

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement

/.../.../.../.../...



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

**Simulation de la Distribution des Contraintes autour
d'un Défaut dans un Polymère**

Soutenu publiquement le : 06/06/2024

Par :

Walid REDDAH

Idris BABAAMER TIAZIT

Devant les jurys composés de :

Mme.KHANE YASMINE	MCA	Univ.Ghardaïa	Président
M.BOUSNANE TOUFIK	MAA	Univ.Ghardaïa	Encadrant
M.MEDOUKALI HEMZA	MCA	Univ.Ghardaïa	Examineur
M.ZITANI BRAHIM	MAA	Univ.Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2023/2024

REMERCIEMENT

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu,
qui nous a donné la force et la persévérance nécessaires
pour achever ce travail.

Nous souhaitons également remercier chaleureusement
notre encadrant M.Bousnane Toufik, pour son précieux
accompagnement tout au long de ce projet.

Nos sincères remerciements vont également à tous les
enseignants qui nous a enseigné, conseillé et soutenu durant
notre parcours académique.

Un grand merci à tous nos amis de promo pour leur soutien,
leur encouragement et leur amitié tout au long de cette
expérience.

Enfin, nous adressons nos remerciements aux membres du
jurys pour avoir acceptés d'évaluer notre mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes parents, pour leur amour, leur soutien et leur sacrifices constant, sans lesquels ce parcours n'aurait pas été possible.

À mon frère et mes seours, pour leur encouragement, leur inspiration et leurs conseils.

À ma famille, pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement tout au long de mes études.

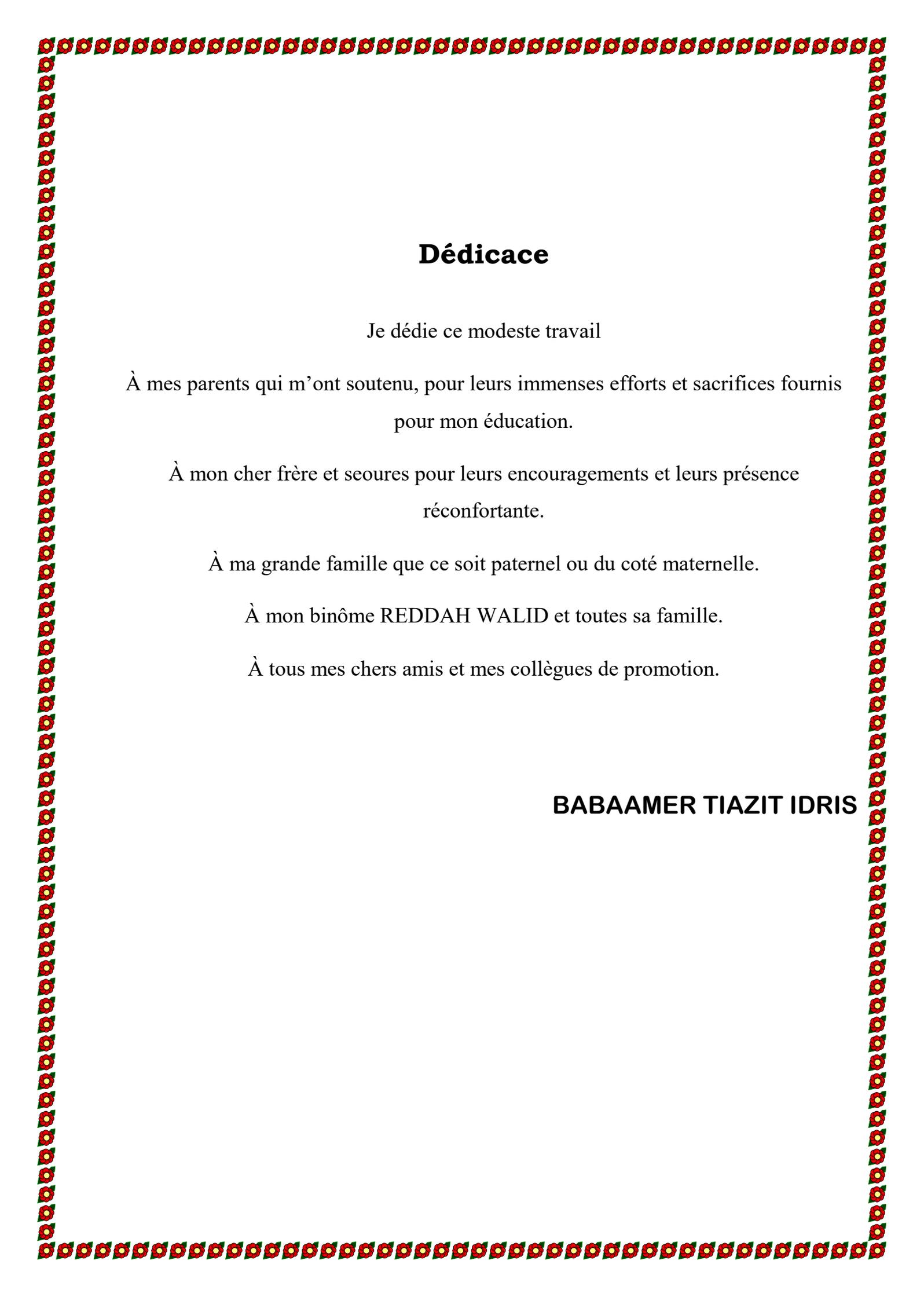
Je tiens également à exprimer ma gratitude à mes amis et collègues, qui ont été une source constante de motivation et d'aide précieuse.

À tous mes professeurs et mentor, dont la patience et les connaissances m'ont guidé tout au long de cette aventure académique.

À mon binôme BABAAMER TIAZIT Idris et toutes sa famille.

À tous ceux qui m'ont inspiré et soutenu de près ou de loin dans mon parcours.

REDDAH WALID



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes parents qui m'ont soutenu, pour leurs immenses efforts et sacrifices fournis
pour mon éducation.

À mon cher frère et seoures pour leurs encouragements et leurs présence
réconfortante.

À ma grande famille que ce soit paternel ou du coté maternelle.

À mon binôme REDDAH WALID et toutes sa famille.

À tous mes chers amis et mes collègues de promotion.

BABAAMER TIAZIT IDRIS

Résumé :

Le but de ce mémoire est la modélisation d'un défaut dans une plaque en poly méthyle méthacrylate (PMMA) soumis à deux pressions opposées de 90 MPa.

Pour cela, nous avons utilisé le code de calcul aux éléments finis ABAQUS, notamment sa version 6.14-5 comportant la méthode X-FEM, ainsi que les outils nécessaires pour son utilisation en 3 D.

On a divisé le travail en deux parties, la première consiste à analyser la plaque en PMMA sans défaut et la deuxième est de refaire le premier travail mais cette fois-ci avec l'existence d'un défaut.

Mots clés : Polymère, PMMA, Défaut, Contrainte, Rupture.

Abstract:

The aim of this thesis is the modelling of a defect in a poly methyl methacrylate (PMMA) plate subjected to two opposite pressures of 90 MPA.

For this, we used the finite element code ABAQUS, including its version 6.14-5 including the X-FEM method, as well as the tools necessary for its use in 3 D.

We divided the work on two parts, the first is to analyze the plate on PMMA without defect and the second is to redo the first work but this time with the existence of a defect.

Keyword: Polymer, PMMA, Default, Constraint, Failure.

ملخص:

الهدف من هذه المذكرة هو نمذجة عيب في صفيحة بولي ميثيل ميثاكريلات (PMMA) التي تعرضت لضغطين متعاكسين يبلغ 90 ميغا باسكال.

لهذا، استخدمنا رمز العنصر المحدود ABAQUS، بما في ذلك نسخته 6.14-5 بما في ذلك طريقة X-FEM، بالإضافة إلى الأدوات اللازمة لاستخدامه في 3 D.

قسمنا العمل على جزأين، الأول هو تحليل اللوحة في PMMA دون عيب والثاني هو إعادة العمل الأول ولكن هذه المرة مع وجود عيب.

الكلمات المفتاحية: البوليمر، بولي ميثيل ميثاكريلات، العيب، الإجهاد، التمزق.

Liste des abréviations

PMMA : PolyMéthyle MéthAcrylate

C : atome Carbone

H : atome d'Hydrogène

O : atome d'Oxygène

PVC : Polychlorure de vinyle

PE : Polyéthylène

PS : Polystyrène

Tg : température de transition vitreuse

Tf : température de fusion

σ : contrainte normale (N/m²)

τ : contrainte tangentielle (N/m²)

Table des matières :

Remercîment	
Dédicace 01	
Dédicace 02	
Résumé	
Liste des abréviations	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERAL	1
Chapitre I : Etude bibliographique	3
I .1 Introduction :.....	4
I .2. Définitions :	4
I .3. Procède de fabrication de polymère.....	5
I .3.1 Polymérisation :.....	5
I .3.1.2 Polymérisation par condensation :.....	5
I .4 Classification des polymères :	6
I .4.1 Selon leurs origines :	6
I .4.2 Classification selon leurs propriétés :.....	6
I .4.2.2 Les thermodurcissables :.....	7
I .4.2.3 Les élastomères :.....	7
I .4.3 Selon leur nombre d'unité.....	7
I .4.3.1 Les homopolymères :	7
I .4.3.2 Les copolymères :	7
I .4.3.2.1Types des copolymères :	8
I .4.4 Selon leurs architectures :	8
I .4.4.1 Monodimensionnelles :.....	8
I .4.4.2 Bidimensionnels :	9
I .4.4.3 Tridimensionnels :	9
I .5 Généralités sur le comportement des polymères :.....	10
I .5.1 comportement thermique :	10
I .5.2 Comportement et transition vitreux :	10
I .5.2.1 Transition vitreuse(Tg) :	11
I .5.2.2 zone de transition :.....	11
I .5.2.4 Zone fluide :.....	11
I .6 Propriétés générales des matériaux polymères :.....	12

I .6.1 Propriétés mécaniques :.....	12
I .6.2 Propriétés thermiques :.....	13
I .6.3 Propriétés chimiques :.....	13
I .6.4 Propriétés optiques :.....	14
I .7 Le poly méthyle méthacrylate (PMMA) :	14
I .7.1 Définition :.....	14
I .7.2 Cycle de vie de poly méthacrylate de méthyle (PMMA) :.....	15
I .7.2.1 Elaboration :.....	15
I .7.2.1.2 Polymérisation en solution :.....	15
I .7.2.1.3 Polymérisation en suspension :.....	15
I .7.2.1.4 Choix de technique.....	15
I .7.3 Mise en forme	15
I .7.4 Propriétés de poly (méthyle méthacrylate) :	17
I .7.4.1 Propriétés mécaniques :.....	17
7.4.2 Propriétés physiques et optiques :.....	18
7.4.3 Propriétés chimiques :.....	18
7.4.4 Propriétés thermiques :.....	18
7.4.5 Propriétés électriques :	19
I .7.5 Domaine d'utilisation de PMMA :	19
I .7.6 Les avantages et les inconvénients de PMMA :	20
I .8. Les défauts dans les matériaux cristallins :	20
I .8.1 Définition :.....	20
I .8.2 Les défauts ponctuels :.....	20
I .8.3 Défauts linéaires ou dislocation :	21
I .8.4 Défauts planaires :.....	23
I .8.5 Défauts volumiques :.....	23
I .8.5.1 Effet des défauts volumiques :.....	24
I .8.6 Impact des défauts sur les matériaux polymères :.....	24
I .9 Conclusion :	25
Chapitre II : Modélisation d'un défaut dans une plaque en PMMA	26
II .1 Introduction :.....	27
II .2 Produit ALTUGLAS™ :	27
II .2.1 Propriétés générales d'ALTUGLAS™ :.....	27
II .3 Présentation de logiciel ABAQUS :	27
II .3.1 Domaines physiques :.....	28

II .3.2 Problèmes :	29
II .3.3 Les unités :	29
II .3.4 Utilisation :	29
II .4 Définition des deux modèles :	29
II .4.1.1 Dimension :	29
II .4.1.2 Propriétés mécaniques principales du matériau :	30
II .4.1.3 Chargement et Condition aux limites :	30
II .4.1.4 Maillage :	31
II .4.2 Description du modèle 2 (avec défaut) :	33
II .4.2.1 Présentation du défaut :	33
II .5. Conclusion :	33
Chapitre III : Résultats et Discussion	34
III.1 Introduction :	35
III.2 Résultats et Discussion :	35
III .1.1 Distribution de la Contrainte équivalente (Von Mises) dans la plaque sans défaut :	35
III.2.2 Distribution de la Contrainte équivalente (Von Mises) dans la plaque avec défaut :	36
III .2.3 Distribution des contraintes normales :	37
III .2.4 Distribution des contraintes de cisaillement :	39
III .4 Conclusion :	41
Conclusion générale	43
Recommandations :	44
Références bibliographiques	46
Annexe	48

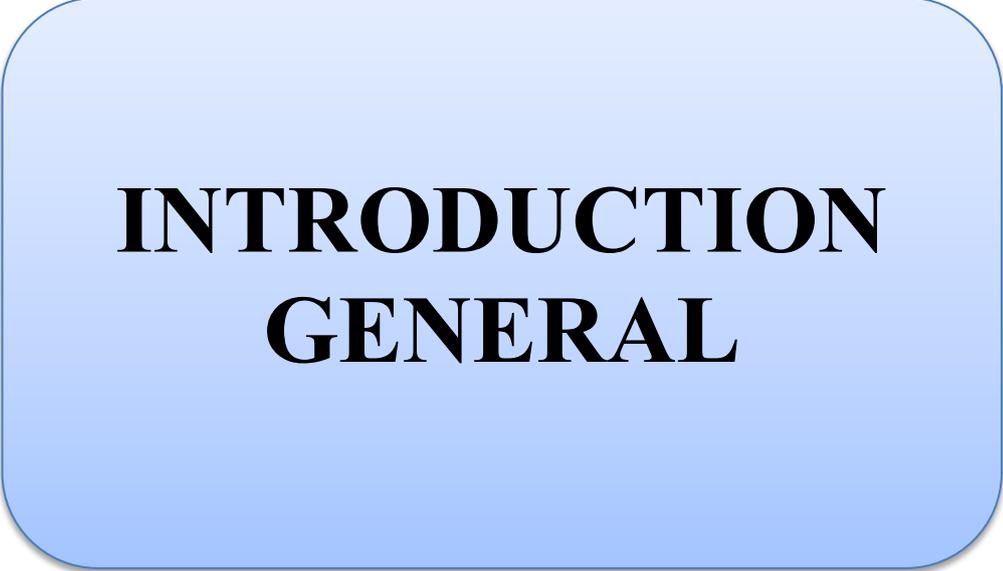
Liste des figures :

Figure	Page
Chapitre I	
Figure I.1 : structure d'un polymère	6
Figure I.2 : Exemple de polyaddition : la polymérisation de polyéthylène à partir de monomère éthylène	7
Figure I.3 : Exemple de polymérisation : la polymérisation de polyester à partir de monomère d'éthylène glycol $C_2H_4(OH)_2$ et d'acide adipique $C_6H_8(OOH)_2$ avec formation d'eau	8
Figure I.4 : Types de polymères	9
Figure I.5 : Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire	11
Figure I.6 : Représentation d'un polymère bidimensionnel	12
Figure I.7 : Représentation schématique d'un fragment de polymère tridimensionnel	12
Figure I.8 : Dépendance des propriétés de polymère de la température	14
Figure I.9 : Comportement viscoélastique des polymères	15
Figure I.10 : Structure chimique de PMMA	17
Figure I.11 : Injection par moulage	18
Figure I.12 : coupe schématique d'une installation d'extrusion	19
Figure I.13 : coupe schématique d'une installation de thermoformage	19
Figure I.14 : Types de défauts ponctuels dans un cristal : (A) lacune ; (B) atome étranger interstitiel ; (B') atome auto-interstitiel ; (C, C') atomes étrangers en substitution	24
Figure I.15 : Géométrie des dislocations dans un cristal à réseau cubique : (a) réseau sans défaut; (b) dislocation-coin; (c) dislocation-vis. Pour les deux types de dislocations on a indiqué le vecteur qui caractérise le déplacement des atomes du réseau cristallin, appelé vecteur de Burgers b	25
Figure I.16 : Arrangement des atomes au niveau d'un joint de grain dans un échantillon polycristallin	26
Chapitre II	
Figure II.1 : Interface de logiciel Abaqus 6.14	31
Figure II.2 : Plaque en PMMA	33
Figure II.3 : Définition des conditions aux limites de la plaque	34
Figure II.4 : Adoption d'un maillage de la plaque	35
Figure II.5 : Défaut elliptique	36
Chapitre III	
Figure III.1 : Répartition de la contrainte de Von Mises dans la plaque sans défaut.	38
Figure III.2 : Répartition de la contrainte de Von Mises dans la plaque avec défaut	39
Figure III.3 : Répartition de la contrainte de Von Mises autour le défaut	40

Figure III.4 : Contrainte normale dans la direction 1	41
Figure III.5 : Contrainte normale dans la direction 2	41
Figure III.6 : Contrainte normale dans la direction 3	42
Figure III.7 : Contrainte de cisaillement dans le plan (1,2)	43
Figure III.8 : Contrainte de cisaillement dans le plan (2,3)	43

Liste des tableaux :

Tableau	Page
Chapitre I	
Tableau I.1: Types des copolymères	10
Tableau I.2 : caractéristiques mécaniques de PMMA	19
Tableau I.3 : caractéristiques physique et optique de PMMA	20
Tableau I.4 : caractéristiques chimiques de PMMA	20
Tableau I.5 : Caractéristiques thermiques de PMMA	21
Tableau I.6 : Caractéristiques électriques de PMMA	21
Chapitre III	
Tableau III.1 : les valeurs des contraintes normales et de cisaillements obtenus de deux plaques	42



**INTRODUCTION
GENERAL**

INTRODUCTION GENERAL

Les polymères souvent appelé plastique ou matière plastique représente une classe importante des matériaux aux propriétés variées, largement utilisés dans divers domaines industrielles et quotidiens, ces macromolécules forment par la répétition de petites unités appelées « monomères » créant ainsi des structures moléculaires de grande envergure.

