générale d'un stratifié :	30
II.3.4. Composites sandwiches :	30

Chapitre III

III.1. la Fatigue des composites.....	33
III.2. Fatigue et endurance.....	33
III.3. Les principales caractéristiques et propriétés impliquées dans le comportement en fatigue d'un polymère.....	35

III.4 . Paramètres généraux qui influent sur la tenue en fatigue	36
III.4.1. Les paramètres liés au matériau peuvent être classés en deux groupes	36
III.4.2. Les paramètres liés au chargement sont :	36
III.4.3. Les paramètres liés à l'environnement sont:.....	36
III.5. Endommagement des composites :.....	37
III.6. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement.....	37
III.7. Caractéristiques des mécanismes d'endommagement.....	38
III.7.1. Fissuration matricielle :	38
III .7.2. Décohésion fibre matrice :.....	38
III.7.3. Rupture de fibres	39
III.7.4. Délaminage	39
IV .8. Influence de la direction de sollicitation sur les modes de rupture :	40
III.9. Mesure de l'endommagement et méthode de control :.....	42
III.9.1. Méthodes de contrôle directes :	42

ChapitreVI

VI.1. Introduction.....	44
VI.2.Principe de fonctionnement de la machine d'essai de fatigue	44
VI.3. Les différents mécanismes de transformation de mouvement :	44
VI.4 . Schéma cinématique de la machine étudiée :.....	45
VI.5 .Présentation de logiciel SOLIDWORKS	45
VI.5 .1.Conception par CAO SOLIDWORKS.....	46
VI.6 : Elaborations et conception composants sous SOLIDWORKS	48
VI.6.1. Paroi support de palière à roulements.....	48
VI.6.2 : Paroi support glissière	48
VI.6.3 .Paroi support de la Mâchoire fixe.....	49
VI.6.4 .Glissière.....	49
VI.6.5. Disque et arbre rotatif	50
VI.6.6. Goupille cannelée	50
VI.6.7. Bielle	51
VI.6.8. Pièce pour fixe la Bielle avec Disque et arbre rotatif.....	51
VI.6.9. Bague de fixation pour le roulement.....	52
VI.6.10 . Poulies.....	52
VI.6.11. Mâchoire mobile et fixe	53
VI.6.12 . Moteur électrique.....	53

VI .7. Dessin de définition des composants sous SOLIDWORKS	54
VI .8. Exécution des assemblages sous SOLIDWORKS	62
VI.9. Les Présentation du matériau à étudier	62
VI.9.1. Géométrie des éprouvettes.....	63
VI.9.2. L'éprouvette est soumise à la flexion :.....	63
VI.10. calcul des éléments de la machine	64
VI.10.1. Calcule la vitesse angulaire de rotation ω	64
VI.10.2. Calcule le couple :	65
VI.10.3.calcul la résistance de l'Arber	65
VI.11. Choix des roulement :.....	70
IV.12. Gamme de fabrication.....	74
VI.13.Réalisation de machine d'essai de fatigue pour éprouvettes planes.....	74
VI.14:Estimation du coût de la machine a essai mécanique	74

Listes des figures :

Chapitre I

Figure. I.1. Cycle de contrainte de fatigue.....	4
Figure I.2.Représentation schématique de la propagation d'une fissure.....	5
Figure I.3. Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte	6
Figure I.4. Faciès de fatigue.....	8
Figure I.5. Schéma de la formation des cupules Rupture normale b- Rupture par glissement.....	9
Figure I.6. courbes d'endurance pour plusieurs matériaux	10
Figure. I.7. principe de la fatigue en traction compression	11
Figure. I.8. Machine d'essai de la fatigue en traction compression	11
Figure. I.9. Fatigue en flexion alternée principe et Machine d'essai.....	11
Figure. I.10. principe de la fatigue en torsion alternée	12
Figure. I.11. machine d'essai de fatigue en torsion alternée	12
Figure. I.12. Essai de Moore ou essai de fatigue en flexion rotative.....	13
Figure. I.13. Allure de la courbe de Wöhler.....	14
Figure. I.14. Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques).....	15
Figure. I.15. Diagramme de Haigh (résultats théoriques).....	15
Figure. I.16. Diagramme de Haigh.....	16
Figure. I.17. Diagramme de Goodman.....	17
Figure. I.18. Diagramme de Rôs.....	17
Figure. I.19. Diagramme de Moore- Koppers- Jaspers.....	18

Chapitre II

Figure. II.1.Représentation schématique d'un matériau composite.....	19
Figure II.2. Différentes types de matrices	20
Figure II.3. Types de renfort.....	24
Figure. II.4. Mono filaments réunis en mèches.....	25
Figure. II.5. Le métal déborde de l'envers : excès de pénétration.....	25
Figure II.6. Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus.....	26
Figure II.7. Fibre de verre.....	26
Figure. II.8. Fibre de carbone.....	27
Figure. II.9.Fibres d'armide.....	28

Figure. II.10. Constitution d'un stratifié.....	29
Figure. II. 11. Désignation d'un stratifié.....	29
Figure. II. 12. Matériaux sandwiches à âmes pleines.....	31
Figure. II. 13. Matériaux sandwiches à âmes creuses.....	31

Chapitre III

Figure.III.1. Influence de l'épaisseur sur la résistance à la fatigue d'un joint soudé de type C.....	29
Figure III.2 Schéma illustrant l'influence des paramètres sur le comportement en fatigue.....	36
Figure. III. 3. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement: illustration sur un matériau stratifié	38
Figure. III. 4. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement: illustration sur un matériau stratifié	38
Figure. III. 5. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement: illustration sur un matériau stratifié	38
Figure. III. 6. Micrographies des faciès de rupture d'un composite polyester renforcé a.....	39
Figure. III.7. Pull-out des fibres, rupture des fibres et délaminage dans la surface de rupture après (a) rupture en traction (b) rupture en flexion (c) rupture par 'impact.....	40
Figure. III.8 : Mécanisme d'endommagement et surface de rupture d'un stratifié UD présentant une faible adhésion fibre/matrice.....	41
Figure. III.9 : Représentation graphique des mécanismes d'endommagement de composite à matrice TP renforcée par des fibres de carbone soumis à une sollicitation en traction.....	42

Chapitre IV

Figure IV.1. Schémas des mécanismes	45
Figure IV.2.Schéma cinématique de principe de la machine.....	45
Figure IV.3. Différents compartiments du mécanisme de la machine.....	46
Figure IV.4. Paroi support de palière à roulements Réalisée sous SOLIDWORKS.....	48
Figure IV.5. Vue Paroi support glissière réalisée sous SOLIDWORKS	48
Figure IV.6. Vue Paroi support de la Mâchoire fixe Réalisée sous SOLIDWORKS.....	49
Figure IV.7. Vue Glissière réalisée sous SOLIDWORKS	50
Figure IV.8. Vue Disque et arbre rotatif réalisée sous SOLIDWORKS	50
Figure IV.9. Vue Goupille cannelée réalisée sous SOLIDWORKS	50
Figure IV.10. Vue Bielle réalisée sous SOLIDWORKS	51
Figure IV. 11 Vue Pièce pour fixe la Bielle avec Disque et arbre rotatif réalisée sous	51
Figure IV.12 . Vue Bague de fixation pour le Roulement réalisée sous SOLIDWORKS.....	52

Figure IV.13 Vue de Poulies réalisée sous SOLIDWORKS	52
Figure IV. 14. Vue de. Mâchoire de fixation d'éprouvette	53
Figure IV. 15. Vue de Moteur électrique réalisée sous SOLIDWORKS	53
Figure IV. 16. Vue de machine réalisée sous SOLIDWORKS	62
Figure IV. 17. Vue de la machine d'essai de fatigue pou éprouvettes planes après assemblage....	74

Listes des Tableau :

Chapitre I	
Tableau I.1 Faciès de rupture en fatigue.....	6
Chapitre II	
Tableau. II.1. Les avantages et les inconvénients des résines époxydes	22
Tableau. II. 2. Les avantages et les inconvénients de polyesters insaturés.....	23
Chapitre IV	
TableauVI.1 . Différents compartiments du mécanisme.....	47
Tableau VI.2.choix de roulement.....	69
Tableau VI.3 la gamme de fabrication	70
Tableau VI.4. Coût de la matière première.....	75
Tableau VI.5.Prix des accessoires et pièces standard.....	75
Tableau VI.6.Total final des dépenses de la fabrication.....	76
Tableau VI.7.....	76

Introduction Générale

Introduction générale

La fatigue est l'affaiblissement d'un matériau causé par des charges appliquées à plusieurs reprises. C'est le dommage structurel progressif et localisé qui se produit lorsqu'un matériau est soumis à une charge cyclique. Les valeurs de contrainte maximales nominales qui causent de tels dommages peuvent être bien inférieures à la résistance du matériau généralement citée comme limite de contrainte de traction ultime ou limite de limite d'élasticité. Par conséquent, il est nécessaire de tester le matériau pour sa durée de vie en fatigue.

Les matériaux composites sont la nouvelle ère des matériaux. Encore beaucoup de travail est en cours pour tester leurs performances. Différents matériaux composites ont des caractéristiques de résistance à la fatigue différentes pour différents matériaux fibreux et orientations de fibres et, Par conséquent, ils auront des données de fatigue différentes pour différentes combinaisons de matrice et de renforcement.

En raison de l'indisponibilité de la machine et du processus coûteux, les données de fatigue du composite ne sont généralement pas disponibles. Dans cet article, une tentative est faite pour concevoir un système simple qui aide les ingénieurs à générer les données de fatigue facilement et à faible coût les deux types de conditions de chargement en flexion. Les métaux produisent les mêmes données de fatigue pour linéaire, transversal et chargement de type flexion en raison de l'hypothèse de propriété isotrope.

Mais le Composite se comporte différemment pour différents types de chargement en raison de l'empilement des fibres. Dans les cas maximum, les composites sont soumis à une charge de flexion, c'est la raison pour laquelle les données de résistance à la flexion composite,

L'objectif de ce travail de projet est de concevoir une machine capable de tester en fatigue pour le cas de chargement en flexion des matériaux composites et des joints de soudure.

Ce travail comporte quatre chapitres :

- Le premier est une recherche bibliographique, qui comporte des généralités sur les propriétés mécaniques des matériaux et quelques essais mécaniques.
- Le deuxième chapitre est réservé aux généralités sur les matériaux composites, ses éléments constitutants, les différents procédés de mise en forme. Dans le troisième chapitre, traite la Fatigue des composites du point de vue théorique.
- Le quatrième chapitre constitue la partie expérimentale du sujet, dans laquelle le principe

Introduction Générale

de conception et de fonctionnement de la machine est fourni, la description du dispositif ainsi que les différents mécanismes responsables de la transmission ou la transformation de mouvement utilisés. La conception des pièces constitutives des mécanismes et ainsi que les montages des sous-ensembles et ensembles ont été exécutés sous Solidworks.

La réalisation de ce prototype est rendue possible par la récupération des pièces mécaniques déjà utilisées ailleurs, qui sont dans un bon état et qui sont retraitées ou modifiées pour servir et assurer une fonction dans le prototype. Il s'agit de pratiquer le recyclage pour un coût moins cher.

Les conclusions et les perspectives possibles à cette étude ont finalement été dégagées à la fin de ce manuscrit.

CHAPITRE I : LA FATIGUE DE MATERIAUX

I. Introduction

La fatigue est un phénomène qui affecte les matériaux lorsque ceux-ci subissent des contraintes alternées ou des contraintes cycliques. Après un certain nombre de répétitions ou cycles, ces contraintes peuvent provoquer la rupture. Le chargement cyclique critique est souvent inférieur à la limite d'élasticité statique.

I.1. Esquisse sur le phénomène de la fatigue des matériaux

Sous chargement d'amplitude constante, il est généralement admis que les matériaux métalliques possèdent une limite de fatigue, c'est-à-dire qu'il existe un niveau de contrainte en dessous duquel aucun endommagement macroscopique de fatigue n'apparaîtra au bout d'un nombre de cycles très grand (ou infini) en théorie. Différentes définitions physiques de la limite de fatigue existent. Dans certains cas, elle correspond à la contrainte minimale permettant l'amorçage d'une fissure à l'échelle du grain, celle-ci étant supposée se propager sous le même niveau de chargement jusqu'à rupture complète de la structure. Dans d'autres cas la limite de fatigue est définie comme une limite de non propagation d'une fissure amorcée depuis un défaut sous chargement cyclique. Cette définition fait suite à des observations microscopiques ayant permis de mettre en évidence la présence de fissures de fatigue amorcées dans certains grains situés à la surface d'une éprouvette et bloquées contre des barrières microstructurales pour des niveaux de contraintes inférieures à la limite d'endurance. Ce dernier cas est plus délicat à traiter dans la mesure où l'estimation de durée de vie à l'amorçage d'une fissure macroscopique fait intervenir de nombreux paramètres inhérents à la microstructure [1].

I.2. Définition de la fatigue :

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue, la modification des propriétés du métal consécutive à des cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture de la pièce.[2] .

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 en 1964 par une Organisation Internationale de standardisation à Genève.

La fatigue est un mécanisme qui modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures de dimension croissante pouvant conduire à la rupture de la structure, sous l'action de contraintes ou déformations variables (cycliques) dans le temps. La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte bien inférieure à la résistance à la traction du matériau. On représente le cycle de sollicitation en fatigue par la courbe cyclique suivante :

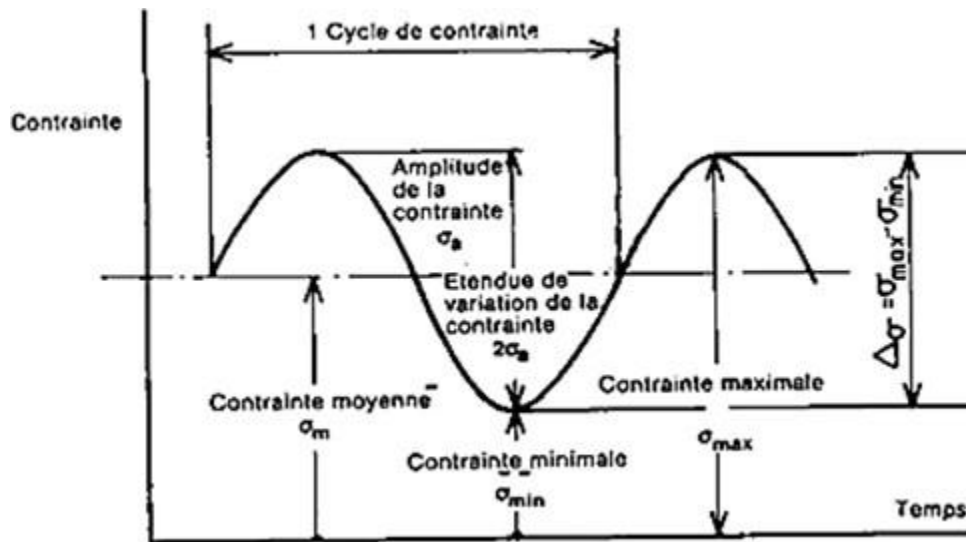


Figure I.1. cycle de contrainte de fatigue.[3]

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} : $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$

I.3. Phase de propagation d'une fissure en fatigue :

L'évolution d'une fissure de fatigue peut être divisée en trois phases: [4]

I.3.1. L'initiation (ou amorçage) de la fissure : (phase A dans la figure 1.2)

Est influencée principalement par la différence de contraintes $\Delta\sigma$, par le facteur de concentration des contraintes (facteur «normalisant» la géométrie du détail), par la microstructure du matériau, par la contrainte moyenne et par l'environnement, on admet que la phase d'initiation est terminée lorsque la fissure atteint une certaine dimension, souvent prise entre 0,1 mm et 0,25 mm. Pendant longtemps la dimension observable de la fissure minimale a été de 0,1mm. Elle est influencée principalement par la différence de contraintes $\Delta\sigma$, par la

géométrie du détail (pointe de la fissure), et par la géométrie de la fissure. Alors que la microstructure du matériau la contrainte moyenne et l'environnement ont une influence moindre.

I.3.2. La propagation stable : (phase B dans la figure 1.2)

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, soumise à la contrainte

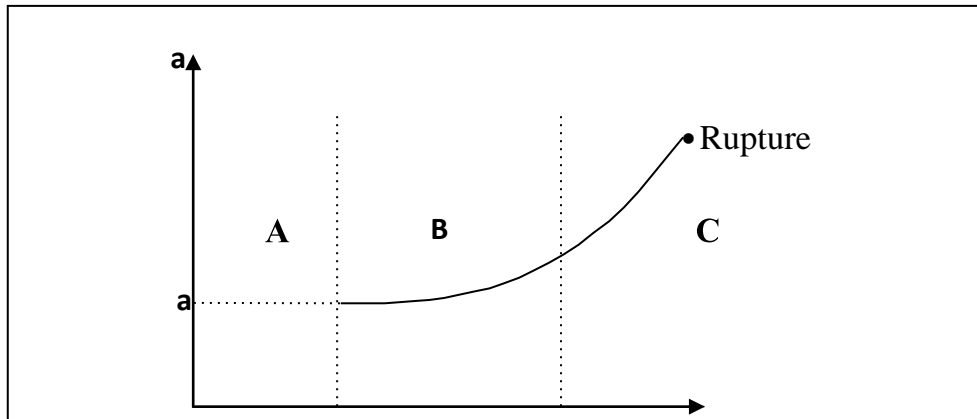


Figure I.2 Représentation schématisée de la propagation d'une fissure [4].

I.3.3. La propagation rapide : (phase C dans la figure 1.2)

Qui conduit à la rupture de l'élément. Le nombre de cycles est ici très faible et la propagation très rapide. Mentionnons encore que la rupture fragile peut intervenir à n'importe quel moment, alors qu'une rupture ductile a lieu après la phase de propagation rapide. Ce qui ne peut pas être décrite par la mécanique de la rupture linéaire élastique traditionnelle.

I.4. Fissuration par fatigue

I.4.1. 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 [4], et au-dessus de laquelle leur propagation serait irréversible (endommagement) et conduirait à la rupture. On a donc cherché à suivre la progression des fissures au cours de la fatigue.

On peut reporter les longueurs mesurées en fonction du nombre de cycle sous les différents niveaux de fissure (figure I.3). Ces courbes indiquent que l'importance relative des différentes étapes, amorçage et propagation, dépend de la contrainte maximale

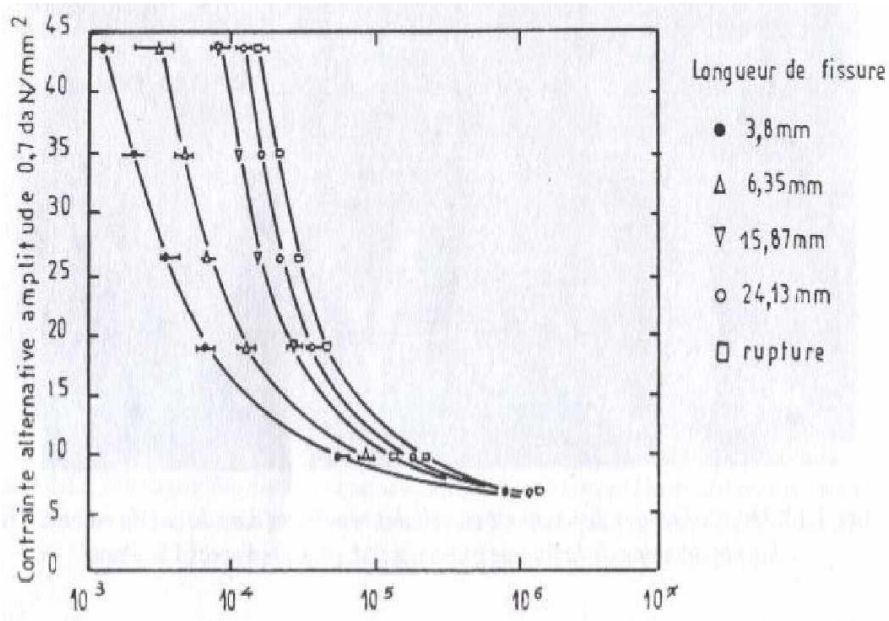


Figure I.3 Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte [5]

Les différents stades observés correspondent à :

- Un stade de croissance rapide des fissures, qui atteignent des longueurs de l'ordre de quelques microns en surface après quelques millions de cycles.
- Un stade de progression plus lente de la fissure en surface, dont la durée dépend de l'amplitude de la contrainte.
- Un stade de progression rapide, qui précède de peu la rupture finale brutale.

I.4.2. 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. Si a est la longueur de la fissure, N le nombre de cycle et s la contrainte maximale des cycles, on peut citer, chronologiquement :

- **Formule de Frost et Dugdale :**

$$\frac{da}{dN} = a(\varepsilon_T \cdot \sigma_N) \quad (1)$$

Où : a est une contrainte qui dépend du matériau et de la contrainte moyenne.

Cette formule est valable pour les fissures petites par rapport aux dimensions de l'éprouvette.

- Formule de McEvelly et Illg :

$$\frac{da}{dN} = f(k_t \cdot \sigma_N) \quad (2)$$

Où : K_t est le facteur de concentration de contrainte élastique théorique de Neuber et σ_N la contrainte normale dans la section fissurée.

Dans le domaine de la fatigue plastique oligocyclique, Boettner, Laird et McEvelly ont proposé la formule :

$$\frac{da}{dN} = f(k_t \cdot \sigma_N) \quad (3)$$

Où : A est une contrainte, et la déformation plastique totale par cycle et n a été trouvé voisin de 2 quel que soit le matériau.

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.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta k)^m \quad (4)$$

Expérimentalement, de nombreux auteurs ont trouvé que la vitesse de fissuration pouvait s'écrire selon la relation de Paris :

Où : ΔK est l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte K et C et m des constantes qui dépendent du matériau [07].

I.4.3- Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue :

L'examen attentif de toute rupture de pièces est une opération d'une grande importance dans le développement d'un produit. Pour l'observateur averti, de lui montrer les causes de rupture, donc envisager les remèdes à appliquer pour que cet état de fait soit supprimé [5].

I.4.4- Faciès de fatigue à l'examen optique :

Sur la section de la rupture, on observe à l'œil et à la loupe un nombre de Caractéristiques, figure (1.4) : Présence de deux zones distinctes d'importance variable selon l'amplitude des contraintes et la nature du matériau :

- La rupture brutale avec faciès à grains ou à nerfs.
- La fissure de surface avec une surface lisse.

L'examen permet de déterminer aussi la nature des sollicitations (Tableau (1.1)).

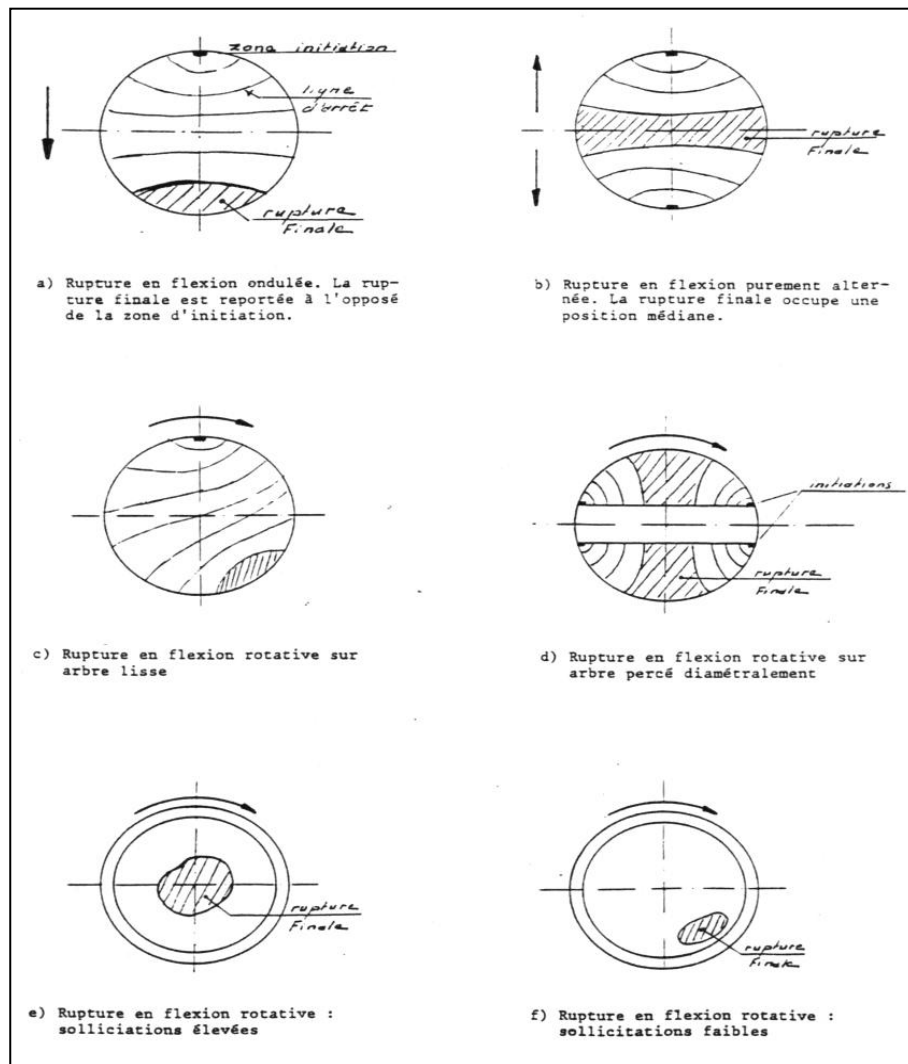


Figure I.4 Faciès de fatigue [6].

I.4.5. Faciès de fatigue à l'examen microscopique :

Le microscope électronique à balayage (MEB) présente l'avantage de permettre un examen direct avec une gamme large et continue de grossissements et sous des orientations qui peuvent varier dans de larges limites, l'observation est complètement différente de celle observée optiquement :

Rupture Brutale (finale) :

a- Fragile : montre les clivages trans-granulaires lisses avec réamorçages par rivières lors des passages des joints de grains ou des clivages à languettes suivant des plans cristallographiques proches à forte densité, le sens de propagation de la rupture est indiqué par le sens des rivières.

b- Ductile : Montre des cupules (creux amorcés sur des précipitations) les deux faces de la rupture présentant ces cupules qui se produisent après une déformation plastique importante,

lorsque les cupules ne sont pas équiaxes (ce qui généralement le cas sauf en traction pure), le sens de propagation est donné par le grand axe des cupules, figure 1.5.

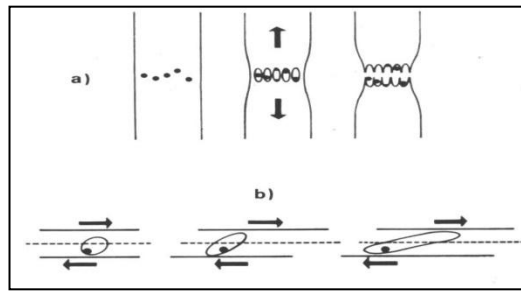


Figure I.5 Schéma de la formation des cupules [6] : a- Rupture normale b- Rupture par glissement.

Tableau I.6 Faciès de rupture en fatigue [6].

Type de sollicitation	Contrainte nom. élevée			Contrainte nom. Faible		
	Concentration de contrainte					
	Nulla	Faible	élevée	Nulla	Faible	élevée
Traction-traction Ou Traction-compression						
Flexion plane Ondulée						
Flexion plane Alternée						
Flexion rotative						
Torsion						

I.5- Essai de fatigue ou d'endurance

C'est un essai statistique dans la mesure où des éprouvettes identiques, sous les mêmes conditions d'essai, donnent des résultats différents. Il y a une répartition statistique des résultats autour d'une valeur moyenne ou médiane. Cette valeur moyenne, une fois déterminée est choisie comme représentative de la capacité du matériau.

