

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique**

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

**Mémoire de Master en Génie Mécanique
Option : Mécanique des solides**

Thème

**Expérimentation et simulation de la fatigue
en flexion plane alternée sur du PMMA**

Etudié par :

Khaled MELIANI

Proposé et dirigé par :

Mr. BELKACEMI Yacine

Mr. GUERGUEB Brahim

Promotion 2015

ملخص:

يهدف هذا المشروع بدراسة ظاهرة التعب الميكانيكي وإبراز تأثير المسافة بين الخدشين على مدة الإستعمال من أجل هذا قمنا بإجراء بحث نظري فيما يخص هذه الظاهرة ثم تجارب على مجموعة من العينات في نموذج تجريبي ومن ثم التحقق من نتائج التجارب عن طريق محاكاة باستعمال برنامج SOLIDWORKS وفي الاخير رسم المنحنيات والتعليق عليها .
كلمات مفتاحية: التعب الميكانيكية، المسافة بين الخدشين، محاكاة,

RESUME:

Ce projet vise à étudier le phénomène de fatigue en flexion plane et mettre en évidence l'impact de la distance entre deux entailles parallèles sur la durée de vie. Une série de tests expérimentaux a été réalisée sur des éprouvettes en plexiglas de section droite et d'égale résistance avec une machine testant 12 éprouvettes simultanément. Les éprouvettes testées présentent deux entailles parallèles et traversantes perpendiculaires à l'axe de celle-ci. La simulation du phénomène a été faite en utilisant le logiciel Solidworks en s'intéressant au nombre de cycles à rupture en fonction de la distance entre entailles.

Mots clés : fatigue, flexion plane , entailles, simulation, PMMA, Solidworks

Abstract:

This project aims to study the phenomenon of mechanical fatigue and highlight the impact of the distance between two parallel notches on the duration of the life. An experimental test series was performed on 12 samples at the same time using fatigue machine. The samples tested have two parallel slits and perpendicular to the axis of the samples. The simulation of the phenomenon was made using SolidWorks software.

Keywords: fatigue, parallel notches, simulation, PMMA, Solidworks

REMERCIEMENTS

Avant tout, on remercie ALLAH tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

Le présent mémoire a été dirigé par Mr. Yacine BELKACEMI et Mr. Brahim GUERGUEB. C'est grâce à eux, à leurs remarques, conseils et soutien que j'ai pu le finaliser. Je leur exprime mes gratitudes, mes reconnaissances et mes sincères remerciements.

Je tiens à remercier tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'avoir accepté de juger le travail développé dans ce mémoire.

Enfin, je ne pourrai terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants, en particulier ceux du département de génie mécanique. Qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A mes chers frères, Mohamed, pour toute son aide et sa présence, Walid, pour ses attentions et sa présence et Djamel, mon adorable petit frère. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A mon épouse, pour son soutien moral, ses conseils et ses encouragements.

A ma tante Souad, pour sa compréhension, son soutien et sa tendresse.

A mon frère et binôme Abdeldjalil, En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

A tous mes amis depuis mon enfance.

A tous ceux qui m'ont enseigné.

A toute ma famille aussi nombreuse qu'elle soit.

Trouvez ici l'expression de ma profonde gratitude et reconnaissance.

K.Meliani

TABLE DES MATIERES

Résumé:.....	I
REMERCIEMENTS	II
Dédicaces.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VI
NOMENCLATURE :.....	VII
Introduction générale	1
1. CHAPITRE I : FATIGUE SOUS ENTAILLES	4
1.1. INTRODUCTION.....	5
1.2. PHÉNOMÈNE DE FATIGUE.....	5
1.3. LES CONTRAINTES APPLIQUEES.....	6
1.3.1. CONTRAINTE NOMINALE.....	6
1.3.2. CYCLE DE CONTRAINTE.....	7
1.3.3. TERMES ET SYMBOLS UTILISÉS POUR DÉCRIRE LE CYCLE DE CONTRAINTE.....	7
1.3.4. TYPES DE CYCLE DE CONTRAINTE.....	8
1.4. PRÉSENTATION PRATIQUE DES ESSAIS (COURBE DE WÖHLER) :.....	8
1.5. EFFET D'ENTAILLE.....	9
1.5.1. FACTEUR DE CONCENTRATION DE CONTRAINTES.....	10
1.5.2. INFLUENCE DE LA SEVERITE D'ENTAILLE.....	11
2. CHAPITRE 2 : LES EPROUVETTES	13
2.1. MATÉRIAUX UTILISÉ.....	14
2.1.1. INTRODUCTION.....	14
2.1.2. PRESENTATION.....	14
2.1.3. CARACTERISTIQUES.....	14
2.1.4. PROPRIETES.....	14
2.1.5. APPLICATIONS.....	15
2.2. USINAGE.....	15
2.2.1. SCIES CIRCULAIRES.....	16
2.2.2. SCIES A RUBAN.....	16
2.2.3. SCIES A DECOUPER OU A CHANTOURNER.....	16
2.2.4. SCIES SAUTEUSES.....	17

2.3. GÉOMÉTRIE DES EPROUVETTES	17
2.3.1. FORME	17
2.3.2. DIMENSION	19
2.4. Distribution de la contrainte	19
3. CHAPITRE 3 : EXPERIMENTATION	21
3.1. INTRODUCTION	22
3.2. DESCRIPTION DE LA MACHINE.....	22
3.3. COMPOSANTS	22
3.4. PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES :	23
3.5. ESSAIS DE FATIGUE.....	25
4. CHAPITRE 4 :RESULTATS ET DISCUSSIONS	26
4.1. INTRODUCTION :	27
4.2. SIMULATION SOUS SOLIDWORKS :.....	27
4.2.1. PRESENTATION DU LOGICIEL	27
4.2.2. CONCEPTION DE LA PIECE	27
4.2.3. ANALYSE STATIQUE :	28
4.2.4. ANALYSE DE FATIGUE	31
4.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX :.....	33
4.3.1. VERIFICATION DE LA PROFONDEUR D'ENTAILLE :	33
4.3.2. LES RESULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE :	35
Conclusion générale	38
Bibliographie	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Différents types de sollicitations.....	6
Figure 2 Cycle de contrainte de fatigue	7
Figure 3 courbe de wholer	9
Figure 4 Diagramme S-N.....	10
Figure 5 Distribution des contraintes au fond d'une entaille semi-elliptique	11
Figure 6 Coefficient effectif de concentration de contraintes k_f en fonction du rayon en fond d'entaille.....	12
Figure 7 Découpage à la scie à ruban.....	16
Figure 8 scie à découper pour réaliser une inscription	16
Figure 9 Scie sauteuse avec trou percé à l'angle.....	17
Figure 10 Epreuve axisymétrique cylindrique à section circulaire constante	17
Figure 11 Epreuve axisymétrique toroïdales à section circulaire variable	18
Figure 12 Epreuve parallélépipédique à section rectangulaire constante.....	18
Figure 13 Epreuve parallélépipédique à section rectangulaire variable.....	18
Figure 14 Epreuve parallélépipédique à section rectangulaire à profil triangulaire d'égales résistances	19
Figure 15 Epreuve normalisée	19
Figure 16 Représentation schématique de la poutre	20
Figure 17 Différents composants de la machine d'essai	22
Figure 18 Plaques de plexi recouvertes par un ruban adhésif	23
Figure 19 Scie à chantourner	24
Figure 20 Epreuves de plexiglas découpée.....	24
Figure 21 Epreuves fixées sur la machine.....	25
Figure 22 Epreuves non-entaillée	27
Figure 23 Epreuve avec entailles distantes de 5mm.....	28
Figure 24 Configuration d'encastrement.....	29
Figure 25 Configuration de chargement.....	29
Figure 26 Maillage de l'épreuve	30
Figure 27 Flèche de l'épreuve d'entailles séparées de 15 mm	30
Figure 28 Résultats de la flèche obtenus par SolidWorks.....	31
Figure 29 nombre de cycle de l'épreuve d'entailles séparées de 5 mm.....	32
Figure 30 Résultats de durée de vie obtenus par SolidWorks.....	32
Figure 31 Microscope MITUTOYO pour vérifier les entailles	33
Figure 32 Positionnement de l'épreuve.....	34
Figure 33 Fond d'entaille	34
Figure 34 Détermination de la longueur de l'entaille.....	35
Figure 35 Rupture des épreuves	35
Figure 36 Résultats expérimentaux pour la durée de vie	36
Figure 37 Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 propriétés mécanique du PMMA	15
Tableau 2 propriétés physiques du PMMA	15
Tableau 3 Propriétés du PMMA injectées dans solidworks.....	28
Tableau 4 Résultats de la flèche obtenus par solidworks.....	31
Tableau 5 Resultats de durée de vie par soliworks	32
Tableau 6 Profondeur des entailles des épreuves	35
Tableau 7 Résultats expérimentaux pour la durée de vie	36

NOMENCLATURE :

d	Profondeur en fond d'entaille
E	Module de Young
k_{σ}	Coefficient de concentration de contrainte en régime élasto-plastique
k_f	Coefficient de réduction de la résistance en fatigue
k_n	Facteur d'intensité de contrainte normalisé
k_t	Facteur de concentration de contrainte
K	Facteur d'intensité de contrainte d'une fissure
k_n	Facteur d'intensité de contrainte d'une entaille en V
k_s	Facteur d'intensité de contrainte, au seuil de propagation
m_d	Facteur de correction pour l'effet d'échelle
m_e	Rapport entre la limite d'endurance sur bord lisse et la résistance à la traction
q	Facteur de sensibilité à l'effet d'entaille
r	Rayon en fond d'entaille
R	Rapport de contrainte (min/max)
S	Contrainte nominale
N_a	Amplitude de contrainte nominale
σ_a	Amplitude de contrainte
σ_{ar}	Amplitude de contrainte à $R = -1$
σ_m	Contrainte moyenne
σ_{max}	Contrainte nominale maximale
σ_{min}	Contrainte nominale minimale
σ_D	Limite d'endurance d'une éprouvette avec bord lisse
σ_D^E	Limite d'endurance d'une pièce entaillée
σ_x	Contrainte locale dans la direction x
σ_y	Contrainte locale dans la direction y

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le développement des polymères structuraux est lié à leurs propriétés mécaniques, qui dépendent elles-mêmes de la microstructure. C'est ainsi que, parmi les polymères, les semi-cristallins ont pour la plupart une tenacité élevée qui répond aux exigences de produits devant résister à des conditions d'utilisation sévères (impact, fluage, fatigue). Leur utilisation dans des applications structurales implique également de disposer de modèles fiables pour le dimensionnement de structures. Ces modèles doivent tenir compte de la complexité des modes de sollicitation vus par les pièces en service, et en particulier la multi axialité du chargement.