Le poly méthyle méthacrylate PMMA constitue l'un de ces polymères également connu sous le nom d'acrylique, est un thermoplastique transparent et résistant largement utilisé dans diverses applications, notamment la construction, l'automobile et les produits médicaux. Cependant, comme tous les matériaux le PMMA est susceptible de défaillance sous contrainte, et la compréhension de ces mécanismes de défaillance est cruciale pour assurer la sécurité et la fiabilité des structures et des composants fabriqués à partir de ce matériau.

Les défauts volumiques sont un type courant de défaut courant de défaut dans les matériaux polymères, et ils peuvent jouer un rôle significatif dans l'initiation et la propagation des fissures.

Des recherches précédentes ont examiné le comportement de défaillance du PMMA :

- Par exemple, « une étude publiée dans le journal of mechanics and physics of solids a examiné l'influence des conditions de chargement et de la géométrie des échantillons sur la ténacité à la fracture du PMMA en testant divers échantillons avec des encoches ou des formes spécifiques qui peuvent être considérées comme des défauts artificiels pour observer comment ces imperfections influencent la résistance à la fracture, ils ont découvert que ces facteurs affectent significativement la capacité du PMMA à résister à la propagation des fissures. Les résultats montrent que la géométrie des échantillons et la nature du chargement interagissent de manière complexe pour déterminer la ténacité à la fracture. Ces découvertes sont cruciales pour optimiser la conception et l'utilisation du PMMA dans des applications industrielles où la résistance à la fracture est essentielle. » [1]
- « Une autre étude a analysé comment les fissures se propagent dans le PMMA lorsqu'il est soumis à des modes de chargement mixtes, l'objectif principal est de comprendre les mécanismes de propagation des fissures dans des conditions où les charges appliquées combinent des modes de traction et de cisaillement, afin de déterminer les facteurs critiques qui influencent la résistance du matériau et son comportement sous des sollicitations complexes. Bien que l'objectif principal soit d'analyser les mécanismes de propagation des fissures sous ces conditions, l'étude traite indirectement des défauts dans le PMMA. En effet, une fissure peut être considérée comme un type de défaut dans le matériau dans la mesure où elle analyse comment ces défauts se développent et se propagent sous différents types de chargement. » [2]

INTRODUCTION GENERAL

- ❖ L'objectif de cette étude est de simuler le comportement de défaillance du PMMA sous contrainte en présence d'un défaut elliptique à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF), qui sera utilisée pour prédire la distribution des contraintes autour d'un produit PMMA.
- ❖ Les résultats de cette étude permettront de mieux comprendre les mécanismes de défaillances du PMMA sous contrainte et d'aider à développer des méthodes plus précises pour prédire la durée de vie des structures et des composants fabriqués à partir de ce matériau.

Ce mémoire contient trois chapitres :

Le 1^{er} chapitre est structuré en trois parties distinctes. La première partie présente une étude bibliographique sur les polymères et leurs comportements, la deuxième partie se concentre spécifiquement sur le PMMA en examinant ses caractéristiques et ses comportements. Enfin, la troisième partie analyse les différents types de défauts pouvant se trouver dans ce matériau et leurs effets sur ses propriétés mécaniques et physiques.

Le 2^{ème} chapitre est consacré à la modélisation de deux modèles PMMA effectués à l'aide du logiciel Abaqus.

Le 3^{ème} chapitre présente une analyse des résultats de nos deux modèles simulés par logiciel Abaqus et des recommandations liées à ces résultats.

Chapitre I :

Etude bibliographique

I.1 Introduction :

L'homme utilise des polymères naturels tels que la soie, le cuir et la corne se vêtir et fabriquer des objets. Mais il faut attendre le XIXème siècle pour que la science commence à percer les secrets de ces matériaux. En 1839, le chimiste allemand Eduard Simon découvre que le chlorure de vinyle peut se polymériser, donnant naissance au polychlorure de vinyle (PVC), le premier polymère synthétique. Cette découverte ouvre la voie à une multitude d'autres synthèses révolutionnaires, comme celle de la bakélite par Leo Baekeland en 1909, le premier plastique entièrement synthétique.

Aujourd'hui, les polymères sont devenus des matériaux indispensables dans notre sociétés moderne, ils contribuent à améliorer notre confort de vie, à réduire notre impact environnemental et relever les défis du siècle.

I.2. Définitions :

Le terme polymère vient du grec poly qui signifie « plusieurs » et « more » qui signifie « partie », est une molécule constitué d'une chaîne de macromolécules de même nature chimique, formant structure composée de chaîne répétitives appelé « monomère ».

- **Une macromolécule** : « est une molécule résultant de l'enchaînement covalent de motifs monomères. » [3]
- **Un motif monomère** : « (unité répétitive) est la plus petite unité constitutive dont la répétition décrit un polymère. » [3]
- **Monomère** : « la matière à partir de laquelle un polymère est formé, (équivalent ou presque équivalent au motif monomère au niveau de la composition chimique). » [3]

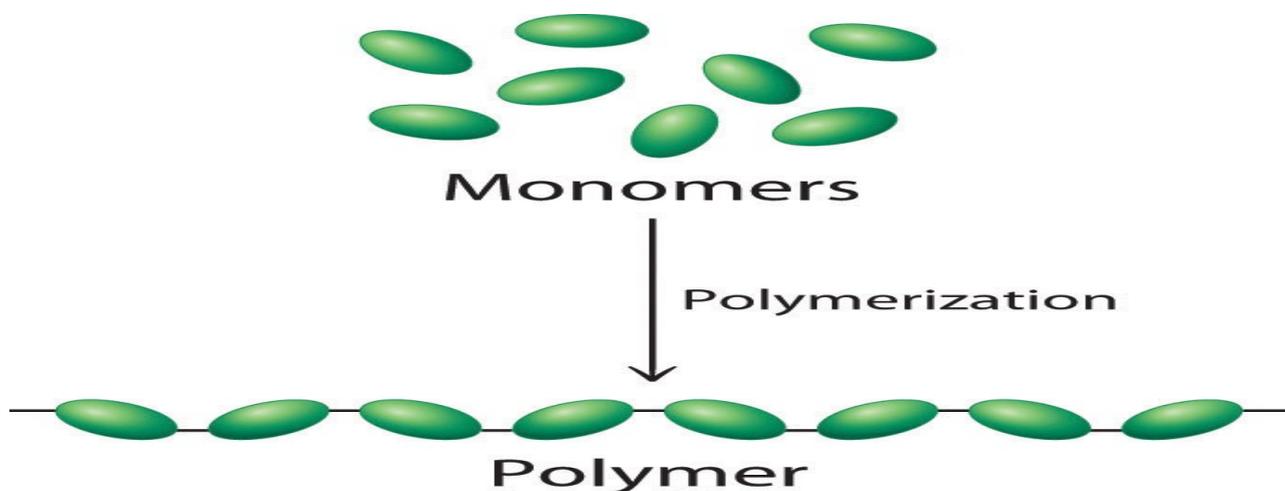


Figure I.1 : structure d'un polymère. [4]

I.3. Procède de fabrication de polymère

I.3.1 Polymérisation :

Est un processus chimique qui consiste à combiner des petites molécules appelées monomères pour former des grandes molécules appelées polymères.

Il existe deux types principaux de polymérisation :

I.3.1.1 Polymérisation par addition :

La polymérisation en chaîne est une réaction dans laquelle les monomères se lient les uns aux autres par des liaisons covalentes, sans formation de sous-produits. Les polymères obtenus par ces méthodes sont appelés **polymérisât**.

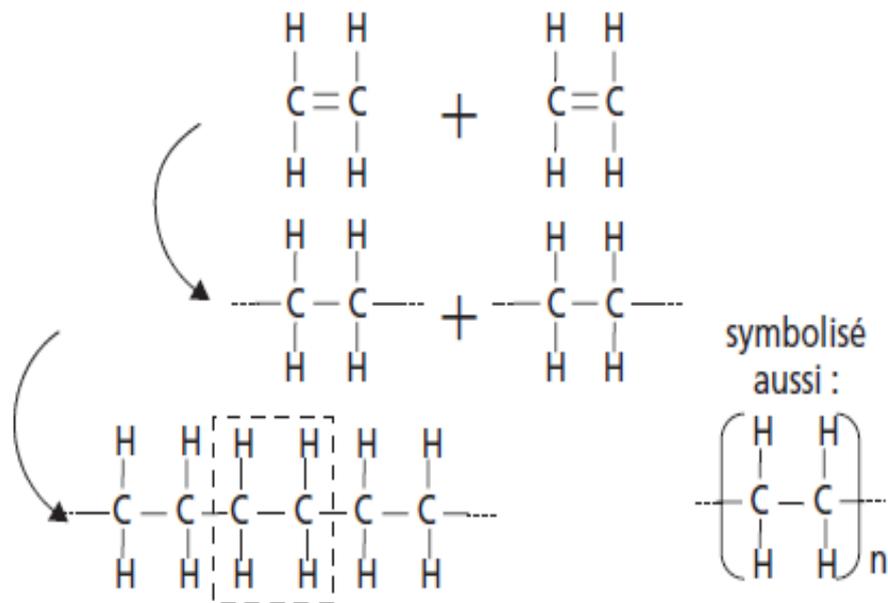


Figure I.2 : Exemple de polyaddition : la polymérisation de polyéthylène à partir de monomère éthylène. [5]

I.3.1.2 Polymérisation par condensation :

La polycondensation est une réaction chimique dans laquelle les monomères se lient les uns aux autres par des liaisons covalentes, avec formation de sous-produits, généralement de H_2O ou l'ammoniac.

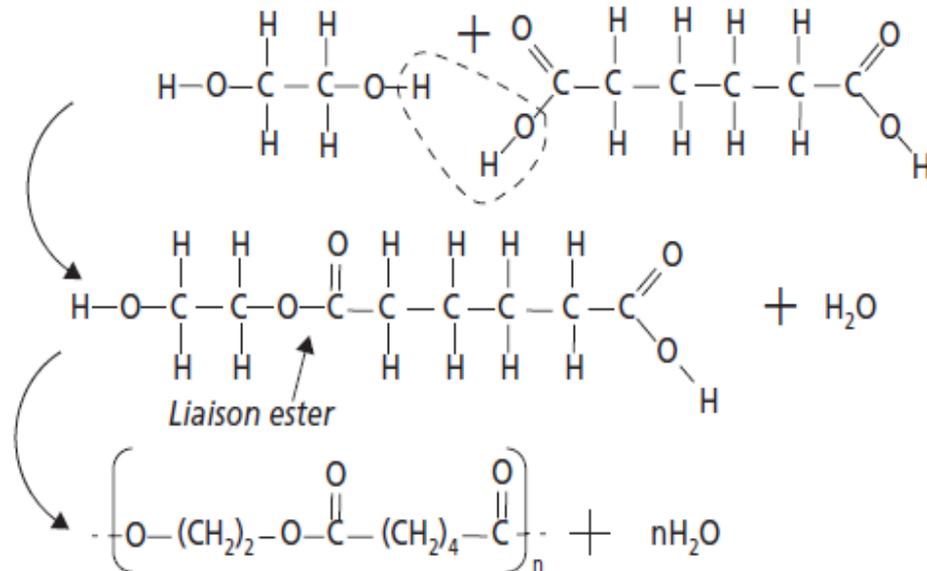


Figure I.3 : Exemple de polymérisation : la polymérisation de polyester à partir de monomère d'éthylène glycol $C_2H_4(OH)_2$ et d'acide adipique $C_6H_8(OOH)_2$ avec formation d'eau. [5]

I.4 Classification des polymères :

I.4.1 Selon leurs origines :

On peut distinguer :

- Polymères naturels : ils sont produits par les organismes vivants, comme l'ADN, la cellulose ou la soie.
- Polymères artificiels : ils sont obtenus par modification chimique de polymères naturels comme le polystyrène ou le nylon.
- Polymères synthétiques : ils sont fabriqués par polarisation des monomères, comme le polystyrène, le polyéthylène ou le pvc.

I.4.2 Classification selon leurs propriétés :

I.4.2.1 Les thermoplastiques :

Ils sont des polymères capables de passer de l'état rigide à l'état malléable par une élévation de température. « La cohésion entre macromolécules est assurée uniquement par les liaisons faibles, qui se dissocient au passage de la température de transition Vitreuse, permettant un mouvement relatif des chaînes et un Comportement visqueux à chaud. Les thermoplastiques sont le plus Souvent obtenus par polyaddition. » exemple : PVC, PE. [6]

I.4.2.2 Les thermodurcissables :

Est un polymère obtenu par une réaction chimique irréversible généralement par polycondensation. « Leurs chaînes sont fortement réticulées par des liaisons covalentes dans les trois directions de l'espace : ces liaisons résistent à l'agitation thermique jusqu'à la température de pyrolyse ou de combustion. Ces polymères ne présentent donc ni transition vitreuse marquée, ni fusion. » [6]

I.4.2.3 Les élastomères :

« Ce sont des polymères thermodurcissables à très faible taux de réticulation. Les Liaisons covalentes qui pontent les macromolécules sont peu nombreuses et très éloignées les unes des autres. Ceci laisse subsister de longues portions de chaînes libres de se déployer sous l'effet d'une contrainte appliquée, et de se replier dans leur configuration d'énergie minimale lorsque la contrainte est supprimée. » [6]

I.4.3 Selon leur nombre d'unité

On peut différencier les homopolymères et les copolymères

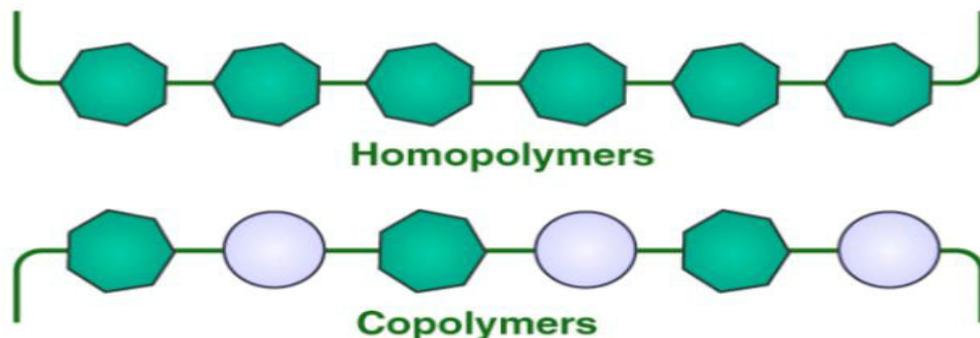


Figure I.4 : Types de polymères. [7]

I.4.3.1 Les homopolymères :

Les homopolymères sont composés d'un seul type d'unité répétitives comme le polyéthylène.

I.4.3.2 Les copolymères :

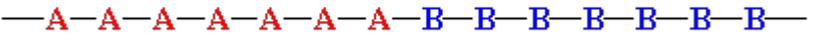
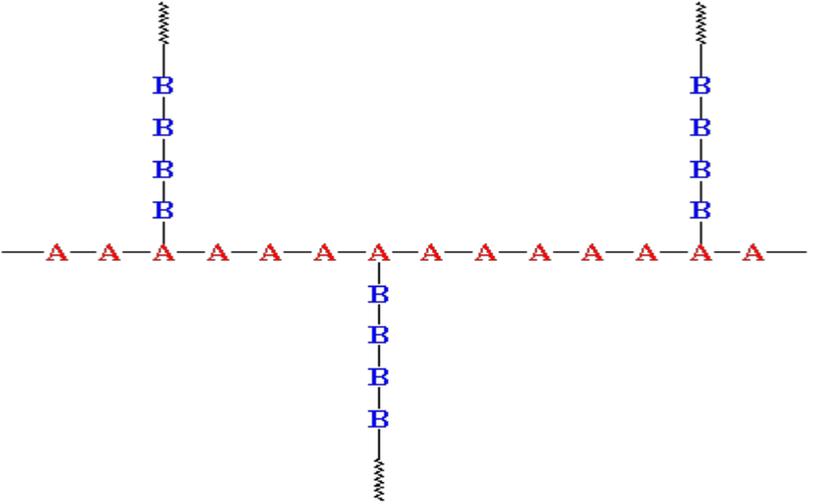
Elles sont composées d'au moins deux types d'unités répétitives, comme le polyéthylène-Co-vinyle-acétate.

I.4.3.2.1 Types des copolymères :

- Statistique : les deux monomères se suivent dans n'importe quel ordre.
- Alterné : les deux monomères alterne sur la chaîne.
- Bloc : les monomères identiques sont, il est considéré comme deux polymères réunis par leurs extrémités.
- Greffé : lorsque les chaînes polymères B sont greffées sur une chaîne de polymère A.

Les A et B sont deux unités différentes du copolymère. Les types sont représentés dans la figure ci-dessous :

Tableau I.1 : Types des copolymères.

Types	Structure
Statistique	 <p style="text-align: center;">Copolymère statistique</p>
Alterné	 <p style="text-align: center;">Copolymère alterné</p>
Bloc	 <p style="text-align: center;">Copolymère bloc</p>
Greffé	 <p style="text-align: center;">Copolymère greffé</p>

I.4.4 Selon leurs architectures :

I.4.4.1 Monodimensionnelles :

« Sont des polymères pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre élevé mais finis d'unité monomères, de tels système correspondent à la polymérisation de monomères bivalent et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère(figure1.3). » [8]

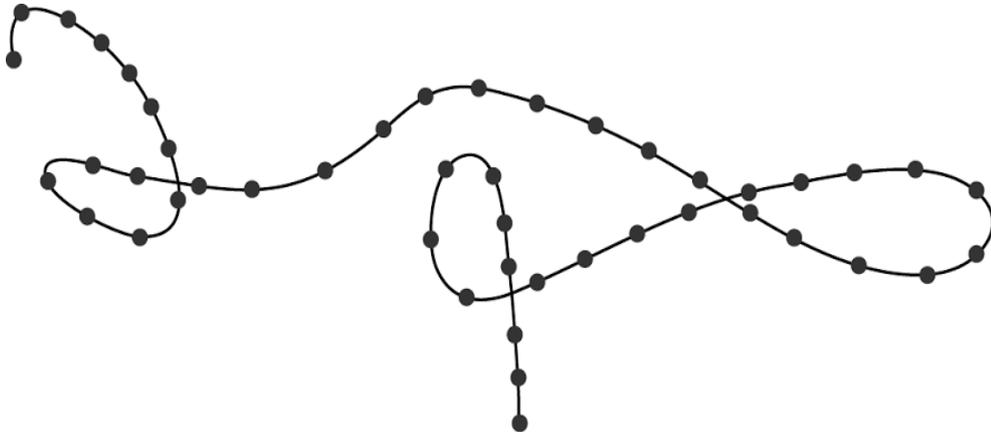


Figure I.5 : Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire. [8]

I.4.4.2 Bidimensionnels :

Ils peuvent être produit par la nature (carbone-kératine...). Dans le domaine des polymères synthétiques ce sont encore des curiosités de laboratoire. Ils se présente sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples(figure1.4).