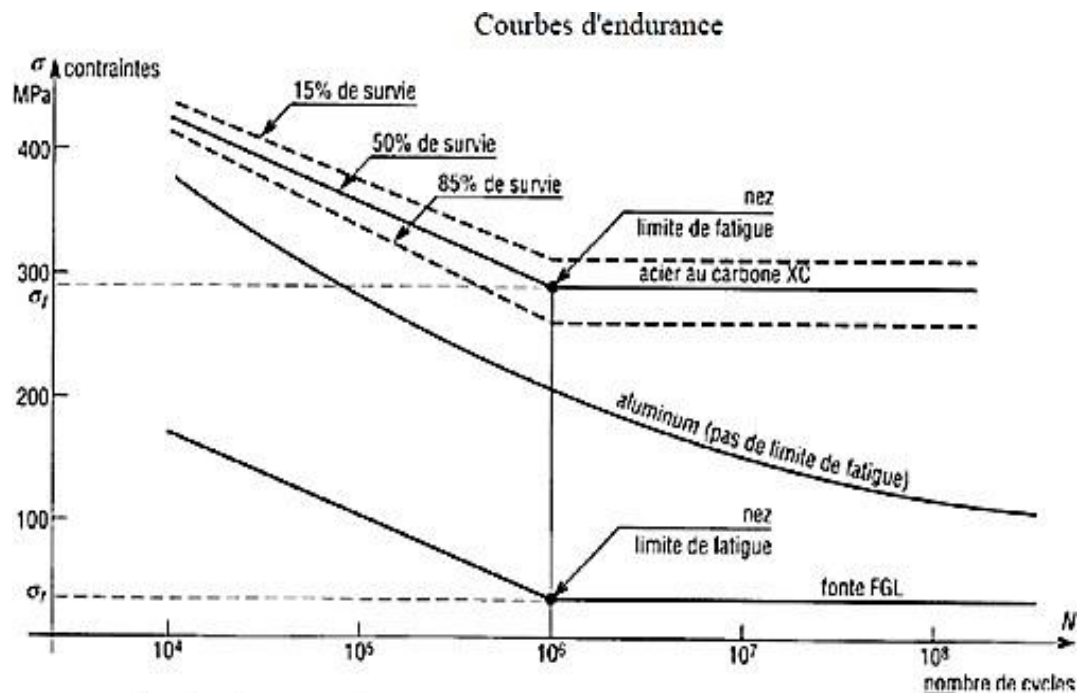


Figure. I.6. courbes d'endurance pour plusieurs matériaux. [2]

Il y a trois types d'essais de fatigue :

- Traction compression,
- Torsion alternée et flexion alternée (le plus classique)
- Flexion pure alternée .

I.5.1-Flexion en traction compression :

La contrainte appliquée est complètement renversée ($\sigma_m = 0$), l'éprouvette est maintenue fixe d'un côté et tirée/comprimée de l'autre côté (Fig. I.8 et I.9)

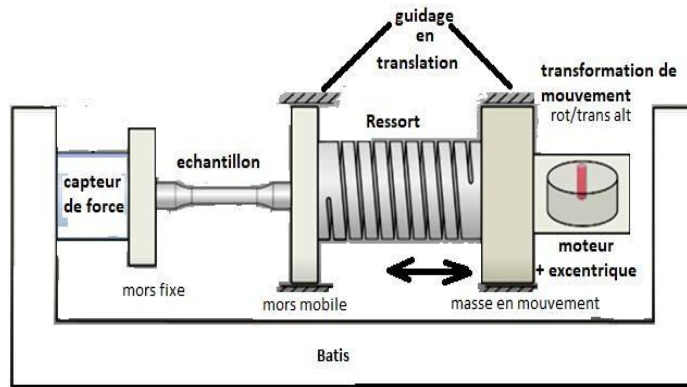


Figure I.7. principe de la fatigue en traction compression. [2]



Figure I.8. Machine d’essai de la fatigue en traction compression. [2]

I.5.2-Flexion alternée :

Dans ce cas les efforts sont opposés en signes durant les cycles effectués. Une poutre vibrant sou l’effet d’un chargement dynamique est en flexion alternée, la fibre supérieure tantôt tirée tantôt comprimée. Comme illustre la figure(I.10)

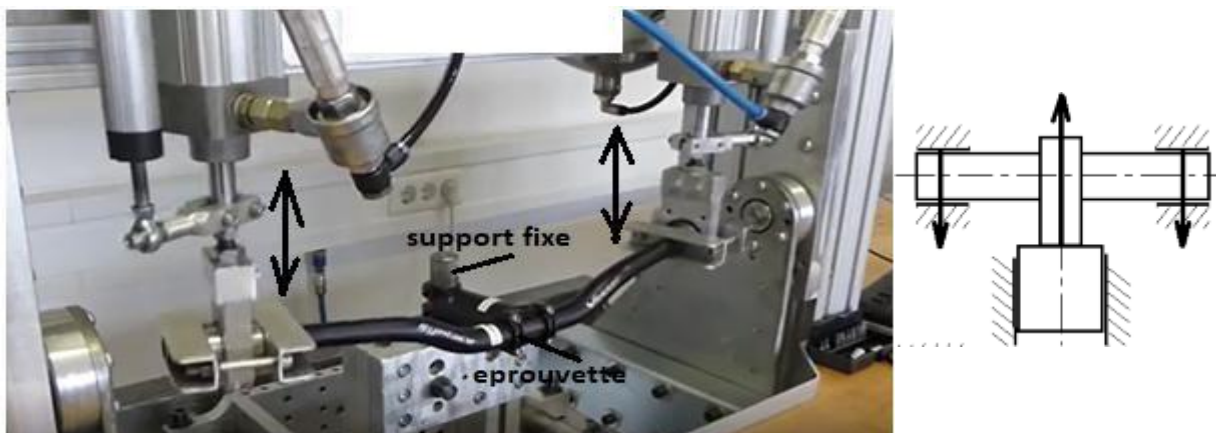


Figure I.9. Fatigue en flexion alternée principe et Machine d’essai

I.5.3. Torsion alternée :

Les contraintes tangentielles ou moments sont de signes opposés. Dans la figure (Fig. I.11 et I.12) l'arbre tournant est oscillant ou en rotation alternative, ce dernier est soumis à une torsion alternative.

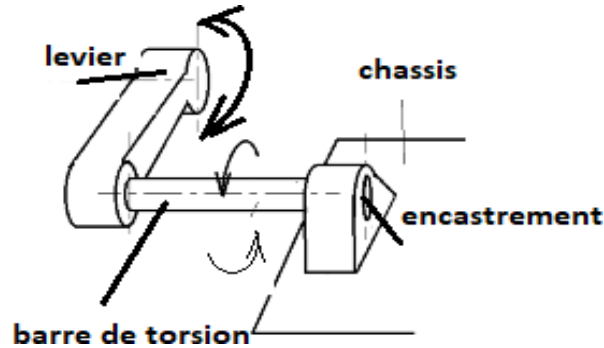


Figure I.10. principe de la fatigue en torsion alternée.[2]

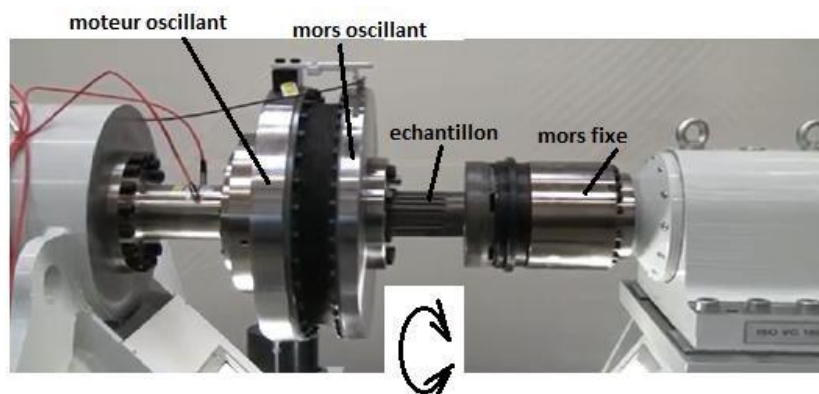


Figure I.11. machine d'essai de fatigue en torsion alternée [2]

I.5.4. Essai de fatigue en flexion rotative ou 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.

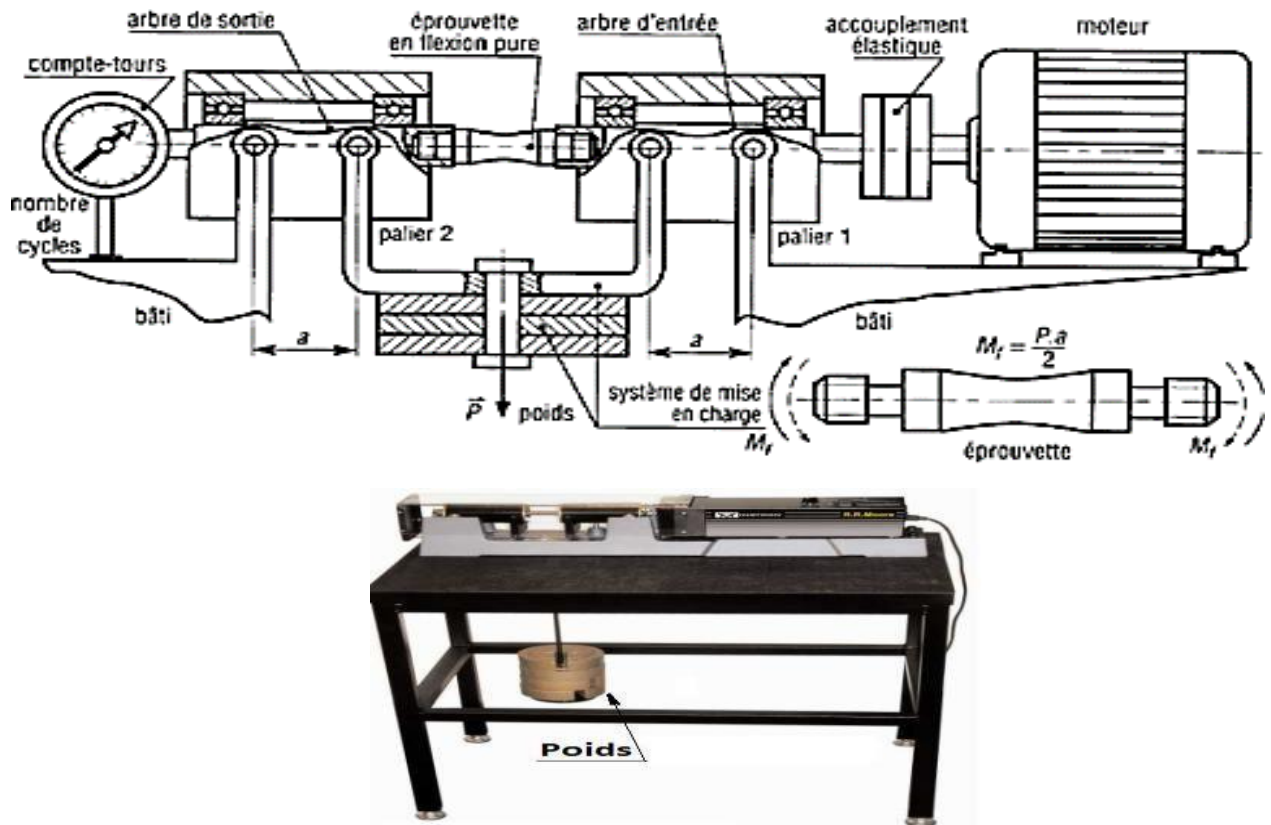


Figure. I.12. Essai de Moore ou essai de fatigue en flexion rotative

I.6. Diagrammes représentatifs de la fatigue:

Il existe un certain nombre de représentation possible des résultats obtenus au cours d'essais de fatigue :

Courbes de *Wöhler*.

Courbes d'équiprobabilité de rupture (courbes P.S.N).

Diagramme de *Haigh*.

Diagramme de *Goodman*.

Diagramme de *Rôs*.

Diagramme de *Moore, Kommers et Jaspers*.

I.6.1. Courbe de Wöhler

(Courbe « S.N » dans les pays anglo-saxon (Sterss - Number of cycles)), Cette courbe représente la variation d'une des contraintes dynamiques précitées en fonction du nombre de cycles à rupture (reporté sur échelle logarithmique). [7]. Cette courbe partage le plan de coordonnées en trois domaines :

Domaine de la fatigue oligocyclique : ruptures surviennent après un petit nombre decycle $N \leq 10^5$ cycles.

Domaine d'endurance limitée : ($N > 10^5$ cycles) ou les ruptures surviennentsystématiquement après un nombre de cycles croissants avec la décroissance des contraintes.

Domaine d'endurance illimitée : où les ruptures ne se produisent pas avant un nombrede cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce.

Entre les deux derniers domaines la courbe de *Wöhler* présente un coude plus ou moins prononcé compris entre 10^6 et 10^7 cycles.

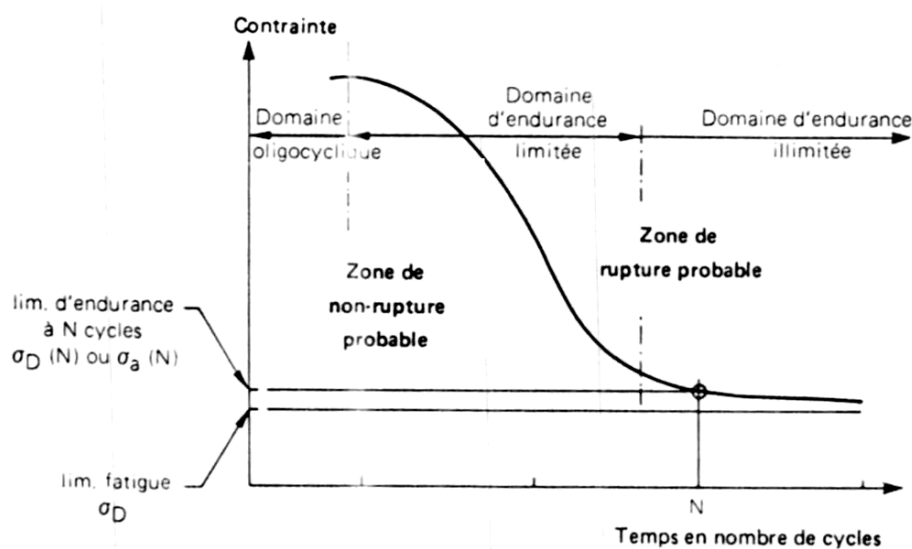


Figure I.13. Allure de la courbe de Wöhler [7].

I.6.2. Courbes d'équiprobabilité de rupture

(Courbes (P.S.N) dans les pays anglo-saxon), La courbe de *Wöhler* dont nous venons de parler étant 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 ». Les courbes d'équiprobabilité de rupture, dont la courbe de *Wöhler* constitue un cas particulier ($p=50\%$ de rupture) sont alors tracées en sous trayant à la valeur moyenne une

certaine valeur fonction de la probabilité de rupture recherchée [7].

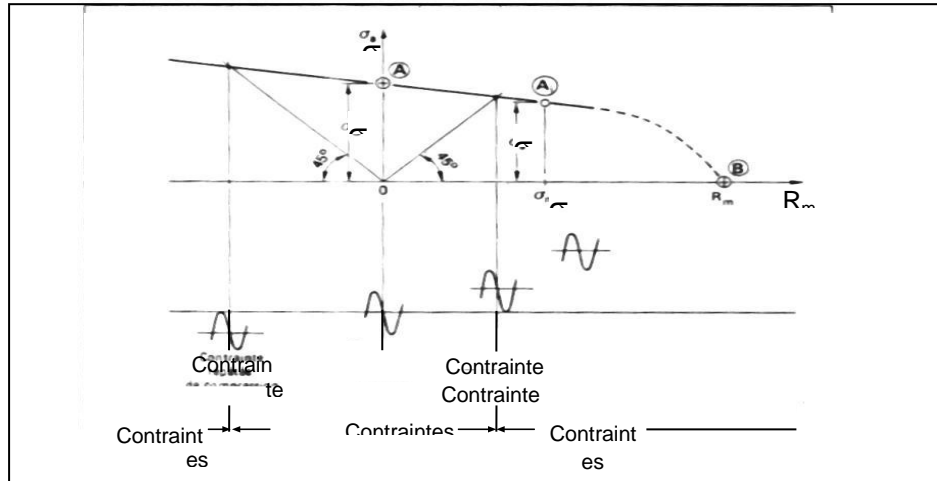


Figure I.14. Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques) [7].

I.6.3. Diagramme de Haigh :

Ce diagramme représente la variation de l'amplitude de la contrainte σ_a en fonction de la contrainte moyenne σ_m , pour un nombre de cycles à rupture [8].

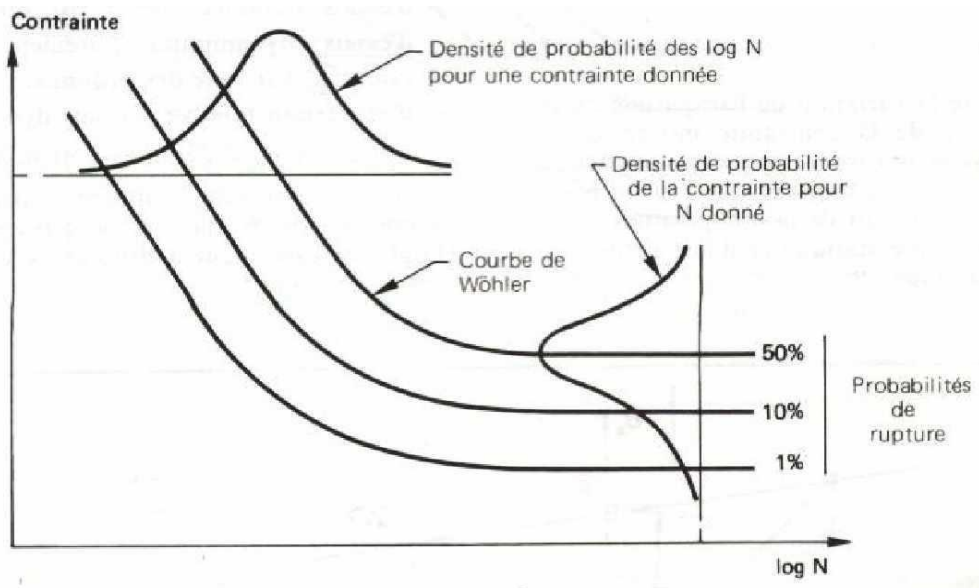


Figure I.15. Diagramme de Haigh (résultats théoriques) [8].

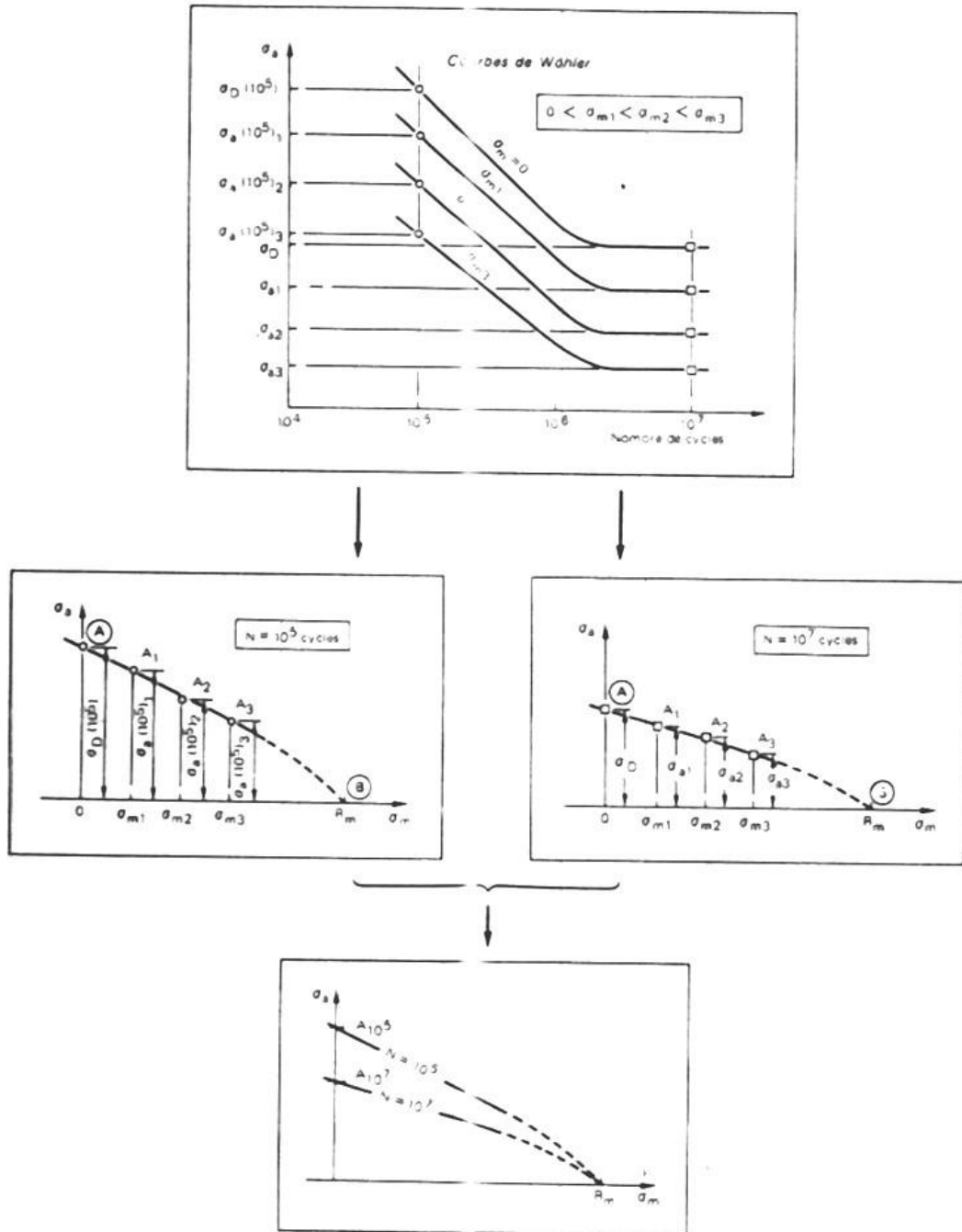


Figure I.16. Diagramme de Haigh [8].

I.6.4- Diagramme de Goodman :

Ce diagramme représente la variation des contraintes maximales σ_{max} et minimales σ_{min} en fonction de la contrainte

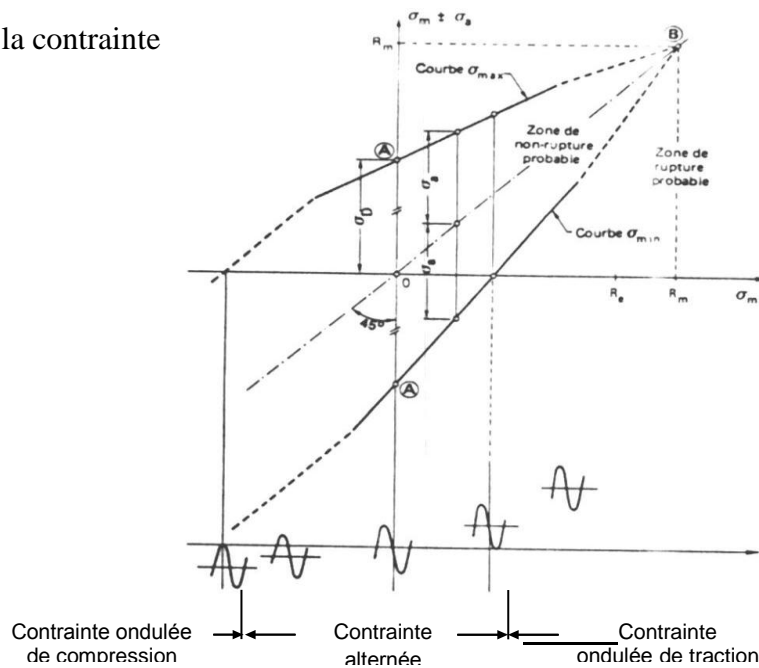


Figure I.17. Diagramme de Goodman [2]

I.6.5- Diagramme de Rôts :

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxon ce diagramme représente la variation de la contrainte maximale σ_{max} en fonction de la contrainte minimale σ_{min} . figure I.20 [8].

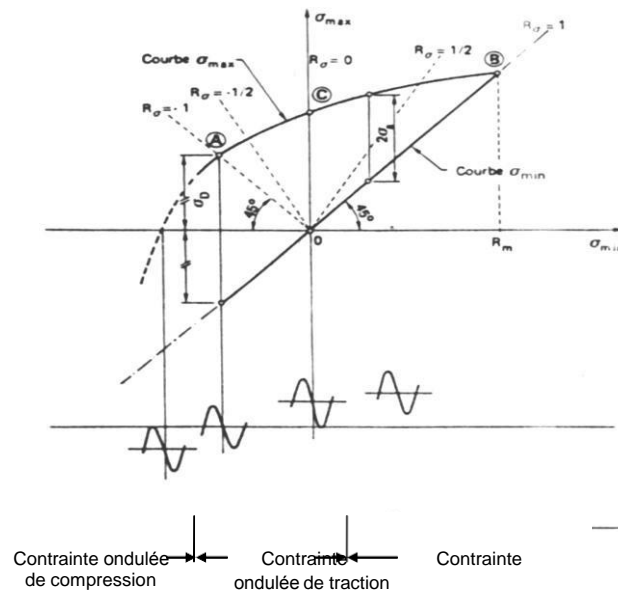


Figure I.18. Diagramme de Rôts.[2]

I.6.6- Diagramme de Moore- Koppers- Jaspers :

Relativement peu connu, essentiellement utilisé dans les pays germaniques, ce diagramme présente la variation de la contrainte maximale σ_{\max} en fonction du rapport des contraintes R

= $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ figure (1.21) [8].

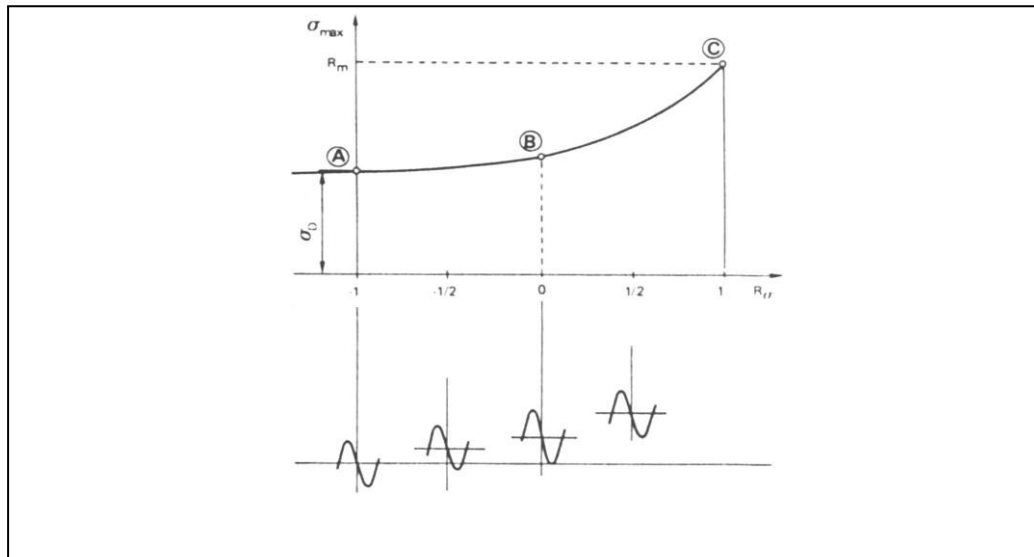


Figure I.19. Diagramme de Moore- Koppers- Jaspers [8].

CHAPITRE II : MATERIAUX COMPOSITES

II. Introduction:

Il existe un grand nombre de matériaux composites qui sont utilisés dans divers domaines et peuvent être classés selon différents critères (la nature de la matrice et la nature du renfort). Par exemple, Le contreplaqué a été utilisé par les anciens Égyptiens pour obtenir une résistance et une résistance supérieures à la dilatation thermique ainsi qu'au gonflement causé par l'absorption d'humidité [9].