Un problème majeur que l'on rencontre pour les pièces thermoplastiques concerne leur durée de vie. De nombreux travaux ont été menés pour prédire la durée de vie de structures en fluage, en fissuration lente, dans des environnements agressifs, etc... Dans ce contexte, des aspects relatifs à l'influence du procédé de mise en œuvre, des paramètres microstructuraux et des effets de l'environnement sur certaines propriétés mécaniques particulières du matériau ont été étudiés.

La compréhension et la prédiction de la durabilité de ces matériaux en fatigue sont, d'une façon générale, moins avancées et assez disparates selon le mode de ruine : les phénomènes qui précèdent la fissuration ont été relativement peu étudiés, contrairement aux mécanismes de propagation de fissures qui font l'objet d'une bibliographie abondante. La nature des mécanismes impliqués dans les processus d'instabilités sous sollicitations cycliques à grand nombre de cycles est plus rarement discutée, malgré un enjeu clair pour un dimensionnement plus efficace. Ceci s'explique, dans certains cas de sollicitations complexes, par la difficulté à associer a posteriori une sollicitation de fatigue à des structures ne présentant aucun signe classiquement associé à ce type de chargement : fissure, stries de fatigue par exemple [1].

Dans un tel contexte, ce mémoire a fait l'objet de l'étude de la fatigue sous flexion plane alternée d'éprouvette de plexiglas possédant deux entailles elliptiques parallèles. Dans **le premier chapitre** une recherche bibliographique de la fatigue sous entaille, les termes employés et les paramètres utilisés ont été brièvement définis. L'accent a été mis sur l'effet d'entaille qu'on peut dire qu'il est représentatif de n'importe quel changement de section ou imperfection que peut présenter un matériau donné.

L'objet du deuxième chapitre est la description de l'éprouvette allant du choix de la forme au matériau choisi (plexiglas) tout en donnant ces particularités, propriétés et les méthodes par lesquelles ont été usinées les éprouvettes.

Le troisième chapitre donne une description de la machine utilisé pour les essais de fatigue en flexion ainsi que les démarches suivies pour y parvenir. Le dernier chapitre a été dédié aux résultats de simulation et expérimentaux et à leurs interprétations. Le mémoire est clôturé par une conclusion générale mettant le point sur le fruit de ce travail.

1. CHAPITRE I : FATIGUE SOUS ENTAILLES

1.1. INTRODUCTION

De manière générale on estime qu'environ 80 % des ruptures en service sont dues à la fatigue. Les ruptures dues à la fatigue ont fait l'objet de recherches depuis plus de 150 ans afin de comprendre le phénomène. La fatigue persiste même de nos jours à être un problème majeur en ingénierie. Pour avoir une idée de son ampleur, le coût annuel de bris de pièces en fatigue frôle 3% du revenu national brut des États-Unis (Dowling, 2007 ; Henaff& Morel, 2005). Malgré tous les efforts de recherche, de nombreux aspects de fatigue demeurent méconnus et les méthodes utilisées pour les calculs de dimensionnement restent, dans une large partie, empiriques [2].

1.2. PHENOMENE DE FATIGUE

Toute pièce mécanique est soumise durant son fonctionnement normal à un certain nombre de sollicitations de causes variables mais qui se traduisent le plus souvent par des variations cycliques des contraintes qui lui sont appliquées.

Or, il est malheureusement souvent constaté, et ce depuis fort longtemps, la ruine, parfois catastrophique, d'un certain nombre de structures alors que celles-ci ne sont soumises qu'à des sollicitations dynamiques jugées modestes par rapport aux capacités statiques des matériaux définis communément par leur résistance à la rupture et leur limite d'élasticité.

Le responsable de ces ruines est très souvent le phénomène de fatigue du matériau, au caractère particulièrement insidieux puisque se développant lentement dans le temps, sans modifications macroscopiquement apparentes des pièces et structures et dans des zones souvent inaccessibles mais particulièrement sujettes à cet endommagement de par leur conception.

Cet endommagement par fatigue mené jusqu'à son terme, c'est-à-dire jusqu'à la ruine, comprend trois périodes d'importances variables suivant les matériaux et les caractéristiques des sollicitations [3] :

- période d'amorçage,
- période de propagation,
- rupture brutale.

1.3. LES CONTRAINTES APPLIQUEES

En service ou au cours d'essais de laboratoire, les efforts appliqués peuvent être des sollicitations de type simple, par exemple de traction-compression, de flexion ou de torsion, ou résulter d'une combinaison de ces sollicitations. Selon le renseignement cherché, les sollicitations appliquées dans les essais de fatigue peuvent, de même, être d'un des types ci-dessous ou représenter une combinaison de deux ou plusieurs d'entre-deux. Quel que soit le mode de sollicitation, simple ou combiné, les contraintes normales et/ou les contraintes tangentielles (contraintes de cisaillement) développées dans l'éprouvette, varieront suivant une fonction du temps.

Généralement, au cours d'essais de fatigue, la contrainte appliquée variera suivant une fonction du temps approximativement sinusoïdale, ceci en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines ou pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats d'essais. Dans ce qui suit, on ne s'occupera donc que de sollicitations sinusoïdales d'amplitude constante.

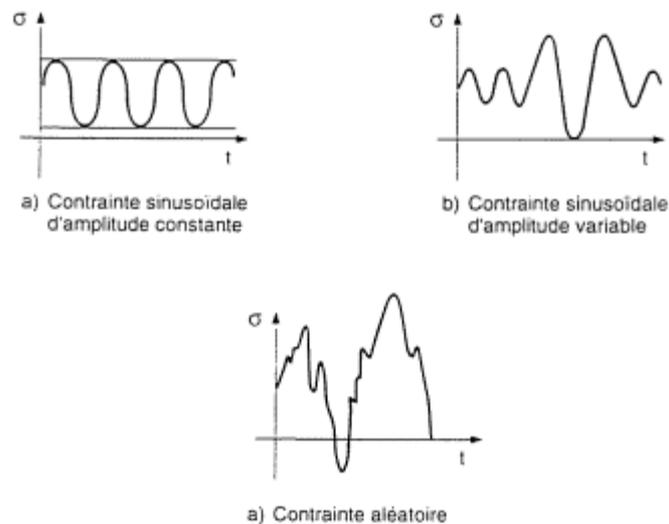


Figure 1 Différents types de sollicitations

1.3.1. Contrainte nominale

La contrainte prise en compte au cours de l'essai de fatigue est une contrainte nominale. Elle est calculée par rapport à la section nette de la pièce ou de l'éprouvette considérée, à l'aide des formules usuelles de la résistance des matériaux (RDM) relative au domaine élastique. Elle ne fait

pas intervenir la concentration de contrainte due à des entailles, ou à d'autres causes. La contrainte normale est exprimée par σ , la contrainte de cisaillement (ou de torsion) par τ .

1.3.2. Cycle de contrainte

C'est la plus petite partie de la fonction contrainte-temps qui se répète périodiquement. La contrainte sinusoïdale peut être considérée comme la superposition d'une contrainte alternée σ_a et d'une contrainte statique appelée contrainte moyenne σ_m .

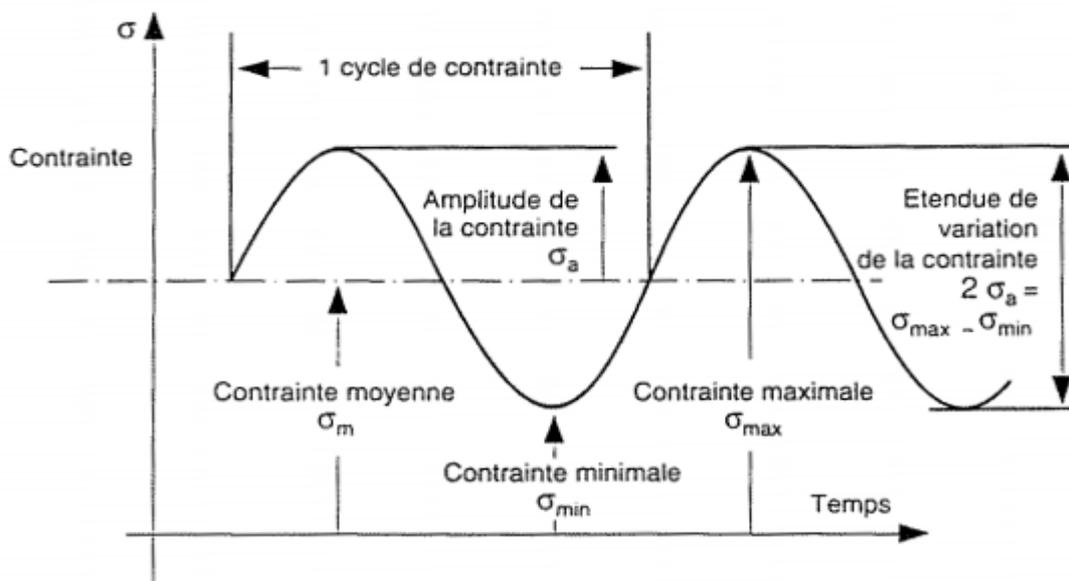


Figure 2 Cycle de contrainte de fatigue

1.3.3. Termes et symboles utilisés pour décrire le cycle de contrainte

- Contrainte maximale (σ_{max}, τ_{max}) : valeur maximale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte.
- Contrainte minimale (σ_{min}, τ_{min}) : valeur minimale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte.
- Contrainte moyenne (σ_m, τ_m): définie par la valeur algébrique $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$
- Amplitude de contraintes : (appelée aussi contrainte alternée) définie par la valeur

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

➤ Rapport de contrainte R_σ : défini par le rapport algébrique $R_\sigma = \sigma_{min} / \sigma_{max}$

➤ Etendue de variation de la contrainte ($2\sigma_a$ ou $2\tau_a$) : différence algébrique entre la contrainte maximale et la contrainte minimale du cycle de contrainte: $2\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

1.3.4. Types de cycle de contrainte

➤ Contrainte purement alternée: contrainte qui varie entre des valeurs égales dans le sens positif et négatif. (Pour ce cycle de contrainte σ_m ou $\tau_m = 0$)

➤ Contrainte alternée: contrainte qui évolue entre une valeur maximale positive et une valeur minimale négative dont les valeurs absolues sont différentes (Pour ce cycle de contrainte $0 < \sigma_m < \sigma_a$ ou $0 < \tau_m < \tau_a$)

➤ Contrainte répétée: contrainte qui varie entre la valeur 0 et une valeur maximale positive ou entre 0 et une valeur maximale négative (pour ce cycle de contrainte: $\sigma_m = \sigma_a$ ou $\tau_m = \tau_a$).