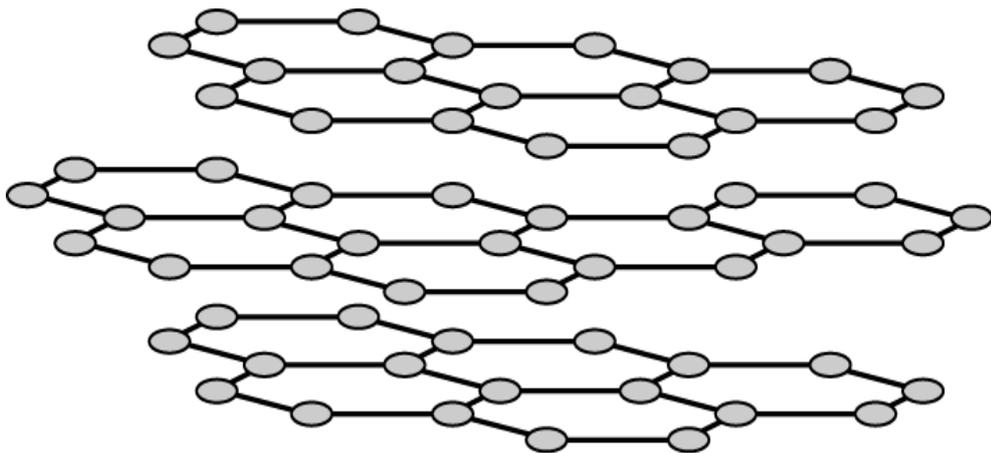


Figure I.6 : Représentation d'un polymère bidimensionnel. [8]

I.4.4.3 Tridimensionnels :

Sont des polymères naturels ou bien résultante de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux. Ils peuvent aussi être obtenus par réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel ou polymère réticulé), par voie physique ou chimique.

leur dimension moléculaire peut être considéré comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule, les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel système est représenté (figure 1.5).

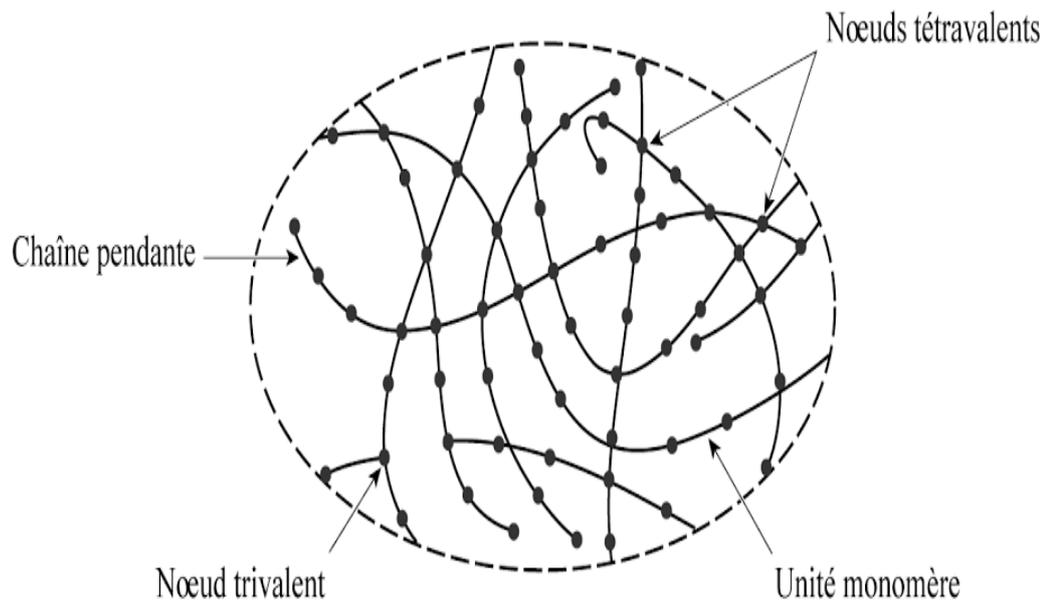


Figure I.7 : Représentation schématique d'un fragment de polymère tridimensionnel. [8]

I.5 Généralités sur le comportement des polymères :

I.5.1 comportement thermique :

« Les propriétés mécaniques des matériaux polymères dépendent de la position de la température expérimentale par rapport aux températures caractéristiques (Températures de fusion, de transition vitreuse et de transition secondaire).

On traite en général ensemble les propriétés dites mécaniques, sous-entendu à l'ambiante et les propriétés thermomécaniques. Bien que les températures caractéristiques relèvent du domaine de la physique on traitera ici de leur mesure. » [8]

I.5.2 Comportement et transition vitreux :

- **Etat vitreux :**

« À l'état vitreux (basse température) les mouvements moléculaires accessibles au polymère ne peuvent pas amorcer le coopératif le long du squelette de la chaîne. Les déformations accessibles sont donc faibles et le module de Young est élevées, la déformation élastique est contrôlée par le terme enthalpique de son énergie interne, comme pour les métaux. Pour vitreux qu'il soit, le

polymère n'est pas figé. Il existe toujours des fluctuations temporelles et spatiales de conformation. A forte contraintes le processus de déformation plastique peuvent être activé à température dite température de transition ductile/ fragile, inférieure à la température de transition vitreuse. Le comportement apparent du polymère lorsqu'il est vitreux est viscoélastique, viscoplastique, avec une ductilité macroscopique plus ou moins développée en fonction de la température et de la vitesse. » [9]

I.5.2.1 Transition vitreuse(Tg) :

Est un phénomène observé dans de nombreux polymères, à une certaine plage de température, c'est un point où le polymère change de manière significative de son état caoutchouteux et flexible à un état rigide et cassant.

I.5.2.2 zone de transition :

« La zone de transition D représente un moment clé c'est là que le matériau subit des changements importants dans sa structure moléculaire, en particulier des mouvements le long de la chaîne. Ces mouvements entraînent une baisse rapide du niveau de rigidité du polymère, le rendant plus flexible, autrement, c'est la période où le polymère passe d'une rigidité plus élevée à une flexibilité accrue en raison de changement moléculaire significatifs.

I.5.2.3 Zone caoutchouteux :

- Sur cette zone le polymère se produit à des températures où les chaînes moléculaires peuvent rapidement changer de forme, mais elles restent emmêlées à grande échelle. Le matériau semble souple mais il ne peut pas s'écouler librement, il devient élastique dû à des changements moléculaires plutôt qu'à des déformations permanentes.
- Dans cette zone aussi, la présence de parties cristallines dans certains polymères compense la perte de rigidité observée chez les polymères amorphe.
- Les polymères semi-cristallins restent élastique et peuvent subir des déformations importantes, mais ils conservent également des caractéristiques plastiques.

I.5.2.4 Zone fluide :

« Les chaînes polymériques se désenchevêtrent facilement devenant statiquement indépendantes et permettant un déplacement plus fluide sous l'effet d'une contrainte. Le matériau présente un comportement principalement visqueux mais conserve des propriétés viscoélastiques. » [9]

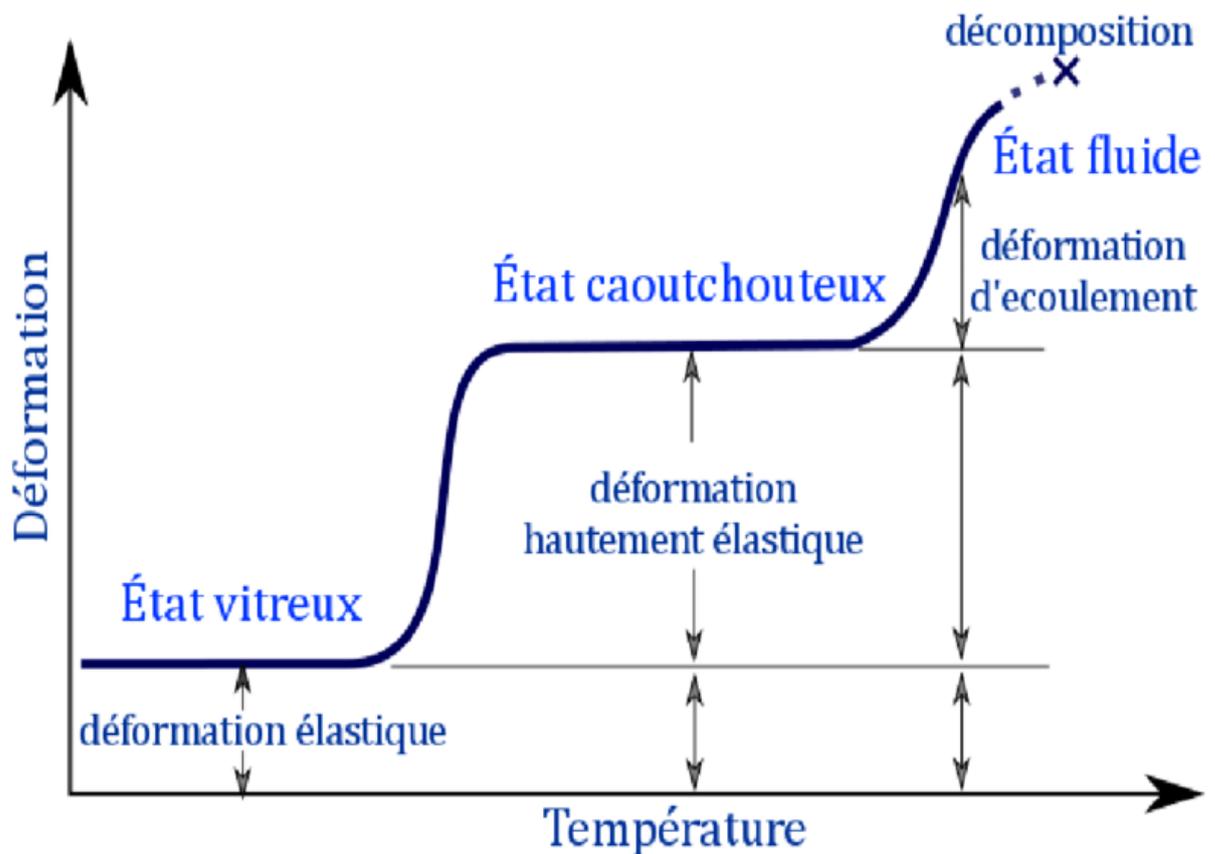


Figure I.8 : Dépendance des propriétés de polymère de la température. [10]

I.6 Propriétés générales des matériaux polymères :

I.6.1 Propriétés mécaniques :

« Les propriétés mécaniques décrivent leur comportement vis à vis des sollicitations mécaniques telles que pressions, étirements, torsions, frottements, chocs et effets de la pesanteur. Autrement dit est-ce que la structure et la forme du polymère sont stables dans le temps, même s'il est un peu bousculé ? Certains polymères seront appréciés pour leur bonne stabilité dimensionnelle (par exemple les polyesters aromatiques). D'autres, les élastomères, seront recherchés pour leur élasticité qui leur confère une excellente capacité d'absorption des chocs. » [11]

- **La viscoélasticité :**

« La viscoélasticité est la caractéristique principale des polymères, faisant l'hypothèse que la viscoélasticité est linéaire, c'est à dire que le comportement de solide élastique et du liquide visqueux linéaire coexistent simultanément, cela signifie que la relation entre contrainte et déformation reste toujours la même quelle que soit l'évolution du matériau au cours de la déformation. D'une manière schématique on peut résumer le comportement viscoélastique en

traçant la courbe de déformation en fonction du temps du solide élastique, du liquide visqueux et du corps viscoélastique lorsqu'ils sont soumis à une charge constante. » [11]

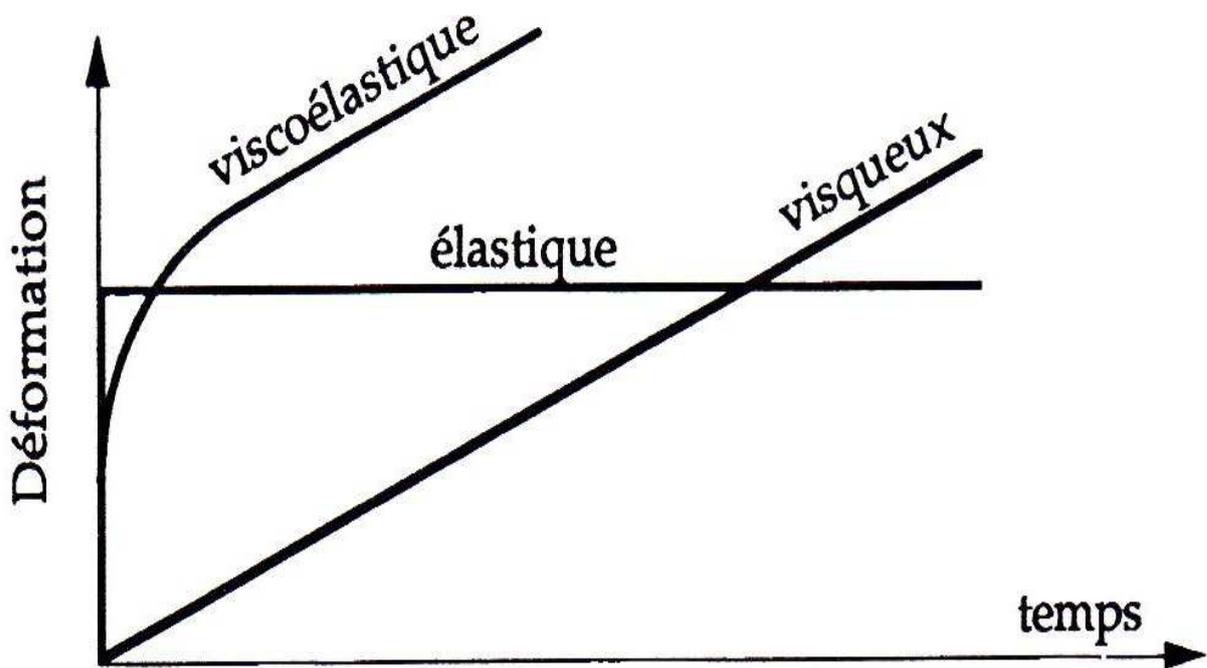


Figure I.9 : Comportement viscoélastique des polymères. [11]

I.6.2 Propriétés thermiques :

La conductibilité thermique est faible, de l'ordre $0,1 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$, les polymères sont des isolants. Les charges peuvent augmenter la conductibilité. La capacité thermique à pression constante est de l'ordre du $\text{kJ.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$. [4]

I.6.3 Propriétés chimiques :

« Le comportement chimique du matériau dépend en grande partie de la nature chimique de la partie polymère mais aussi de son accessibilité aux agents extérieurs. Il faut donc garder en mémoire tout ce qui a été dit sur les propriétés physiques. On traitera dans ce qui suit de l'action des produits chimiques sur le matériau solide, puis du comportement au feu qui est une attaque chimique à température élevée par l'air. On notera que la distinction entre mise en solution et attaque chimique est théoriquement claire, une solution devant laisser intacte la structure chimique du produit. Cependant des réactifs utilisés comme solvants peuvent être des agents de l'attaque chimique. Ainsi les acides formique ou chloracétique, qui dissolvent le PA 66, commencent par mettre en jeu une liaison hydrogène avec les fonctions amide ; à température plus élevée ils peuvent provoquer la rupture de liaisons et donc dégrader le polymère chimiquement. » [12]

I.6.4 Propriétés optiques :

« La propriété optique d'intérêt pour la lumière visible est la transparence, c'est-à-dire l'absence de diffusion et d'absorption dans le visible. Seuls les amorphes sans additifs de résilience élastomères ni charges minérales¹ peuvent être transparents, il y a quelques exceptions où la nature chimique du renforçateur de choc a le même indice de réfraction que le polymère principal. On peut citer des copolymères MBS (poly[méthacrylate-Co-butadiène-co-styrène]) de composition telle qu'ils aient l'indice du PVC des bouteilles qu'ils renforcent. » [12]

- **Indice de réfraction :**

Est un paramètre optique qui influence la manière dont la lumière se propage à travers ces matériaux, plus l'indice est élevé plus la lumière se déplace lentement par exemple le polystyrène qui est transparent car il est utilisé pour les lentilles de lunettes et les emballages.

I.7 Le poly méthyle méthacrylate (PMMA) :

I.7.1 Définition :

Le poly méthacrylate de méthyle est un polymère formule chimique $C_5H_8O_2$ obtenu par la polymérisation de méthacrylate de méthyle, il est caractérisé par sa transparence, sa facilité de mise en œuvre et ses propriétés mécaniques. Disponible sur le marché sous nom plexiglas, verre acrylique ou simplement acrylique.

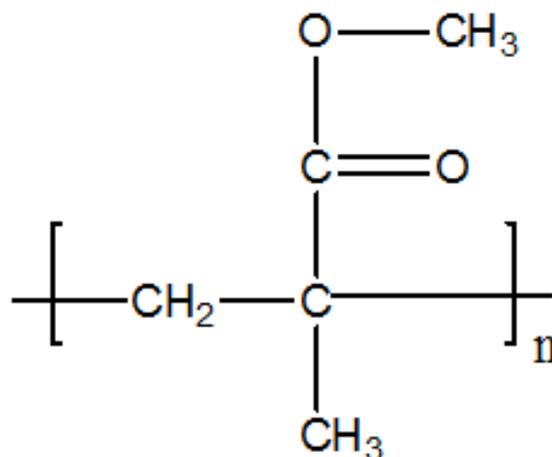


Figure I.10 : Structure chimique de PMMA. [13]

I.7.2 Cycle de vie de poly méthacrylate de méthyle (PMMA) :

I.7.2.1 Elaboration :

Le PMMA peut être réalisée selon trois techniques principales dans l'industrie.