Dans ce chapitre nous décrirons les différents constituants entrant dans mise en forme de matériaux composites, et on présente leurs classifications, ainsi que leurs caractéristiques générales. En outre, les paramètres affectant les propriétés des matériaux composites renforcés par des fibres.

II.1. Définition des matériaux composites :

Le terme «matériau composite» désigne un matériau solide et hétérogène, constituée d'une combinaison de deux ou plusieurs substances : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et devenir solidaires pour former un troisième matériau. Pour cela, un agent de liaison, appelé interface, est nécessaire (figure. II.1). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de matériau composite. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres. Les charges et les additifs peuvent être ajoutés au composite sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, afin de modifier une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, la résistance au feu...). [9].

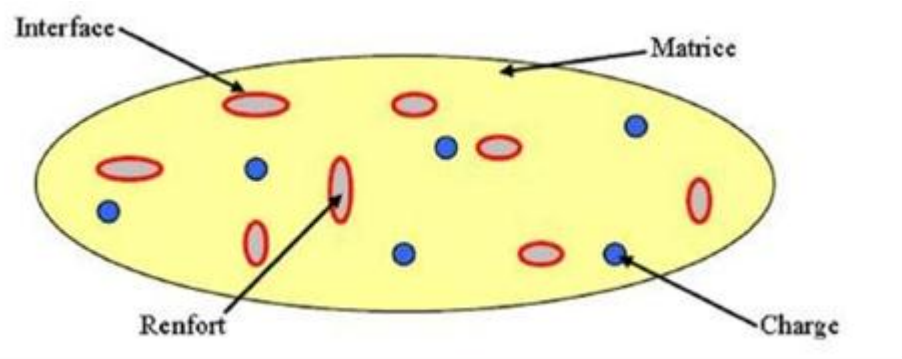


Figure. II.1.Représentation schématique d'un matériau composite [10].

Constituants des matériaux composites

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

La matrice (liant).

Le renfort.

Les charges et les additifs.

II.2. La matrice :

La matrice est un matériau organique léger, facilement déformable. Le rôle de matrice est: lier les fibres du renfort fibreux entre elle, la répartition de la charge mécanique et les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) sur tous les renforts, permet la cohésion des fibres pour une meilleure homogénéisation de l'ensemble et assure leur protection chimique. La matrice doit avoir une masse volumique faible afin de conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifique élevées [11.12].

Il existe différentes types de matrices qui sont utilisées dans les matériaux composites comme représenté sur la figure. II.2.

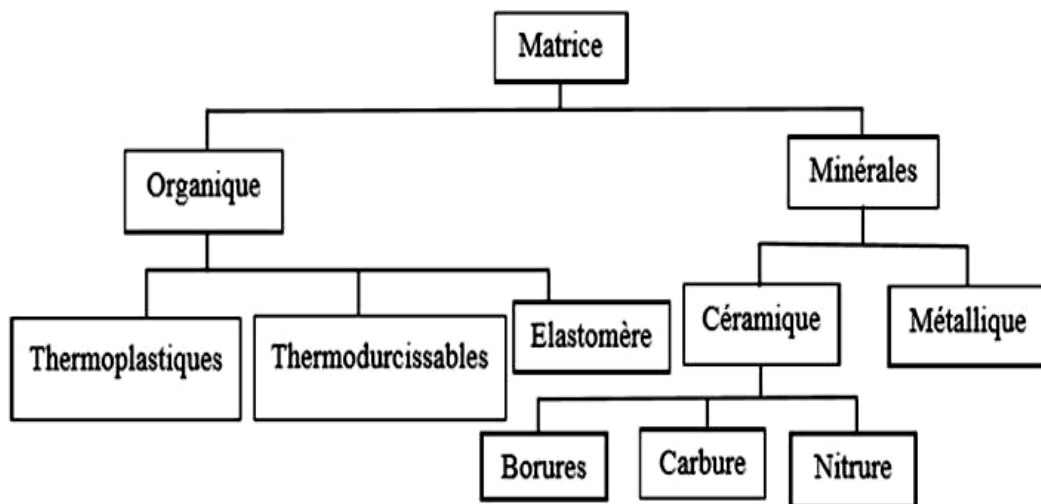


Figure. II.2.Différentes types de matrices [11].

II.2.1. Matrices organiques :

Dans le cas des composites à matrices organiques, on peut citer trois types de matrices utilisés : les résines thermoplastiques (TP), les résines thermostables (TS), les résines thermodurcissables (TD). Elles sont obtenues à partir de polymères, leurs propriétés sont les suivantes :

- Faible densité .
- Faible coût .

- Bonnes propriétés mécaniques .
- Bonne résistance thermique .
- Bonne résistance aux solvants et à l'humidité .
- Bonne adhésion aux fibres .
- Bonne résistance au feu et à l'émission des gaz toxiques [13].

II.2.1.1. Les résines thermoplastiques (TP) :

Les résines thermoplastiques sont des polymères qui fondent lors du chauffage, deviennent formables et retrouvent leur forme solide lors du refroidissement, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (force de van der Waal, liaisons d'hydrogène) [14,15].

II.2.1.2. Les résines thermostables (TS) :

Ce polymère présente des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées, supérieures à 200°C, appliquées de façon continue. Elles sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace [16].

II.2.1.3. Les résines thermodurcissables (TD) :

Les thermodurcissables sont jusqu'à présent les plus utilisées dans l'industrie des composites à matrice organique du fait de leurs propriétés mécaniques et de leur stabilité une fois transformés. Elles subissent une transformation irréversible et durcit lors montée en température au cours de la polymérisation lors de la montée en température en formant un réseau tridimensionnel de monomères liés par liaisons covalentes. Après le traitement thermique les résines transforment en produits essentiellement infusibles et insolubles, ne peut être formé qu'une seule fois, Généralement associées à des fibres longues ou continues. Aussi Ces résines sont exceptionnellement utilisées avec renforts, en raison de leur fragilité [17,18].

Les principales résines thermodurcissables sont : les résines époxydes, les résines polyesters insaturés, les résines de condensation.

II.1.1.4. Les résines époxydes :

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles sont préférentiellement utilisées pour les composites hautes performances [19].

Tableau. II.1. Les avantages et les inconvénients des résines époxydes [20].

Les avantages	Les inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> • Excellentes propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et un bon comportement chimique • Faible retrait (1 à 2 %). • Excellente adhérence sur fibres. • Auto-extinguibilité. • Mise en œuvre facile, sans solvant. 	<ul style="list-style-type: none"> • Prix élevé. • Sensibilité à l'humidité et aux UV. • Vieillessement sous température. • Sensibilité aux chocs. • Temps de polymérisation

Les résines de condensation

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques.

- Les résines phénoliques sont les plus anciennes des résines thermodurcissables. Elles présentent une excellente stabilité dimensionnelle, une bonne tenue à la chaleur, une bonne résistance aux agents chimiques, de bonnes caractéristiques mécaniques et un faible coût.
- Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter : la possibilité d'utilisations alimentaires et la possibilité de colorer les résines.
- Les résines furaniques sont assez peu utilisées à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyesters. Parmi leurs avantages : un durcissement plus rapide que les résines phénoliques et une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs [20].

Les résines polyesters insaturés

Un polyester insaturé est une résine linéaire de polyester basée sur les acides dibasiques et les alcools dihydriques ayant la capacité de se réticuler avec des monomères de vinyle dans le but de produire des copolymères thermodurcissables. Elle est le plus mise en œuvre dans matériaux composites [21].

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont du type rigide [20].

Aussi il existe différents types de résines :

Ortho phtalique : la plus courante.

Iso phtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité.

- Chlorée : apportant une auto exigibilité.
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques [22].

Les avantages et les inconvénients de polyesters insaturés sont représentantes dans le tableau. II .2.

Tableau. II. 2. Les avantages et les inconvénients de polyesters insaturés [22].

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Bonne accrochage sur fibres de verre • Translucidité • Bonne résistance chimique • Mise en œuvre facile • Tenue en température (> 150 °C) • Prix réduit 	<ul style="list-style-type: none"> • Inflammabilité (sauf résineschlorées) ; • Tenue vapeur et eau bouillante • Retrait important (6 à 15 %) • Durée de conservation en pot limitée • Emission de styrène

II.2.2. Matrices minérales :

Ce sont des matrices formées à base de carbure de silicium et de carbone. Elles permettent d'atteindre de hautes températures.

II.2.3. Matrices métalliques :

Elles présentent plusieurs propriétés :

- rigidité et résistance mécanique élevées .
- fragilisation par le renforcement fibreux .
- bon comportement à haute température .
- densité élevée .
- mise en œuvre difficile .

II.2.4. Matrices céramiques :

Elles ont caractère réfractaire. Elles sont utilisées dans des pièces qui doivent subir sans dommage de très hautes températures, leur coût est très élevé.

II.2. Les Renforts :

Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue de feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. les caractéristiques recherchées pour les renforts sont : des caractéristiques mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une bonne facilitée de mise en œuvre, un faible coût, etc. La figure suivante représente différents types de renforts (figure II.3):



Figure. II.3. Types de renfort. [24]

En fonction des utilisations, les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc. Toutefois, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées, et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 et 0,7. Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales:

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.).
- Sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats, etc.).
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

II.3.1. Formes linéiques:

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelques micromètres (une dizaine), et ne peuvent par conséquent pas être utilisées sous forme unitaire. Pour leur utilisation pratique, ces fibres sont réunies en fils ou en mèches de différentes formes. La nomenclature générale des diverses formes linéiques est encore mal déterminée, et généralement dérivée de celle utilisée pour les fibres de verre.

La fibre unitaire est généralement appelée filament élémentaire ou mono filament. Les mono filament sont ensuite réunis en fils ou mèches (FigureII. 4). Les fils continus ou

discontinus sont caractérisés par leur masse linéique. Cette masse linéique dépend du diamètre et du nombre de mono filaments.

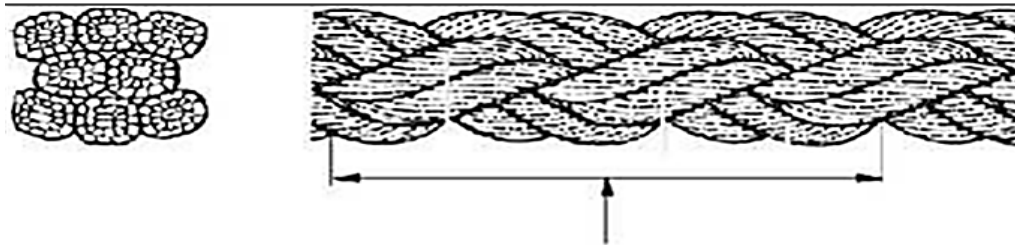


Figure. II.4. Mono filaments réunis en mèches. [24]

II.3.2. Formes surfaciques:

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types: mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

II.3.3. Mats :

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

II.3.4. Tissus et rubans :

Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèche, etc., réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué (Figure II .5).

- D'une chaîne, ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu.
- D'une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne.

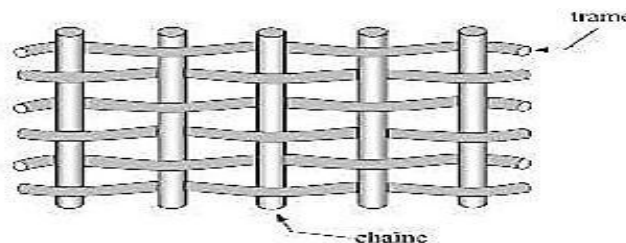


Figure. II.5. chaîne et trame d'un tissu.

Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés (fils simples, mèches, etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaînes et des fils de trames. La Figure II. 6, illustre les armures classiques utilisées : toile ou taffetas, sergé, satin, armure croisée, armure unidirectionnelle

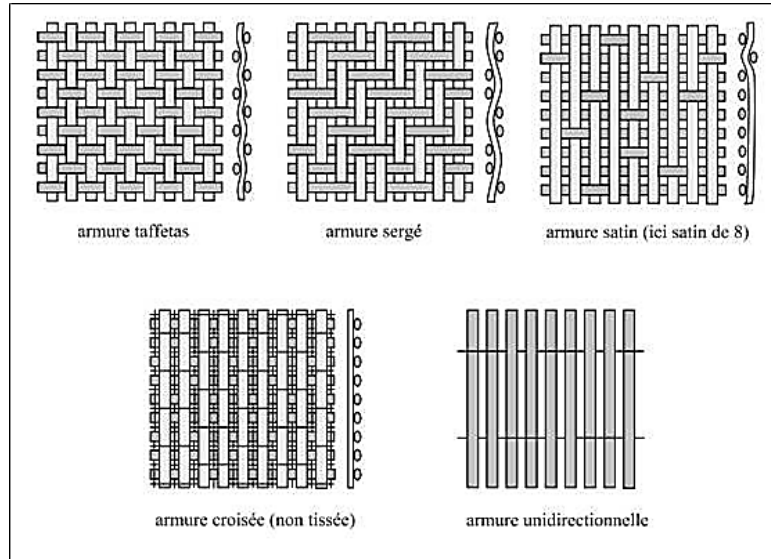


Figure.II.6. Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus. [24]

II.3.5. Différents types de fibres Fibres de verre :

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètre), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice ; alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites.

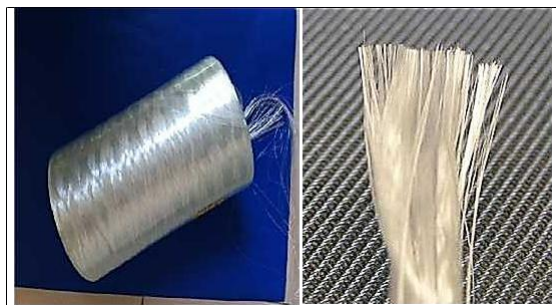


Figure. II.7 . Fibre de verre.

Suivant leurs compositions, différents types de verres filables peuvent être obtenus (tableau II.1). Dans la pratique, les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement. Les autres verres, représentant globalement une faible quantité (environ 1%) sont réservés à des applications spécifiques:

- Le verre D, à hautes propriétés diélectriques, pour la construction de matériel électronique de télécommunications.
- Le verre C, résistant aux agents chimiques pour les couches superficielles des structures particulièrement exposées sur le plan chimique.
- Les verres R et S, à caractéristiques mécaniques élevées pour la réalisation de structures à hautes performances mécaniques.

Tableau. II. 1. Différents types de verres filables.

Type	Caractéristiques générales
E	A usage général; bonnes propriétés électriques
D	Hautes propriétés diélectriques
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
R, S	Haute résistance mécanique

II.3.6. Fibres de carbone:

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques d'autant plus que leur masse volumique est faible (généralement inférieure à 2000 Kg/m³). Il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue en température, en atmosphère non oxydante. En effet, leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500 °C environ. Cette propriété a conduit à développer des composites fibres de carbone/matrice de carbone, à hautes tenue thermique, utilisés dans les tuyères de fusée, les plaquettes de freins (camion, avions), les éléments de fours, etc. ces matériaux, revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante, trouvent également des applications en atmosphère oxydante dans le domaine spatial : bords, tuiles, etc.



Figure. II.8. Fibre de carbone

Le produit de base est le fil contenu ou stratifié carbone, constitué de mono filaments de carbone (par exemple : 500, 1000, 3000, 6000, 10000, etc. filaments) assemblés sans torsion. Ces stratifiés peuvent être utilisés directement pour les procédés de fabrication de composites par pultrusion ou par enroulement filamentaire. Les stratifiés peuvent être également tissés pour obtenir des rubans, des tresses, des tissus unidirectionnels ou multidirectionnels, des tissus hybrides (verre- carbone, Kevlar- carbone) etc. Ces diverses formes peuvent éventuellement être pré imprégnées .

II.3.7. Fibres d'aramide:

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de "KEVLAR", nom commerciale de la fibre .Les fibres aramides sont des fibres polyaramides ou polyamides aromatiques. Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont reportées dans le tableau 4 pour des mono filaments. Sur fils multi filaments, les caractéristiques sont généralement plus faibles. Leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres aramides:

- Résistances faibles à la compression, à la flexion.
- Sensibilité au cisaillement

Ces faiblesses sont généralement attribuées à une mauvaise adhérence fibre-matrice.

Pour y remédier, des ensimages adaptés sont développés.



Figure. II.9 . Fibre d'aramide

II.3.8. Fibres naturelles:

Les fibres naturelles sont des fibres organiques d'origine animale ou bien végétales ou bien des fibres minérales. Les fibres végétales sont couramment utilisées car ce sont les fibres les plus disponibles. Leur structure complexe est assimilable à celle des matériaux composites renforcés par des fibrilles de cellulose disposées en hélice. [116].

II.4. Architecture des matériaux composites :

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

Par surface : plaques, coques,

Par stratification de couches successives.

II.4.1. Les Stratifiés :

Les stratifiés sont constitués (figure II.10) de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résin es. Nous examinons les divers types de stratifiés.

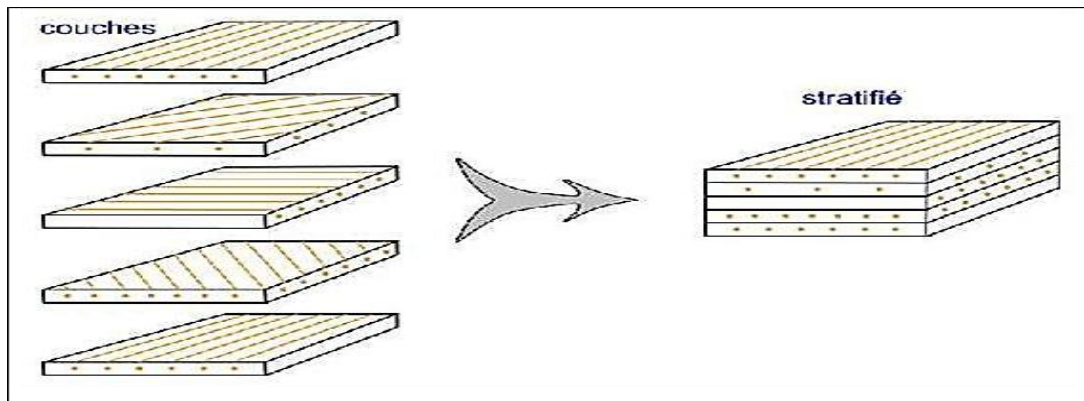


Figure II.10. Constitution d'un stratifié. [23]

II.4.2. Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels :

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués (figure 11) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche.

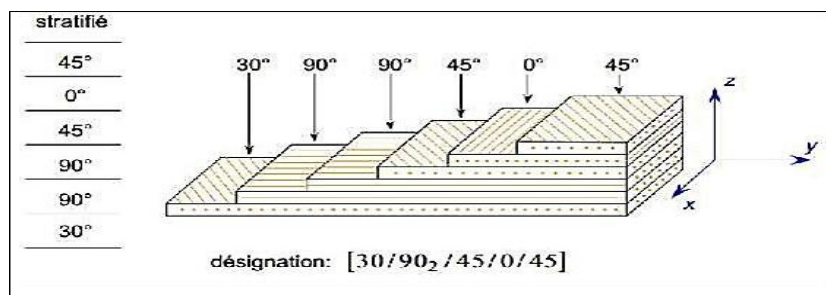


Figure. II.11. Désignation d'un stratifié. [23]

La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

- Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence.
- Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.
- Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.
- Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre. Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code. La désignation dépend du système d'axes choisi. Un exemple est donné à la figure II. 11.

II.4.3. Structure générale d'un stratifié :

Dans le cas général, le renfort de chaque couche sera de natures diverses : fils, stratifils, mats, tissus, fibres de verre, fibres de carbone, etc. Chaque couche doit alors être désignée par l'indication de la nature des fibres, du type de renfort : fils, mat, tissu avec indication de la proportion de fibres suivant le sens chaîne et trame. Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation du matériau composite, en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposées :

- Les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres
- Les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées;
- Une stratification croisée sera sensible au délaminage inter laminaire.
- Une stratification avec au moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir une pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.
- Enfin, il est intéressant de noter qu'une stratification symétrique garantira généralement une bonne planéité du stratifié après démoulage.

II.4.4. Composites sandwichs :

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une âme mat unidirectionnel (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux "feuilles", appelées peaux, possédant de bonnes caractéristiques en traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité. Généralement, le choix des matériaux est fait avec pour objectif initial d'avoir une masse

minimale en tenant compte ensuite des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.). Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

Pour les âmes pleines (figure II.12) :

- le balsa ou bois cellulaire .
- diverses mousses cellulaires .
- des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques.

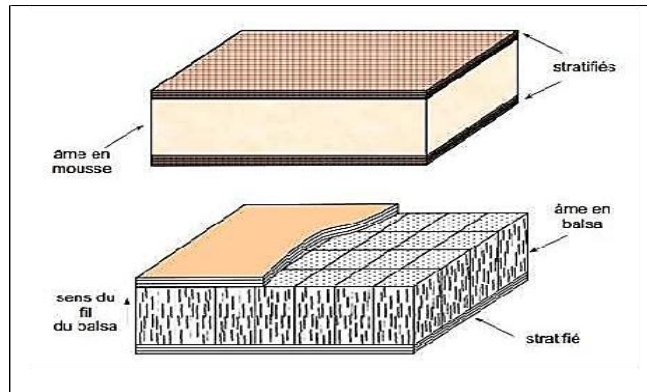


Figure. II.12 . Matériaux sandwichs à âmes pleines. [23]

Pour les âmes creuses (figure I.13), essentiellement nid d'abeilles et profilés :

- des alliages métalliques légers .
- du papier kraft (enduit ou non de résine) .
- du papier polyamide, type papier Nomex .

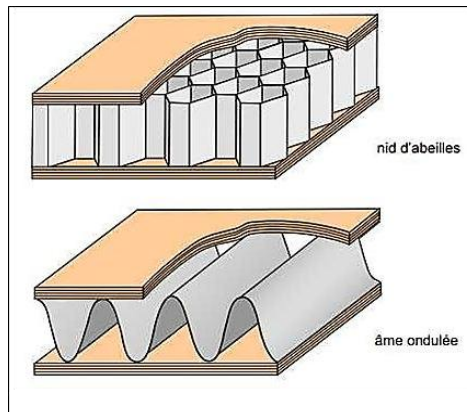


Figure. II.13. Matériaux sandwichs à âmes creuses. [23]

Des âmes mixtes peuvent être utilisées. Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, Kevlar) ou des feuilles d'alliages légers.

Pour que les structures sandwiches jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux, de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence.

CHAPITRE III : LA FATIGUE DE COMPOSITES

III.1. la Fatigue des composites :

Lorsqu'une structure est soumise à une charge d'intensité variable, elle est soumise à un phénomène de fatigue qui peut conduire à sa rupture bien que la charge reste à tout moment inférieure à sa résistance statique. Ce phénomène est lié à l'amorçage et la propagation d'une fissure à partir d'un défaut au sein de la structure, c'est-à-dire un ensemble de circonstances favorables à une décohésion locale du matériau du fait d'une forte concentration de contraintes. L'étude du comportement en fatigue des matériaux présente deux aspects. Le premier est lié à la prédiction de la durée de vie et conduit à l'obtention des courbes de Wöhler. Le deuxième consiste à étudier et identifier le dommage spécifique causé par la fatigue au sein du matériau, et à comprendre comment ce dommage conditionne la durée de vie.

III.2. Fatigue et endurance :

La notion de fatigue ou d'endommagement en fatigue désigne la modification du comportement d'un matériau, suite à l'application répétée d'une sollicitation mécanique cyclique ; conduisant à une rupture prématurée de la pièce pour des amplitudes souvent bien inférieures aux caractéristiques observées en monotone [25]. L'endurance est la capacité du matériau à résister au phénomène de fatigue. Les paramètres caractéristiques d'un cycle de fatigue à déformation (ϵ) ou contrainte (σ) sinusoïdale imposée sont :

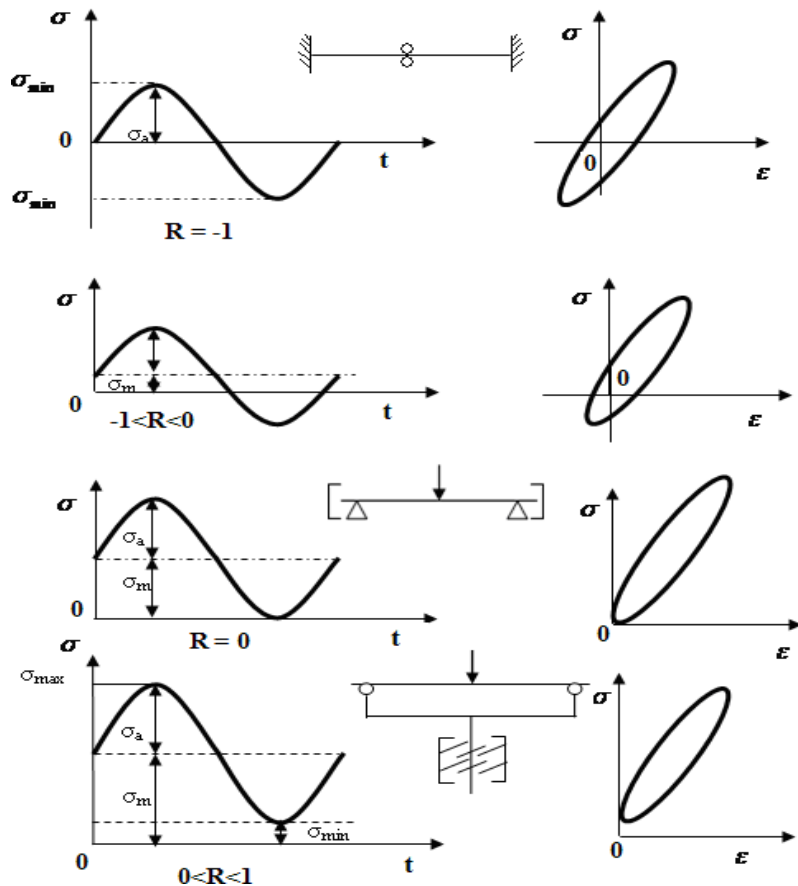
- l'amplitude maximale de la contrainte (déformation) atteinte au cours d'un cycle, notée (σ_a) (ϵ_a) la valeur moyenne de la contrainte (déformation) (σ_m), (ϵ_m)
- le rapport des contraintes maximale et minimale, et le paramètre R :

$$-\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad - \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad - \quad R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

(Ces paramètres sont aussi valables en déformation imposée en remplaçant le terme (σ) par (ϵ) un cycle sinusoïdale de fatigue est alors entièrement décrit par les trois paramètres (σ_{max}) (ϵ_{max}), R et f (fréquences de l'essai) [26]. On est parfois conduit à distinguer La composante alternative σ_a de la composante statique σ_m .

Ainsi, selon les valeurs relatives de ces composantes, et les valeurs de rapport R on distingue plusieurs types d'essais soussollicitations (Figure III.1)

- alternée symétrique : $\sigma_m = 0$ $R = -1$
- alternée dissymétrique : $0 < \sigma_m < \sigma_a$ $-1 < R < 0$
- répétée $\sigma_m = \sigma_a$ $R = 0$
- ondulée $\sigma_m > \sigma_a$ $0 < R < 1$



Remarque

Pour $R=1$, on n'est plus dans la fatigue dynamique mais dans la fatigue statique (fluage, relaxation). Pour des conditions d'essai données (et en particulier pour un niveau ϵ_{max} , ou σ_{max} de sollicitations), on définit la durée de vie du matériau comme le nombre de cycles que le matériau peu supporter avant sa rupture.

