

Republique Algerienne Democratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Saad Dahleb Blida 1
Faculté des sciences technologiques
Département de génie mécanique
Option : Construction mecanique



Theme:

**Etude du comportement de pièces mécaniques
imprimées en 3D selon le type de remplissage**

Realisée par:

 **Chadouli abdelkader**
 **Lembarki Ahmed amine**

Encadrée par:

Dr. Mohamed Meghatria

Année universitaire: 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, qui m'a donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour arriver jusqu'ici.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon encadrant monsieur MEKARRAJA pour sa confiance, son écoute et ses conseils précieux tout au long de ce travail. Merci pour votre bienveillance et votre accompagnement, qui ont été pour moi un vrai soutien.

Je remercie également tous les enseignants du département de Génie Mécanique pour les connaissances transmises et leur engagement tout au long de ma formation. Mon passage à l'université SAAD DAHLAB BLIDA¹ restera une étape marquante de ma vie

Je n'oublie pas ma famille, qui a toujours été à mes côtés, dans les moments de doute comme dans les réussites. Merci pour votre amour inconditionnel et votre soutien constant.

À mes amis, pour les fous rires, les discussions et les encouragements : merci d'avoir rendu ce parcours plus léger et plus humain.

Ce mémoire est le fruit de tous ces apports. À chacun de vous, du fond du cœur :

merci.

_Dédicaces

À mes parents,

Mes piliers, mes repères, ma source de force.

Papa, merci pour tes conseils pleins de sagesse, ta patience et ta confiance en moi, même dans mes moments de doute.

Maman, ton amour inconditionnel, tes prières et ton soutien silencieux m'ont porté chaque jour. Ce mémoire est avant tout le fruit de vos sacrifices. Je vous le dédie du fond du cœur.

À mes frères et sœurs,

Merci pour votre présence, vos encouragements et votre humeur qui m'ont souvent redonné le sourire quand j'en avais le plus besoin. Vous avez été un vrai refuge pendant ce parcours.

À mes ami(e)s les plus proches,

Merci pour vos messages, vos appels à l'improviste, vos blagues qui détendent et vos épaules toujours disponibles. Vous avez rendu ce chemin plus doux et plus vivant.

À mon encadrant(e),

Merci pour votre écoute, votre bienveillance et votre accompagnement humain autant que scientifique. Votre confiance a fait toute la différence.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail,

Merci pour vos sourires, vos mots gentils, votre aide, même passagère. Chaque geste compte, et je n'oublie rien.

Résumé:

Ce mémoire étudie le comportement mécanique de structures polymères imprimées en 3D avec différents motifs et taux de remplissage internes, soumis à divers types de sollicitations mécaniques: traction, compression, flexion et torsion. À l'aide de la technologie FDM (Fused Deposition Modeling) et du matériau ABS, des éprouvettes en forme de panneau sandwich ont été fabriquées avec des remplissages hexagonaux et en grille (grid), à des taux allant de 0 % à 100 %. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel ANSYS 2022 R2 – APDL, en analysant la déformation totale, la contrainte équivalente de Von Mises et la déformation unitaire élastique. Les résultats montrent que la densité de remplissage influence fortement le comportement mécanique des pièces imprimées. Les motifs hexagonaux se sont révélés particulièrement efficaces pour répartir les contraintes et limiter les déformations à faible et moyen remplissage, notamment en flexion et en torsion. Les motifs en grille, plus rigides en traction et compression à faible densité, deviennent plus déformables à mesure que le taux de remplissage augmente. Cette étude met en évidence l'importance de l'optimisation des paramètres de remplissage dans la fabrication additive, afin d'améliorer les performances mécaniques des pièces imprimées selon les besoins spécifiques des applications industrielles.

Abstract:

This thesis studies the mechanical behavior of 3D-printed polymer structures with different patterns and internal infill rates, subjected to various types of mechanical stresses: tension, compression, bending, and torsion. Using FDM (Fused Deposition Modeling) technology and ABS material, sandwich panel-shaped specimens were fabricated with hexagonal and grid infills, at rates ranging from 0% to 100%. Simulations were performed using ANSYS 2022 R2 – APDL software, analyzing total strain, Von Mises equivalent stress, and unit elastic strain. The results show that infill density significantly influences the mechanical behavior of the printed parts. Hexagonal patterns were particularly effective in distributing stresses and limiting deformations at low and medium infill rates, particularly in bending and torsion. Grid patterns, which are stiffer in tension and compression at low density, become more deformable as the infill rate increases. This study highlights the importance of optimizing filling parameters in additive manufacturing, in order to improve the mechanical performance of printed parts according to the specific needs of industrial applications.

المخلص :

يتناول هذا البحث سلوك الهياكل المصنوعة من البوليمر باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية FDM ، والتي تم تصميمها بأنماط وتراكيب تعبئة داخلية مختلفة، عند تعرّضها لأربعة أنواع من الأحمال الميكانيكية: الشد، الضغط، الانحناء، واللي. تم استخدام مادة ABS لتصنيع عينات على شكل لوحات ساندويتش تحتوي على أنماط تعبئة سداسية وشبكية (Grid) بنسب تعبئة تتراوح من 0% إلى 100%. تم إجراء المحاكاة العددية باستخدام برنامج ANSYS 2022 R2 – APDL ، حيث تم تحليل التشوه الكلي، والجهد المكافئ (فون ميزس)، والانفعال المرن. أظهرت النتائج أن كثافة التعبئة تؤثر بشكل كبير على الأداء الميكانيكي للأجزاء المطبوعة. تميز النمط السداسي بفعالية عالية في توزيع الإجهادات والحد من التشوه، خاصة في حالي الانحناء واللي، حتى عند نسب تعبئة منخفضة. أما النمط الشبكي، فرغم أنه أظهر صلابة أكبر تحت الشد والضغط عند تعبئة منخفضة، إلا أن قابليته للتشوه ازدادت عند ارتفاع النسبة. تؤكد هذه الدراسة أهمية اختيار وتصميم نمط التعبئة بشكل دقيق لتحسين الأداء الميكانيكي في تطبيقات التصنيع الإضافي حسب متطلبات كل حالة.

1 Table des matières

2	Introduction générale:	1
3	Chapitre I :	2
3.1	Introduction à l'impression 3D : concepts et évolution.....	2
3.1.1	Définition et bases de l'impression 3D (fabrication additive):.....	2
3.1.2	Évolution historique et étapes clés de l'impression 3D:.....	2
3.1.3	Avantages et inconvénients de l'impression 3D:.....	4
3.2	Applications modernes et état de l'art de l'impression 3D :	5
3.3	Différents types de technologies d'impression 3D:.....	5
3.3.1	Classification selon la norme ISO/ASTM 52900:2015	5
3.3.2	Description des principales technologies:.....	6
3.4	Technologie de dépôt de matière fondue (FDM) : un examen détaillé.....	6
3.4.1	Principe de fonctionnement du FDM.....	7
3.4.2	Avantages et limites:.....	8
3.4.3	Composants clés d'une imprimante FDM:	8
3.4.4	Matériaux utilisés:.....	8
3.5	Types de remplissage et leur impact sur les objets imprimés:	9
4	CHAPITRE II	11
4.1	Introduction :.....	11
4.2	Présentation de logiciel utilisé :	11
4.2.1	Fonctionnalités principales utilisées	12
4.2.2	Paramètres analysés dans ANSYS (Static Structural – APDL):.....	12
4.3	Présentation des sollicitations mécaniques:	13
4.3.1	Sollicitation en traction:.....	13
4.3.2	Sollicitation en compression:.....	14
4.3.3	Sollicitation en flexion:.....	15
4.3.4	Sollicitation en torsion:.....	15
4.4	Sélection des pièces mécaniques à étudier.....	16
4.4.1	Critères de sélection.....	16
4.4.2	Description géométrique des pièces.....	17
4.5	Hypothèses de modélisation.....	18
4.6	Rétroconception et choix des types de remplissage.....	19
4.6.1	Méthodologie de rétroconception	19
4.6.2	Présentation des motifs de remplissage retenus	19

5	CHAPIRE III	21
5.1	Introduction :.....	21
5.2	Étude des sollicitations mécaniques.....	22
5.2.1	Simulation de la flexion	22
5.2.2	Simulation de la traction	36
5.2.3	Simulation de la compression	50
5.2.4	Simulation de la torsion	64
5.3	Interprétation des résultats	79
5.3.1	3.2 Comparaison Globale entre les Motifs Hexagonal et Grille	79
6	Conclusion Generale :.....	81

Liste des figures :

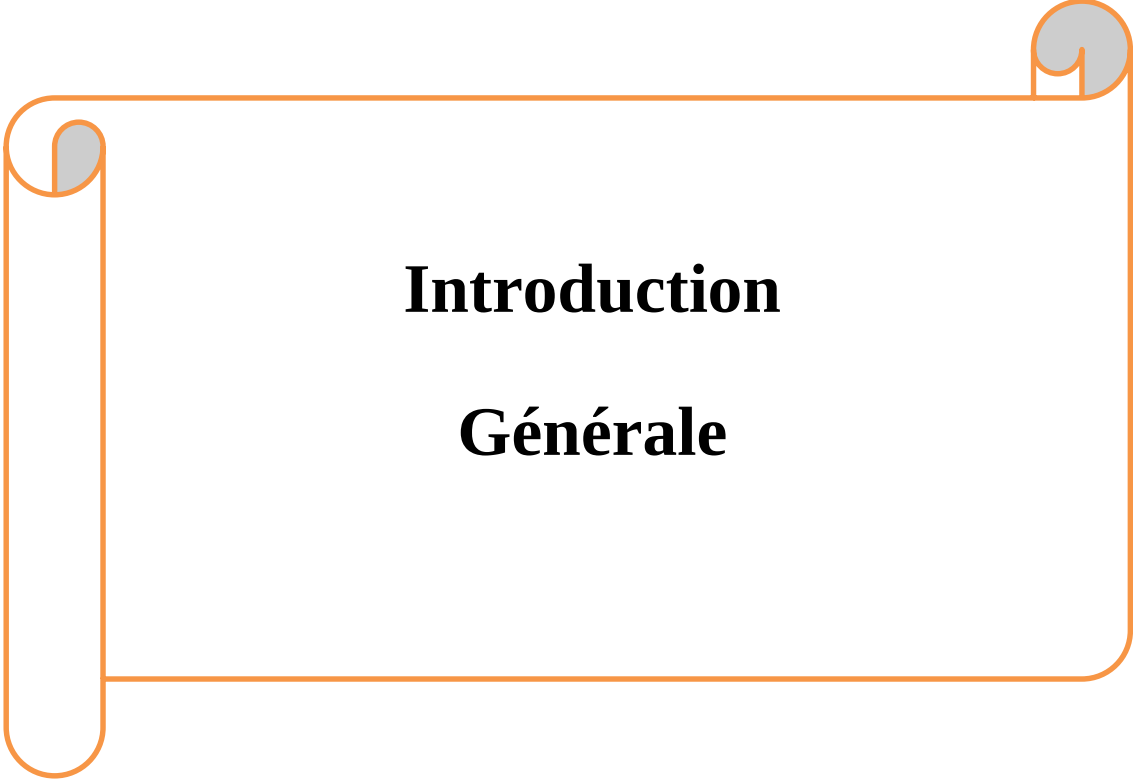
Figure 1: Schéma simplifie les differents etapes de limpression 3D	03
--	----

Figure 2: Figure 2 : Schéma de principe du prototypage rapide	08
Figure 3: les motifs et les taux de remplissage	11
Figure 4 : Logo de Logiciel Ansys 2022 R2 - APDL	13
Figure 5 : essai de traction	15
Figure 6 : Phases successives de l'essai de traction d'une éprouvette standard	16
Figure 7 : Illustration d'un essai de compression appliqué à une structure alvéolaire hexagonale	17
Figure 8 : Schéma d'un essai de flexion trois points sur poutre simplement appuyée	18
Figure 9 : Représentation schématique d'un effort de torsion appliqué	18
Figure 10 : Schéma général de l'analyse des efforts internes et des critères de vérification d'une structure	26
Figure 11 : Dimensions de la pièce monocouche imprimé en 3D (300 × 100 × 10 mm)	20
Figure 12 : Modèles numériques de poutres -flexion 3 points-.	26
Figure 13 : Courbe de chargement monotone – Force appliquée (N)	26
Figure 14 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en flexion 3 points	27
Figure 15 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points	27
Figure 16 : Carte de déformation totale de la pièce en flexion 3 points	28
Figure 17 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en flexion 3 points	28
Figure 18 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points	29
Figure 19 : Carte de déformation totale de la pièce en flexion 3 points	29
Figure 20 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en flexion 3 points	30
Figure 21 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points	30
Figure 22 : Carte de déformation totale de la pièce en flexion 3 points	30
Figure 23 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en flexion 3 points	30
Figure 24 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points	31
Figure 25 : Carte de déformation totale de la pièce en flexion 3 points	31
Figure 26 : Déformation Totale Max – Flexion – Motif Hexagonal	31
Figure 27 : Déformation Élastique Max – Flexion – Motif Hexagonal	32
Figure 28 : Contrainte Équivalente Max – Flexion – Motif Hexagonal	32
Figure 29 : Carte de déformation totale de la pièce en flexion 3 points	33
Figure 30 : Carte de contrainte équivalente de la pièce en flexion 3 points	34

Figure 31 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en flexion 3 points	35
Figure 32 : Carte de déformation totale de la pièce en flexion 3 points	35
Figure 33 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points	36
Figure 34 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en flexion 3 points	36
Figure 35 : Déformation Totale Max – Flexion – Motif Grille	36
Figure 36 : Déformation Élastique Max – Flexion – Motif Grille	37
Figure 37 : Contrainte Équivalente Max – Flexion – Motif Grille	37
Figure 38 : Courbe de chargement monotone – Force appliquée (N)	38
Figure 39 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en traction	39
Figure 40 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en traction	40
Figure 41 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction	41
Figure 42 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction	42
Figure 43 : Carte de déformation totale de la pièce en traction	43
Figure 44 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en traction	44
Figure 45 : Carte de déformation totale de la pièce en traction	44
Figure 46 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction	45
Figure 47 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en traction	45
Figure 48 : Carte de déformation totale de la pièce en traction	45
Figure 49 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction	46
Figure 50 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en traction	46
Figure 51 : Déformation Totale – Traction – Motif Hexagonal	47
Figure 52 : Déformation Élastique Équivalente – Traction – Motif Hexagonal	48
Figure 53 : Contrainte Équivalente (von Mises) – Traction – Motif Hexagonal	49
Figure 54 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en traction	49
Figure 55 : Carte de déformation totale de la pièce en traction	50
Figure 56 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction	50
Figure 57 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en traction	50
Figure 58 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction	51
Figure 59 : Carte de déformation totale de la pièce en traction	51
Figure 60 : Déformation Totale – Traction – Motif Grille	52

Figure 61 : Déformation Élastique Équivalente – Traction – Motif Grille	53
Figure 62 : Contrainte Équivalente – Traction – Motif Grille	54
Figure 63 : Courbe de chargement monotone – Force appliquée (N)	55
Figure 64 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en compression	55
Figure 65 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression	56
Figure 66 : Carte de déformation totale de la pièce en compression	56
Figure 67 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression	56
Figure 68 : Carte de déformation totale de la pièce en compression	57
Figure 69 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en compression	57
Figure 70 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression	58
Figure 71 : Carte de déformation totale de la pièce en compression	58
Figure 72 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en compression	59
Figure 73 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression	59
Figure 74 : Carte de déformation totale de la pièce en compression	60
Figure 75 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en compression	60
Figure 76 : Déformation Totale Max – Compression – Motif Hexagonal	61
Figure 77 : Déformation Élastique Max – Compression – Motif Hexagonal	63
Figure 78 : Contrainte Équivalente Max – Compression – Motif Hexagonal	63
Figure 79 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression	63
Figure 80 : Carte de déformation totale de la pièce en compression	64
Figure 81 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en compression	64
Figure 82 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression	65
Figure 83 : Carte de déformation totale de la pièce en compression	65
Figure 84 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en compression	66
Figure 85 : Déformation Totale – Compression – Motif Grille	66
Figure 86 : Déformation Élastique Équivalente – Compression – Motif Grill	68
Figure 87 : Contrainte de von Mises – Compression – Motif Grille	69
Figure 88 : Courbe de Chargement Cyclique – Force appliquée (N)	69
Figure 89 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion	70
Figure 90 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en torsion	70

Figure 91 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion	71
Figure 92 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en torsion	71
Figure 93 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion	72
Figure 94 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion	72
Figure 95 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion	72
Figure 96 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion	73
Figure 97 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en torsion	73
Figure 98 : Carte de shear Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion	74
Figure 99 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en torsion	74
Figure 100 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion	74
Figure 101 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion	75
Figure 102 : Déformation Totale – Torsion – Motif Hexagonal	75
Figure 103 : Déformation Élastique – Torsion – Motif Hexagonal	76
Figure 104 : Contrainte de von Mises – Torsion – Motif Hexagonal	77
Figure 105 : Déformation de Cisaillement – Torsion – Motif Hexagonal	78
Figure 106 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion	78
Figure 107 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion	79
Figure 108 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en torsion	79
Figure 109 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion	79
Figure 110 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion	79
Figure 111 : Carte d'équivalent Stress de la pièce en torsion	80
Figure 112 : Déformation Totale – Torsion – Motif Grille	80
Figure 113 : Déformation Élastique – Torsion – Motif Grille	80
Figure 114 : Contrainte Équivalente – Torsion – Motif Grille	81
Figure 115 : Déformation de Cisaillement – Torsion – Motif Grille	81

A stylized orange scroll graphic with a light gray background. The scroll has a vertical strip on the left side and a horizontal strip on the top right. The text is centered within the main rectangular area of the scroll.

Introduction

Générale

2 Introduction générale:

L'impression 3D, également appelée fabrication additive, a révolutionné le secteur manufacturier en offrant la possibilité de créer des pièces complexes, personnalisées et économiques directement à partir de modèles numériques, sans les contraintes des méthodes traditionnelles [1]. Parmi les techniques existantes, le Fused Deposition Modeling (FDM) se distingue par sa simplicité et son accessibilité [2]. Un aspect crucial en FDM est le remplissage (infill), la structure interne de la pièce. Ce paramètre a un impact direct sur les propriétés mécaniques, le poids, le temps d'impression et la consommation de matériau, avec divers motifs (grille, nid d'abeille, etc.) et densités ajustables [3].

Ce projet se concentre sur l'étude de l'impact du type de remplissage sur le comportement mécanique des pièces imprimées en 3D, notamment leur résistance, rigidité et déformation [4]. L'objectif est d'identifier les configurations optimales selon les contraintes mécaniques prévues, tout en explorant les compromis entre légèreté, performance et économie de matière. Grâce à des essais expérimentaux, des analyses comparatives et des simulations numériques, ce travail vise à formuler des recommandations pratiques pour le choix des paramètres de remplissage dans des contextes industriels et de prototypage rapide [5].

Chapitre I :
Introduction à l'impression 3D et à
la fabrication additive

3 Chapitre I :

3.1 Introduction à l'impression 3D : concepts et évolution

3.1.1 Définition et bases de l'impression 3D (fabrication additive):

L'impression en trois dimensions (3D), souvent appelée fabrication additive (FA) ou fabrication numérique, est une façon nouvelle et importante de créer des objets physiques [1, 2, 3, 4, 5, 9, 12]. Contrairement aux méthodes de fabrication habituelles qui enlèvent de la matière d'un gros morceau, l'impression 3D, elle, construit les objets en ajoutant de la matière, couche par couche [4, 5, 9].

Le principe de base de l'impression 3D est de transformer un dessin numérique en un objet réel. Cela commence souvent par un modèle créé avec un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) ou d'autres données numériques [3, 5, 9]. Ce plan numérique est ensuite transformé en un fichier STL (Standard Tessellation Language), qui sert de base à l'imprimante 3D pour construire l'objet. Pour passer du numérique au physique, on utilise un logiciel de "découpe" (slicing) qui divise le modèle 3D en plein de couches minces et crée un code G. Ce code G donne des instructions précises à l'imprimante pour ses mouvements, le dépôt de matière, et d'autres réglages pour chaque couche [2, 4, 7, 9].

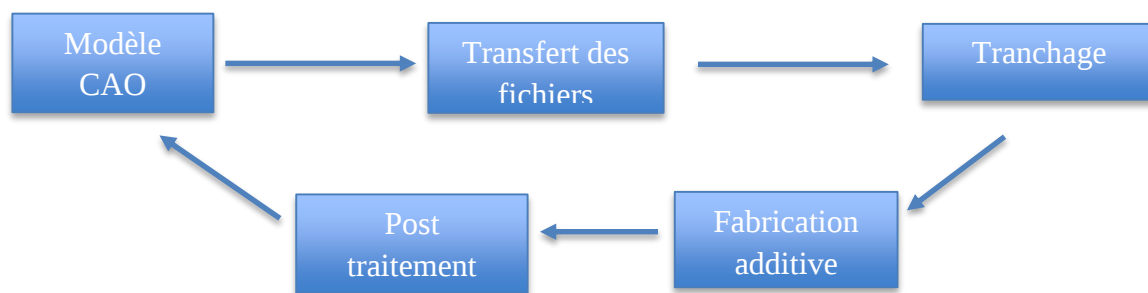


Figure 1: Schéma simplifié des différentes étapes de l'impression 3D

3.1.2 Évolution historique et étapes clés de l'impression 3D:

Les premiers travaux de base sont attribués au Dr Hideo Kodama, un chercheur japonais des années 1970. On dit qu'il a imprimé le premier objet solide à partir d'un dessin numérique [2, 9]. Une étape très importante a eu lieu en 1984, une entreprise essentielle dans le jeune secteur de

l'impression 3D a créé le format de fichier STL largement utilisé, qui reste une norme pour les modèles 3D numériques [9].

Au milieu des années 1980, les techniques de fabrication additive se sont encore diversifiées avec l'invention du frittage sélectif par laser (SLS) par le Dr Carl Deckard et le Dr Joe Beaman à l'Université du Texas en 1986 [9, 11]. Peu après, à la fin des années 1980, S. Scott Crump a mis au point le dépôt de matière fondue (FDM), une technologie qui deviendrait plus tard très accessible et souvent associée à l'impression 3D de bureau [9]. Le début des années 1990 a également vu le brevet de la fusion par faisceau d'électrons (EBM) en 1993, une technique de fusion sur lit de poudre conçue spécialement pour les métaux [11].

Le début des années 2000 a été une période cruciale de développement commercial, marquée par une forte augmentation des ventes d'imprimantes 3D et une baisse progressive de leurs prix, ce qui a beaucoup amélioré l'accès à cette technologie [9]. Cette tendance a continué en 2005 avec l'arrivée de l'impression 3D laminée sur papier par Mcor Technologies Ltd, une méthode unique qui utilise des feuilles de papier [11]. Cela a encouragé un modèle d'innovation participatif qui a rendu la technologie encore plus accessible [9, 11]. Les années 2010 ont été un tournant majeur, car la fabrication additive est passée d'un outil de prototypage spécialisé à un procédé industriel courant. Pendant cette décennie, des pièces métalliques finales ont commencé à être "fabriquées" de manière additive plutôt que d'être uniquement usinées à partir de blocs bruts, et les termes "impression 3D" et "fabrication additive" sont devenus interchangeables [9].

Ce parcours historique montre un chemin clair, des outils de prototypage spécialisés et chers vers des solutions de fabrication plus abordables et polyvalentes. Cette évolution constante a complètement transformé l'impression 3D, passant d'une utilisation de niche à une méthode viable pour fabriquer des pièces fonctionnelles. Cela marque un grand changement dans les capacités de fabrication, annonçant un future où la personnalisation de masse, la production décentralisée et la fabrication sur demande de pièces complexes et performantes seront possibles. Ces développements pourraient beaucoup modifier les chaînes d'approvisionnement mondiales traditionnelles et les façons de fabriquer établies [5, 12].

3.1.3 Avantages et inconvénients de l'impression 3D:

➤ Avantages :

- **Réduction du gaspillage de matière** grâce au procédé additif (fabrication couche par couche) [2, 4, 5, 9].
- **Capacité à produire des formes complexes** (structures internes, designs optimisés) difficiles avec les méthodes traditionnelles [2, 4, 5, 9].
- **Pièces légères mais résistantes**, adaptées à de nombreuses applications mécaniques [4, 5].
- **Automatisation accrue**, réduction de la main-d'œuvre et intégration dans l'Industrie [2, 4].
- **Peu ou pas de finition post-impression** dans certains cas, ce qui améliore l'efficacité [4, 5].
- **Technologie plus durable et économe en énergie** par rapport à la fabrication soustractive [2, 4, 5].
- **Prototypage rapide** : réduction du cycle de développement (de plusieurs mois à quelques jours) [5, 9, 11, 12].
- **Fabrication personnalisée à la demande** : personnalisation de masse facilitée [2, 5, 9, 12].
- **Production décentralisée** : usines plus proches des clients, réduction des coûts logistiques [5].
- **Capacités de réparation ou d'amélioration de pièces existantes** (ajoute de matière) [4, 12].
- **Réduction des risques de conception** grâce à des prototypes physiques [9].
- **Évaluation tactile et ergonomique** des prototypes, utile pour les tests utilisateurs [9].
- **Liberté de création** pour designers et ingénieurs : passage rapide de l'idée au prototype réel [9].

➤ Inconvénients :

- **Réduction possible de l'emploi manuel** dans les secteurs industriels peu qualifiés [5, 9].

- **Risque de fabrication d'objets dangereux** ou illégaux (armes, contrefaçons) [5, 9].
- **Problèmes de propriété intellectuelle** (facilité de copier et reproduire des objets sans autorisation) [5, 9].
- **Limites de taille** des objets imprimables : nécessité d'assembler plusieurs parties [9, 12].
- **Choix de matériaux encore restreint** comparé aux procédés conventionnels [9].
- **Coût élevé** des imprimantes professionnelles multi-matériaux ou haute précision [9].
- **Temps d'impression long** pour les pièces de grande taille ou à haute qualité de surface [12].
- **Nécessité de structures de support** pour les formes complexes, ce qui augmente les déchets et les étapes de post-traitement [12].
- **Finition de surface souvent imparfaite** : aspect "escalier", rugosité, nécessitant des retouches [12].

3.2 Applications modernes et état de l'art de l'impression 3D :

Applications dans les secteurs industriels :

- Industrie aérospatiale .
- Industrie automobile .
- Industrie électronique .
- Industrie de la construction .
- les secteurs de la santé et de la médecine .

3.3 Différents types de technologies d'impression 3D:

Le monde de l'impression 3D comprend un large éventail de technologies, chacune utilisant des principes de fonctionnement, des matériaux compatibles et offrant des avantages et des inconvénients uniques. Ces technologies sont généralement classées selon la norme ASTM F2792 [5, 12].

3.3.1 Classification selon la norme ISO/ASTM 52900:2015

Cette norme distingue :

- **MEX (Material Extrusion)** : extrusion de matière.
- **VAT (Vat Photopolymerization)** : photopolymérisation en cuve.

- **PBF (Powder Bed Fusion)** : fusion sur lit de poudre.
- **DLS (Directed Energy Deposition)** : dépôt direct d'énergie.

3.3.2 Description des principales technologies:

1. FDM (Fused Deposition Modeling) – MEX

Technique courante utilisant un filament fondu (ex : PLA, ABS), extrudé par une buse chauffante. Avantages : faible coût, simplicité. Inconvénients : rugosité, précision limitée.

2. SLA (Stereolithography Apparatus) – VAT

Utilise un laser UV pour durcir une résine photosensible. Haute précision et surface lisse. Nécessite un post-traitement (nettoyage + polymérisation UV).

3. SLS (Selective Laser Sintering) – PBF

Fusion d'une poudre (souvent polymère) par laser. Aucune structure de support nécessaire. Permet des géométries complexes. Inconvénient : aspect granuleux, post-traitement requis.

4. SLM (Selective Laser Melting) – PBF

Similaire au SLS, mais destiné aux métaux. Fusion complète des particules. Utilisé dans l'aéronautique et le médical. Requiert des supports, atmosphère contrôlée.

5. DED (Directed Energy Deposition) – DLS

Utilise un faisceau laser ou plasma pour fondre un matériau (fil ou poudre) simultanément à son dépôt. Idéal pour réparation de pièces ou ajout localisé. Moins précis que SLM.

3.4 Technologie de dépôt de matière fondue (FDM) : un examen détaillé

Le dépôt de matière fondue (FDM), aussi appelé fabrication de filament fondu (FFF), est l'une des méthodes d'impression 3D les plus utilisées et qui évolue le plus vite dans le domaine de la fabrication additive (FA) [7, 8].

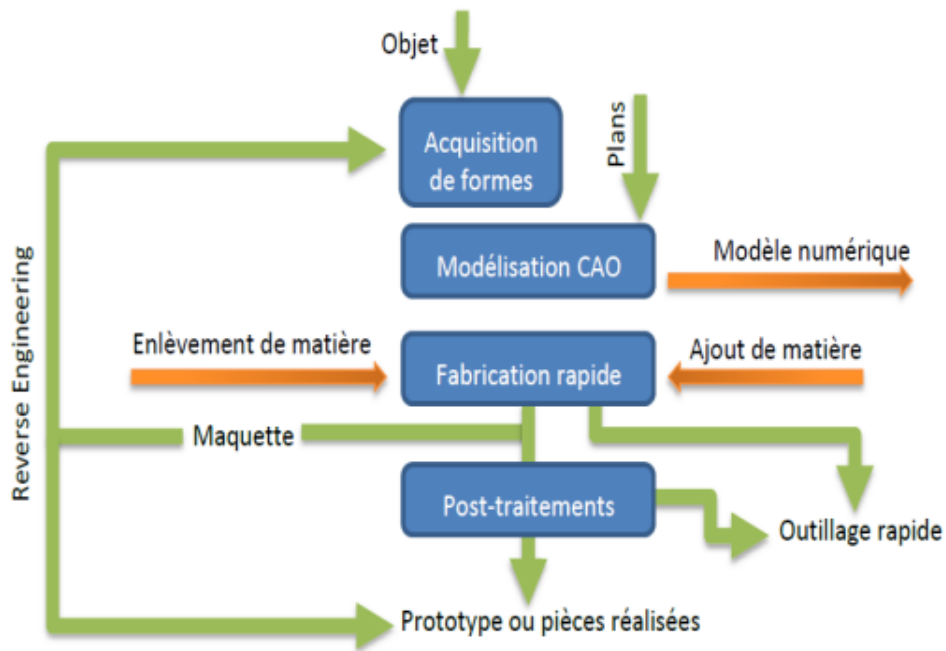


Figure 2 : Schéma de principe du prototypage rapide [9]

3.4.1 Principe de fonctionnement du FDM

Principe de fonctionnement

Le **FDM (Fused Deposition Modeling)** repose sur l'extrusion d'un **filament thermoplastique** chauffé jusqu'à son état semi-fondu, puis déposé **couche par couche** via une buse sur une plateforme. Chaque couche adhère à la précédente en refroidissant. Le processus est piloté par ordinateur à partir d'un modèle **CAO** converti en fichier **STL**, puis transformé en **G-code** par un logiciel de découpe. Un **apport continu** de filament est assuré par une bobine.

Pour les géométries complexes, des **structures de support** (solubles ou non) sont nécessaires. Une bonne fusion entre couches est cruciale, sans quoi la pièce peut présenter des défauts mécaniques.

3.4.2 Avantages et limites:

➤ Avantages :

- Coût d'investissement faible, matériaux bon marché [5, 7, 8].
- Simplicité d'utilisation, fiabilité du procédé [7].
- Adapté aux **prototypes rapides**, conceptions complexes et production à la demande [5, 7].
- Grand choix de matériaux, délais courts, faible gaspillage [7].
- Contributions à la **durabilité** : réparabilité, consommation réduite, longévité accrue [7].

➤ Limites :

- **Vitesse d'impression lente**, inadaptée à la production de masse [7, 8].
- Limitations aux **matériaux à bas point de fusion** [7].
- **Dimensions réduites** de fabrication, nécessitant parfois un assemblage [7, 8].
- **Finition de surface rugueuse** ("effet escalier") [7, 8].
- Présence de **vides** (dans le filament ou formés à l'impression), pouvant affaiblir la pièce [7].
- Mauvaise **adhésion fibres/matrice** dans les composites [7].
- **Déformations** dues aux contraintes thermiques internes (wrapping, décollement) [7].

3.4.3 Composants clés d'une imprimante FDM:

- **Extrudeur** : moteur qui pousse le filament.
- **Hotend** : chambre de chauffe avec buse de sortie.
- **Plateau chauffant** : assure l'adhérence de la première couche.
- **Moteurs XYZ** : déplacement précis de la tête et du plateau.

3.4.4 Matériaux utilisés:

Le FDM utilise principalement des **polymères thermoplastiques** sous forme de **filament**, avec des propriétés mécaniques, thermiques et chimiques variables selon l'application.

3.4.4.1 PLA (Acide Polylactique)

- Biodégradable, issu de ressources naturelles [6, 9].
- Facile à imprimer, idéal pour débutants [6, 7].
- Bonne résistance mécanique (traction : 61–66 MPa) [6].
- Température de transition vitreuse : ~55°C ; fusion : 157–170°C [6, 9].

3.4.4.2 ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène)

- Résistant aux chocs, thermiquement stable jusqu'à 80°C [6].
- Température d'impression : 210–250°C [6, 9].
- Bonne isolation électrique, résistant à l'humidité et aux produits chimiques [6, 7].
- Inflammable et sensible aux UV [6].

3.4.4.3 Nylon (Polyamide)

- Excellente **résistance mécanique**, élasticité et résistance aux chocs [7].
- Bonne tenue à haute température, mais sensible à l'humidité (hydrophile) [7].
- Utilisé en aéronautique, automobile et produits de consommation [7].

3.4.4.4 PEEK (Polyétheréthercétone)

- **Polymère hautes performances** semi-cristallin [7].
- Résistance mécanique supérieure, stabilité thermique et chimique [7].
- Nécessite un **contrôle précis** des paramètres d'impression pour de bonnes propriétés [7].

3.5 Types de remplissage et leur impact sur les objets imprimés:

le remplissage constitue un paramètre fondamental dans le procédé de **dépôt de filament fondu (Fused Deposition Modeling, FDM)**, influençant non seulement les propriétés mécaniques de la pièce imprimée, mais également son temps de fabrication et sa consommation de matière [8]. La densité de remplissage, exprimée en pourcentage, permet de moduler la solidité globale de la pièce, tandis que le motif de remplissage détermine la manière dont les efforts mécaniques sont distribués à l'intérieur de la structure [8].

