

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

*Mémoire de master*

*En vue de l'obtention du master en mécanique des solides*

*Thème*

**Essai de fatigue en flexion plane sur PMMA**

Réalisé par  
**Melle. HADID Fatima Zahra**

Promoteurs  
**Mr. B.GUERGUEB**  
**Mr. Y.BELKACEMI**

*octobre 2015*

## ملخص

يهدف هذا العمل دراسة التعب على نوع من البلاستيك ويبين مدى تأثير الزاوية على الحياة. وقد حققت سلسلة الاختبار على 16 عينة، 8 لكل دراسة. هناك نوعان من الدراسات لشقوق على شكل V- الشق مرتفع أو منخفض و لكل دراسة تختلف الزاوية من 0 درجة إلى 60 درجة بخطوة 20 درجة.

كلمات البحث: التعب- البلاستيك-الشقوق-الزاوية

## Résumé

Ce travail a pour but une étude de fatigue en flexion plane sur PMMA et met en évidence l'impact de l'angle sur la durée de vie.

Une série de test a été réalisée sur 16 éprouvettes, 8 pour chaque étude, de plexiglass d'égale résistance sur une machine acceptant 12 éprouvettes

On a deux types d'études dépendant de l'entaille, entaille haute ou entaille basse en forme de V, pour chaque étude on fait varier l'angle de 0° à 60° par pas de 20°.

Mots clés : PMMA, fatigue, flexion plane, éprouvette, entaille haute, entaille basse, angle.

## Abstract

This work aims a flat bending fatigue study on PMMA and puts in evidence the impact angle on life.

A test series was realized on 16 specimens, 8 for each study, of equal resistance on a machine accepting 12 specimens .

there are two types of dependent studies of the notch, notch high or low notch V-shaped, and is made for each study varied the angle of 0 ° to 60 ° in steps of 20 ° .

Keywords: PMMA, fatigue, plane bending, test tube, high-cut, low-cut angle

## *Dédicace*

Je dédie ce projet de fin d'études à :

La mémoire de *mon très cher grand père (BABAYI)* qui nous a quitté  
le 1<sup>er</sup> mars 2015.

La mémoire de *Ma très chère tante (Mama Rabéa)* qui nous a quitté  
le 10 février 2010.

*A mon père*, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse qu'Allah le tout puissant fasse en sorte que ce travail porte son fruit, Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

*A ma mère*, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

*Mes frères Hamza et Abdelmalek Samy* qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me soutenir.

*A ma très chère Mamie, mes tantes Malia et Malika.*

*A mes amis* et tout particulièrement *Chawki et Nesrine* avec qui j'ai partagé des moments de peines et de joie qui resteront à jamais gravés dans ma mémoire.

*A mes chers cousins et cousines.*

*À toute la famille HADID de Bouzaréah et la famille BRAHIMI de Belcourt*

Amira Fatima Zahra

## **Remerciements**

*Je tiens en premier lieu à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, je tiens à remercier sincèrement Mr. BRAHIM GUERGUEB et Mr. YACINE BELKACEMI, qui, en tant que directeurs de mémoire, se sont toujours montrés à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

*mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

# Table des matières

Introduction générale .....	1
Chapitre 1 : Généralités .....	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Plexiglass.....	2
1.2.1 Définition .....	2
1.2.2 Propriétés.....	3
1.2.3 Procédé de traitement .....	5
1.2.4 Applications .....	6
1.2.5 Recyclage.....	7
1.3 Fatigue dans le plexiglass.....	7
1.3.1 Etude 1 :.....	8
1.3.2 Etude 2 :.....	9
1.3.3 Etude 3.....	10
1.4 Propagation de fissure .....	11
Chapitre 2 : Les éprouvettes.....	13
2.1 Usinage.....	13
2.1.1 les scies circulaires de table .....	13
2.1.2 Les scies circulaires portatives .....	14
2.1.3 Les scies sauteuses .....	14
2.1.4 Scie à chantourner.....	15
2.1.5 les scies à archet .....	15
2.1.6 les cutters.....	15
2.2 Géométrie des éprouvettes .....	15
2.2.1 Forme des éprouvettes .....	16
2.2.2 Dimensions .....	18
Chapitre 3 : Expérimentation.....	20
3.1 Description de la machine .....	20
3.2 Préparation des éprouvettes.....	21
3.3 Résultats.....	24
Les tableaux suivants donnent le nombre de cycle à la rupture des éprouvettes entaillées.....	24
Chapitre 4 : Simulation par SOLIDWORKS .....	27

4.1	Présentation du logiciel .....	27
4.2	Fatigue par SOLIDWORKS .....	27
4.2.1	Vue d'ensemble de l'analyse de fatigue .....	27
4.3	Eprouvette .....	28
4.4	Simulation .....	28
4.4.1	Analyse statique .....	28
4.4.2	Maillage .....	30
4.4.3	Résultats : .....	31
	Conclusion .....	34
	Bibliographie .....	35

## Liste des figures

Figure 1 schéma démonstratif de la fissuration des matériaux.....	2
Figure 2 la polymérisation radicalaire.....	3
Figure 3 étude expérimentale de rupture fragile dans une encoche en V sur PMMA sous une charge de compression.....	9
Figure 4 Simulation de la trajectoire de croissance de la fissure pour le spécimen de la SCB avec $\beta=50^\circ$ .....	10
Figure 5 Fissure de bord simple.....	11
Figure 6 marque laissée par une microfissure sur une surface de rupture rapide d'un échantillon de Plexiglas.....	11
Figure 7 Réseau d'empreintes laissées par la nucléation, croissance et coalescence des microfissures, lors de la fracture rapide d'un échantillon de Plexiglass. A droite : reconstruction numérique du réseau observé.....	12
Figure 8 scies circulaires de table.....	13
Figure 9 scies circulaires portatives.....	14
Figure 10 scies sauteuses.....	14
Figure 11 Scie à chantourner.....	15
Figure 12 Eprouvettes parallélépipédiques à section rectangulaire.....	17
Figure 13 Eprouvettes axisymétriques à section circulaire.....	17
Figure 14 Types d'éprouvettes.....	18
Figure 15 dimensions de l'éprouvette.....	19
Figure 16 Machine de fatigue en flexion plane.....	21
Figure 17 plaque de plexiglass rectangulaire.....	21
Figure 18 plaque de plexiglass rectangulaire enveloppée d'adhésif.....	22
Figure 19 scie à chantonner.....	22
Figure 20 éprouvette en plexiglass.....	23
Figure 21 éprouvette après rupture.....	23
Figure 22 graphique démontrant le nombre de cycles entaille haute en fonction de l'angle.....	24
Figure 23 graphique démontrant le nombre de cycles entaille basse en fonction de l'angle.....	25
Figure 24 graphique démontrant le nombre de cycles pour les 2 études en fonction de l'angle.....	26
Figure 25 forme de l'éprouvette.....	28
Figure 26 fixation de l'éprouvette.....	29
Figure 27 forme de l'éprouvette après fixation.....	29
Figure 28 application de force.....	30
Figure 29 forme de l'éprouvette après fixation et application de la force.....	30
Figure 30 Eprouvette maillée.....	31
Figure 31 Résultat de la flèche.....	31
Figure 32 graphe démontrant l'évolution de la flèche en fonction de l'angle pour éprouvette à entaille haute.....	32
Figure 33 graphe démontrant l'évolution de la flèche en fonction de l'angle pour éprouvette à entaille basse.....	32

## Liste des tableaux

Tableau 1 propriétés physiques du PMMA.....	3
Tableau 2 propriétés mécaniques du PMMA.....	4
Tableau 3 propriétés électriques du PMMA .....	4
Tableau 4 propriétés thermiques du PMMA.....	5
Tableau 5 propriétés optiques du PMMA .....	5
Tableau 6 éprouvette à entaille haute .....	24
Tableau 7 éprouvette à entaille basse.....	24
Tableau 8 propriétés du matériau.....	29
Tableau 9 flèche pour entaille haute.....	31
Tableau 10 flèche pour entaille basse .....	32

## *Introduction générale*

Dans le monde d'aujourd'hui où la société connaît un développement permanent et important, les besoins en sécurité se sont accrus considérablement. Dans l'industrie, les pièces mécaniques, de par leurs fonctions diverses sont confrontées à un usage fréquent conduisant à leur rupture brutale. Cette rupture s'explique par un phénomène de ruine des matériaux, la fatigue.

La fatigue est une discipline traitée en science de l'ingénierie pour mettre en évidence l'endommagement et la fissuration des matériaux sous une sollicitation mécanique cyclique. Cette science est étudiée lors de la présence de sollicitations ou d'efforts d'intensité périodiquement variable.

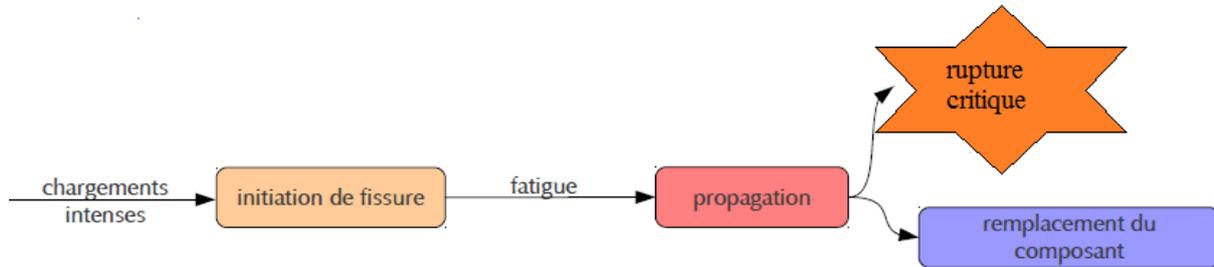
Nous sommes donc confrontés à un problème touchant plusieurs types de constructions allant des chemins de fer aux constructions automobiles en passant par les réacteurs nucléaires. D'ailleurs la révolution industrielle et, tout spécialement le transport, ont été marqués dès leurs débuts par un certain nombre d'accidents graves comme celui de Versailles qui en 1842, provoqua, suite à une rupture d'essieu, la mort de 60 personnes.

Confrontée à ces événements tragiques, la communauté internationale se devait de réagir en mettant tout en œuvre pour comprendre ce phénomène comme en témoigne les diverses publications parues depuis plus d'un siècle comme les études de Bauschinger à l'origine de la fatigue oligocyclique. Par ailleurs, plusieurs lois sont entrées en vigueur comme la loi de Paris pour la propagation des fissures en 1961.

Cependant, en dépit de tous les efforts consentis et les progrès réalisés, le chemin est encore long comme en témoigne les accidents de Penascola en 1996 et Los Angeles Boeing 767 en 2007. [9]

# Chapitre 1 : Généralités

## 1.1 Introduction



*Figure 1 schéma démonstratif de la fissuration des matériaux*

A cause de sa haute résistance aux chocs et de son excellente transmission, le PMMA connu sous nom de plexiglass a une large application.