III.3. Les principales caractéristiques et propriétés impliquées dans le comportement en fatigue d'un polymère :

- La structure et la composition chimique, la masse molaire et sa distribution, les états physiques.
- Le chargement mécanique du polymère peut générer la rupture de liaisons covalentes puis la croissance des fissures au cours du procédé de fabrication sous l'effet de la force de cisaillement.
- La déformation homogène comme la déformation élastique et viscoélastique. Quand la concentration de contraintes à la tête de la fissure est assez haute et la rupture n'intervient pas encore, la limite d'élasticité du matériau peut être atteinte. Dans le cas des polymères vitreux, le point maximal de la limite d'élasticité présente deux modes : La limite d'élasticité du cisaillement et la limite d'élasticité normale de la contrainte, mais le cas des polymères semi-cristallins est différent. Ils sont parmi les polymères qui ont la meilleure tenue en fatigue. Par contre le mécanisme de la déformation, la balance entre l'énergie dissipée et la résistance à la fissuration dépendent du mode de rupture.
- La déformation non-homogène comme la création de craquelures et bandes de cisaillement. La craquelure est différente dans le cas des polymères et dans le cas des autres matériaux comme les céramiques. La différence est qu'elle n'est pas une fissure réelle et elle nécessite une déformation plastique. Elle dépend du type de sollicitations, de la masse molaire et des paramètres de la fatigue comme, la fréquence, de paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité. Ce phénomène se produit sous certaines conditions pour les polymères amorphes vitreux et quelques polymères semi cristallins. La formation de craquelures se traduit par une dissipation d'énergie et la résistance mécanique du matériau devient faible.
- Le phénomène de transition vitreuse de la matrice avec son changement d'état physique.
- Les modifications morphologiques comme l'orientation et la cristallisation.
- L'effet thermique induit par l'auto-échauffement. [28]

III.4 : Paramètres généraux qui influent sur la tenue en fatigue :

Les paramètres les plus importants sont les paramètres liés au matériau, au chargement et à l'environnement. La Figure. III.2 montre bien cette influence.

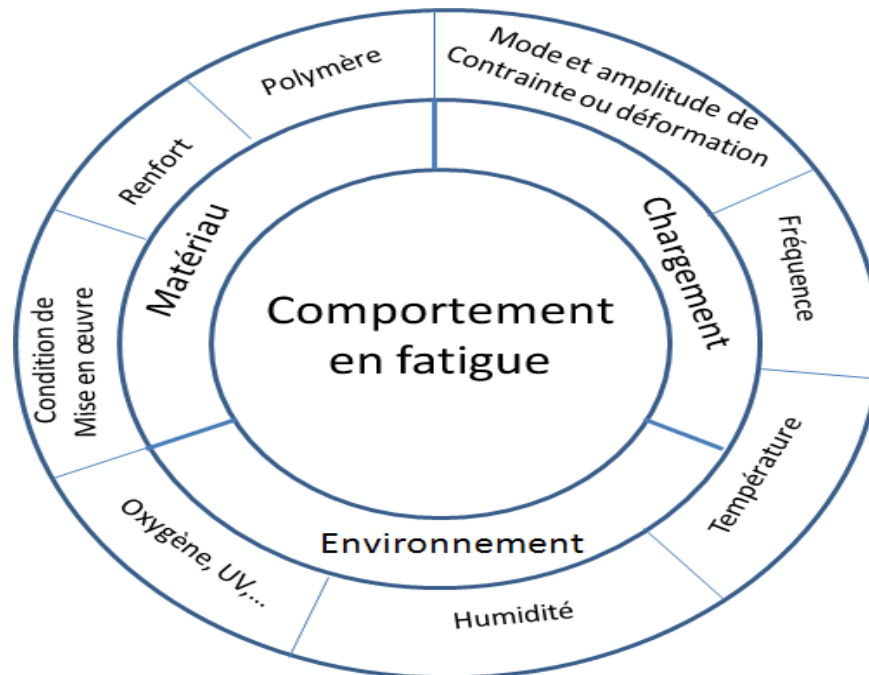


Figure. III.2 : Schéma illustrant l'influence des paramètres sur le comportement en fatigue. [28]

III.4.1. Les paramètres liés au matériau peuvent être classés en deux groupes :

- Les composants d'un matériau composite (matrice et renfort) ;
- Les conditions de mise en forme.

III.4.2. Les paramètres liés au chargement sont :

Le mode et l'amplitude de la contrainte (ou déformation) imposée et la fréquence.

III.4.3. Les paramètres liés à l'environnement sont:

La température et les paramètres agressifs comme l'humidité, l'oxygène, les UV qui peuvent être la cause du vieillissement du polymère. La température peut être un facteur de l'environnement ou un facteur généré lors de la sollicitation. Quand on parle de la température extérieure, elle est un facteur de l'environnement mais quand on parle de la température induite par l'auto-échauffement, c'est un facteur qui dépend directement de la fréquence de sollicitation.

III.5. Endommagement des composites :

Lors de leur vie en service, les pièces peuvent être soumises à diverses sollicitations mécaniques dont les effets peuvent être aggravés par le facteur temps ou par un environnement plus ou moins agressif. Le comportement dépend en grande partie des paramètres microstructuraux. De par leur nature hétérogène, l'endommagement des matériaux composites est complexe ; il se manifeste généralement par la combinaison de trois modes : rupture de fibre, décohésion de l'interface fibre-matrice et fissuration de la matrice.

Ces mécanismes et la multiplicité des facteurs influençant la résistance du composite rendent difficile la description de son endommagement.

Ainsi, il existe des paramètres, tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des plis et l'espacement entre fibres, jouent un rôle très important dans la cinétique de l'endommagement.

III.6. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement

Plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée, unidirectionnelle ou tissés qui se révèlent à différentes échelles d'observation (figure III.3). Les plus significatifs sont les suivants : [29]

- A l'échelle microscopique apparaissent les ruptures d'interfaces : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice et d'autre part, la rupture de fibre, de matrice.
- A l'échelle macroscopique on observe le phénomène de décollement inter pli.
- c'est le délaminage.
- A l'échelle microscopique on observe l'apparition de nombreuses fissures intralaminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau, qui sont parallèles à la direction des fibres.

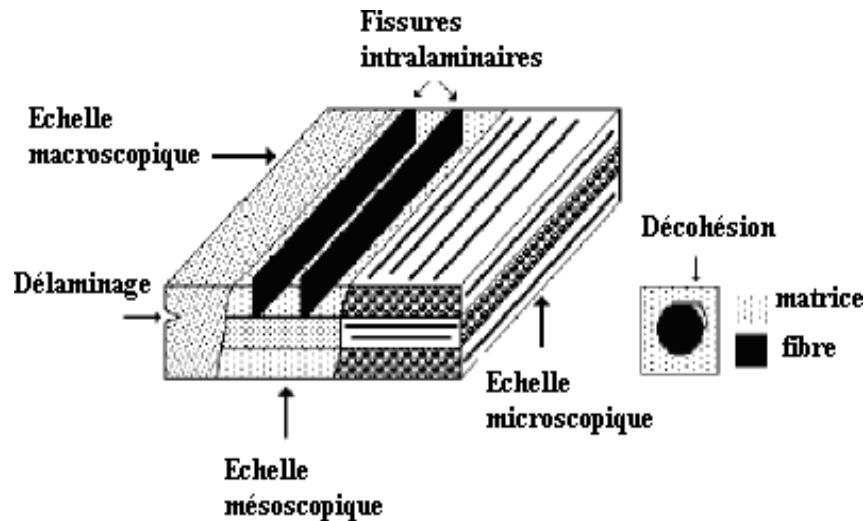


Figure III.3. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement: illustration sur un matériau stratifié.

III.7. Caractéristiques des mécanismes d'endommagement

III.7.1. Fissuration matricielle :

Dans le cas des matrices fragiles, les fissures s'initient dans la matrice en premier lieu ($\epsilon_m^R < \epsilon_f^R$). La fissuration de la matrice se produit, soit par fissuration transverse ou longitudinale. Selon la nature de l'interface fibre-matrice, on assiste à une décohésion entre les fibres et la matrice ou au cisaillement de la matrice (τ_c). Cette dernière aura lieu lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à (τ_c).[30]

III .7.2. Décohésion fibre matrice :

La fissuration de la matrice est accompagnée d'une redistribution des contraintes en faisant intervenir les frottements à l'interface fibre/matrice. On assiste à une perte d'énergie, nécessaire à la création de nouvelles microfissures dans l'interface. Ce mécanisme de fissuration dépend fortement de la nature de l'interface fibre /matrice. Cette caractéristique peut être contrôlée par de différents traitements adéquats de la fibre ou même par l'addition d'agents de couplages. Lakshmanan et Laks ont montré que le traitement alcalin du tissu (toile) de Jute améliore sa compatibilité avec la résine polyester (fig. III.5). Par conséquent, il y a une nette amélioration des propriétés mécaniques des composites (en traction, en flexion, et cisaillement inter laminaire du composite à renfort traité). Ces propriétés sont supérieures à celles du composite à base de jute non traité.

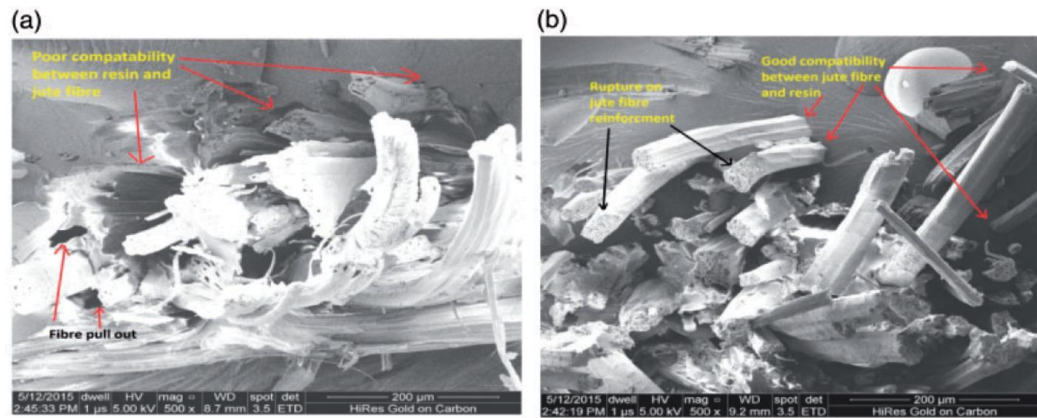


Figure. III.5. Micrographies des faciès de rupture d'un composite polyester renforcé a (a) par un tissu de jute non traité, a droit par un tissu de jute traité par 1% de NaOH(b) .

Une contrainte de cisaillement inter faciale faible favorise le processus de décohésion. Dans le cas contraire (cas lié), le comportement du matériau se traduit par une rupture brutale. Tandis que pour une contrainte intermédiaire, la rupture du composite est de type semicontrôlé. À ce stade la charge est transmise aux fibres et aux torons du renfort (fissuration inter- toron).

III.7.3. Rupture de fibres

Après la fissuration matricielle, si la contrainte de rupture des torons est atteinte, on assiste à la rupture de ces derniers. La rupture des fibres et des torons aura lieu de part et d'autre de fissure principale. Les longueurs déchaussées (l_c) sont contrôlées par la distribution des défauts les plus sévères. si le module de Wei bull des fibres est grand, toutes les fibres se rompent au même endroit et les longueurs déchaussées sont relativement faibles. [31]

III.7.4. Délaminage

C'est la décohésion entre les couches qui apparaît sur le bord libre et à l'intérieur de la couche. Il se produit principalement dans les stratifiés à empilement de plis croisés dû au fait de la différence de module entre les couches. A cause des contraintes inter-laminaires élevées près des bords, le délaminage s'amorce généralement à cet endroit, puis progresse entre les couches. Dans de nombreuses situations (notamment lors d'un impact) la fissuration matricielle et le délaminage sont des phénomènes fortement couplés. La figure III.6 présente des micrographies MEB des faciès de rupture de composite hybride (tissu de jute/Mat de fibres de verre/résine époxy) à différents essais mécaniques. On note la présence du délaminage lors de la flexion et de l'impact, en outre en traction ce mécanisme n'a pas apparu.

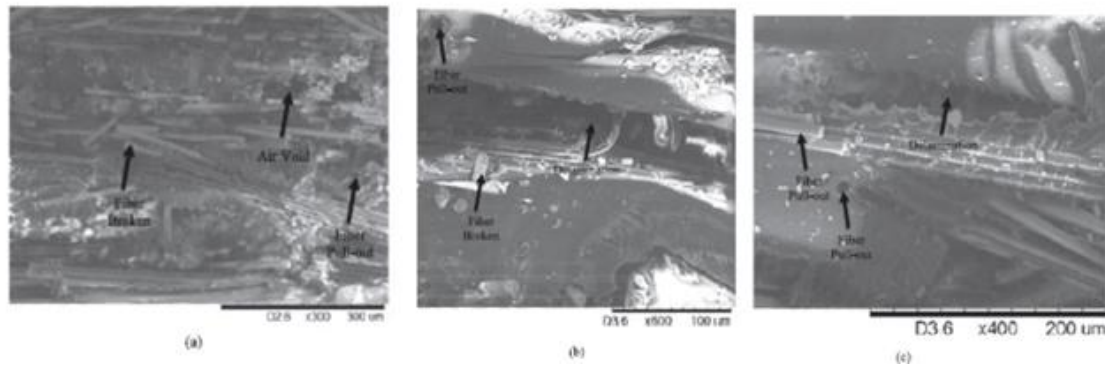


Figure. III.6: Pull-out des fibres, rupture des fibres et délaminage dans la surface de rupture après (a) rupture en traction (b) rupture en flexion (c) rupture par ‘impact [32]

IV .8: Influence de la direction de sollicitation sur les modes de rupture :

Selon le type de composite et le mode de sollicitation, notamment la direction de sollicitation par rapport à la direction des renforts, certains mécanismes d’endommagement peuvent être favorisés.

- **En traction dans l’axe des fibres**, trois modes de rupture interviennent; microfissuration de la matrice et se développe ensuite perpendiculairement aux fibres avec décohésion aux interfaces. Des zones de concentration de contraintes se forment aux interfaces et provoquent la rupture de fibres qui conduisent à la rupture finale du matériau.
- **En traction perpendiculaire aux fibres**, la matrice et les interfaces sont les seules sollicitées. Des microfissures se développent au niveau des défauts. La qualité d’adhésion des interfaces fibre/matrice détermine le type de microfissures qui se propagera et mène à la rupture du matériau.
- **En traction à 45° par rapport à l’axe des fibres**, l’endommagement inter facial est favorisé par cisaillement.
- **En traction déviée par rapport à l’axe des fibres**, la matrice, les fibres et les interfaces sont toujours sollicités et peuvent s’endommager. La répartition entre les différents mécanismes d’endommagement varie en fonction de l’inclinaison des fibres par rapport à la direction de sollicitation.

Il est toutefois important de tenir compte de la nature de l’interface fibre/matrice, qui peut jouer un rôle important dans la propagation de la rupture. Si celle-ci est forte, la rupture initiée par les fibres ou la matrice induit en front de fissure une concentration de contraintes conduisant ainsi à la propagation de la rupture successivement dans la matrice et les fibres. Si celle-ci est faible, en front de fissure, la propagation de la fissure de la matrice ne se poursuit pas par une rupture de

fibres mais par une décohésion fibre/matrice. L'ouverture de la fissure finit par entraîner une surcontrainte des fibres voisines qui finissent également par rompre. Avec la propagation de la fissuration transversale de la matrice, ces fibres rompues n'adhèrent plus à la matrice. Les fissures transversales de la matrice peuvent s'initier à différents endroits et se rejoindre par propagation de la rupture à l'interface fibre/matrice. Il en résulte ainsi une rupture en escalier (Figure III.7).

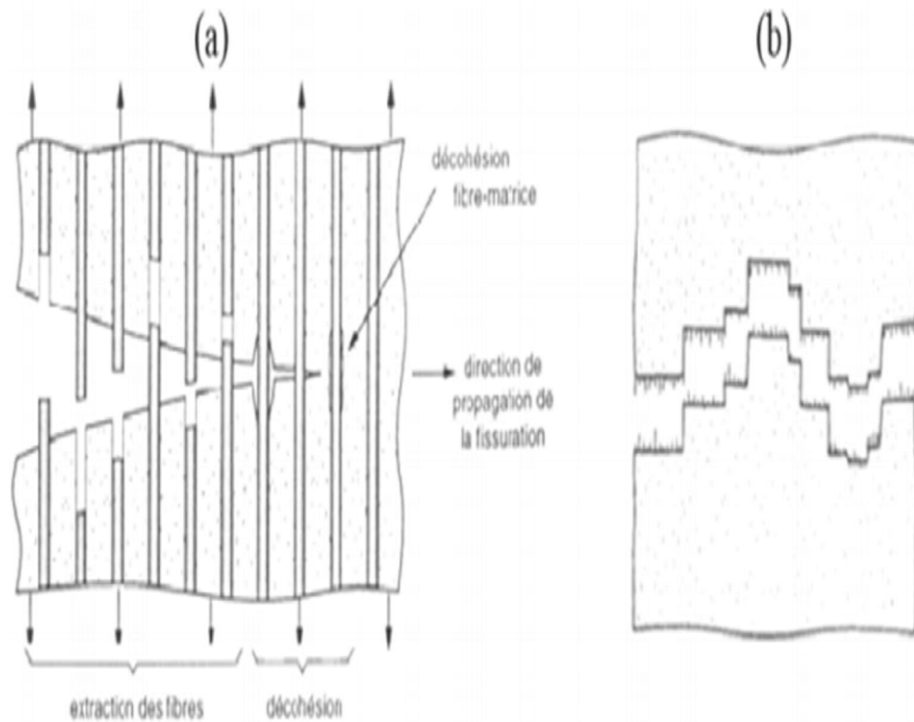


Figure. III.7 : Mécanisme d'endommagement et surface de rupture d'un stratifié UD présentant une faible adhésion fibre/matrice [32]

Dans le cas des composites fibres de carbone/ matrice polyamide, l'interface présente une meilleure adhésion en raison de la présence de transcritaux en surface des fibres. Oyat et al. [32] ont étudié les mécanismes de rupture de stratifiés UD de ce matériau. Ils ont ainsi mis en évidence que l'endommagement était initié par une rupture des fibres suivie d'une fissuration transversale de la matrice, donnant un faciès de rupture en escalier ou droit (Figure III.8).

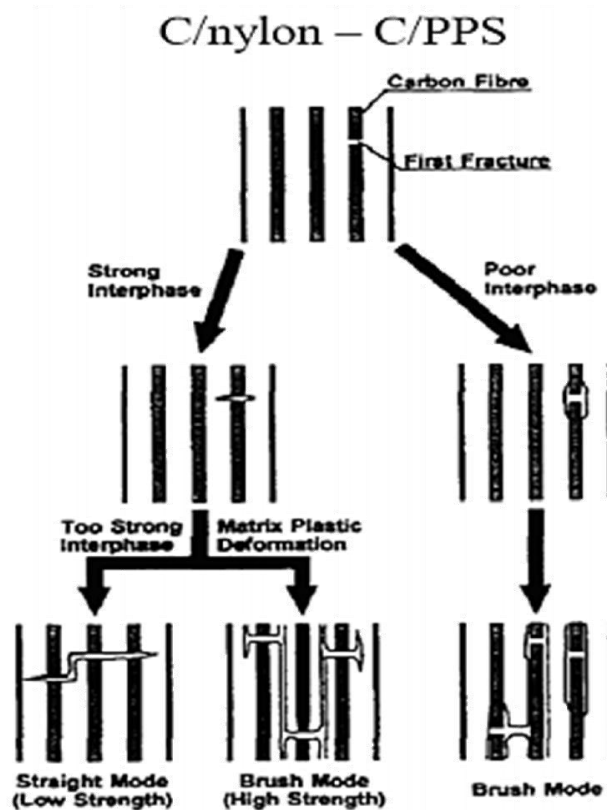


Figure. III.8 : Représentation graphique des mécanismes d'endommagement de composite à matrice TP renforcée par des fibres de carbone soumis à une sollicitation en traction [32]

III.9. Mesure de l'endommagement et méthode de control :

Il est indispensable de contrôler les mécanismes d'endommagement et leurs évolutions au cours du chargement d'un composite. L'endommagement est souvent contrôlé et étudié par différentes méthodes. Ces méthodes sont classées en deux catégories, les méthodes directes et les méthodes indirectes :

III.9.1. Méthodes de contrôle directes :

Qui permettent de déterminer l'état d'une structure à un moment précis. Cette catégorie comprend notamment les méthodes de contrôles non destructif(CND). Ces méthodes fournissent des informations concernant l'état d'endommagement des pièces contrôlées sans altérer ni modifier leur état. Parmi les méthodes les plus couramment employées on cite : l'ultrasons, la thermographie infrarouge active et la radiographie ettomographie à rayons X.

III.9.2. Méthodes de contrôle indirectes :

Contrairement aux méthodes discrètes, ces méthodes permettent de faire un suivi du comportement d'une structure lors de sollicitations mécaniques. Elles sont utilisées lorsque la pièce est en service. Ceci implique que l'excitation et la perturbation permettant de faire le contrôle sont générées par la sollicitation mécanique de la pièce elle-même. Les méthodes de cette catégorie permettent donc de faire un suivi de l'endommagement et des propriétés du matériau en temps réel, sans perturber la sollicitation ou le matériau. Dans cette catégorie on peut citer :

- L'émission acoustique (EA),
- La corrélation digitale d'images (CDI),
- La thermographie infrarouge (FT-IR) passive (TI). [33]

CHAPITRE VI : L'ETUDE DE CONCEPTION

VI.1. Introduction

La réalisation des pièces mécaniques passe par trois fonctions essentielles. La conception, l'étude et la préparation de la fabrication. La direction générale dans l'entreprise c'est elle qui dirige plusieurs critères, le temps, le finance, les moyens fournis etc., et la réalisation de chaque fonction dépend de ses critères citées, et pour répondre à tous ses fonctions nous avons trois intervenants principaux: Le bureau d'étude, Les bureau des méthodes et Les ateliers de fabrication.

Dans ce chapitre nous allons expliquer la conception de la machine de mise en forme (la machine d'essai de fatigue), et montrer les composants essentiels pour sa réalisation et son fonctionnement.

VI.2.Principe de fonctionnement de la machine d'essai de fatigue :

Le montage expérimental a été développé spécialement pour les essais de fatigue en flexion sur des éprouvettes de poutre en porte-à-faux. Bien que des machines d'essais servo hydrauliques commerciales plus sophistiquées soient capables d'effectuer les mêmes expériences de fatigue, les coûts de maintenance et d'entretien sont très élevés par rapport aux coûts d'utilisation de cette machine d'essai. La puissance est transmise par une courroie trapézoïdale à un deuxième arbre, qui fournit une fréquence d'essai de fatigue de 2,23 Hz. Le deuxième arbre porte un mécanisme de manivelle, Ce mécanisme impose un déplacement alternatif sur l'échantillon composite qui relie la liaison avec la pince inférieure de l'échantillon composite. L'autre extrémité supérieure, l'éprouvette est serrée. Par conséquent, les échantillons sont chargés comme une poutre composite en porte-à-faux. L'amplitude du déplacement imposé est un paramètre contrôlable et la manivelle réglable permet de choisir entre une flexion unilatérale et entièrement inversée.

D'énergie interne entraîne de petites élévations de température à l'emplacement des jauges de contrainte actives, qui ne sont pas compensées par des jauges de contrainte factices à proximité. Par conséquent, deux jauges de contrainte auto-compensées en température sont placées sur les deux surfaces.

VI.3. Les différents mécanismes de transformation de mouvement :

Dans la mécanique on rencontre plusieurs mécanismes qui transforment la rotation en translation. Parmi ceux-ci on peut citer; Figure IV.1

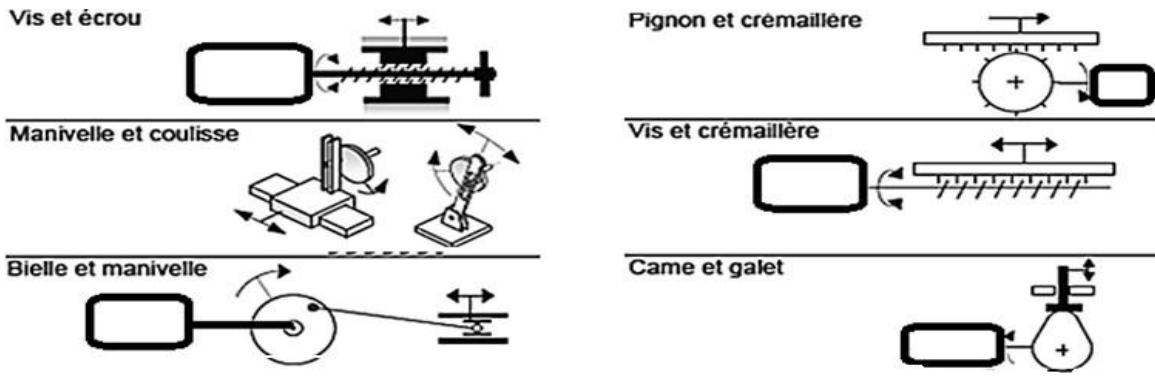


Figure IV.1. Schémas des mécanismes transformation de mouvement de rotation en translation les plus connus.

VI.4. Schéma cinématique de la machine étudiée :

La machine d'essai de fatigue pour pièces plates est conçue selon le schéma cinématique suivant

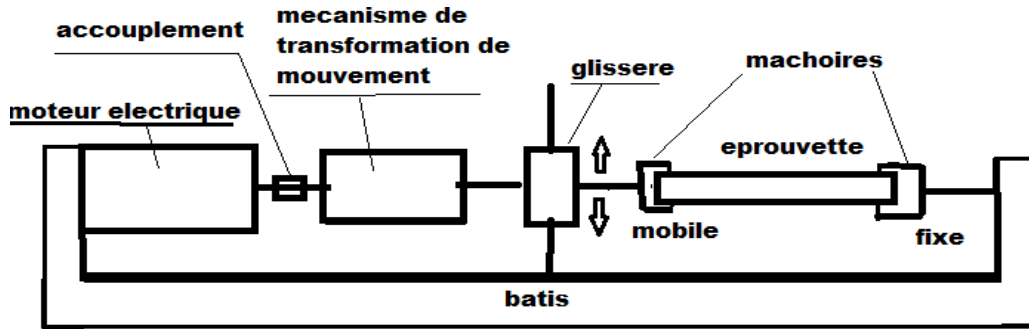


Figure IV.2. Schémacinématique de principe de la machine.

Le mouvement de rotation généré par le moteur électrique est transmis par l'accouplement au mécanisme de transformation de mouvement qui le convertit en un mouvement alternatif de translation guidé par une glissière. Ce mouvement de translation sera communiqué à la partie mobile de l'éprouvette par biais d'une mâchoire mobile de l'autre cote l'éprouvette est solidarisée au bâti par une mâchoire fixe.

VI.5 .Présentation de logiciel SOLIDWORKS

Solid Works est un modèleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère trois types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Chaque modification réalisée sur un concept sera liée aux deux autres.

SolidWorks est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique.

VI.5 .1.Conception par CAO SOLIDWORKS

Le dispositif que nous avons conçu, en tenant compte de cahier des charges est présenté sur la figure VI.3.