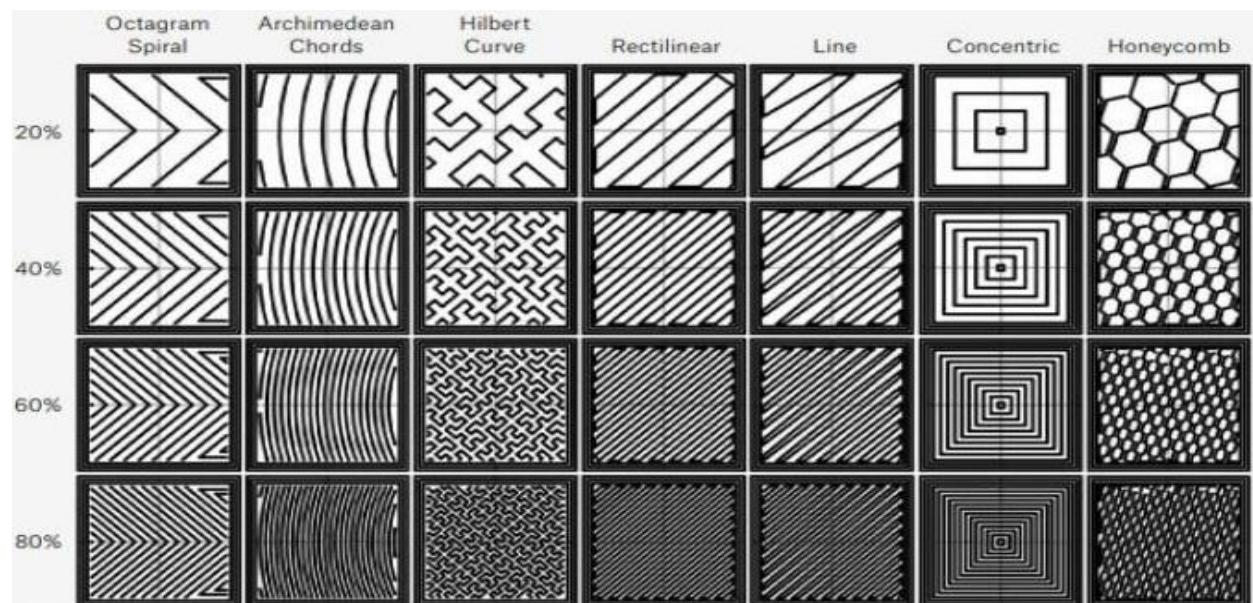
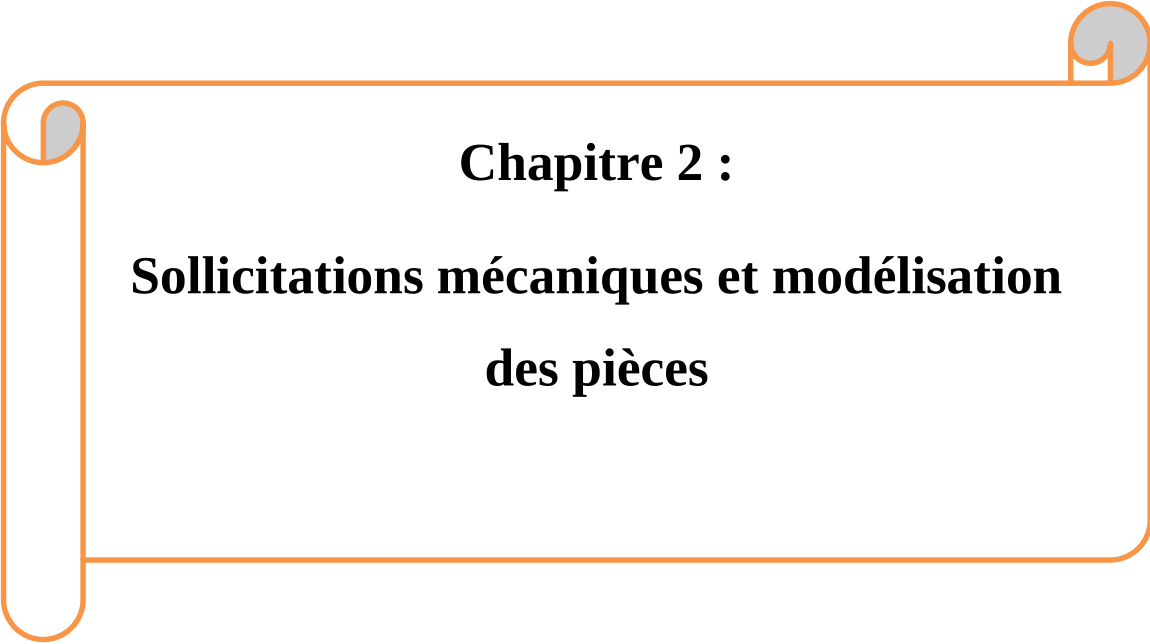


Figure 03: les motifs et les taux de remplissage
(B&C Digital Fabrication Solution)

A decorative orange border with rounded corners and scroll-like details on the left and right sides, enclosing the chapter title.

Chapitre 2 :

Sollicitations mécaniques et modélisation des pièces

4 CHAPITRE II

4.1 Introduction :

Ce chapitre plonge au cœur de la mécanique des matériaux en explorant les sollicitations mécaniques fondamentales et la manière de modéliser le comportement des pièces, un enjeu crucial pour toute conception robuste. Nous aborderons en détail les effets de la traction, de la compression, de la flexion et de la torsion sur les structures. Pour cela, nous nous appuierons sur le puissant logiciel ANSYS 2022 R2 – APDL, qui nous permettra de simuler précisément les réponses des pièces, notamment celles issues de l'impression 3D, et d'analyser l'influence de paramètres clés comme les motifs de remplissage internes sur leurs performances. L'objectif est de vous fournir une compréhension claire et pratique des principes qui régissent la solidité des matériaux, grâce à des outils de simulation reconnus dans l'ingénierie moderne.

4.2 Présentation de logiciel utilisé :

ANSYS 2022 R2 – APDL (Mechanical Structural) est un environnement de simulation avancée basé sur un langage paramétrique, utilisé pour les analyses par éléments finis. Dans ce projet, il a servi à modéliser le comportement mécanique de pièces imprimées en 3D sous des efforts de traction, compression, flexion et torsion. Le module Static Structural permet d'appliquer avec précision les conditions aux limites et de visualiser les contraintes et déformations. Ce logiciel est réputé pour sa robustesse et sa précision dans les analyses mécaniques[13].



Figure 4: Logo de Logiciel Ansys 2022 R2 - APDL

4.2.1 Fonctionnalités principales utilisées

Dans le cadre de cette étude, l'ANSYS Mechanical a été employé pour réaliser des analyses statiques structurelles [13] :

- Importation de géométrie depuis SolidWorks ou modélisation directe via ANSYS DesignModeler.
- Définition des propriétés matériaux (module d'Young, coefficient de Poisson, densité).
- Création du maillage avec possibilité d'affiner les zones critiques (contacts, charges).
- Application des conditions aux limites spécifiques à chaque cas de sollicitation.
- Résolution du problème statique et extraction des résultats : contraintes, déformations, distribution des efforts.

4.2.2 Paramètres analysés dans ANSYS (Static Structural – APDL):

Pour chaque simulation réalisée sur les pièces imprimées en 3D, on a extrait les valeurs suivantes dans ANSYS 2022 R2 (module Static Structural APDL) :

- Déformation totale (Total Deformation) :
C'est le déplacement de la pièce sous l'effet de la charge. Il montre à quel point la pièce bouge ou se plie, exprimé en millimètres (mm).
- Contrainte de Von Mises (Equivalent Stress) :
C'est une valeur qui permet de savoir où la pièce risque de casser. Plus la valeur est élevée, plus il y a de risque de rupture. Elle est exprimée en MPa.
- Contraintes normales (Normal Stress X, Y, Z) :
Ce sont les efforts qui agissent dans les directions X, Y et Z. Elles indiquent comment la pièce est étirée ou comprimée selon chaque direction.

Ces résultats sont très utiles pour comparer les effets des différents remplissages (hexagonal, linéaire, grille) sur le comportement mécanique de la pièce [13].

4.3 Présentation des sollicitations mécaniques:

4.3.1 Sollicitation en traction:

La sollicitation en traction, ou effort normal de traction, se caractérise par l'application de forces opposées et divergentes agissant le long de l'axe longitudinal d'un corps [14]. Ces forces tendent à allonger le corps et à réduire sa section transversale, phénomène connu sous le nom de striction pour les matériaux ductiles [15]. L'analyse de cette sollicitation est cruciale pour la conception de structures soumises à des efforts d'étirement, telles que les câbles de levage, les tirants de pont ou les barres d'armature [16].

Contrainte de traction ($\sigma_t = F/A$), déformation en traction ($\epsilon_t = \Delta L/L_0$), Module d'Young (E).

La contrainte de traction (σ_t) est définie comme le rapport de la force appliquée (F) sur l'aire de la section transversale (A), exprimée en Pascals (Pa) [14]. La déformation en traction (ϵ_t) représente l'allongement relatif du matériau [15]. Le Module d'Young (E), propriété intrinsèque du matériau [14].

Principe : Cet essai consiste à soumettre une « éprouvette » de longueur l à un effort de traction , progressivement croissant, généralement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

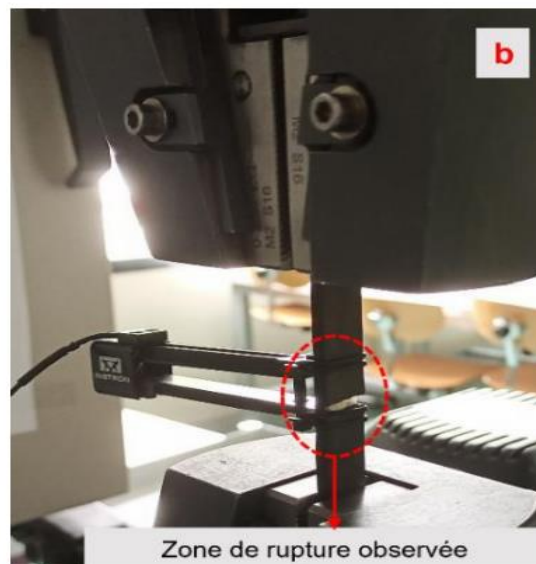


Figure 5 : essai de traction

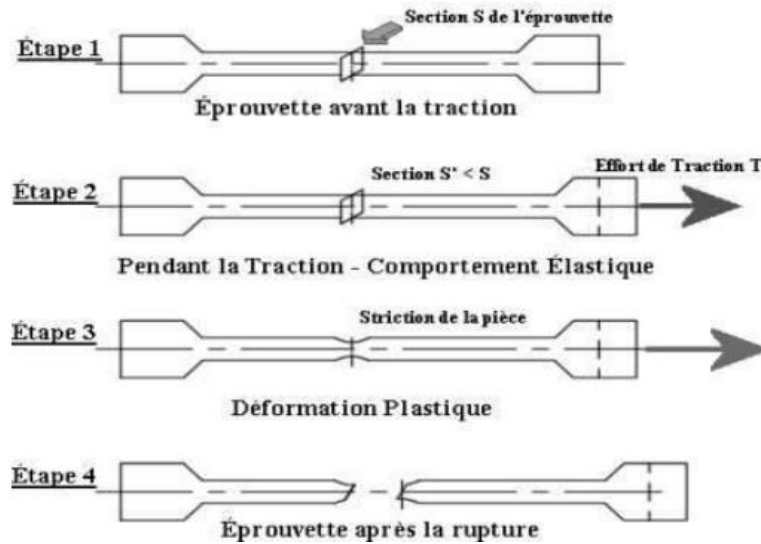


Figure 6 : Phases successives de l'essai de traction d'une éprouvette standard

4.3.2 Sollicitation en compression:

Inversement à la traction, la sollicitation en compression se produit lorsque des forces opposées et convergentes sont appliquées le long de l'axe longitudinal d'un corps, tendant à le raccourcir [14]. Cette sollicitation entraîne une diminution de la longueur de la pièce et une augmentation de sa section transversale [15]

Concepts clés: Contrainte de compression ($\sigma_c = F/A$), déformation en compression ($\epsilon_c = \Delta L/L_0$), risque de flambage pour les pièces élancées.

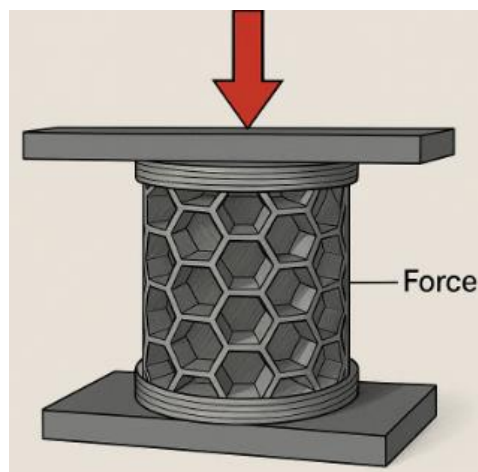


Figure 7: Illustration d'un essai de compression appliqué à une structure alvéolaire hexagonale

4.3.3 Sollicitation en flexion:

La flexion est une sollicitation complexe résultant de l'application d'un moment fléchissant qui provoque une courbure de la pièce [14]. Sous flexion, une face de la pièce est soumise à de la traction, tandis que la face opposée est en compression, avec une "fibre neutre" au centre où la contrainte normale est nulle [15]. Ce type de sollicitation est omniprésent dans les poutres, les arbres supportant des charges transversales ou les ailes d'avions [16].

Concepts clés : Moment fléchissant (M), contrainte normale maximale ($\sigma_{\max}=(M \cdot y_{\max})/I$), Module de flexion (E), Moment d'inertie (I).

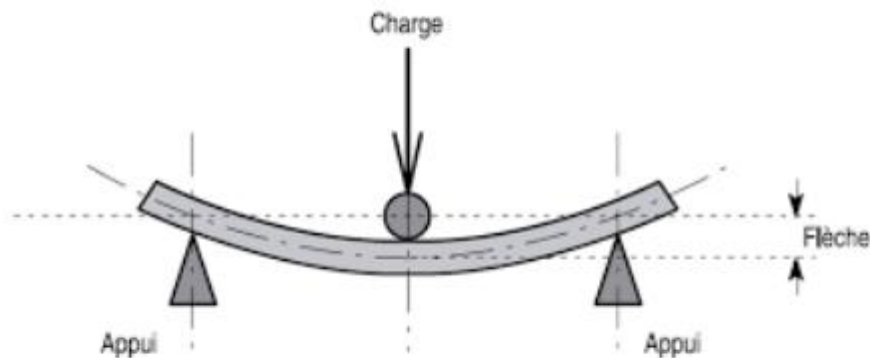


Figure 8: Schéma d'un essai de flexion trois points sur poutre simplement appuyée

4.3.4 Sollicitation en torsion:

La torsion survient lorsqu'un corps est soumis à l'application d'un couple qui tend à le faire vriller autour de son axe longitudinal [14]. Cette sollicitation génère principalement des contraintes de cisaillement au sein du matériau, dont l'intensité est maximale à la périphérie de la section [15]. Elle est caractéristique des arbres de transmission, des essieux de véhicules ou des systèmes de vissage [16].

Concepts clés : Couple de torsion (T), contrainte de cisaillement ($\tau=(T \cdot r)/J$), Module de cisaillement (G), Moment quadratique polaire (J).

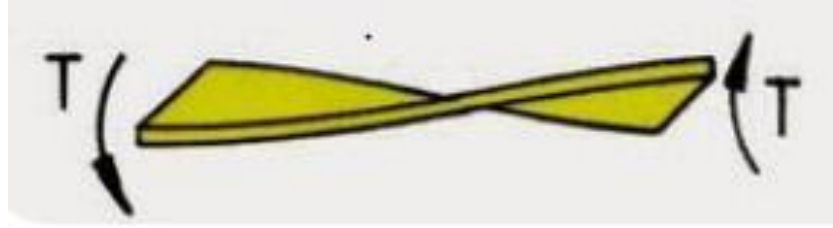


Figure 9 : Représentation schématique d'un effort de torsion appliqué

4.4 Sélection des pièces mécaniques à étudier

4.4.1 Critères de sélection

□ **Représentativité des sollicitations** : Les pièces doivent être intrinsèquement soumises à une ou plusieurs des sollicitations mécaniques étudiées (traction, compression, flexion, torsion), permettant ainsi une application directe des concepts théoriques abordés en section 2.1 [19].

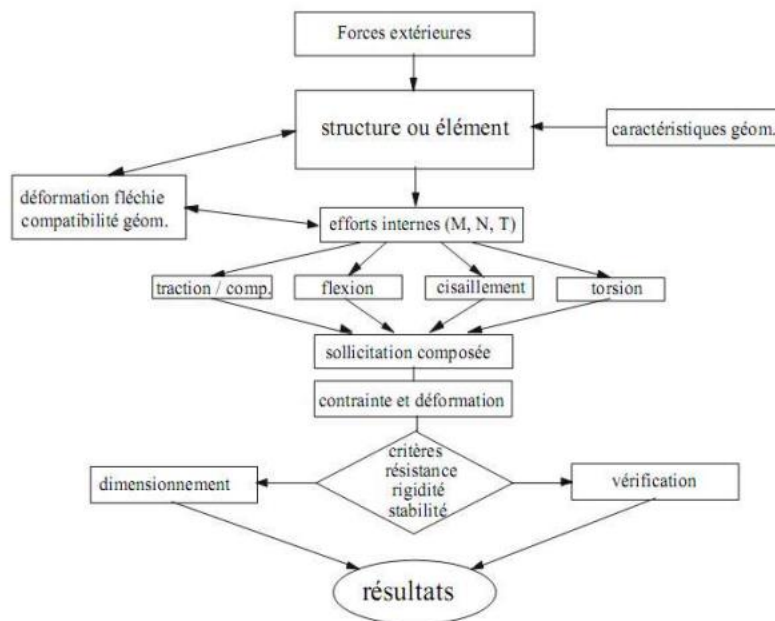


Figure 10 : Schéma général de l'analyse des efforts internes et des critères de vérification d'une structure

□ **Complexité adéquate** : Une complexité géométrique et fonctionnelle moyenne est recherchée. Cela signifie éviter des pièces trop simples (qui ne justifiaient pas une étude approfondie) ou

excessivement complexes [20]. L'objectif est de trouver un équilibre permettant une modélisation et une analyse significatives [20].

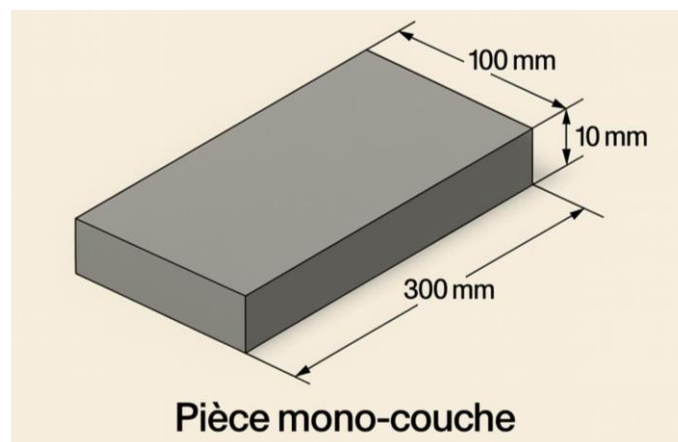
□ **Intérêt pratique et industriel** : Privilégier des pièces ayant une application concrète dans l'industrie ou la vie courante confère une valeur ajoutée à l'étude en montrant comment les principes de conception et d'analyse mécanique s'appliquent à des problèmes réels [21].

□ **Potentiel d'optimisation / Amélioration** : les pièces sélectionnées doivent offrir un potentiel clair d'amélioration de leurs performances (réduction de poids, augmentation de la résistance, etc.) ou de leur processus de fabrication [22].

□ **Disponibilité des données** : La capacité à obtenir des informations précises sur la géométrie, les matériaux et les conditions de chargement des pièces est primordiale, impliquant l'accès à des modèles CAO, des mesures physiques ou des spécifications techniques [18].

4.4.2 Description géométrique des pièces

La pièce étudiée dans ce projet est une **pièce** imprimé en 3D selon la technologie FDM (Fused Deposition Modeling). Elle présente une forme **parallélépipédique rectangulaire** aux dimensions standards de **300 mm de longueur**, **100 mm de largeur**, et **10 mm d'épaisseur totale**, conformément aux formats utilisés dans les essais de caractérisation des matériaux polymères imprimés [23].



**Figure 11: Dimensions de la pièce utilisée – pièce mono-couche imprimé en 3D
(300 × 100 × 10 mm)**

La structure interne est constituée d'un **remplissage de motif périodique**, dont l'épaisseur des parois est fixée à **1,2 mm**. Afin d'étudier l'influence du remplissage sur le comportement mécanique, six **niveaux de taux de remplissage (infill density)** ont été testés : **0 % (creux)**, **10 %**, **30 %** et **100 % (plein)**, ce qui couvre l'ensemble des plages généralement utilisées dans l'industrie [24].

Deux **types de motifs de remplissage** ont été choisis pour leur popularité et leur intérêt structurel :

- **Motif hexagonal** (type nid d'abeilles), connu pour son bon rapport résistance/poids [25],
- **Motif en grille cartésienne (grid)**, simple à générer et souvent utilisé dans les pièces fonctionnelles [27].

Cette géométrie a été sélectionnée pour sa simplicité de fabrication et sa capacité à faire varier les propriétés mécaniques en modifiant uniquement le remplissage, ce qui permet une **analyse comparative fiable** dans les simulations numériques.

4.5 Hypothèses de modélisation

Les principales hypothèses de la résistance des matériaux sont les suivantes:

- L'homogénéité, l'isotropie et la continuité du matériau : On suppose que le matériau possède les mêmes propriétés élastiques en tous les points du corps, dans toutes les directions en un point quelconque du corps, et que le matériau est assimilé à un milieu continu [28].
- L'élasticité et la linéarité du matériau: On suppose admet qu'en chaque point contraintes et déformations sont proportionnelles et qu'après déformation, l'élément revient à son état initiale [29].
- La petitesse des déformations : les déformations dues aux charges sont négligeables par rapport aux dimensions des éléments et la configuration géométrique reste inchangée [13].
- Hypothèse des sections planes (hypothèse de Navier-Bernoulli): Les sections droites restent planes et normales à la fibre moyenne au cours de la déformation.

- Hypothèse de Saint Venant : Tous les efforts qui interviennent dans la théorie peuvent être schématisés par leur torseur résultant.

4.6 Rétroconception et choix des types de remplissage

4.6.1 Méthodologie de rétroconception

La rétroconception (reverse engineering) est une étape clé lorsqu'il s'agit de modifier ou d'optimiser une pièce existante pour laquelle les modèles CAO originaux ne sont pas disponibles ou ne sont pas adaptés aux nouvelles exigences [32].

Objectif de la Rétroconception : L'objectif principal de cette démarche est de reconstituer un modèle numérique 3D précis des pièces sélectionnées à partir de leurs formes physiques existantes [32]. Cela permet d'obtenir une base CAO exploitable pour les analyses numériques (FEM) et pour la préparation à la fabrication additive [33].

Outils et Techniques d'Acquisition de Données : Plusieurs techniques peuvent être employées [32]. La méthode privilégiée sera le **scanner 3D**, qui permet une acquisition rapide et dense de points ou de maillages surfaciques (STL) de la pièce, capturant sa géométrie complexe [34]. Des outils de mesure conventionnels (pied à coulisse, micromètre, comparateur) seront utilisés pour vérifier les dimensions critiques et compléter les données si nécessaire [32].

Traitement des Données et Modélisation CAO : Le nuage de points ou le maillage STL obtenu sera ensuite importé dans un logiciel de CAO (par exemple, SolidWorks, Catia, Fusion 360, ..) [33]. Les étapes incluront le nettoyage et le lissage du scan, l'alignement du modèle dans un système de coordonnées, la segmentation et la reconnaissance des formes géométriques primitives, et enfin la création d'un modèle paramétrique solide [33].

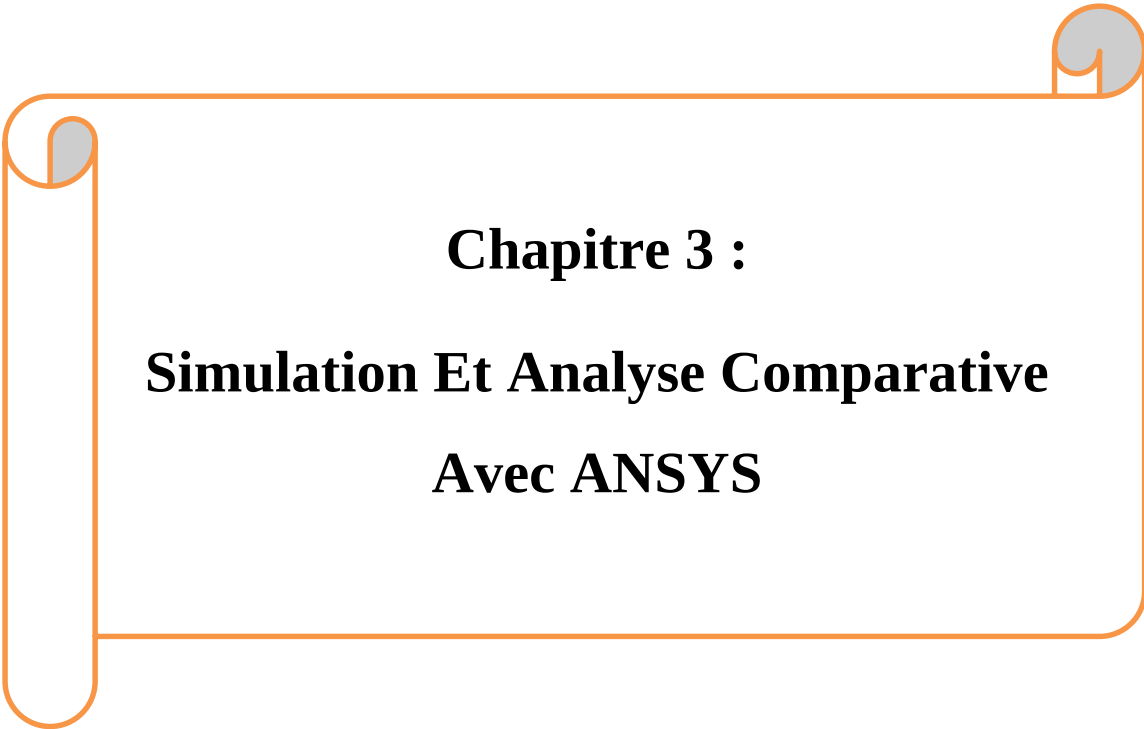
4.6.2 Présentation des motifs de remplissage retenus

Dans le contexte de la fabrication additive par dépôt de fil fondu (FDM) ou techniques similaires, le motif de remplissage (infill pattern) est un paramètre crucial influençant la masse, le temps d'impression et surtout les propriétés mécaniques de la pièce [36].

Concept du Remplissage : Le remplissage désigne la structure interne de la pièce imprimée en 3D [36]. Contrairement aux pièces usinées qui sont généralement massives, les pièces imprimées peuvent avoir une structure interne contrôlée pour optimiser le rapport résistance/poids [37].

Sélection des Motifs : Plusieurs motifs de remplissage seront étudiés en raison de leurs caractéristiques distinctes et de leur pertinence vis-à-vis des sollicitations mécaniques anticipées [38]. Les motifs typiquement considérés incluent :

- **Grille (Grid) / Quadrillage :** Offre une meilleure résistance bidirectionnelle par rapport au rectiligne [40].
- **Nid d'abeille (Honeycomb) / Hexagonal :** Fournit une excellente résistance isotrope dans le plan XY, ainsi qu'une bonne rigidité et une utilisation efficace du matériau [39].
- **Gyroid :** Une structure triplement périodique minimale (TPMS) sans intersection, offrant un bon drainage et des potentiels avantages pour la résistance aux chocs et l'isolation [41]

The title is enclosed in a decorative orange border that resembles a scroll. The border has rounded corners and a vertical strip on the left side, with small circular details at the top and bottom corners.

Chapitre 3 :

Simulation Et Analyse Comparative

Avec ANSYS

5 CHAPIRE III

5.1 Introduction :

Ce chapitre présente les différentes simulations mécaniques réalisées à l'aide du logiciel ANSYS 2022 R2 – APDL. L'objectif est de comparer les performances mécaniques des pièces avec différents motifs internes : **hexagonal** et **grille (grid)**, en fonction de plusieurs taux de remplissage (0 %, 10 %, 30 %, 100 %) sur le comportement mécanique de pièces imprimées en 3D. Les sollicitations étudiées sont : **traction**, **compression**, **flexion**, et **torsion**, représentatives des efforts subis dans des applications réelles.

Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- **Matériau utilisé** : ABS, modélisé comme un matériau isotrope et élastique, avec :
 - Module d'Young : 2100 MPa,
 - Coefficient de Poisson : 0,35,
 - Densité : 1240 kg/m³ [42].
- **Dimensions de la pièce** :
 - Longueur : 300 mm,
 - Largeur : 100 mm,
 - Épaisseur : 10 mm,
 - Épaisseur des parois internes : 1,2 mm.
- **Motifs de remplissage testés** :
 - Hexagonal,
 - Grille (grid) [43][44].
- **Taux de remplissage** :
 - 0 %, 10 %, 30 %, 100 %.
- **Paramètres extraits des simulations** :
 - **Contrainte Equivalente**: C'est la contrainte équivalente combinant tous les types de contraintes pour détecter les zones critiques, exprimée en MPa.

- **Déformation Unitaire** : Mesure du taux de déformation locale dans le matériau sans unité.
- **Déformation Totale** : C'est le déplacement total subi par la pièce sous l'effet de la charge, exprimé en millimètres (mm).

5.2 Étude des sollicitations mécaniques

Chaque effort est simulé avec les mêmes conditions de base pour comparer les résultats selon le remplissage utilisé.

5.2.1 Simulation de la flexion

5.2.1.1 Objectif

La simulation en flexion a pour but d'évaluer le comportement des pièces imprimées en 3D lorsqu'elles sont soumises à un effort perpendiculaire à leur axe longitudinal, reproduisant un chargement en flexion pure. Cette sollicitation est fréquente dans les pièces structurales, notamment dans les panneaux de support, bras articulés, ou coques [42].

5.2.1.2 Mise en place dans ANSYS

La simulation a été effectuée sous **ANSYS 2022 R2 – APDL**, en utilisant le module « Static Structural ». La configuration choisie est celle d'un essai de flexion 3 points sur trois type de remplissage grille, hexagonale, linéaire:

- Deux appuis fixes (sur les extrémités inférieures de la pièce),
- Une force verticale appliquée au centre de la face supérieure,
- Les extrémités latérales restent libres.

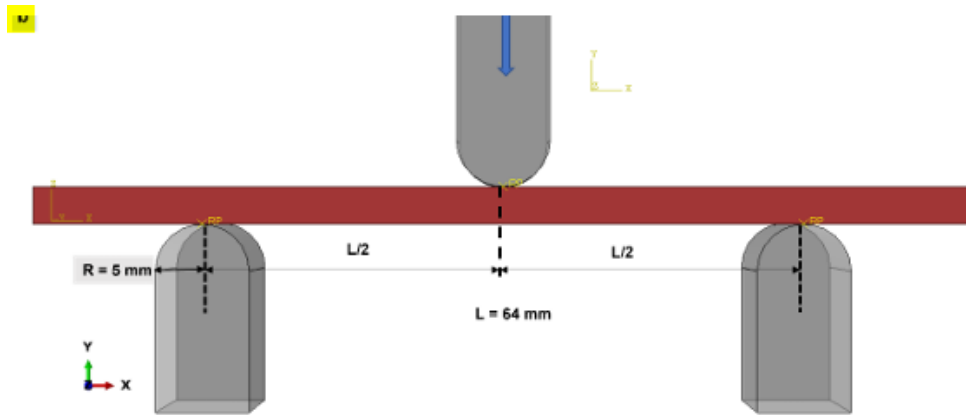


Figure 12 : Modèles numériques de éprouvettes -flexion 3 points-.

Évolution de la force appliquée

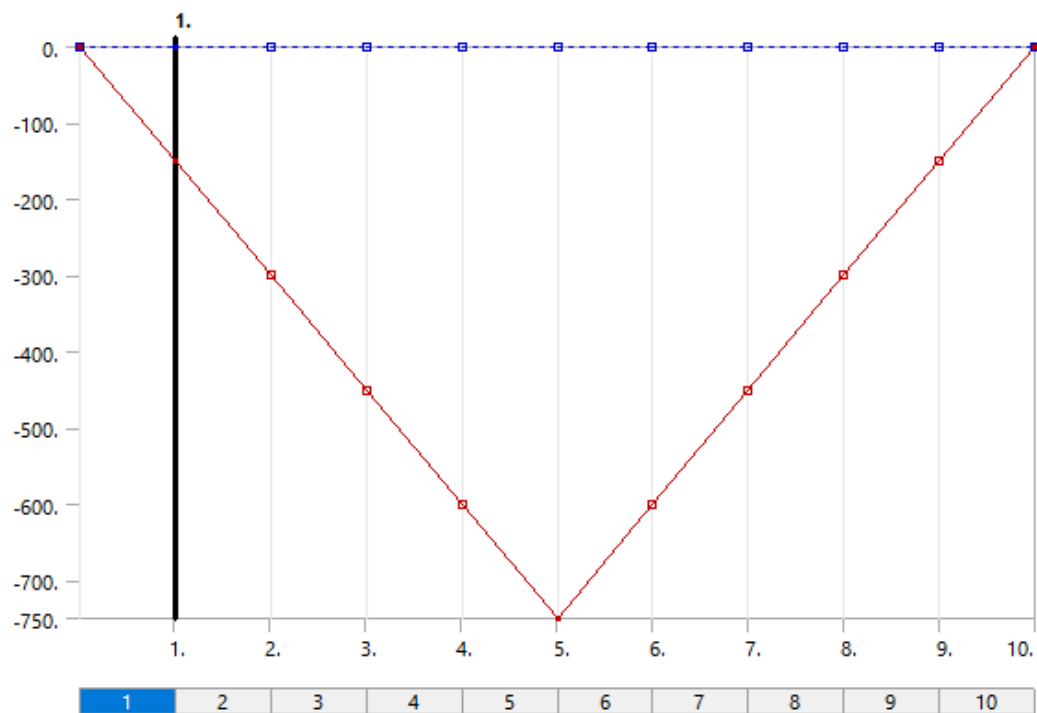


Figure 13 : Courbe de chargement monotone – Force appliquée (N)

La force appliquée diminue linéairement jusqu'à -750 N, puis remonte vers zéro selon un profil symétrique. Ce schéma en V est typique d'un chargement en flexion trois points appliqué de manière contrôlée sur une structure.