Depuis que de nombreuses structures peuvent résister à une charge cyclique au cours de leur durée de vie, la recherche sur le PMMA attire un intérêt accru.

Le PMMA est un genre typique de matériau viscoélastique.

## 1.2 Plexiglass

### 1.2.1 Définition

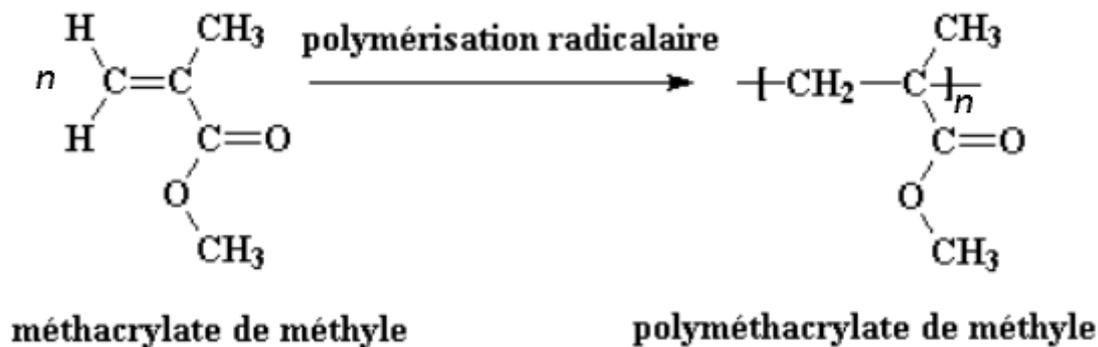
Les poly (méthacrylates) sont des polymères d'esters d'acides méthacryliques. Le plus couramment utilisé parmi eux est le poly (méthacrylate de méthyle) ou (PMMA)

Poly (méthacrylate de méthyle) ou le poly (méthyl-2 methylpropenoate) est le polymère de méthacrylate de méthyle, de formule chimique  $(C_5H_8O_2)_n$ .

C'est un polymère incolore disponible sur le marché sous les noms de plexiglass, Acrylite, Acrylplast, Altuglas, Lucite, etc. Il est communément appelé verre acrylique ou simplement acrylique.

Un autre polymère, le poly (acrylate de méthyle) (PMA) est un matériau caoutchouteux, semblable à du poly (méthacrylate de méthyle), mais plus doux que lui, parce que ses longues chaînes de polymères sont plus minces et plus lisse et peuvent plus facilement glisser les unes sur les autres.

Poly (méthacrylate de méthyle) est produit par polymérisation radicalaire de méthacrylate de méthyle à masse (quand il est sous forme de feuille) ou la polymérisation en suspension selon la figure suivant : [8]



*Figure 2 la polymérisation radicalaire*

## 1.2.2 Propriétés

### 1.2.2.1 Propriétés physiques et mécaniques

Le PMMA est un polymère thermoplastique linéaire.

Les Principales caractéristiques physiques de PMMA sont présentées dans le tableau 1.

PMMA a une haute résistance mécanique, un module de Young très important et un faible allongement à la rupture. Il ne se brise pas à la rupture. Il est l'un des thermoplastiques les plus résistants. Il présente une faible capacité d'absorption de l'humidité et de l'eau, en raison de laquelle les produits sont fabriqués avec une bonne stabilité dimensionnelle. Ces deux caractéristiques augmentent quand la température augmente. Le tableau 2 montre certains des caractéristiques mécaniques du PMMA.

*Tableau 1 propriétés physiques du PMMA*

Propriétés physiques	Valeur
Densité	1.15 - 1.19 g/cm <sup>3</sup>
Absorption de l'eau	0.3 – 2 %
Absorption de l'humidité	0.3 - 0.33 %
Indice de fluidité	0.9 – 27 g/10 min

Ses propriétés de résistance pendant le moulage par injection diffèrent sensiblement par sens longitudinal et transversal à la suite de l'effet d'orientation. Comme dans le cas avec d'autres matières thermoplastiques, les propriétés mécaniques du PMMA varient avec la température. Ce matériau a tendance à glisser. Il ne convient pas pour un fonctionnement sous de multiples charges dynamiques.

PMMA est l'un des polymères qui est le plus résistant à l'exposition aux rayons directs du soleil. Ses caractéristiques de résistance présentent des variations relativement petites sous l'effet du rayonnement UV, ainsi qu'en présence d'ozone. Ces propriétés du PMMA le rendent approprié pour les produits destinés à une utilisation prolongée en plein air.

**Tableau 2 propriétés mécaniques du PMMA**

<b>Propriétés mécaniques</b>	<b>valeur</b>
<b>Dureté</b>	63 - 97
<b>résistance à la traction</b>	47 - 79 MPa
<b>Allongement à la rupture</b>	1 - 30 %
<b>Module de traction</b>	2.2 - 3.8 GPa
<b>Module de flexion</b>	3 - 3.5 GPa

### 1.2.2.2 Propriétés électriques

La faible capacité d'absorption d'eau de PMMA fait qu'il soit très approprié à des fins d'ingénierie électrique. Ses propriétés diélectriques sont très bonnes, mais le polystyrène et le LDPE sont supérieurs à lui. Sa résistivité dépend de la température ambiante et de l'humidité relative. La constante diélectrique, ainsi que la tangente de pertes, dépendent de la température, l'humidité relative de l'air et de la fréquence.

**Tableau 3 propriétés électriques du PMMA**

<b>Propriétés électriques</b>	<b>valeurs</b>
<b>Résistivité électrique</b>	$10^{14} - 10^{15} \Omega.cm$
<b>résistance de surface</b>	$10^{14} - 10^{16} \Omega$
<b>Facteur de perte</b>	0.04
<b>Constante diélectrique</b>	2.8 - 4
<b>Constante diélectrique basse fréquence</b>	3 - 4
<b>résistance diélectrique</b>	17.7 - 60 kV/mm
<b>Facteur de dissipation</b>	0.03 - 0.55

### 1.2.2.3 Propriétés thermiques

La stabilité thermique de PMMA est seulement de 65 ° C. les Types de stabilisateurs de chaleur peuvent supporter des températures atteignant 100 ° C. le PMMA peut résister à des températures aussi basses que -70 ° C. Sa résistance aux changements de température est très bonne.

Le PMMA est un matériau combustible, qui continue de brûler même après le retrait de la flamme - les produits séparés dans le processus de destruction thermique ont un effet enivrant.

**Tableau 4 propriétés thermiques du PMMA**

<b>Propriétés thermiques</b>	<b>valeurs</b>
<b>Capacité thermique spécifique</b>	1,46 à 1,47 J / g ° C.
<b>Conductivité thermique</b>	0,19 à 0,24 W / m.K
<b>Température maximale, air</b>	41 - 103 ° C
<b>Point de fusion</b>	130 ° C

#### 1.2.2.4 Propriétés optiques

PMMA présente de très bonnes propriétés optiques - il transmet plus de lumière (jusqu'à 93% de la lumière visible) que le verre. Combiné à sa bonne compatibilité avec les tissus humains, il peut être utilisé pour le remplacement des lentilles intraoculaires ou les lentilles de contact. Contrairement au verre, le PMMA ne filtre pas la lumière ultraviolette. Il transmet la lumière UV jusqu'à 300 nm et permet à la lumière infrarouge de passer jusqu'à 2800 nm.

**Tableau 5 propriétés optiques du PMMA**

<b>Propriétés optiques</b>	<b>valeurs</b>
<b>Brume</b>	1 - 96 %
<b>Transmission, visible</b>	80 - 93 %
<b>Indice de réfraction</b>	1.49 - 1.498

#### 1.2.2.5 Résistance chimique

Les Acryliques ne sont pas affectés par les solutions aqueuses de la plupart des produits chimiques de laboratoire, ni par les détergents, les nettoyants et les acides dilués inorganiques. Cependant, les acryliques ne sont pas recommandés pour une utilisation avec les hydrocarbures chlorés ou aromatiques, des esters, des cétones. Ils se dissolvent complètement dans le chloroforme, le di- et tri-chlorethane, qui est utilisé pour la production de colles. La résistance chimique varie avec le niveau de contrainte, de la température, des réactifs et de la durée de l'exposition.

Le PMMA est physiologiquement inoffensif. En raison de sa faible capacité d'absorption de l'humidité, il n'est pas attaqué par les moisissures et les enzymes.

#### 1.2.3 Procédé de traitement

Le PMMA est approprié pour le moulage par injection, extrusion, extrusion-soufflage (impact acryliques modifiés uniquement), le thermoformage, le moulage. L'indice de fluidité à chaud du matériau varie en fonction de la méthode de traitement :

- Faible indice de fusion de flux (0,8 - 2.5) - matériaux destinés à l'extrusion ;
- À moyen indice de fluidité (2,5 - 10) - à usage général ;

- Indice de fluidité élevé ( $> 10$ ) - pour le moulage par injection de produits ayant une forme complexe. Pour le moulage par injection, la température de moulage doit être comprise entre 40 et 80 ° C, selon le type, la température du produit doit être comprise entre 200 et 250 ° C. Habituellement, les pressions d'injection élevées sont nécessaires en raison des mauvaises propriétés d'écoulement. Ceci est particulièrement important pour les moulages optiques où les lignes de soudure visibles se forment si les bons paramètres ne sont pas utilisés. Pendant le moulage par injection des contraintes internes se mettent souvent en place, ce qui peut être éliminé par le chauffage à une température d'environ 80°C (trempe).

La buse de moule est un facteur important lors de la fabrication du PMMA. La taille de la grille de la buse varie en fonction de la forme et de la taille du produit. Les produits fabriqués à partir de PMMA sont principalement clairs et transparents et il est important qu'ils ne possèdent pas de rayures. Il est recommandé d'utiliser au moins un angle de 1 ° (au lieu de 2 °). Parce que le PMMA a une viscosité élevée, les canaux de gaz peuvent être très profonds, de 0,04 à 0,08 mm

Une Mauvaise opération en raison de la température élevée provoque la destruction du PMMA, accompagnée par la libération de méthacrylate de méthyle ou d'autres produits volatils à faible molécules. Le processus conduit aussi à une perte de masse, ce qui le rend indésirable, et une bonne connaissance des propriétés thermo-physiques du polymère est nécessaire pour l'éviter, en particulier dans le traitement de la plage de température (220-250 ° C).

Les Acryliques sont facilement sciés, percés, fraisés, gravés, et finis avec des outils en carbure tranchantes. Les Surfaces de coupe peuvent être facilement poncés et polis. Ils sont également facilement pliés ou thermoformés à basse température .Le PMMA peut être soudé par tous les procédés de soudage des matières plastiques telles que le gaz chaud, les ultrasons ou le soudage par rotation.