➤ Contrainte ondulée: contrainte qui varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe ($\sigma_m > \sigma_a$ ou $\tau_m > \tau_a$).

1.4. PRÉSENTATION PRATIQUE DES ESSAIS (COURBE DE WÖHLER) :

Les résultats des essais de fatigue peuvent être reportés sur un diagramme de résistance à la fatigue exprimant l'amplitude de contrainte en fonction du logarithme de la durée de vie N (ou nombre de cycles à rupture) et tracer la courbe moyenne correspondante, appelée courbe de Wöhler dite aussi diagramme S-N (Stress - Number of cycles to rupture),

A chaque essai sous amplitude de contrainte constante, on associe un point $\sigma_a - \log N$ sur le diagramme.

Tous les essais doivent être conduits à une même fréquence f, même contrainte moyenne σ_m sur un nombre d'éprouvettes identiques ou même rapport de contrainte.

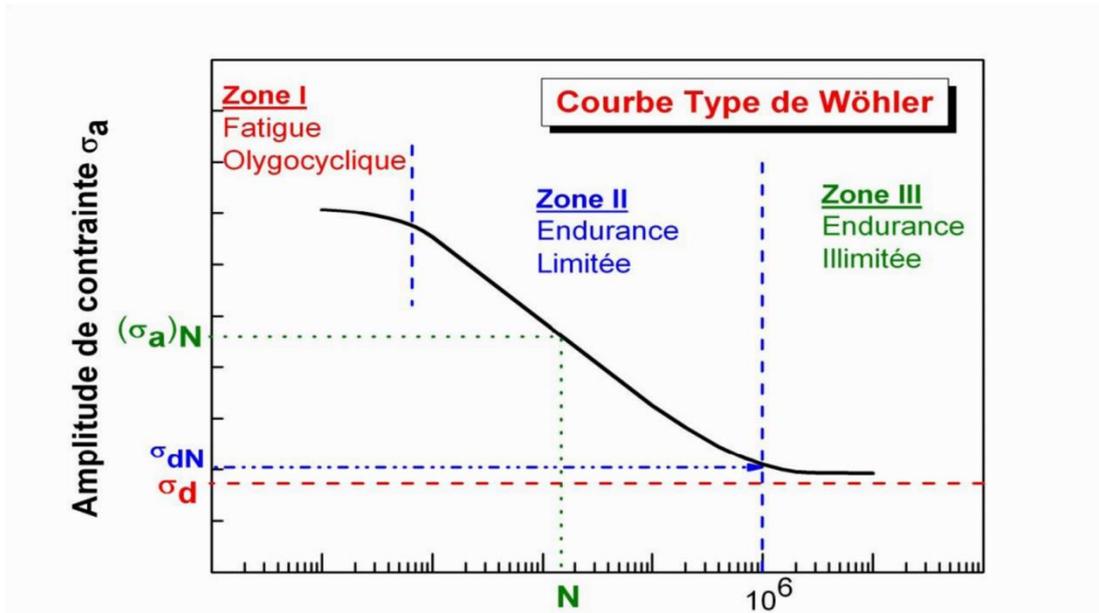


Figure 3 courbe de wholer

Sur une courbe de Wöhler, on distingue trois domaines :

- Domaine de fatigue oligocyclique : sous de fortes amplitudes de contrainte, les ruptures surviennent après un petit nombre de ($NR \leq 10^4$ cycles).
- Domaine d'endurance limité: les ruptures se produisent après un nombre de cycle qui croit quand la contrainte décroît ($10^4 < NR < 10^6$ cycles).
- Domaine d'endurance illimité : les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce.

N.B : Le niveau de l'asymptote horizontale détermine la limite de fatigue σ_D . Pour certains matériaux soumis à une contrainte cyclique inférieure à la rupture ne se produit pas en principe.

1.5. EFFET D'ENTAILLE

La plupart des structures sont constituées d'éléments de formes géométriques complexes. Ces entailles mécaniques sont des lieux de concentration de contrainte qui jouent un rôle nocif relativement à la résistance de la structure. Un changement de section dans une pièce, entraîné par la présence d'une entaille, d'un congé, d'un trou, etc., conduit à modifier la distribution des contraintes et à faire apparaître localement des pointes de contrainte

L'influence des concentrations de contraintes sur la résistance à la fatigue d'un matériau, est étudiée sur des éprouvettes entaillées. Cette concentration de contraintes locale est mesurée à l'aide des coefficients de concentration de contraintes [4].

1.5.1. Facteur de concentration de contraintes

Une pièce soumise à des contraintes variables dans le temps se brise à un niveau de contrainte inférieur à celui de la contrainte de rupture en chargement statique. Les limites d'endurance des matériaux sont habituellement déterminées en faisant des essais sur des éprouvettes normalisées et polies en chargement de traction compression.

Les résultats expérimentaux sont habituellement présentés dans un diagramme bi logarithmique de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles à la rupture (Drouin, 1986). Généralement les pièces n'ont pas la même géométrie, n'ont pas la même qualité de surface et ne sont pas soumises au même type de cycle de chargement [2].

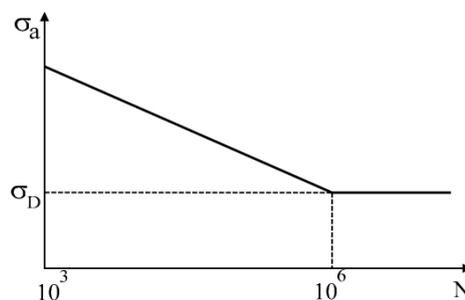


Figure 4 Diagramme S-N

La plupart des structures présentent des discontinuités géométriques qui font en sorte d'augmenter les contraintes locales par un facteur k_t , qu'on appelle facteur de concentration de contrainte. Le champ de contrainte créé dans la proximité de ces discontinuités influence grandement la durée de vie en fatigue (Drouin, 1986).

Dans le cas d'un comportement élastique linéaire le facteur k_t est donné par :

$$k_t = \frac{\sigma}{S}$$

où σ est la contrainte locale maximale et S est la contrainte nominale.

Le facteur k_t dépend de la géométrie de la discontinuité et du chargement. Il peut être déterminé par la théorie d'élasticité, par un calcul numérique ou par des méthodes expérimentales comme la photoélasticité et les jauges de déformations (Drouin, 1986).

L'expression du facteur de concentration de contraintes dû à l'introduction d'une entaille elliptique dans une grande plaque soumise à une contrainte uni-axiale est :

$$k_t = 1 + 2 \frac{A}{B}$$

où A et B sont les demi-longueurs des axes de l'ellipse (Figure 5).

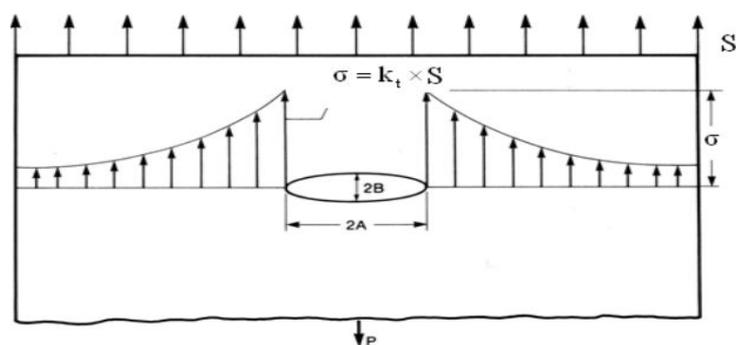


Figure 5 Distribution des contraintes au fond d'une entaille semi-elliptique

Dans le cas d'un trou circulaire, k_t est égal à 3 en tension uni axiale. Si on considère une tension bi axiale le facteur devient égal à 2, et si on a une contrainte de cisaillement on obtient une valeur de 2 selon le critère de Von Mises et une valeur de 4 selon le critère de Tresca (Fuchs & Stephens, 1980).

La pente de la distribution de contrainte depuis le fond d'entaille représente la rapidité avec laquelle la contrainte locale décroît.

1.5.2. Influence de la sévérité d'entaille

Pour un matériau donné, l'écart entre k_f et k_t est d'autant plus grand que l'entaille est sévère. La figure 6 montre l'évolution des facteurs k_f et k_t en fonction du rayon en fond d'entaille, avec une éprouvette soumise à la flexion rotative, faite d'acier au carbone AISI 1045 avec une résistance à la traction de 400 MPa. En modifiant le rayon, on change le degré de sévérité d'entaille. Plus le rayon est petit, plus l'entaille est sévère.

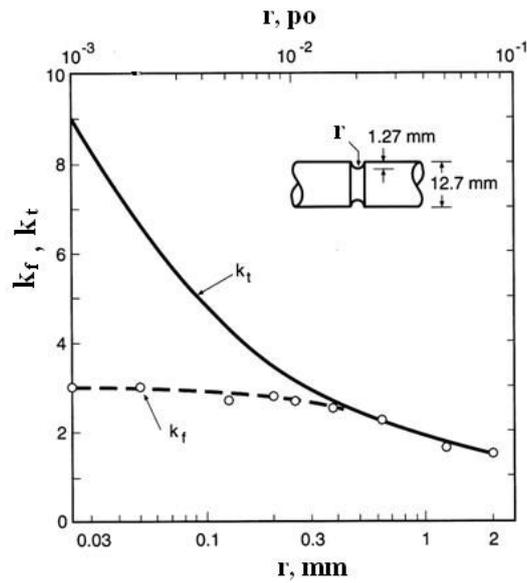


Figure 6 Coefficient effectif de concentration de contraintes k_f en fonction du rayon en fond d'entaille

On remarque que pour des entailles présentant un rayon en fond d'entaille de 0,3 mm et plus, le facteur k_f se rapproche du facteur k_t , tandis que pour des entailles sévères, la différence entre k_t et k_f est beaucoup plus importante.