5.2.1.3 Résultats obtenus

❖ Taux de remplissage a : 0%

Volume	79252 mm ³
Mass	8.163e-002 kg

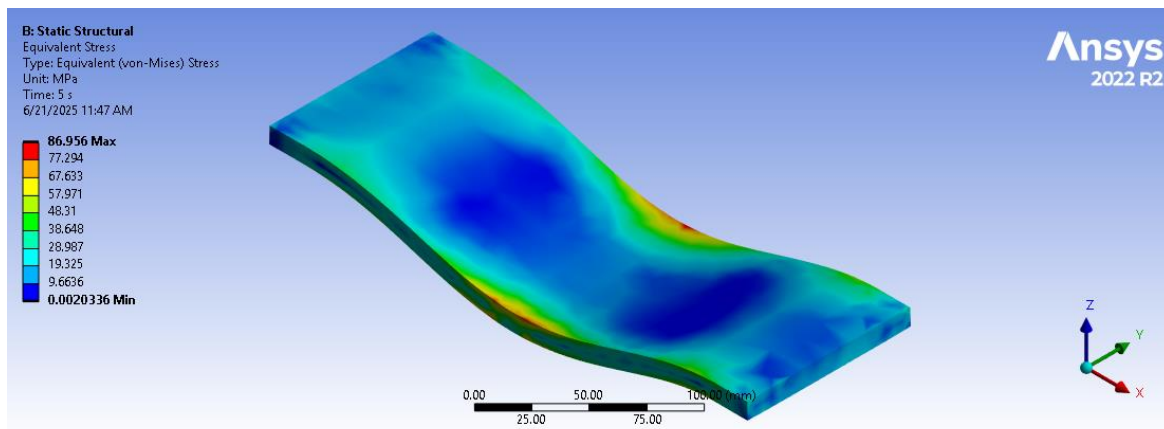


Figure 14 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en flexion 3 points

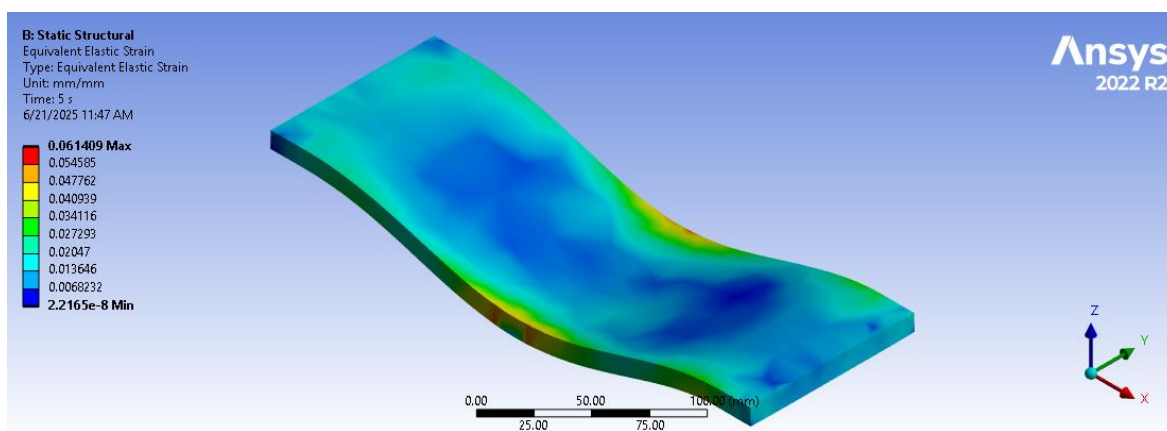


Figure 15 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points

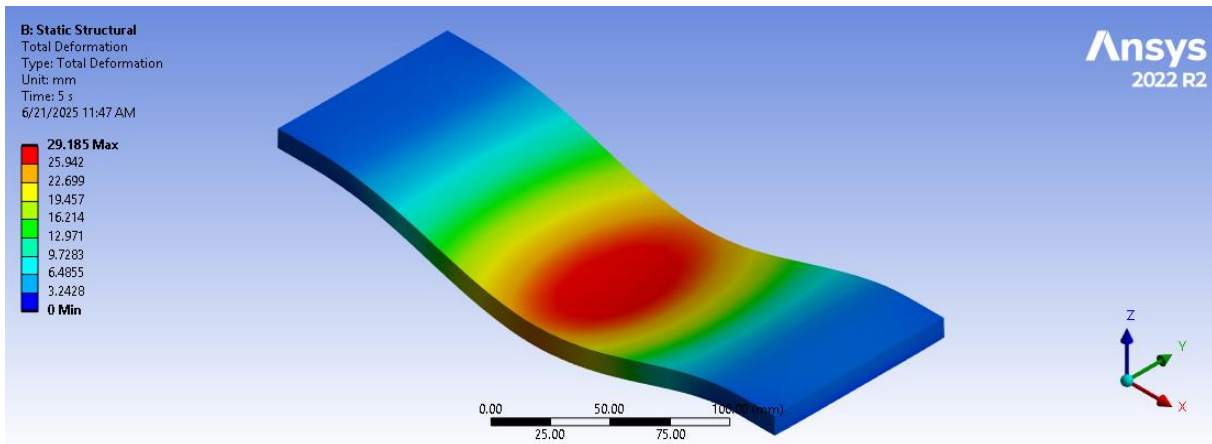


Figure 16 : Carte de Déformation Totale de la pièce en flexion 3 points

❖ Taux de remplissage a : 100%

Volume	3.9425e+005 mm ³
Mass	0.309 kg

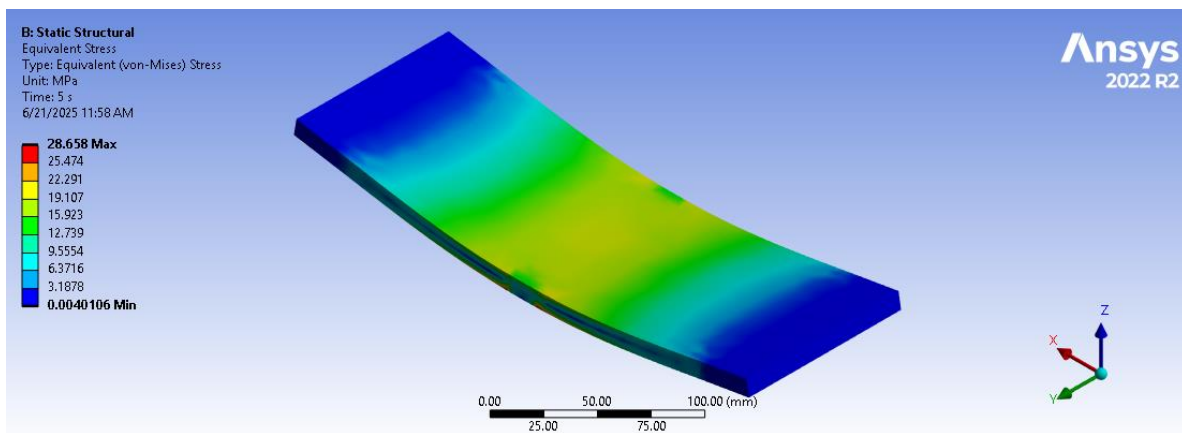


Figure 17 : Carte De Contrainte Equivalente de la pièce en flexion 3 points

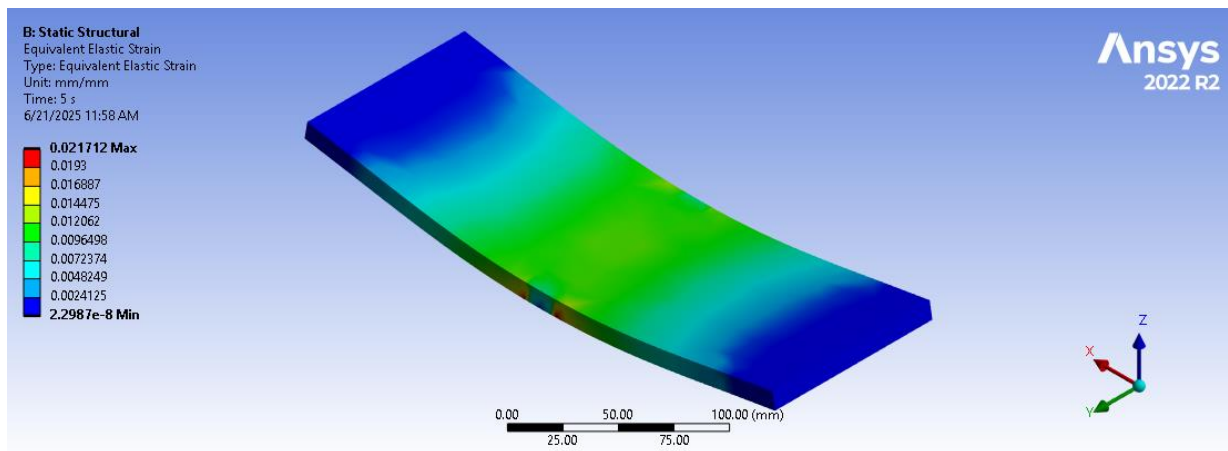


Figure 18 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points

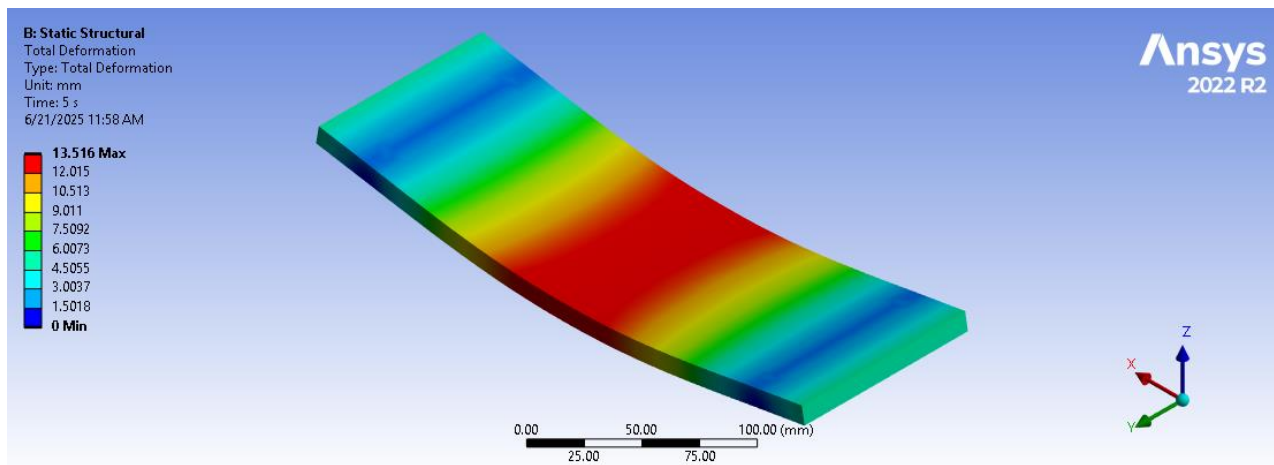


Figure 19 : Carte de Déformation Totale de la pièce en flexion 3 points

❖ Le type Hexagonale

❖ Taux de remplissage a : 10%

Volume	1.9239e+005 mm ³
Mass	0.101079kg

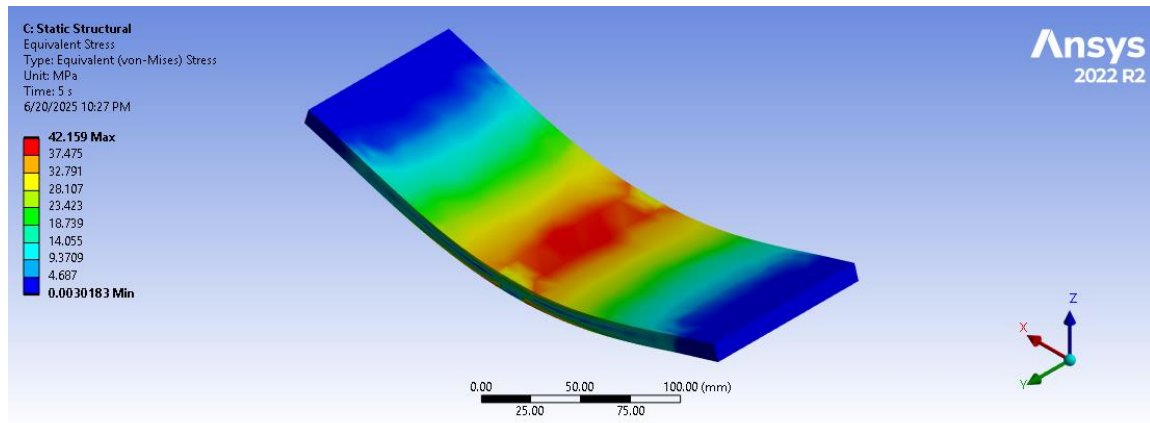


Figure 20 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en flexion 3 points

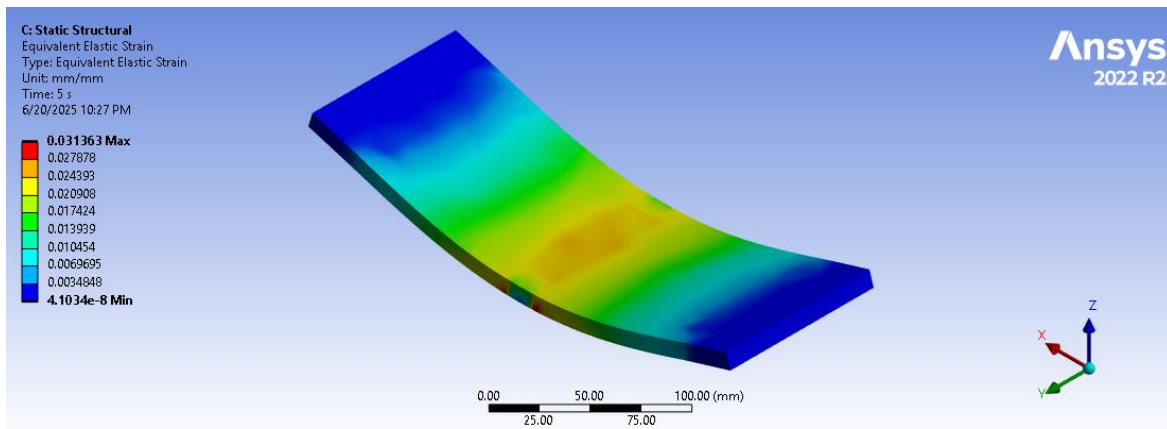


Figure 21 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points

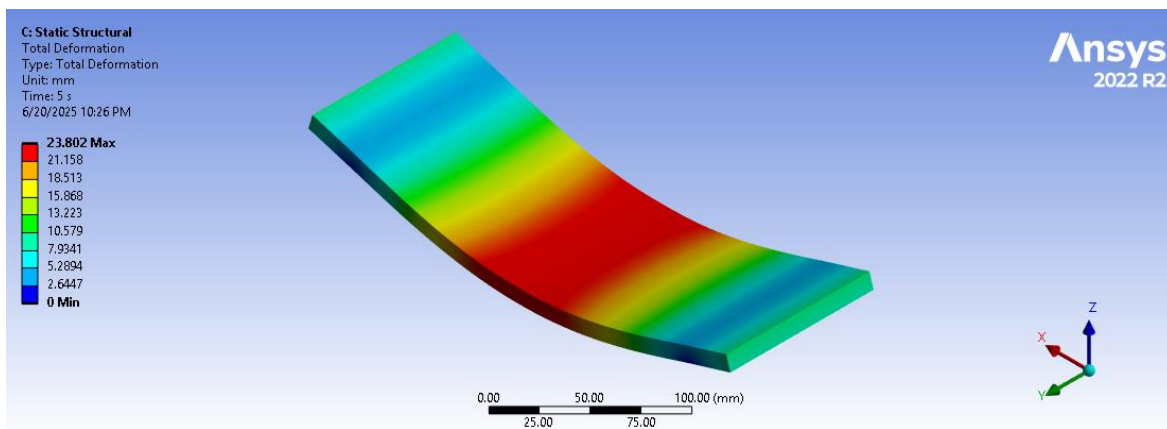


Figure 22 : Carte de Déformation Totale de la pièce en flexion 3 points

❖ Taux de remplissage a : 30%

Volume	2.3324e+005 mm ³
Mass	0.88303 kg

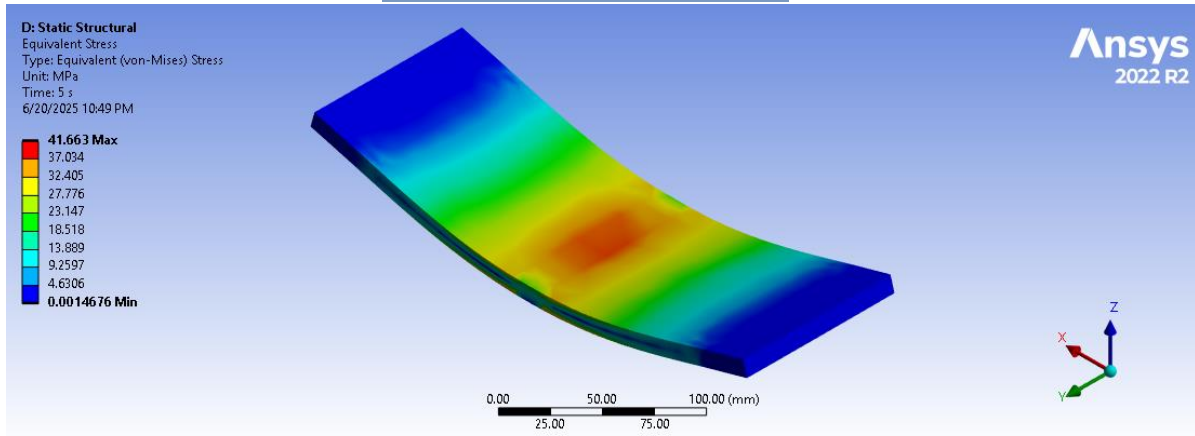


Figure 23 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en flexion 3 points

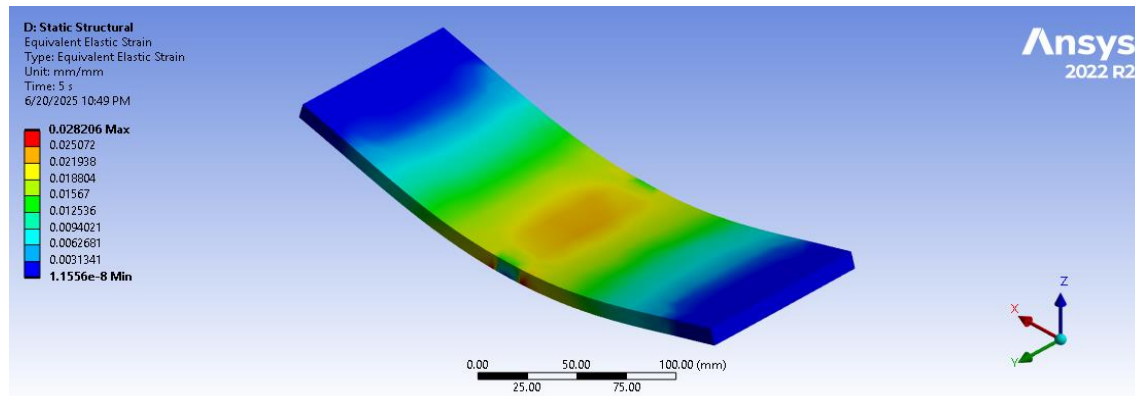


Figure 24 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points

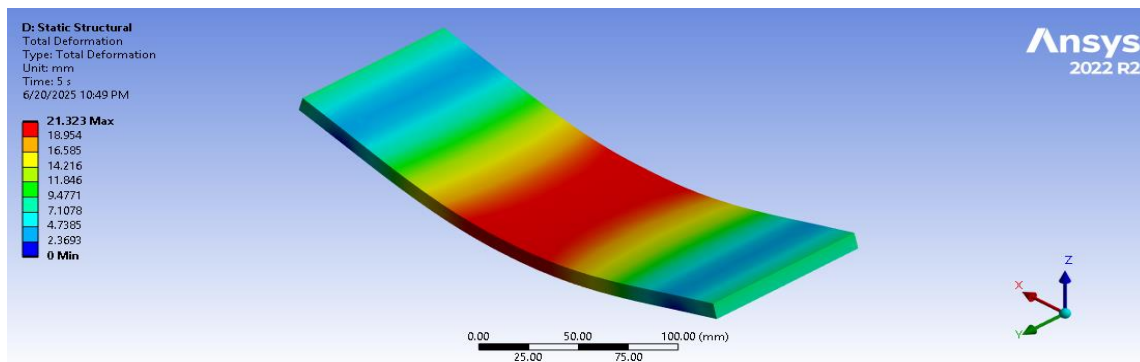


Figure 25 : Carte de Déformation Totale de la pièce en flexion 3 points

Résultats – Essai de Flexion – Motif Hexagonal

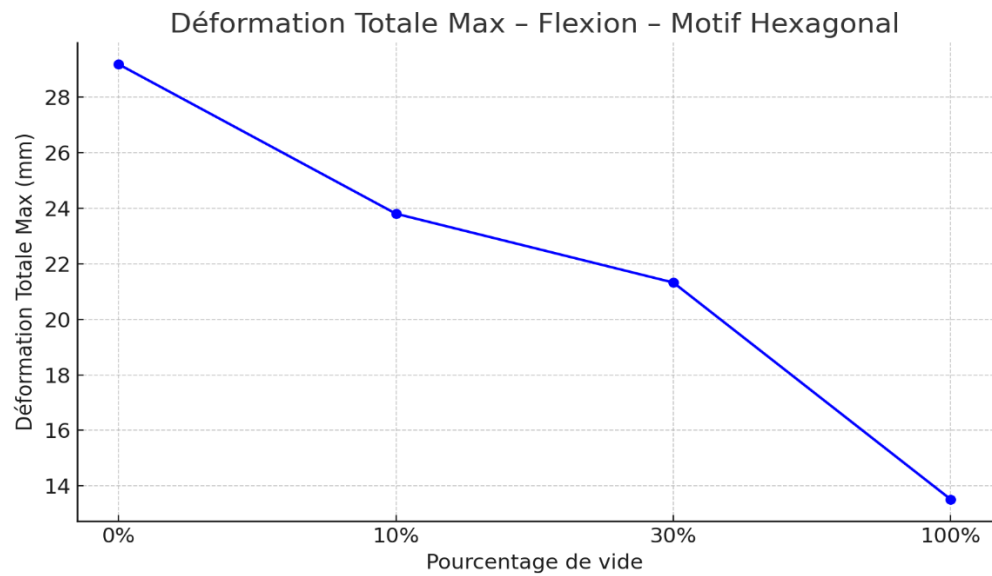


Figure 26 : Déformation Totale Max – Flexion – Motif Hexagonal

La déformation diminue de façon continue avec le taux de remplissage, indiquant une amélioration progressive de la rigidité structurale.

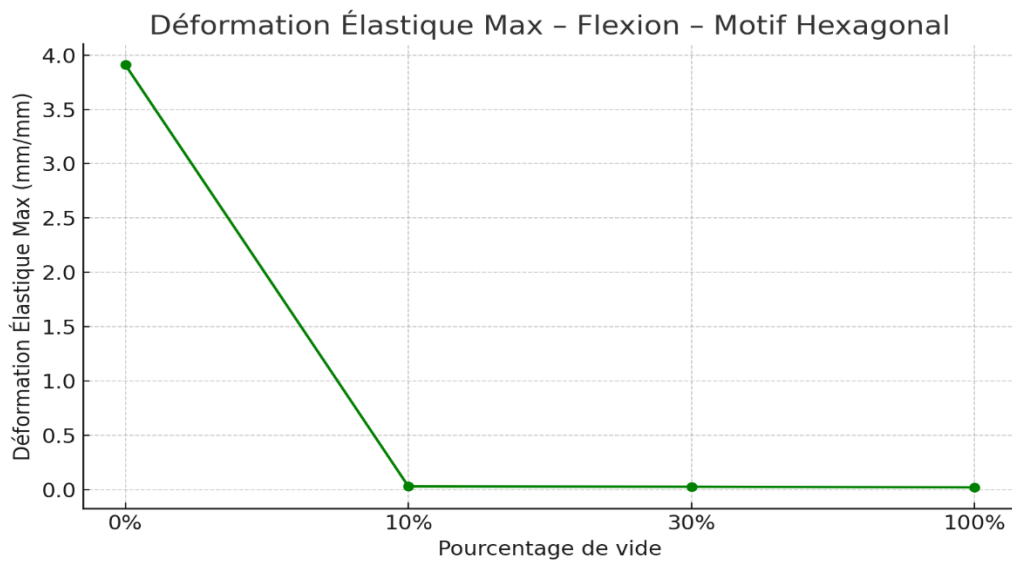


Figure 27 : Déformation Élastique Max – Flexion – Motif Hexagonal

La déformation élastique décroît rapidement, ce qui reflète une réduction significative de la sollicitation interne.

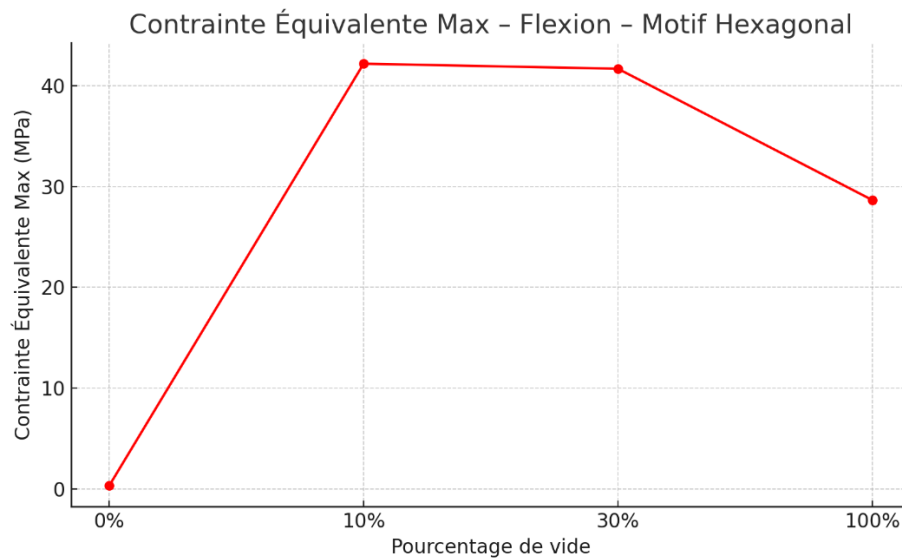


Figure 28 : Contrainte Équivalente Max – Flexion – Motif Hexagonal

La contrainte augmente fortement entre 0 % et 10 %, puis se stabilise avant de chuter à 100 %, ce qui montre un pic d'efficacité mécanique autour de 10 à 30 %.

Analyse des résultats:

Taux de Remplissage (%)	Déformation Totale Max (mm)	Déformation Élastique Équiv. Max (mm/mm)	Contrainte Équivalente Max (MPa)
0 %	29.185	3.9101	0.36321
10 %	23.802	3.1363e-2	42.159
30 %	21.323	2.8206e-2	41.663
100 %	13.516	2.1712e-2	28.658

- La **déformation totale maximale** est très élevée à 0 % (29.185 mm), ce qui reflète une structure sans rigidité. Cette valeur diminue progressivement avec l'augmentation du taux de remplissage, atteignant 13.516 mm à 100 %.
- La **déformation élastique équivalente** suit la même tendance : elle est extrêmement élevée à 0 % (3.9101 mm/mm), puis diminue significativement pour se stabiliser autour de 2.17×10^{-2} mm/mm à 100 %.
- La **contrainte équivalente de von Mises** montre une évolution inverse. Très faible à 0 % (0.36 MPa), elle augmente fortement à 10 % (42.159 MPa), reste stable jusqu'à 30 %, puis diminue à nouveau à 100 %.

Ces résultats montrent que le motif hexagonal devient mécaniquement plus performant dès 10 % de remplissage, en augmentant sa capacité à résister à la flexion, tout en réduisant la déformation.

- **Le type Grille :**

❖ Taux de remplissage a : 10%

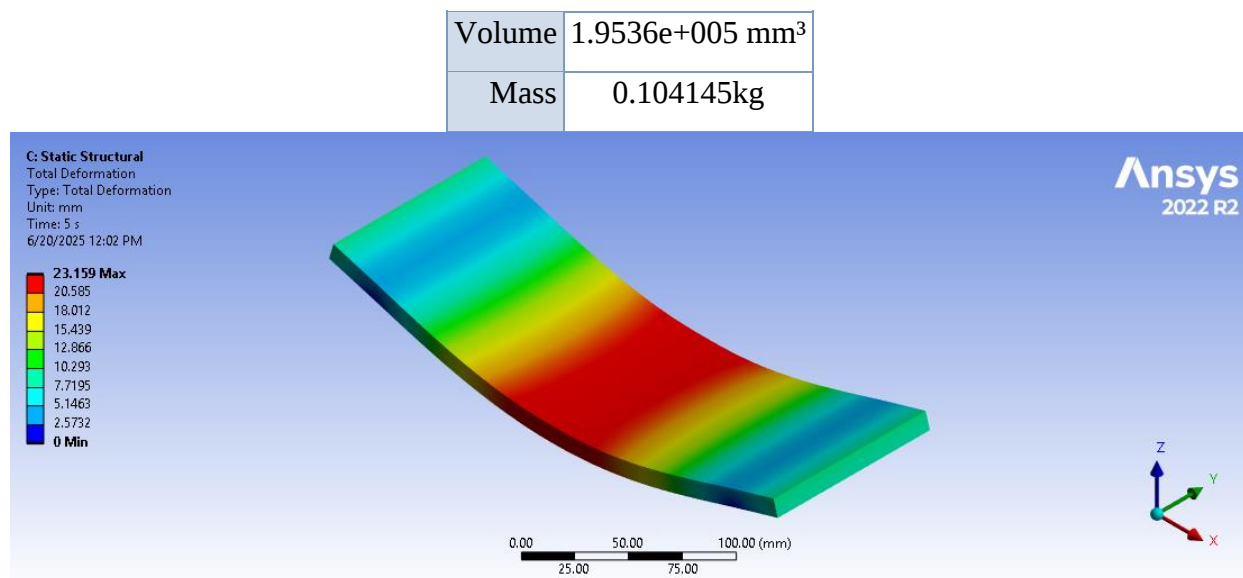


Figure 29 : Carte de déformation totale de la pièce en flexion 3 points

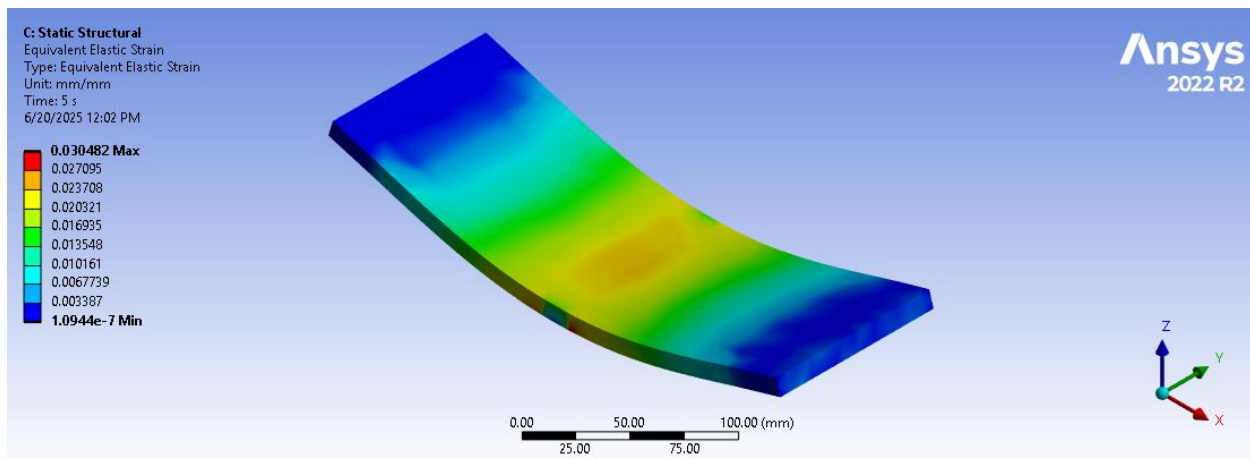


Figure 30 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points

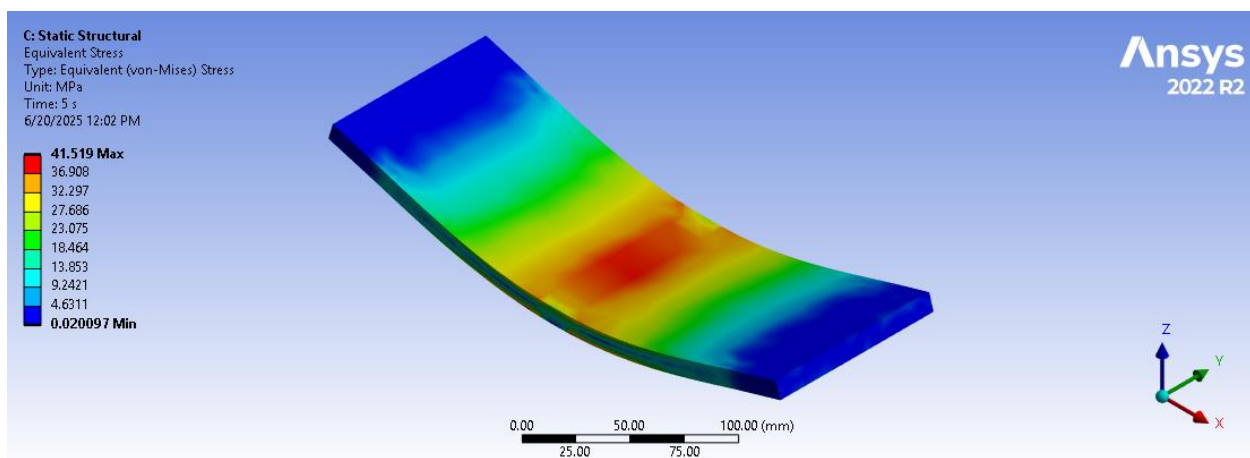


Figure 31 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en flexion 3 points