#### 1.2.4 Applications

Le PMMA est un matériau à usage général économique et polyvalent. Il est disponible dans le matériel extrudé et / ou coulé dans des formes de feuille, tige et tube, ainsi que des profils personnalisés. Divers types de résines acryliques sont utilisés dans une grande variété de domaines et d'applications, y compris:

- Optique: lunettes de soleil, verres de montres, lentilles, loupes;
- Véhicules: Les feux arrière, les indicateurs, triangles de signalisation;
- Génie électrique: pièces de commutateurs, des cadrans, boutons de commande;
- Matériel de bureau: Instruments d'écriture et de dessin, stylos;
- Médecine: Emballage pour les comprimés, pilules, gélules, suppositoires, des conteneurs d'urine, de l'équipement stérilisé;
- Autres: vitrage incassable , cabines de douche, les pipelines transparents, enseignes lumineuses, jouets.

### 1.2.5 Recyclage

Le PMMA peut être fondu puis remoulé, mais c'est surtout par dépolymérisation qu'il peut être recyclé facilement. Par chauffage, le PMMA redonne son monomère de départ, le MMA. Celui-ci peut alors être réutilisé pour une nouvelle polymérisation.

## 1.3 Fatigue dans le plexiglass

Le PMMA est un cas typique de matériau viscoélastique. Les propriétés de fatigue de ce dernier sont sensibles à la température et la fréquence.

Beaucoup de chercheurs ont étudié la propriété de fatigue du PMMA et d'autres polymères à différentes fréquences.

Les recherches menées sur la propagation des fissures du PMMA ont été faites à 10, 50 et 100 Hz quant à la Température d'essai, elle varie de -30 à 100 ° C. Les résultats ont montré que les taux FCP diminuent quand la fréquence augmente jusqu'à ce que la température se rapproche de la région de transition vitreuse, Les tests de fatigue sur PMMA effectués sur les avions ont tous montré que les taux FCP diminuent.

Plusieurs essais de fatigue du PMMA ont été réalisés sous la fréquence de 0,1, 1 et 10 Hz ; les résultats ont montré que la fatigue a augmenté avec l'augmentation de la fréquence, bien que la hausse n'ait pas été si remarquable dans la gamme de haute fréquence.

Les essais de fatigue du PMMA menés aux fréquences 1, 2 et 5 Hz, et la différence était que la fatigue a diminué avec la fréquence, sauf à un niveau élevé de tension.

La durée de vie en fatigue de PMMA varie avec la fréquence, et son taux de propagation des fissures de fatigue diminue avec la fréquence est une conclusion cohérente de la plupart des expériences. Cependant, il n'y a pas une telle relation constante entre résistance à la fatigue et fréquence de chargement. Beaucoup de recherche ont analysé le mécanisme de l'influence de la fréquence sur le comportement en fatigue. Ça peut se résumer à trois attributions : chauffage hystérésis, fluage et la sensibilité aux taux. Sous charge cyclique, la boucle d'hystérésis est formée par la tension et les tensions de phase dues à l'amortissement interne des polymères. La Boucle d'hystérésis indique la dissipation de l'énergie ou de la chaleur nommée chauffage hystérésis. Si la fréquence est élevée, la chaleur d'hystérésis ne peut pas être dissipée assez rapidement en raison de la faible conductivité thermique de polymères, et donc la température se lèvera. Le Chauffage hystérésis va ramollir la matière, et la rigidité et la résistance vont diminuer. Ceci est la raison de la diminution de la fatigue avec la fréquence dans certaines expériences. Le phénomène de flambage est important et commun dans les polymères. Pendant le processus de fatigue avec une contrainte moyenne non nulle, la déformation de fluage et les

dommages de fluage peuvent être observés même sans charge retenue. Plus de dégâts que de fluage accumulé dans un cycle de sous-fréquence inférieure pour plus de temps par cycle. Il en résultera une diminution de la résistance à la fatigue et la fréquence diminue. Les propriétés mécaniques de matériau viscoélastique dépendent de la vitesse de déformation. Pour les polymères, l'effet de la vitesse de déformation est une propriété importante. Dans le domaine de recherche de la compression et de l'impact, l'effet de la vitesse de déformation a attiré encore plus d'attention. Le durcissement de la vitesse de déformation du PMMA a été observé dans beaucoup d'expériences. Quand la fréquence augmente, la vitesse de déformation augmente elle aussi, la rigidité et la résistance à la traction augmentent aussi. En d'autres termes, au même niveau de charge, plus la fréquence est plus élevée, plus la résistance à la fatigue sera plus grande. Malheureusement, l'effet du taux de la fatigue PMMA n'a été mentionnée que de temps en temps ; l'attention portée à évaluer l'effet était loin d'être suffisante. En général, la variation de la durée de fatigue avec la fréquence est liée à la gamme de fréquences, niveau de tension et d'autres paramètres. Par exemple, la chaleur d'hystérésis est remarquable à haute fréquence, les dommages de fluage contribuent plus au cours de basse fréquence, et l'effet de taux peut jouer un rôle dans une large gamme de fréquences. Le chauffage hystérétique dans les polymères a été remarqué et étudié à partir d'une première période ; de nombreux travaux ont été réalisés. Pour les dommages de fluage, des équations similaires à la loi de Paris, y compris la fatigue et le fluage ont été proposés pour décrire le taux FCP.

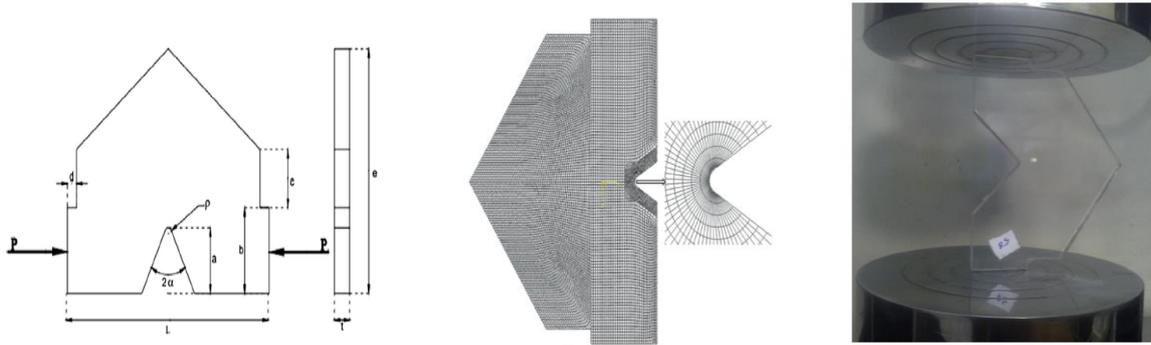
Plusieurs études ont été faites dans ce domaine :

### **1.3.1 Etude 1 :**

Une nouvelle série de résultats expérimentaux a été fournie concernant la rupture fragile à entailles sous compression. Les expériences ont été réalisées à la température ambiante sur un nouvel échantillon d'essai, appelé (VSC) (V-notch stepped cottage).

Les échantillons d'essai ont été fabriqués à partir de PMMA avec des entailles en V pour différents angles et différents rayons. Les charges de rupture ont été enregistrées.

Deux modèles de rupture fragile ont été conclus dépendant de l'effort, à savoir le point-stress (PS) et la moyenne-stress (MS), ces critères ont été développés pour prédire les résultats expérimentaux. Avec une précision d'environ 87%, il a été montré que les deux critères pourraient prédire les résultats expérimentaux de manière satisfaisante. Quelques nouvelles relations ont été établies entre les paramètres critiques des deux critères. [3]



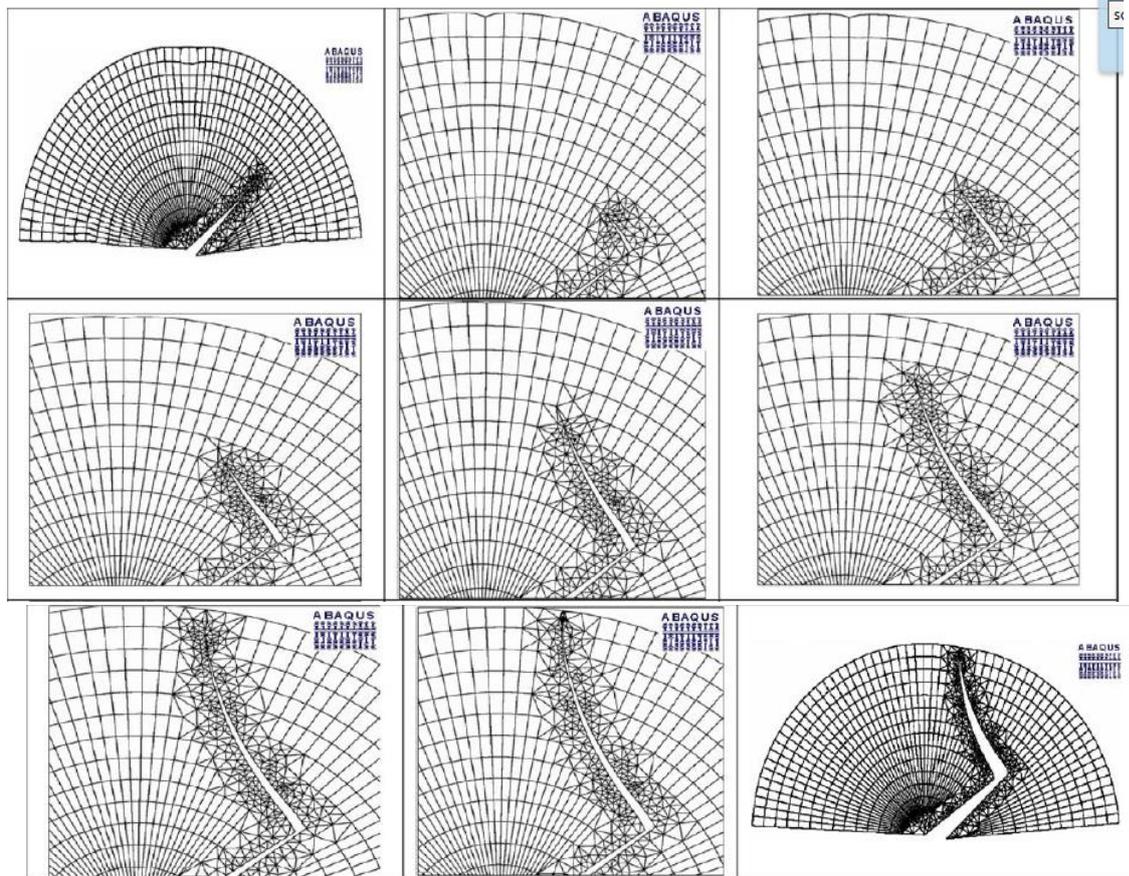
**Figure 3 étude expérimentale de rupture fragile dans une encoche en V sur PMMA sous une charge de compression[3]**

### 1.3.2 Etude 2 :

Une série de tests en mode mixte de I / II est réalisée sur du polyméthacrylate de méthyle (PMMA) en utilisant un échantillon de courbure semi-circulaire (SCB) contenant une fissure de bord. La charge à la rupture et le chemin de propagation des fissures sont obtenues à partir des expériences pour différents angles de crack. Il est montré que le critère de fracture en mode mixte classique I / II la contrainte maximale tangentiel (MTS) surestime la résistance à la rupture du PMMA quand le SCB est utilisé pour les tests de fracture, en particulier pour le mode II ou les conditions de chargement sont dominantes.