Pour une profondeur d'entaille donnée, mais pour des rayons de courbure décroissants, le volume de matériau sollicité, et donc la probabilité d'avoir un site d'amorçage favorable diminue. Ceci donne une explication pour l'augmentation de l'écart entre k_f et k_t avec une croissance de la sévérité d'entaille.

Conclusion :

Parmi les paramètres influençant la durée de vie, nous avons retenu l'effet d'entailles.

2. CHAPITRE 2 : LES EPROUVETTES

2.1. MATERIAUX UTILISE

2.1.1. INTRODUCTION

L'application des matériaux polymériques industriels a considérablement augmenté, et ceci grâce à leur facilité de mise en œuvre, à leur faible coût de production et leur faible densité. Le comportement de ces matériaux suscite actuellement un grand intérêt dans le monde de la recherche. Les domaines d'applications des polymères comme matériaux de structure sont très variés (aéronautique, automobile...). Par exemple, le Poly méthacrylate de Méthyle (PMMA), transparent et présentant une grande rigidité élastique, est utilisé pour des applications telles que les pare-brise ou encore pour les blindages.

Les matériaux polymères sont de plus en plus souvent soumis à une large gamme de conditions de chargement en termes de vitesses de déformation et de températures, dans une variété d'applications importantes telles que l'aviation et les composants de véhicules [5].

2.1.2. PRESENTATION

Le poly méthacrylate de méthyle ou PMMA, plus connu sous le nom de plexiglas, a été inventé par les chimistes Barker et Skinner en 1924. Il s'agit d'une matière Plastique appartenant à la famille des thermoplastiques, qui a pour propriétés d'être transparente et très résistante. Il a été commercialisé à partir de 1934 par l'entreprise Otto Haas sous la marque déposée "Plexiglas", même si le nom de commercialisation de ce matériau en Europe est plutôt "Altuglas". Il est parfois désigné par les termes de verre acrylique, Plastique acrylique ou simplement d'acrylique et commercialisé sous les noms de Perspex, Limacryl, Vitroflex, Metacrilat ou Lucite.

2.1.3. CARACTERISTIQUES

Le plexiglas est un polymère, le poly méthacrylate de méthyle, dont le monomère est le méthacrylate de méthyle (ou MAM). Il est souvent abrégé PMMA, de l'anglais Poly Méthyl Méthacrylate.

Ce matériau appartient à la famille des thermoplastiques, c'est-à-dire des matières plastiques qui se déforment et peuvent être façonnées sous l'action de la chaleur.

2.1.4. PROPRIETES

Le plexiglas possède des qualités optiques et mécaniques très intéressantes. Ce matériau très limpide avec un aspect brillant présente une très grande transparence et une transmission lumineuse supérieure à celle du verre (son indice optique est de 1.49). Il est résistant aux rayons UV, à la corrosion et aux agents atmosphériques tout en étant beaucoup plus léger que le verre (masse volumique 1190 kg/m³).

Enfin, son aspect très lisse et brillant en surface en fait un matériau esthétique, voire design, pouvant être utilisé dans les domaines de la construction et de l'ameublement.

Le PMMA a aussi pour avantage d'être recyclable : il peut être fondu puis remoulé. Il peut aussi être chauffé pour obtenir son monomère de départ, le MAM, qui sera réutilisé pour une nouvelle polymérisation.

Les propriétés mécaniques du PMMA se résument dans le tableau suivant :

Tableau 1 propriétés mécanique du PMMA

Module d'élasticité (GPa)	Coefficient de poisson	Limite d'élasticité (MPa)	Résistance à la traction (MPa)
3.2	0.4	60-110	110

Les propriétés physiques du PMMA se résument dans le tableau suivant :

Tableau 2 propriétés physiques du PMMA

Masse volumique ρ (kg.m⁻³)	Température de fusion (°C)	Coefficient de dilatation (10⁻⁶. °C⁻¹)
1190	85-105	55-90

2.1.5. APPLICATIONS

Le plexiglas est un matériau très apprécié pour sa transparence et sa solidité : il est fréquemment utilisé dans le secteur du bâtiment et l'industrie, notamment pour les enseignes lumineuses, les panneaux signalétiques, les Murs anti-bruit, les meubles, supports et étagères ou encore les aquariums (car il supporte la pression de plusieurs tonnes d'eau).

Il sert aussi à la fabrication des pièces industrielles, des accessoires de sécurité et des prothèses dentaires.

Son excellente transmission de la lumière lui permet de remplacer le verre dans la fabrication de vitres (il transmet jusqu'à 92% de la lumière visible).

2.2. USINAGE

Les appareils couramment employés pour le travail du bois et des métaux se prêtent très bien à l'usinage du PLEXIGLAS®. Les machines fonctionnant rapidement et sans vibrations assurent des surfaces de coupe propres. Il convient surtout que les ponceuses et les scies circulaires soient équipées de dispositifs d'aspiration, afin d'évacuer immédiatement les copeaux produits.

PLEXIGLAS® est généralement découpé à l'aide de scies circulaires ou de scies à ruban. Il est également possible d'utiliser des scies à archet et des scies à main [6].

2.2.1. SCIES CIRCULAIRES

Alors que le transformateur de matières plastiques travaille généralement avec des scies circulaires sur table, les distributeurs utilisent essentiellement des scies à panneaux verticales. Pour la découpe de lots plus importants, des installations commandées par ordinateur permettent de traiter plusieurs paquets à la fois [7].

2.2.2. SCIES A RUBAN

Pour le découpage en courbe et le détournage de pièces formées en PLEXIGLAS®, on utilise fréquemment les scies à ruban très employées dans le travail du bois et des métaux.

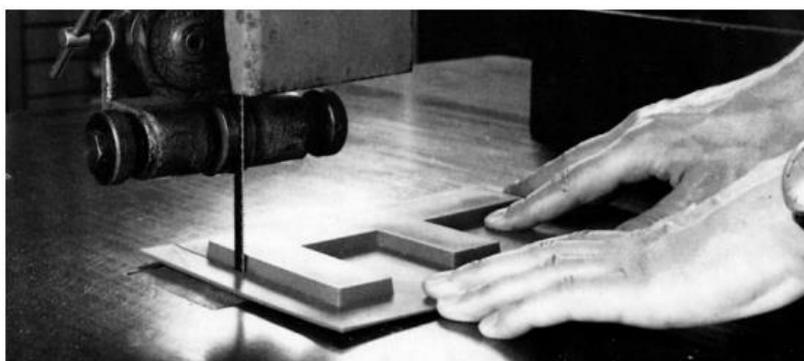


Figure 7 Découpage à la scie à ruban

2.2.3. SCIES A DECOUPER

Pour les découpes intérieures où la direction de travail change fréquemment, ainsi que pour le travail sur des plaques fines, il est possible d'utiliser des scies à chantourner ou à découper avec lames de scie en couteau ou lame de scie spiralée [7].



Figure 8 scie à découper pour réaliser une inscription

2.2.4. SCIES SAUTEUSES

Pour les opérations de finition, d'ajustage ou de découpage de passages, les scies sauteuses sont irremplaçables. Les bords de coupe sont toutefois assez grossiers et doivent éventuellement être repris [7].



Figure 9 Scie sauteuse avec trou percé à l'angle

2.3. GEOMETRIE DES EPROUVETTES

Les éprouvettes utilisées pour les essais de fatigue sont très diverses tant du point de vue forme que dimensions. On peut cependant différencier deux types principaux : les éprouvettes de révolution à section circulaire et les éprouvettes prismatiques à section rectangulaire.

2.3.1. FORME

Les éprouvettes de révolution à section circulaire peuvent être cylindriques ou coniques ; un exemple d'éprouvette cylindrique est donné dans la figure 10.

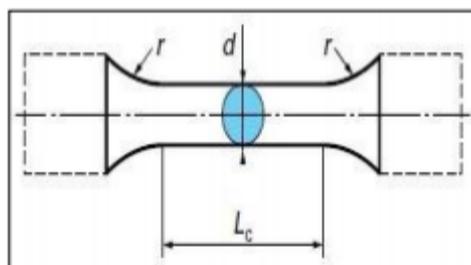


Figure 10 Eprouvette axisymétrique cylindrique à section circulaire constante

Elles peuvent aussi posséder une gorge toroïdale comme le montre l'exemple de la (figure11).

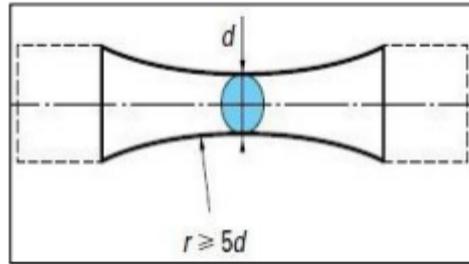


Figure 11 Epreuve axisymétrique toroïdale à section circulaire variable

Pour faciliter les comparaisons de résultats, l'organisme international de normalisation (ISO) propose l'emploi d'éprouvettes ayant des diamètres de 5-6-7,5-9,5 et 12,5mm avec une tolérance de 0,05mm.

Les éprouvettes prismatique à section rectangulaire peuvent avoir un profil rectiligne ou en ligne de jet (figure 12).

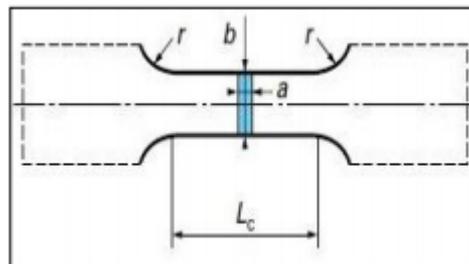


Figure 12 Epreuve parallépipédique à section rectangulaire constante

Elles peuvent aussi, comme dans le cas précédent, présenter soit un profil toroïdal (figure13) soit un profil triangulaire d'égale résistance (figure14)

Pour ces éprouvettes, l'ISO propose une section comprise entre 30 et 640 mm².