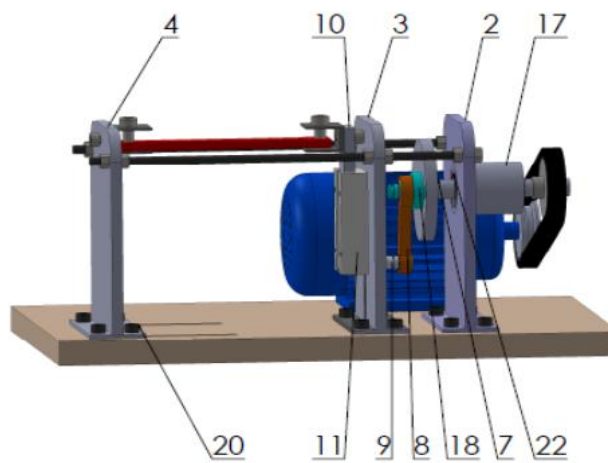
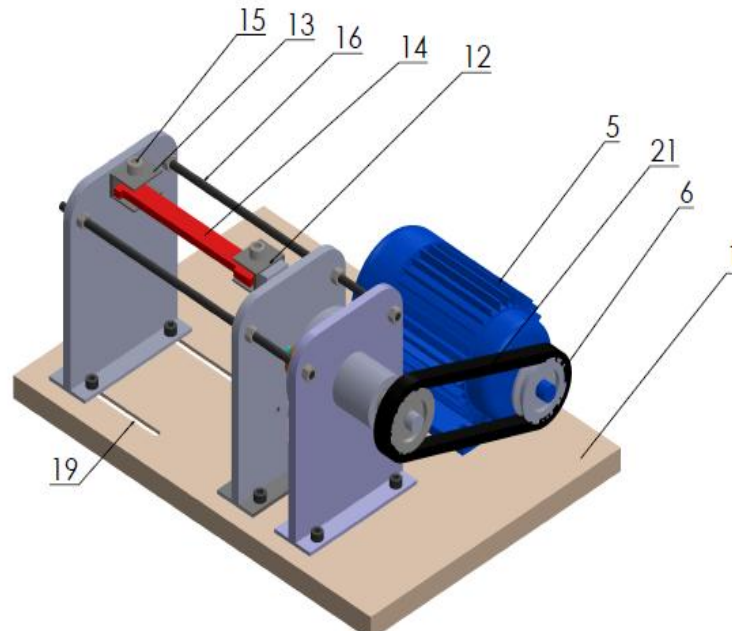


Figure.VI.3. Différents compartiments du mécanisme de la machine

TableauVI.1 : Différents compartiments du mécanisme

N°	Designations	N°	Designations
01	Bas	12	Mâchoire mobile
02	Paroi support de palière à roulements	13	Mâchoire fixe
03	Paroi support glissière	14	Eprouvette
04	Paroi support de la Mâchoire fixe	15	Vis de serrage
05	Moteur électrique	16	Tige fileté
06	Poulies	17	Bague de fixation pour le roulement
07	Disque et arbre rotatif	18	Pièce pour fixe la Bielle avec Disque et arbre rotatif
08	Bielle	19	Ruiner
09	Goupille cannelée	20	Vis ecrou
10	Bras	21	courroie
11	Glissière	22	Roulement

VI.6 : Elaborations et conception composants sous SOLIDWORKS

VI.6.1. Paroi support de palière à roulements

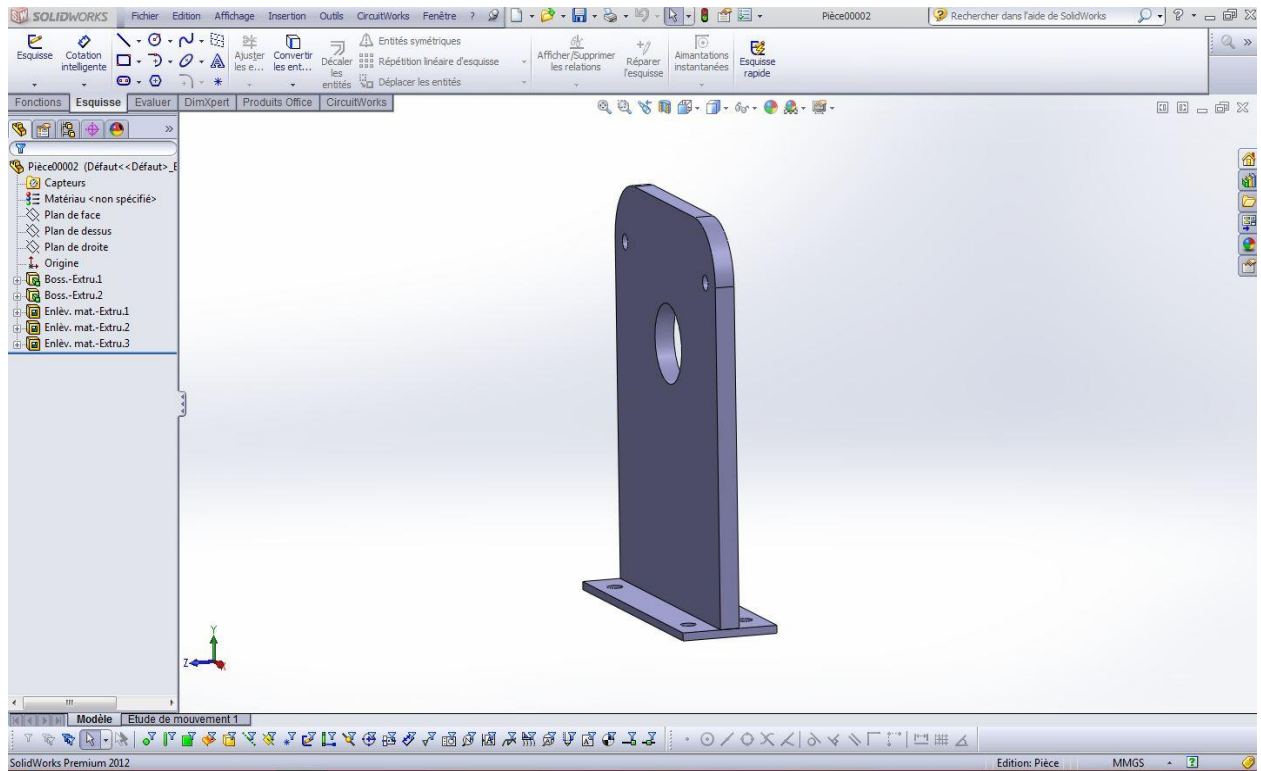


Figure IV.4. Paroi support de palière à roulements Réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.2 : Paroi support glissière

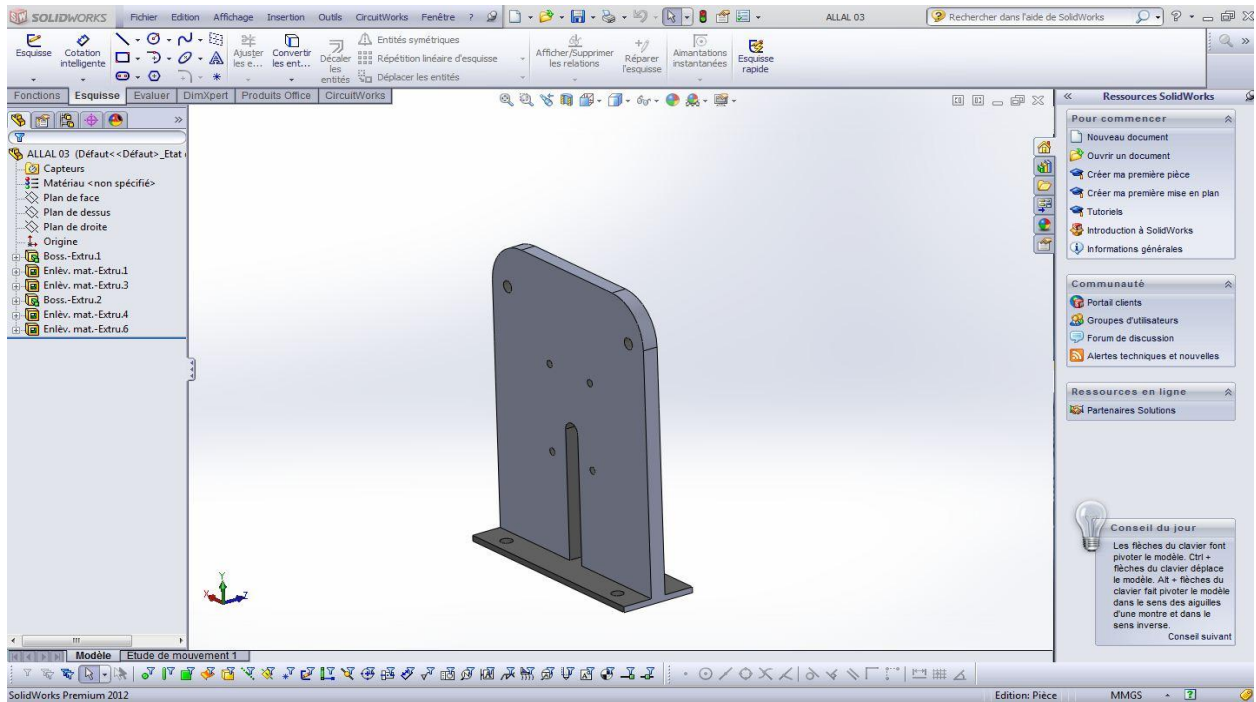


Figure IV.5 .Vue Paroi support glissière réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.3 .Paroi support de la Mâchoire fixe

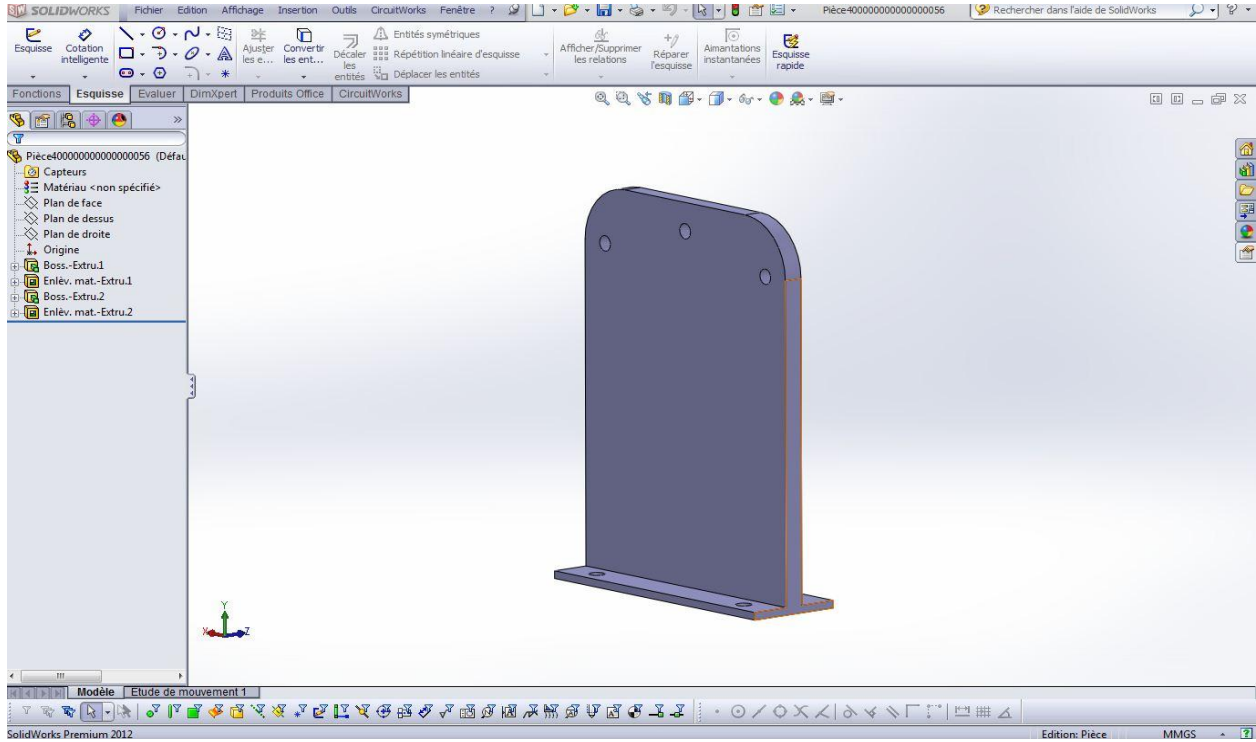


Figure IV.6 .Vue Paroi support de la Mâchoire fixe Réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.4 .Glissière

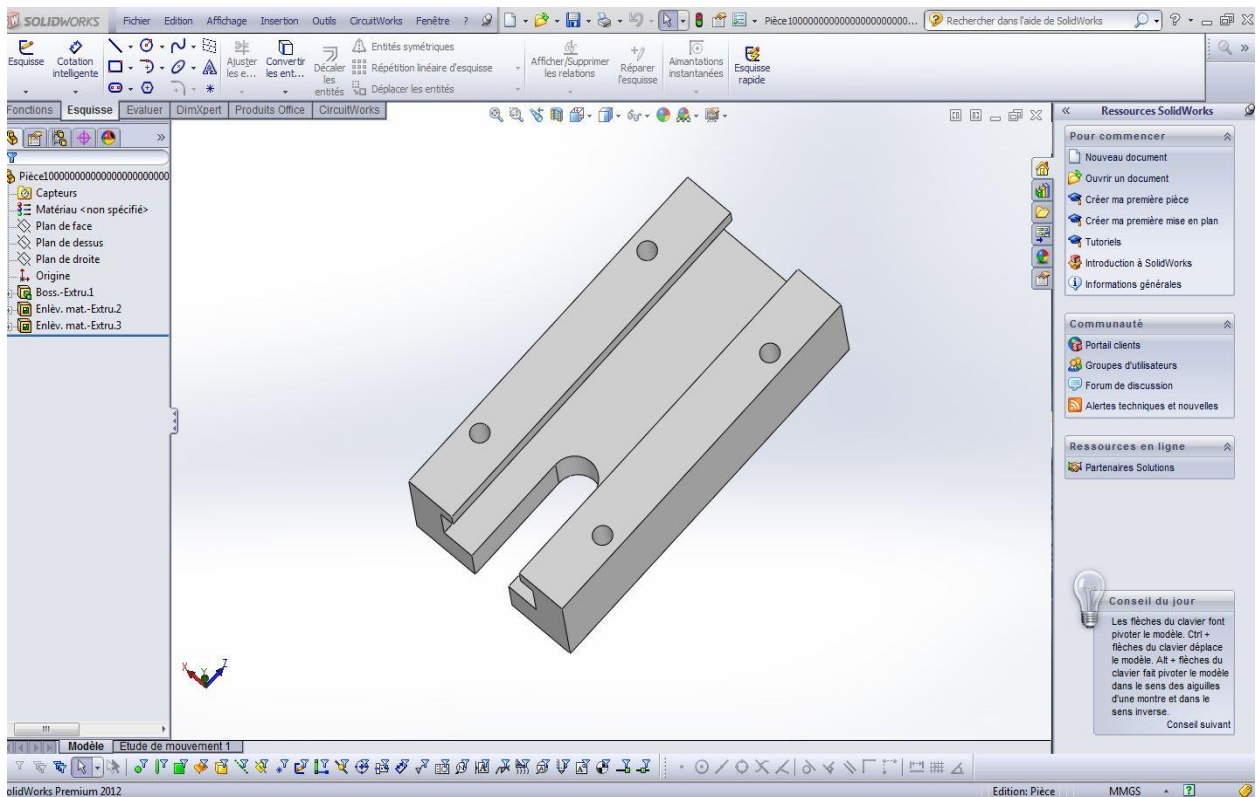


Figure IV.7.Vue Glissière réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.5. Disque et arbre rotatif

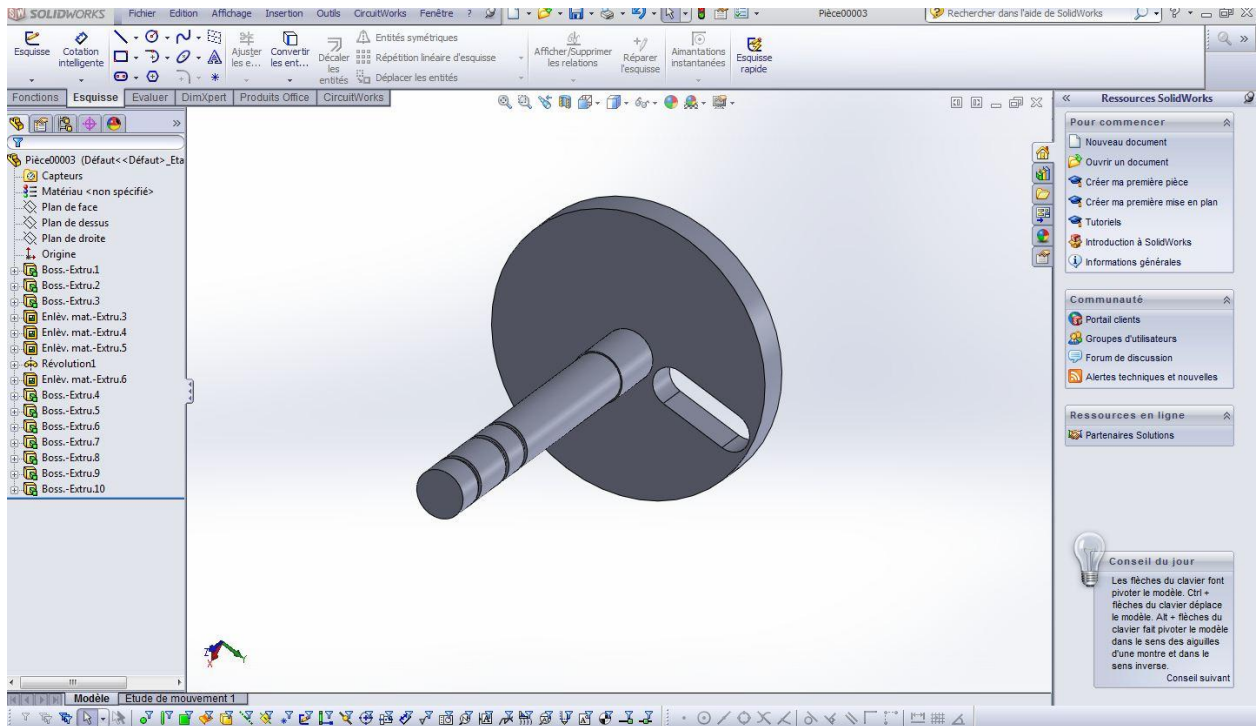


Figure IV.8. Vue Disque et arbre rotatif réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.6. Goupille cannelée

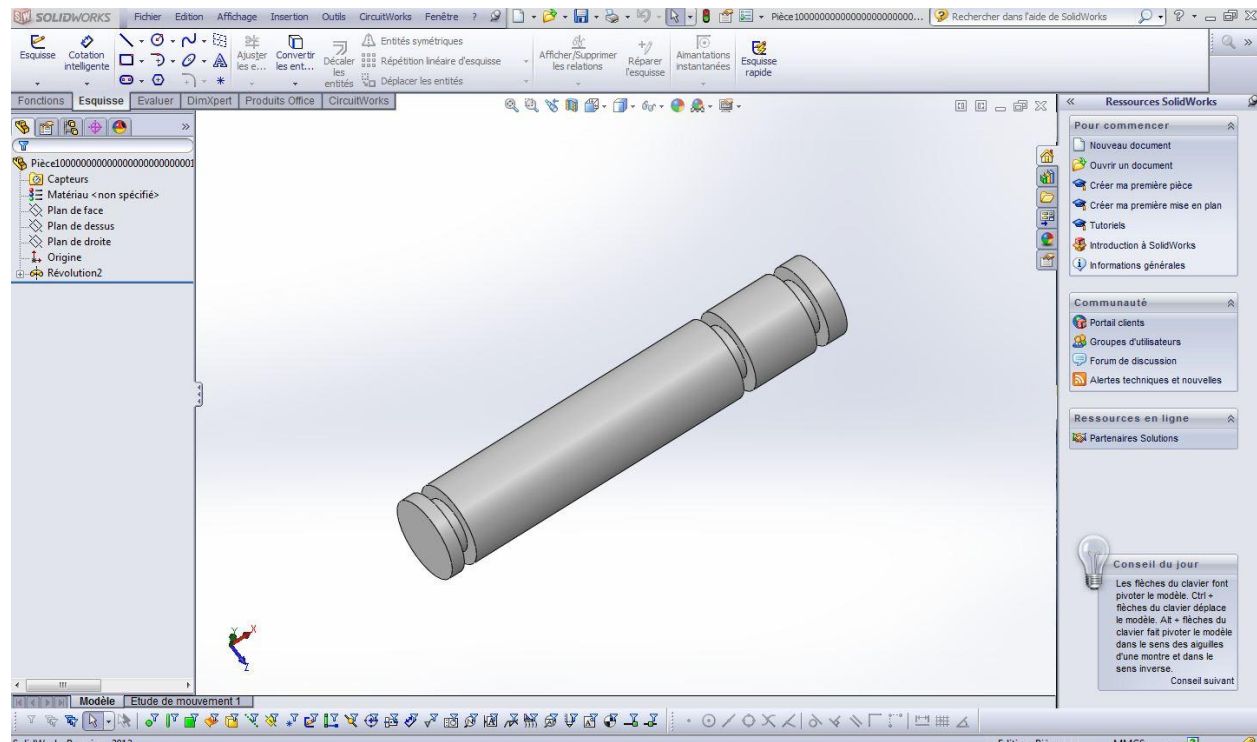


Figure IV.9. Vue Goupille cannelée réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.7 : Bielle

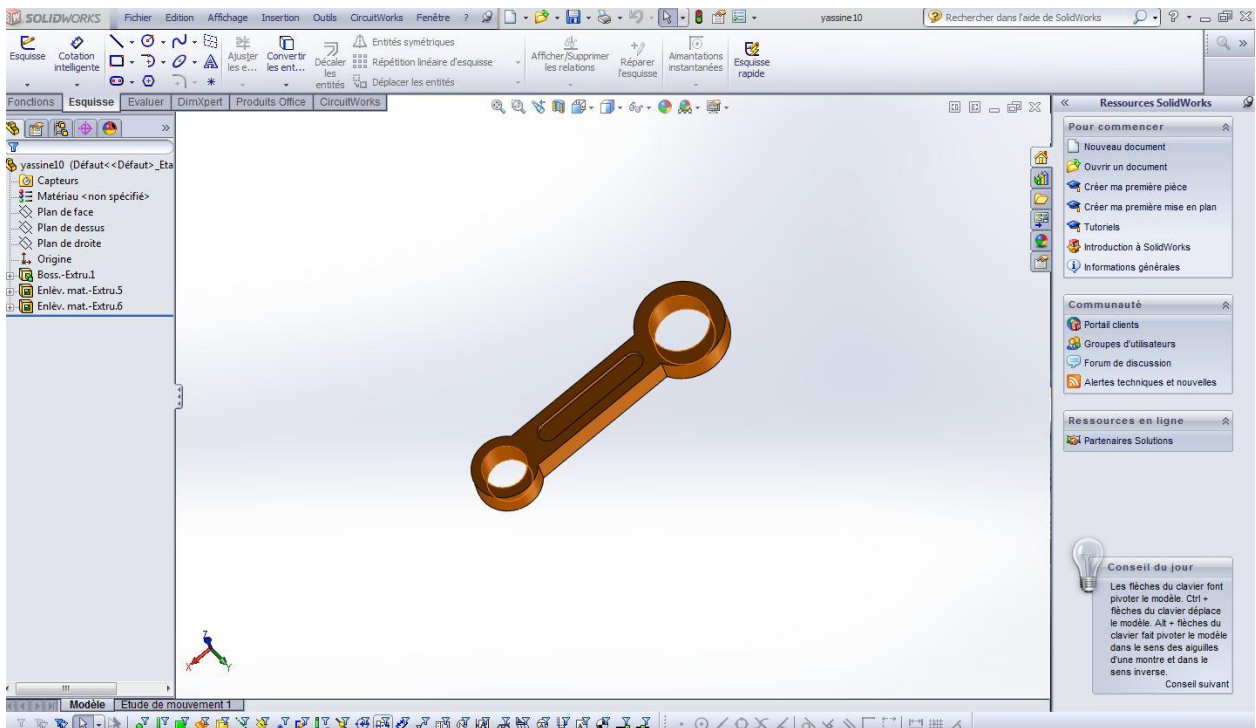


Figure IV.10. Vue Bielle réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.8. Pièce pour fixe la Bielle avec Disque et arbre rotatif

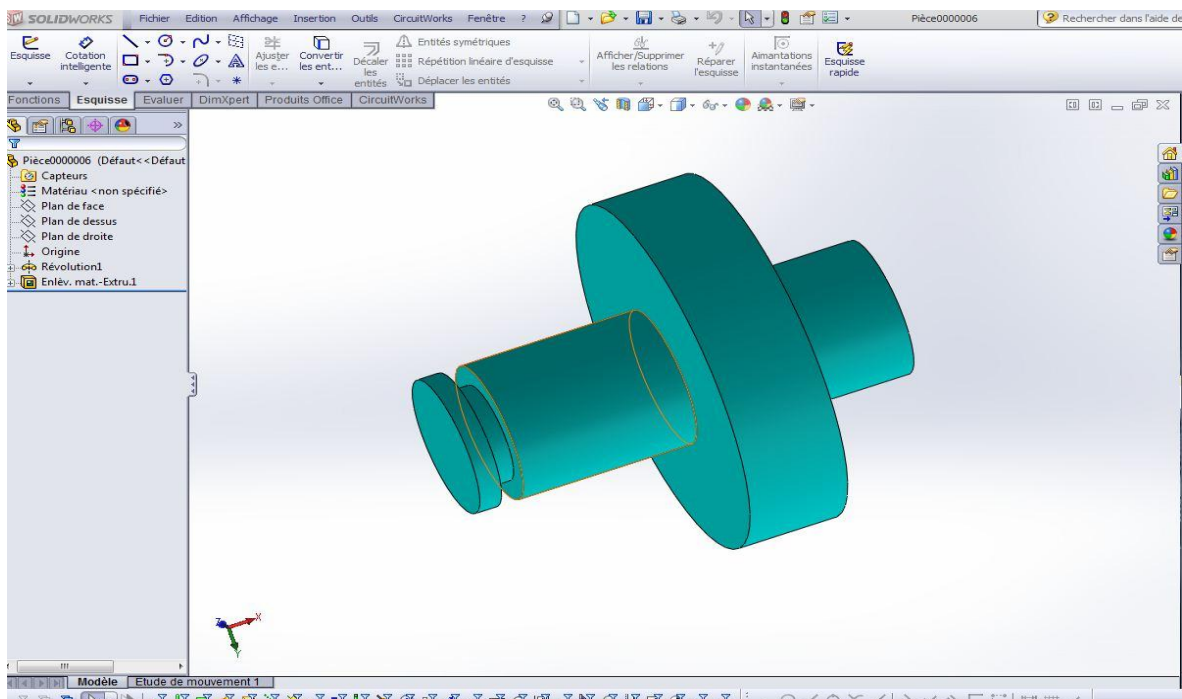


Figure IV.11. Vue Pièce pour fixe la Bielle avec Disque et arbre rotatif réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.9. Bague de fixation pour le roulement

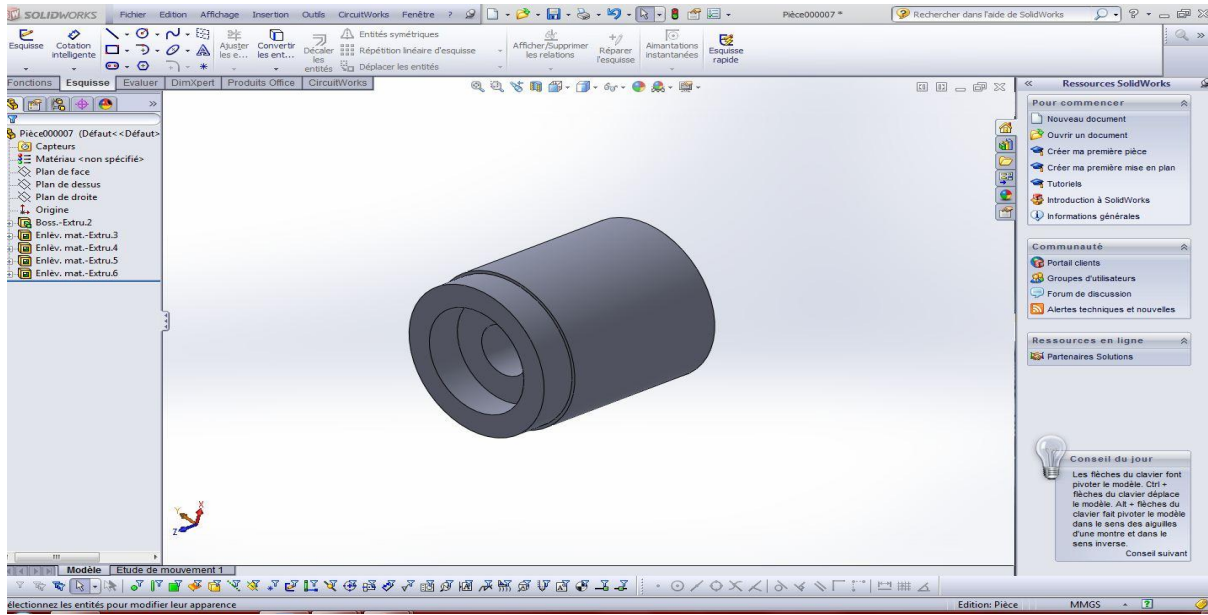


Figure IV.12. Vue Bague de fixation pour le Roulement réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.10. Poulies