Cependant, l'amélioration des prévisions de charge de rupture sont obtenus lorsqu'un critère MTS généralisé est employé. Alors que le chemin de la croissance de la fissure est droit pour le mode I pur, il dévie de manière significative de l'angle de fracture d'initiation pour le mode II. On montre que le chemin de la croissance de la fissure prédit par le critère MTS généralisée est également dans une bonne entente avec le chemin de fracture observée dans les échantillons SCB fracturées.

L'écart entre la théorie et les résultats expérimentaux a été plus important pour le mode II.. Le critère MTS généralisé prend en compte l'effet de l'effort en plus des termes singuliers de contraintes autour de la pointe de la fissure. Une technique de sauvegarde incrémentale de l'extension de fissure a également été utilisée pour simuler les trajectoires de fracture dans le SCB pour différentes combinaisons de modes I et II. Il a été montré que la simulation en éléments finis peut très bien estimer le chemin de la fissure dans les échantillons fracturés. [4]



**Figure 4 Simulation de la trajectoire de croissance de la fissure pour le spécimen de la SCB avec  $\beta=50^\circ$ . [4]**

### 1.3.3 Etude 3

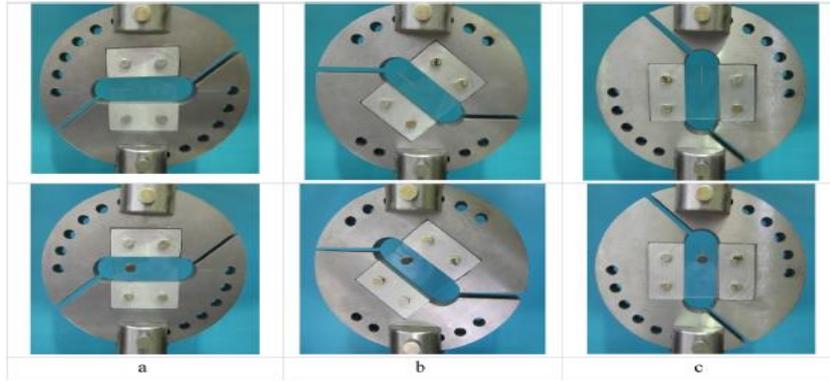
Des études expérimentales et numériques ont été menées pour évaluer l'effet de serrage, résultant de couple de serrage d'un écrou et un boulon, en mode mixte (I et II). Des tests ont été effectués sur trois lots d'échantillon fabriqué à partir de la plaque rectangulaire de poly-méthacrylate de méthyle (PMMA). Les résultats ont été obtenus en utilisant une machine d'essai de traction dans différents angles de chargement au moyen d'un appareil Arcan modifié.

En partie numérique, la simulation par éléments finis a été utilisée pour modéliser les trois éprouvettes variantes et établir ainsi l'intensité de leurs facteurs d'effort. Les résultats montrent que le couple du boulon de serrage et la force sur la plaque de serrage, ont un effet significatif sur la réduction de l'effort.

Les essais expérimentaux montrent que la résistance à la rupture est supérieure à la fissure.

La résistance à la rupture du couple dépend de la grandeur du couple de serrage et elle est plus grande pour des couples plus élevés (la force de serrage par conséquent est plus élevée).

La résistance à la rupture (charge de rupture) des échantillons de PMMA en mode II est plus grande que le mode I qui est due à la physique. [5]

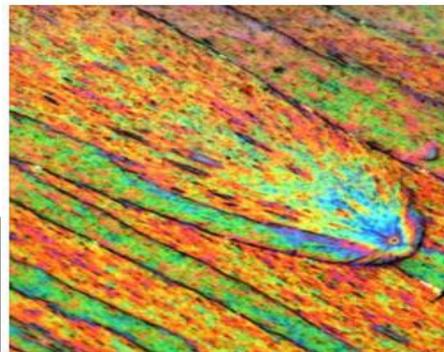


**Figure 5** Fissure de bord simple (rangée du haut) et spécimens boulonnés (rangée du bas) sur l'appareil Arcan modifié: (a) le mode I pur, (b) en mode mixte (angle de chargement de  $45^\circ$ ) et (c) pur Mode II.[5]

## 1.4 Propagation de fissure

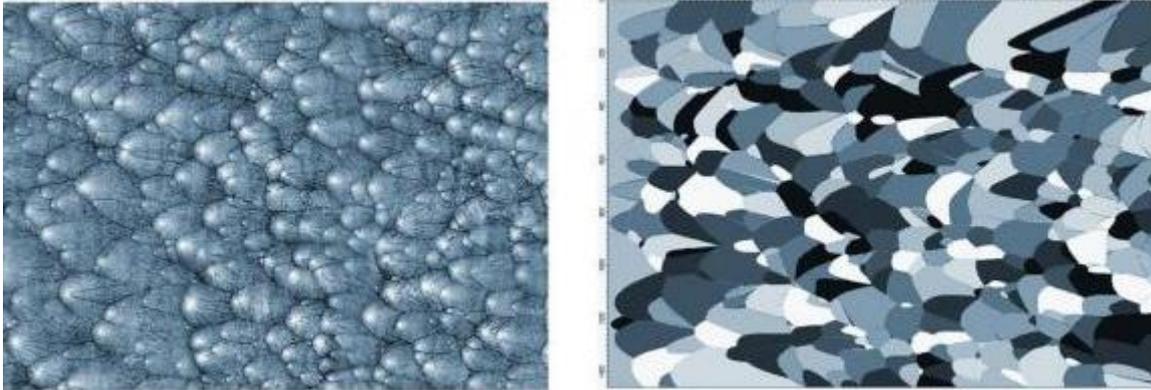
Les chercheurs ont cassé des échantillons de plexiglass en variant la force effectivement appliquée pour ouvrir la fissure. Comme on peut s'y attendre, on observe que l'échantillon se rompt d'autant plus vite que la force appliquée est élevée. On observe qu'au-delà d'une certaine vitesse de rupture, la propagation de la fissure s'accompagne de la naissance, sur de minuscules défauts toujours présents dans le matériau, d'une multitude de microfissures en avant du front de fissure principal. Ces microfissures se créent au rythme effréné de centaines de millions par seconde (soit un temps caractéristique de 10 nanosecondes), ce qui rend impossible leur suivi en temps réel au cours de l'expérience. Cependant chaque microfissure laisse son empreinte sur les surfaces de rupture (voir figure), que les chercheurs ont tout le temps d'analyser après l'expérience. A partir de la géométrie du réseau d'empreintes, il a été possible de déterminer le point origine de l'ensemble des microfissures, la chronologie de leurs naissances, et la vitesse à laquelle elles se sont développées. Les chercheurs sont ainsi parvenus, pour la première fois, à reconstruire en détail l'histoire de la série d'événements ayant amené à la rupture rapide observée.

**Figure 6** marque laissée par une microfissure sur une surface de rupture



Ce résultat remet en cause la vision classique de la rupture et une première surprise fut d'observer que toutes les microfissures se propagent à la même vitesse, d'environ 200 m/s, indépendamment du niveau de force appliqué pour

ouvrir la fissure (pour une vitesse de Rayleigh de l'ordre de 900 m/s). Ce comportement observé à l'échelle microscopique est très différent de celui observé à grande échelle, avec une vitesse de fissuration macroscopique qui augmente avec la force, et qui peut atteindre des valeurs bien supérieures à 200m/s, pouvant atteindre 500 m/s. Ces résultats contredisent aussi l'opinion qui prévalait jusque-là dans la communauté scientifique, selon laquelle la génération de microfissures dissipe un surcroît d'énergie et ralentirait la fissuration. Bien au contraire, c'est par la coalescence des microfissures avec la fissure principale, que l'on multiplie la vitesse de fissuration microscopique



***Figure 7 Réseau d'empreintes laissées par la nucléation, croissance et coalescence des microfissures, lors de la fracture rapide d'un échantillon de Plexiglass. A droite : reconstruction numérique du réseau observé.***

Ces résultats permettent de révéler le rôle important que jouent les défauts microscopiques présent dans un matériau sur son comportement en rupture. La prise en compte de ces effets doit permettre de mieux apprécier, -et à terme d'améliorer-, la résistance à la rupture des matériaux. Au-delà de cet aspect fondamental, la méthodologie développée pour reconstituer en détail l'histoire des événements se produisant au cours de la rupture catastrophique d'un matériau pourraient trouver des applications importantes. L'analyse *postmortem* des empreintes laissées sur les surfaces de rupture permet de remonter aux événements qui se sont produits lors de la rupture du matériau et ainsi d'obtenir, par exemple, des indications sur les causes de l'effondrement d'une structure, d'un éboulement de terrain ou d'un tremblement de terre. [1]

## Chapitre 2 : Les éprouvettes

Nos éprouvettes sont faites à base de plexiglass, outre les propriétés bien connues du PMMA, on a :

- Facilité d'usinage
- Importante dureté de surface
- Faible poids propre – moitié moins lourd que le verre
- 11fois plus résistant au choc que le verre
- 100% recyclable
- Des tolérances d'épaisseurs réduites

Les formes des éprouvettes sont adaptées aux modes de chargement utilisés, et leurs géométries évitent les concentrations de contraintes.

### 2.1 Usinage

Les plaques de plexiglass peuvent facilement être fraisées, percées, sciées etc. Avec un outillage adapté ; elles demandent des vitesses élevées de coupe et un bon refroidissement, car leur mauvaise conductibilité thermique peut facilement provoquer un échauffement excessif et des contraintes thermiques localisées et présentent une fusion lors du frottement.

Les outils qui conviennent généralement pour la découpe sont :

#### 2.1.1 les scies circulaires de table



*Figure 8 scies circulaires de table*

- la lame doit juste dépasser la plaque de plexiglass
- utiliser une butée
- mettre la scie en marche avant d'attaquer la plaque avec précaution
- veiller à faire une découpe très précise et à ne pas coincer la lame
- bien fixer la plaque pour l'empêcher de vibrer
- choisir une avance moyenne
- lorsque l'on découpe du plexiglass refroidir si possible à l'eau ou à l'air comprimé à partir de 3 mm d'épaisseur

### 2.1.2 Les scies circulaires portatives

Avec des lames au carbure, choisir des lames dites à pas très court, les lames de scie doivent toujours être parfaitement affûtées et servir exclusivement au plexiglass



*Figure 9 scies circulaires portatives*

### 2.1.3 Les scies sauteuses

Une scie sauteuse est une machine-outil de découpe, équipée d'une lame dentée, utilisée en général pour la découpe de planches ou de panneaux en bois. La lame est très petite et étroite : elle est fixée d'un côté à un moteur qui lui fait faire un mouvement de va-et-vient rapide. Sur la plupart des modèles actuels, un guide rigidifie renforce la rigidité de la lame.