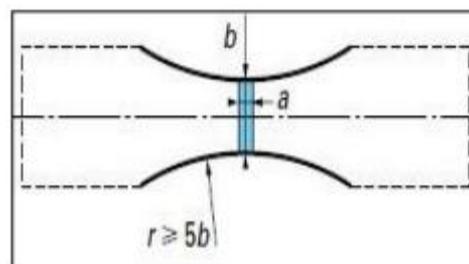


Figure 13 Epreuve parallépipédique à section rectangulaire variable

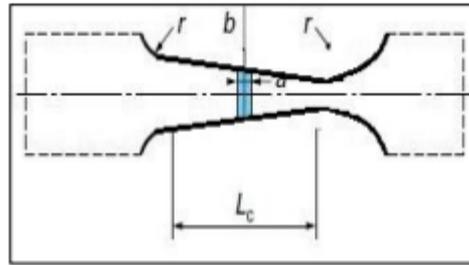


Figure 14 Epreuve parallépipédique à section rectangulaire à profil triangulaire d'égales résistances

2.3.2. DIMENSION

Le type d'éprouvette utilisée dépend des renseignements que l'on désire obtenir de l'essai de fatigue et de la forme sous laquelle le métal est disponible. L'éprouvette réalisée a une section droite rectangulaire et présentant un profil triangulaire d'égale résistance.

La forme et les dimensions s'inspirent d'éprouvettes normalisées en respectent les proportions et sont adaptées au problème particulier, pour être représentatives de l'échelle des pièces réelles et être adaptées aux moyens de fabrication. La figure 15 illustre une éprouvette entaillée normalisée.

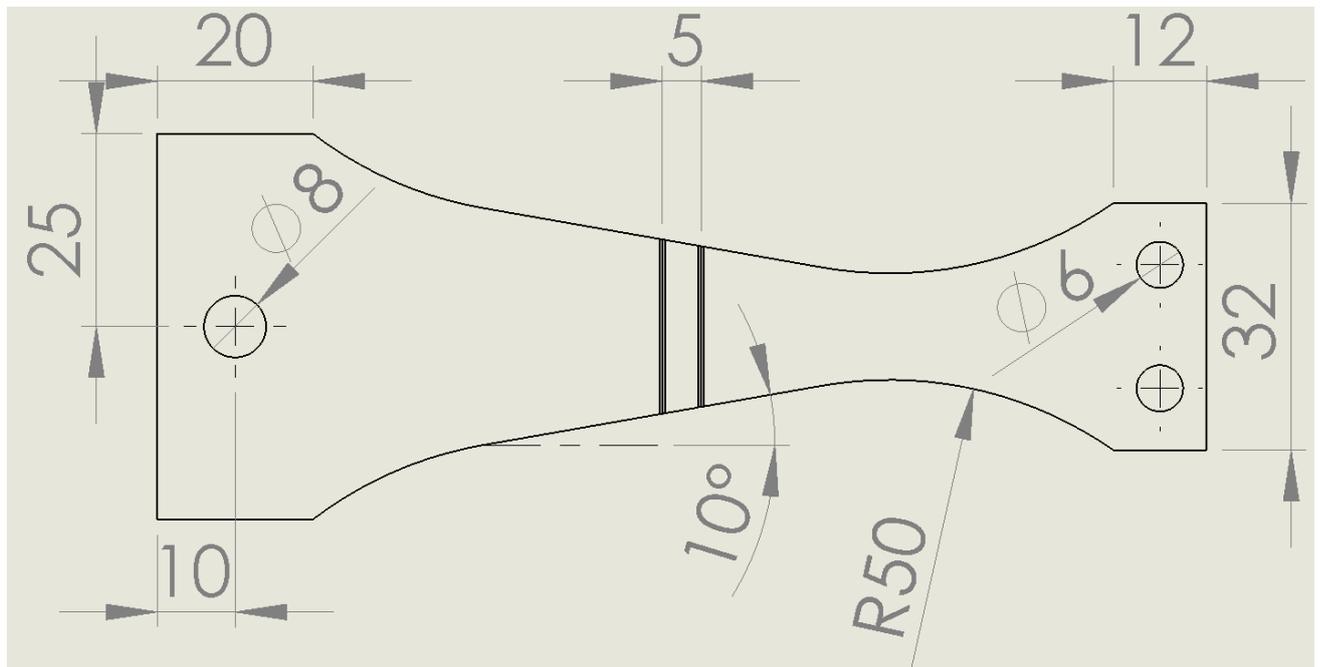


Figure 15 Epreuve normalisée

2.4. Distribution de la contrainte

La théorie des poutres est une application de la théorie de l'élasticité isotrope. Pour mener les calculs de résistance des matériaux, on considère les hypothèses suivantes :

- hypothèse de Bernoulli : au cours de la déformation, les sections droites restent perpendiculaires à la courbe moyenne ;
- les sections droites restent planes selon Navier-Bernoulli (pas de gauchissement).

L'hypothèse de Bernoulli permet de négliger le cisaillement dans le cas de la flexion. La théorie des poutres permet d'établir des relations entre l'effort appliqué F , la valeur du moment fléchissant tout au long de l'éprouvette, la valeur extrême de la contrainte normale et la valeur de la flèche.

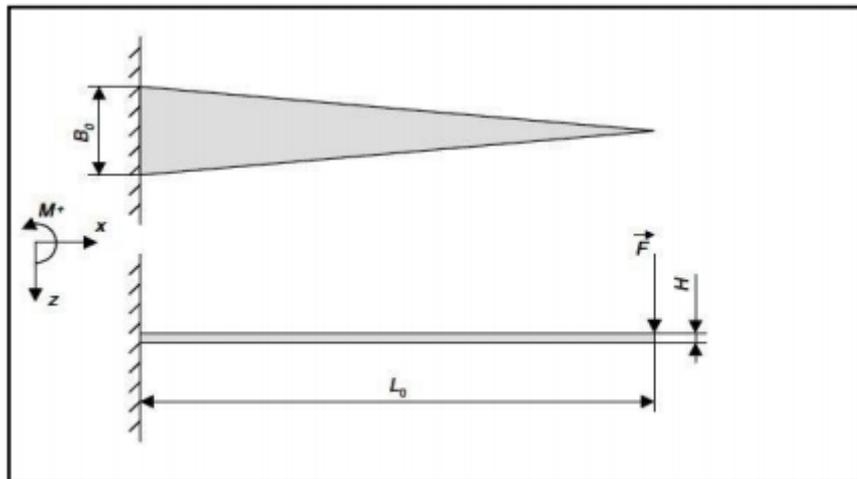


Figure 16 Représentation schématique de la poutre

Afin de procéder au dimensionnement, on assimile l'éprouvette à une poutre en porte-à-faux schématisée dans la figure 16, encastrée d'un côté, libre à l'autre. Pour une charge concentrée, appliquée à l'extrémité libre, le moment fléchissant est proportionnel à l'abscisse x , or pour un bon déroulement de l'essai on est contraint d'avoir un moment fléchissant constant tout au long de la longueur utile. C'est ce qui justifie l'utilisation d'éprouvettes présentant une section d'égale résistance.

Conclusion:

Pour cette étude, des éprouvettes en plexiglass d'égale résistance doivent être réalisées pour les essais de fatigue.

3. CHAPITRE 3 : EXPERIMENTATION

3.1. INTRODUCTION

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

3.2. DESCRIPTION DE LA MACHINE

La machine de fatigue conçue dans le cadre d'un PFE au sein de l'école est une machine d'essai de fatigue sous corrosion en flexion plane sur multi-échantillons à grand nombre de cycles.

La machine peut réaliser des essais de fatigue en flexion plane sur 12 échantillons simultanément, dont 6 échantillons à l'air libre et 6 autres sous corrosion. Les échantillons parallélépipédiques sont encastrés d'un côté et un déplacement est imposé à l'autre extrémité. Une contrainte due à la flexion homogène est ainsi produite sur une certaine longueur de l'échantillon. Après un certain nombre de cycles de charge, les échantillons se rompent en raison de la fatigue du matériau. Dans ce cas, la machine est arrêtée automatiquement par l'interrupteur d'arrêt. Le nombre de cycles d'effort est enregistré par un compteur électronique et visualisé par un afficheur numérique.

3.3. COMPOSANTS

La figure suivante montre la machine d'essai en précisant ses différents composants :

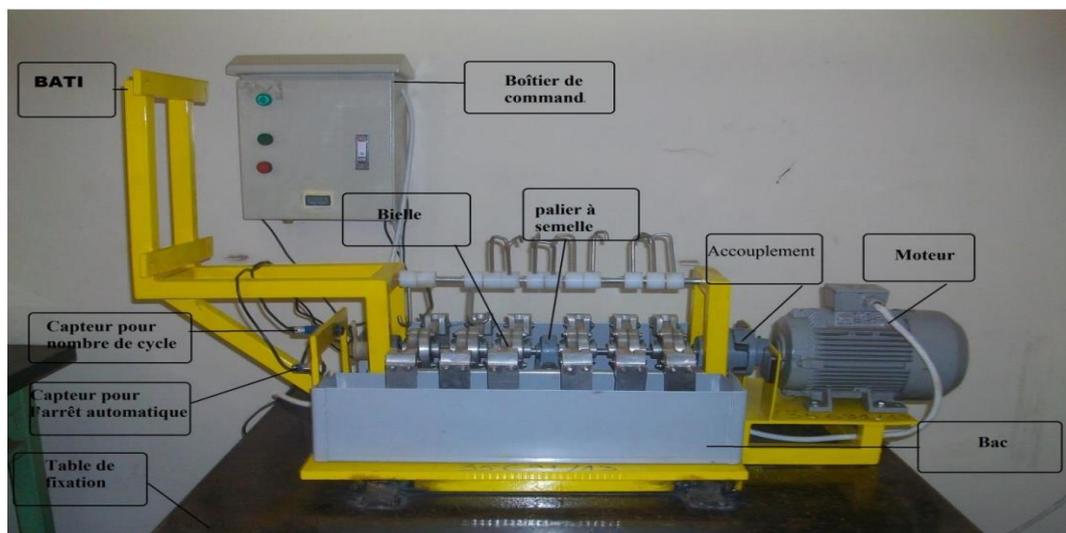


Figure 17 Différents composants de la machine d'essai

3.4. PREPARATION DES EPROUVETTES :

On commence, et à l'aide d'une scie circulaire, la découpe des plaques de plexiglass en rectangles pour faciliter et permettre une meilleur découpe des éprouvettes avec la scie à chantourner. Ces plaques seront ensuite recouvertes d'adhésif de protection, comme le montre la figure suivante, pour éviter la formation d'éventuelles bavures et garantir un meilleur état de surface.



Figure 18 Plaques de plexi recouvertes par un ruban adhésif

Après avoir collé les formes, préalablement imprimées, sur les plaques on passe aux découpes des éprouvettes à l'aide de la scie à chantourner **figure 19**. Ensuite sur une perceuse radiale, nous réalisons les perçages qui permettront la fixation des éprouvettes sur la machine de fatigue.