- Taux de remplissage a : 30%

Volume	2.387e+005 mm ³
Mass	0.148783kg

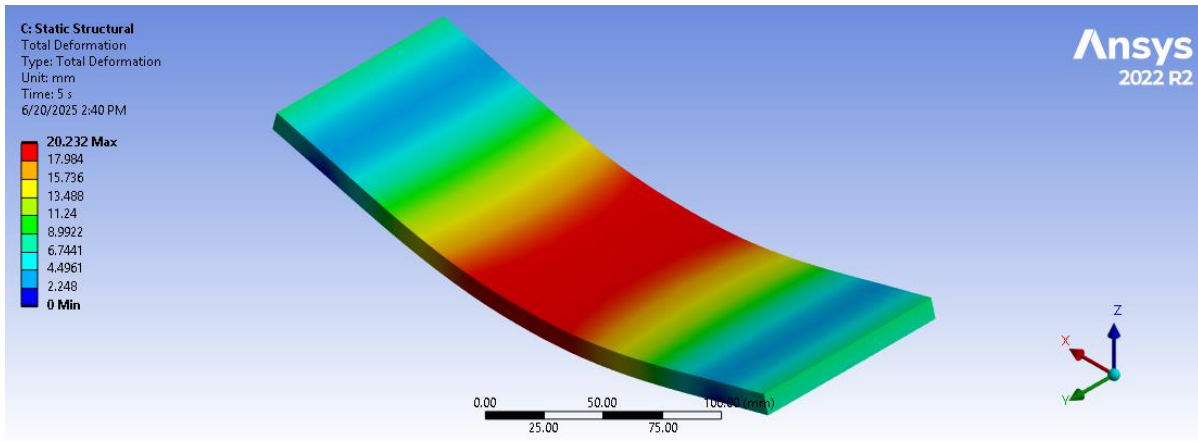


Figure 32 : Carte de déformation totale de la pièce en flexion 3 points

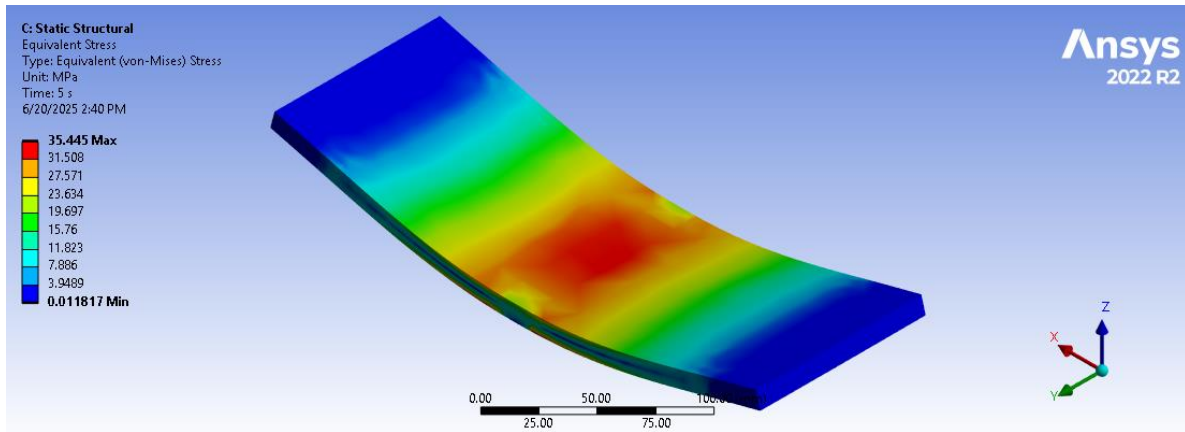


Figure 33 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en flexion 3 points

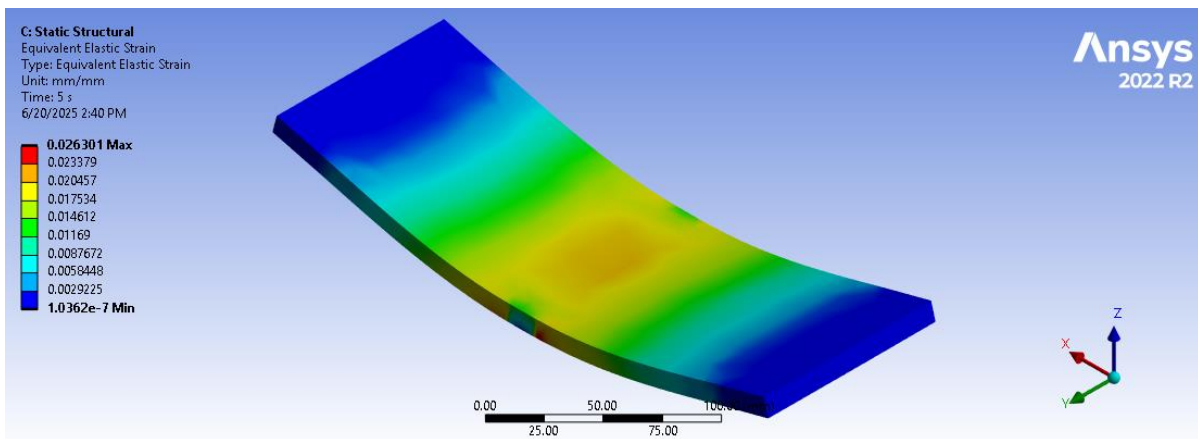


Figure 34 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en flexion 3 points

Résultats – Essai de Flexion – Motif Grille

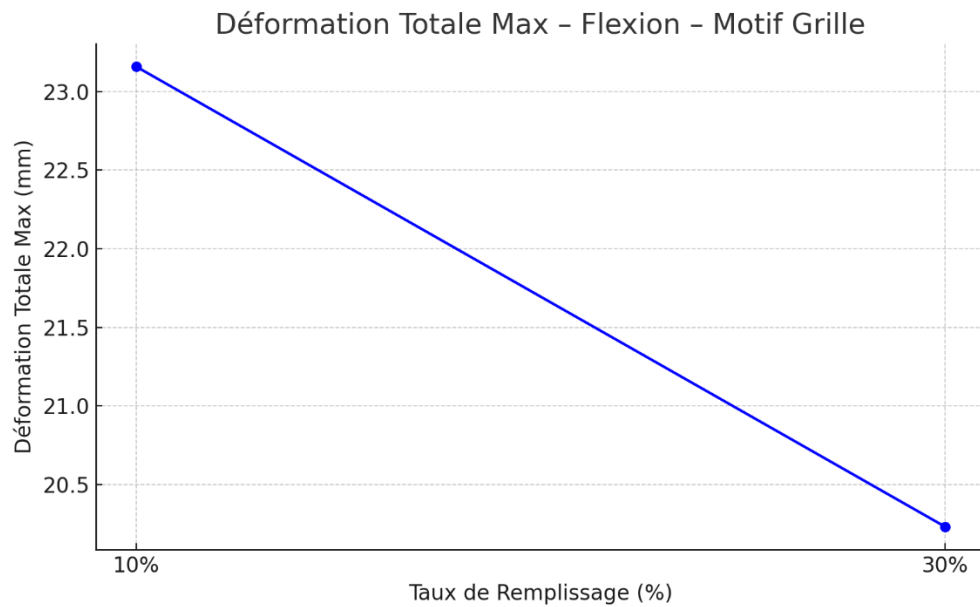


Figure 35 : Déformation Totale Max – Flexion – Motif Grille

La déformation totale montre une diminution modérée, indiquant un effet stabilisant du taux de remplissage sur la souplesse de la structure.

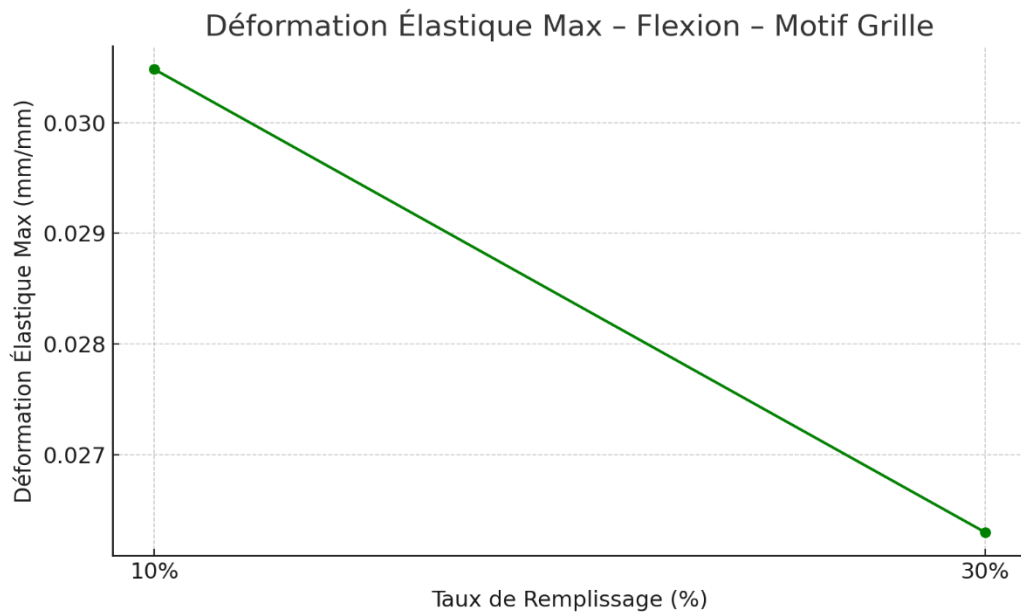


Figure 36 : Déformation Élastique Max – Flexion – Motif Grille

Une réduction sensible de la déformation élastique est observée, signalant une meilleure tenue mécanique à 30 %.

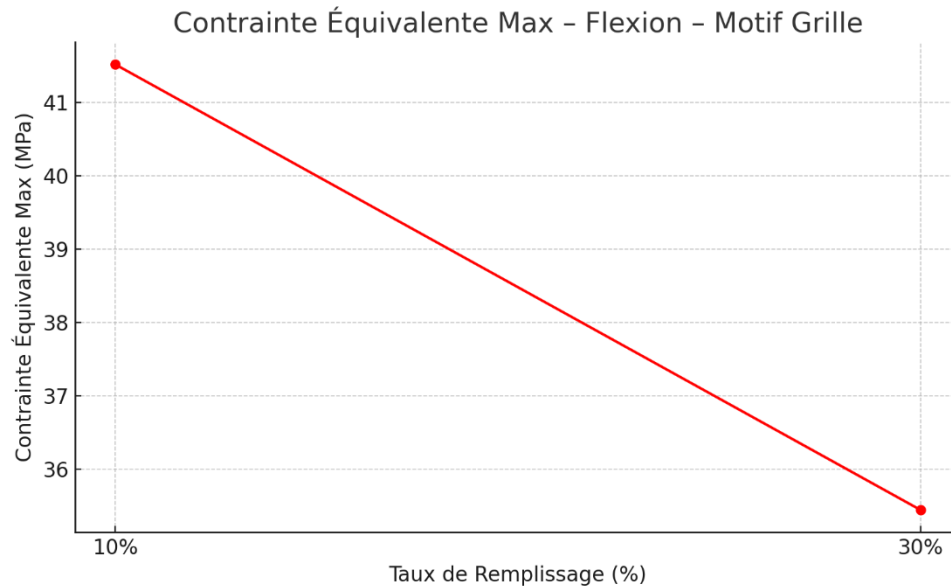


Figure 37 : Contrainte Équivalente Max – Flexion – Motif Grille

La contrainte équivalente diminue entre 10 % et 30 %, ce qui traduit un allègement local des efforts internes.

Analyse des résultats

Taux de Remplissage (%)	Déformation Totale Max (mm)	Déformation Élastique Max (mm/mm)	Contrainte Équivalente Max (MPa)
10 %	23.159	3.0482e-2	41.519
30 %	20.232	2.6301e-2	35.445

- La **déformation totale maximale** diminue légèrement entre 10 % et 30 %, ce qui traduit un gain en rigidité du motif avec l'augmentation du remplissage.
- La **déformation élastique équivalente** suit la même tendance, en passant de 3.0482e-2 mm/mm à 2.6301e-2 mm/mm, indiquant une réduction du comportement déformable.

- La **contrainte équivalente de von Mises** diminue aussi (de 41.5 MPa à 35.4 MPa), ce qui peut traduire une meilleure distribution des efforts et moins de concentrations de contraintes à 30 %.

En résumé : contrairement au motif hexagonal, la géométrie grille conserve un bon compromis rigidité/déformation dès 10 %, mais montre une atténuation globale des sollicitations à 30 %.

5.2.2 Simulation de la traction

5.2.2.1 Objectif

Cette simulation vise à étudier la réponse mécanique des pièces imprimées en 3D soumises à un effort de traction. Cela permet d'évaluer leur résistance à l'allongement, la distribution des contraintes, et la rigidité longitudinale selon le motif et le taux de remplissage [1].

Évolution de la force appliquée :

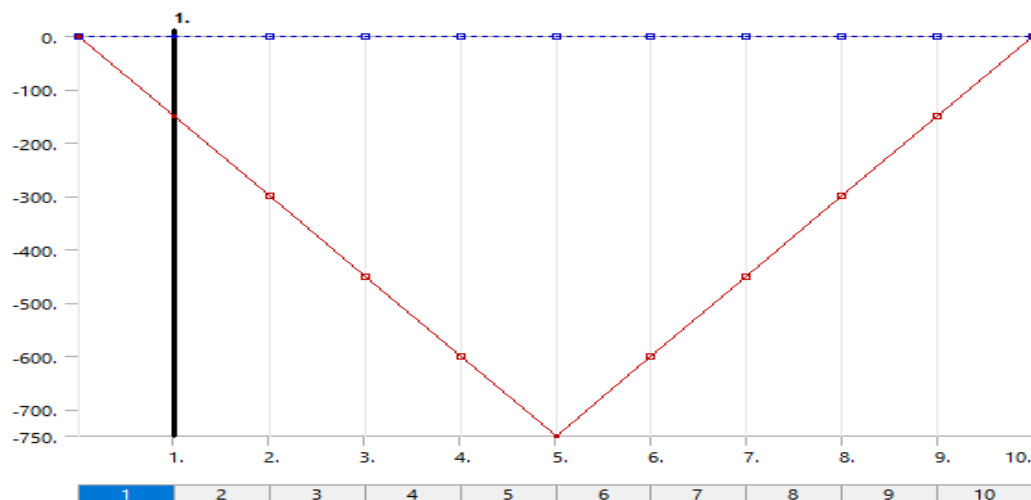


Figure 38: Courbe de chargement monotone – Force appliquée (N)

La force appliquée croît puis décroît linéairement selon un profil en triangle, atteignant un pic à 750 N. Ce type de chargement monotone est représentatif d'un essai de traction uniaxiale simulé.

5.2.2.2 Mise en place dans ANSYS

- **Type de simulation :** Static Structural

- **Conditions de chargement :**

- Une face fixée (immobile),
- Une force axiale appliquée sur la face opposée, dans le sens longitudinal (axe X).

5.2.2.3 Résultats obtenus

❖ **Taux de remplissage a : 0%**

Volume	1.825e+005 mm ³
Mass	0.71633kg

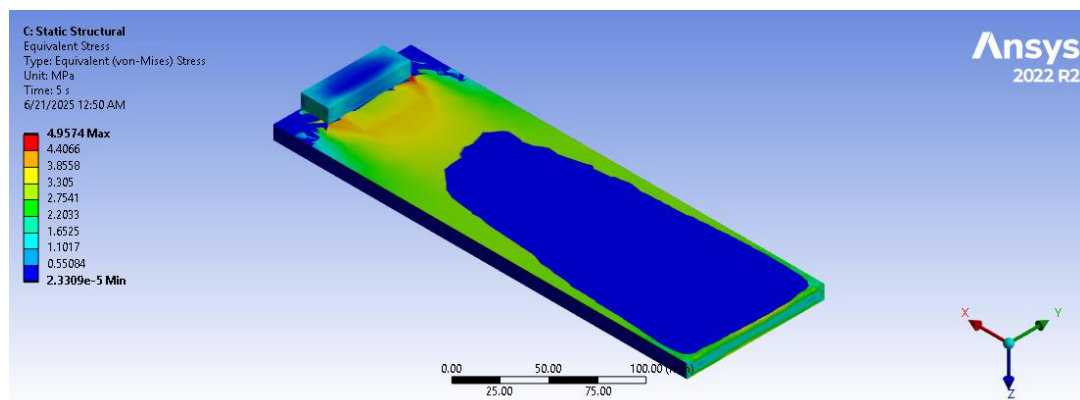


Figure 39 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en traction

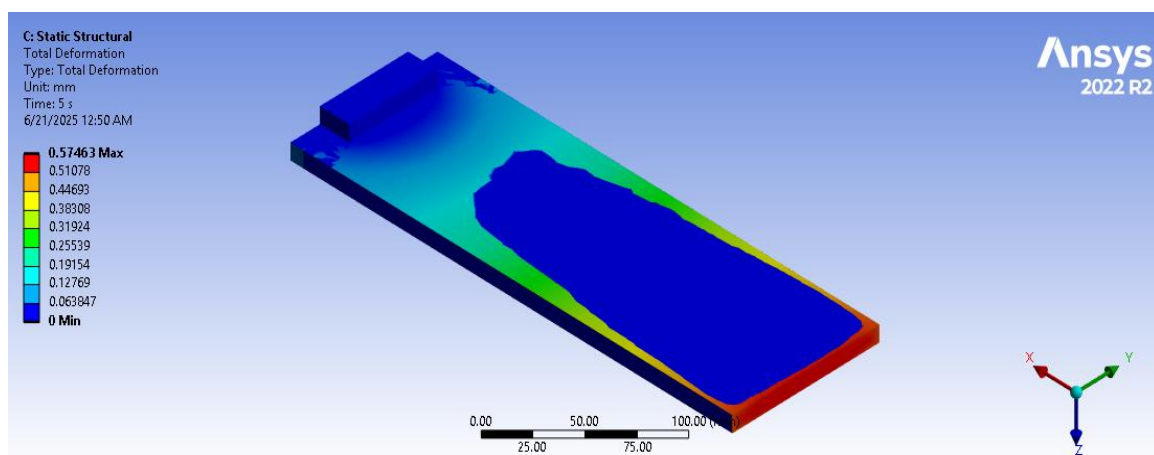


Figure 40 : Carte de déformation totale de la pièce en traction

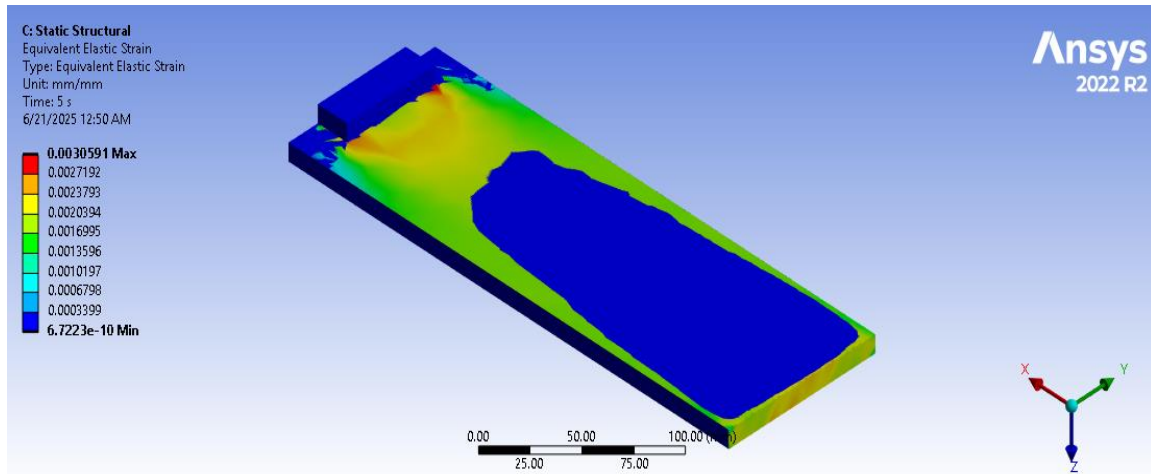


Figure 41 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction

❖ Taux de remplissage a : 100%

Volume	4.0325e+005 mm ³
Mass	0.0000309kg

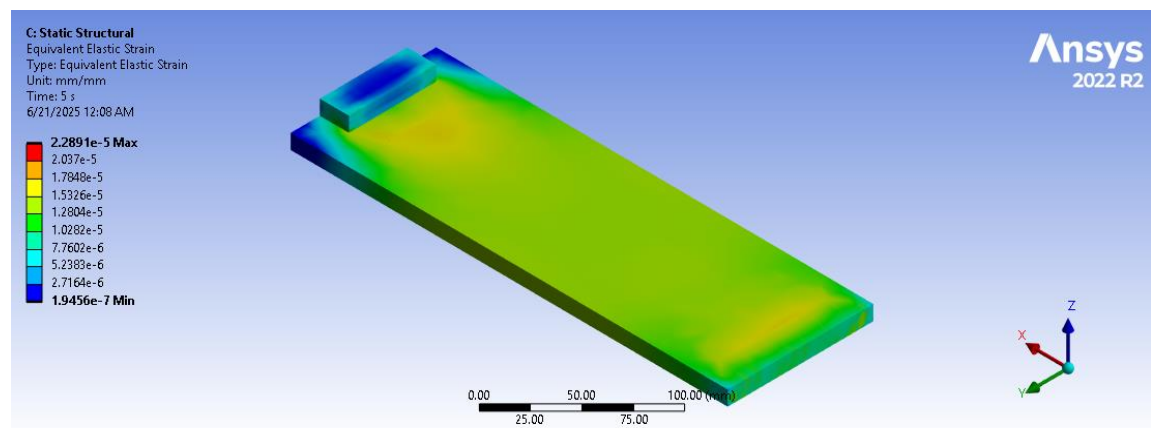


Figure 42 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction

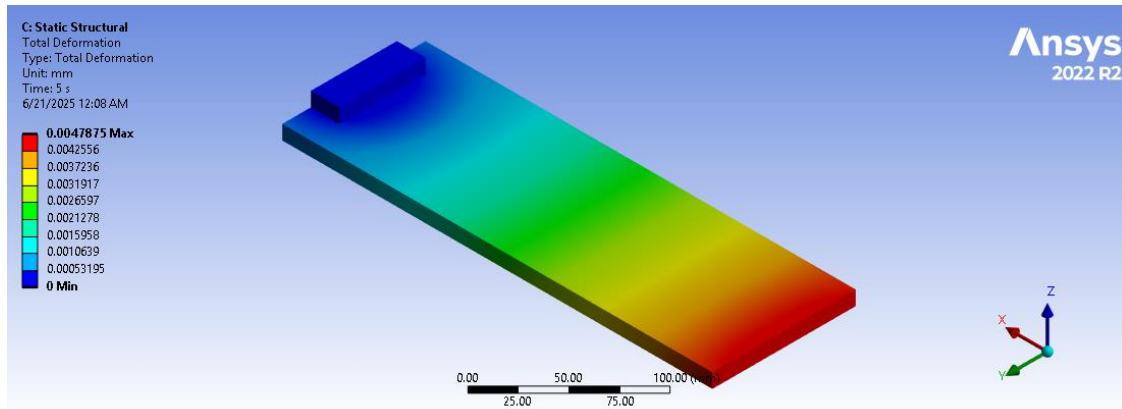


Figure 43 : Carte de déformation totale de la pièce en traction

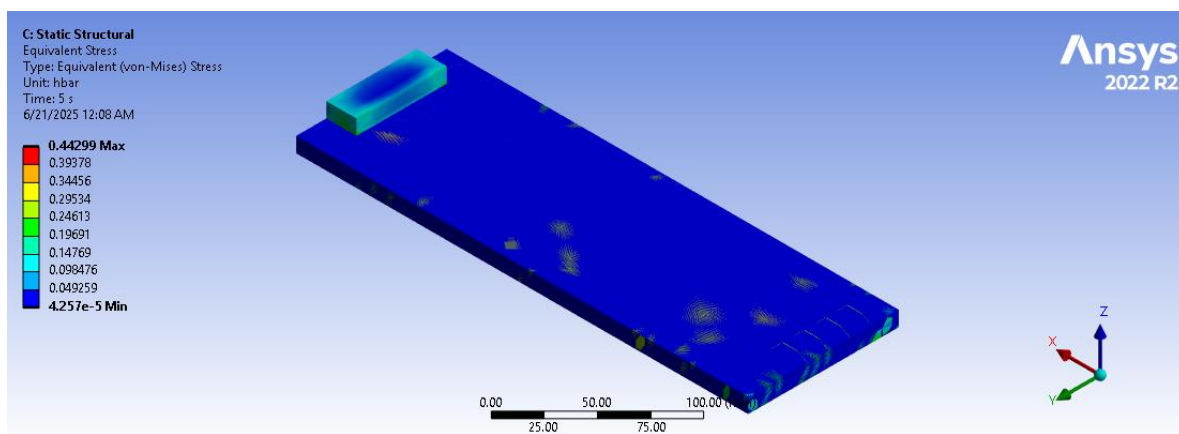


Figure 44 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en traction

❖ Le type hexagonale :

Cette section présente l'impact du taux de remplissage sur le comportement mécanique d'une éprouvette imprimée avec un motif hexagonal soumise à une traction uniaxiale. Les résultats extraits sont regroupés dans le tableau suivant :

❖ Taux de remplissage a 10%

Volume	2.0139e+005 mm ³
Mass	0.000071633kg

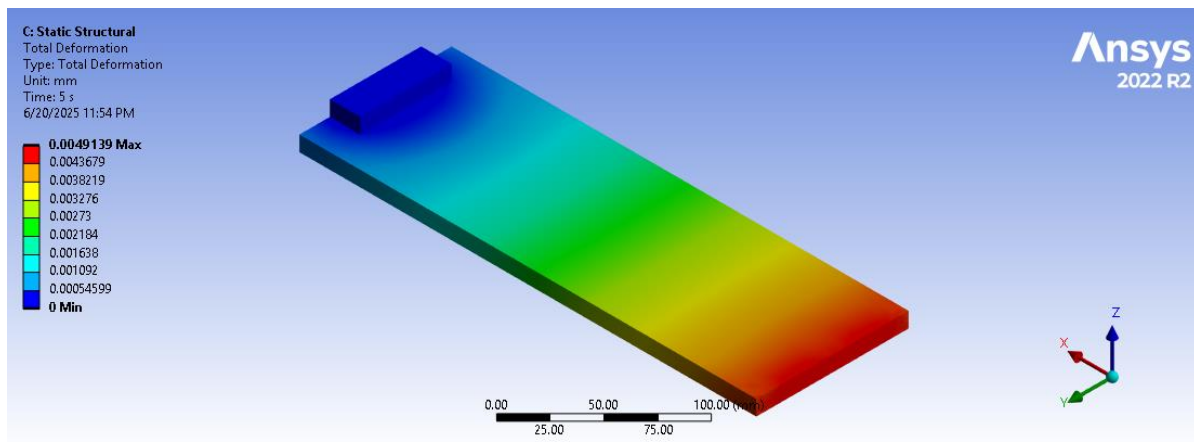


Figure 45 : Carte de déformation totale de la pièce en traction

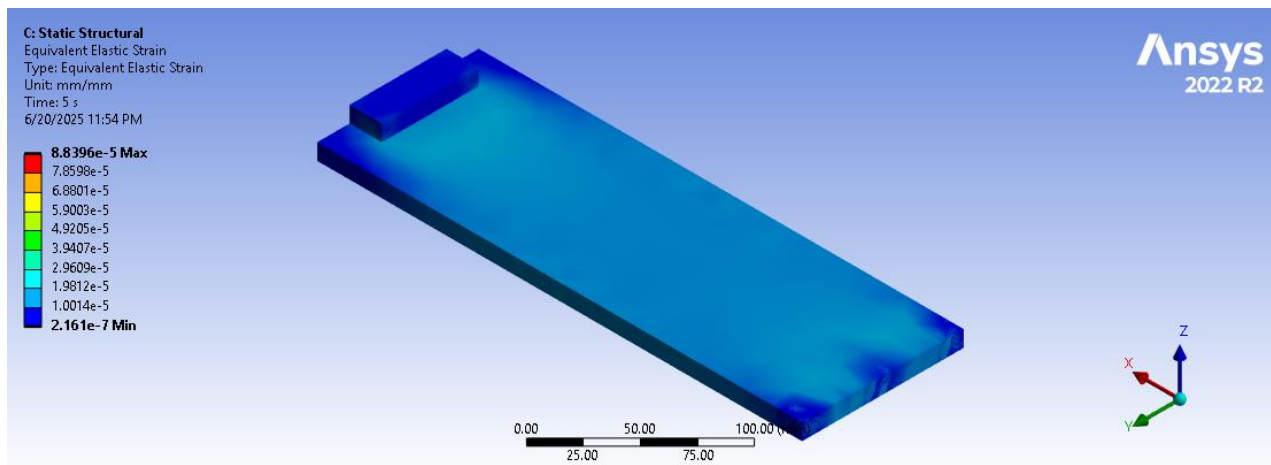


Figure 46 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction

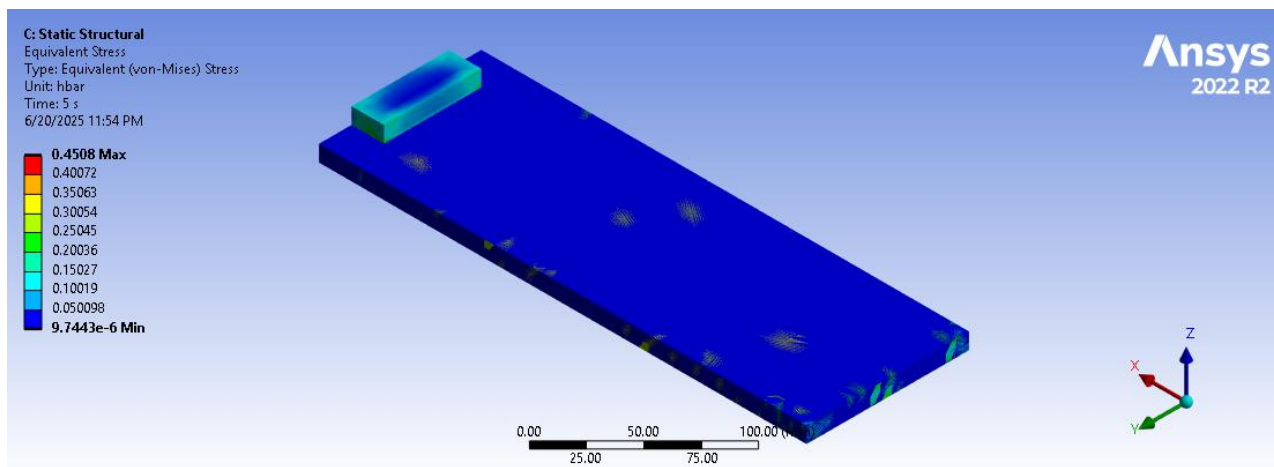


Figure 47 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en traction

❖ Taux de remplissage a : 30%

Volume	2.4224e+005 mm ³
Mass	0.000014316kg

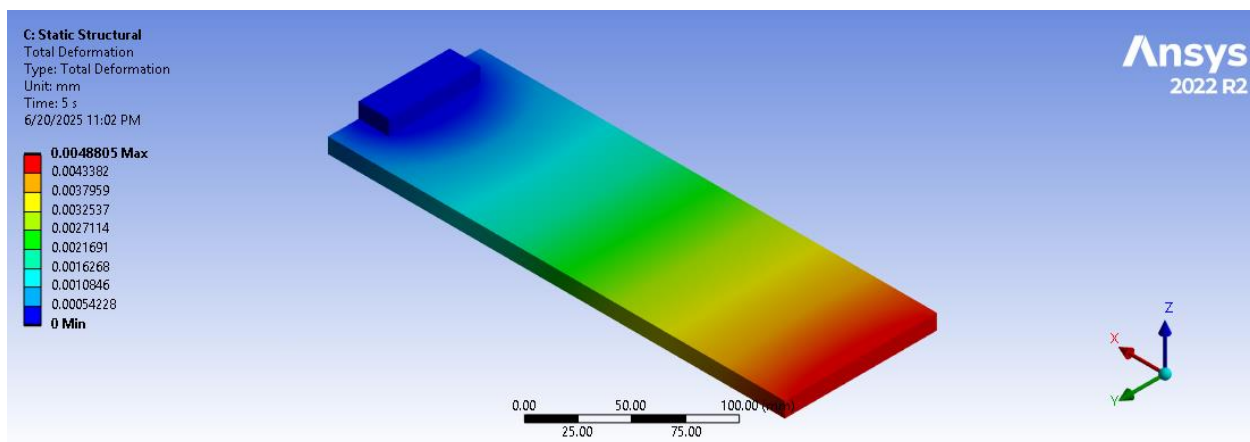


Figure 48 : Carte de déformation totale de la pièce en traction

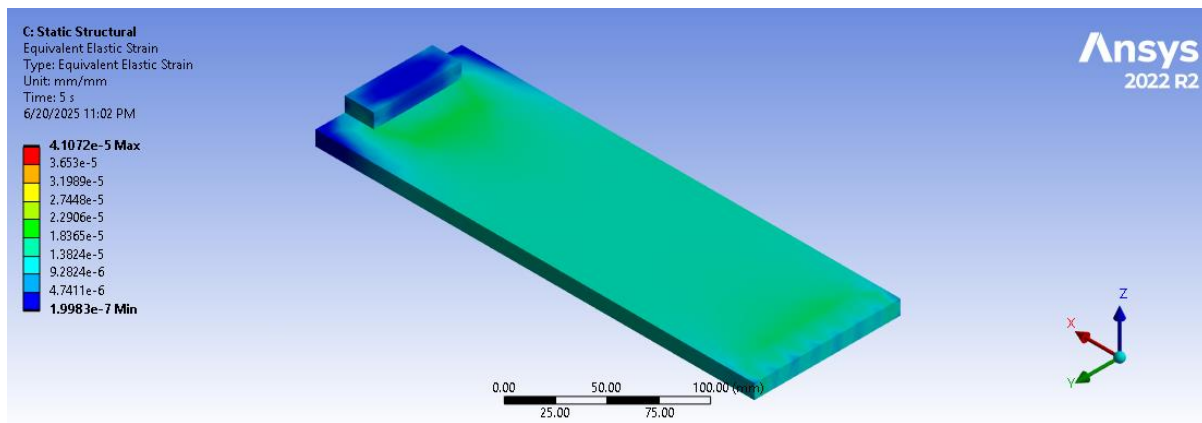


Figure 49 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction

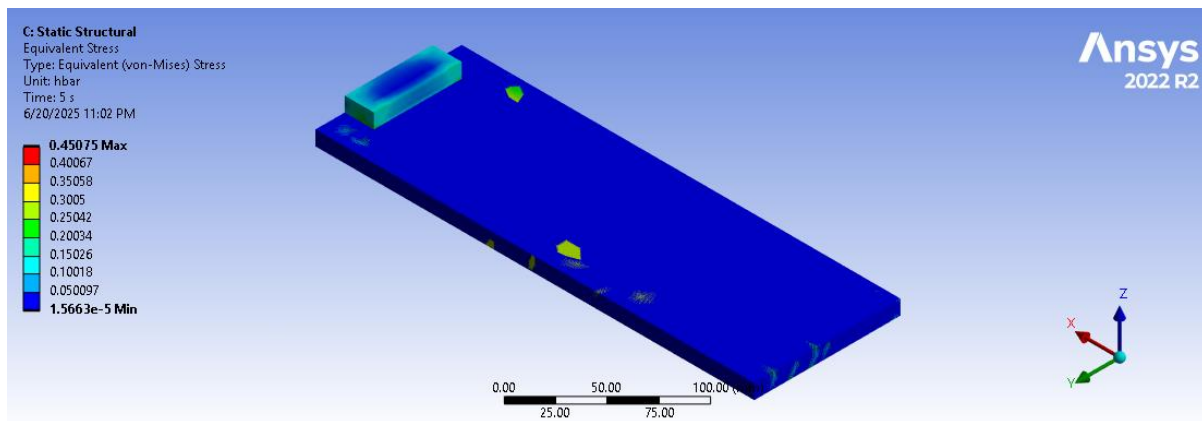


Figure 50 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en traction

Résultats – Traction – Motif Hexagonal

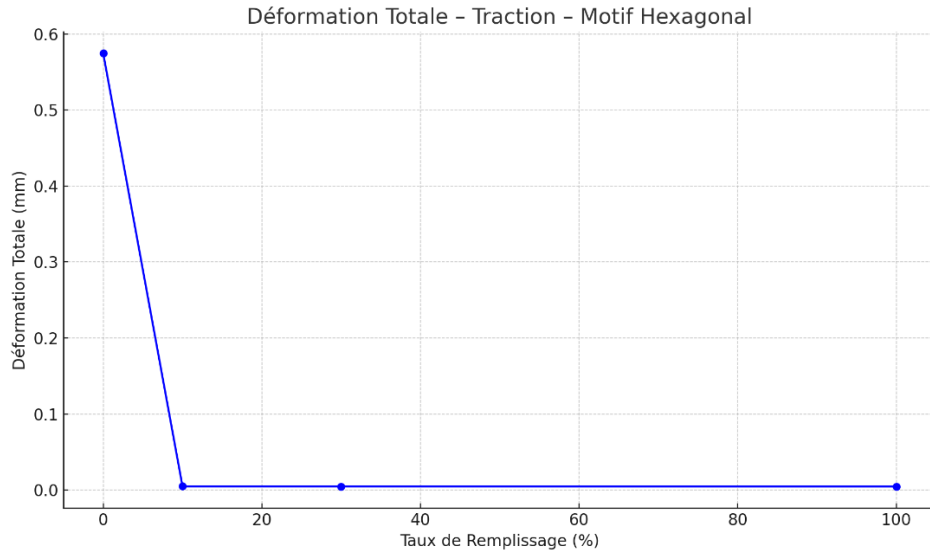


Figure 51 : Déformation Totale – Traction – Motif Hexagonal

La déformation chute brutalement entre 0 % et 10 %, traduisant une nette amélioration de la rigidité dès un faible taux de remplissage. Elle reste quasi constante au-delà.