I.7.2.1.1 Polymérisation en masse :

Cette technique implique la polymérisation du monomère de PMMA directement dans un récipient ou le polymère ce forme. Elle consiste à mélanger le PMMA avec un initiateur de polymérisation souvent un peroxyde, l'initiateur se décompose sous l'effet de chaleur formant des radicaux libres qui déclenchent la réaction de polymérisation, la réaction continue jusqu'à ce que les radicaux libres soient consommés ou que les chaînes polymères atteignent une certaine taille. C'est un processus simple qui produit un polymère très transparent et de haute qualité, mais il peut être difficile à contrôler en raison de la chaleur générer pendant la réaction.

I.7.2.1.2 Polymérisation en solution :

Le monomère est dissous dans un solvant organique approprié et un initiateur de polymérisation est ajouté pour commencer la réaction. Ensuite, les monomères réagissent avec les radicaux actifs pour former des chaînes de polymères en croissance, enfin, la réaction est arrêtée en éliminant la source de chaleur ou en ajoutant un agent de terminaison.

I.7.2.1.3 Polymérisation en suspension :

Le monomère est dispersé dans un milieu aqueux contenant des gouttelettes qui sont ensuite polymérisées, cette technique est souvent utilisée pour produire des perles de PMMA qui peuvent être facilement filtrées et séchées.

I.7.2.1.4 Choix de technique

Le choix de technique dépend de l'application spécifique du PMMA et des exigences de production. Cependant, la polymérisation en masse est fréquemment mentionnée comme étant la méthode principalement utilisée pour la production de PMMA, en raison de sa simplicité et de son coût relativement bas.

I.7.3 Mise en forme

- **Injection par moulage :**

Appelé aussi injection plastique, est un procédé de mise en œuvre des thermoplastiques. Elle consiste à injecter sous haute pression dans un moule fermé avec la forme souhaitée.

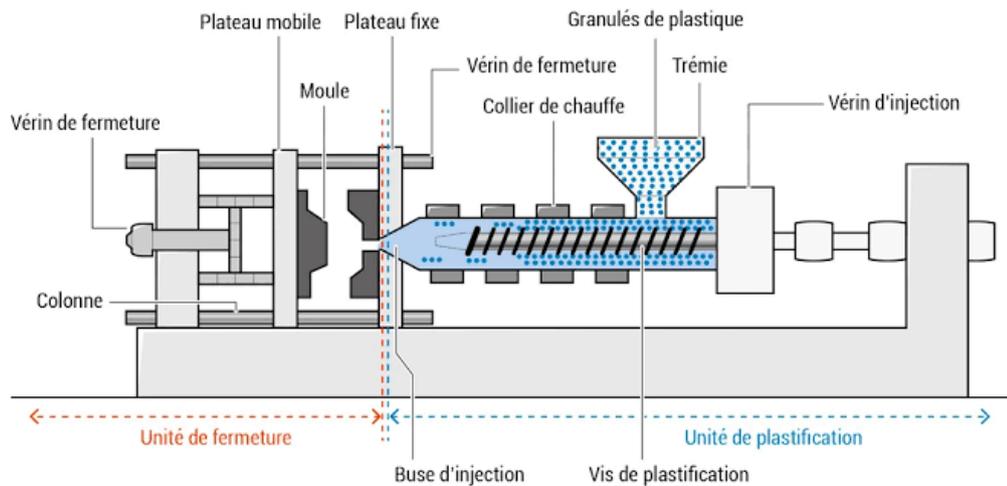


Figure I.11 : Injection par moulage. [14]

- **Extrusion :**

« L'extrusion du PMMA se fait à des températures de 160-220°C à partir de poudre ou granules de hautes masse molaire pour obtenir des plaques extrudées. » [15]

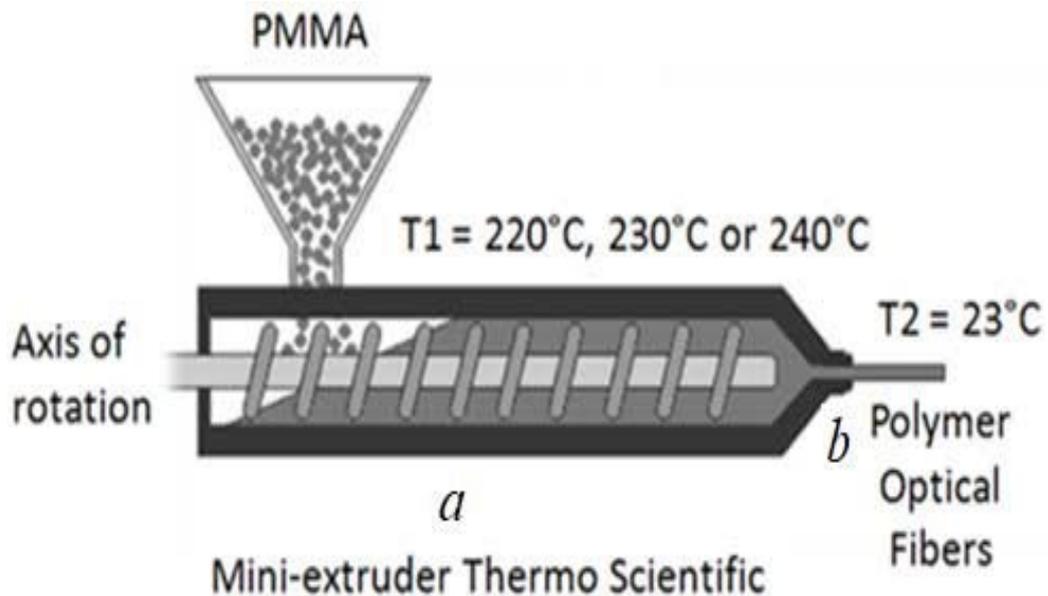


Figure I.12 : Coupe schématique d'une installation d'extrusion. [15]

- **Thermoformage :**

Cette technique implique le chauffage des plaques de PMMA à des températures de 130-160°C pour ensuite le mouler dans la forme désirée. « Il peut s'effectuer dans des étuves à air chaud, à rayonnement infrarouge ou sous vide. » [16]

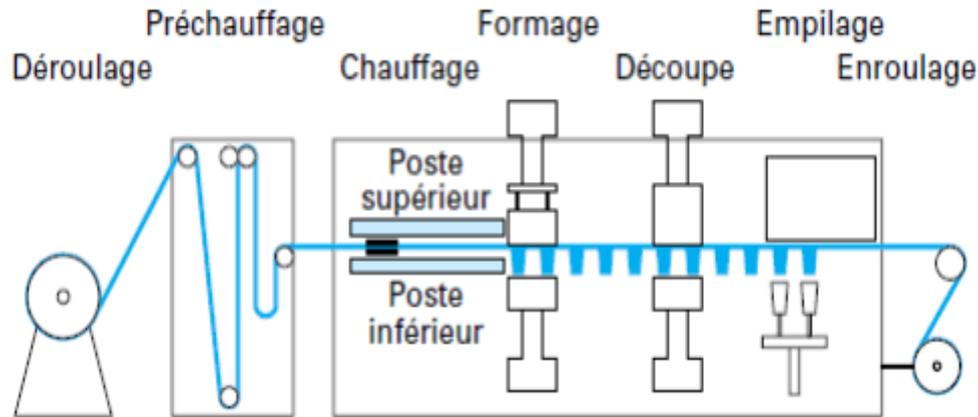


Figure I.13 : Coupe schématique d'une installation de thermoformage. [17]

I.7.4 Propriétés de poly (méthyle méthacrylate) :

Le PMMA est un polymère synthétique qui présente diverses propriétés, en faisant un matériau polyvalent pour de nombreuses applications.

I.7.4.1 Propriétés mécaniques :

Comme dans le cas des autres thermoplastiques, les propriétés mécaniques du PMMA varient en fonction de la température. Ce matériau a la tendance à glisser. Il n'est pas adapté pour fonctionner sous plusieurs charges dynamiques.

Le PMMA a une résistance mécanique élevée, un module de YOUNG élevé et un faible allongement à la rupture. Il ne se brise pas en cas de rupture. Il est l'un des thermoplastiques les plus durs et est également très résistant aux rayures. Il présente une faible capacité d'absorption d'humidité et d'eau, grâce à laquelle les produits fabriqués ont une bonne stabilité dimensionnelle. Ces deux caractéristiques augmentent à mesure que la température augmente, Voir (Tableau I.2).

Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques de PMMA. [18]

Caractéristiques	Valeur
Coefficient de poisson (%)	0.35-0.4
Dureté Rockwell M	63-97
Allongement à la rupture (%)	1-30
Ténacité à la fracture (MPA. \sqrt{m})	1-3.5
Module de l'élasticité en traction(Young) (GPA)	2.2-3.8
Module de cisaillement (MPA)	770-1300
Résistance à la traction (MPA)	47-79
Résistance à la compression (MPA)	100
Résistance au cisaillement (MPA)	20-30

7.4.2 Propriétés physiques et optiques :

Le PMMA présente de très bonnes propriétés optiques, il transmet plus de lumière (jusqu'à 93 % de la lumière visible) que le verre. Combiné avec son bon degré de compatibilité avec les tissus humains, il peut être utilisé pour le remplacement des lentilles intraoculaires ou pour 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 jusqu'à 2800 nm de passer.

Tableau I.3 : Caractéristiques physique et optique de PMMA. [18]

Propriétés	Valeurs
Transmission, visibilité (%)	80-92
Réflexion de la lumière (%)	8
Indice de réfraction	1,49
Brillance (%)	60
Densité (g/cm ³)	1.15-1.19
Absorption d'eau (%)	0.3-2
Point de fusion (°C)	130

7.4.3 Propriétés chimiques :

Le PMMA est insipide (sans goût) et inodore (sans odeur), et peut dans certains cas être reconnu comme approprié pour une utilisation avec des aliments Jusqu'à 60 °C, le PMMA résiste assez bien aux acides organiques et aux minéraux dilués ainsi qu'aux solutions alcalines diluées, mais il est attaqué par les produits courants comme (Acétone, chloroforme, tétrahydrofurane...). Sa résistance à la diminution de la transmission de la lumière due au vieillissement est très bonne. [12]

Tableau I.4 : Caractéristiques chimiques de PMMA. [18] [19]

Propriétés	Valeurs/Performance
Masse molaire(g/mol)	114.14
Solubilité	Insoluble dans la plupart des solvants polaire
Sensibilité au UV	Très résistant jusqu'à 20 ans ou plus
Recyclabilité	Recyclable

7.4.4 Propriétés thermiques :

« Le PMMA est combustible et brûle sans produire une quantité excessive de fumée (UL 94 HB). Sa rétraction lors du moulage est faible (0,4 à 0,7%) comme pour les polymères non cristallisés. Comme son coefficient d'expansion linéaire est très différent de celui des métaux et son élasticité faible, il n'est pas conseillé d'utiliser des inserts métalliques dans une pièce en PMMA injecté. La température de fonctionnement maximale est basse (< 85 °C). Propriétés d'impression et de marquage : le PMMA convient à la fois à la métallisation sous vide et à la sérigraphie. » [12]

Les principales caractéristiques thermiques du PMMA sont présentées dans le tableau en dessous :

Tableau I.5 : Caractéristiques thermiques de PMMA. [18] [19]

Propriétés	Valeurs/Performance
Capacité calorifique spécifique (J/g.°C)	1.46-1.47
Conductivité thermique (W/mK)	0.19-0.24
Température de service maximale (°C)	70
Température de transition vitreuse (°C)	105-135
Température d'auto inflammation (°C)	421-435
Température d'inflammabilité (UL 94)	HB
Température de ramollissement Vicat iso 306 (°C)	105
Chaleur de combustion (MJ/Kg)	27.2
Coefficient de dilatation thermique linéaire (10 ⁻⁶ .k ⁻¹)	70

7.4.5 Propriétés électriques :

Les propriétés électriques peuvent être fortement affectées par l'absorption de l'humidité. Sa résistance aux arcs électriques est excellente. Le PMMA est électrostatique, ce qui peut altérer son apparence (attraction de la poussière). Cet inconvénient peut être corrigé en utilisant des produits antistatiques.

Tableau I.6 : Caractéristiques électriques de PMMA. [18]

Propriétés	Valeurs
Résistivité électrique	10 ¹⁴ -10 ¹⁵
Résistivité de surface	10 ¹⁴ -10 ¹⁶
Constante diélectrique	2.8-4
Résistance diélectrique	17.7-60
Facteur de dissipation	0.03-0.55

I.7.5 Domaine d'utilisation de PMMA :

- ✓ Application dans l'optique et l'éclairage :

Le polymère PMMA est largement utilisé pour fabriquer des lentilles, des écrans et des luminaires. Ses propriétés optiques en font un matériau idéal pour l'optique et l'éclairage.

- ✓ Application en architecture et design :

Le PMMA est apprécié dans l'industrie de la construction pour sa transparence, sa résistance et sa malléabilité. Il est couramment utilisé dans les panneaux, les vitres et les éléments décoratifs.

✓ Application médicale et dentaires :

Dans le domaine médical, le PMMA est utilisé pour fabriquer des prothèses des implants et des dispositifs médicaux, sa biocompatibilité en fait un matériau de choix pour de nombreuses applications médicales.

✓ Application dans l'industrie automobile :

Le PMMA est utilisé pour les phares, les feux arrière et les éléments de design intérieur. Sa légèreté et sa résistance aux chocs en font un matériau prisé dans l'industrie automobile.

I.7.6 Les avantages et les inconvénients de PMMA :

❖ Avantages :

- ✓ Excellente transparence et brillance.
- ✓ Stabilité aux UV et résistance au jaunissement.
- ✓ Facilité de traitement et de mise en forme.
- ✓ Bonne résistance aux intempéries.
- ✓ Recyclable, ce qui favorise la durabilité environnementale.

❖ Inconvénients :

- ✓ Plus sensible aux rayures que certains autres plastiques.
- ✓ Moins flexible que d'autres matériaux.
- ✓ Peut-être altéré par certains solvants.

I.8. Les défauts dans les matériaux cristallins :

I.8.1 Définition :

Le cristal parfait ne se rencontre jamais dans la nature, à cause de l'agitation thermique, les cristaux réels, comprennent toujours un certain nombre de défauts, il existe plusieurs types de défauts qui peuvent se produire dans une structure cristalline qui peut être classés :

I.8.2 Les défauts ponctuels :

Elle se traduit par une perturbation de l'ordre cristallin sur des dimensions limitées à une maille cristallographique typiquement.

On distingue trois types principaux de défauts ponctuels :

- La lacune : caractérise l'absence d'un atome d'un site normal du réseau cristallin(A). [12]

- L'interstitiel : apparaît lorsqu'un atome étranger de petite taille (B) s'insère dans les espaces vides du réseau cristallin. Lorsqu'un atome constitutif du cristal est placé en insertion, on a affaire à un auto-interstitiel (B'). [12]
- L'atome en substitution : résulte du remplacement d'un atome constitutif cristal placé en position régulière par un atome étranger (C, C'). [12]

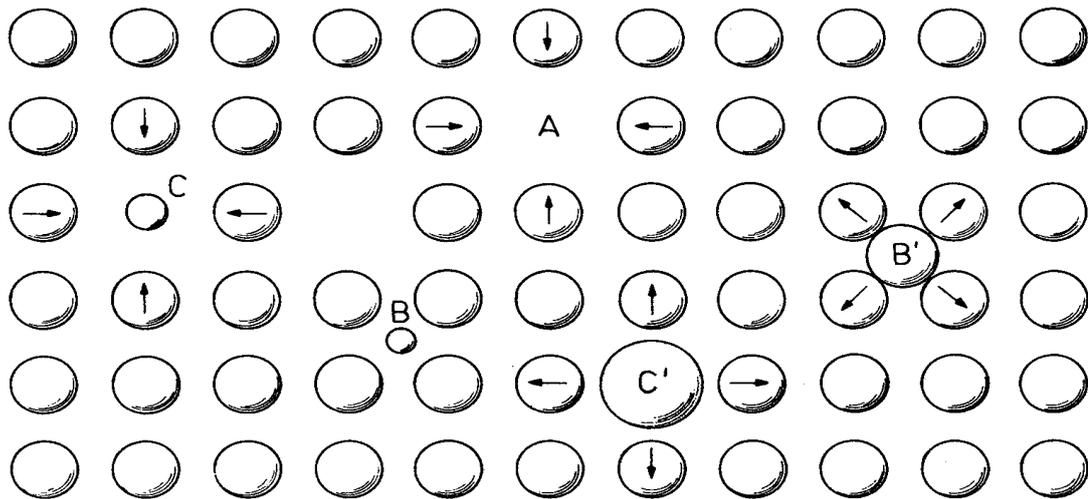


Figure I.14 : Types de défauts ponctuels dans un cristal : (A) lacune ; (B) atome étranger interstitiel ; (B') atome auto-interstitiel ; (C, C') atomes étrangers en substitution. [12]

I.8.3 Défauts linéaires ou dislocation :

« La dislocation est un défaut du cristal qui résulte d'une perturbation de la structure centrée autour d'une ligne (rangée réticulaire). Pour nous aider à percevoir la géométrie de ce défaut, imaginons l'expérience suivante : coupons un cristal à réseau cubique idéal (fig.I.15 (a)) selon un plan ABCD en déplaçant sa partie supérieure d'une distance interatomique. Pour permettre de reformer les liaisons interatomiques, il est nécessaire que le déplacement s'effectue le long du plan de coupe ABCD. Il existe dans ce plan deux directions de déplacement particulières :

- Lorsque le déplacement des atomes est effectué dans une direction perpendiculaire à la ligne AB (fig.I.15(b)), on comprime la partie supérieure du cristal et on observe la formation d'un plan réticulaire, ABEF qui se termine à l'intérieur du cristal le long de la ligne de dislocation (ligne AB). Ce plan d'atomes supplémentaires s'enfonce donc comme un coin dans le cristal, d'où le nom dislocation-coin donne à ce type de défaut. A l'extérieur du cristal, on observe la formation d'une marche CC' DD' dont la largeur caractérise le déplacement des atomes le long du plan de coupe.
- Si le déplacement des atomes se fait parallèlement à la ligne de dislocation AB (fig.I.15 (c)), on induit une torsion hélicoïdale du cristal qui a la ligne AB comme axe. Ce défaut linéaire

est appelé dislocation-vis. Les signes extérieurs du glissement des atomes sont les marches ADD' et BCC'.