Figure 19 Scie à chantourner

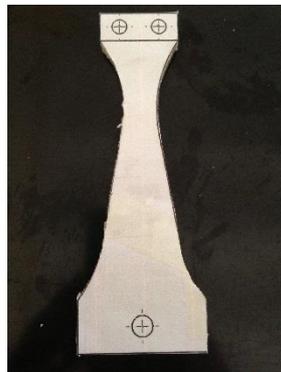


Figure 20 Eprovettes de plexiglas découpée

La dernière étape de la préparation des éprouvettes consiste à réaliser des entailles, on a choisi des types d'entailles :

- elliptiques de profondeur égale à 0.3 mm et une longueur de 10 mm les entailles doivent être parallèles et identiques. Elles sont séparées de 5, 10, 15 et 20 mm
- Entailles traversantes a sections triangulaire de profondeur 1mm et espacées de 5, 10, 15 et 20mm.

Il est à noter que les entailles ont été faites manuellement avec un cutter dédié à la découpe du plexiglas.

3.5. ESSAIS DE FATIGUE

Les éprouvettes ainsi préparées sont prêtes pour effectuer un test de fatigue. Les éprouvettes sont installées et fixées dans leur places et le test peut démarrer par des sollicitations de flexions planes alternés.



Figure 21 Eprouvettes fixées sur la machine

4. CHAPITRE 4 :RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre seront présentés les résultats relatifs aux essais de fatigue en flexion plane alternée sur des éprouvettes en plexiglas. Il sera aussi présenté une étude de simulation avec le logiciel SolidWorks. Les résultats présentés seront ensuite interprétés pour les lier à leurs causes physiques.

4.2. SIMULATION SOUS SOLIDWORKS :

4.2.1. PRESENTATION DU LOGICIEL

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur 3D fonctionnant sous Windows. C'est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan.

4.2.2. CONCEPTION DE LA PIECE

Vu que la pièce n'est pas de forme compliquée la conception sous SolidWorks fait appel à des commandes de bases dans la rubrique esquisse de ce logiciel. Ensuite on fait appel à la fonction bossage extrudé pour avoir la pièce finalisée comme le montre la figure suivante :

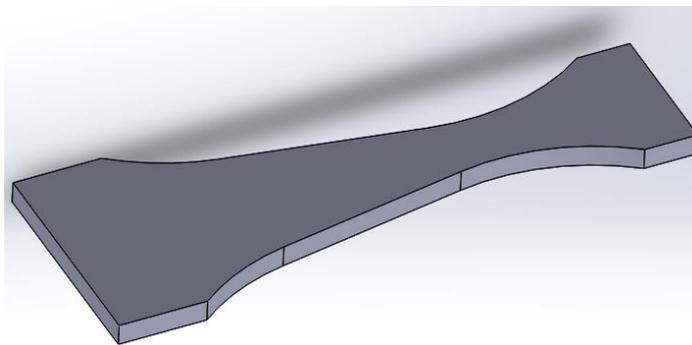


Figure 22 Eprouvettes non-entallée

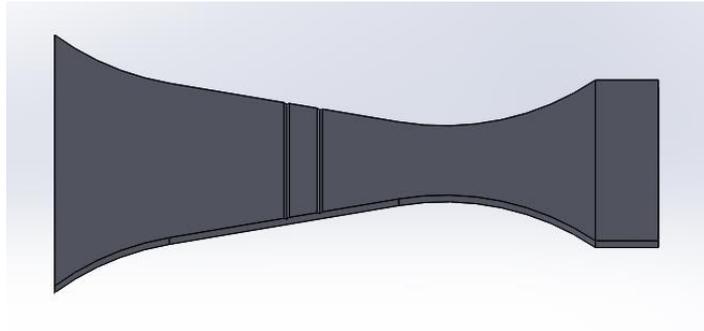


Figure 23 Eprouvette avec entailles distantes de 5mm

Après avoir défini correctement la géométrie de l'éprouvette, nous entamons la simulation qui passe par deux étapes : une analyse statique et l'analyse de fatigue.

4.2.3. ANALYSE STATIQUE :

L'analyse statique comme son nom l'indique donne des résultats en appliquant une seule fois la charge maximale introduite. Les résultats donnés sont la distribution de contraintes, la flèche, et le taux de déformation.

- **Injecter les propriétés du matériau**

Dans un premier temps on injecte quelques propriétés (physiques et mécaniques) qui définissent notre matériau qui est le plexiglas. Le tableau suivant montre les données injectées dans SolidWorks.

Tableau 3 Propriétés du PMMA injectées dans solidworks

Propriété	Valeur	Unité
Module d'élasticité	2.77	GPa
Coefficient de Poisson	0.39	-
Module de cisaillement	1	GPa
Masse volumique	1190	kg/m3
Allongement à la rupture	2.5 à 4	%
Résistance à la traction	80	MPa
Résistance à la compression	105	MPa
Limité d'élasticité	70	MPa
Conductivité thermique	0.21	W/(m.K)

Chaleur spécifique	1250	J/(kg.K)
--------------------	------	----------

- **Conditions aux limites**

L'éprouvette est encastrée à sa base comme condition imposée par la machine.

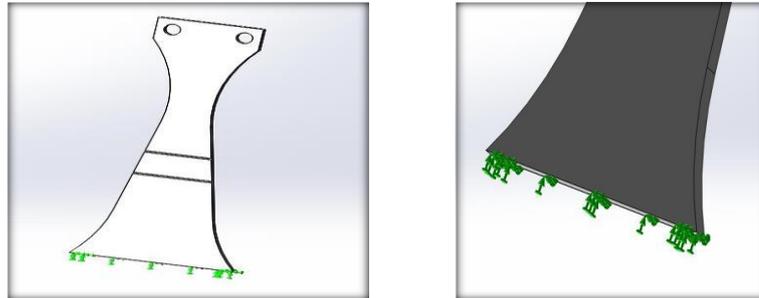


Figure 24 Configuration d'encastrement

- **Chargement**

Pour modéliser le chargement, on a considéré la surface sur laquelle la force est active et on a appliqué une force de 15 N. cette force est uniformément répartie sur la surface.

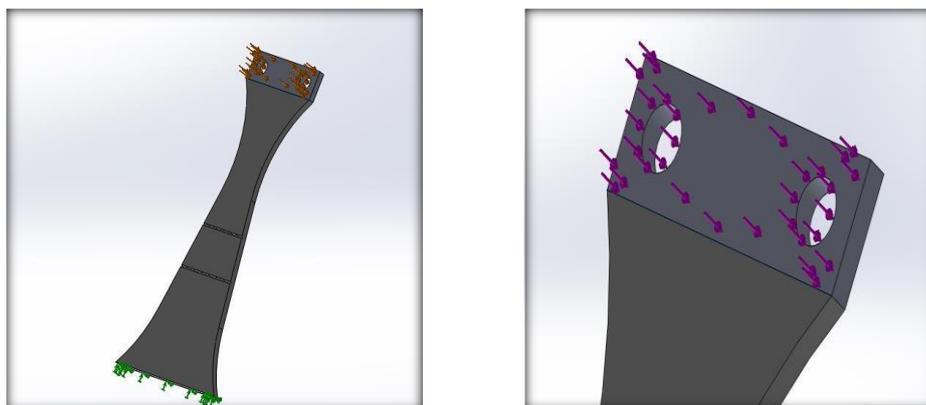


Figure 25 Configuration de chargement

- **Maillage**

Le maillage définit le nombre d'éléments à travers lequel le logiciel divisera la pièce pour effectuer les calculs. Pour cette simulation j'ai choisi le maillage le plus fin que propose SolidWorks, qui donne pour cette pièce 52171 éléments.

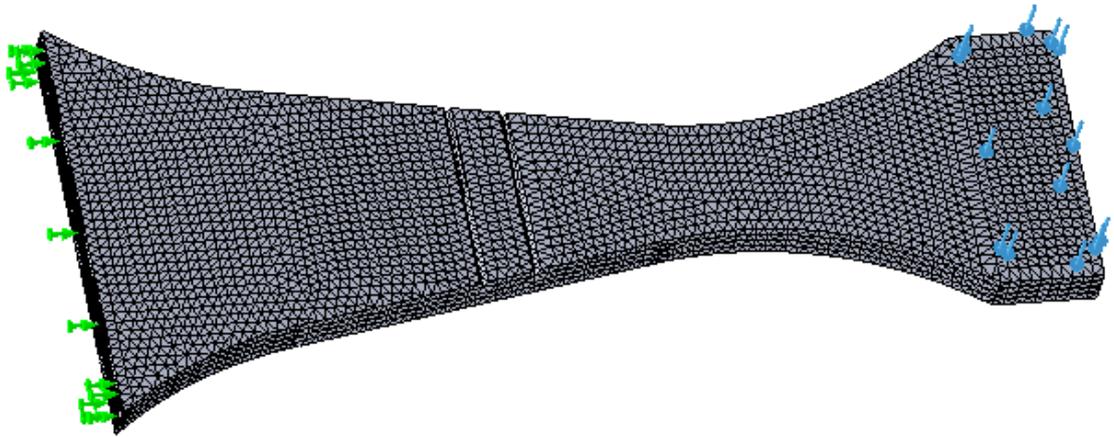


Figure 26 Maillage de l'éprouvette

- Exécution de l'analyse et résultats de la flèche

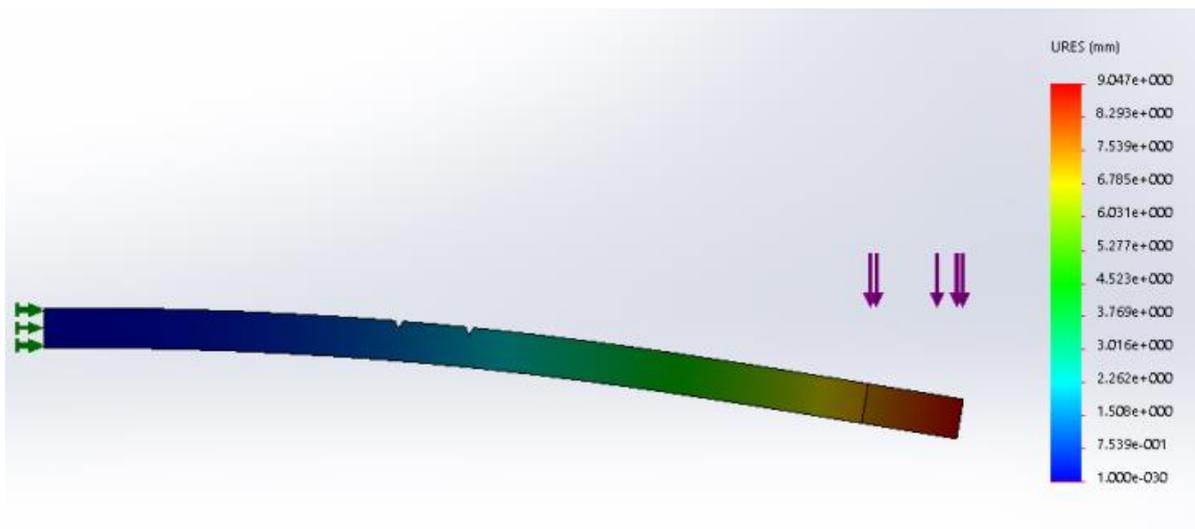


Figure 27 Flèche de l'éprouvette d'entailles séparées de 15 mm

Les résultats pour les entailles sont résumés dans le tableau suivant :