*Figure 10 scies sauteuses*

- toujours mettre la scie en marche avant d'attaquer la pièce ;
- appuyer fermement la semelle de la scie sur le film de protection de la plaque ;
- régler sur une vitesse de coupe moyenne, avance pendulaire sur zéro ;
- choisir une avance moyenne ;
- lorsque l'on découpe du plexiglass, refroidir si possible à l'eau ou à l'air comprimé à partir de 3 mm d'épaisseur.

### 2.1.4 Scie à chantourner

Les scies à chantourner : ne peuvent être utilisées que pour une épaisseur de plaque jusqu'à 4 mm



*Figure 11 Scie à chantourner*

### 2.1.5 les scies à archet

Etant donné que les lames de ces scies sont généralement à denture avoyée, elles ne permettent pas d'obtenir des découpes de bonne qualité (éclats), par conséquent il faut utiliser que des lames parfaitement affûtées, et procéder à des essais pour déterminer la course et l'avance qui produisent les conditions de coupe recherchées.

### 2.1.6 les cutters

Pour faciliter le sciage du plexiglass.

## 2.2 Géométrie des éprouvettes

En physique des matériaux, une éprouvette est une pièce de fabrication et de dimensions normalisées destinée à être soumise à un essai thermomécanique, conçu pour connaître le comportement d'un matériau quand il est soumis à une contrainte telle que la traction, le cisaillement ou encore la torsion et la flexion comme dans notre étude [RAB M4 170].

Le choix de l'éprouvette dépend du but recherché :

- La recherche de l'influence de la mise en forme du matériau lors de la fabrication d'un produit nécessite, soit de reproduire, à la surface des éprouvettes, les conditions thermomécaniques les plus proches possibles de celles subies par le produit, soit de prélever les éprouvettes dans le produit lui-même, en faisant en sorte de ne pas modifier l'état de surface (rugosité, écrouissage, contraintes résiduelles) induit par les conditions de fabrication de celui-ci.

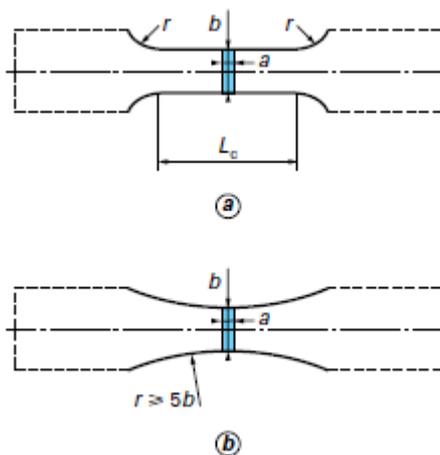
- La connaissance de l'effet d'un traitement de surface appliqué à un composant requiert aussi de traiter les éprouvettes dans les conditions de similitude adaptées. Dans ce cas, en particulier, les dimensions des éprouvettes doivent être telles qu'elles permettent d'obtenir un champ de contraintes résiduelles comparable à celui d'un composant réel.
- L'obtention des caractéristiques de résistance à la fatigue du matériau, dans un état microstructural donné, conduit par contre à réaliser l'éprouvette dans des conditions les plus neutres possibles c'est-à-dire qui n'engendrent pas un état de surface modifiant les propriétés recherchées.

Le choix de l'éprouvette d'essais dépend de l'essai que l'on veut effectuer et de la machine dont on dispose :

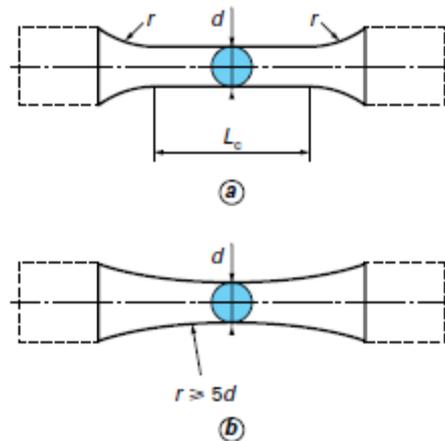
### 2.2.1 Forme des éprouvettes

On distingue les éprouvettes parallélépipédiques, d'épaisseur constante et à section soit constante, soit variable, des éprouvettes axisymétriques à section circulaire, soit cylindriques à section constante, soit toroïdales à section variable. Ce dernier modèle est d'utilisation la plus générale et de ce fait conseillé quand d'autres conditions n'imposent pas le choix d'une autre éprouvette (minimum de matière, facilité d'usinage et de finition, élimination du flambement, évacuation de la chaleur, localisation de la rupture ...).

Dans tous les cas, on distingue les éprouvettes lisses des éprouvettes entaillées.



**Figure 12 Eprouvettes parallélépipédiques à section**



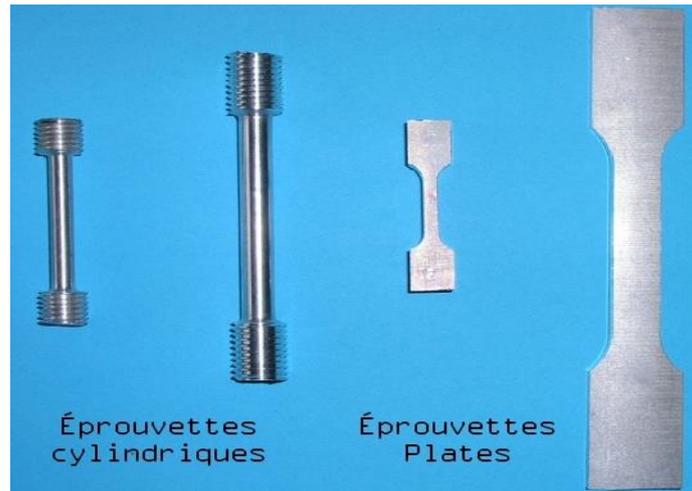
**Figure 13 Eprouvettes axisymétriques à section circulaire**

Lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques fondamentales d'un métal en fatigue, il est donc nécessaire de réduire le plus possible l'influence de l'état de surface de l'éprouvette sur le processus de fatigue qui conduira à la rupture.

Pour cette raison, l'état de surface des éprouvettes devra être particulièrement soigné et répétitif pour le même lot d'éprouvettes. On aura alors intérêt à privilégier les types d'éprouvettes et les modes d'usinage qui assurent le maximum de régularité et de répétitivité de l'état de surface et qui n'introduisent que des contraintes résiduelles et un écrouissage superficiel négligeables comme par exemple, la rectification fine.

La finition des éprouvettes par polissage manuel, même longitudinal, doit donc être évitée chaque fois que cela est possible.

Des éprouvettes classiques sont illustrées dans les schémas suivants [ATO 97] :

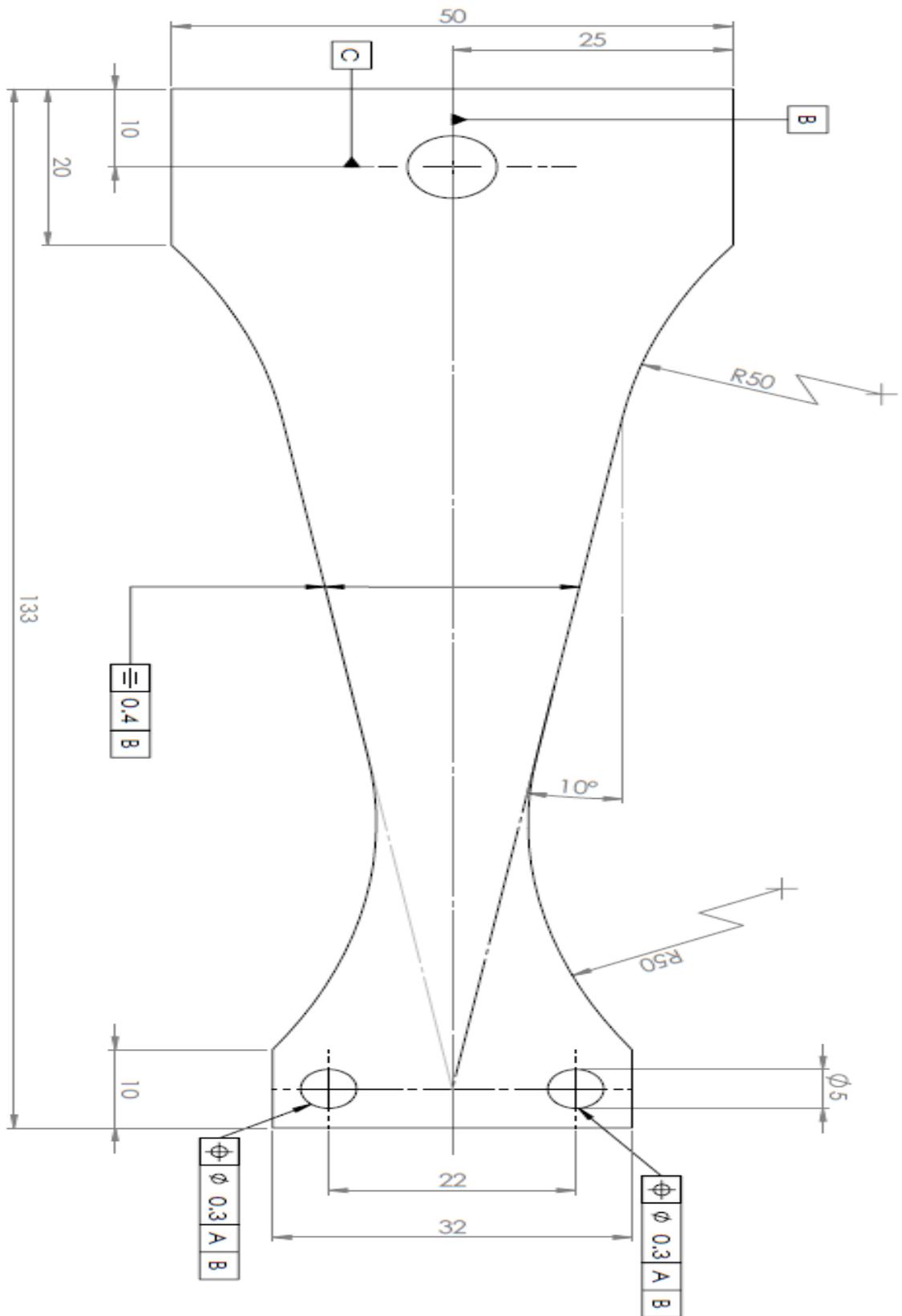


*Figure 14 Types d'éprouvettes*

L'éprouvette utilisée dans ce travail est une éprouvette de forme plate.