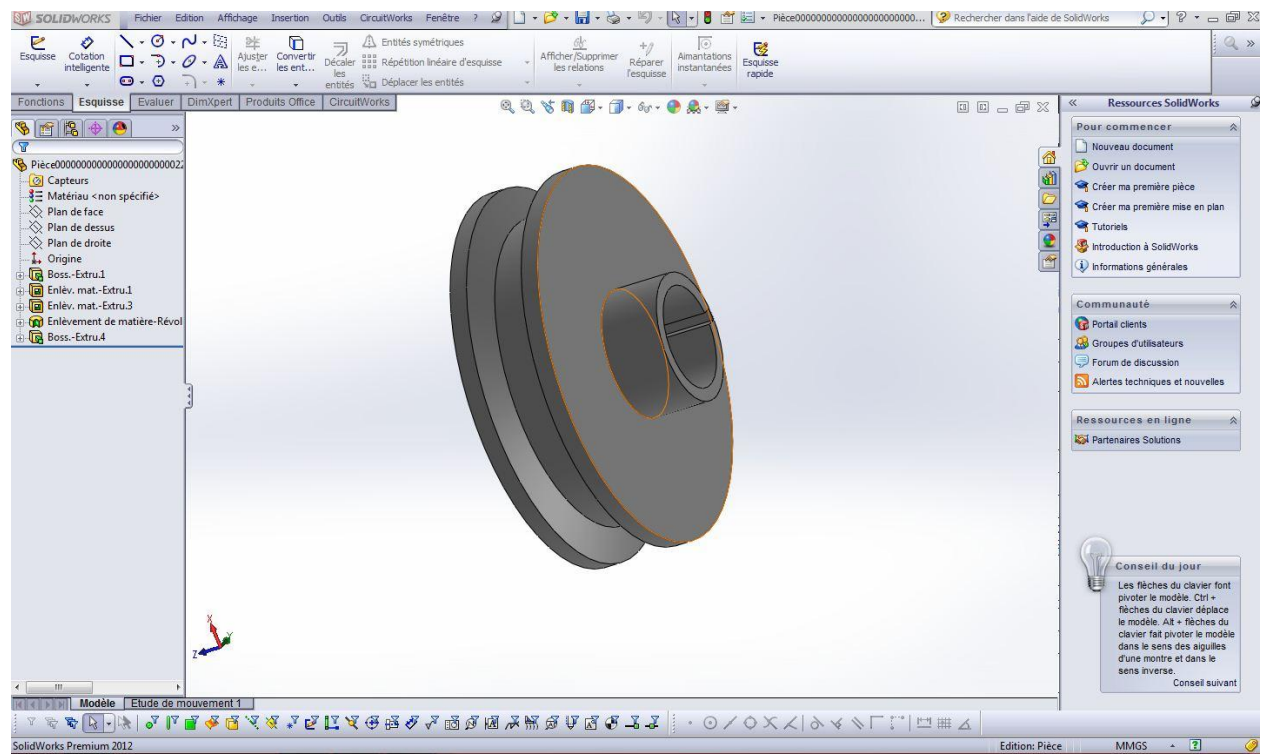


Figure IV.13. Vue de Poulies réalisée sous SOLIDWORKS

VI.6.11. Mâchoire mobile et fixe

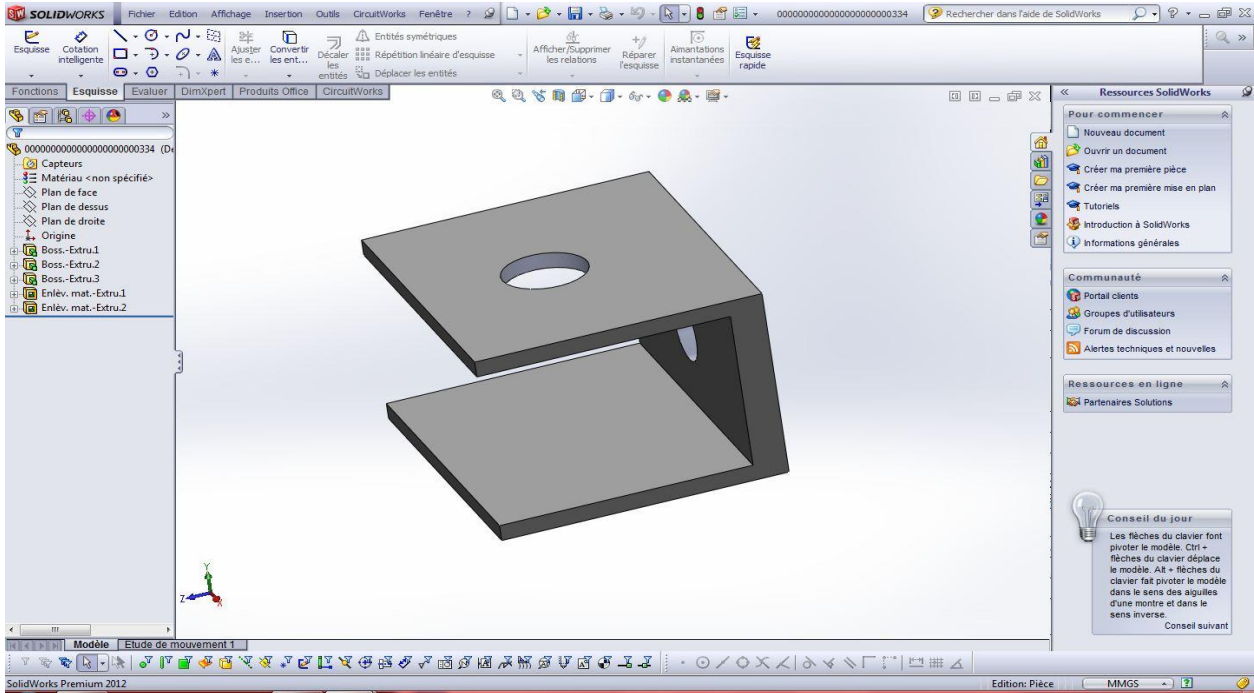


Figure IV.14 .Vue de. Mâchoire de fixation d'éprouvette

VI.6.12. Moteur électrique

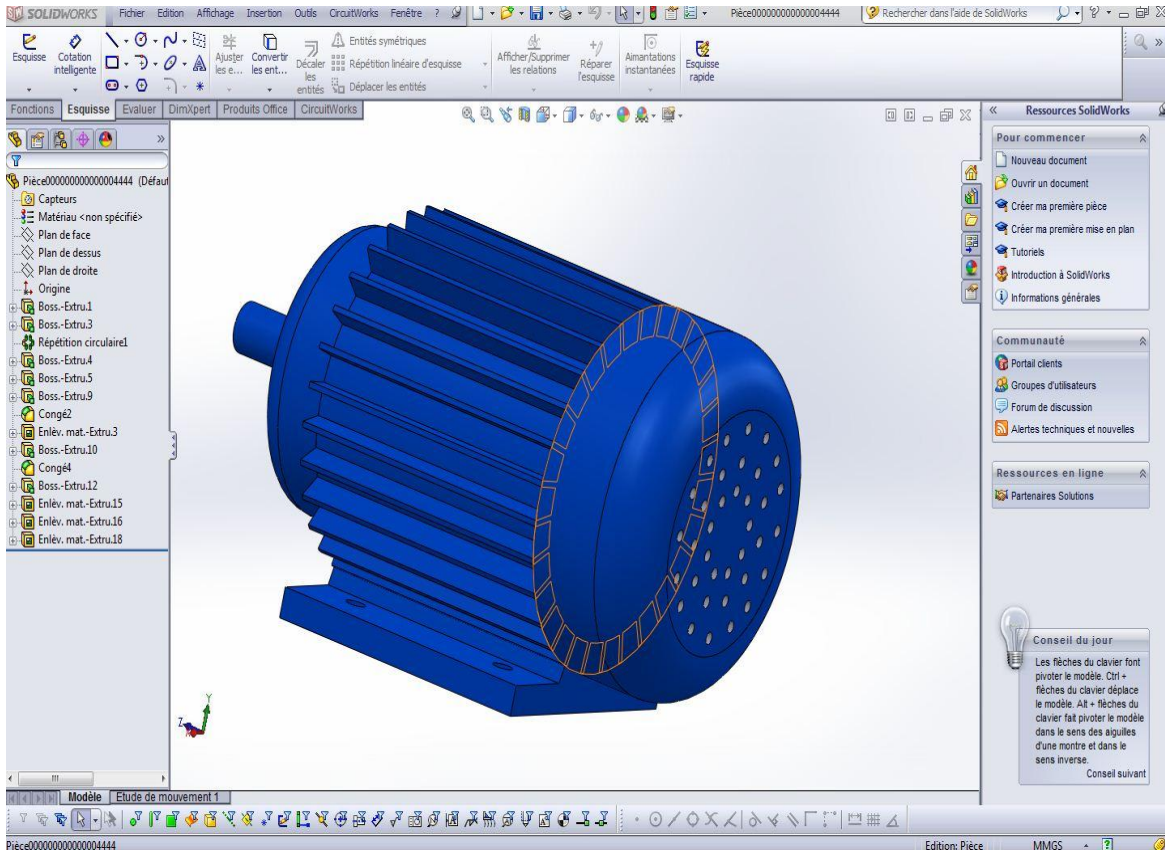
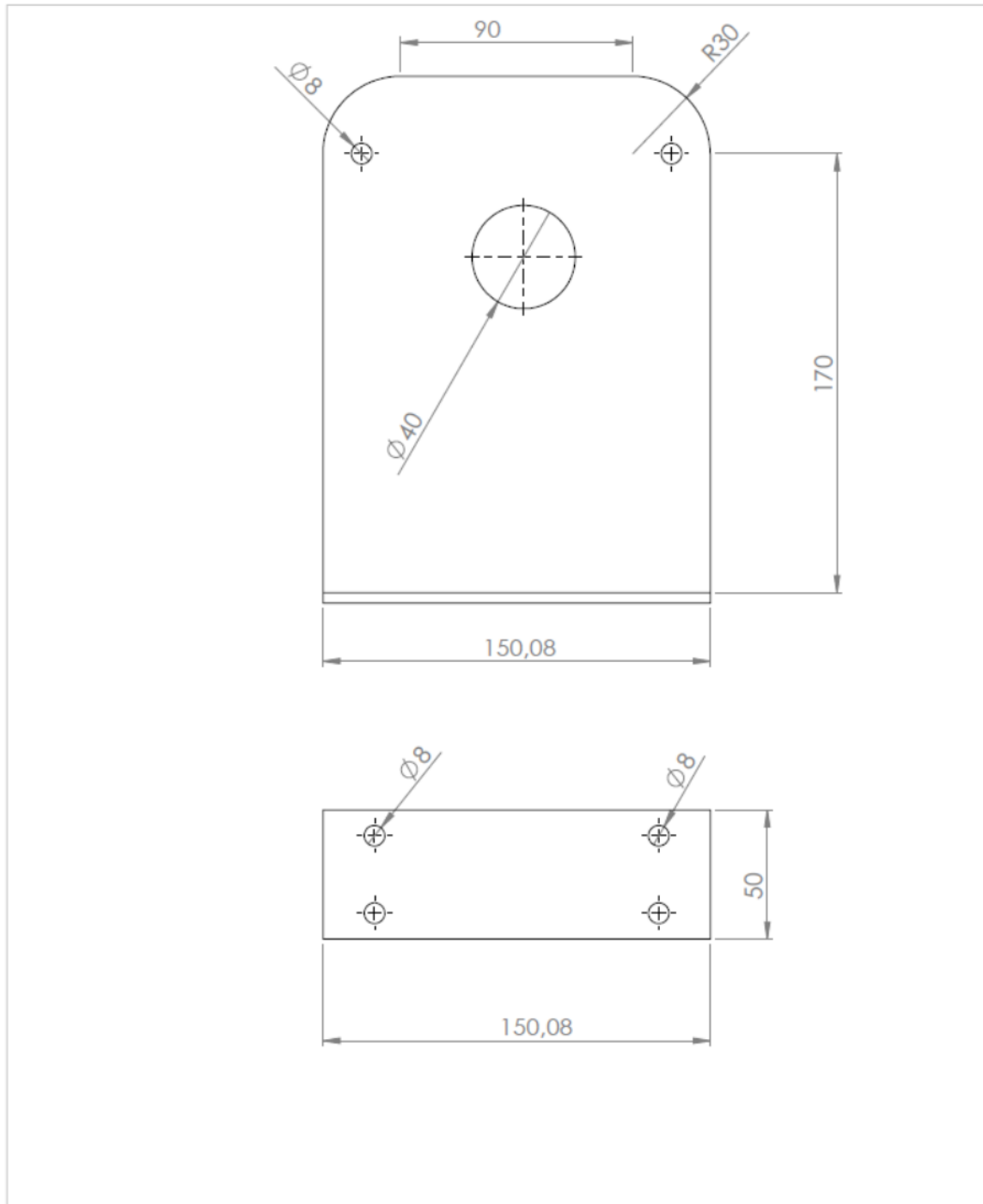


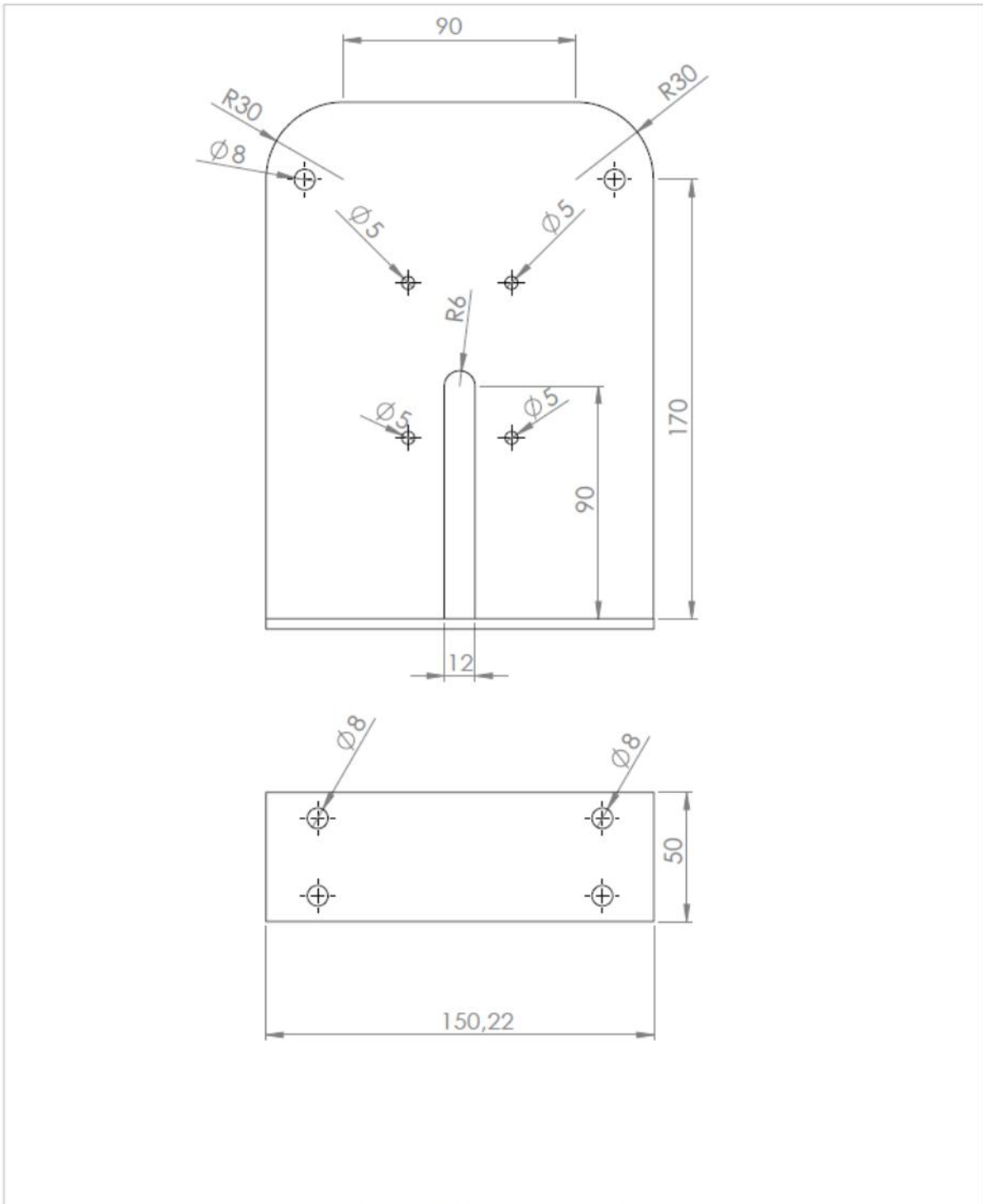
Figure IV.15.Vue de Moteur électrique réalisée sous SOLIDWORKS

VI .7. Dessin de définition des composants sous SOLIDWORKS



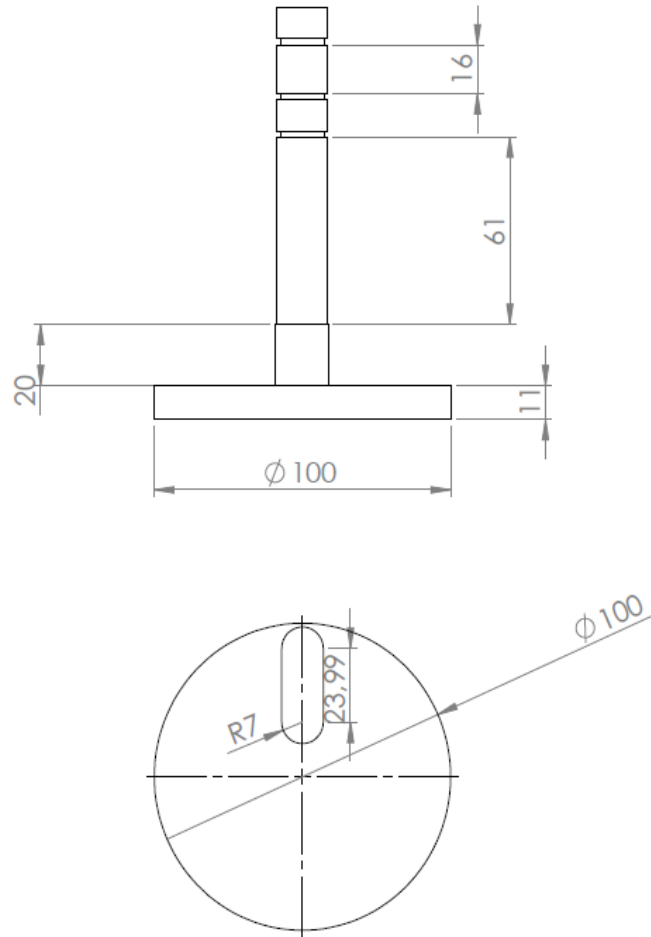
Université de Mohamed Boudiaf-Msila

Echelle:1	Paroi support de palière à roulements	Materiau
		2022-2001
A4		Date: 8-5-22



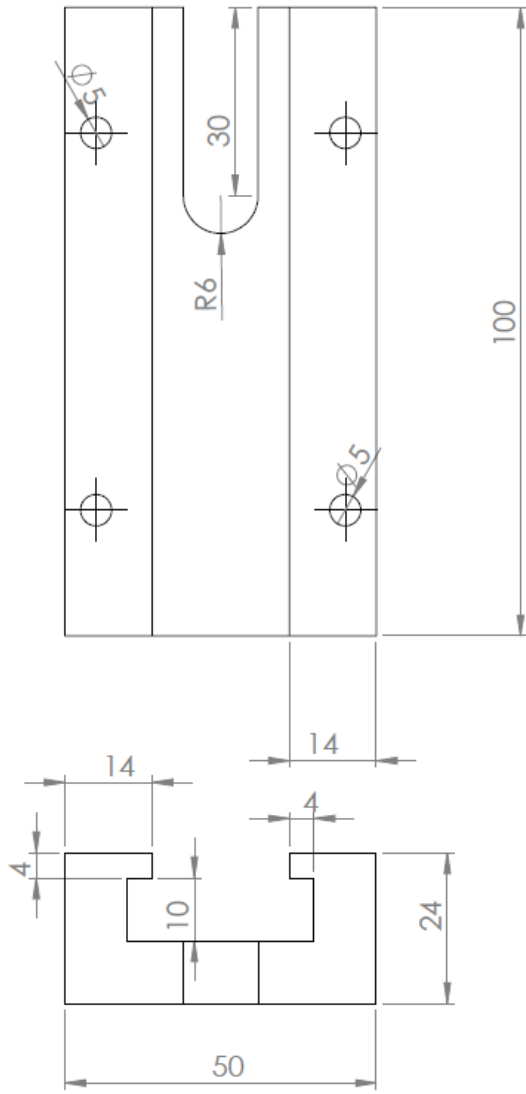
Université de Mohamed Boudiaf-Msila

Echelle:1	Paroi support glissière	Materiau
		2022-2001
A4		Date: 8-5-22



Université de Mohamed Boudiaf-Msila

Echelle:1	bielle	Materiau
		2022-2001
A4		Date: 8-5-22



Université de Mohamed Boudiaf-Msila

Echelle:2/1



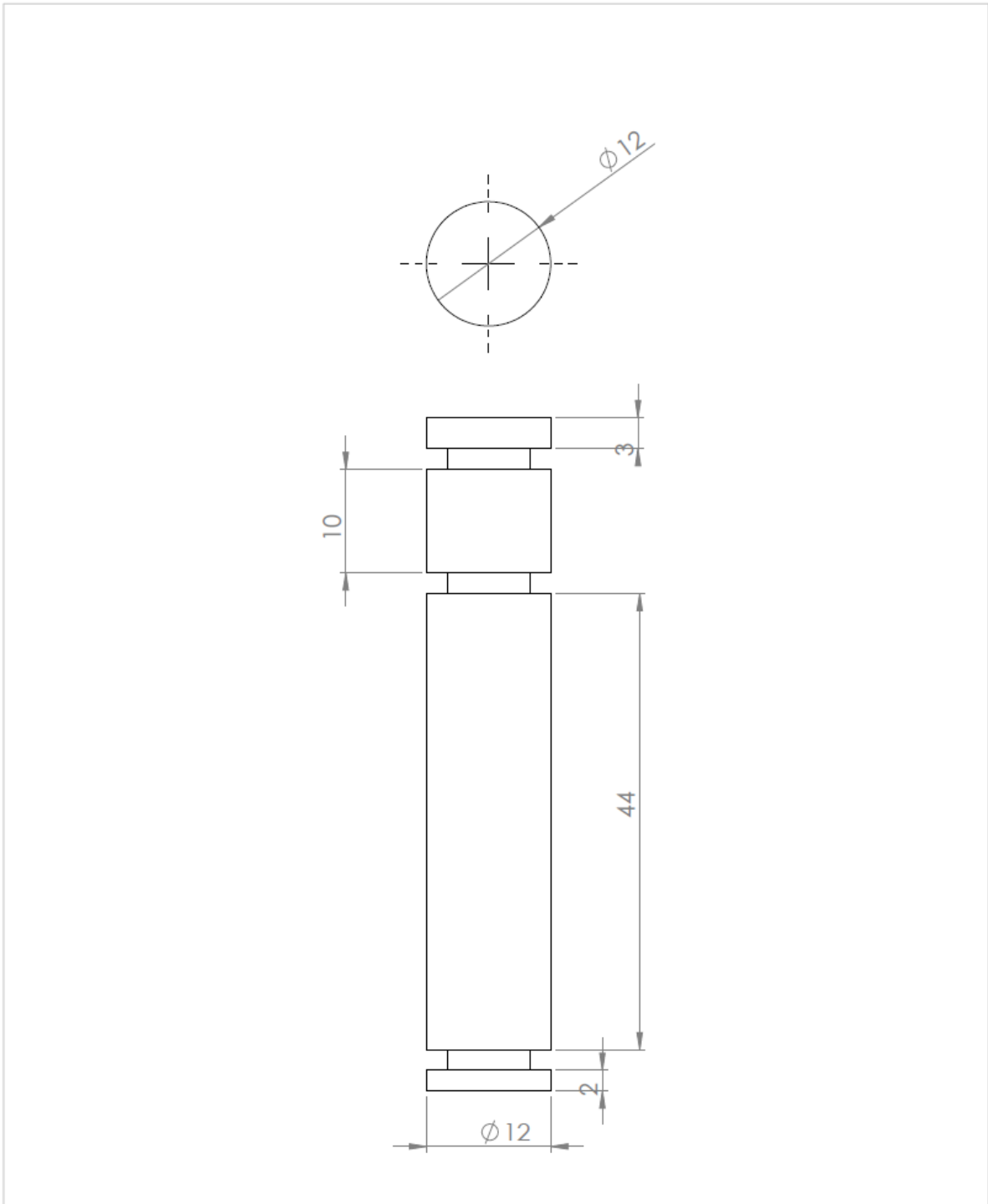
A4

Glissière

Matériau

2022-2001

Date: 8-5-22

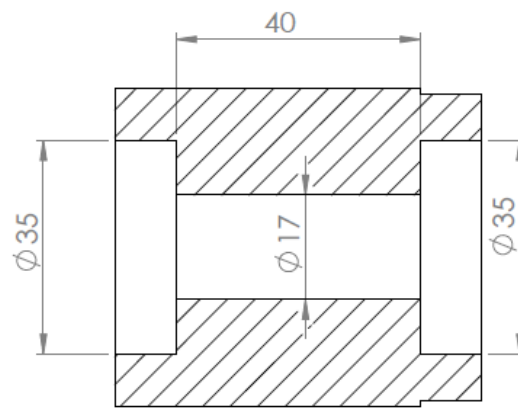
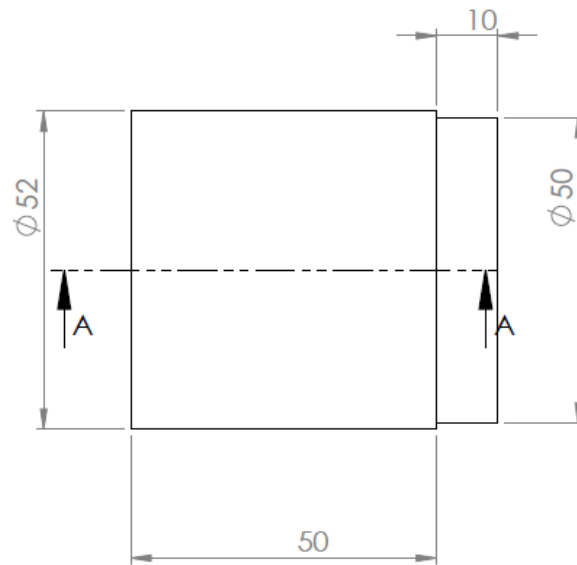