distance entre entailles	Flèche (mm)
5	9.037
10	9.042
15	9.047
20	9.053

Tableau 4 Résultats de la flèche obtenus par solidworks

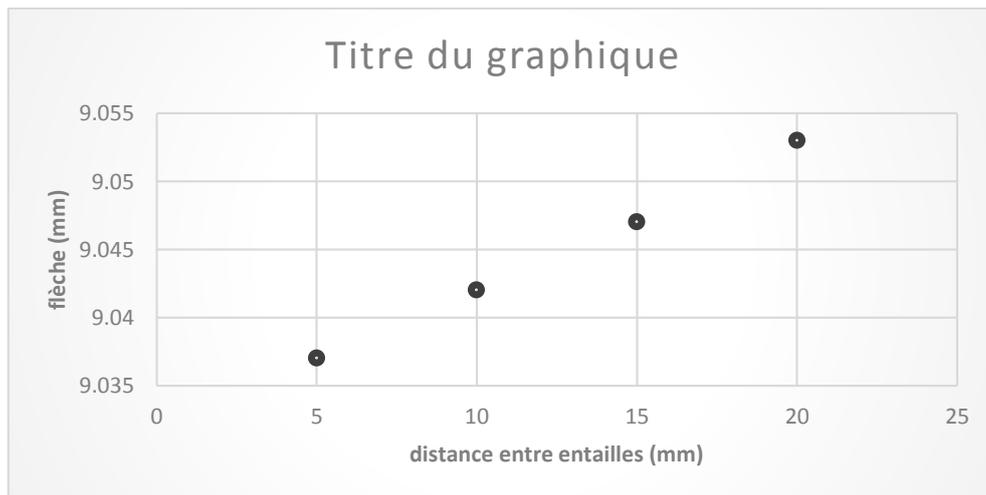


Figure 28 Résultats de la flèche obtenus par SolidWorks

Ce graphe montre l'évolution de la flèche en fonction de la distance entre entaille. Il est à noter que plus la distance entre entailles augmente plus la flèche augmente, ceci est dû essentiellement à la perte de rigidité flexionnelle. On peut donc prévoir une diminution de la durée de vie accompagnant l'augmentation de la distance entre entailles.

4.2.4. ANALYSE DE FATIGUE

L'analyse peut être maintenant exécutée à partir des résultats de l'analyse statique. Pour ce faire dans le complément simulation on lance une nouvelle étude tout en sélectionnant fatigue quand il est demandé de définir le type d'analyse. Ensuite on lance la résolution et on obtient comme résultats la durée de vie.

Dans ce qui suit seront présentés les résultats de fatigue obtenus par SolidWorks :

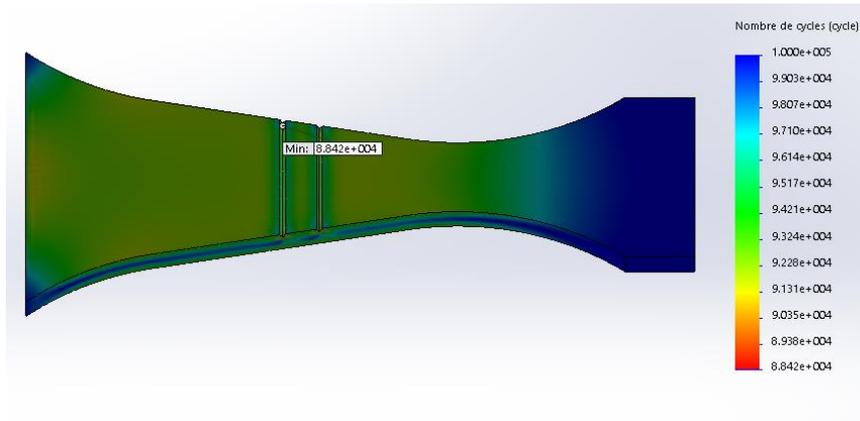


Figure 29 nombre de cycle de l'éprouvette d'entailles séparées de 5 mm

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant

distance entre entailles (mm)	nombre de cycle
5	88420
10	70670
15	61600
20	54230

Tableau 5 Resultats de durée de vie par soliworks

Le graph représentant le nombre de cycle en fonction de la distance entre entaille a l'allure suivante :

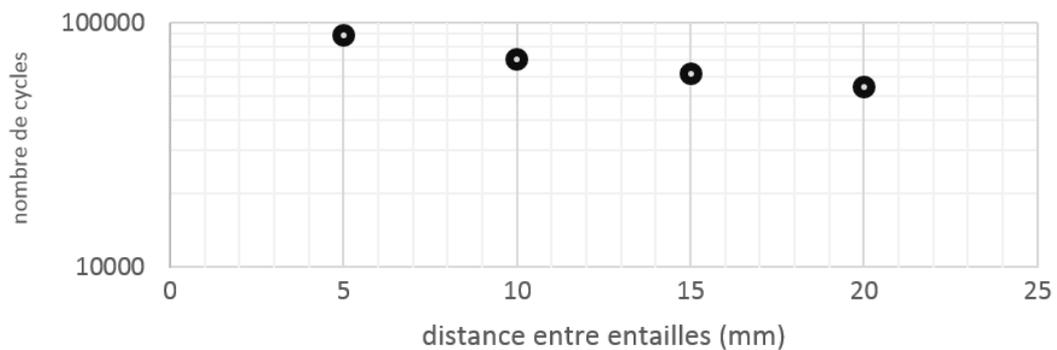


Figure 30 Résultats de durée de vie obtenus par SolidWorks

Le graphique établi présente l'évolution du nombre de cycles à rupture en fonction de la distance entre entailles. L'allure de la courbe est décroissante et linéaire. Pour un espacement compris entre 5 et 20 le nombre de cycles est compris entre 54230 et 88420.

Le graphe montre que la durée de vie est inversement proportionnelle à la distance entre les entailles. Cette simulation est en accord avec le test réalisé sur l'évolution de la flèche en fonction des distances entre entailles.

4.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX :

4.3.1. VERIFICATION DE LA PROFONDEUR D'ENTAILLE :

L'entaille est un paramètre d'influence important sur l'endurance. Sa géométrie doit être vérifiée. Pour cela, un microscope de marque MITUTOYO disponible au laboratoire de métrologie a été utilisé.

Le microscope utilisé permet d'observer la qualité de l'entaille et d'obtenir sa profondeur.



Figure 31 Microscope MITUTOYO pour vérifier les entailles

Pour y parvenir on pose l'éprouvette verticalement comme le montre la figure 32, et cela pour laisser passer les faisceaux lumineux à travers l'entaille pour que sa forme soit visible et pouvoir déterminer sa profondeur.

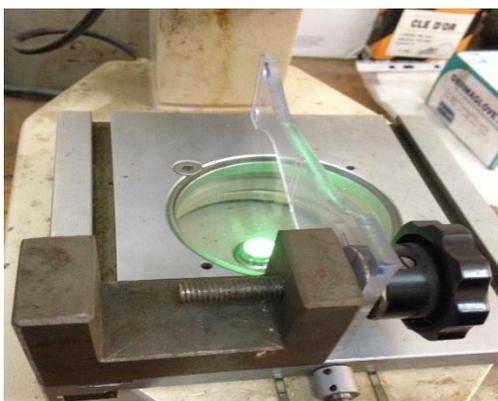


Figure 32 Positionnement de l'éprouvette

Après cela on règle le zéro en fond d'entaille :

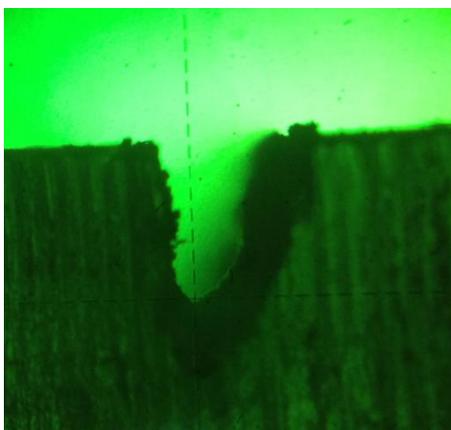


Figure 33 Fond d'entaille

Ensuite on déplace la ligne horizontale jusqu'à la surface plane et on lit le déplacement qui n'est autre que la profondeur de l'entaille :

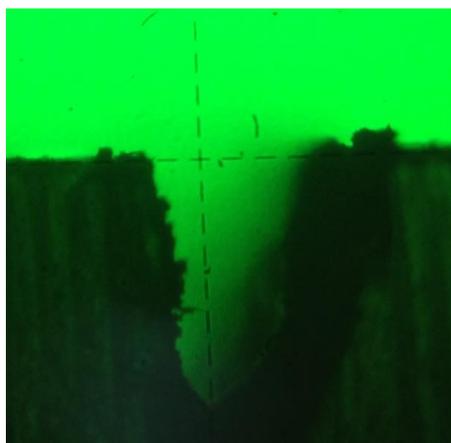


Figure 34 Détermination de la longueur de l'entaille

Les mesures obtenues sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 6 Profondeur des entailles des éprouvettes

	Eprouvette 1	Eprouvette 2
Distance entre entailles	Profondeur d'entaille	Profondeur d'entaille
5	1.08	1.03
10	1	1.02
15	1.04	1.2
20	0.98	1.02

Les résultats obtenus sont acceptables car l'erreur est au centième du millimètre sauf pour l'éprouvette de la série 2 pour la distance de 15 mm, l'erreur est de l'ordre du dixième du millimètre.