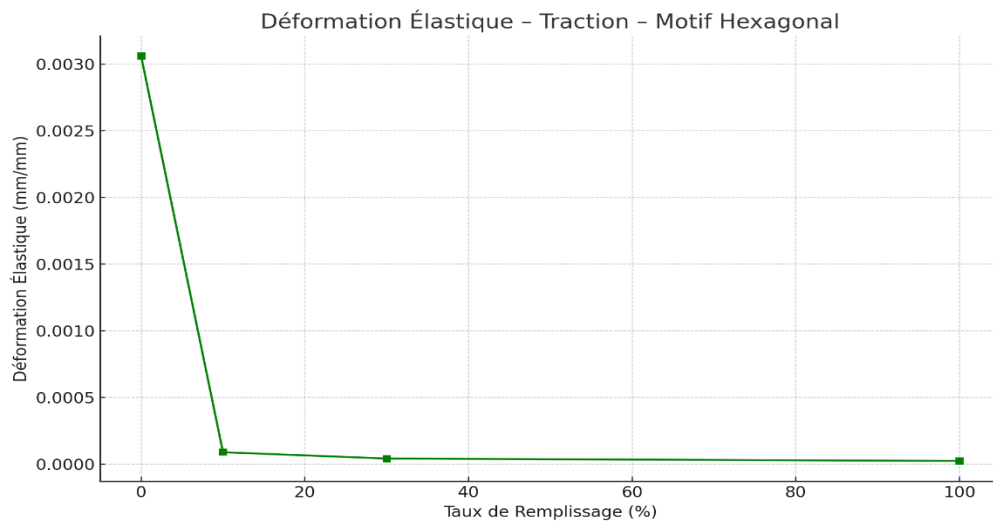


Figure 52 : Déformation Élastique Équivalente – Traction – Motif Hexagonal

La déformation élastique diminue de manière régulière avec le taux de remplissage, montrant une réduction progressive de la sollicitation interne.

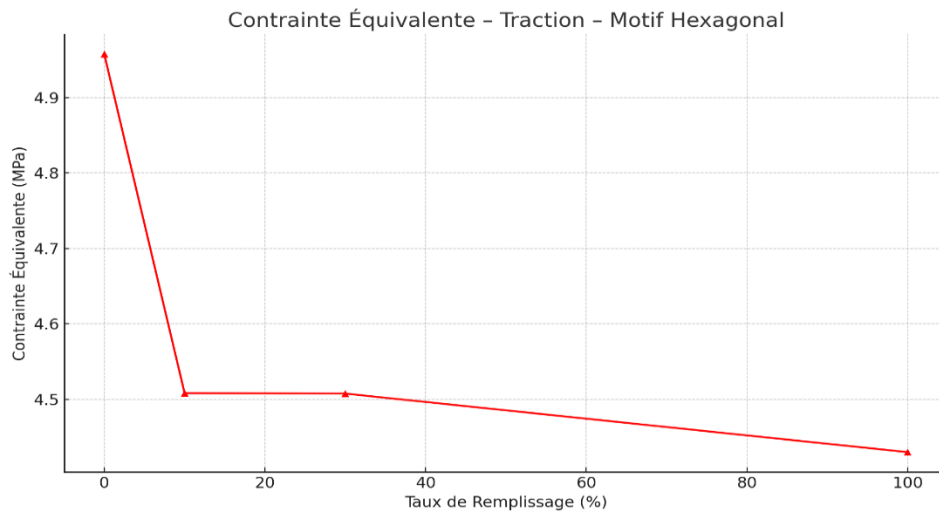


Figure 53 : Contrainte Équivalente (von Mises) – Traction – Motif Hexagonal

La contrainte est maximale à 0 % puis reste relativement stable entre 10 et 100 %, indiquant une bonne homogénéité dans la répartition des efforts.

Analyse des résultats

Taux de Remplissage (%)	Déformation Totale (mm)	Déformation Élastique Équiv. (mm/mm)	Contrainte Équivalente (MPa)
0	0.57463	3.0591e-3	4.9574
10	4.9139e-3	8.8396e-5	4.508
30	4.8805e-3	4.1072e-5	4.5075
100	4.7875e-3	2.2891e-5	4.4299

- La **déformation totale** est extrêmement élevée à 0 % (0.57463 mm), ce qui traduit une structure très peu résistante.

- Dès 10 % de remplissage, cette déformation chute brutalement ($\sim 4.9 \times 10^{-3}$ mm) et reste relativement stable jusqu'à 100 %. Cela montre qu'un simple renforcement structurel à faible densité améliore déjà fortement le comportement mécanique.
- La **déformation élastique équivalente** diminue continuellement avec l'augmentation du taux de remplissage, passant de 3.0591×10^{-3} à 2.2891×10^{-5} mm/mm. Cela traduit une structure de plus en plus rigide.
- La **contrainte équivalente (von Mises)** atteint un pic à 0 % (4.9574 MPa), puis reste stable autour de 4.5 MPa, avec une légère baisse à 100 %.

Le motif hexagonal montre un excellent comportement mécanique dès les faibles taux de remplissage, en particulier au niveau du contrôle de la déformation.

- **Le type Grid :**

Résultats – Traction – Motif Grille

❖ Taux de remplissage a : 10%

Volume	2.0436e+005 mm ³
Mass	0.104145kg

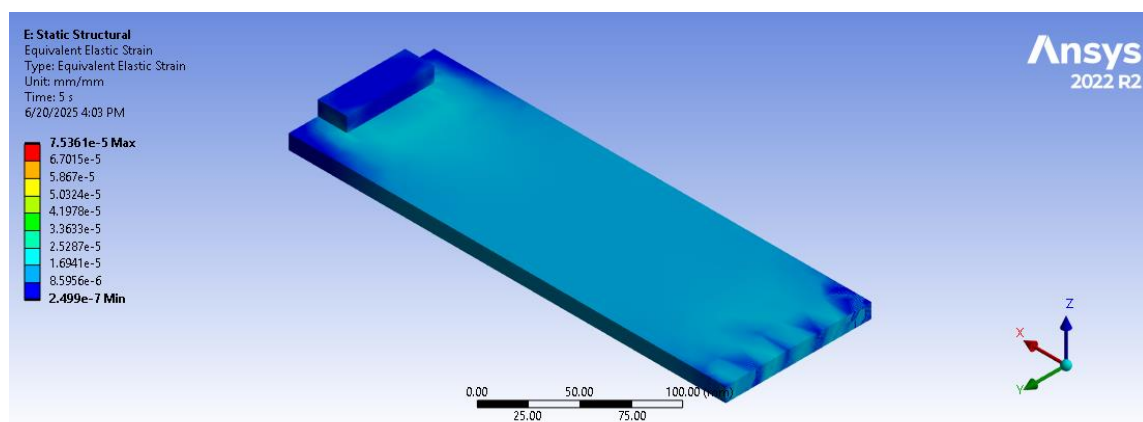


Figure 54 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en traction

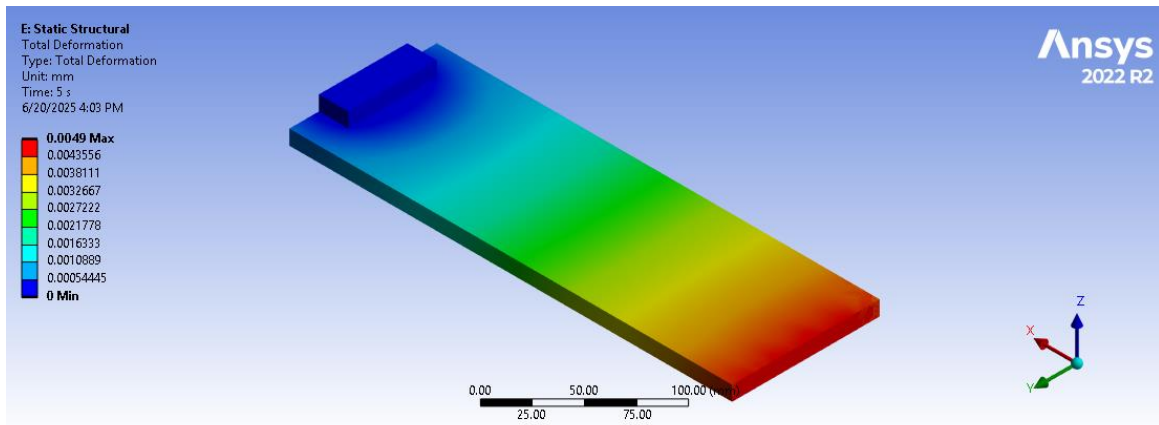


Figure 55 : Carte de déformation totale de la pièce en traction

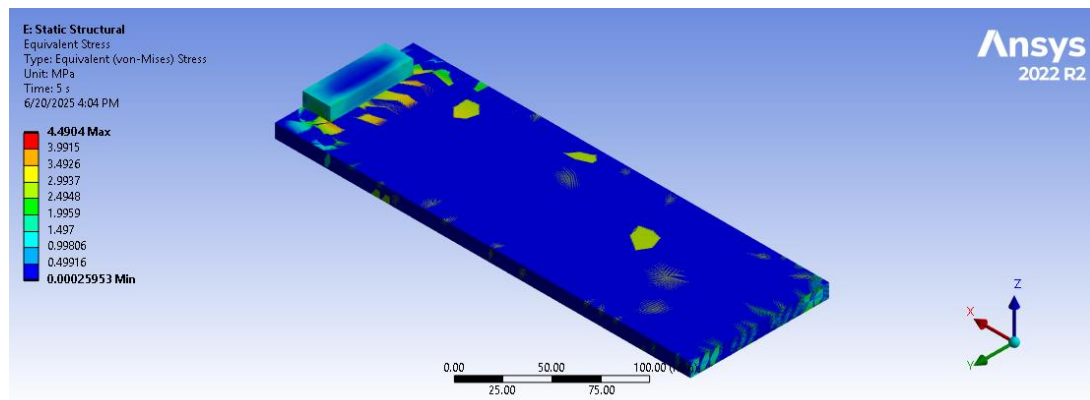


Figure 56 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction

❖ Taux de remplissage α : 30%

Volume	2.477e+005 mm ³
Mass	0.148783kg

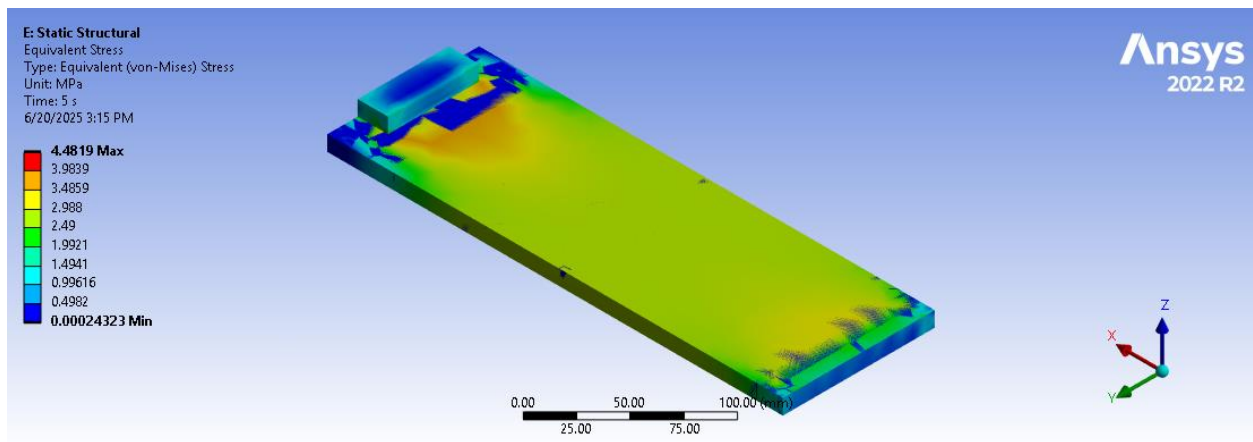


Figure 57 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en traction

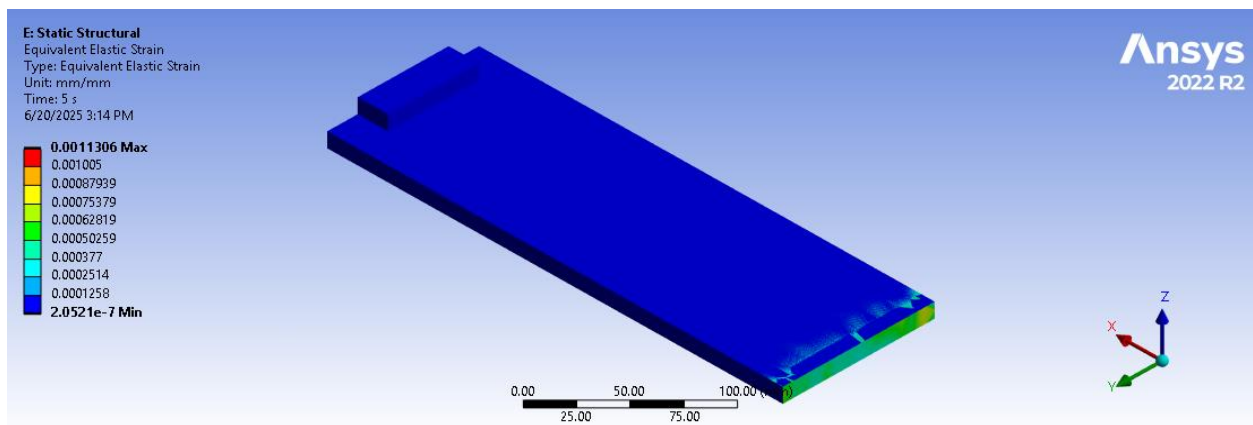


Figure 58 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en traction

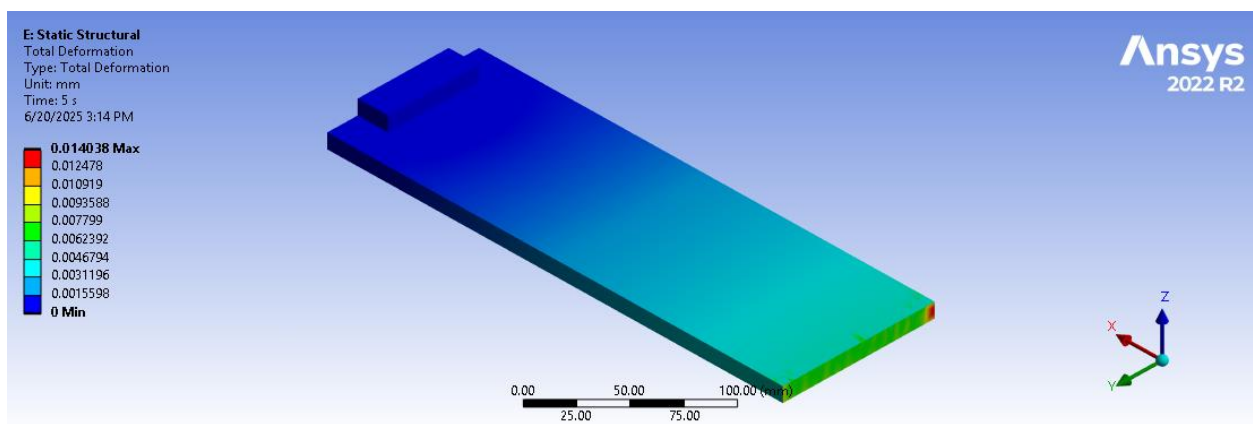


Figure 59 : Carte de déformation totale de la pièce en traction

Résultats – Traction – Motif grid

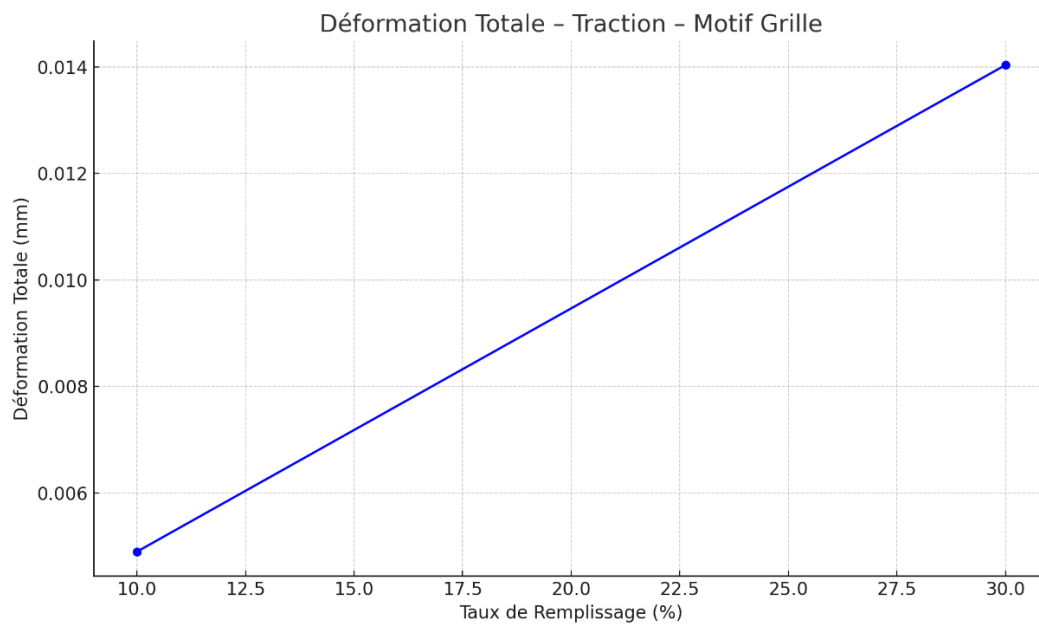


Figure 60 : Déformation Totale – Traction – Motif Grille

La déformation augmente fortement entre 10 % et 30 %, indiquant un assouplissement global de la structure.

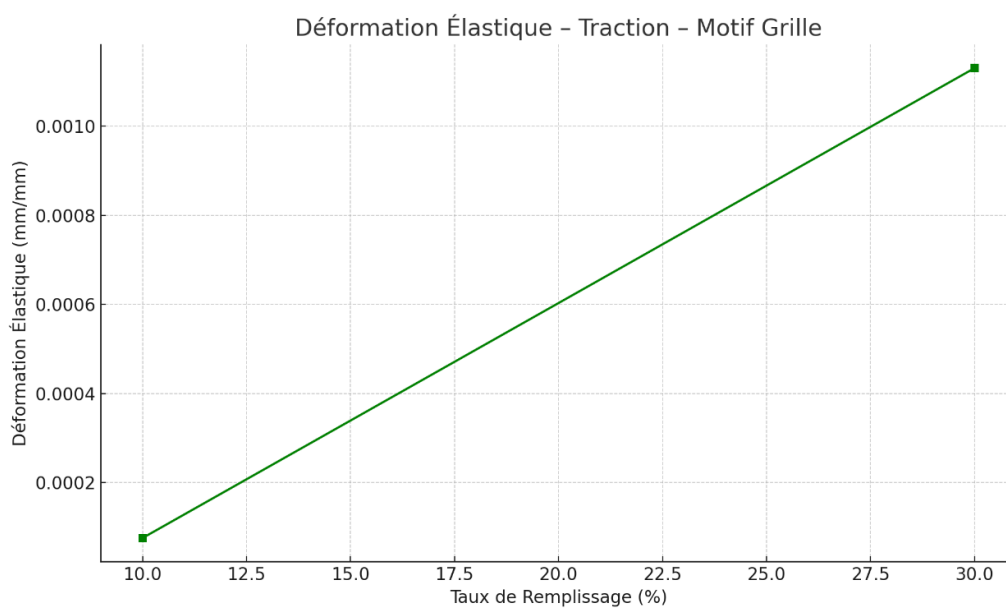


Figure 61 : Déformation Élastique Équivalente – Traction – Motif Grille

La déformation élastique s'amplifie considérablement, signalant une sollicitation accrue des zones internes.

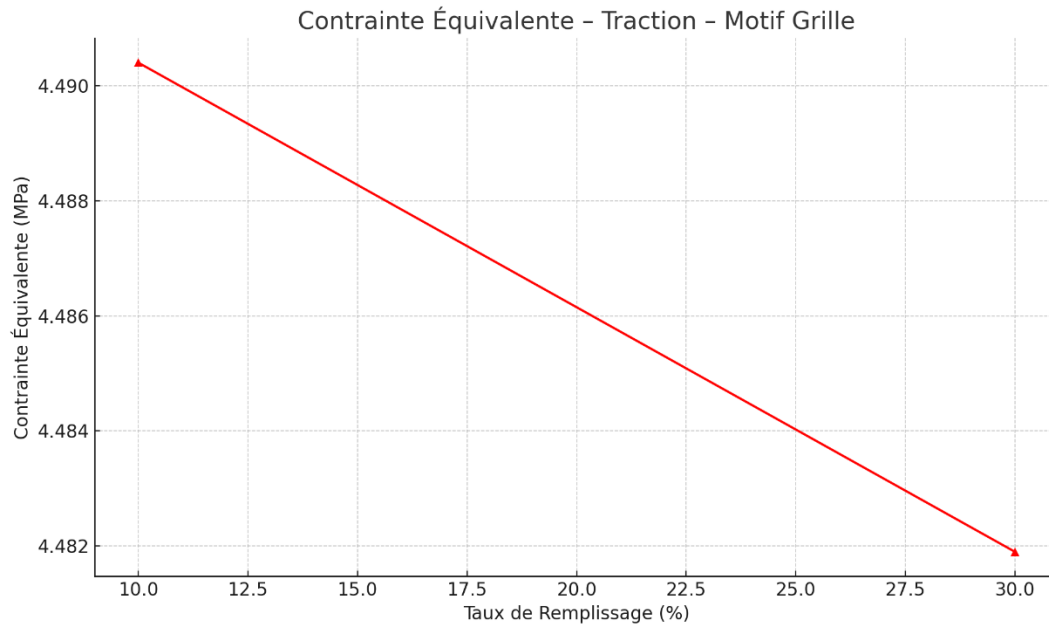


Figure 62 : Contrainte Équivalente – Traction – Motif Grille

Les contraintes restent relativement constantes, malgré les variations de la géométrie.

Analyse des résultats

Taux de Remplissage (%)	Déformation Totale (mm)	Déformation Élastique Équiv. (mm/mm)	Contrainte Équivalente (MPa)
10	4.9000e-3	7.5361e-5	4.4904
30	1.4038e-2	1.1306e-3	4.4819

- La **déformation totale** reste modérée à 10 % (4.9e-3 mm), mais augmente fortement à 30 % (1.4038e-2 mm), indiquant une plus grande souplesse à mesure que la structure se remplit.

- La **déformation élastique équivalente** passe de $7.5361e-5$ mm/mm à un pic de $1.1306e-3$ mm/mm, ce qui indique une concentration importante des efforts internes à haut remplissage.
- La **contrainte équivalente (von Mises)** reste relativement stable ($4.4904 \rightarrow 4.4819$ MPa), similaire à l'hexagonal.

Le motif grille est plus flexible et présente une montée significative de la déformation élastique à mesure qu'il est rempli — ce qui peut le rendre moins fiable dans les efforts de traction prolongés.

5.2.3 Simulation de la compression

5.2.3.1 Objectif

L'analyse en compression permet d'étudier la résistance des pièces à l'écrasement, un cas fréquent pour les pièces de support ou les panneaux structuraux. Cela permet de détecter les risques de flambement ou de déformation excessive selon le motif de remplissage [3].

Évolution de la force appliquée

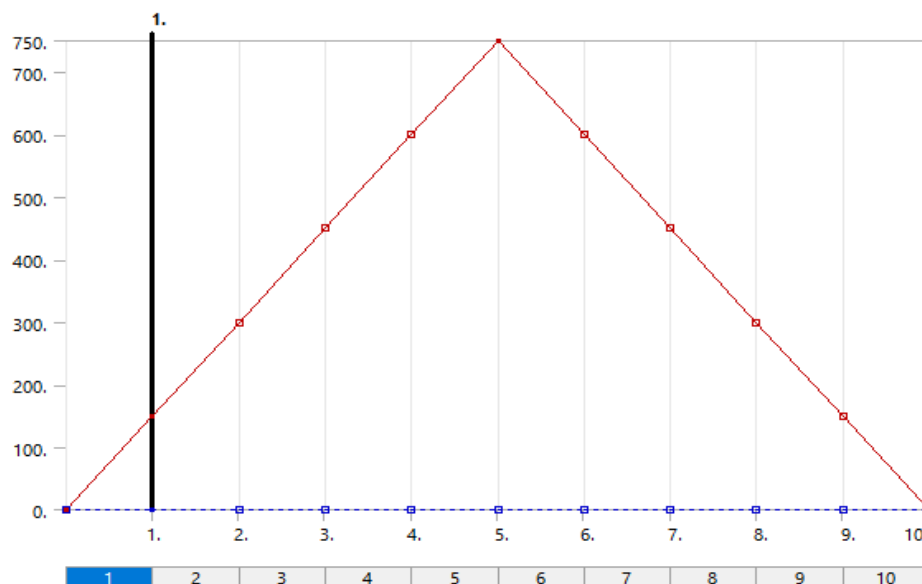


Figure 63 : Courbe de chargement monotone – Force appliquée (N)

La force appliquée augmente de manière linéaire jusqu'à 750 N, puis décroît symétriquement vers zéro. Cette courbe en triangle représente un chargement monotone utilisé pour simuler une sollicitation simple croissante puis décroissante.

5.2.3.2 Mise en place dans ANSYS

- Chargement axial inversé (par rapport à la traction) :
 - Une face fixe,
 - Une force de compression appliquée sur la face opposée.