### **2.2.2 Dimensions**

Chaque essai de fatigue a une éprouvette qui lui correspond avec forme et dimensions précises, et qui dépendent du résultat de fatigue qu'on veut obtenir. Notre éprouvette a les dimensions suivantes :



*Figure 15 dimensions de l'éprouvette*

## Chapitre 3 : Expérimentation

Il existe plusieurs types de machine de fatigue, selon le mode de sollicitation voulu (flexion, torsion, traction, compression, flexion rotative ...) et selon les facteurs d'influence (température, corrosion, entaille...)

La méthode d'essai la plus répandue pour le tracé des courbes d'endurance est celle de la flexion rotative ou de flexion plane. Les machines mécaniques utilisées pour ces essais permettent d'atteindre des fréquences voisines de 20 Hz, [1]. Ces machines sont simples et relativement peu coûteuses. On a aussi parfois recours à des essais de traction/compression qui présentent l'avantage de conduire à une contrainte constante à travers la section de l'éprouvette. Le choix du type d'éprouvette et du mode de sollicitation est important dans la mesure où il existe un effet d'échelle en fatigue.

Tous ces essais sont réalisés à effort ou contrainte imposée dans le domaine de l'élasticité.

En revanche, les essais de fatigue plastique oligocyclique sont asservis en déformation imposée, ce qui nécessite l'emploi d'un système d'extensométrie. On utilise alors le plus souvent des machines servohydrauliques qui ont été mises au point au milieu des années 60.

Dans notre travail, on va utiliser une machine de fatigue à flexion plane.

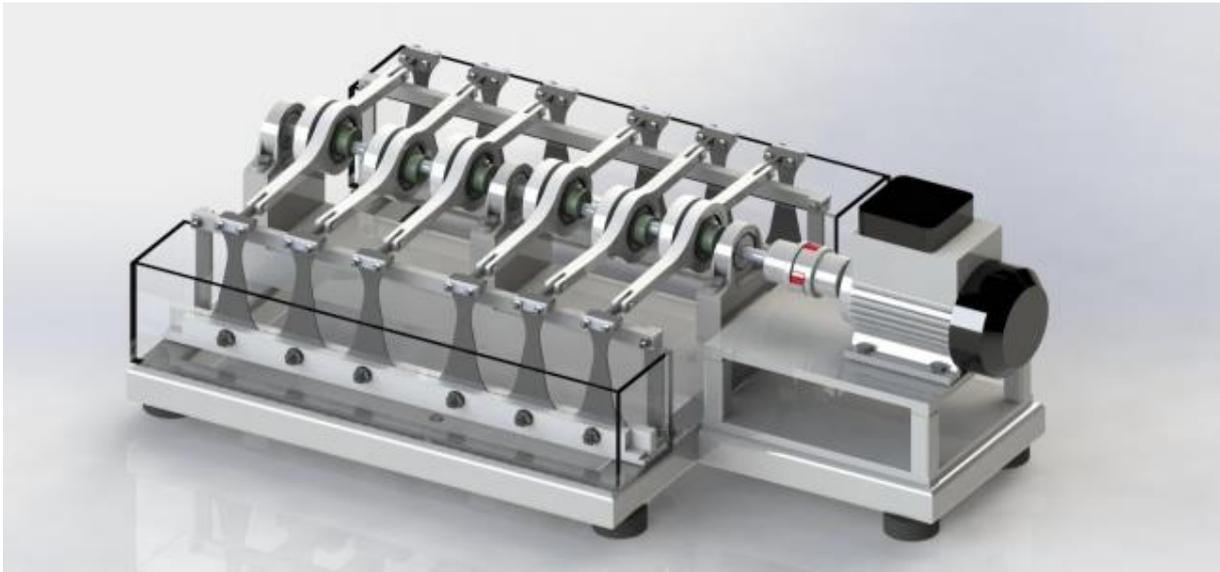
### 3.1 Description de la machine

Notre machine d'essai a été réalisée dans le cadre d'un PFE au sein de l'école, c'est une machine de fatigue sous corrosion en flexion plane sur multi-éprouvettes à grands nombre de cycles.

Elle peut réaliser des essais de fatigue sur 12 éprouvettes dont 6 à l'air libre et 6 autres sous corrosion.

Les éprouvettes sont encastrées d'un côté et un déplacement est imposé de l'autre côté.

Après un certain nombre de cycles, les éprouvettes se rompent en raison de la fatigue du matériau et la machine s'arrête automatiquement grâce à un capteur optique et le nombre de cycle d'effort est enregistré par le compteur électronique.



*Figure 16 Machine de fatigue en flexion plane*

### **3.2 Préparation des éprouvettes**

1. On découpe à l'aide d'une scie circulaire et d'une scie sauteuse des plaques de plexiglass en forme rectangulaire pour faciliter la découpe de l'éprouvette et on recouvre avec un adhésif de protection pour éviter la formation de bavures et garantir un meilleur état de surface.



*Figure 17 plaque de plexiglass rectangulaire*



***Figure 18 plaque de plexiglass rectangulaire enveloppée d'adhesif***

2. On imprime sur du papier A4 plusieurs éprouvettes et on les colle sur la plaque rectangulaire à l'aide d'une colle
3. Après les avoir collés, on réalise le perçage d'abord, par l'intermédiaire d'une perceuse, pour éviter que l'éprouvette casse
4. Après avoir réalisé le perçage, on découpe les éprouvettes par une scie à chantonner



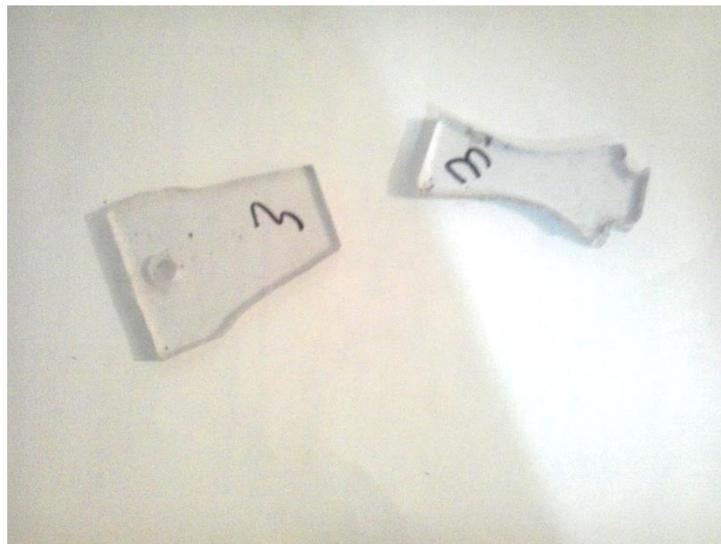
***Figure 19 scie à chantourner***

5. On découpe en tout 16 éprouvettes



**Figure 20** *épreuve en plexiglass*

6. En utilisant un feutre spécial, on dessine les entailles et on les découpe par la scie à chantonner
7. Les éprouvettes ainsi préparées sont placées dans la machine et sont prêtes pour effectuer le test.
8. La machine s'arrête automatiquement dès qu'il y a rupture de l'éprouvette.



**Figure 21** *épreuve après rupture*

Il est noté que les entailles sont réalisées sur le côté, et sont traversantes, on a 2 types d'étude, en fonction de l'entaille :

- Entaille de 3mm de profondeur vers le haut à différents angles  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  et  $60^\circ$
- Entaille de 3mm de profondeur vers le bas à différents angles  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  et  $60^\circ$

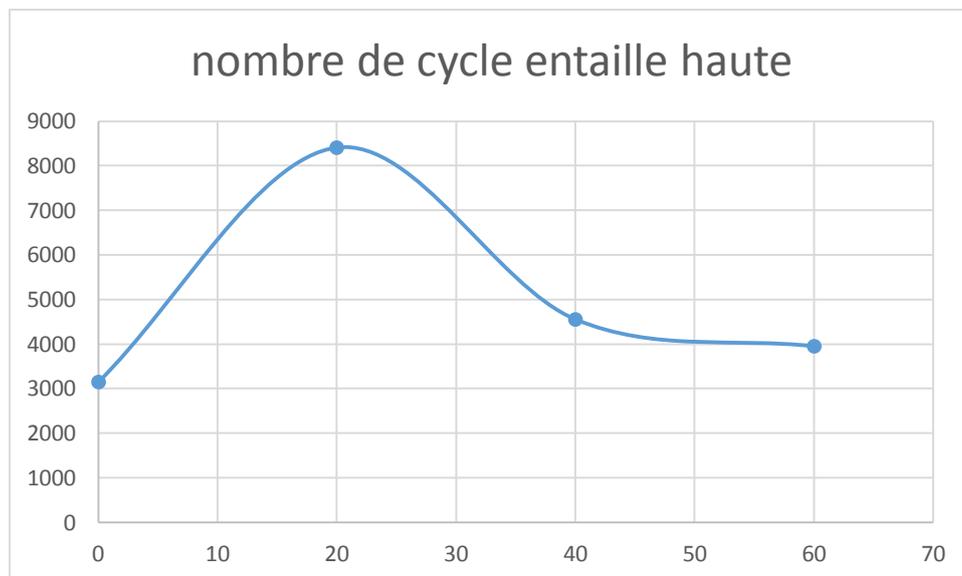
### 3.3 Résultats

Les tableaux suivants donnent le nombre de cycle à la rupture des éprouvettes entaillées.