Université de Mohamed Boudiaf-Msila

Echelle:2/1
A4

Goupille cannelée

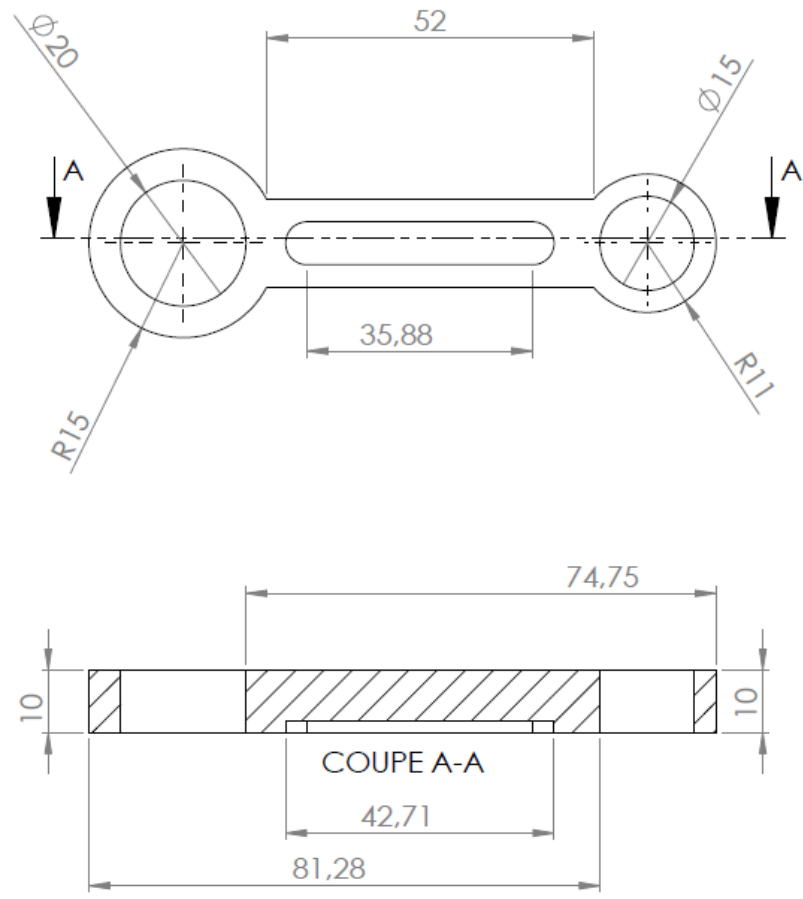
Matériau
2022-2001
Date: 8-5-22



COUPE A-A

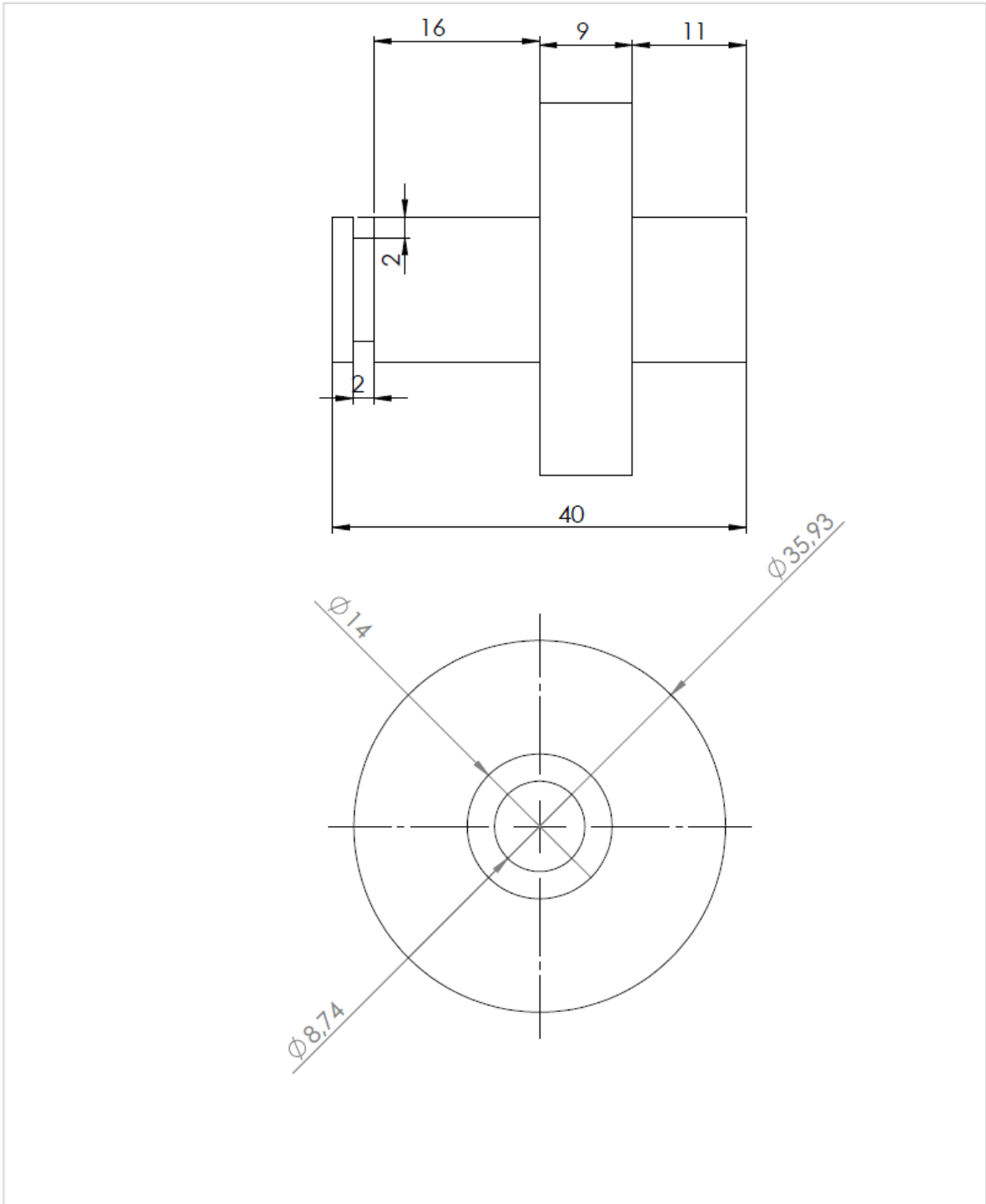
Université de Mohamed Boudiaf-Msila

Echelle:1	Bague de fixation pour le roulement	Materiau
		2022-2001
A4		Date: 8-5-22



Université de Mohamed Boudiaf-Msila

Echelle: 1	Bielle	Materiau
		2022-2001
A4		Date: 8-5-22



Université de Mohamed Boudiaf-Msila

Echelle:2/1	Pièce pour fixe la Bielle avec Disque et arbre rotatif	Materiau
		2022-2001
A4		Date: 8-5-22

VI.8. Exécution des assemblages sous SOLIDWORKS

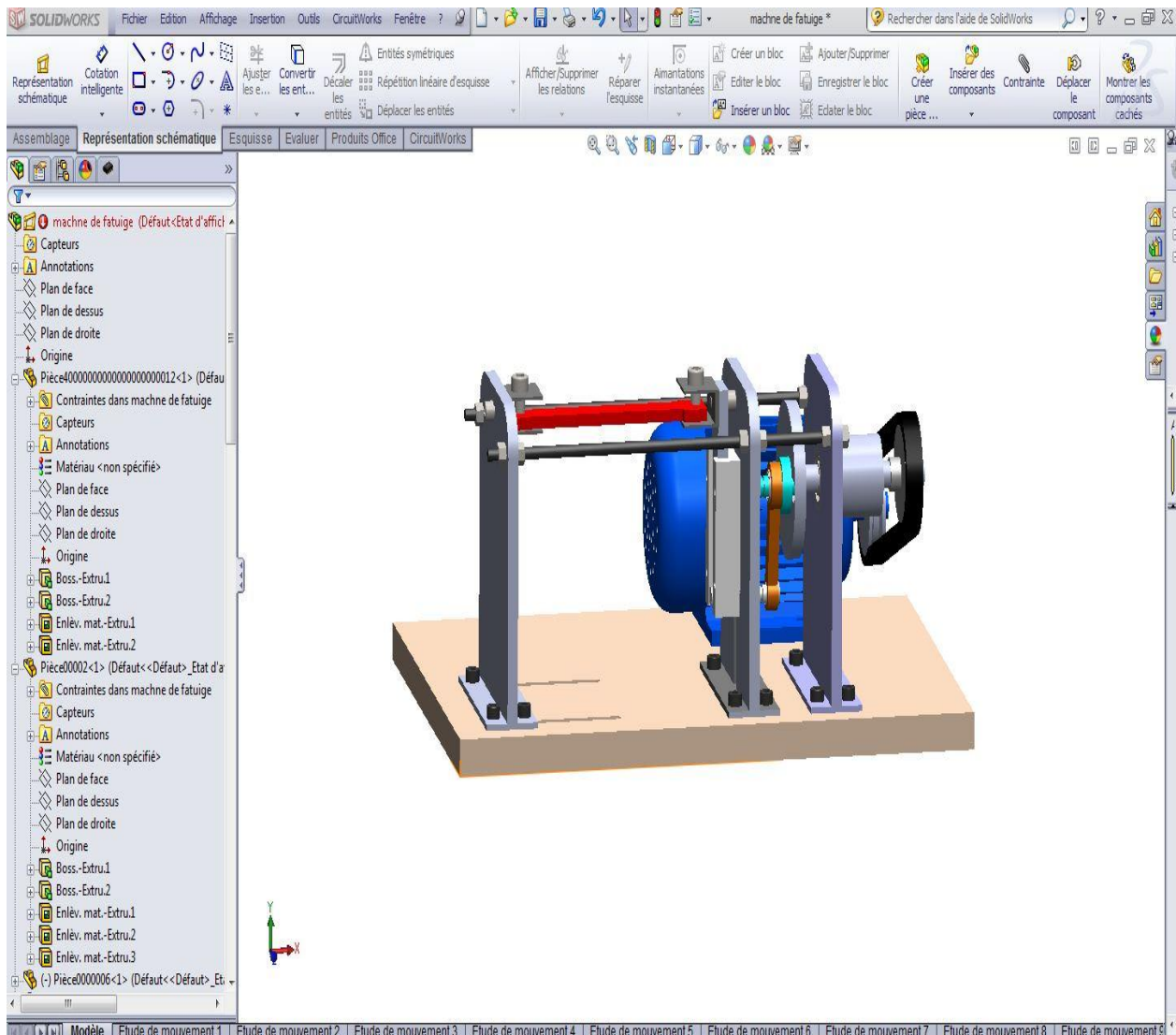


Figure IV.16. Vue de machine réalisée sous SOLIDWORKS

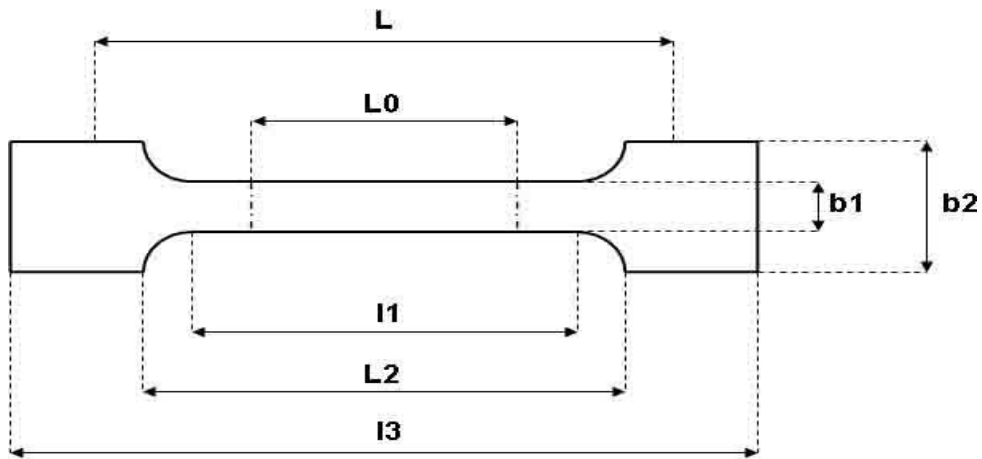
VI.9. Les Présentation du matériau à étudier

Le PRV est un matériau thermodurcissable renforcé de fibres de verre. Des additifs sont ajoutés aux résines afin d'en améliorer ses propriétés. Cette combinaison fait du PRV un matériau de haute performance. Ses propriétés de résistance (mécanique et chimique) et sa masse volumique font aussi du PRV un matériau de choix et une excellente alternative aux métaux. Il est principalement utilisé dans les industries chimique, pétrolière, alimentaire et des pâtes et papiers ainsi que dans les usines de traitement et dans les centrales électriques.

VI.9.1. Géométrie des éprouvettes

Les éprouvettes soumises aux essais sont découpées dans une seule direction qui est la direction longitudinale

- R_e : Résistance élastique
- R_m : Résistance maximal
- A : l'allongement



VI.9.2. L'éprouvette est soumise à la flexion :

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais ont été choisies selon la norme (ASTM D638M-I) c'est-à-dire : L=150mm, b= 40mm, h= 8mm qui représente un cas de rupture par flexion assez difficile.

La contrainte de flexion : $\sigma = y \times \frac{M}{I_{GZ}}$

Y : la position de la fibre soumise a Mf $I_{GZ} = b \cdot h^3/12$

I_{GZ} / y : Module de flexion. $I_{GZ} = b \cdot h^3/12$

Mf: Moment de flexion

La contrainte maximale s'écrit : $\sigma_{max} = M_{max}(I_{GZ}/Y)$

La contrainte est max pour la fibre supérieure de position $y = h/2$

Dans notre cas (éprouvette encastree d'un cote et actionnee de l'autre) $M_{max} = Mf_{max} = F \times L$

Les criteres de resistance à la rupture de l'éprouvette sont :

En Traction $\sigma_{max} \leq R_{pe}$

Calcul à la Traction $\sigma_{max} \leq R_{pe}$

$$F \cdot L (h/2) / (b \cdot h^3/12) = 6 F L / b h^2 \leq R_{pe}$$

$$d'où F \leq R_{pe} \cdot b h^2 / 6L$$

Calcul en cisaillement: $\tau_{xy} = 3 T_y / 2 b h \leq R_{pcis}$

$$d'où T_{xy} \leq 2 / 3 R_{pcis} \cdot b h$$

Calcul en Compression: $\sigma_{max} \leq R_{pc}$

$$6 F L / b h^2 \leq R_{pc}$$

$$d'où F \leq R_{pc} \cdot b h^2 / 6L$$

Application numérique : L=150mm, b=40mm, h=8mm

La force de traction naissante qui est responsable de la rupture de l'éprouvette $\leq R_{pe} \cdot b h^2 / 6L$

$$R_{pe} = R_e / S$$

Ou S: le coefficient de sécurité est choisi entre [3 et 7],

Pour la construction mécanique s=3

$$R_{pe} = R_e / S = 216 / 3 = 72 \text{ N/mm}^2$$

$$F \leq R_{pe} \cdot b h^2 / 6L = 72 \cdot 40 \cdot 64 / 6 \cdot 150$$

$$F \leq 204.48 \text{ N}$$

La force de cisaillement naissante qui est responsable de la rupture de l'éprouvette:

$$T_{xy} \leq 2 / 3 R_{pcis} \cdot b h$$

$$R_{pcis} = 0.3 R_p$$

$$T_{xy} \leq (2 / 3) (204.48 \cdot 0.3) \cdot 40 \cdot 8 = 13056 \text{ N}$$

On retient F=13056 N la plus grande force comme force ultime de rupture.

VI.10. calcul des éléments de la machine

- **Choix du moteur électrique :**

- vitesse de rotation : N=1000tr/min
- puissance : p = 1300w
- diamantaire de poulies $\emptyset = 62\text{mm}$

VI.10.1. Calcule la vitesse angulaire de rotation ω

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 1000}{60} \Rightarrow \omega = 104.66 \text{ rad/s}$$

Chapitre VI

L'étude de conception

VI.10.2. Calcule le couple :

$$P = C \times W \Rightarrow C = \frac{P}{W} \Rightarrow C = 12.42 \text{ N/}$$

VI.10.3 : Calcule la force F

$$C = (T_2 - t_1)R$$

- Angel : $\theta = 60$
- coefficient de friction $f = 0.2$

$$\frac{T_2}{t_1} = e^{f\theta}$$

$$\frac{T_2}{t_1} = e^{1.029} \Rightarrow \frac{T_2}{t_1} = 2 \Rightarrow T_2 = t_1 \cdot 2$$

$$C = (t_1 \cdot 2 - t_1) R \Rightarrow t_1 = 402 \text{ N}$$

$$T_2 = 2t_1 \Rightarrow T_2 = 804 \text{ N}$$

$$F = T_1 + t_2 = 1206 \text{ N}$$

VI.10.3. calcul la résistance de l'Arber

$$F_C = T + t$$

$$F_C = 1206 \text{ N}$$

1)-Action de effort le plan horizontal

$$\sum F_X = 0$$

$$-F_C + R_A + R_B = 0$$

$$F_C = R_A + R_B$$

$$\sum Mf/B = 0 \Rightarrow F_C(85) - R_A(45) = 0$$

$$R_A = (F_C(85))/40 = (1206 \times 85)/45 = 2278 \text{ N}$$

$$R_B = F_C - R_A = 1206 - 2278$$

$$R_B = -1072 \text{ N}$$

ZONE C-A $0 \leq X \leq 45$

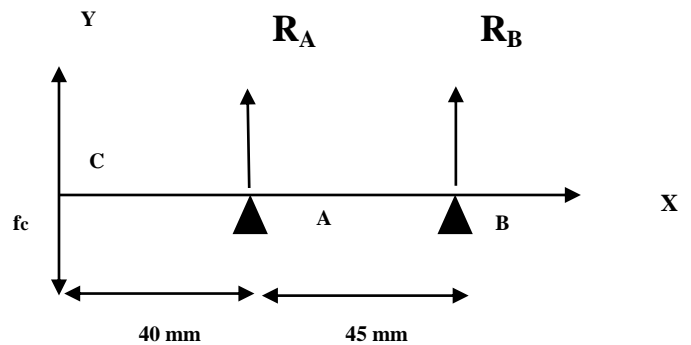
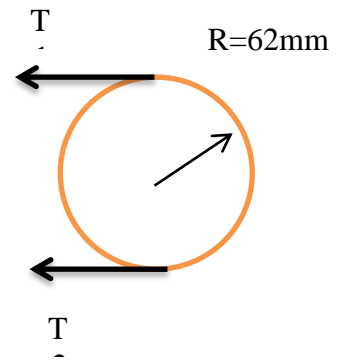
$$x = 0 \Rightarrow T = F_C = -1206$$

$$\sum Mf/B = 0 \Rightarrow Mf + F_C \times x = 0$$

$$Mf = -F_C \times 45$$

$$x = 0 \Rightarrow Mf = 0$$

$$x = 45 \Rightarrow Mf = -48.24 \text{ KN}$$



ZONE A-B $45 \leq X \leq 85$

$$-F_c + R_A - T_2 = 0$$

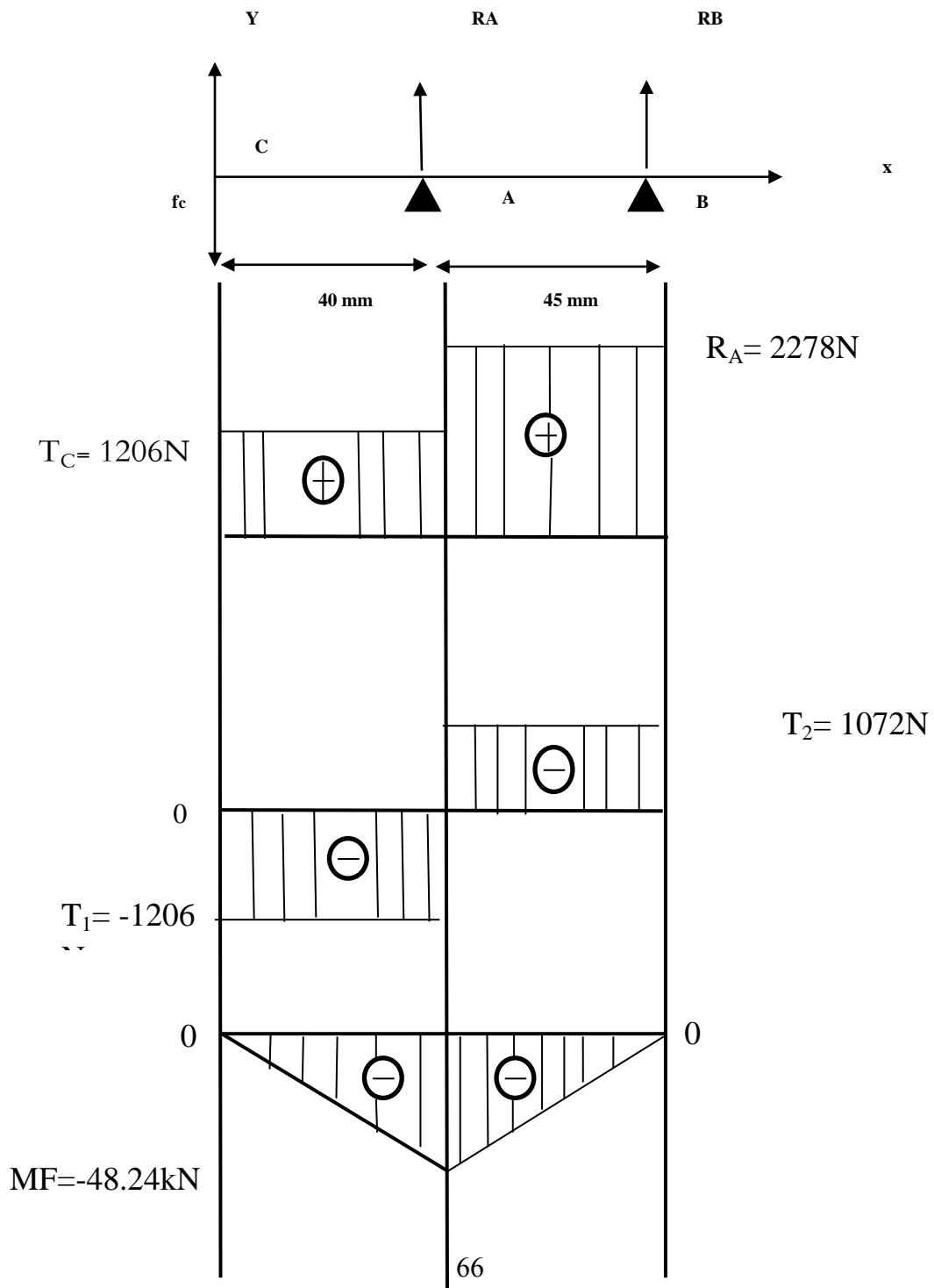
$$T_2 = 1072 \text{ N}$$

$$M_f = -F_c(x) - R_A(x - 45)$$

$$x = 45 \Rightarrow M_f = -48.24 \text{ kN}$$

$$x = 85 \Rightarrow M_f = 0$$

- Diagrammes des efforts internes



2)- Action des efforts le plan vertical

$$\sum F_x = 0$$

$$F_C + R_A + R_B = 0$$

$$F_C = -R_A + R_B$$

$$\sum M_{f/A} = 0 \Rightarrow F_D (76) - R_B (45) = 0$$

$$F_D = -634.73 \text{ N}$$

- ZONE A-B $0 \leq X \leq 45$

$$-R_B + T = 0 \Rightarrow T = -R_B$$

$$T = 1072 \text{ N}$$

$$M_f = -R_A x$$

$$x=0 \Rightarrow M_f = 0$$

$$x = 45 \Rightarrow M_f = -102.51 \text{ KN}$$

- ZONE B-D $45 \leq X \leq 76$

$$-R_A - R_B + T = 0$$

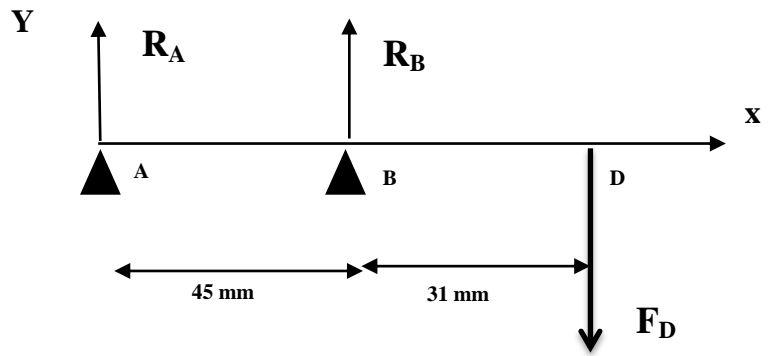
$$T = -R_A - R_B$$

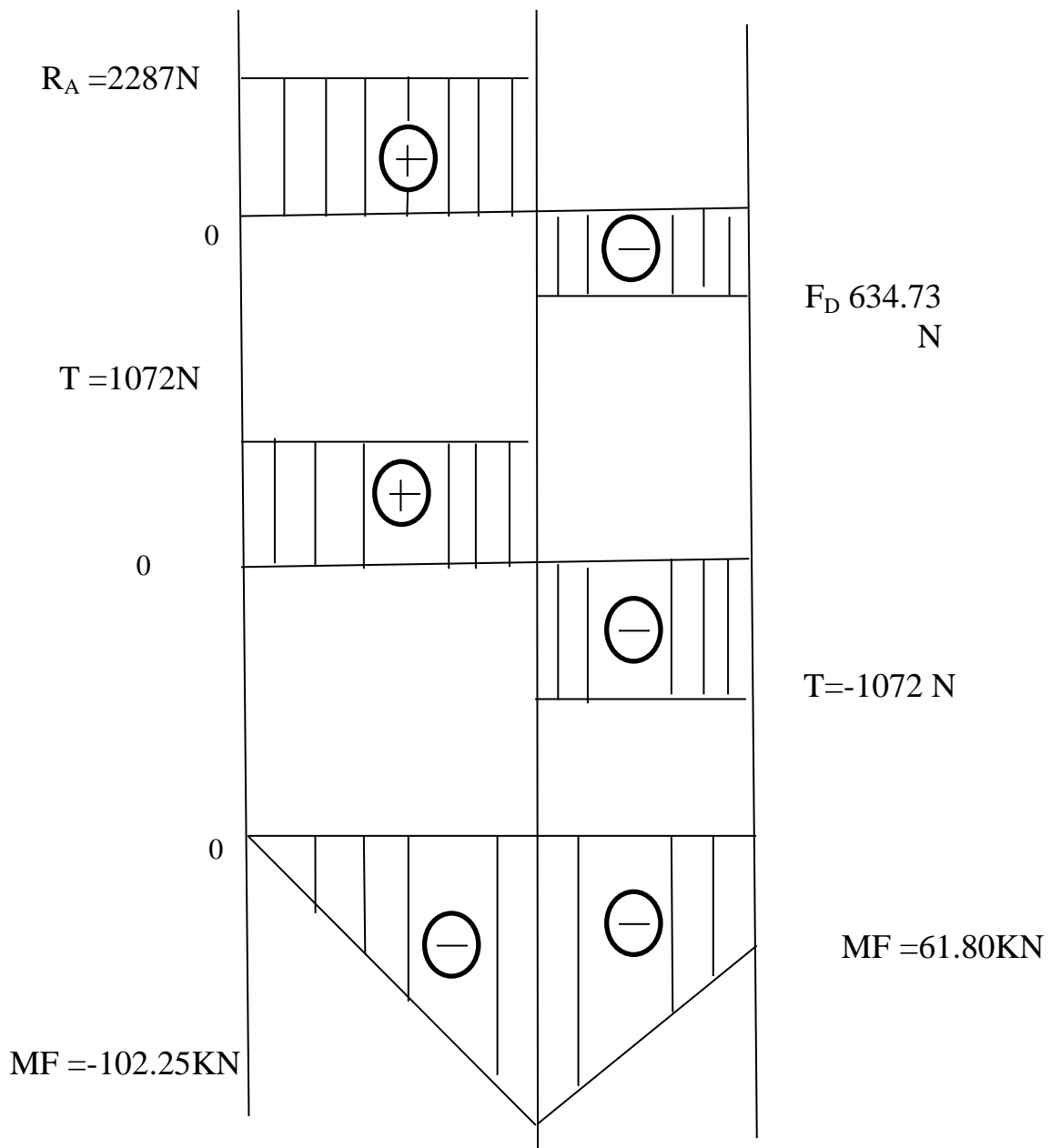
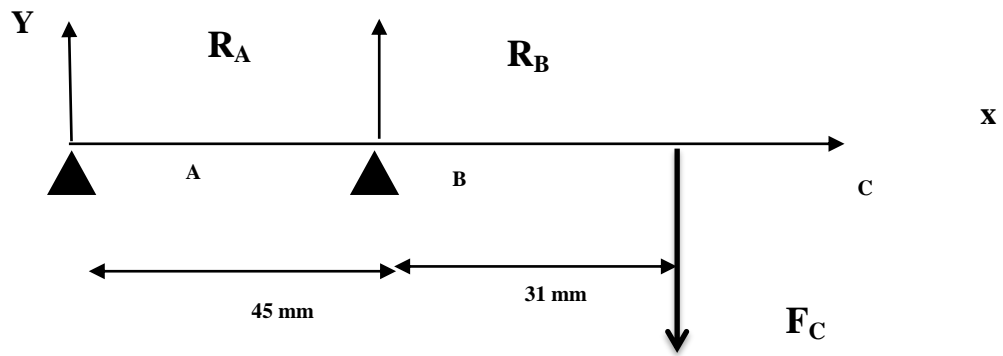
$$T_2 = -1072 \text{ N}$$

$$M_f = R_B x - F_D (x - 45)$$

$$x=45 \Rightarrow M_f = -48.24 \text{ KN}$$

$$x = 76 \Rightarrow M_f = -61.80 \text{ KN}$$





VI.11. Choix des roulement :

$$\sigma_{max} \leq R_p$$

$$\frac{Mf_{max}}{I_0} \cdot I_0 = \frac{\pi d^2}{64} \cdot y = \frac{d}{2} \quad R_e = 340 \text{ Nmm}^2 \quad s = 3$$

$$\frac{32Mf_{max}}{\pi d^2} \leq R_p$$

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32Mf_{MAX}}{\pi R_p}}$$

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \times 79.50 \cdot 10^3}{3.14 \times 133.33}} \quad d \geq 36 \text{ mm}$$