5.2.3.3 Résultats obtenus

❖ Taux de remplissage a : 0%

Volume	1.0325e+005 mm ³
Mass	0.0942kg

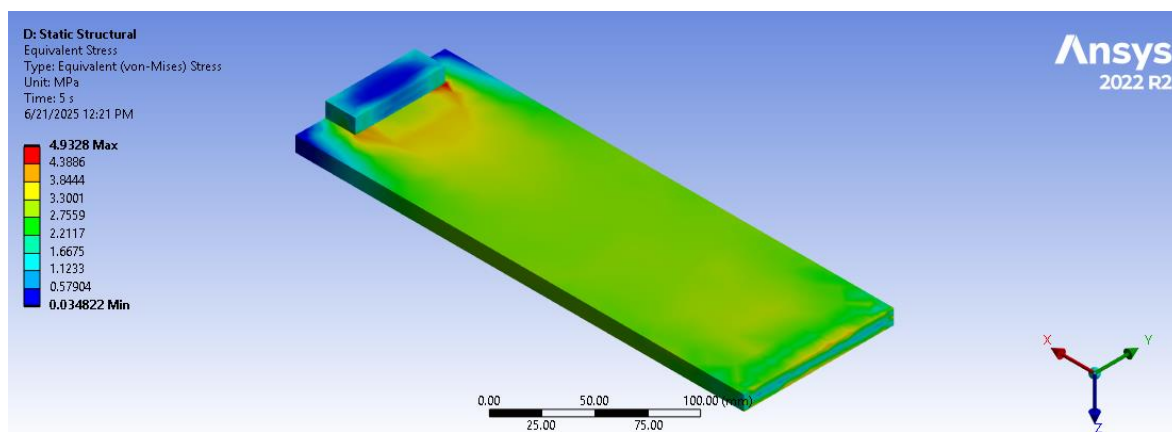


Figure 64 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en compression

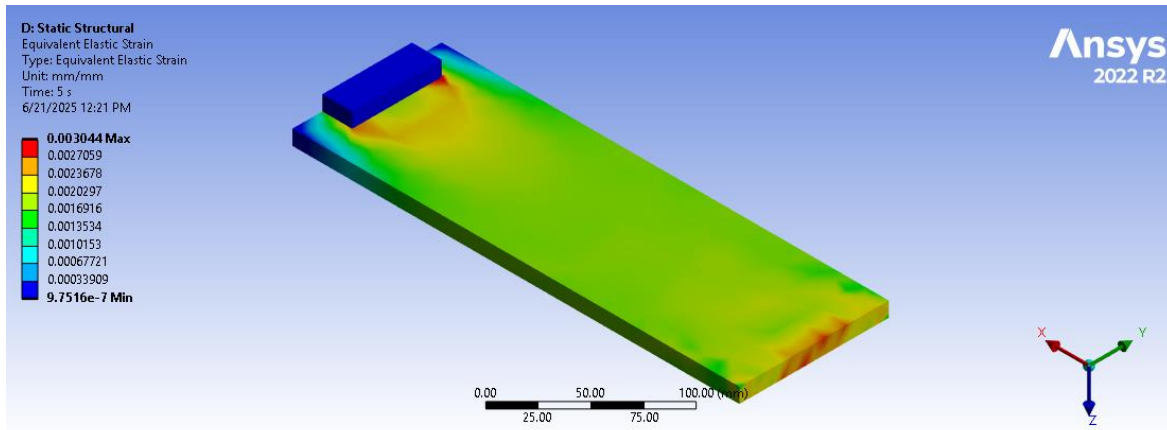


Figure 65 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression

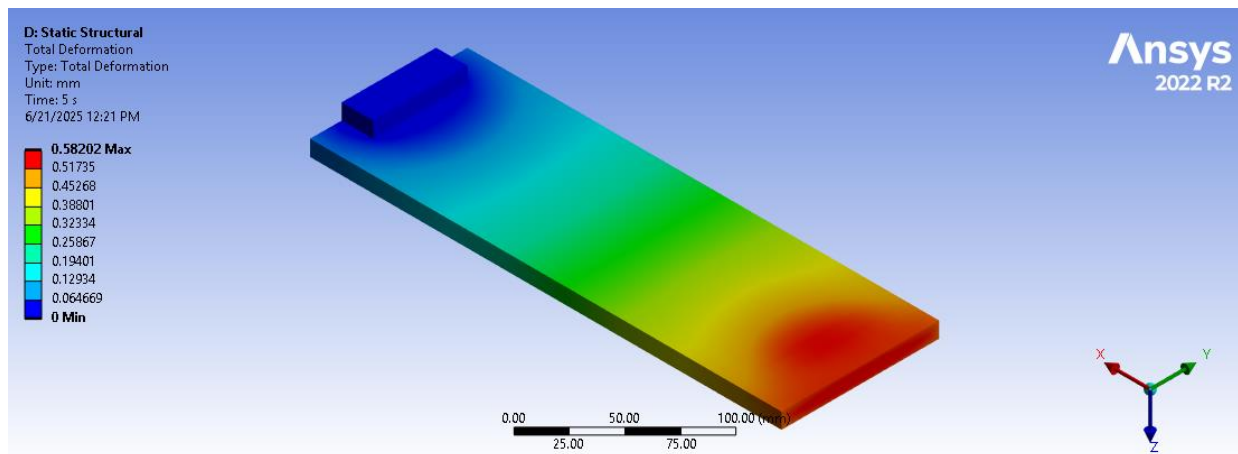


Figure 66 : Carte de déformation totale de la pièce en compression

❖ **Taux de remplissage a : 100%**

Volume	4.0325e+005 mm ³
Mass	0.000071633kg

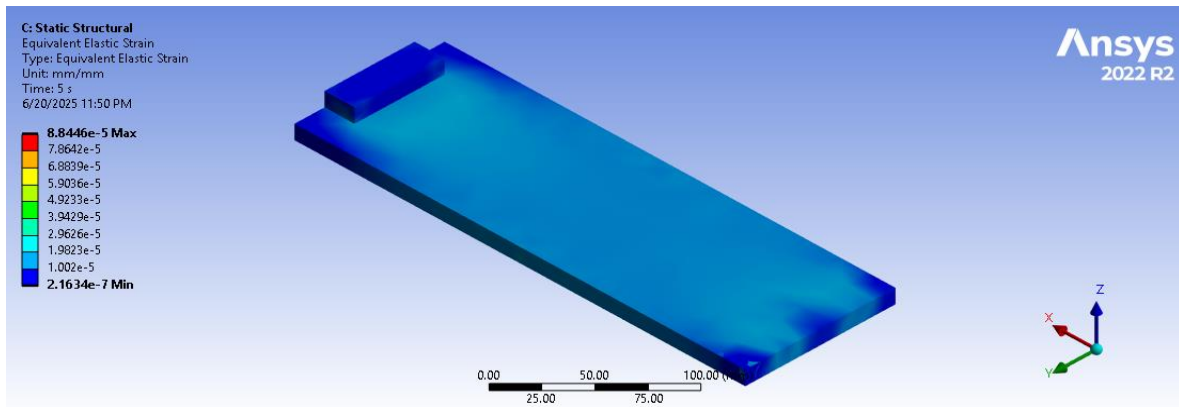


Figure 67 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression

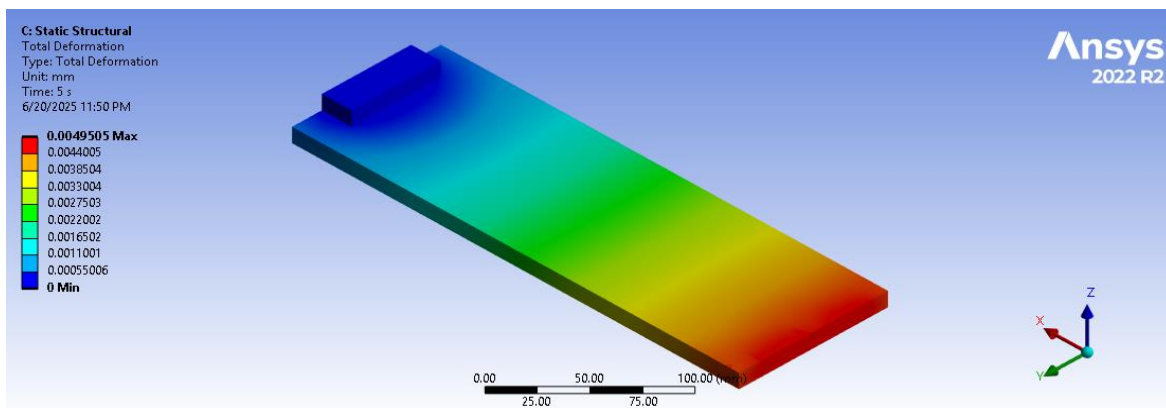


Figure 68 : Carte de déformation totale de la pièce en compression

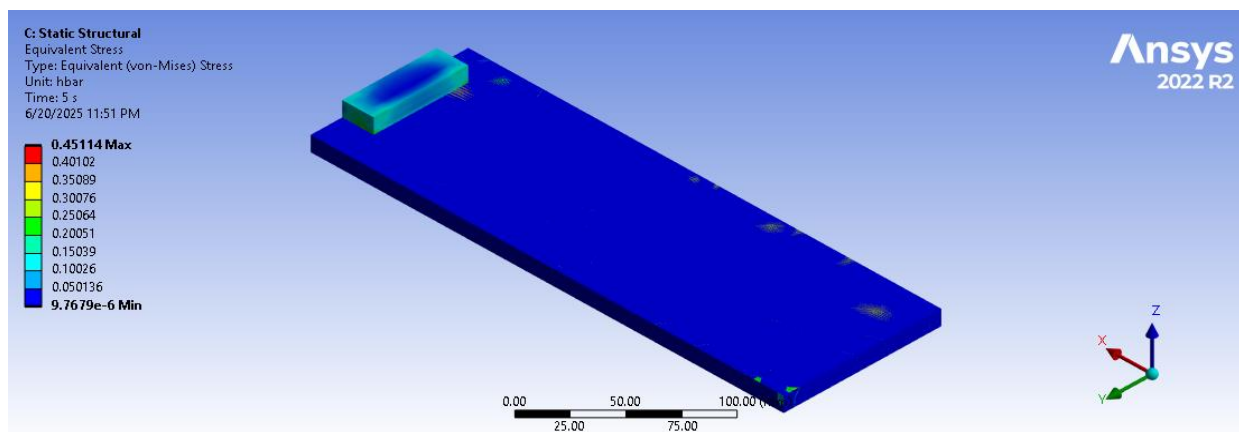


Figure 69 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en compression

❖ Le type hexagonale

Résultats – Compression – Motif Hexagonal

❖ Taux de remplissage a : 10%

Volume	2.0139e+005 mm ³
Mass	0.0000101079kg

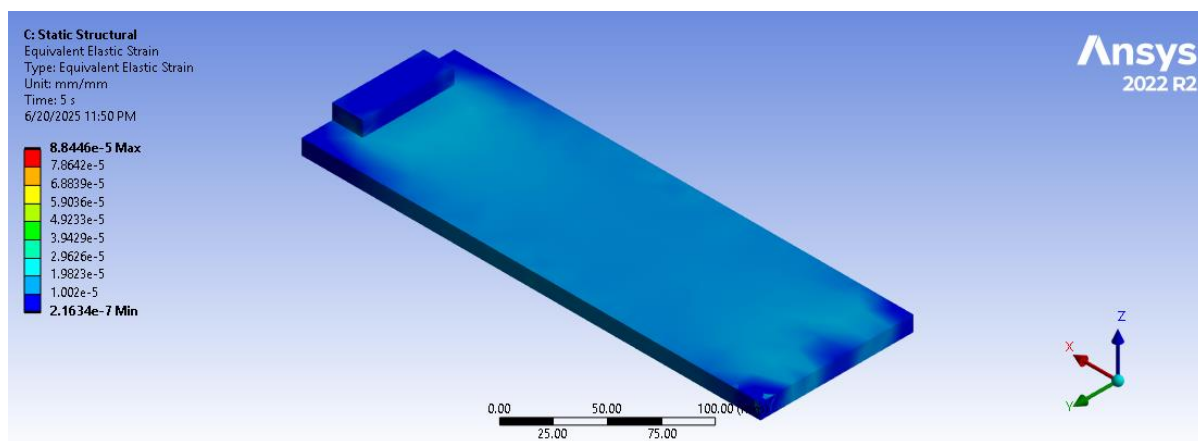


Figure 70 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression

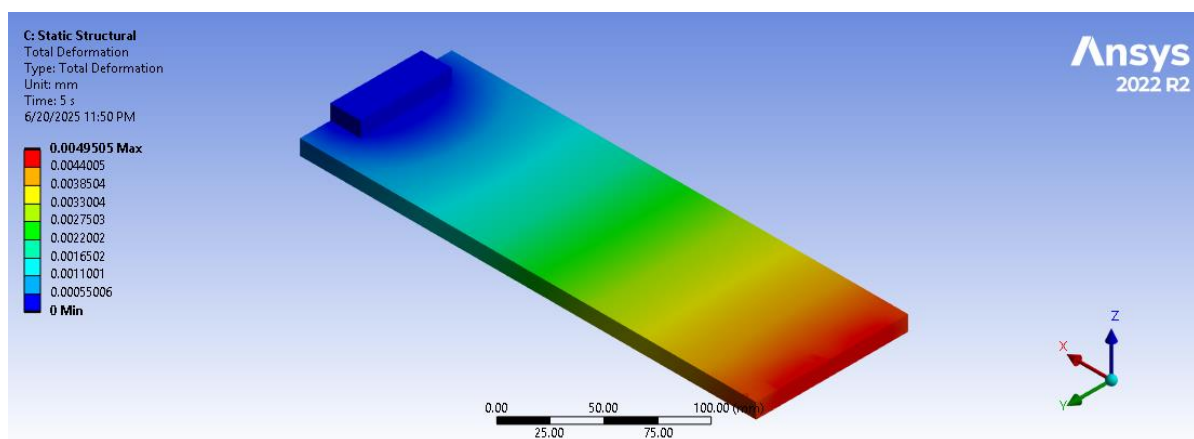


Figure 71 : Carte de déformation totale de la pièce en compression

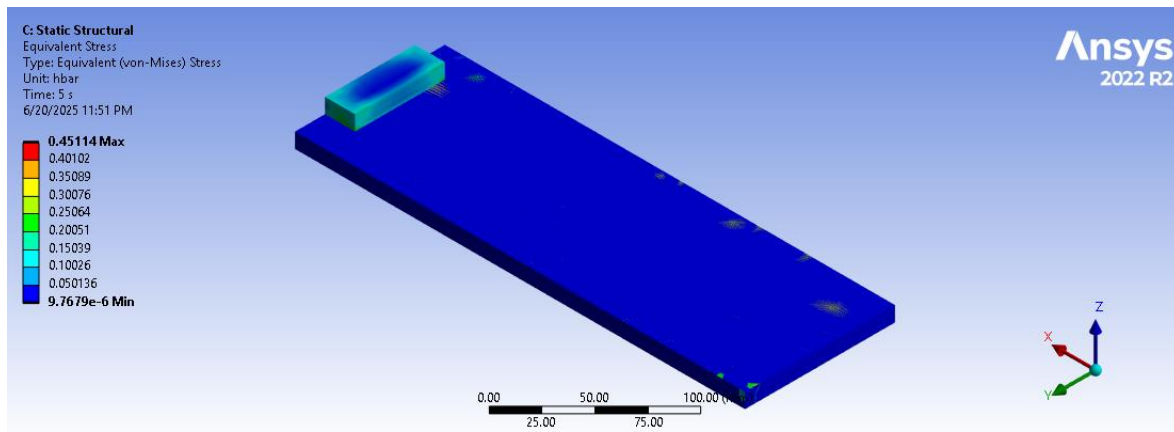


Figure 72 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en compression

❖ Taux de remplissage a : 30%

Volume	2.4224e+005 mm ³
Mass	0.000014316kg

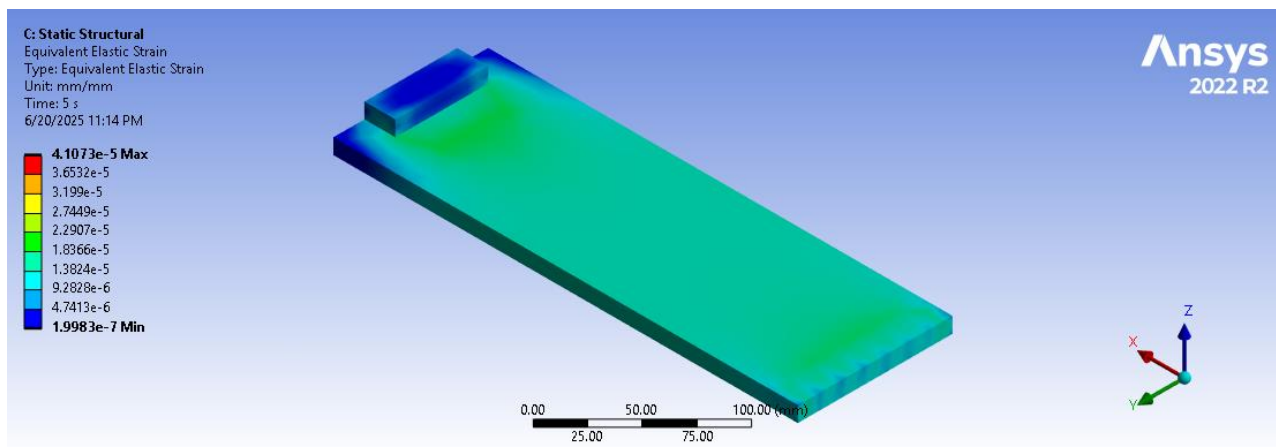


Figure 73 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression

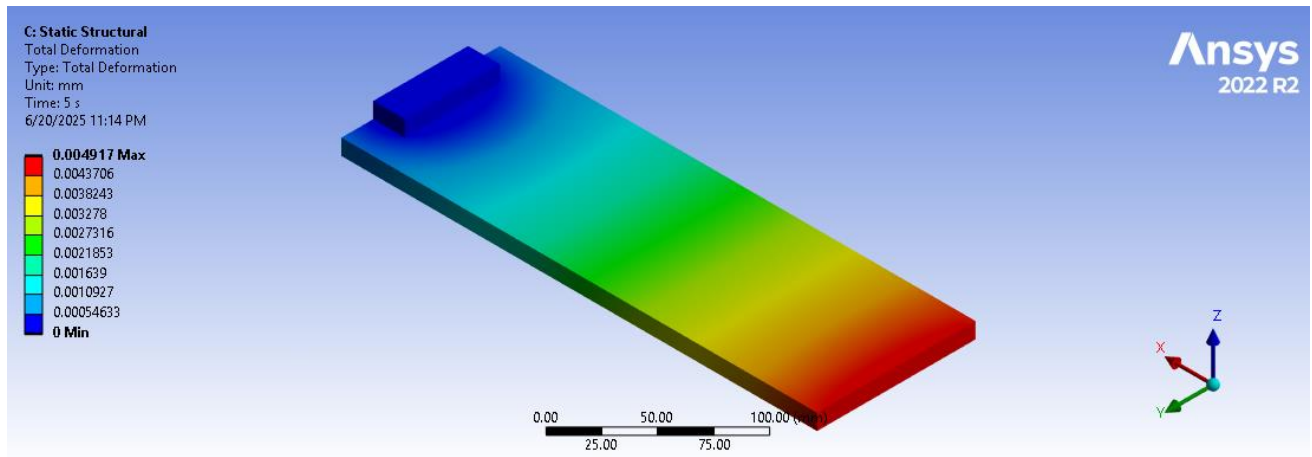


Figure 74 : Carte de déformation totale de la pièce en compression

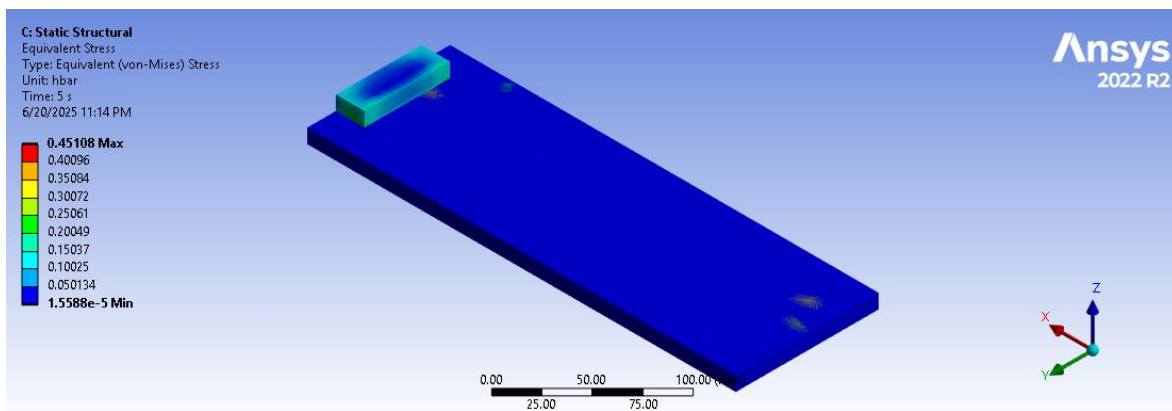


Figure 75 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en compression

Analyse des Résultats

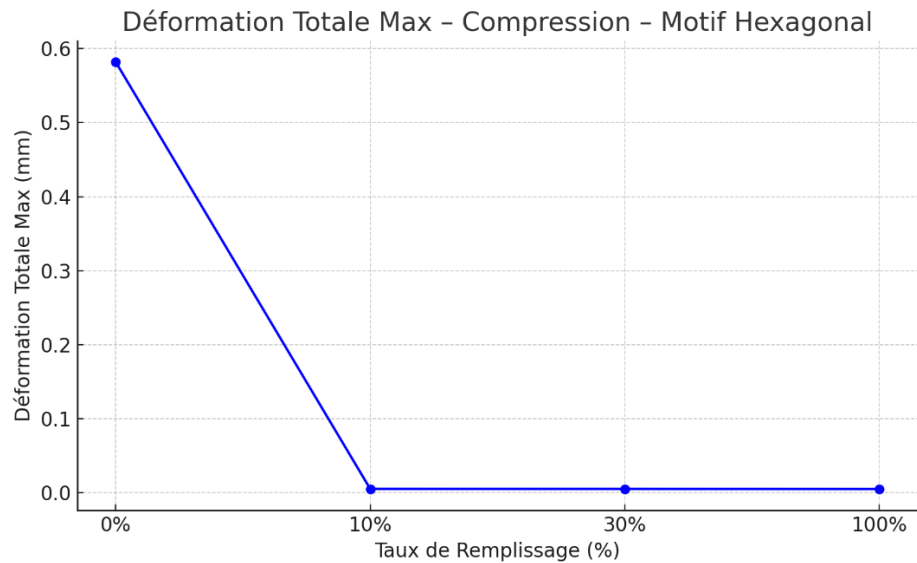


Figure 76 : Déformation Totale Max – Compression – Motif Hexagonal

La déformation chute brutalement entre 0 % et 10 % de remplissage, puis reste presque constante. Cela met en évidence l'effet immédiat du remplissage sur la rigidité globale.

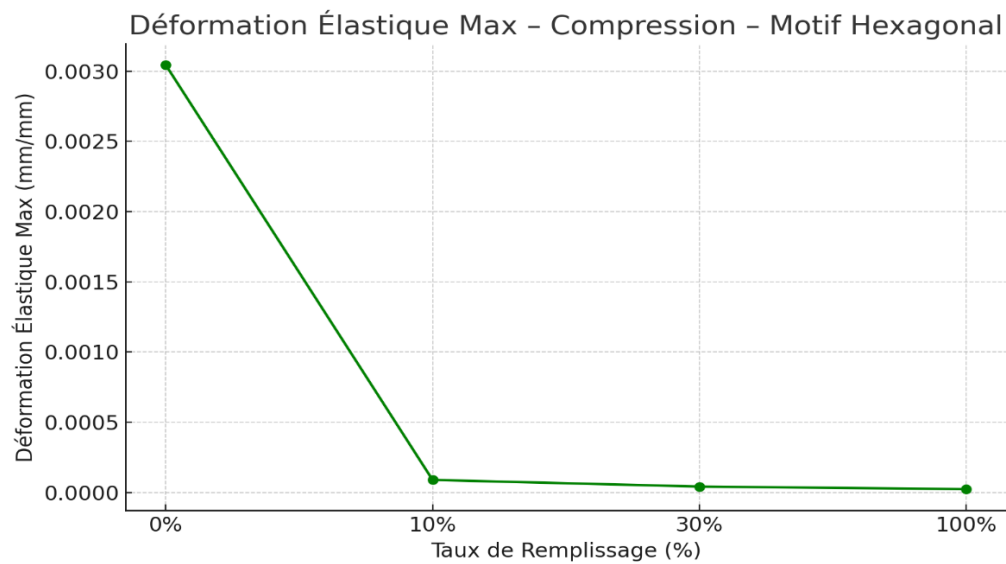


Figure 77 : Déformation Élastique Max – Compression – Motif Hexagonal

Une diminution nette de la déformation élastique est observée dès 10 %, puis elle continue à décroître modérément. Ce comportement traduit une réduction des sollicitations internes.

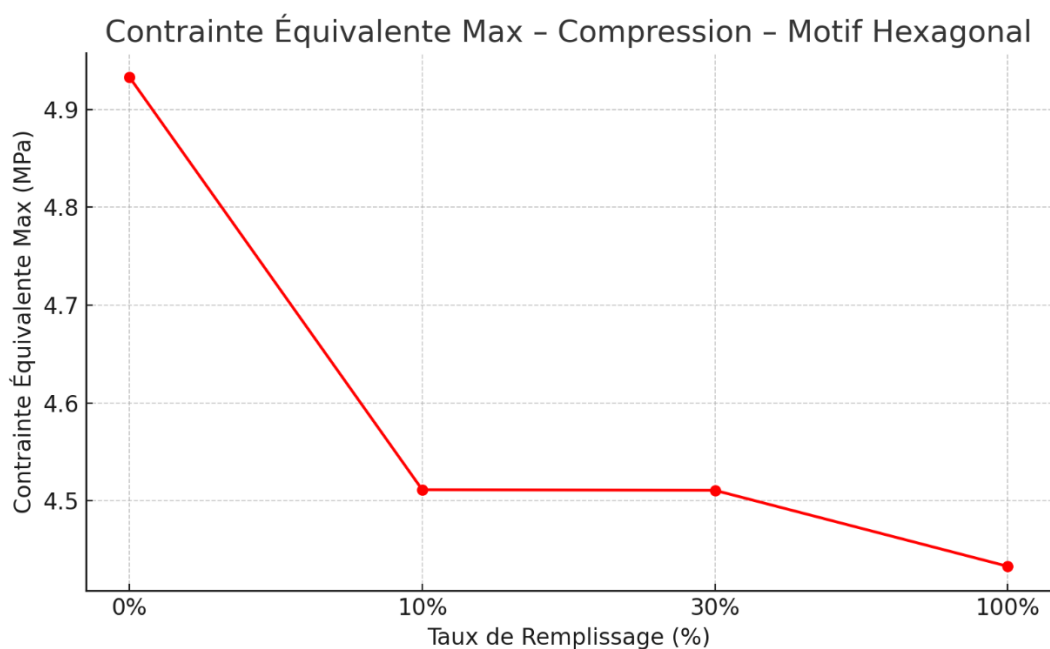


Figure 78 : Contrainte Équivalente Max – Compression – Motif Hexagonal

La contrainte maximale diminue légèrement entre 0 % et 100 %, indiquant une meilleure répartition des charges à mesure que le matériau se densifie.

Analyse des Résultats

Taux de Remplissage (%)	Déformation Totale Max (mm)	Déformation Élastique Max (mm/mm)	Contrainte Équivalente Max (MPa)
0 %	0.58202	3.044e-3	4.9328
10 %	0.0049505	8.8446e-5	4.5114
30 %	0.004917	4.1073e-5	4.5108
100 %	0.0048241	2.2895e-5	4.4332

- La déformation totale maximale est très élevée pour la configuration vide (0 %), atteignant 0.582 mm. Cela traduit l'absence de résistance structurelle en compression dans un matériau non rempli.
- Dès l'introduction d'un faible taux de remplissage (10 %), la déformation chute drastiquement à environ 0.00495 mm, puis reste stable autour de cette valeur jusqu'à 100 %. Cette stabilité suggère que l'effet du remplissage sur la rigidité totale est saturé dès les premiers niveaux.
- La **déformation élastique équivalente** suit une tendance similaire : très élevée à 0 % ($3.044e-3$ mm/mm), elle diminue de manière significative dès 10 % ($8.8446e-5$ mm/mm), puis continue à décroître légèrement jusqu'à 100 %. Cela reflète une réduction des sollicitations internes et une meilleure tenue mécanique.
- Concernant la **contrainte équivalente de Von Mises**, la valeur maximale est observée à 0 % (4.93 MPa), ce qui semble paradoxal. En réalité, cette valeur est due à des concentrations locales d'effort dans une structure sans appuis. À partir de 10 %, la contrainte diminue et reste stable autour de 4.5 MPa, indiquant une répartition plus uniforme des efforts dans la structure.

En résumé : le motif hexagonal en compression atteint rapidement sa performance optimale dès les premiers niveaux de remplissage, avec peu d'évolution au-delà de 10 %. Ce comportement suggère une efficacité structurelle intrinsèque dès qu'un squelette de base est présent.

- **Le type Grid :**

❖ **Taux de remplissage a : 10%**

Volume	2.0436e+005 mm ³
Mass	0.71633kg

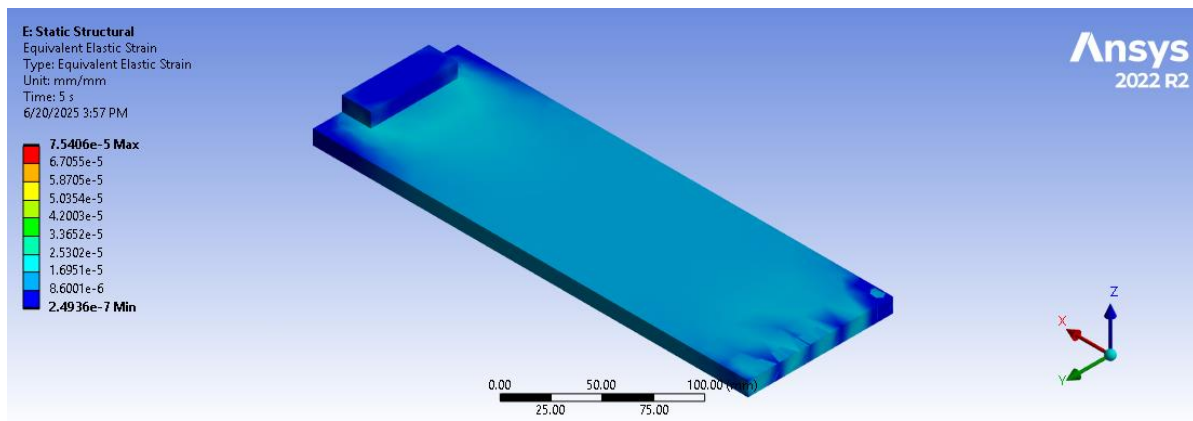


Figure 79 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression

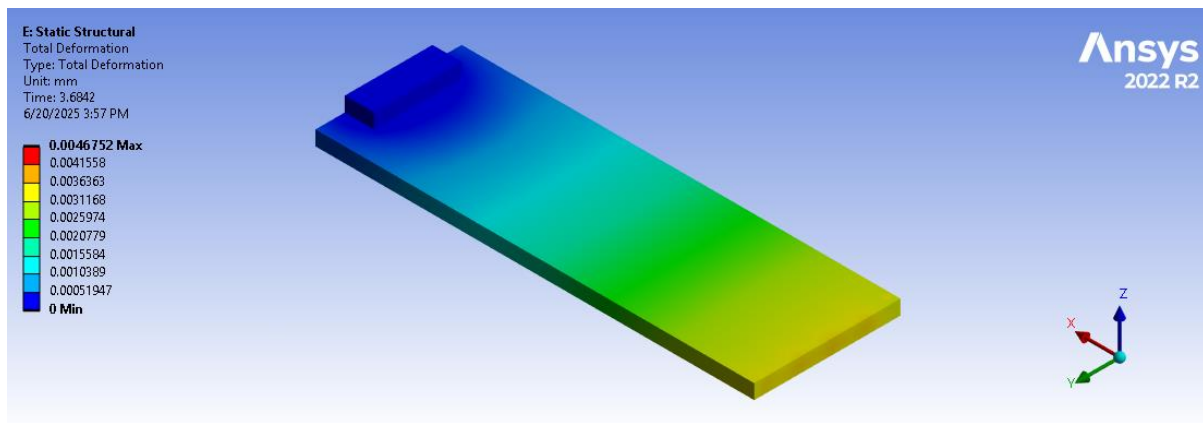


Figure 80 : Carte de déformation totale de la pièce en compression

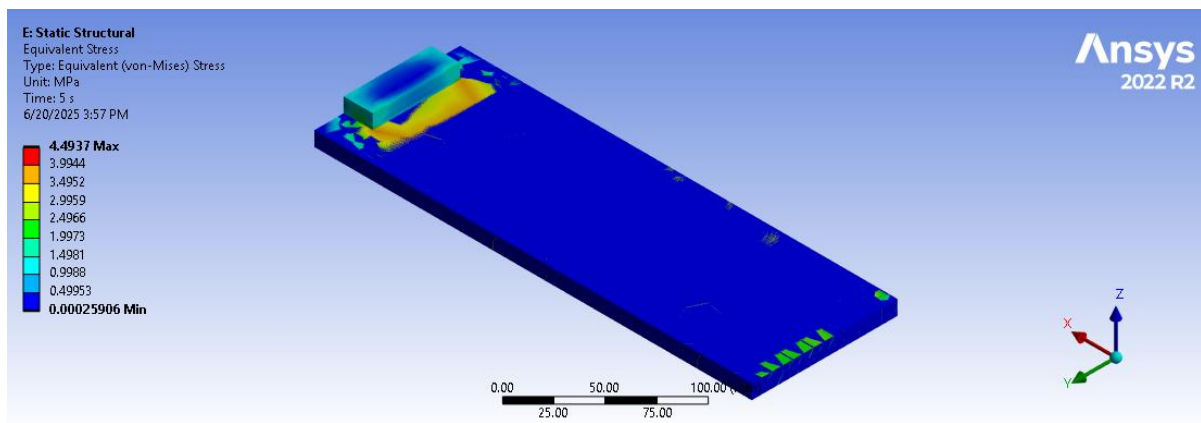


Figure 81 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en compression

❖ Taux de remplissage a : 30%

Volume	2.477e+005 mm ³
Mass	0.148783kg

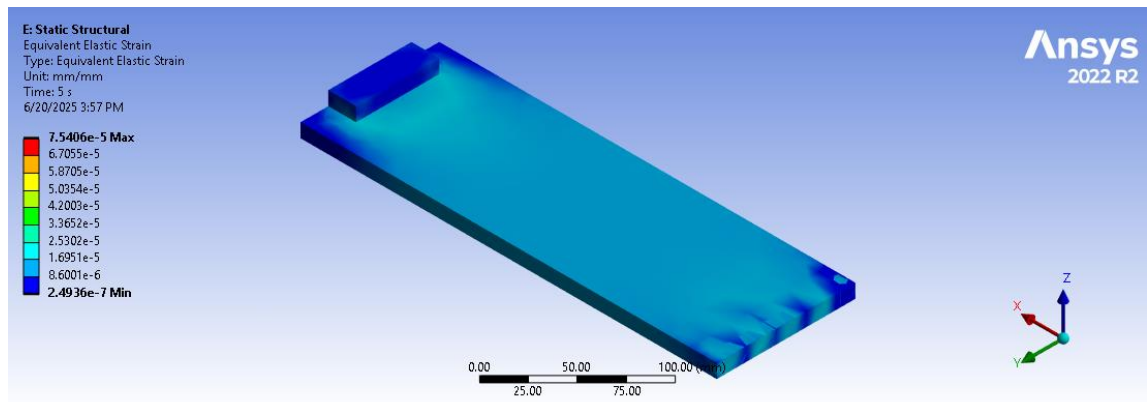


Figure 82 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en compression

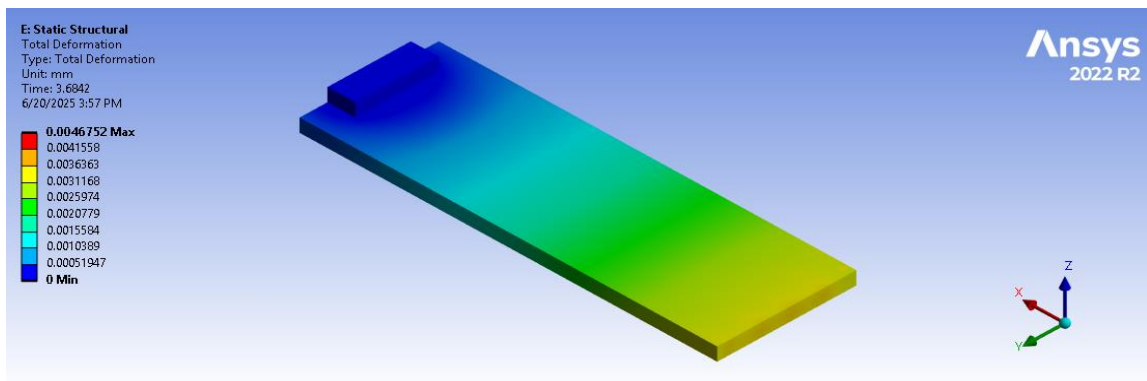


Figure 83 : Carte de déformation totale de la pièce en compression

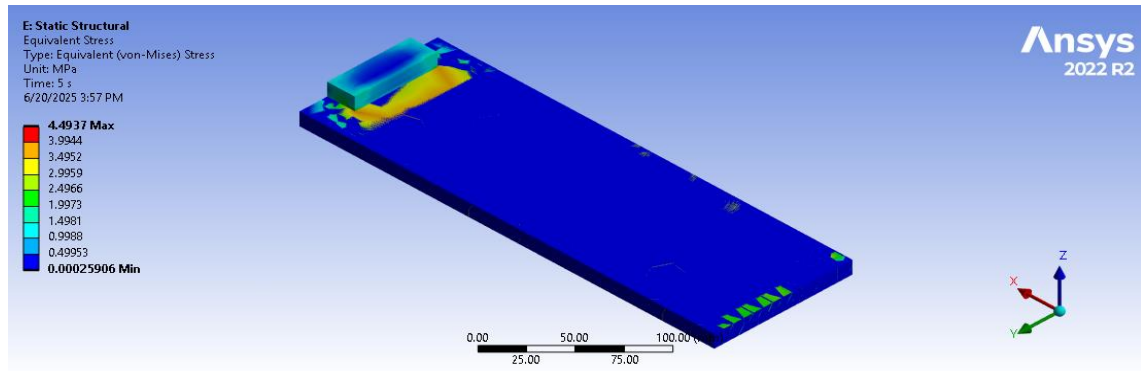


Figure 84 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en compression

Analyse des résultats :

Taux de Remplissage (%)	Déformation Totale Max (mm)	Déformation Élastique Max (mm/mm)	Contrainte Équivalente Max (MPa)
10 %	0.0049358	7.5406e-5	4.4937
30 %	0.014045	1.1302e-3	4.485

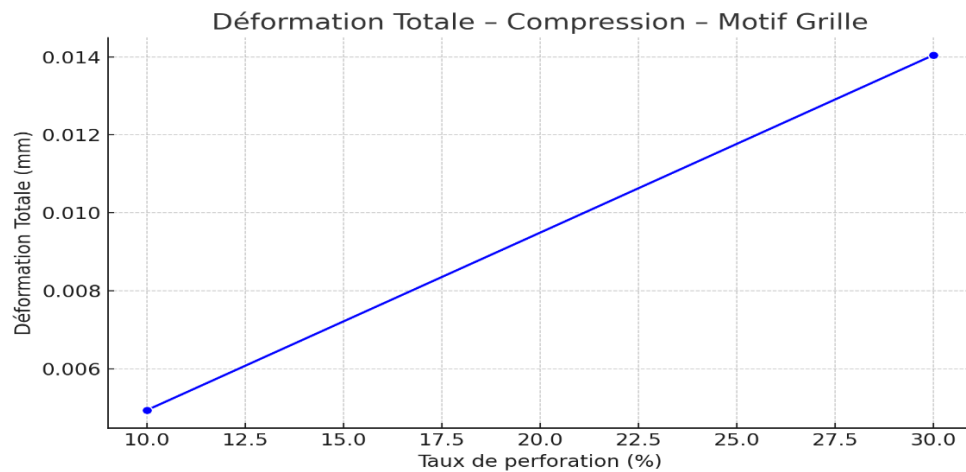


Figure 85 : Déformation Totale – Compression – Motif Grille

La déformation augmente fortement entre 10 % et 30 %, ce qui reflète un comportement plus souple du motif grille à mesure que le matériau est vidé.