- Tout autre déplacement dans le plan ABCD formant un angle quelconque avec la ligne AB produit une dislocation mixte, c'est-à-dire une dislocation ayant en même temps une composante-vis et une composante-coin. » [12]

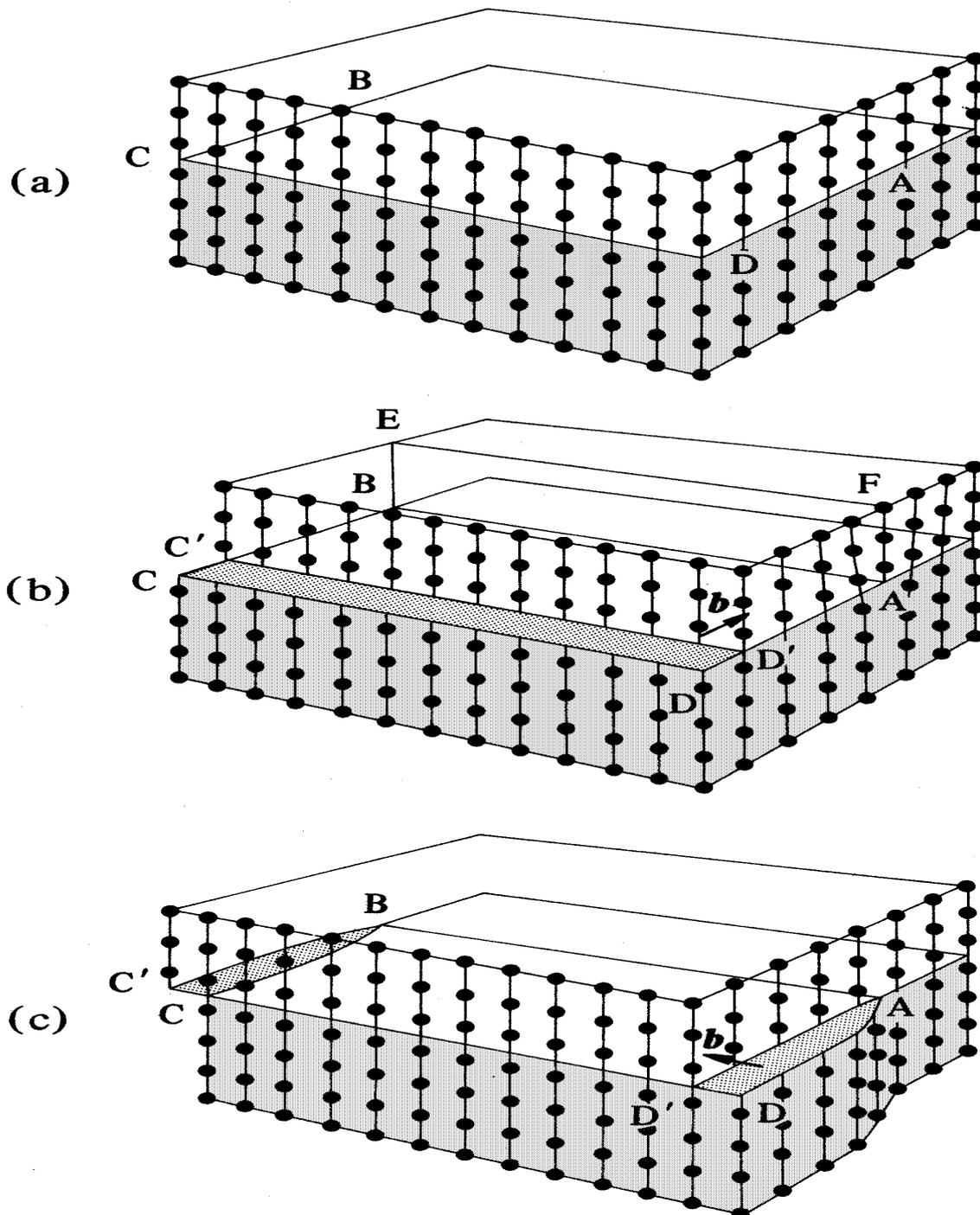


Figure I.15 : Géométrie des dislocations dans un cristal à réseau cubique : (a) réseau sans défaut; (b) dislocation-coin; (c) dislocation-vis. Pour les deux types de dislocations on a indiqué le vecteur qui caractérise le déplacement des atomes du réseau cristallin, appelé vecteur de Burgers b . [12]

I.8.4 Défauts planaires :

« Un défaut planaire correspond à une région perturbée du cristal dont le volume est comparable à celui d'un plan d'atomes. Des exemples de défauts planaires sont les surfaces libres qui limitent un échantillon cristallin réel ou les joints de grains, surfaces frontières entre les cristallites constituant les échantillons polycristallins (Fig.I.16). Les défauts d'empilement sont également courants dans les structures compactes formées par les métaux ». [12]

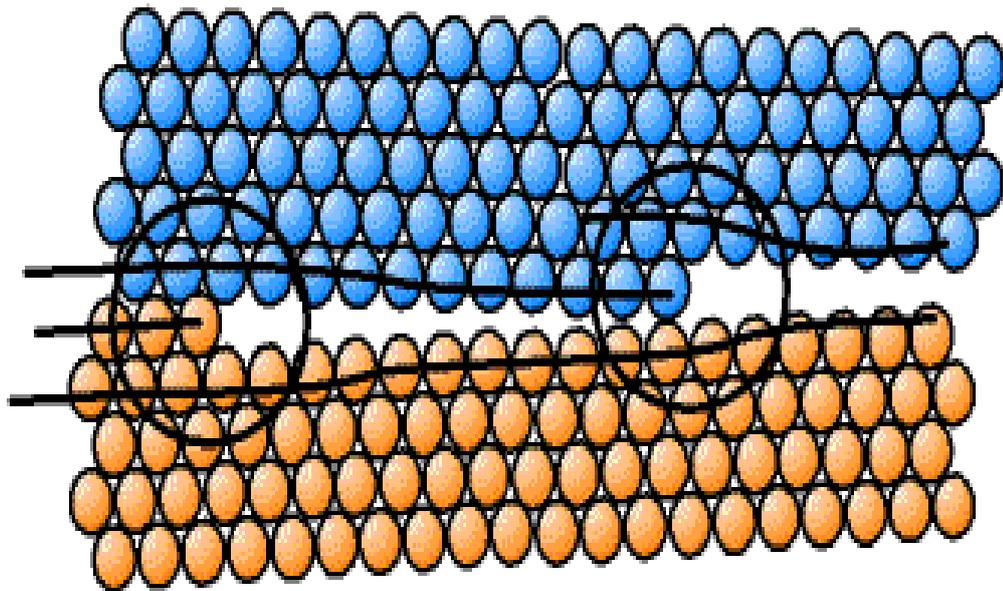


Figure I.16 : Arrangement des atomes au niveau d'un joint de grain dans un échantillon polycristallin. [8]

I.8.5 Défauts volumiques :

Ce sont des défauts qui occupent un volume, formé par l'inclusion d'une phase cristalline au sein d'une autre.

- **Les pores** : ce sont des défauts de volume où des espaces vides se forment à l'intérieur du matériau, Les polymères peuvent contenir des pores qui se forment pendant le processus de polymérisation ou sous l'effet de contraintes mécaniques. Les bulles d'air piégées dans la résine liquide pendant la fabrication peuvent rester piégées dans le matériau polymère solide résultant, formant ainsi des pores.
- ✓ Les pores peuvent affaiblir le matériau en réduisant sa densité et en créant des zones de concentration de contraintes. Cela peut entraîner une diminution de la résistance mécanique. « Une étude réalisée par la méthode des éléments finis tridimensionnels (EF) pour analyser la distribution des contraintes autour des microcavités dans le manteau de ciment de l'arthroplastie totale de la hanche (THA). Charge statique et dynamique ont été analysées l'effet de la position du microdéfaut sur la distribution des contraintes est également mis en

évidence. Les résultats obtenus montrent que la microcavité située dans la zone proximale de la prothèse est soumise à champ de contrainte plus élevé. La charge statique génère des contraintes plus élevées que dynamique si la microcavité est située dans les zones proximale et distale de la prothèse. Le cas inverse est observé lorsque la microcavité est situé dans la zone médiane. » [20]

- ✓ Dans certains cas, les pores peuvent également affecter les propriétés optiques en piégeant la lumière et provoquant une diffusion.

- **Durcissement structural :**

En raison de leur présence dans la structure cristalline, les défauts volumiques peuvent agir comme des obstacles aux dislocation, qui sont des défauts linéaires responsables de la déformation plastique dans les matériaux ductiles.

Lorsqu'une dislocation rencontre un défaut volumique, elle peut être arrêtée déviée de sa trajectoire, ce qui augmente la résistance du matériau à la déformation plastique. Ce phénomène est connu sous le nom « durcissement structural » et entraîne généralement une élévation de la limite élastique du matériau, ce qui le rend plus résistant à la déformation.

- **Les précipités :** sont des particules de seconde phase qui sont formés par combinaison entre les atomes du métal et les atomes des éléments d'alliage.

I.8.5.1 Effet des défauts volumiques :

« Les défauts volumiques n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques, en particulier module de YOUNG, que le reste du matériau. Il s'ensuit des concentrations de contrainte et donc un amorçage de rupture possible. » [9]

Ils n'ont pas non plus les mêmes propriétés chimiques. Il peut donc se produire des piles de corrosion localisée, produisant de la piquant.

I.8.6 Impact des défauts sur les matériaux polymères :

- ❖ Affaiblissement de la résistance mécanique : Les défauts tels que les fissures, les inclusions ou les imperfections de structure peuvent entraîner une réduction de la résistance mécanique du polymère, ce qui peut compromettre sa capacité à supporter des charges ou des contraintes.
- ❖ Augmentation de la fragilité : Certains défauts, comme les microfissures ou les zones de concentration de contrainte, peuvent augmenter la fragilité du polymère, le rendant plus susceptible de se fissurer ou de se casser sous contrainte.

- ❖ Altération des propriétés optiques : Les défauts tels que les bulles d'air ou les impuretés peuvent altérer les propriétés optiques du polymère, comme sa transparence ou sa clarté, ce qui peut réduire sa valeur esthétique ou sa fonctionnalité dans certaines applications.

- ❖ Dégradation chimique accrue : Certains défauts peuvent agir comme des sites préférentiels pour la dégradation chimique du polymère, accélérant ainsi sa détérioration au fil du temps et réduisant sa durée de vie utile.

- ❖ Impact sur les propriétés thermiques : Les défauts peuvent également influencer les propriétés thermiques du polymère, affectant sa conductivité thermique, sa résistance aux températures élevées ou sa stabilité dimensionnelle.

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait une synthèse bibliographique associée aux généralités sur les polymères en générale et en particulier sur le polyméthyle méthacrylate (PMMA). Ainsi, nous avons examiné les différents défauts susceptibles de se former dans les matériaux polymères, comprenant l'impact potentiel de ces défauts sur les caractéristiques des matériaux polymères.

Chapitre II :

Modélisation d'un défaut dans une plaque en PMMA

Chapitre II : Modélisation d'un défaut dans une plaque en PMMA

II.1 Introduction :

Notre démarche méthodologique s'articule en plusieurs étapes. Dans un premier temps, nous sélectionnons un produit possédant les propriétés du PMMA, en mettant particulièrement en avant deux de ses caractéristiques principales : le module de Young et le coefficient de Poisson. Ensuite, nous entamons la phase de modélisation informatique où nous développons deux modèles distincts : le premier modèle représente la structure sans aucun défaut, tandis que le second intègre un défaut elliptique. Nous procédons ensuite à une simulation afin d'évaluer l'incidence de ce défaut sur la plaque, en utilisant le logiciel ABAQUS.

II.2 Produit ALTUGLAS™ :

ALTUGLAS™ est la marque déposée de Trinseo pour ses produits à base de PMMA, elle est disponible sous nombreuse formes :

- ✓ Plaques coulées et extrudées
- ✓ Plaque pour le marché du sanitaire
- ✓ Résines
- ✓ Adhésifs et produits auxiliaires

Les plaques fabriquées par Trinseo sont conformes aux normes suivantes :

- ✓ ALTUGLAS™ CN : ISO 7823.1-2003
- ✓ ALTUGLAS™ EX : ISO 7823.2-2003

II.2.1 Propriétés générales d'ALTUGLAS™ :

ALTUGLAS™ est un matériau thermoplastique transparent et rigide, par nature incolore et d'une limpidité exceptionnelle, il peut être teinté dans une très large palette de couleur.

Inerte face à de nombreux agent chimique agressifs, il est le matériau plastique d'extérieur de référence.

Les plaques ALTUGLAS™ s'usinent et se mettent en forme selon des procédés très variés : industriel, artisanaux ou artistiques.

II.3 Présentation de logiciel ABAQUS :

ABAQUS est un logiciel de calcul en élément finis développé par DASSAULT. Il est composé de trois produits principaux :

- ABAQUS/Standard : c'est un solveur généraliste qui utilise un schéma d'intégration implicite. Il est conçu pour des analyses statiques, dynamique et thermique.
- ABAQUS/Explicit : ce solveur emploie un schéma d'intégration explicite. Idéal pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires.

Chapitre II : Modélisation d'un défaut dans une plaque en PMMA

- ABAQUS/CAE : il s'agit d'une interface de modélisation et de visualisation intégrée pour les solveurs mentionnés ci-dessus.

La gamme de logiciel ABAQUS est particulièrement réputés pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondial dans tous le secteur industriel.

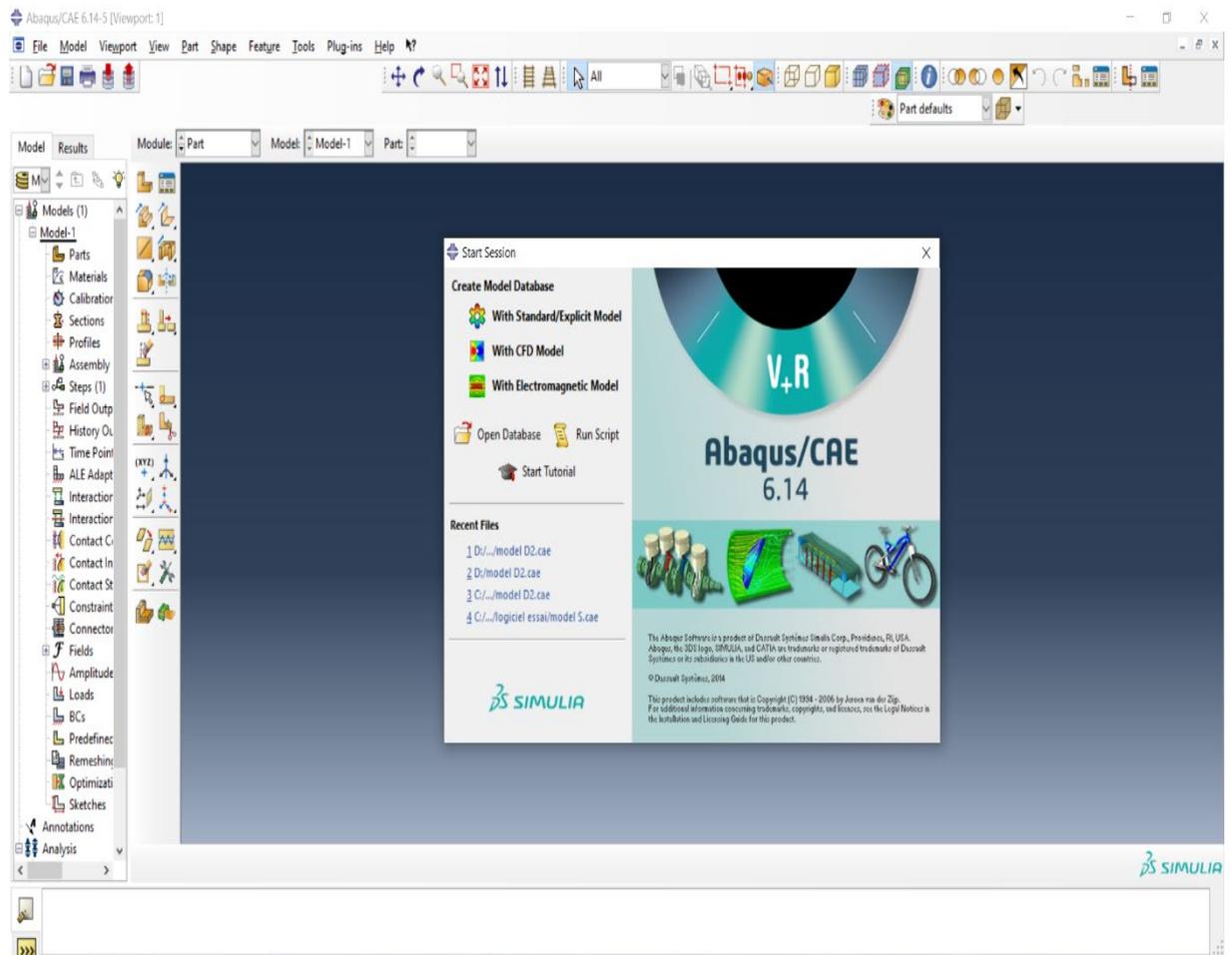


Figure II.1 : Interface de logiciel Abaqus 6.14.

Abaqus couvre presque tous les domaines de la physique et tous les types de problème.

II.3.1 Domaines physiques :

- Mécanique
- Thermique
- Electrique
- Problèmes couplés

Chapitre II : Modélisation d'un défaut dans une plaque en PMMA

II.3.2 Problèmes :

- Statique et dynamique
- Linéaires et non linéaires
- ABAQUS offre un très large choix d'éléments (plus de 100) avec la possibilité de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/standard).

II.3.3 Les unités :

Avant de commencer de définir n'importe quel modèle sous ABAQUS, on doit décider un système d'unités on emploie. ABAQUS n'a aucun système d'unités intégré. Toutes les données doivent être spécifiées dans un système d'unités conforme.

II.3.4 Utilisation :

- ✓ Industrie automobile et aéronautique :

Abaqus est largement utilisé pour concevoir et tester des composant dans les secteurs automobile et aéronautique, ou la sécurité et la performance sont critique.

- ✓ Génie civil et construction :

Les ingénieurs utilisent Abaqus pour analyser la résistance des structures telles que les ponts, les bâtiments et les barrages.