Tableau VI.2. Choix de roulement. [34]

. 3 Dimensions et caractéristiques						
Roulements à une rangée de billes à contact radial						
Écart sur B (sauf roulements coniques)			d ≤ 50	0 ; - 0,120		
			d > 50	0 ; - 0,150		
d**	D	B	r	C ₀ N	C N	n max.* tr/min
1	3	1	0,04	15	52	147 000
1,5	4	1,2	0,05	20	85	105 000
2	5	1,5	0,05	30	111	91 000
2,5	7	2,5	0,15	75	260	74 000
3	10	4	0,1	230	640	70 000
4	13	5	0,2	490	1 300	58 000
5	16	5	0,3	680	1 880	52 000
6	19	6	0,3	1 050	2 460	41 000
8	22	7	0,3	1 360	3 300	42 000
9	24	7	0,3	1 640	3 650	37 000
9	26	8	0,3	1 960	4 620	34 000
10	26	8	0,3	1 970	4 600	34 000
10	30	9	0,6	2 650	6 000	27 000
10	35	11	0,6	3 450	8 100	25 000
12	28	8	0,3	2 370	5 100	32 000
12	32	10	0,6	3 100	6 900	26 000
12	37	12	1	4 200	9 700	23 000
15	32	9	0,3	2 850	5 590	28 000
15	35	11	0,6	3 750	7 800	24 000
15	42	13	1	5 400	11 400	20 000
17	35	10	0,3	3 250	6 050	24 000
17	40	12	0,6	4 750	9 560	20 000

Roulements ouverts						
Roulements à flasques						
Roulements à joints						
d	D	B	r	C ₀ N	C N	n max.* tr/min
17	47	14	1	6 550	13 500	19 000
20	42	12	0,6	5 000	9 360	20 000
20	47	14	1	6 550	12 700	18 000
20	52	15	1,1	7 800	15 900	16 000
25	47	12	0,6	6 550	11 200	18 000
25	52	15	1	7 800	14 000	15 000
25	62	17	1,1	11 600	22 500	14 000
30	55	13	1	8 300	13 300	15 000
30	62	16	1	11 200	19 500	13 000
30	72	19	1,1	16 000	28 100	11 000
35	62	14	1	10 200	15 900	13 000
35	72	17	1,1	15 300	25 500	11 000
35	80	21	1,5	19 000	33 200	10 000
40	80	18	1,1	19 000	30 700	10 000
40	90	23	1,5	24 000	41 000	9 000
45	85	19	1,1	21 600	33 200	9 000
45	100	25	1,5	31 500	52 700	8 000
50	90	20	1,1	23 200	35 100	8 500
50	110	27	2	38 000	61 800	7 500

Roulements miniatures à contact oblique						
d	D	B	r	C ₀ N	C N	n max.* tr/min
10	12	5	0,2	100	150	10 000
12	15	6	0,2	150	200	10 000
15	18	7	0,2	200	250	10 000
17	20	8	0,2	250	300	10 000
20	25	10	0,3	300	350	10 000
25	30	12	0,3	400	450	10 000
30	35	14	0,3	500	550	10 000
35	40	16	0,3	600	650	10 000
40	45	18	0,3	700	750	10 000
45	50	20	0,3	800	850	10 000
50	55	22	0,3	900	950	10 000
55	60	24	0,3	1 000	1 050	10 000
60	65	26	0,3	1 100	1 150	10 000
65	70	28	0,3	1 200	1 250	10 000
70	75	30	0,3	1 300	1 350	10 000
75	80	32	0,3	1 400	1 450	10 000
80	85	34	0,3	1 500	1 550	10 000
85	90	36	0,3	1 600	1 650	10 000
90	95	38	0,3	1 700	1 750	10 000
95	100	40	0,3	1 800	1 850	10 000
100	105	42	0,3	1 900	1 950	10 000
105	110	44	0,3	2 000	2 050	10 000
110	115	46	0,3	2 100	2 150	10 000
115	120	48	0,3	2 200	2 250	10 000
120	125	50	0,3	2 300	2 350	10 000
125	130	52	0,3	2 400	2 450	10 000
130	135	54	0,3	2 500	2 550	10 000
135	140	56	0,3	2 600	2 650	10 000
140	145	58	0,3	2 700	2 750	10 000
145	150	60	0,3	2 800	2 850	10 000
150	155	62	0,3	2 900	2 950	10 000
155	160	64	0,3	3 000	3 050	10 000
160	165	66	0,3	3 100	3 150	10 000
165	170	68	0,3	3 200	3 250	10 000
170	175	70	0,3	3 300	3 350	10 000
175	180	72	0,3	3 400	3 450	10 000
180	185	74	0,3	3 500	3 550	10 000
185	190	76	0,3	3 600	3 650	10 000
190	195	78	0,3	3 700	3 750	10 000
195	200	80	0,3	3 800	3 850	10 000
200	205	82	0,3	3 900	3 950	10 000
205	210	84	0,3	4 000	4 050	10 000
210	215	86	0,3	4 100	4 150	10 000
215	220	88	0,3	4 200	4 250	10 000
220	225	90	0,3	4 300	4 350	10 000
225	230	92	0,3	4 400	4 450	10 000
230	235	94	0,3	4 500	4 550	10 000
235	240	96	0,3	4 600	4 650	10 000
240	245	98	0,3	4 700	4 750	10 000
245	250	100	0,3	4 800	4 850	10 000
250	255	102	0,3	4 900	4 950	10 000
255	260	104	0,3	5 000	5 050	10 000
260	265	106	0,3	5 100	5 150	10 000
265	270	108	0,3	5 200	5 250	10 000
270	275	110	0,3	5 300	5 350	10 000
275	280	112	0,3	5 400	5 450	10 000
280	285	114	0,3	5 500	5 550	10 000
285	290	116	0,3	5 600	5 650	10 000
290	295	118	0,3	5 700	5 750	10 000
295	300	120	0,3	5 800	5 850	10 000
300	305	122	0,3	5 900	5 950	10 000
305	310	124	0,3	6 000	6 050	10 000
310	315	126	0,3	6 100	6 150	10 000
315	320	128	0,3	6 200	6 250	10 000
320	325	130	0,3	6 300	6 350	10 000
325	330	132	0,3	6 400	6 450	10 000
330	335	134	0,3	6 500	6 550	10 000
335	340	136	0,3	6 600	6 650	10 000
340	345	138	0,3	6 700	6 750	10 000
345	350	140	0,3	6 800	6 850	10 000
350	355	142	0,3	6 900	6 950	10 000
355	360	144	0,3	7 000	7 050	10 000
360	365	146	0,3	7 100	7 150	10 000
365	370	148	0,3	7 200	7 250	10 000
370	375	150	0,3	7 300	7 350	10 000
375	380	152	0,3	7 400	7 450	10 000
380	385	154	0,3	7 500	7 550	10 000
385	390	156	0,3	7 600	7 650	10 000
390	395	158	0,3	7 700	7 750	10 000
395	400	160	0,3	7 800	7 850	10 000
400	405	162	0,3	7 900	7 950	10 000
405	410	164	0,3	8 000	8 050	10 000
410	415	166	0,3	8 100	8 150	10 000
415	420	168	0,3	8 200	8 250	10 000
420	425	170	0,3	8 300	8 350	10 000
425	430	172	0,3	8 400	8 450	10 000
430	435	174	0,3	8 500	8 550	10 000
435	440	176	0,3	8 600	8 650	10 000
440	445	178	0,3	8 700	8 750	10 000
445	450	180	0,3	8 800	8 850	10 000
450	455	182	0,3	8 900	8 950	10 000
455	460	184	0,3	9 000	9 050	10 000
460	465	186	0,3	9 100	9 150	10 000
465	470	188	0,3	9 200	9 250	10 000
470	475	190	0,3	9 300	9 350	10 000
475	480	192	0,3	9 400	9 450	10 000
480	485	194	0,3	9 500	9 550	10 000
485	490	196	0,3	9 600	9 650	10 000
490	495	198	0,3	9 700	9 750	10 000
495	500	200	0,3	9 800	9 850	10 000
500	505	202	0,3	9 900	9 950	10 000
505	510	204	0,3	10 000	10 050	10 000
510	515	206	0,3	10 100	10 150	10 000
515	520	208	0,3	10 200	10 250	10 000
520	525	210	0,3	10 300	10 350	10 000
525	530	212	0,3	10 400	10 450	10 000
530	535	214	0,3	10 500	10 550	10 000
535	540	216	0,3	10 600	10 650	10 000
540	545	218	0,3	10 700	10 750	10 000
545	550	220	0,3	10 800	10 850	10 000
550	555	222	0,3	10 900	10 950	10 000
555	560	224	0,3	11 000	11 050	10 000
560	565	226	0,3	11 100	11 150	10 000
565	570	228	0,3	11 200	11 250	10 000
570	575	230	0,3	11 300	11 350	10 000
575	580	232	0,3	11 400	11 450	10 000
580	585	234	0,3	11 500	11 550	10 000
585	590	236	0,3	11 600	11 650	10 000
590	595	238	0,3	11 700	11 750	10 000
595	600	240	0,3	11 800	11 850	10 000
600	605	242	0,3	11 900	11 950	10 000
605	610	244	0,3	12 000	12 050	10 000
610	615	246	0,3	12 100	12 150	10 000
615	620	248	0,3	12 200	12 250	10 000
620	625	250	0,3	12 300	12 350	10 000
625	630	252	0,3	12 400	12 450	10 000
630	635	254	0,3	12 500	12 550	10 000
635	640	256	0,3	12 600	12 650	10 000
640	645	258	0,3	12 7		

IV.12. Gamme de fabrication

Tableau VI.3. recap de la gamme de fabrication du disque

Projet de fabrication			Machine d'essais de f		
Pièces: Disque et arbre rotatif			Brut: Acier		
N°de phase	Designation des phases	Machine/o utilillage	Schémas de phase	Contrôle	
100	Contrôle du brut	Tour// Outil à Charioteret à dresser		Pieds à coulisse	
200	<p>Tournage: Opération210: Dressage e(1) Ebauche de avec une passe de 2mm Finition de(1) Avec une passe de 0.5mm. L=41mm</p> <p>Opération220: - Chariotage de(2) Ebauche de(2) avec une passe de 1mm sur L=140mm m Ø=18. Finition de (2) avec une passe de 1mm sur L=141mm ; Ø=18</p>				
300	<p>Opération310: - Chariotage de(3) Ebauche de(3) avec une passe de 0.5mm sur L=120mm m .Ø=17 Finition de(2) avec une passe de .5mm sur L=60mm Ø=17</p> <p>Opération320: tronçonnage(3)(5) 1mm. L=29mm</p> <p>Opération330: Dressage de(6) L=39mm</p>				

<p>500</p>	<p>Tournage: Opération510: Dressage de ⑦une passe de 2mm Finition de ① avec une passe de 0.5mm L=12mm</p>			<p>Pieds à coulisse</p>
<p>600</p>	<p>Opération610: Rainurage ⑧ .5mm sur L=30mm ; Ø=12mm</p>	<p>Fraisage vertical</p>		<p>Pieds à coulisse</p>

Projet de fabrication			Machine d'essais de fatigue	
Pièces : Glassier			Brut: Acier	
N°de phase	Désignation des opérations	Machine/Outillage	Schémas de phase	Contrôle
100	<p>Contrôle du brut L=100mm A=50mm E=24mm</p> <p>fraisage : Opération210: Rainurage : La surface ① L=100mm E=4mm A=22mm</p> <p>Opération220: Rainurage : la surface ② un outil rainurage L=100mm E=10mm A=30mm</p> <p>Opération230: Rainurage : la surface ③ un outil rainurage L=100mm E=2mm A=15mm</p>	Fraisage vertical		Pieds à coulisse
200	<p>Fraisage : Opération 210</p> <p>Rainurage : la surface ④ L=30mm E=10mm A=14mm</p> <p>Opération 310 : Parçage taraudages La surface ⑤ ④ ⑥ ⑦ ⑧. Ø =5mm</p>	Fraisage vertical Parçage		Pieds à coulisse
300	<p>Fraisage : Opération 210</p> <p>Rainurage : la surface ④ L=30mm E=10mm A=14mm</p> <p>Opération 310 : Parçage taraudages La surface ⑤ ④ ⑥ ⑦ ⑧. Ø =5mm</p>	Fraisage vertical Parçage		Pieds à coulisse

Projet de fabrication			Machine d'essais de fatigue	
Pièces: Paroi support glassier			Brut: Acier	
N° de phase	Designation Des operations	Machine/ Outillage	Schémas de phase	Contrôle
100 200	<p>Contrôle du brut :</p> <p>Fraisage : Opération 210 Profilage ① ② R=30mm</p> <p>Opération 210 Rainurage : la surface ③ L=30mm E=10mm A=10mm</p>	<p>Fraisage vertical Parçage</p>		Pieds à coulisse
300	<p>Opération 310 Parçage : La surface ④ ⑤ $\varnothing = 8\text{mm}$ La surface ⑥ ⑦ $\varnothing = 5\text{mm}$ La surface ⑧ ⑨ $\varnothing = 8\text{mm}$ Soudage Opération 410 Soudage la surface ⑩</p>	<p>Fraisage vertical Parçage Soudage</p>		

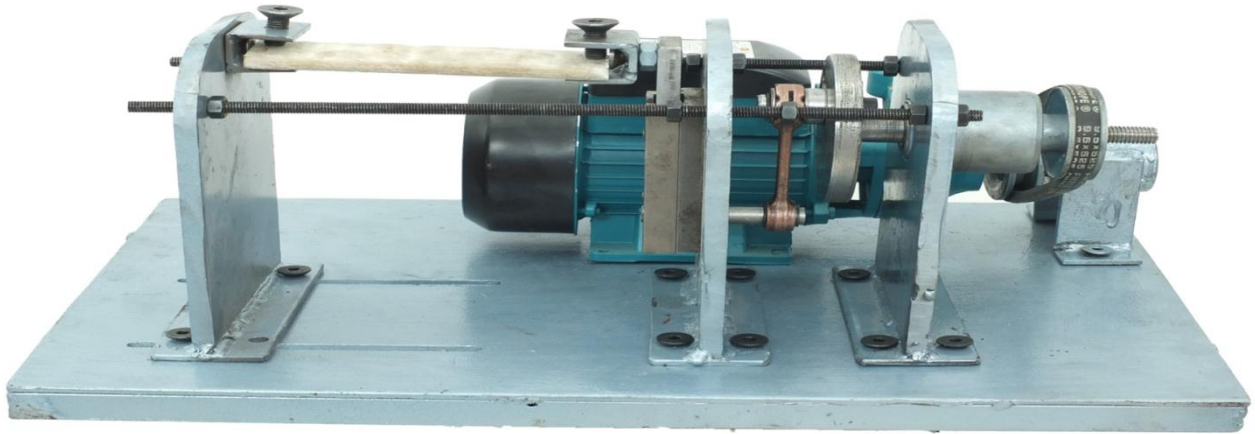
VI.13.Réalisation de machine d'essai de fatigue pour éprouvettes planes

Figure IV.17. Vue de la machine d'essai de fatigue pou éprouvettes planes après assemblage

VI.14:Estimation du coût de la machine a essai mécanique

La présente machine à essai sera utilisée pour réaliser les essais de la fatigue sur des matériaux locaux dans le but de la recherche scientifique. Pour la conception et la réalisation des éléments mécaniques de la machine nous avons acheté de la matière première que nous avons usiné afin d'obtenir certaines pièces pour la réalisation de la machine et d'autres achetées selon le besoin. Dans les tableaux qui suivent nous allons faire une estimation du coût de réalisation de la machine.

Tableau VI.4. Coût de la matière première

Designations	Quantités	Prix unitaires	Montants
Plat d'acier (500*350(mm) épaisseur 4	1	1500	1500
Plat d'acier (200*150mm) épaisseur 10	3	1000	3000
Acier A60 épaisseur (e=10mm) (l= 200 *50mm)	1	500	500
Acier A60 épaisseur (e=10mm) (l= 200 *30mm)+(l=200*15)	1	500	500
	2	250	500
Fer rond plein $\phi = 110$ mm	1	800	800
Fer rond plein $\phi = 60$ mm	2	700	1400
Fer rond plein $\phi = 20$ mm	1	700	700
Fer rond plein $\phi = 50$ mm	1	300	300
Total 1			9200

Tableau VI.5.Prix d'usinage

Eléments usinés	Montants
Bas+ 3 paroi	7000
Fer rond plein	5000
Acier A60	4000
Soudage	1000
Total 2	17000

Tableau VI.6.Prix des accessoires et pièces standard

Accessories et Pièces Standard	Quantités	Prix unitaires	Montants
Roulement 6003	3	500	1500
Roulement 32c1216+13c1521	2	300	300
Bielle	1	300	300
Poulies	2	700	1400
courroie	1	200	200
Vis M08	14	40	560
Vis M12	4	100	100
Claveta	2	50	100
Circliebes	3	50	150
Ecrou+ tige fileté	2	600	600
Peinture		1000	1000
TOTAL 3			5150

Tableau VI.7.Total final des dépenses de la fabrication

TOTAL 1	9200
TOTAL 2	17000
TOTAL 3	550
TOTAUX	30850

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'objectif de notre travail était d'apporter une contribution à la recherche en vue de la caractérisation du comportement mécanique des matériaux composites en étudiant la conception d'une machine capable de procéder à des essais mécaniques.

De l'analyse de ces modèles de machine nous avons pu procéder à des choix de formes d'éléments pour en faire ressortir un schéma qui sera une première vue de l'ensemble de la machine. Cette étape franchie, nous sommes passés à la détermination des paramètres et des sollicitations liés à certains éléments sensibles de la machine pour un dimensionnement précis et la gamme de fabrication de la machine.

Au terme de ce travail de conception, nous avons fait la réalisation de certaines composantes mécanique de la machine suivie d'une présentation du coût global de la matière première et de leur usinage

Référence bibliographique :

- [1] Bardia Esmaellou (2011) Approche Cinétique Du Comportement En Fatigue Du Polyamide 66 Renforcé Par 30% De Fibres De Verre Thèse De Doctorat, Ensam Smi De Paris. Ecole Doctorale N° 432 : Science Des Métiers De L'ingénieur. Doctorat Paristech..
- [2] Ed. Institut De Recherches De La Sidérurgie Française, Collection Irsid-Otua. 1991]. Lieurade H.P. Rupture Par Fatigue Des Aciers.
- [3] H.J.Gough And H.V. Pollard, The Strength Of Metals Under Combine D'alternating Stresses, Proc. Inst. Mech. Engrs., 131, Pp. 3-103, 1935].
- [4] A.-F. Gourgues-Lorenzon(2006) Comportement, Endommagement Et Rupture Par Fatigue Thèse D'amine Bennani, Soutenue A L'école Des Mines De Paris.
- [5] Didier Duprat (2004) Fatigue Et Mécanique De La Rupture Des Pièces En Alliage Léger Bureau D'études. Aérospatiale Toulouse.
- [6] P.Bonnet (2004-2005) Fatigue Des Métaux 'Matériaux Et Procèdes' Institut Supérieur De Mécanique De Paris.
- [7] Colloquium. [S.L.], P. 137-144. 1982
- [8] Offshore Guidance Notes. Second International Conference, On Offshore Welded Struct
- [9] R.M. Jones, « Mechanics Of Composite Materials, Mc Graw-Hill Company », 1975, P270.
- [10] J. Aucher, « Etude Comparative Du Comportement Composite A Matrice Thermoplastique Ou Thermodurcissable », Thèse De Doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées De Rouen, France, 2009, P220.
- [11] E. Jao Jules, « Couplages Entre Propriétés Thermiques, Réactivité Chimique Et Viscosité Des Matériaux Composites Thermodurcissables En Relation Avec Les Conditions De Leur Elaboration Fondée Sur L'hystérésis Diélectrique », Thèse De Doctorat, L'école Nationale Supérieure D'arts Et Métiers Paris Tech, 2001, P242.
- [12] B.Hami, « Elaboration Et Caractérisation Physico-Mécanique D'une Structure Sandwich Multicouches », Thèse De Doctorat, Université M'hamed Bouguerra Boumerdès, 2017/2018, P118.
- [13] K.Hacini, « Etude Du Comportement Mécanique En Flexion 3 Points D'un Matériau Composite Par Les Eléments Finis », Diplôme De Magister, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2009, P85.

- [14] h.H. Kausch, N. Heymans, C. J. Plummer, And P. Decroly, « Matériaux Polymères : Propriétés Mécaniques Et Physiques », Vol.14, 2001, P676.
- [15] F.Z.Moulay, «Etude Par Algorithme Génétique De L'effet D'humidité Sur L'endommagement De L'interface D'un Bio-Composite Bois- Polypropylène», Mémoire De Master, Université De Saida, 2018, P62.
- [16]-M.Laarej, « Etude Par Spectroscopie Raman Et Modélisation D'une Résine Composite Rtm », Thèse De Doctorat, Université Paul Verlaine De Metz, 2010, P130.
- [17] C.Paris, « Etude Et Modélisation De La Polymérisation Dynamique De Composites A Matrice Thermodurcissable», Thèse De Doctorat, Université De Toulouse, 2011, P144.
- [18] L.Gornet, « Généralités Sur Les Matériaux Compo
- [19] C.Zapata.Massot, « Synthèse De Matériaux Composite Par Co-Broyage En Voie Sèche Et Caractérisation Des Propriétés Physico-Chimique Et D'usage Des Matériaux », Thèse De Doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, 2004, P278.
- [20]- C.A.R.M.A, « Glossaire Des Matériaux Composites », Centre D'animation Régional En Matériaux Avances, Livre, Actualisation Octobre 2006, P34.
- [21] J. M. Berthelot, « Matériaux Composites Comportement Mécanique Et Analyse Des Structures », Tec & Doc, Livre 4 Eme Edition 2005, P641.
- [22] M.Ladghem Chikouche, « Renforcement D'un Polymère (Polyester Insaturé) Par Des Fibres Végétales (Arundo Donax) », Thèse De Doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif 1, 2016, P110.
- [23] F.Z.Yahi, « Caractérisation Physique D'une Fibre Végétale (Le Diss) », Mémoire De Master, Université Mohamed Boudiaf – M'sila, 2016, P57.
- [24] M. Geier Et D. Duedal (1985). Guide Pratique Des Matériaux Composites. Technique Et Documentation, Paris.
- [25] R.G. Weatherhead (1980). Frp Technology. Fibre Reinforcedresinsystems. Applied Science Publishers, Londres
- [26] Etude De Comportement En Fatigue De Composites A Fibres De Verres Discontinus Renforçant Une Matrice Claude Bathias, Jean-Paul Bailon
- [27] La Fatigue Des Matériaux Et Des Structures. En Polypropylène.
- [28] Bardia Esmaeillou Approche Cinétique Du Comportement En Fatigue Du Polyamide 66 Renforcé Par 30% De Fibres De Verre.
- [29] DUPLESSIS KERGOMARD Y., , Thèse de Doctorat, Ecole Nationale 2007, Supérieure des Mines de Paris

- [30] OYA N., HAMADA H., , Composites Part A, 1997, Vol. 28 1, pp 23/832P
- [31] J. Lemaitre and J. L. Chaboche. mécanique des matériaux solides. Dunod, 1988 Duplessis
Kergomard Y., , Thèse De Doctorat, Ecole Nationale 2007, Supérieure Des Mines De Paris
- [32] Oya N., Hamada H., , Composites Part A, 1997, Vol. 28 1, Pp 23/832p
- [33] J. Lemaitre And J. L. Chaboche. Mécanique Des Matériaux Solides. Dunod, 1988.
- [34] Chevalier Guide Du Dessinateur Industriel.

Résumé:

Le présent mémoire est consacré à la conception et à la réalisation d'une machine mécanique d'essais de fatigue pour éprouvettes plates sur des matériaux composites.

La conception des composants de machine de fatigue été faite par le logiciel de conception et de dessin assisté par ordinateur solidworks, en suivant des procédures qui déterminent les formes et les démentions des pièces de notre machine. Les différentes pièces a réalisées au niveau de l'atelier de fabrication à l'aide des machine tels que le tour universel et la fraiseuse verticale.

Ce travail nous a permet de toucher à la conception et à la réalisation d'un dispositif pour Développement des pièces constituées du matériau composite. Par conséquent les nombreux échantillons de matériaux composites et des joints de soudure peuvent être testés par des essais de fatigue en flexion.

ملخص :

هذه المذكورة مخصصة لتصميم آلة ميكانيكية لتجربة قياس التعب لعينات مسطحة على مواد مركبة . تصميم مكونات آلة التعب أنجزت بواسطة برنامج الرسم على الحاسوب (الصوليد وركس). باتباع الخطوات التي تسمح بتحديد الأشكال وأبعاد القطع لهذه الآلة. ويتم انجاز مختلف هذه القطع على مستوى ورشة التصنيع بواسطة آلة الخراطة المتعددة المهام وآلة الفرازة العمودية.

هذا العمل سمح لنا بتصميم وإنجاز هذه الآلة من أجل تطوير مكونات القطع من المواد المركبة ومنه نستطيع قياس عدد كبير من عينات المواد المركبة ووصلات الحام المسطحة بواسطة آلة تجربة قياس التعب بالانحناء

Summary:

This thesis is devoted to the design and construction of a mechanical fatigue testing machine for flat specimens on composite materials.

The design of the fatigue machine components was done by the solid works computer-aided design and drafting software, following procedures that determine the shapes and dimensions of the parts of our machine. The various parts are produced at the level of the manufacturing workshop using machines such as the universal lathe and the vertical milling machine.

This work has allowed us to touch on the design and production of a device for the development of parts made of composite material. Therefore many samples of composite materials and weld joints can be tested by bending fatigue tests.