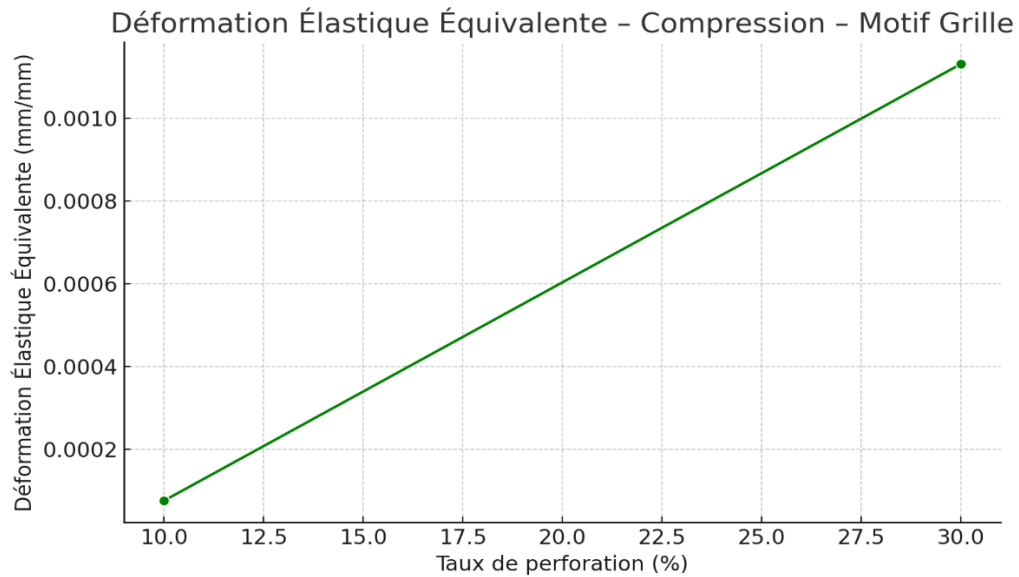


Figure 86 : Déformation Élastique Équivalente – Compression – Motif Grill

On observe une hausse marquée de la déformation élastique avec le taux de perforation, indiquant une diminution de la capacité à résister aux efforts compressifs.

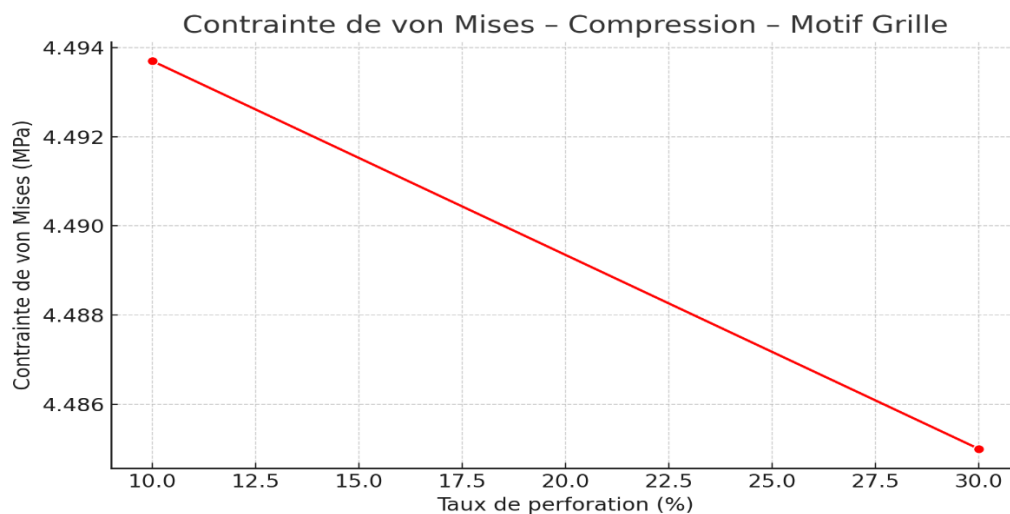


Figure 87 : Contrainte de von Mises – Compression – Motif Grille

La contrainte reste relativement stable entre 10 % et 30 %, suggérant que l'effort se répartit d'une manière similaire malgré les changements géométriques.

- La **déformation totale maximale** augmente de manière significative entre 10 % et 30 %. Cette évolution reflète une perte notable de rigidité du motif grille à mesure que la structure devient plus ajourée.
- La **déformation élastique équivalente** suit la même tendance avec une augmentation d'un facteur de plus de 10, signalant une baisse importante de la capacité à résister à la compression élastique.
- En revanche, la **contrainte équivalente de von Mises** reste quasiment constante entre les deux configurations (environ 4.48–4.49 MPa), ce qui suggère une répartition similaire des efforts malgré la déformation accrue.

En résumé : contrairement au motif hexagonal, le motif grille perd rapidement en performance structurelle en compression à mesure que le taux de perforation augmente, avec un comportement beaucoup plus déformable à 30 %.

5.2.4 Simulation de la torsion

5.2.4.1 Objectif

La simulation de torsion permet d'étudier la **résistance à la rotation autour de l'axe longitudinal**, avec observation des **contraintes de cisaillement** et de la **rigidité angulaire** de la pièce. Cette sollicitation est utile pour les applications mécaniques impliquant des couples ou des rotations [5].

Évolution de la force appliquée

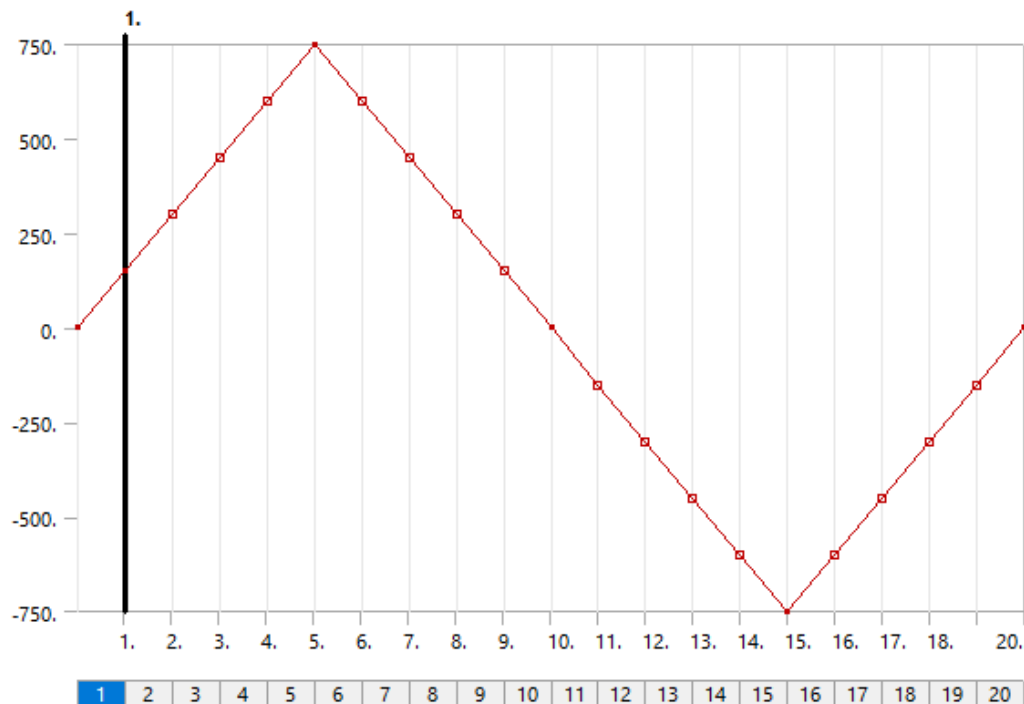


Figure 88 : Courbe de Chargement Cyclique – Force appliquée (N)

La force appliquée varie de manière linéaire entre +750 N et -750 N, suivant un cycle triangulaire typique d'un essai de fatigue.

5.2.4.2 Mise en place dans ANSYS

- **Montage :**
 - Une extrémité **fixée**,
 - L'autre soumise à un **moment de torsion** (torque) autour de l'axe Z.

5.2.4.3 Paramètres analysés

- Déformation totale (mm)
- Contrainte équivalente de Von Mises (MPa)
- de deformation Elastique Equivalente
- Shear Contrainte équivalente

5.2.4.4 Résultats obtenus

❖ Taux de remplissage 0%

Volume	1.825e+005 mm ³
Mass	0.89216 kg

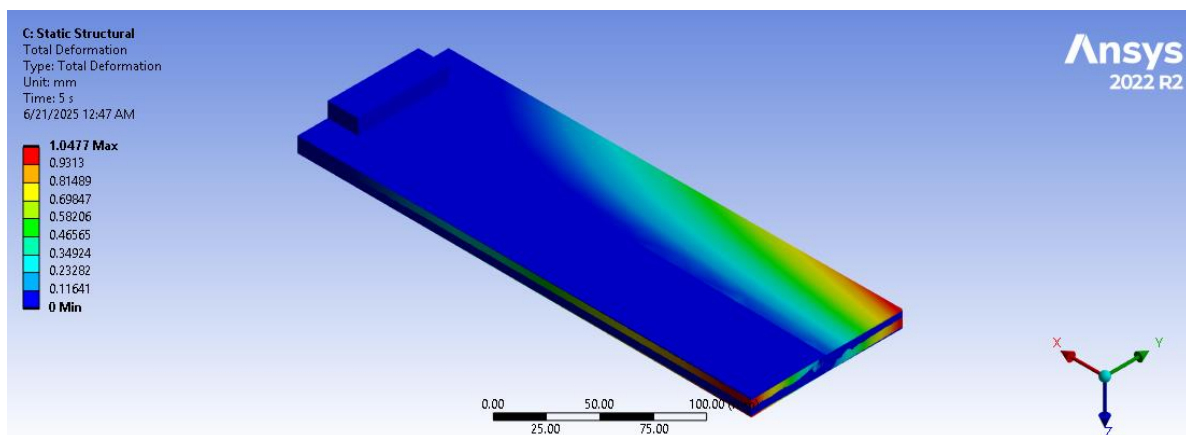


Figure 89 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion

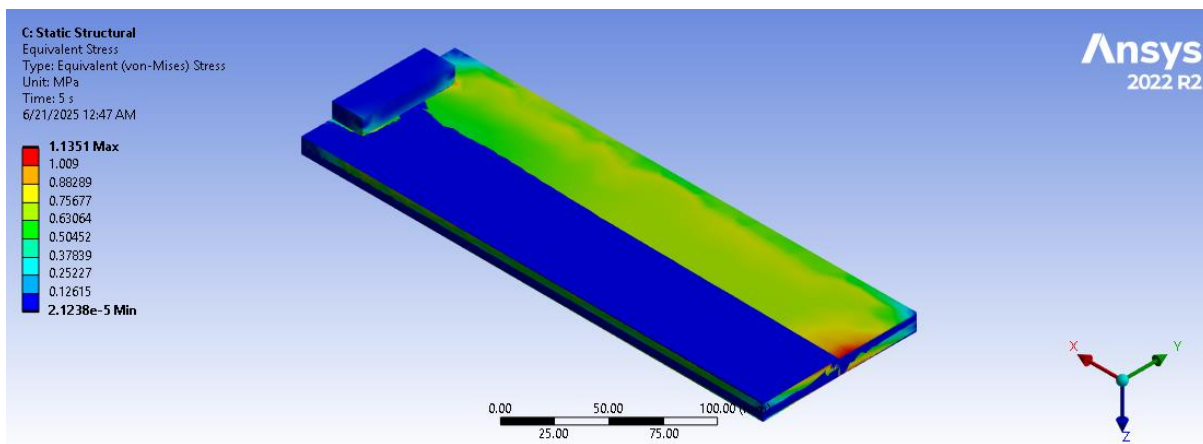


Figure 90 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en torsion

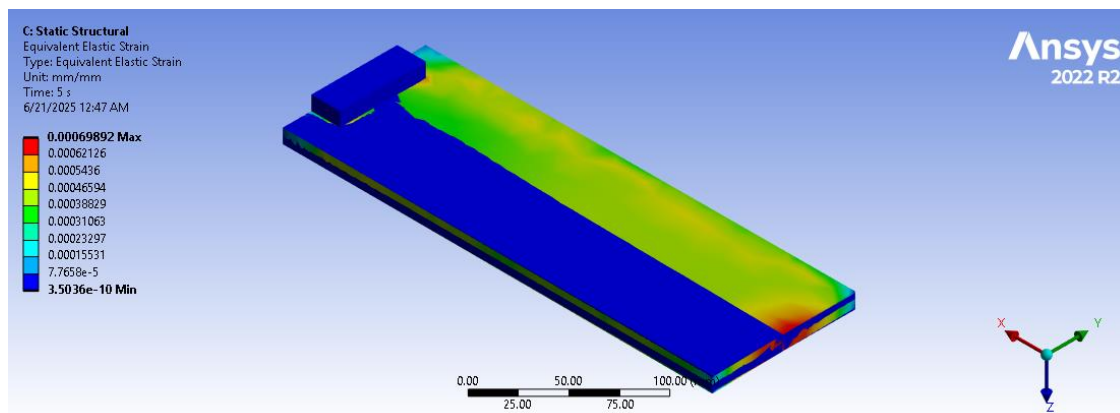


Figure 91 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion

❖ Taux de remplissage a : 100%

Volume	4.0325e+005 mm ³
Mass	0.0000309kg

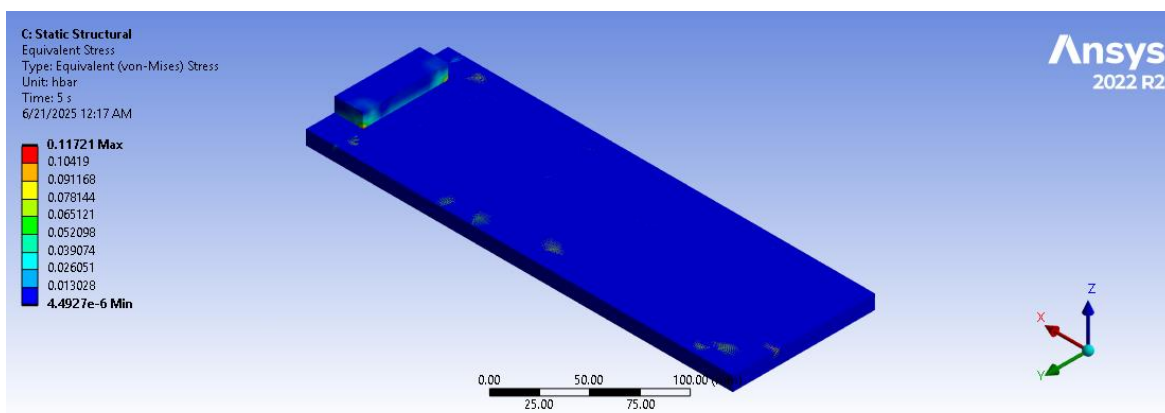


Figure 92 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en torsion

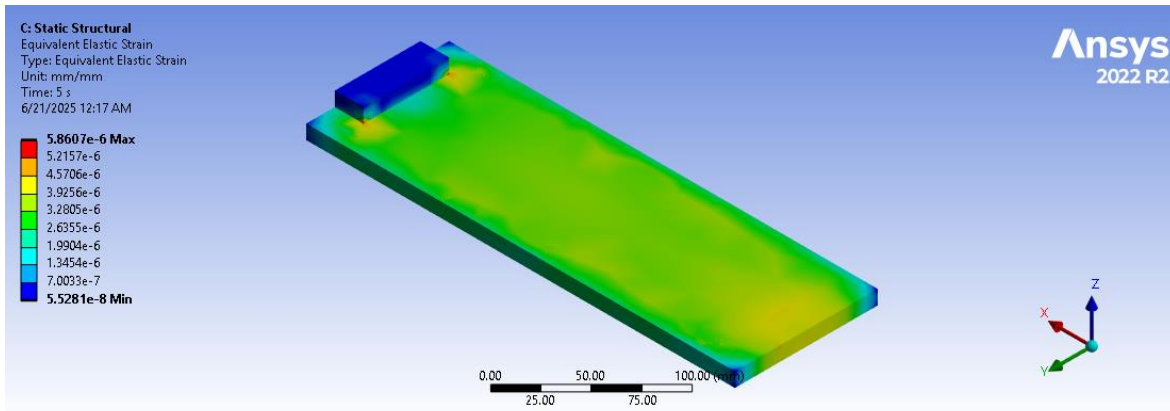


Figure 93 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion

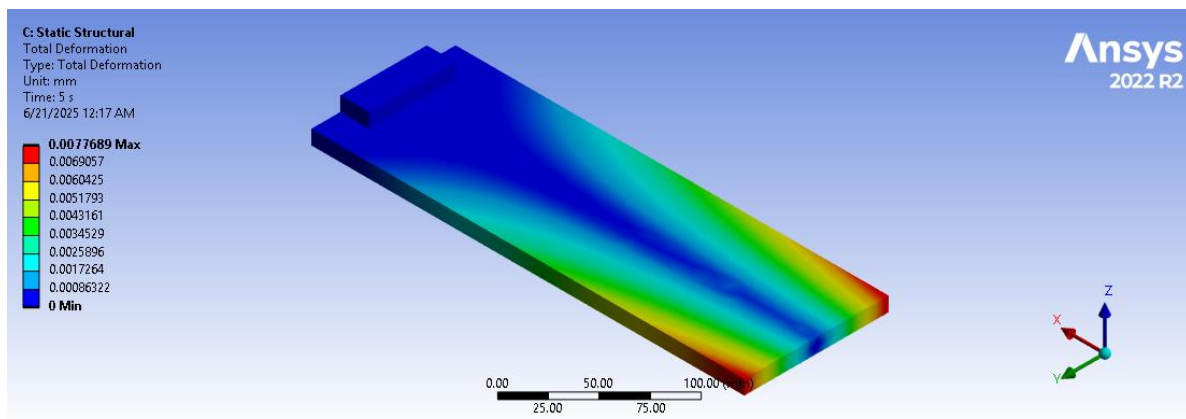


Figure 94 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion

- ❖ Le type hexagonale
- ❖ Taux de remplissage a : 10%

Volume	2.0139e+005 mm ³
Mass	0.0000101079kg

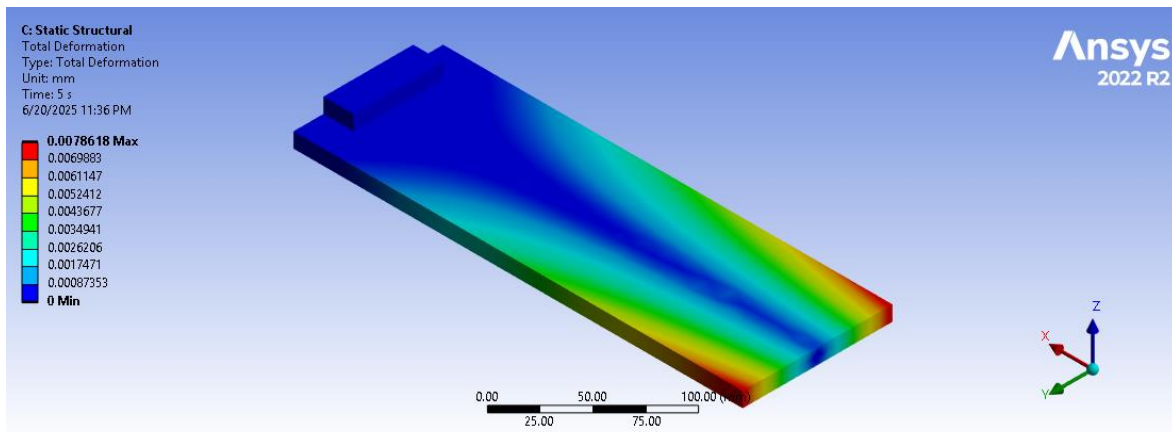


Figure 95 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion

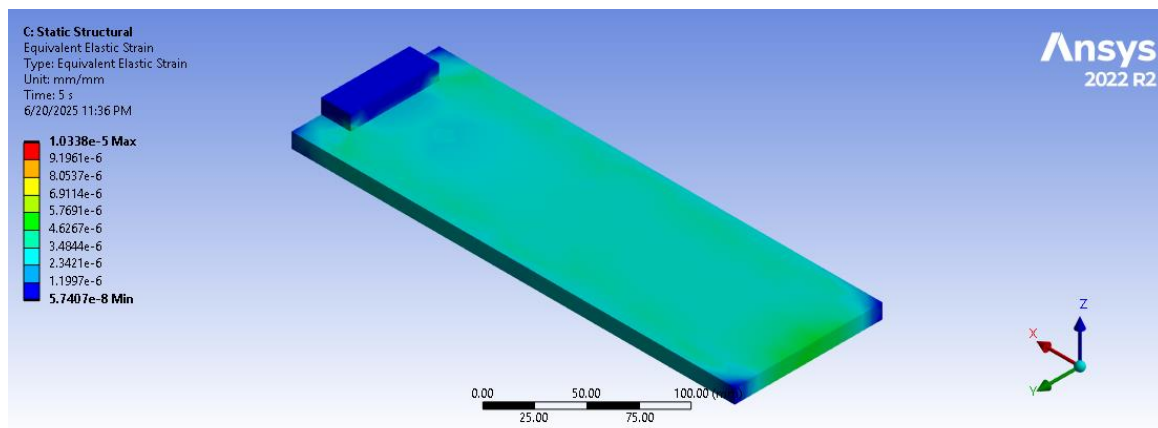


Figure 96 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion

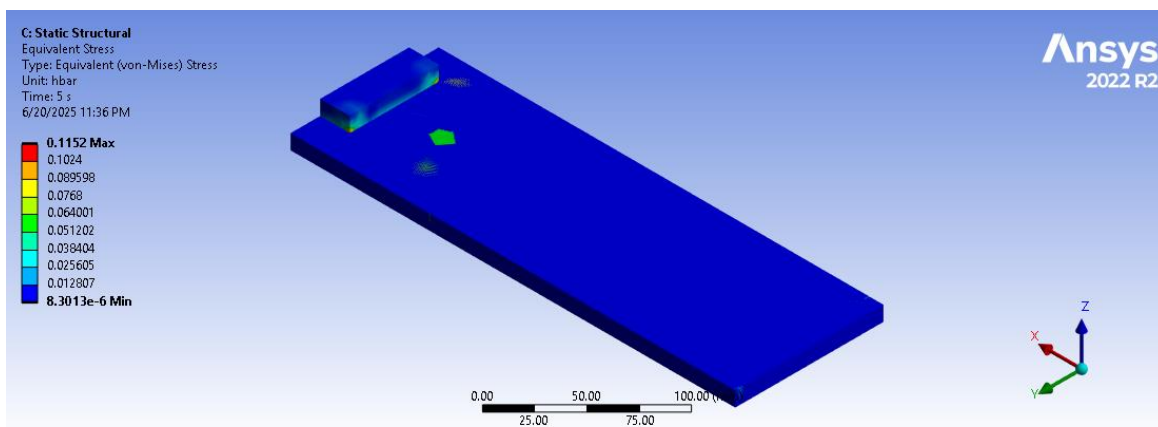


Figure 97 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en torsion

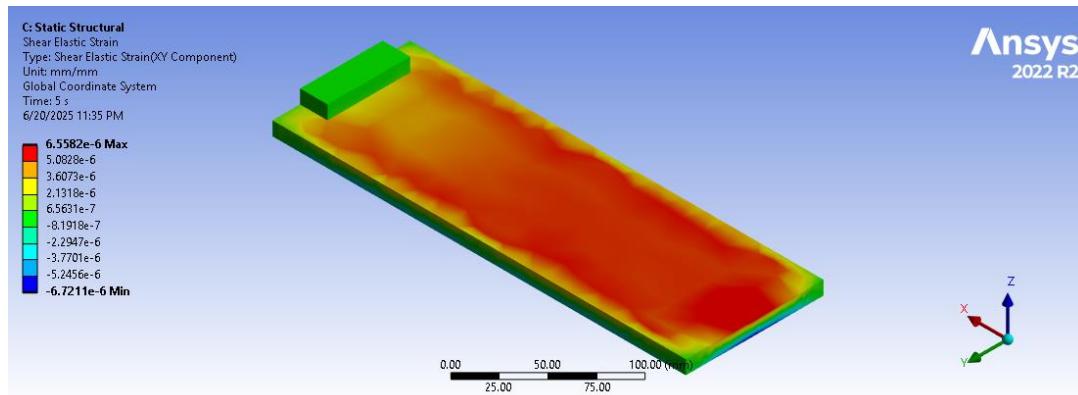


Figure 98 : Carte de Deformation Elastique Equivalente en cisaillement de la pièce en torsion

❖ Taux de remplissage a : 30%

Volume	2.4224e+005 mm ³
Mass	0.000014316kg

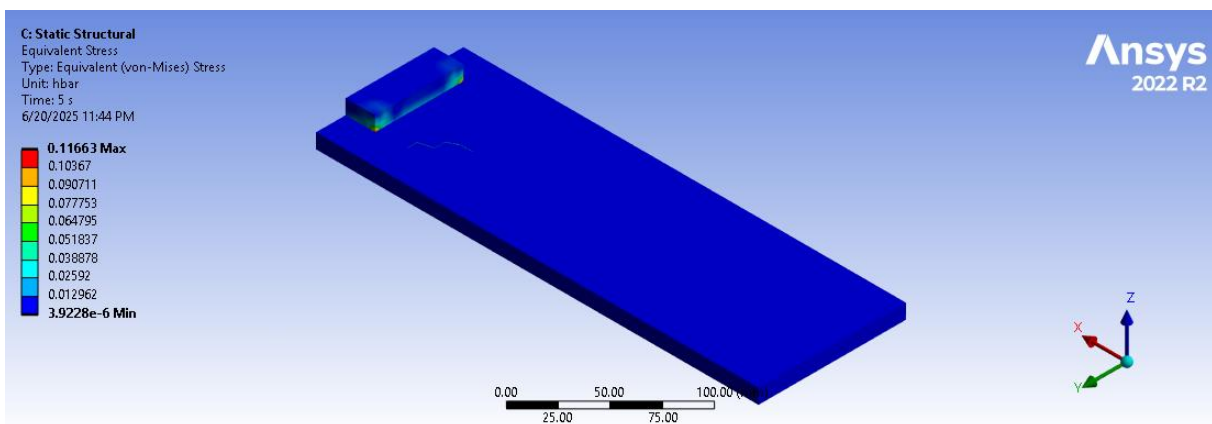


Figure 99 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en torsion

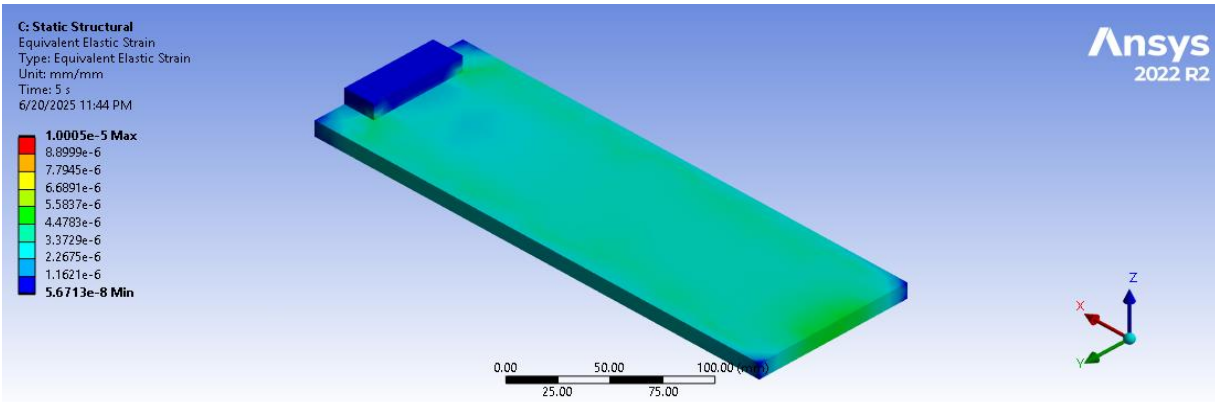


Figure 100 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion

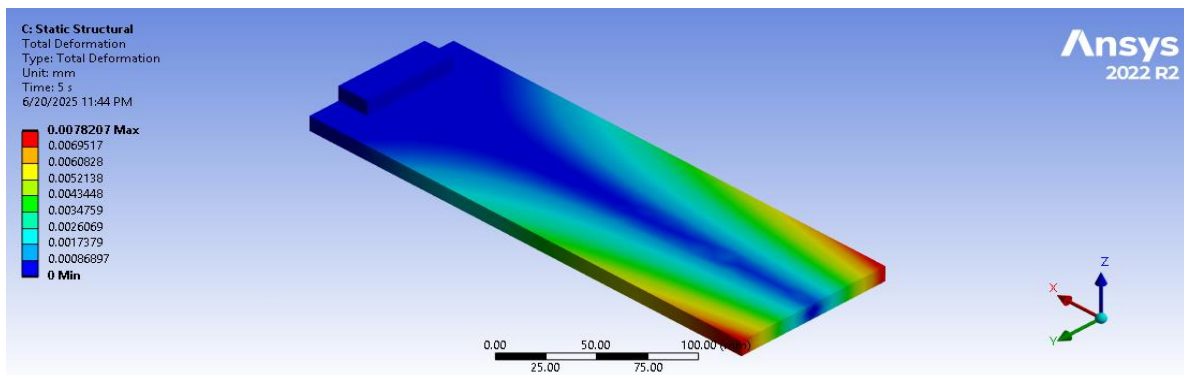


Figure 101 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion

Résultats Torsion – Motif Hexagonal

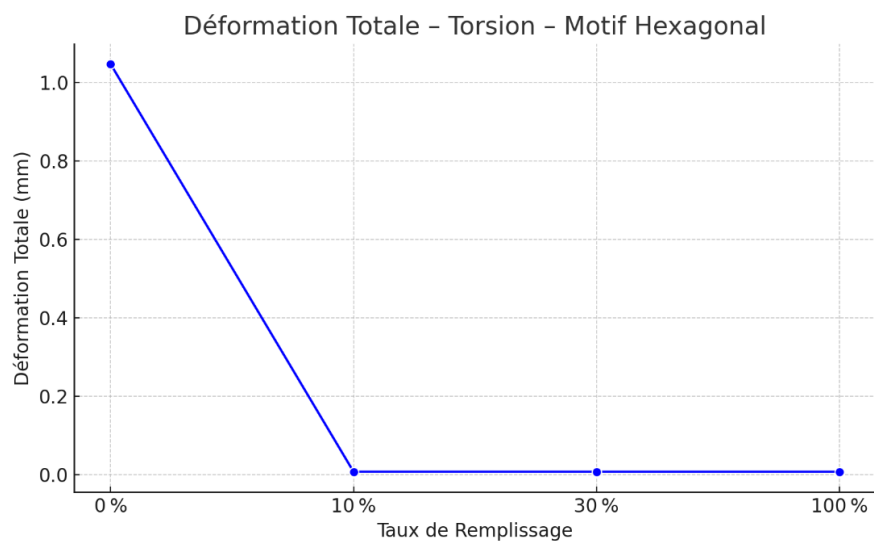


Figure 102 : Déformation Totale – Torsion – Motif Hexagonal

La déformation chute brutalement entre 0 % et 10 % puis se stabilise, indiquant un effet de rigidification significatif dû à l'ajout de matière.