4.3.2. LES RESULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE :

La figure suivante montre les éprouvettes après leur rupture sur la machine :



Figure 35 Rupture des éprouvettes

Le tableau suivant représente le nombre de cycle à rupture des éprouvettes entaillées testées sur la machine.

Tableau 7 Résultats expérimentaux pour la durée de vie

	serie1	série 2
Distance entre entailles	Cycle de vie	Cycle de vie
5	60051	100777
10	141886	142010
15	26284	55039
20	8633	45539

La représentation graphique des résultats obtenus est montrée par la figure suivante :

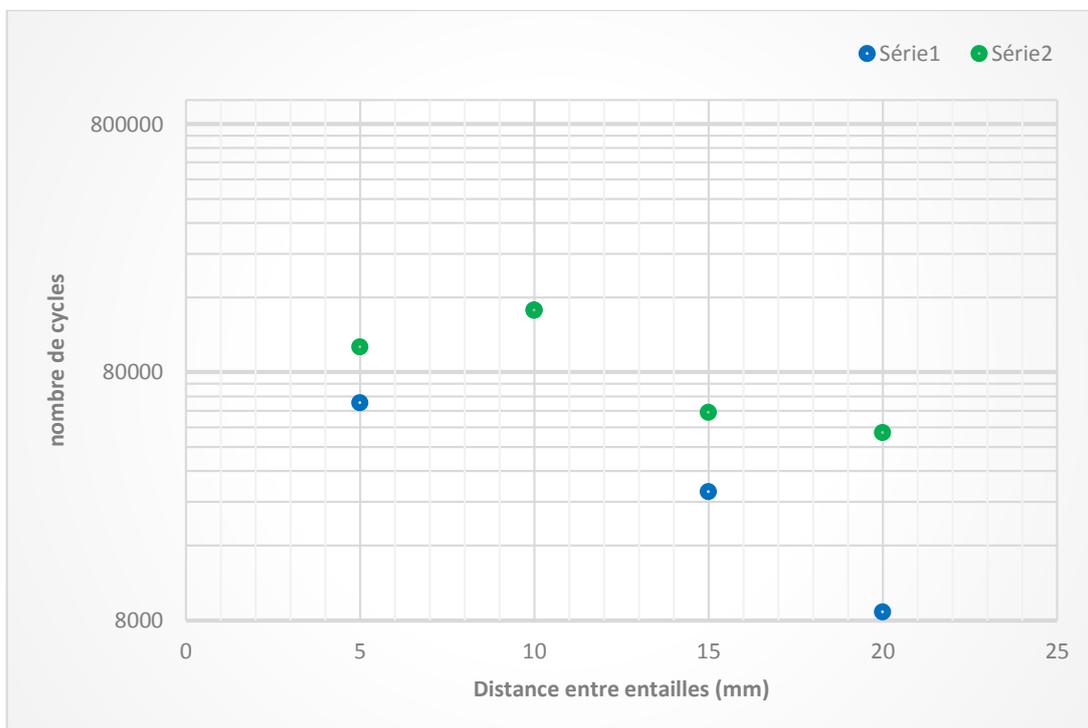


Figure 36 Résultats expérimentaux pour la durée de vie

Ce graph, semi-logarithmique, illustre les résultats expérimentaux obtenus et concernant l'évolution du nombre de cycle en fonction de la distance entre entailles. On note pour les distances 10, 15 et 20 mm une diminution de la durée de vie à chaque fois que la distance entre entaille augmente et ceci pour les deux essais, cependant les résultats obtenus pour les éprouvettes à

entailles séparées de 5 mm ne confirment pas cette constatation. Ceci est dû à des causes internes à l'éprouvette et même externes.

Il est à noter aussi que pour les éprouvette à entailles séparées de 10 mm la durée de vie été presque la même, leurs points représentatif sur le graph sont confondus

La diminution de la durée de vie accompagnant l'augmentation de la distance entre entailles, est essentiellement due à la perte de rigidité flexionnelle lorsque la distance entre entaille augmente.

➤ Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation :

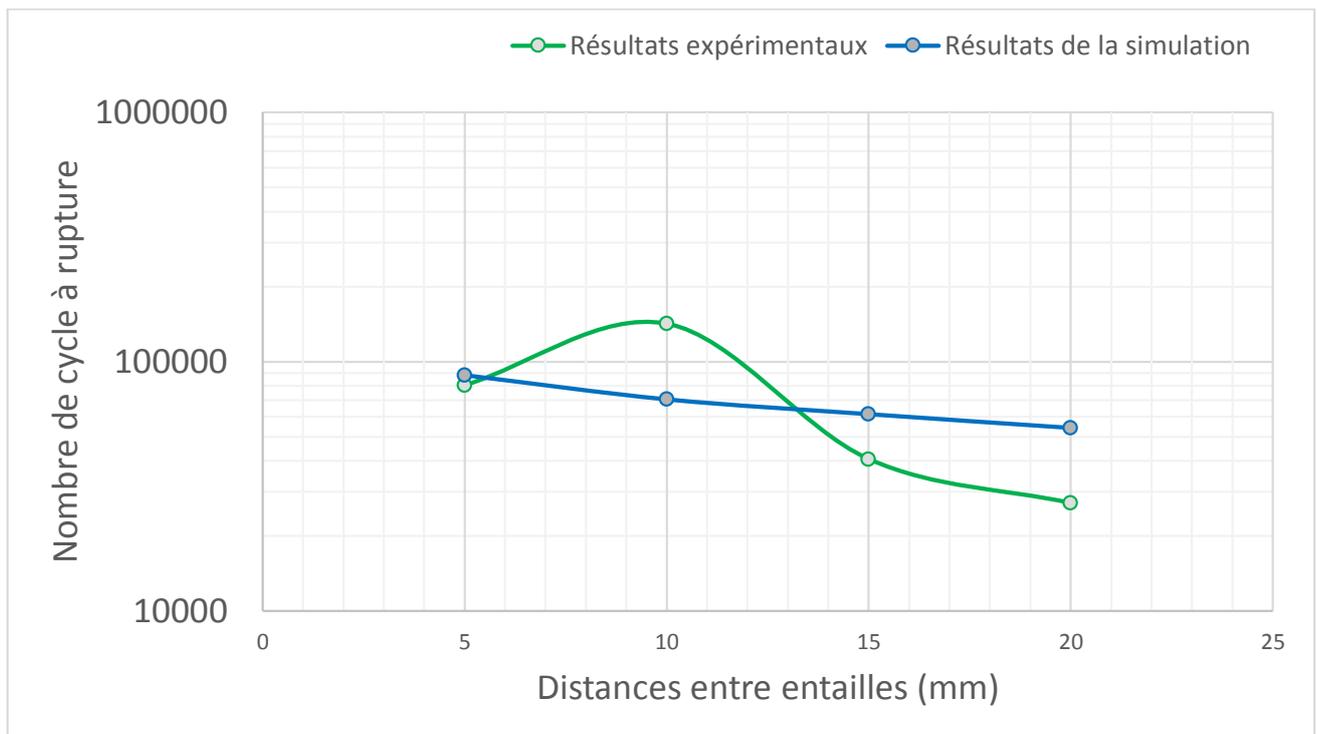


Figure 37 Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation

Ce graph montre une comparaison entre les deux résultats (expérimentaux et ceux de la simulation) on note une différence atteignant les 47% environ pour les distances de 10, 15 et 20 mm alors que pour la distance de 5 mm les résultats obtenus sont assez proches.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La prévision de la durée de vie en fatigue d'un polymère comme le PMMA est un thème relativement peu exploré, malgré des problématiques scientifiques établies et des enjeux industriels potentiellement importants.

L'étude a été entreprise en utilisant une machine de fatigue en flexion plane. Les résultats obtenus, bien qu'ils ne sont pas en concordance parfaite avec les lois physiques, ont montré l'influence de l'effet d'entaille sur la durée de vie de l'éprouvette. En effet plus la distance entre entaille augmente plus la rigidité flexionnelle du matériau diminue provoquant ainsi une durée de vie plus courte.

Les résultats de la simulation sont cohérent et montre la relation inversement proportionnelle entre la distance entre entaille et la durée de vie.

Les éprouvettes testées ont des entailles traversantes. Les résultats sont plus accessibles à obtenir dans le cas de cette configuration de géométrie.

La dispersion des résultats est inhérente aux essais de fatigue. Pour améliorer les résultats obtenus par l'expérience, une attention particulière doit être concentré sur la qualité du rayon en fond d'entaille, sa profondeur et que les entailles soient bien parallèles entre elles et perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette. De même, pour obtenir une section d'égale résistance, la forme triangulaire doit être soignée.

Concernant, la machine d'essai, nous recommandons un bon entretien des organes de machine.

L'excentricité provoquée par la machine pour charger les éprouvettes n'est pas uniforme sur toutes les éprouvettes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. BERREHILI, «comportement cyclique et tenue en fatigue sous chargement multiaxial d'un polyéthylène : expériences et critère d'endurance, "THESE pour l'obtention du grade de docteur en mécanique et aérotechnique",» Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, 2010.
- [2] G. O. TURCAN, «Sensibilité des métaux ferreux à l'effet d'entaille en fatigue,"memoir en vue de l'obtention du diplôme de maitrisés en sciences appliquées",» Montréal, 2011.
- [3] P.BONNET, «Fatigue des métaux,"SUPMECA 3, matériaux et procédés", "Institut supérieur de mécanique de Paris-Supméca",» Paris, 2004-2005.
- [4] M.BRAHIMI, «Essais de fatigue par flexion rotative sur éprouvette avec double-entailles parallèles,"projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en génie mécanique", "Ecole Nationale Polytechnique, département de génie mécanique",» alger, 2009.
- [5] M. NASRAOUI, «comportement mécanique du PMMA sous sollicitations dynamiques: Application à des structures minces impactées,» Université de Reims/ Université de Metz, 2010.
- [6] f. t. evonik industries, «"usinage de plexiglas, directives de mise en oeuvre",Allemagne,» Darmstadt, 2008.
- [7] EVONIC INDUSTRIES, «Usinage de PLEXIGLAS"Directives de mise en oeuvre",» EVONIC, 2008.