- ✓ Recherche et éducation :

En raison de sa flexibilité et de sa puissance, Abaqus est également un outil populaire dans les milieux universitaires pour l'enseignement et la recherche en ingénierie. De plus, Abaqus est souvent intégré dans les programmes d'études pour préparer les futurs ingénieurs à relever les défis techniques de demain.

II.4 Définition des deux modèles :

La description des modèles est comme suit :

4.1 Modèle N° 1 (sans défaut) :

II.4.1.1 Dimension :

On a défini les dimensions de la plaque :

Longueur=40 mm, Largeur=20 mm, épaisseur=1 mm

Chapitre II : Modélisation d'un défaut dans une plaque en PMMA

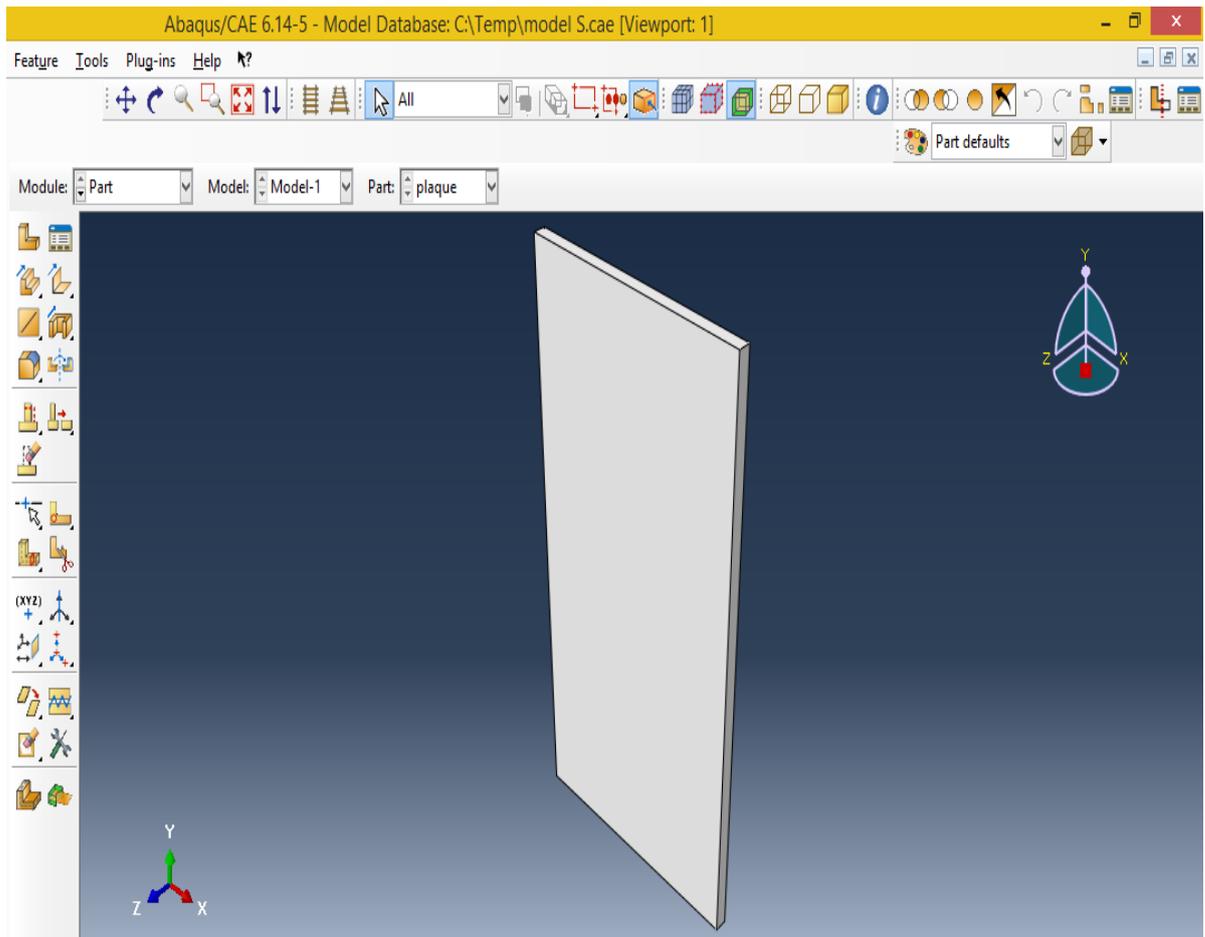


Figure II.2 : Plaque en PMMA.

II.4.1.2 Propriétés mécaniques principales du matériau :

On donne les caractéristiques mécaniques suivantes selon **la fiche technique** de ce produit :

Module d'élasticité : 3300 MPA

Coefficient de poisson à 20°C : 0.39

II.4.1.3 Chargement et Condition aux limites :

Pour les conditions aux limites nous avons appliqués une pression de **90 MPA** sur les deux surfaces supérieures de la plaque, ainsi qu'une pression uniforme de 90 MPA sur la surface inférieure. Cela signifie que chaque point de cette surface est soumis à la même force par unité de surface. En maintenant cette pression uniforme, nous pouvons observer et mesurer la déformation, la résistance et d'autres propriétés mécaniques. Ce qui nous aide à comprendre comment le matériau se comporte sous charges spécifiques.

Chapitre II : Modélisation d'un défaut dans une plaque en PMMA

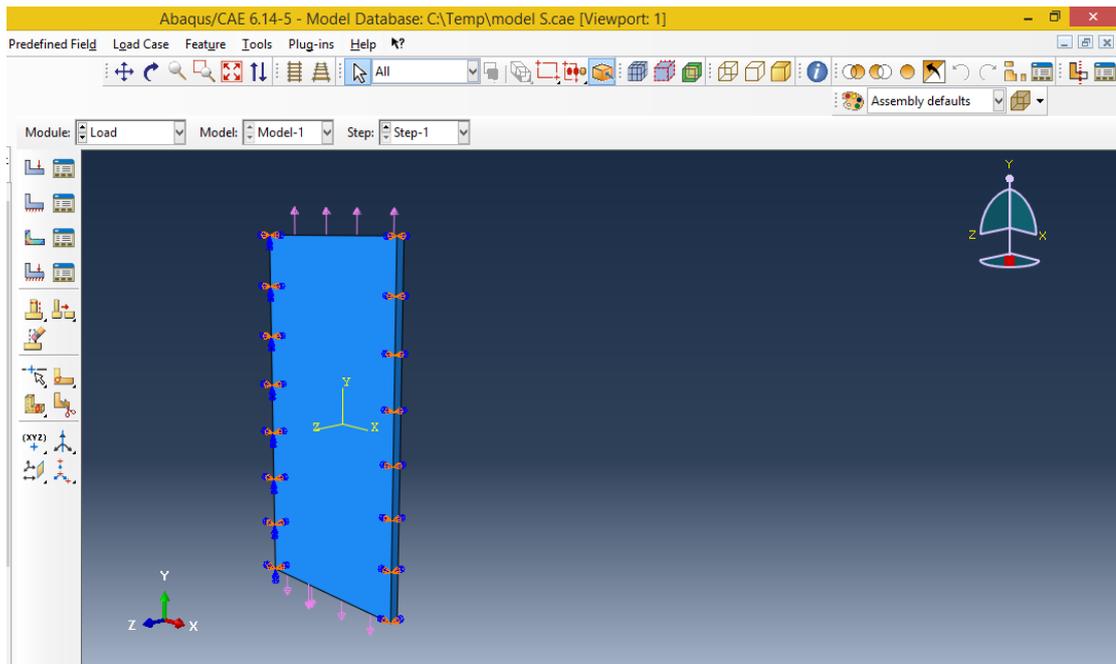


Figure II.3 : Chargements et conditions aux limites.

II.4.1.4 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.

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 notre modèle on a adopté un **maillage triangulaire** avec un **espacement entre les nœuds de 0.5mm**.

Chapitre II : Modélisation d'un défaut dans une plaque en PMMA

➤ Maillage triangulaire :

Est une technique utilisée en modélisation numérique pour subdiviser une surface ou un volume en petits éléments de forme triangulaire. Ces triangles sont utilisés pour représenter approximativement la géométrie de l'objet et pour effectuer des calculs numériques tels que l'analyse par éléments finis (FEM).

L'intérêt de choix de ce type de maillage par rapport à d'autre type de maillage tels que les maillages quadrangulaires, est la facilité d'adaptation à des contours irréguliers et à des formes complexes, ce qui est nécessaires pour modéliser des géométries réelles avec précision.

➤ Espacements entre les nœuds :

L'espacement entre les nœuds ou la distance entre les sommets des triangles est défini dans notre cas est de 0.5 mm. Cela signifie que les sommets des triangles adjacents sont espacés de 0.5 mm. Les uns des autres, créant ainsi un maillage très fin et détaillé.

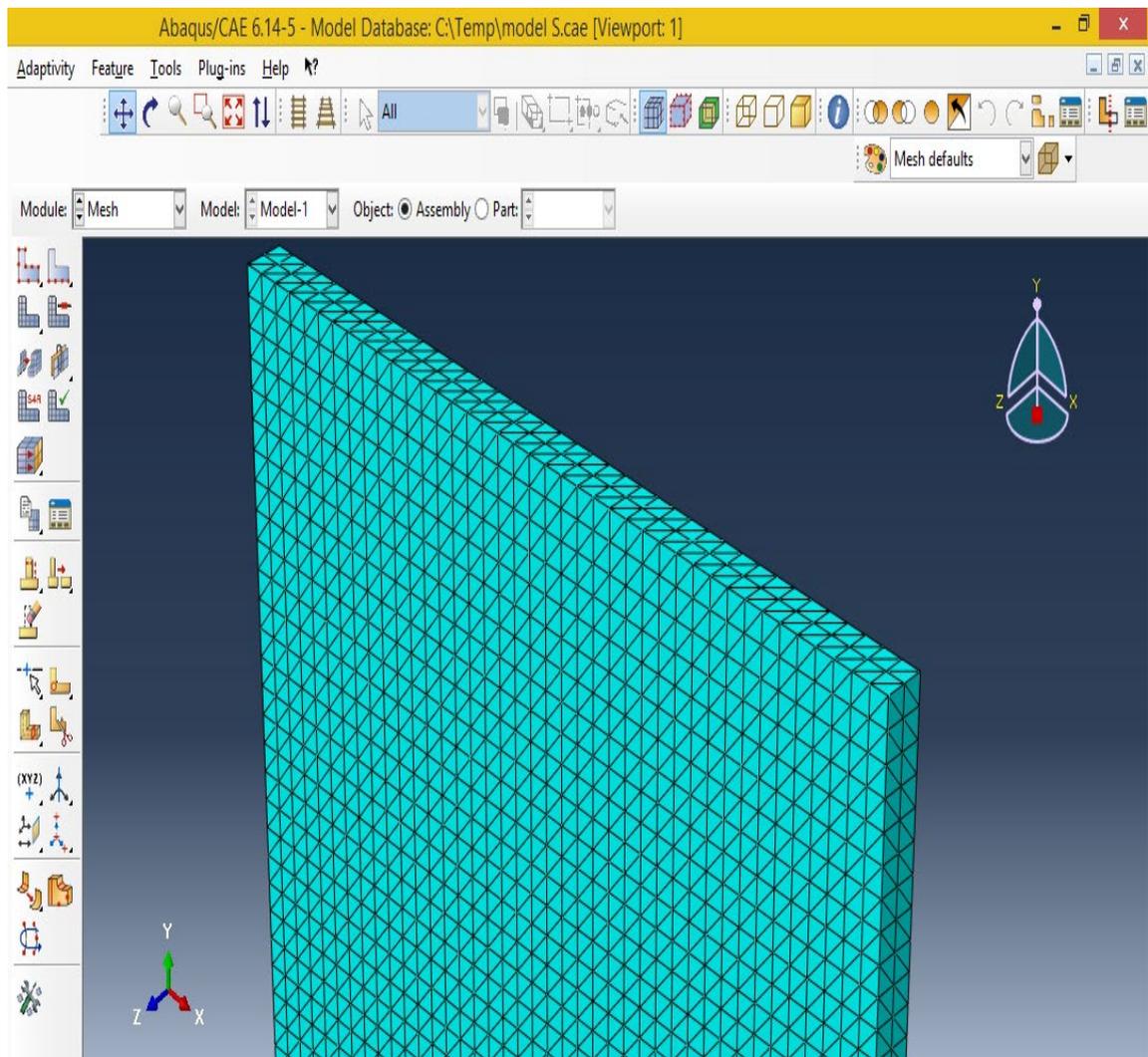


Figure II.4: Adoption d'un maillage de la plaque.

Chapitre II : Modélisation d'un défaut dans une plaque en PMMA

II.4.2 Description du modèle 2 (avec défaut) :

Nous conservons les mêmes dimensions, chargements, caractéristiques du modèle 1, et nous modifions le maillage autour de défaut qui sera à 0.35 mm.

II.4.2.1 Présentation du défaut :

Dans ce modèle on va introduit un petit défaut elliptique(vide) au centre de la plaque dont ont défini ses dimension $R= 0.5$ mm, $r = 0.25$ mm.

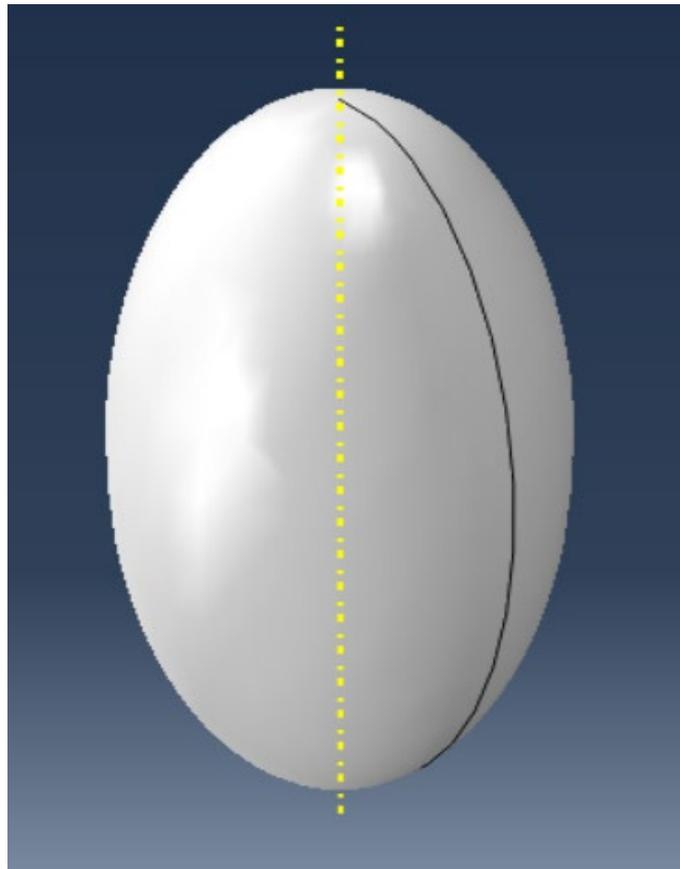


Figure II.5 : Défaut elliptique.

II.5. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter en détail nos deux modèles ainsi que les caractéristiques requises telles que les dimensions et les charges, Cette description approfondie constitue une base solide pour mener à bien notre simulation.

Chapitre III :

Résultats et Discussion

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va calculer les contraintes normales, de cisaillement et équivalentes autour de microvide situés dans le centre de la plaque sous charge statique, cette étude a effectué une localisation différente de la distribution et de microvide.

III.2 Résultats et Discussion :

III.1.1 Distribution de la Contrainte équivalente (Von Mises) dans la plaque sans défaut :

Nous avons étudié la distribution et l'intensité de la contrainte équivalente dans la plaque sans défaut. Le résultat obtenu est représenté dans la (figure III.1). La valeur de la contrainte est la même dans toute de la plaque (32.3 MPa).

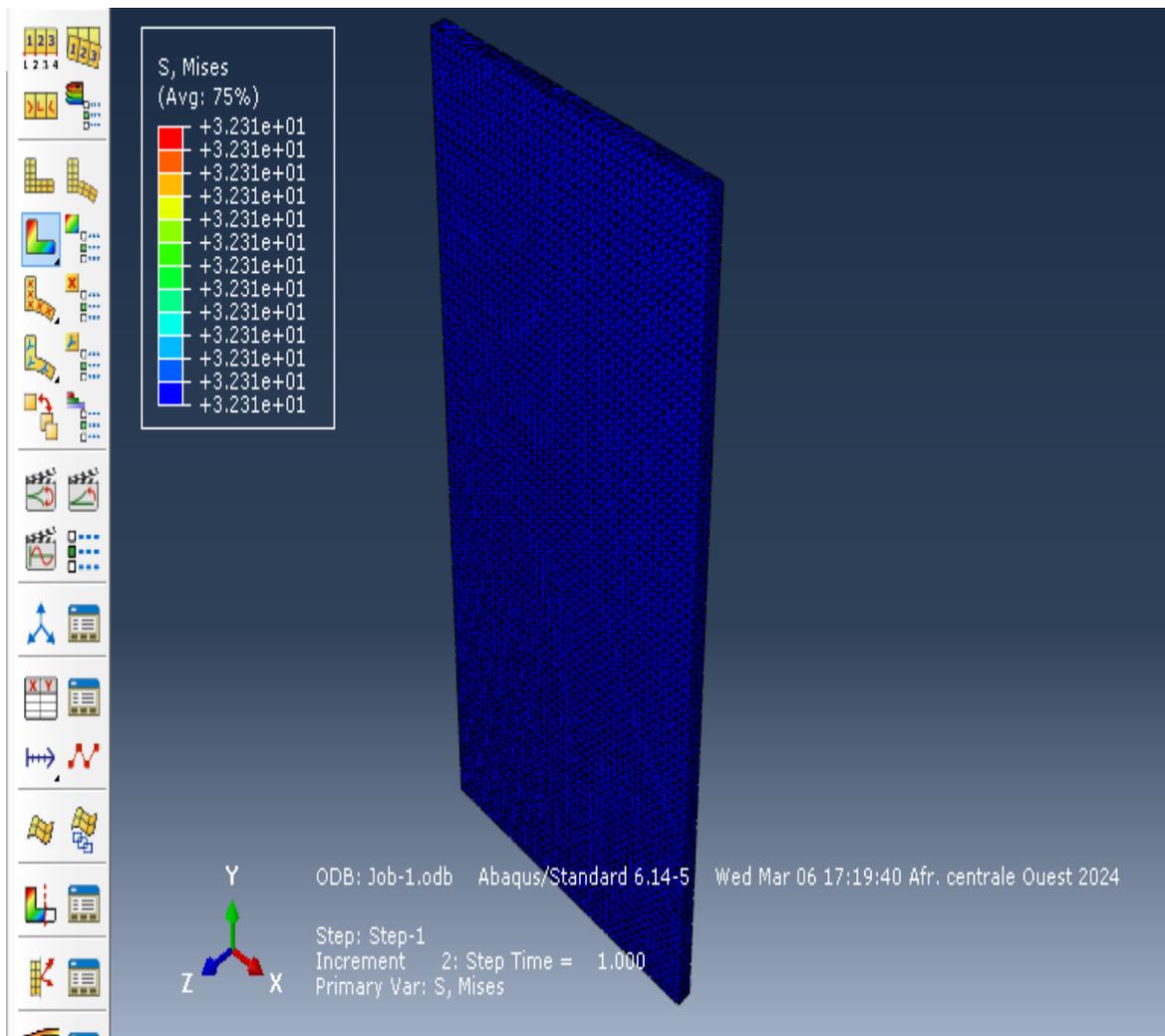


Figure III.1: Répartition de la contrainte de Von Mises dans la plaque sans défaut.