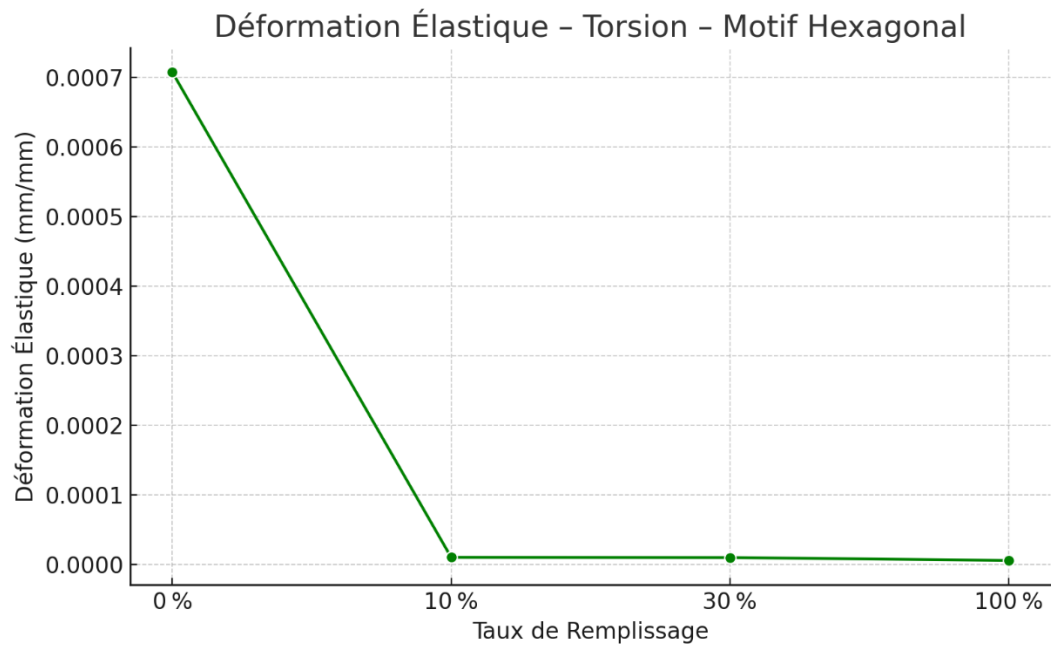


Figure 103 : Déformation Élastique – Torsion – Motif Hexagonal

La déformation élastique diminue fortement à mesure que le taux de remplissage augmente, traduisant une plus grande capacité du motif à résister à la torsion.

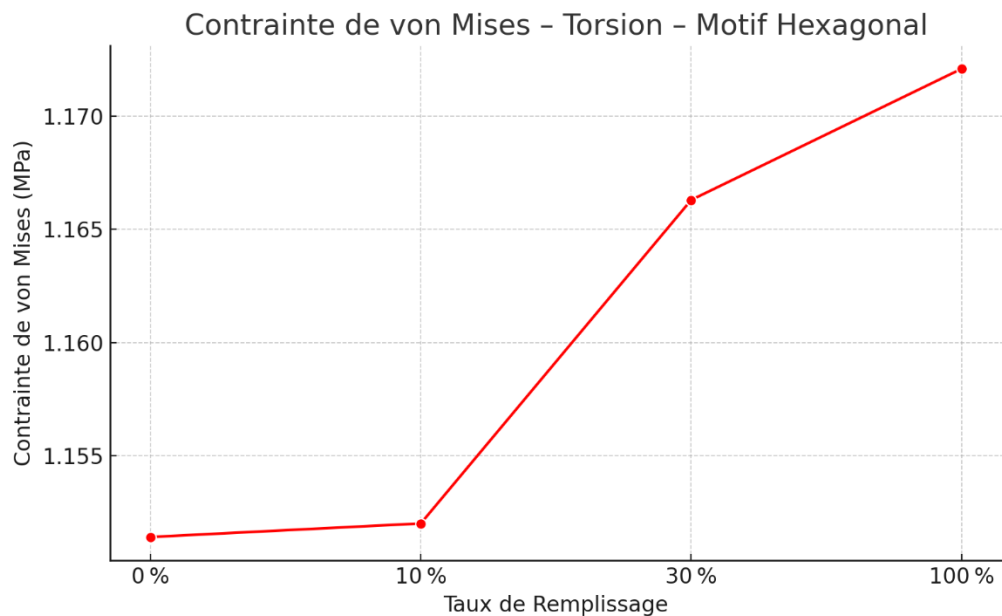


Figure 104 : Contrainte de von Mises – Torsion – Motif Hexagonal

La contrainte équivalente augmente légèrement entre 10 % et 100 %, reflétant une meilleure répartition des efforts mais avec des contraintes plus concentrées.

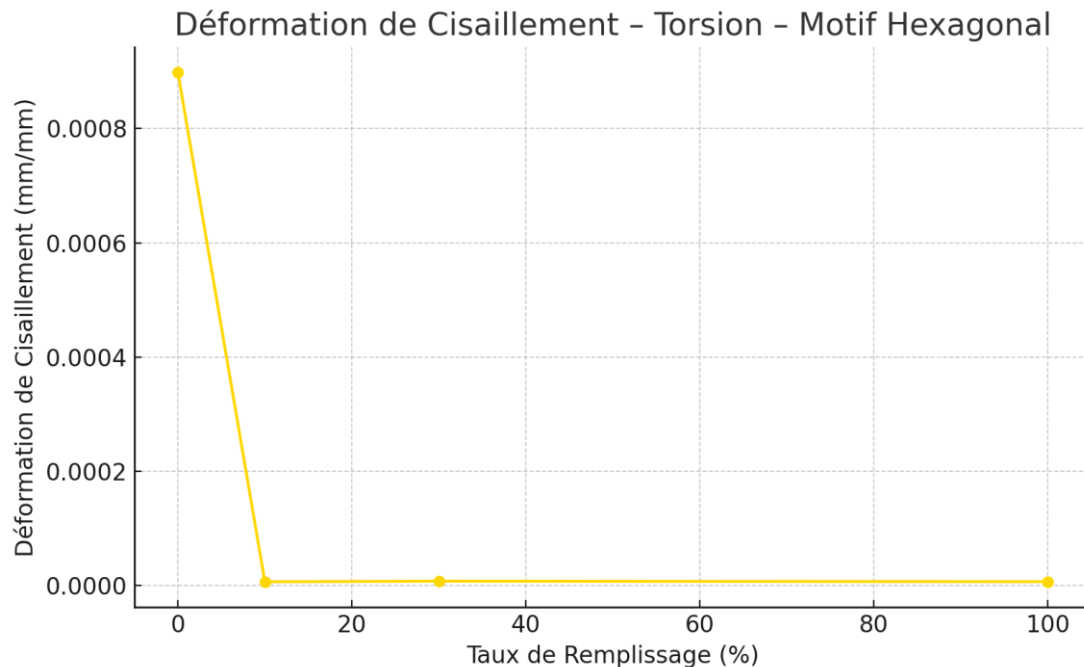


Figure 105 : Déformation de Cisaillement – Torsion – Motif Hexagonal

La déformation de cisaillement chute fortement après 0 % de remplissage, passant de 8.983×10^{-4} mm/mm à des valeurs très faibles ($< 8 \times 10^{-6}$ mm/mm), ce qui traduit une nette amélioration de la résistance au cisaillement avec l'ajout de matière dans le motif hexagonal.

Analyse des resultats:

Taux de Remplissage (%)	Déformation Totale Max (mm)	Déformation Élastique Max (mm/mm)	Contrainte Équivalente Max (MPa)	Déformation de Cisaillement Max (mm/mm)
0 %	1.0477	7.0771e-4	1.1514	8.983e-4
10 %	0.0078618	1.0339e-5	1.152	6.7211e-6
30 %	0.0078207	1.0006e-5	1.1663	7.695e-6
100 %	0.007769	5.8607e-6	1.1721	6.8897e-6

L'analyse met en évidence un comportement très sensible du motif hexagonal à la torsion :

- À 0 %, la structure est très déformable (1.0477 mm) avec des valeurs élevées de déformation élastique et de cisaillement.
- Dès 10 %, une rigidité importante est introduite, réduisant drastiquement les déformations totales et internes.
- La contrainte équivalente reste globalement stable (autour de 1.15 MPa), ce qui montre que la structure résiste mieux sans forcément accumuler de tensions plus fortes.
- Le taux de remplissage joue donc un rôle majeur dans la réponse du motif hexagonal face à un effort de torsion.

- **Le type Grid :**

- ❖ **Taux de remplissage a : 10%**

Volume	2.0436e+005 mm ³
Mass	0.104145kg

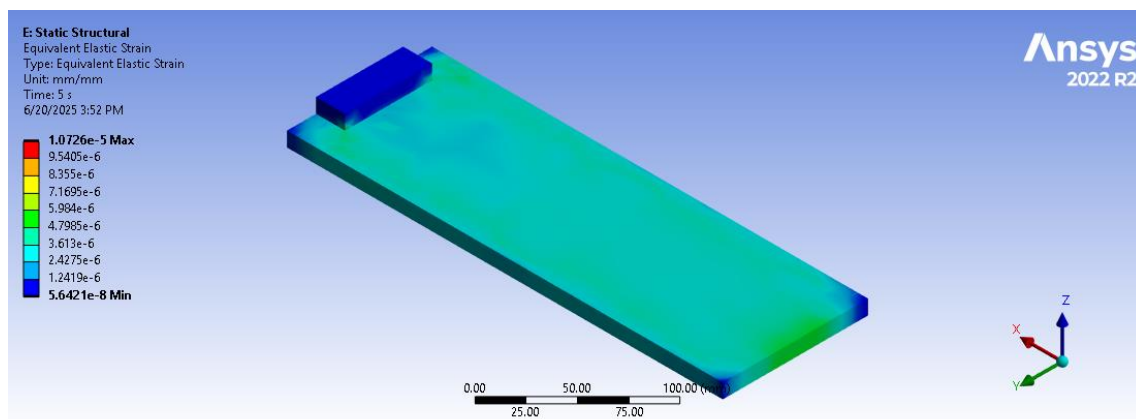


Figure 106 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion

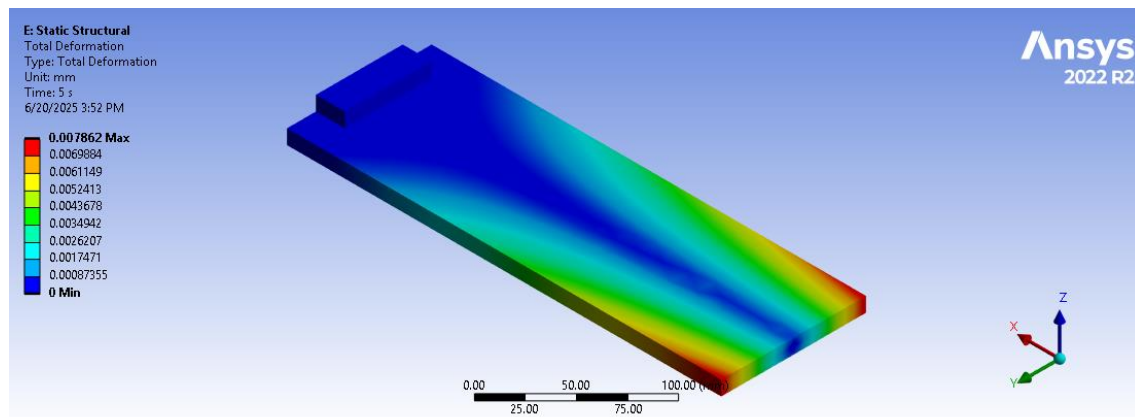


Figure 107 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion

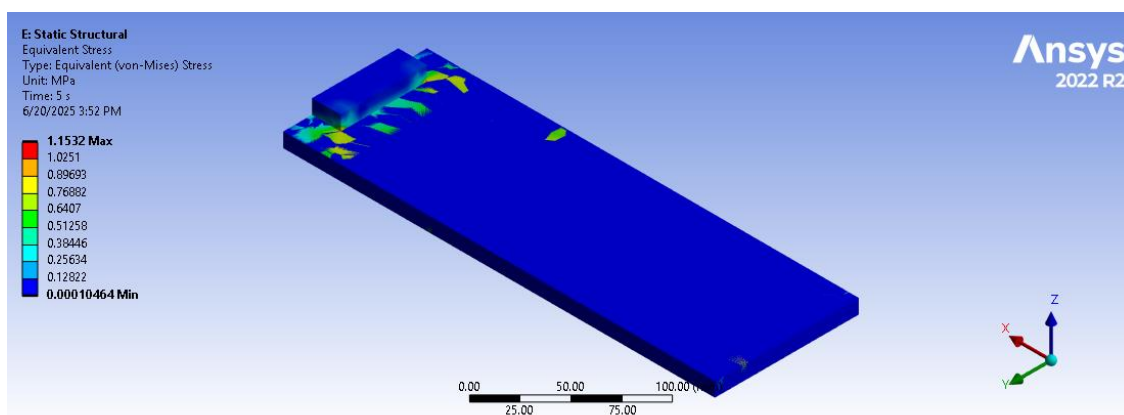


Figure 108 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en torsion

❖ **Taux de remplissage a : 30%**

Volume	79252 mm ³
Mass	0.104145kg

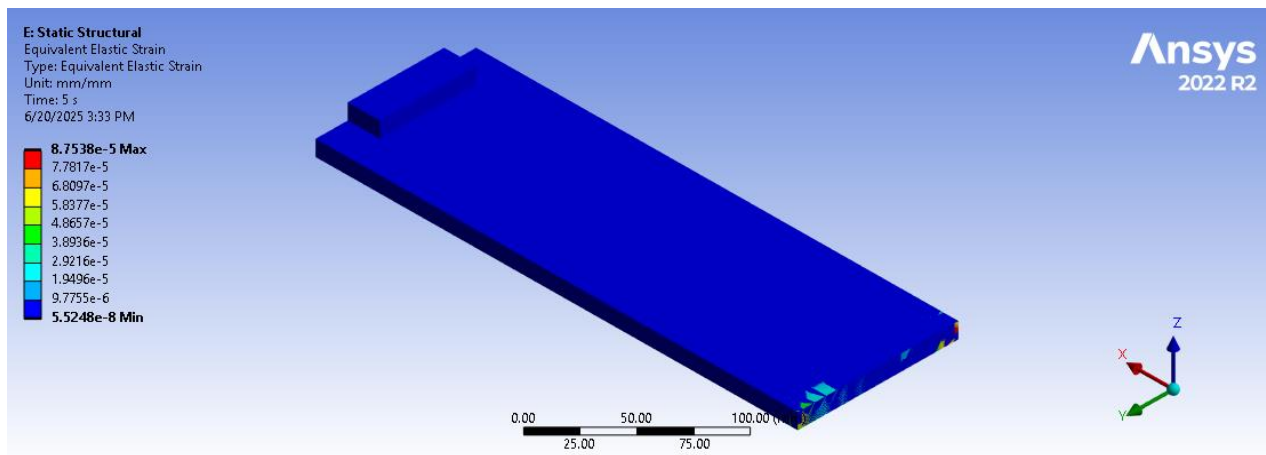


Figure 109 : Carte de Deformation Elastique Equivalente de la pièce en torsion

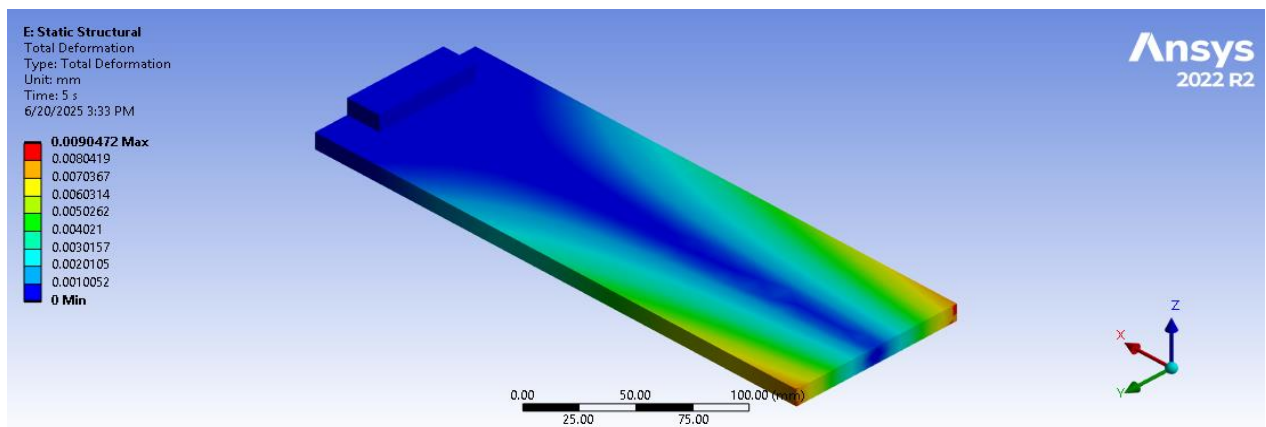


Figure 110 : Carte de déformation totale de la pièce en torsion

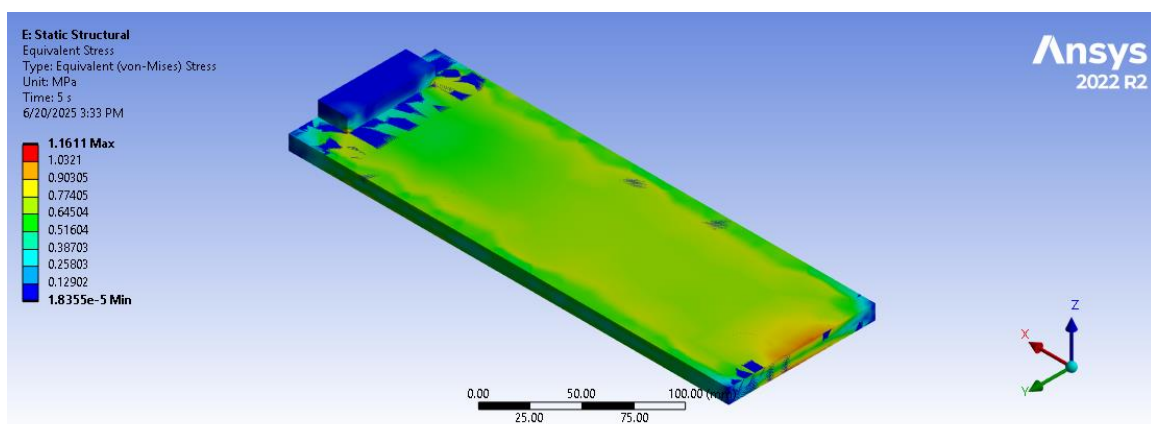


Figure 111 : Carte de Contrainte Equivalente de la pièce en torsion

résultats – Torsion – Motif Grille

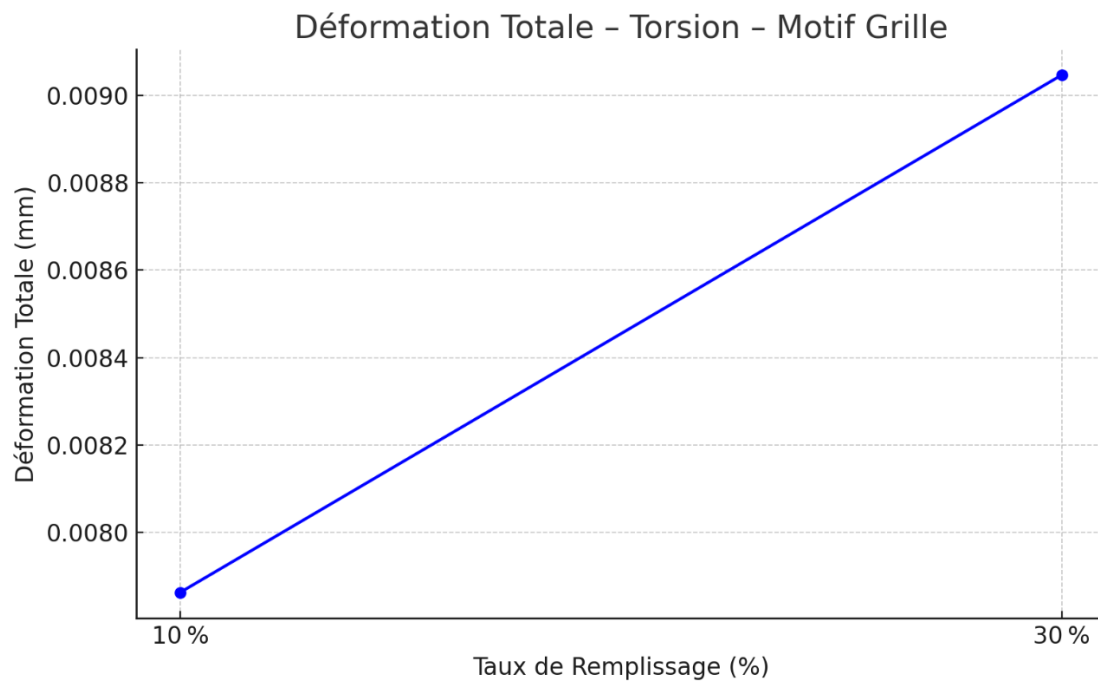


Figure 112: Déformation Totale – Torsion – Motif Grille

Ce graphique montre une légère augmentation de la déformation totale entre 10 % et 30 %, indiquant une structure légèrement plus flexible à taux élevé.

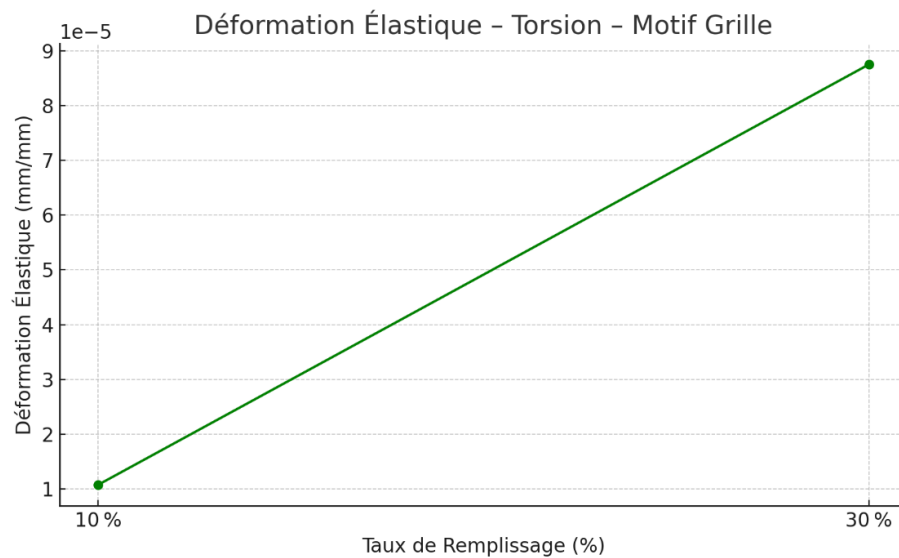


Figure 113: Déformation Élastique – Torsion – Motif Grille

On observe une augmentation importante de la déformation élastique à 30 %, révélant une élévation de la souplesse interne de la structure.

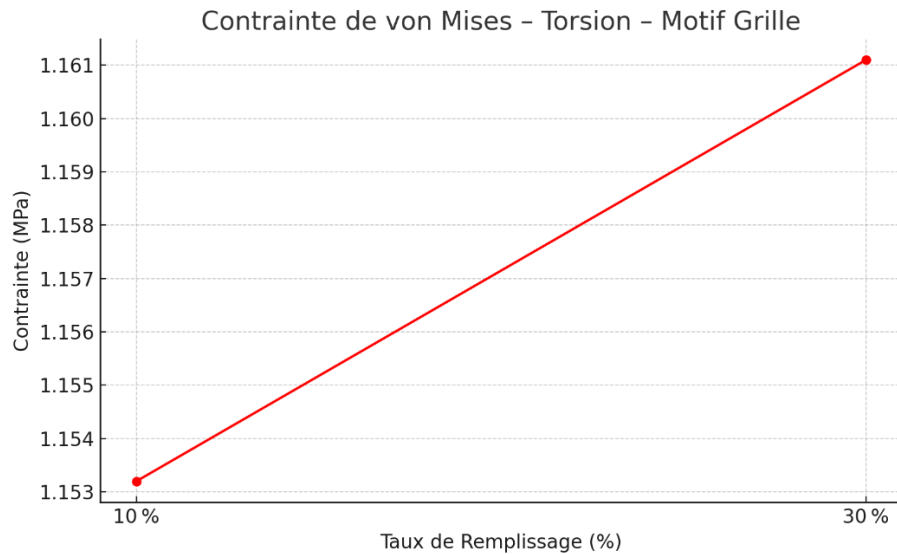


Figure 114 : Contrainte Équivalente – Torsion – Motif Grille

Les contraintes restent quasiment constantes, ce qui traduit une bonne répartition des efforts mécaniques quelle que soit la densité.

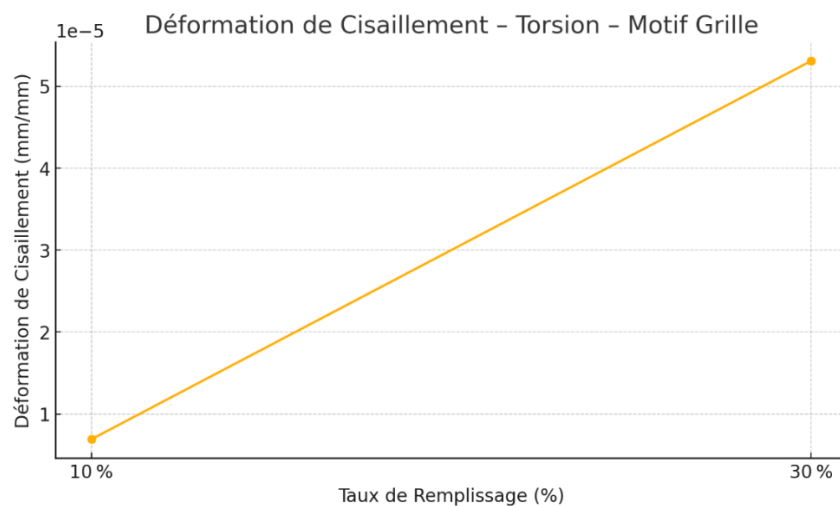


Figure 115 : Déformation de Cisaillement – Torsion – Motif Grille

On remarque une élévation significative de la déformation de cisaillement à 30 %, ce qui suggère une tendance accrue à la torsion plastique.

5.3 Interprétation des résultats

Taux de Remplissage (%)	Déformation Totale Max (mm)	Déformation Élastique Max (mm/mm)	Contrainte Équivalente Max (MPa)	Déformation de Cisaillement Max (mm/mm)
10 %	0.007862	1.0726e-5	1.1532	6.9113e-6
30 %	0.0090472	8.7538e-5	1.1611	5.3101e-5

Les résultats mettent en évidence un comportement torsionnel très modéré pour le motif grille :

- La déformation totale reste faible, avec une légère augmentation à 30 %, ce qui montre une rigidité globale satisfaisante.
- Cependant, l'augmentation de la déformation élastique et surtout de la déformation de cisaillement à 30 % suggère que la structure devient localement plus sensible à la torsion.
- Les contraintes de von Mises restent stables entre les deux taux, ce qui est un signe positif de stabilité mécanique.

On peut conclure que le motif grille résiste bien à la torsion jusqu'à 30 %, mais que sa capacité à absorber l'effort par élasticité diminue à taux élevé.

5.3.1 3.2 Comparaison Globale entre les Motifs Hexagonal et Grille

Le graphique comparatif ci-dessus met en évidence les différences de comportement mécanique entre les deux structures étudiées :

- **En traction**, les deux motifs présentent une réponse identique à taux de remplissage équivalent (0 %), avec une déformation totale de 0.57463 mm.
- **En flexion** (à 10 %), le motif hexagonal est légèrement plus déformable que le motif grille (23.802 mm contre 23.159 mm), traduisant une souplesse accrue.

- **En compression** (à 10 %), le motif grille offre une rigidité supérieure (déformation beaucoup plus faible), ce qui en fait une meilleure option pour les sollicitations de type compressif.
- **En torsion** (à 10 %), le motif grille est également moins déformable (0.007862 mm contre 1.0477 mm pour l'hexagonal), montrant qu'il est plus adapté à supporter des contraintes de torsion.

6 Conclusion Generale :

L'analyse comparative réalisée à l'aide du logiciel ANSYS a permis d'examiner le comportement mécanique des structures à motifs hexagonal et grille soumises à différents types d'efforts : traction, flexion, compression et torsion..

Ces résultats confirment que le motif hexagonal offre davantage de souplesse, le rendant plus adapté à des applications nécessitant une absorption des charges (ex. amortissement ou flexibilité géométrique), tandis que le motif grille s'avère plus performant en matière de rigidité et de résistance, particulièrement en torsion et en compression.

Ainsi, le choix du motif structurel dépendra directement du cahier des charges et des efforts prédominants dans l'application visée.

Bibliographie :

- [1] Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Mohamed, N. A. N., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261-276.
- [2] Piyush, Kumar, R., & Kumar, R. (2020). 3D printing of food materials: A state of art review and future applications. *Materials Today: Proceedings*.
- [3] Dawood, A., Marti Marti, B., Sauret-Jackson, V., & Darwood, A. (2015). 3D printing in dentistry. *British Dental Journal*, 219(11), 521-529.
- [4] Jandyal, A., Chaturvedi, I., Wazir, I., Raina, A., & Ul Haq, M. I. (2022). 3D printing - A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 33-42.
- [5] Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296.
- [6] Swetham, T., Reddy, K. M. M., Huggi, A., & Kumar, M. N. (2017). A Critical Review on 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 5(3), 353-361.
- [7] Wickramasinghe, S., Do, T., & Tran, P. (2020). FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. *Polymers*, 12(7), 1529.
- [8] Solomon, I. J., Sevel, P., & Gunasekaran, J. (2020). A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*.
- [9] Gokhare, V. G., Raut, D. N., & Shinde, D. K. (2017). A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(06), 953-957.
- [10] Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., & Shi, Y. (2018). A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications. *Engineering*, 4(5), 653-662.
- [11] Balletti, C., Ballarin, M., & Guerra, F. (2017). 3D printing: State of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*.
- [12] Singh, T., Kumar, S., & Sehgal, S. (2020). 3D printing of engineering materials: A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*.

- [13] ANSYS Inc. (2022). *ANSYS® Mechanical APDL Documentation* (Release 2022 R2).
- [14] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 10th ed. Pearson, 2017.
- [15] J. M. Gere and S. P. Timoshenko, *Mechanics of Materials*, 4th ed. PWS Publishing Company, 1997.
- [16] F. P. Beer, E. R. Johnston Jr., J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 8th ed. McGraw-Hill Education, 2019.
- [17] S. P. Timoshenko and J. M. Gere, *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed. McGraw-Hill, 1961.
- [18] K. B. C. Lim, S. T. E. Ng, and Z. P. S. Ting, "Methodology for Part Selection in Additive Manufacturing," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, pp. 2960-2965, 2020.
- [19] T. B. Serdyuk and I. A. Voronenko, "Selection of Parts for the Development of Additive Manufacturing," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 993, no. 1, p. 012019, 2020.
- [20] D. G. P. Serfontein, W. F. Haupt, and G. D. de Beer, "A Practical Approach to the Design and Selection of Parts for Additive Manufacturing," in *Proceedings of the 17th International Conference on Rapid Prototyping*, pp. 1-10, 2016.
- [21] B. T. H. Smith, *3D Printing: A Manager's Guide*. O'Reilly Media, 2015.
- [22] A. Gebisa and J. L. Lemu, "FDM 3D Printing of ABS and PLA: A Comparative Study of Mechanical Properties and Effects of Infill Percentage," *Cogent Engineering*, vol. 5, no. 1, p. 1500271, 2018.
- [23] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composites Part B: Engineering, 143, 172–196.
- [24] Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J. M., Garcia-Granada, A. A., Lluma-Fuentes, J., Reyes, G., & Borros, S. (2015). *Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts*. Materials & Design, 83, 670–677.
- [25] Zhang, J., & Chou, K. (2020). *Three-dimensional printed honeycomb structure by fused deposition modeling with effective design and mechanical performance*. Materials, 13(6), 1245.
- [26] Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., & Hague, R. J. M. (2017). *Mechanical properties of gyroid lattice structures by selective laser melting*. Materials Science and Engineering: A, 670, 264–274.
- [27] Torrado Perez, A. R., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). *Fracture surface analysis of*

3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. Journal of Failure Analysis and Prevention, 14, 343–353.

[28] D. Roylance, *Engineering Properties of Ceramics*. MIT OpenCourseWare, 2009. [Online]. Available: https://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/lecture-notes/Roylance_Chap3.pdf

[29] W. F. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th ed. Wiley, 2018.

[32] G. W. H. V. K. J. W. Zhang, X. Chen, and M. W. Zhong, "A Review of Reverse Engineering Methods for 3D Modeling," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 84, pp. 2487-2503, 2016.

[33] C. H. Kim, S. H. Lee, and J. R. G. Park, "Reverse Engineering and Rapid Prototyping: An Integrated Approach for Product Development," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 143-144, pp. 531-536, 2003.

[34] J. Li, F. M. Kong, and W. S. Chen, "Review of 3D Scanning Technologies for Reverse Engineering," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 8, pp. 838-854, 2017.

[35] Li, J., Kong, F. M., & Chen, W. S. (2017). "Review of 3D Scanning Technologies for Reverse Engineering," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(8), pp. 838-854.

[36] Kim, S. H., Lee, S. H., & Park, J. R. G. (2003). "Reverse Engineering and Rapid Prototyping: An Integrated Approach for Product Development," *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, pp. 531-536.

[37] Gebisa, A., & Lemu, J. L. (2018). "FDM 3D Printing of ABS and PLA: A Comparative Study of Mechanical Properties and Effects of Infill Percentage," *Cogent Engineering*, 5(1), p. 1500271.

[38] Gebisa, A., & Lemu, J. L. (2018). "FDM 3D Printing of ABS and PLA: A Comparative Study of Mechanical Properties and Effects of Infill Percentage," *Cogent Engineering*, 5(1), p. 1500271.

[39] Nid d'abeille (Honeycomb) / Hexagonal: Fournit une excellente résistance isotrope dans le plan XY, ainsi qu'une bonne rigidité et une utilisation efficace du matériau

[40] Cubique (Cubic) / Octet: Une structure 3D isogride reconnue pour sa résistance isotrope dans les trois dimensions

[41] Gyroid: Une structure triplement périodique minimale (TPMS) sans intersection, offrant un bon drainage et des potentiels avantages pour la résistance aux chocs et l'isolation

- [42] Wang, P. et al. (2021). Effect of infill pattern and density on mechanical properties in FDM, *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 655–664.
- [43] Tymrak, B. M., Kreiger, M., & Pearce, J. M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Materials & Design*, 58, 242–246.
- [44] Chacón, J. M. et al. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using FDM: Effect of geometrical parameters, *Materials & Design*, 124, 143–157.
- [45] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer.
- [46] Résultats ANSYS – Traction, Hexagonal et Grille, taux de 0 %
- [47] Résultats ANSYS – Flexion, taux de 10 %, fichiers hexagonal et grille
- [48] Résultats ANSYS – Compression, taux de 10 %, fichiers hexagonal et grille
- [49] Résultats ANSYS – Torsion, taux de 10 %, fichiers hexagonal et grille