*Tableau 6 éprouvette à entaille haute*

Eprouvettes à entaille haute	Nombre de cycle essai 1	Nombre de cycle essai 2
0°	/	3143
20°	8400	/
40°	4555	4200
60°	3950	/

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

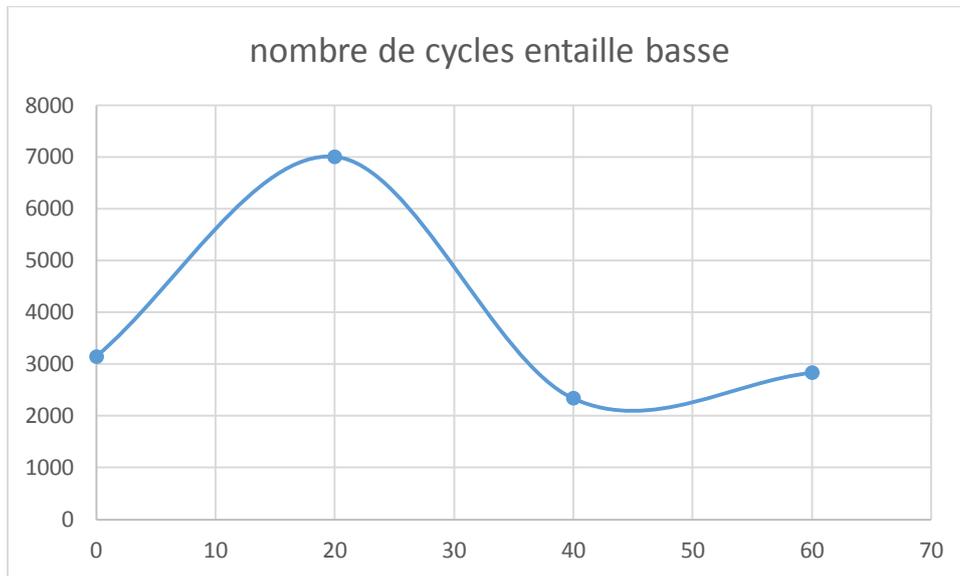


*Figure 22 graphique démontrant le nombre de cycles entaille haute en fonction de l'angle*

*Tableau 7 éprouvette à entaille basse*

Eprouvette à entaille basse	Nombre de cycle essai 1	Nombre de cycle essai 2
0°	3142	/
20°	/	7000
40°	3142	2333
60°	2828	/

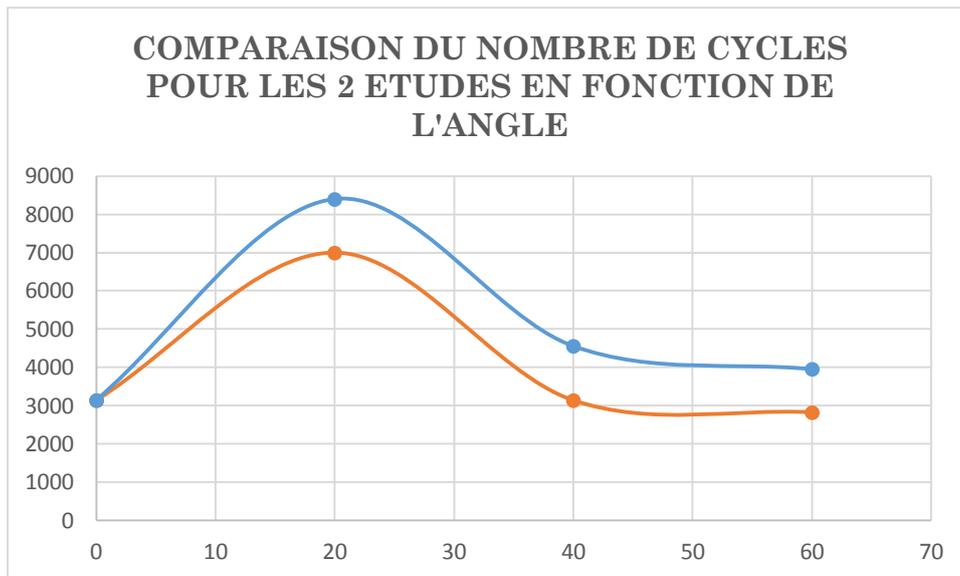
La représentation graphique des résultats obtenus est montrée par la figure suivante :



*Figure 23 graphique démontrant le nombre de cycles entaille basse en fonction de l'angle*

Ces graphes illustrent les résultats expérimentaux obtenus dans les 2 études concernant l'évolution du nombre de cycles en fonction de l'angle.

On remarque que les 2 graphes évoluent de la même manière atteignant un pic à  $20^\circ$  pour diminuer pour augmenter de nouveau à  $60^\circ$  et ceci est dû essentiellement à la perte de rigidité flexionnelle au niveau de l'entaille quand l'angle augmente.



*Figure 24 graphique dementrant le nombre de cycles pour les 2 etudes en fonction de l'angle*

**On constate aussi que les résultats de l'étude 1 sont supérieurs à ceux de l'étude 2 et ceci est dû au fait qu'il y ait plus de matière dans la partie haute que dans la partie basse.**

# Chapitre 4 : Simulation par SOLIDWORKS

## 4.1 Présentation du logiciel

SolidWorks 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. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SolidWorks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

## 4.2 Fatigue par SOLIDWORKS

Anticipez la rupture du composant en examinant des cycles de chargement répétés ou aléatoires et ajustez votre conception afin de minimiser le risque de ruine et optimiser la durée de vie du produit.

Effectuez des analyses de fatigue afin d'anticiper la rupture du composant lors de la phase de conception grâce aux outils de CAO intégrés dans SolidWorks Simulation. Nous pouvons ensuite ajuster notre conception ou définir un programme de maintenance préventif afin de réduire les coûts de garantie et d'optimiser la durée de vie du produit.

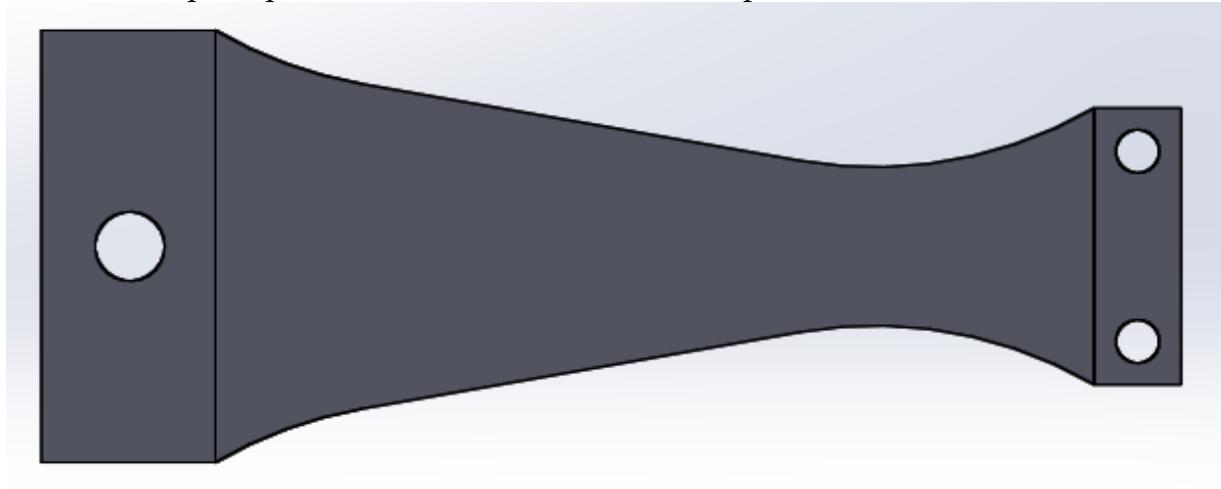
### 4.2.1 Vue d'ensemble de l'analyse de fatigue

L'analyse de fatigue permet de déterminer à quel point les cycles de chargement répétés ou aléatoires peuvent provoquer de défaillances structurales (également appelées fatigue du métal). SolidWorks Simulation permet aux concepteurs de bénéficier de deux approches complémentaires afin de concevoir leurs analyses :

- Conception pour la résistance (Design for Strength) : Traditionnellement, les concepteurs prennent en compte la valeur de rupture ultime de leurs composants dans l'analyse de ruine ; mais le chargement en service est rarement statique par nature, étant donné qu'il existe généralement une variation cyclindrique.
- Conception pour la vie (Design for Life) : En ajoutant cette approche, vous pouvez utiliser l'analyse par éléments finis (FEA) afin d'anticiper et de cibler les causes de la défaillance.

## 4.3 Eprouvette

Après avoir déterminé la géométrie de l'éprouvette, on dessine cette dernière par SolidWorks pour pouvoir entamer la simulation après.



*Figure 25 forme de l'éprouvette*

## 4.4 Simulation

L'étude de fatigue se fait en 2 phases par 2 analyses

### 4.4.1 Analyse statique

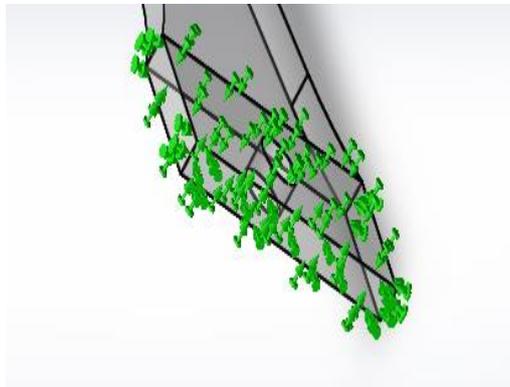
Quand un chargement est appliqué à un corps, celui-ci se déforme et les effets du chargement se transmettent dans tout le corps. Les forces externes induisent des forces internes et des réactions qui conduisent le corps à un état d'équilibre. L'analyse statique linéaire calcule les déplacements, les déformations, les contraintes et les forces de réaction sous l'effet des chargements appliqués.

- On active le solidworks simulation et on choisit nouvelle etude :etude statique et on choisit le materiau avec lequel on va travailler, en outre ACRYLIQUE.

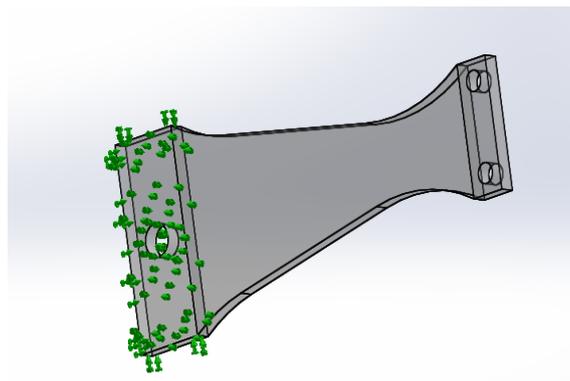
**Tableau 8 propriétés du matériau**

Propriété	Valeur	Unités
Module d'élasticité	3000000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	0.35	S.O.
Module de cisaillement	890000000	N/m <sup>2</sup>
Masse volumique	1200	kg/m <sup>3</sup>
Limite de traction	73000000	N/m <sup>2</sup>
Limite de compression		N/m <sup>2</sup>
Limite d'élasticité	45000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficient de dilatation thermique	5.2e-005	/K
Conductivité thermique	0.21	W/(m·K)
Chaleur spécifique	1500	J/(kg·K)
Rapport d'amortissement du matériau		S.O.

- L'éprouvette est encastrée à sa partie basse, condition imposée par la machine.