III.2.2 Distribution de la Contrainte équivalente (Von Mises) dans la plaque avec défaut :

Ensuite, nous avons étudié la distribution et l'intensité de la contrainte équivalente dans la plaque avec défaut. Le résultat obtenu est représenté dans la (figure III.2). La distribution n'est plus uniforme dans toute la plaque, elle se concentre autour de la microcavité comme le montre la (figure III.2). La majorité de la plaque est soumise à des contraintes de l'ordre de 60 MPa, mais au voisinage du micro défaut, la valeur maximale est de 94.54 MPa, tandis que la valeur minimale est de 17.38 MPa.

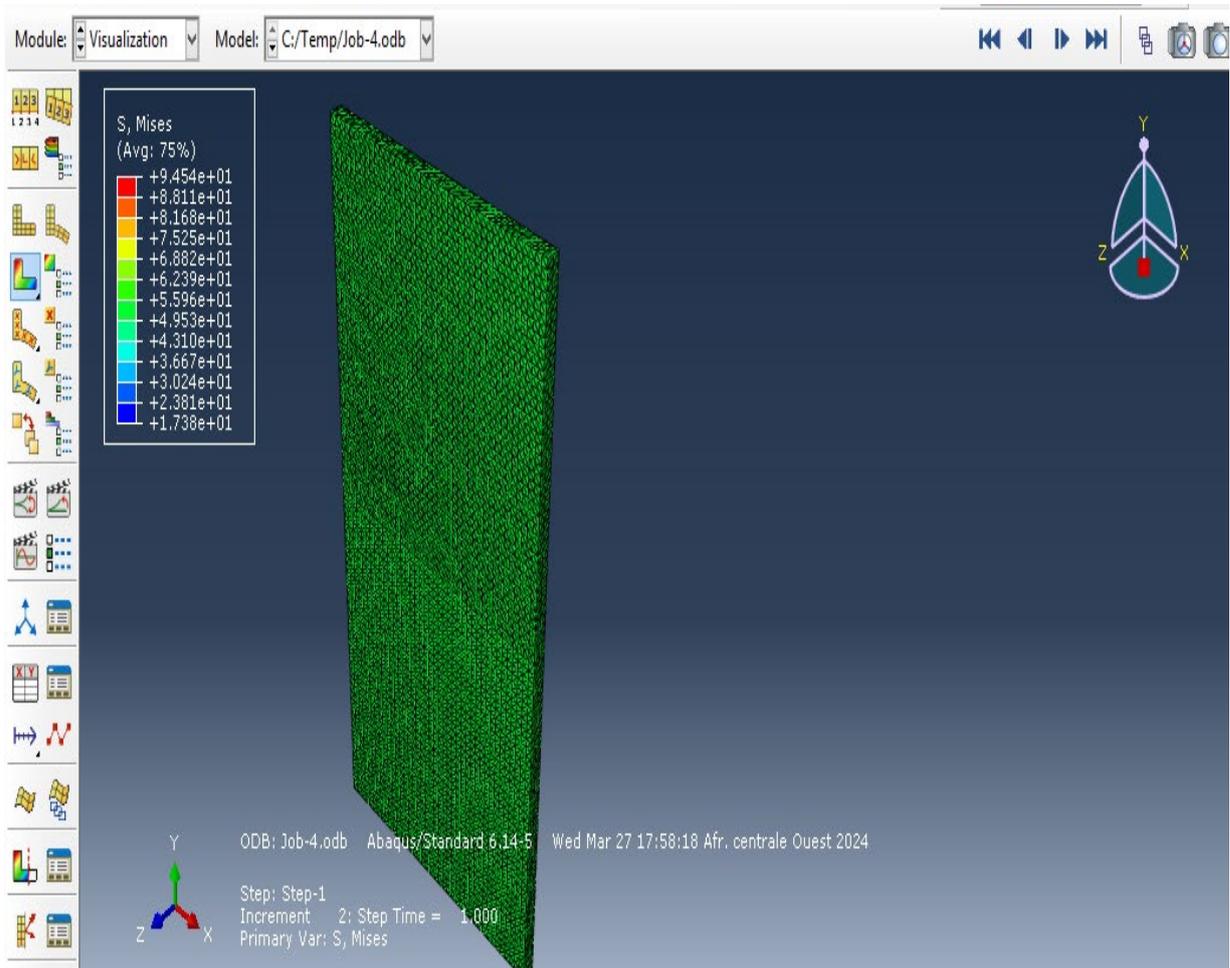


Figure III.2: Répartition de la contrainte de Von Mises dans la plaque avec défaut.

Les contraintes maximales de Von Mises sont situées autour du microvide moyen (**Figure III.3**). Les amplitudes les plus élevées sont beaucoup plus élevées que la contrainte de traction ultime de 75 MPa.

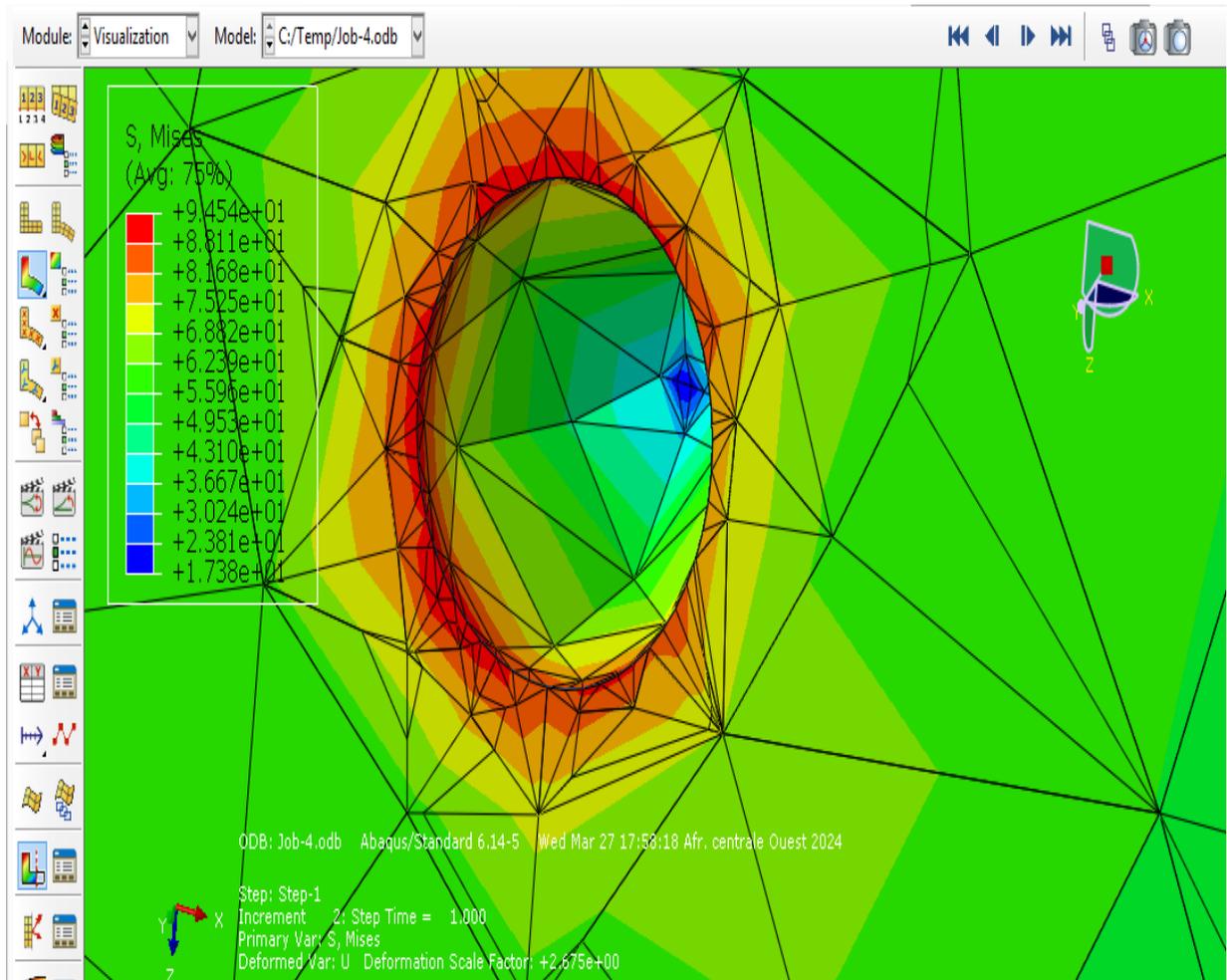


Figure III.3: Répartition de la contrainte de Von Mises autour le défaut.

- ❖ Dans la partie suivante, on va étudier l'influence de l'intensité et de la distribution des contraintes normales, tangentielle et équivalentes induites dans le ciment osseux (la contrainte normale $\sigma\sigma_{zz}$ et la contrainte tangentielle ou cisailée $\tau\tau_{xz}$ sont représentées respectivement par $\sigma\sigma_{zz}$ et $\tau\tau_{xz}$) générer à partir de la distribution de microvide localisée dans le site de forte concentration de contraintes. Où l'axe (ox) est l'axe latéral, le deuxième axe est (oy), et il est le frontal et l'axe (oz) est le vertical et il est le troisième axe.

III.2.3 Distribution des contraintes normales :

La distribution des contraintes normales dans la plaque est non uniforme. Les contraintes normales sont les plus élevées dans la zone du défaut et diminuent progressivement vers les bords de la plaque.

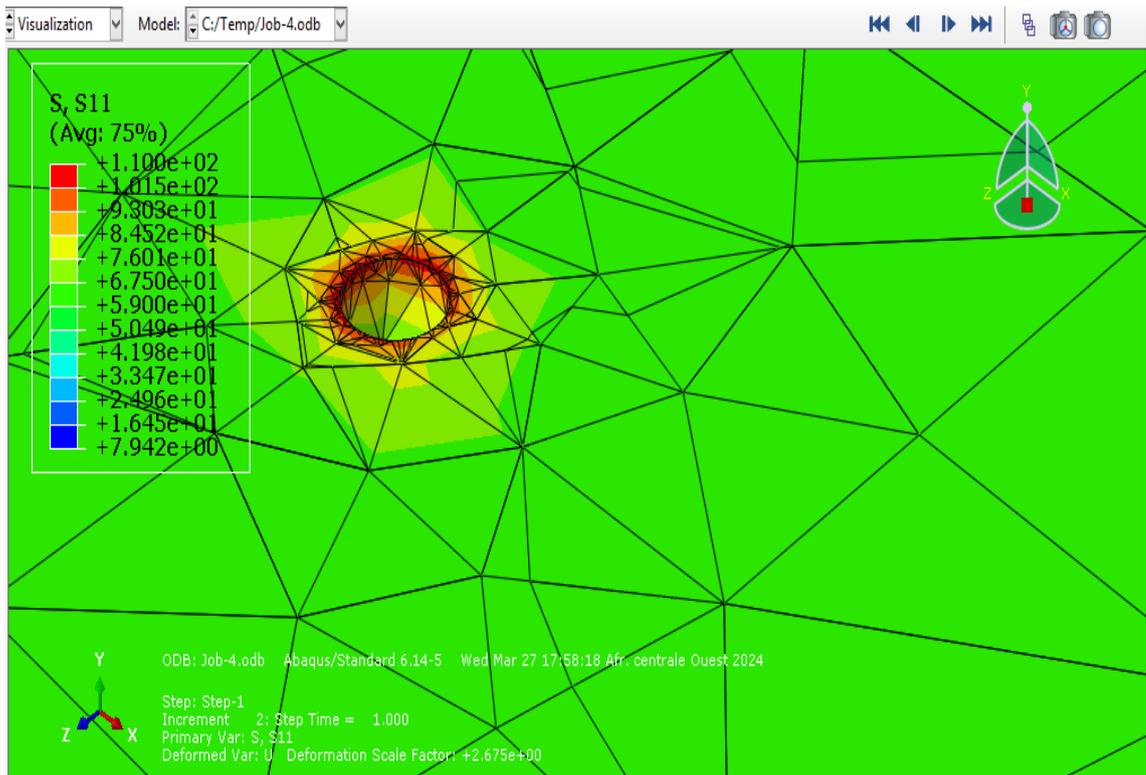


Figure III.4: Contrainte normale dans la direction 1.

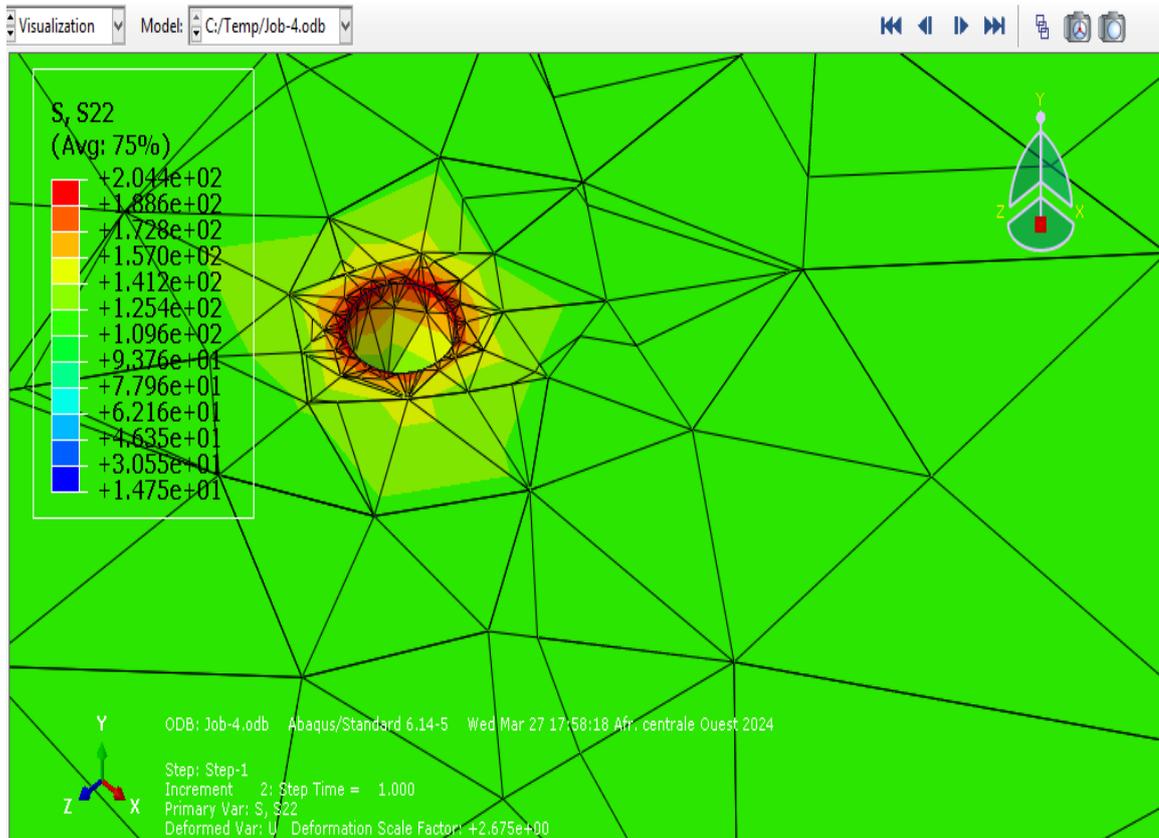


Figure III.5: Contrainte normale dans la direction 2.

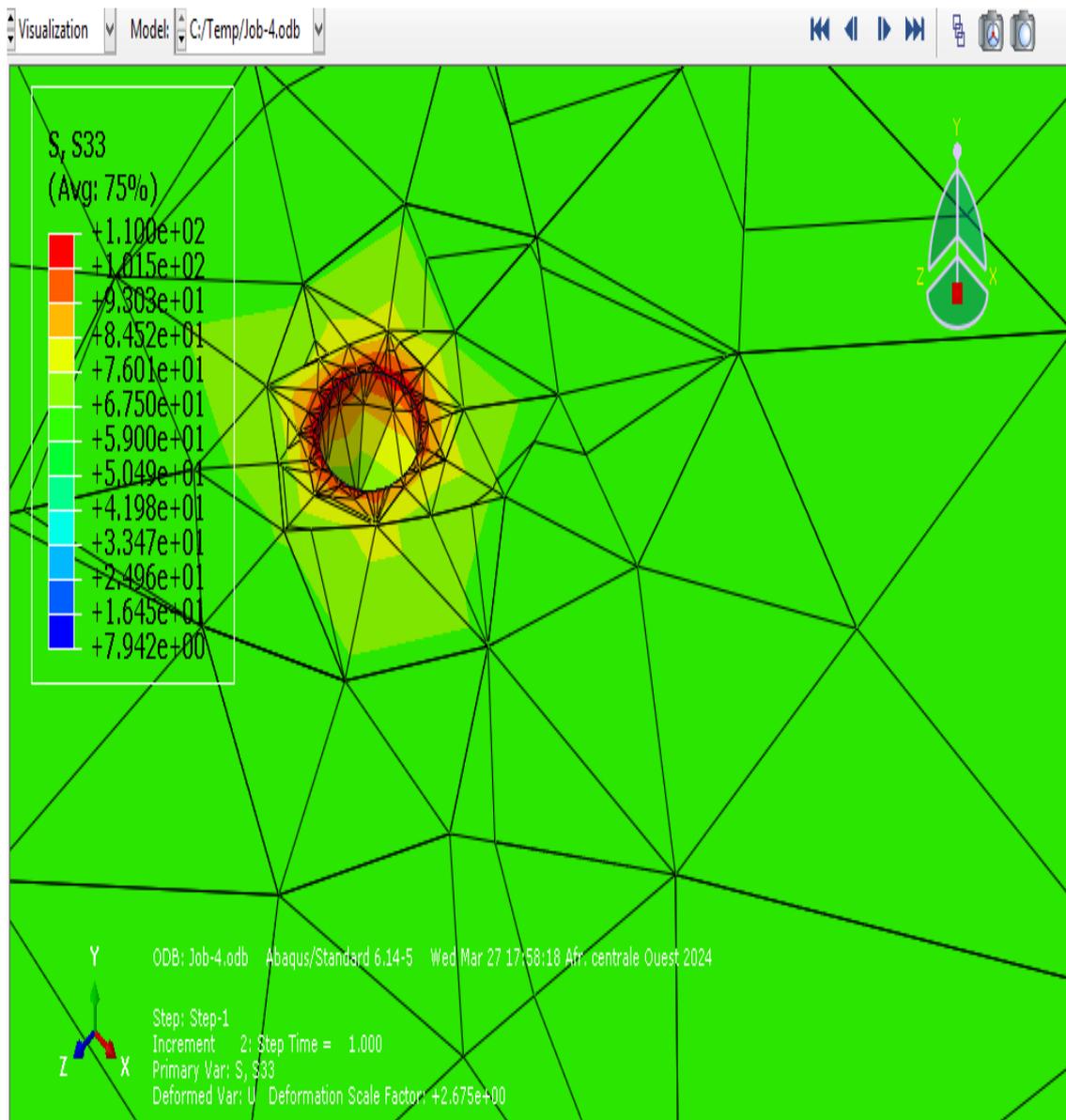


Figure III.6: Contrainte normale dans la direction 3.

III.2.4 Distribution des contraintes de cisaillement :

La répartition des contraintes de cisaillement n'est pas uniforme, les contraintes les plus élevées sont concentrées près du bord du défaut et diminuent progressivement en s'éloignant du défaut. En effet le défaut crée une forte concentration de contraintes.

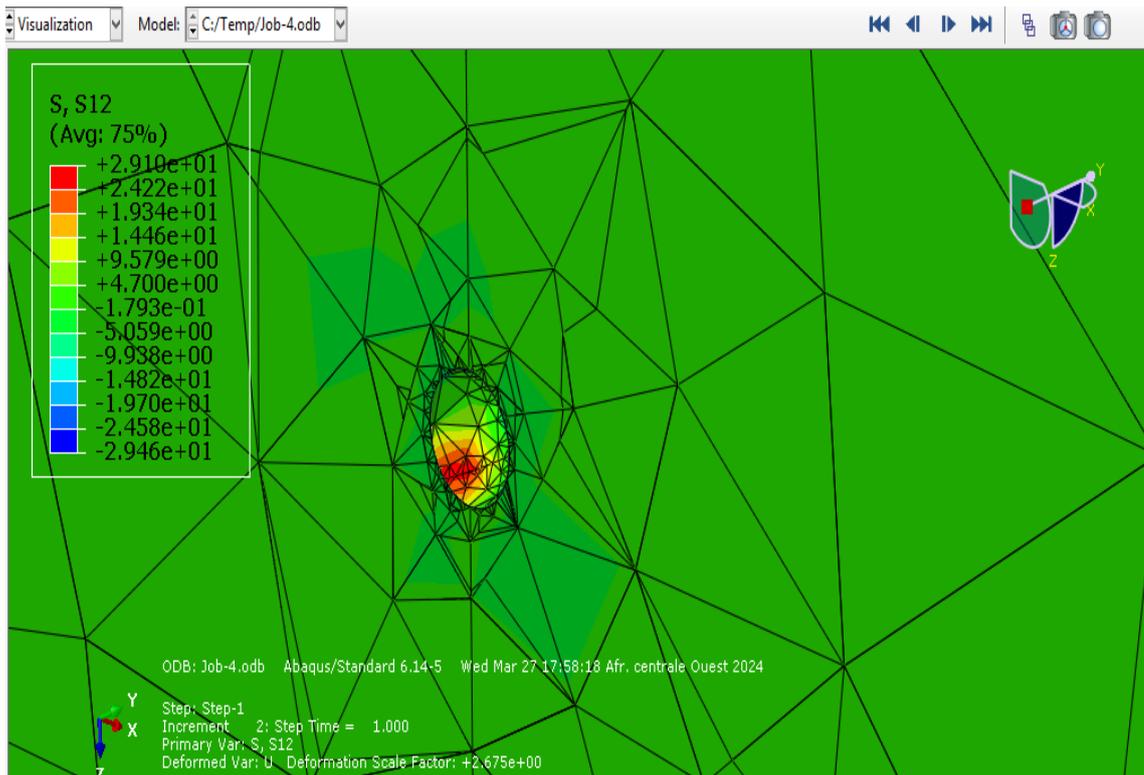


Figure III.7: Contrainte de cisaillement dans le plan (1,2).

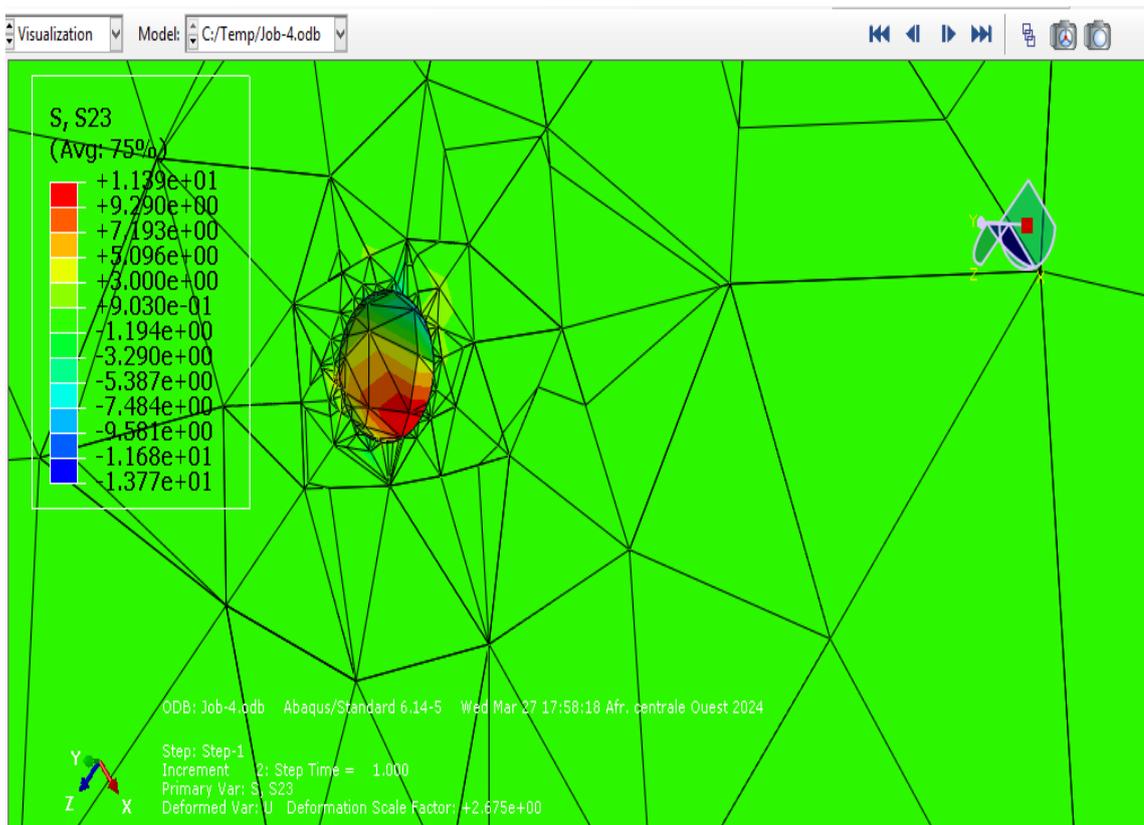


Figure III.8: Contrainte de cisaillement dans le plan (2,3).

Après avoir analysé la contrainte équivalente nous avons comparé les contraintes normales et de cisaillement dans les deux plaques (sans et avec défaut). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.1: les valeurs des contraintes normales et de cisaillements obtenus de deux plaques.

	Plaques Plan	Sans défaut	Avec défaut
Contrainte normale	S (11)	37	110
	S (22)	70	204
	S (33)	37	110
Contrainte de cisaillement	S (12)	1	29
	S (13)	0	0
	S (23)	1	11

On remarque que pour la plaque sans défaut, l'intensité de la contrainte équivalente et normale ne pose pas un risque de fracture, car la plaque en PMMA a une résistance à la traction égale à 75 MPa. De plus, les contraintes de cisaillement sont très faibles et ne dépassent pas la résistance au cisaillement (25 MPa). Cependant, lorsqu'un micro défaut est introduit, ces contraintes dépassent largement les résistances à la traction et au cisaillement.

III.4 Conclusion :

Les résultats de la simulation de notre modèle, nous permis de tiré les conclusions suivantes :

- La présence du défaut elliptique conduit à une concentration significative des contraintes autour de la microcavité. Cela confirme que les défauts microstructuraux, même de petite taille comme une microcavité, peuvent agir comme des points de concentration de contraintes.
- Les contraintes maximales observées près du défaut (94.54 MPa) dépassent considérablement la contrainte initiale uniforme de 32.3 MPa dans la plaque sans défaut, ce qui souligne le risque accru de fissuration et de rupture à cet endroit.
- La variation des contraintes à travers la plaque avec défaut (de 17.38 MPa à 94.54 MPa) indique une complexité dans le comportement mécanique du matériau, avec des zones de contraintes élevées et d'autres de contraintes relativement basses.
- La présence de microcavité dans la plaque, augmente significativement les contraintes dans cette plaque, et ces contraintes sont concentrées autour de la microcavité. Cette augmentation est pour différentes formes de contrainte, (traction et cisaillement).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, Notre étude sur la distribution des contraintes autour d'un défaut dans un polymère PMMA a permis d'approfondir notre compréhension du comportement mécanique des pièces avec défaut, nous avons analysé la distribution des contraintes dans une plaque avec défaut sous chargement, afin de mieux évaluer son état après sollicitation.

La plaque doit résister aux contraintes mécaniques exercées sur elle qui peuvent conduire à la fissuration et par conséquent à la fracture.

* Les conditions de chargement peuvent jouer une grande importance sur la répartition des contraintes dans la plaque.

* L'intensité des contraintes de cisaillement S23 et S31 ne présentent pas un risque fracture dans la plaque en (PMMA).

* L'existence de défaut (microcavité) dans la plaque en poly méthyl méthacrylate (PMMA) a l'inconvénient d'être le siège de concentration des contraintes pouvant provoquer l'amorçage des fissures qui interviennent dans la fracture de cette plaque.

* La présence de microcavité dans la plaque, augmente les contraintes. Ces contraintes sont concentrées autour de la microcavité. Cette augmentation est pour différentes formes de contrainte, (traction et cisaillement).

Ces remarques mettent en évidence l'importance critique de prendre en compte les défauts microstructuraux dans l'évaluation de la résistance mécanique des matériaux polymères comme le PMMA. La simulation montre clairement que les microcavités peuvent influencer de manière significative la distribution des contraintes et augmenter le risque de défaillance structurale. Ces informations sont essentielles pour optimiser la conception des pièces et minimiser les défaillances prématurées dans des applications réelles.

Recommandations :

Sur la base des résultats de la simulation et de la conclusion, il est recommandé de prendre les mesures suivantes pour réduire le risque de rupture :

- **Éliminer les microcavités avant l'utilisation :**

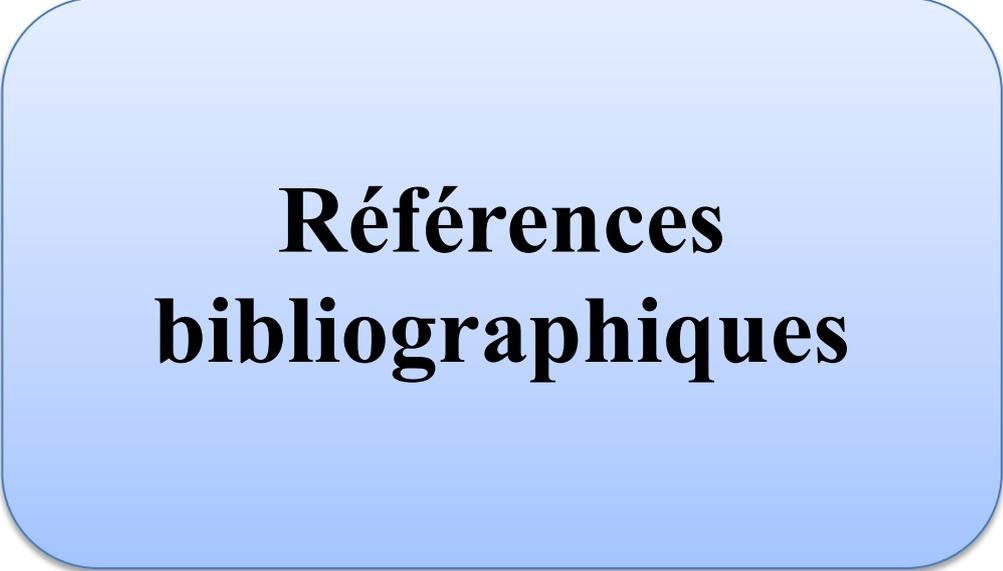
Cela peut être réalisé par des techniques de fabrication telles que le moulage par injection ou l'extrusion, qui permettent de produire des plaques de PMMA avec un minimum de défauts.

- **Utilisation des plaques PMMA avec une épaisseur importante :**

Les plaques plus épaisses peuvent supporter des contraintes plus élevées avant de se rompre.

- **Concevoir les structures en PMMA de manière à minimiser les concentrations de contraintes :**

Cela peut être réalisé en utilisant des formes arrondies et en évitant les angles vifs, qui peuvent créer des points de concentration de contrainte.



**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : Bao.Y & Suo.Z. effect of loading and specimen geometry on fracture toughness of PMMA. Journal of the mechanics and physics of solids, 48(11-12), 2559-2578. (2000).
- [2] : Wan, X & Suo, Z. Crack propagation in PMMA under mixed mode loading. Journal of the mechanics and Physics of solids, 49(10), 2223-2240. (2001).
- [3] : Yue Zhao, chimie des polymères CHM 504-université de Sherbrooke.
- [4] : photos 2023 polymères et monomères de macromolécules, <https://fra.animalia-life.club/>.
- [5] : Michel Dupeux, Aide-mémoire sciences des matériaux-Dunod, Paris, 2004.
- [6] : Marc Carrega, aide-mémoire matières plastiques 2^{ème} édition, Dunod, Paris,2005,2009.
- [7] : Qu'est-ce qu'un copolymère : comprendre les bases de la chimie des polymères-
<https://moldie.net/Fr>. 2024-04-22.
- [8] : Michel Fontanille, Yves Gnanou, Jean-Luc six, chimie et physico, chimie des polymères 4^{ème} édition-Dunod, 2021.
- [9] : Nathan, Matière plastique, Afnor, Paris, 2007.
- [10] : Alina krasnobrizha, école centrale de Nante, thèse doctorat Modélisation des mécanismes d'hystérésis des composites tissés à l'aide d'un modèle collaboratif élasto-plastique endommageable a dérivées fractionnaires, 03/12/2015.
- [11] : kal Naima, Mémoire master Etude expérimentale de comportement mécanique de PMMA à l'état vierge et après vieillissement par UV, Université de Tizi Ouzou, 2014.
- [12] : jean p. Mercier, Gérald Zambelli, wilfreid Kurz, introduction à la science des matériaux (traité des matériaux plastiques), Lausanne, suisse, 2002.
- [13] : Different Modification Methods of Poly Methyl Methacrylate (PMMA) Bone Cement for Orthopaedic Surgery Applications, Orthopaedic Research Center, Bone and Joint Research Laboratory, Mashhad, Iran-12/06/2023.
- [14] : chapitre 2 principe de l'injection, <https://e-learning.univ-Usto.dz>.
- [15] : Article PMMA recycling for the production of optical fiber sensor systems-optique express- November 2017.

Références bibliographiques

[16] : PMMA-Polyméthyleméthacrylate de méthyle, <https://www.inrs.fr>, Ed : octobre 2017.

[17] : chapitre 3 autres procédés de mise en forme thermoformage, <https://e-learning.univ-Usto.dz>.

[18] : Milena Koleva -Plastic PMMA-Technical University of Gabrovo.

[19]:https://www.researchgate.net/publication/226518257_Thermal_Conductivity_of_Polymethyl_Methacrylate_and_Borosilicate_Crown_Glass_Bk7.

[20] : M. Bouziane, "Finite element analysis of the behaviour of microvoids in the cement mantle of cemented hip stem: Static and dynamic analysis," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 545-550, January 2010.

Annexe

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La recherche Scientifique

جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الآلية والكهربونيكانيك

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département automatique et électromécanique



إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

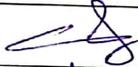
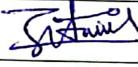
بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة): رداح وليد

2. الطالب (ة): بابا عمر تيازيط إدريس

تخصص: صيانة صناعية

نمنح نحن الأساتذة:

الإمضاء	الصفة	الرتبة - الجامعة الأصلية	الإسم واللقب
	مصصح (1)	MCA-جامعة غرداية	مدوكالي حمزة
	مصصح (2)	MAA-جامعة غرداية	زيطاني إبراهيم
	مؤطر	MAA-جامعة غرداية	بوسنان توفيق
	رئيسة	MCA-جامعة غرداية	خان ياسمينة

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان:

Simulation de la Distribution des Contraintes Autour d'un Défaut dans un Polymère

إمضاء رئيس القسم

العلمي عبد اللطيف
رئيس قسم الآلية
والكهربونيكانيك