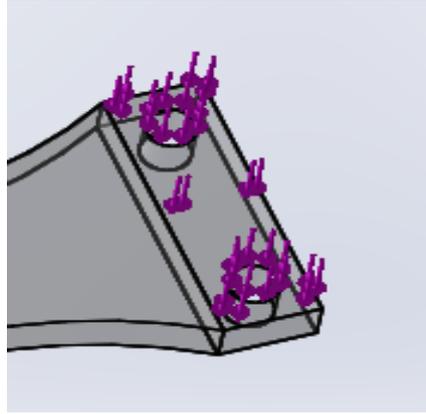


**Figure 26 fixation de l'éprouvette**

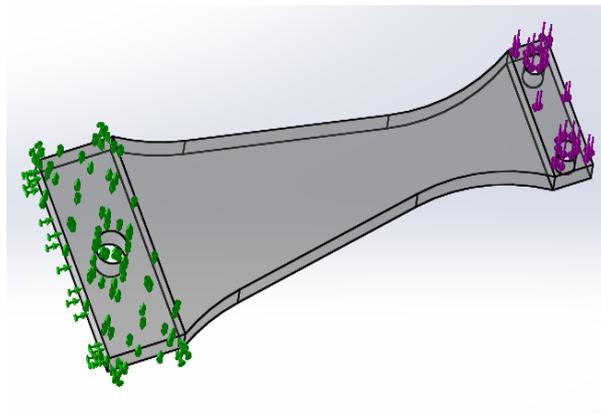


**Figure 27 forme de l'éprouvette après fixation**

- On applique une force de 15N répartie uniformément sur la surface haute ou réduite de l'éprouvette, condition imposée par la machine



*Figure 28 application de force*



*Figure 29 forme de l'éprouvette après fixation et application de la force*

#### 4.4.2 Maillage

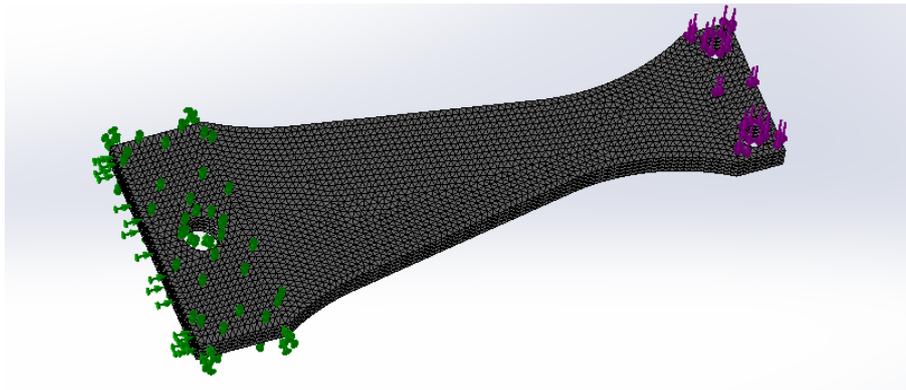
La méthode d'analyse par éléments finis (FEA) constitue une technique numérique fiable d'analyse de conception. Le processus commence par la création d'un modèle géométrique. Ensuite, le programme subdivise le modèle en un réseau de petites entités de formes simples, appelées éléments, interconnectées par des points communs appelés nœuds. Le processus qui consiste à diviser le modèle en petites entités est appelé le maillage. Le programme d'analyse par éléments finis considère le modèle comme un réseau d'éléments interconnectés.

Le maillage est une étape fondamentale de l'analyse. Le logiciel crée automatiquement un maillage mixte d'éléments volumiques, de coques et de poutres. Le maillage volumique convient à des modèles volumiques ou complexes en 3D. Les éléments coque conviennent aux pièces minces (comme les pièces de tôlerie). Les éléments poutre conviennent aux éléments mécano-soudés.

La précision de la solution dépend de la qualité du maillage. En général, plus le maillage est fin, plus la précision est élevée. Le maillage généré dépend des facteurs suivants :

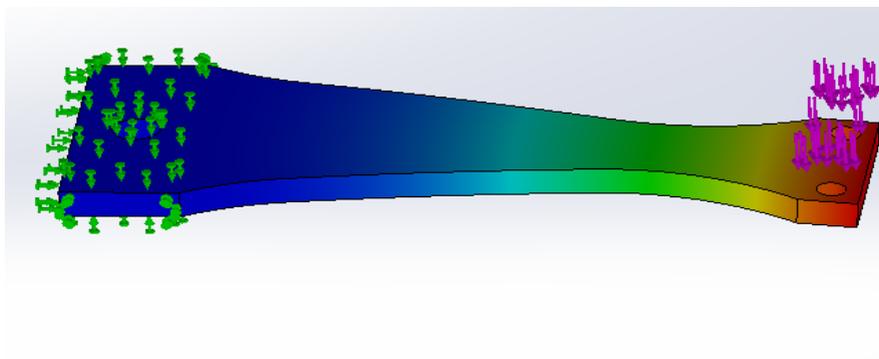
- La géométrie créée
- Les options de maillage actives
- Le contrôle de maillage
- Les conditions de contact
- La taille globale des éléments et la tolérance du maillage

Pour cette simulation, on choisit le maillage le plus fin que propose SOLIDWORKS, et pour cette pièce 57683 éléments ont été créés.



*Figure 30 Epreuve maillée*

- On exécute l'analyse statique
- On obtient les résultats de la flèche pour les 2 études à angles différents :



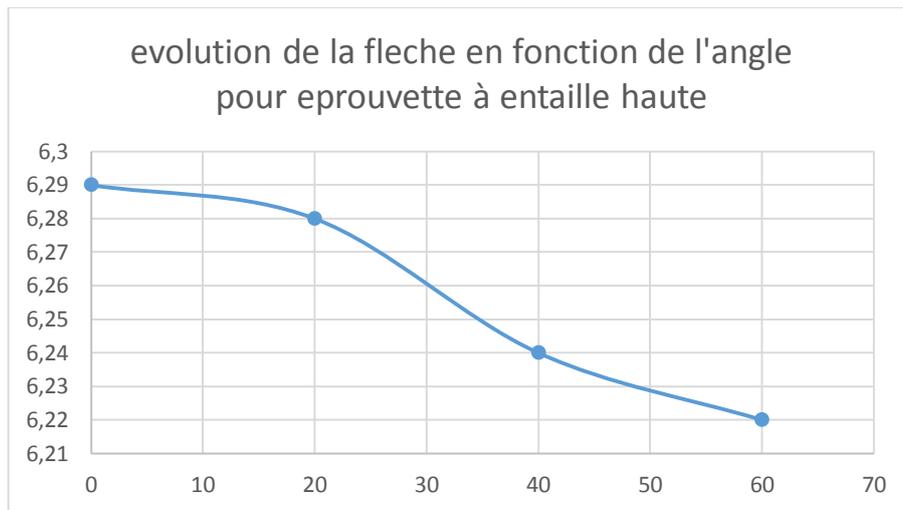
*Figure 31 Résultat de la flèche*

#### 4.4.3 Résultats :

*Tableau 9 flèche pour entaille haute*

Entaille haute	Flèche (mm)
0°	6.29
20°	6.28
40°	6.27
60°	6.24

Le graphique représentant les résultats de la flèche est dans la figure ci-dessous :

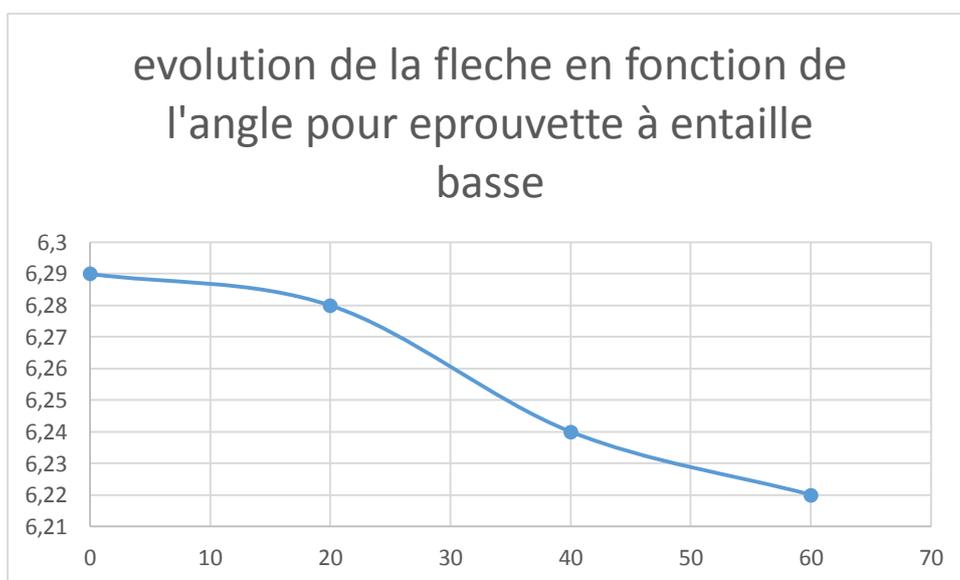


**Figure 32** graphe démontrant l'évolution de la flèche en fonction de l'angle pour éprouvette à entaille haute

**Tableau 10** flèche pour entaille basse

Entaille basse	flèche
0°	6.29
20°	6.28
40°	6.24
60°	6.22

Le graphique représentant les résultats de la flèche est dans la figure ci-dessous :



**Figure 33** graphe démontrant l'évolution de la flèche en fonction de l'angle pour éprouvette à entaille basse

**Les graphes établies montrent l'évolution de la flèche en fonction de l'angle pour les 2 études. l'allure de la courbe est décroissante or quand l'angle augmente, la flèche diminue et ceci est dû essentiellement à la perte de rigidité flexionnelle.**

# Conclusion

La prévision de la durée de vie en fatigue des matériaux est un thème de plus en plus exploré avec des problèmes scientifiques établis et des enjeux industriels potentiellement importants.

Nous avons donc utilisé au cours de ce travail des éprouvettes en plexiglass

Notre étude a été faite en utilisant une machine de flexion comprenant douze (12) éprouvette fonctionnant 15N.

Les résultats obtenus ont démontré l'influence de l'effet d'entaille sur la durée de vie du PMMA.

Nous remarquons de ce fait qu'un angle réduit donne une meilleure endurance de l'éprouvette.

La mesure de la flèche est un indicateur de l'endommagement, dans les deux études nous obtenons un résultat cohérent.

Parfois les résultats obtenus sont plus au moins différents pour des éprouvette de même entaille, ceci est du essentiellement au défaut d'usinage et aux autre facteurs. Cette dissimilitude est un phénomène courant dans la fatigue, nous proposons donc plusieurs essais pour confirmer les résultats.

# Bibliographie

- [1] Communiqué de presse de CNRS/Ecole Centrale de Lyon/Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne
- [2] Fatigue and Fracture Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, School of Mechanical Engineering, Iran
- [3] University of Science and Technology, Narmak 16846, Tehran, Iran
  
- [4] Fracture Research Laboratory, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, P.O. Box 13741-4395, Tehran, Ira
- [5] Harper, Charles A., Handbook of Plastic Processes, John Wiley & Sons, 2005
- [6] Van Krevelen, D.W. Properties of polymers, ELSEVIER, 2003
- [7] Mémoire de fin d'étude : conception et réalisation de machine de fatigue de torsion avec flexion, HADID-HADJBOUZID-Ecole nationale polytechnique-juin 2015