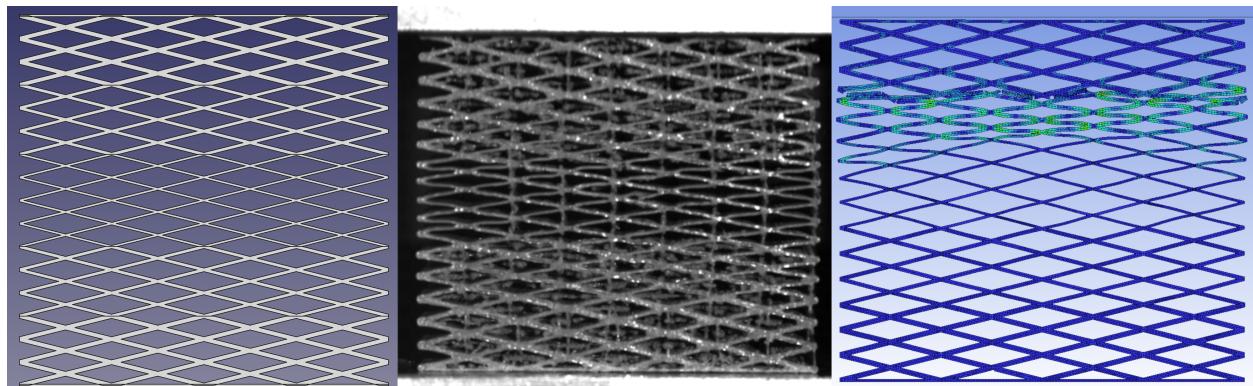


INSA HAUTS-DE-FRANCE

Étude de la capacité d'adsorption de différentes structures lattices hybrides avec des gradients de réseaux

PLP23INT16

FÉVRIER 2024



BACOUT VALENTIN
BENHILAL SALMA
BOSSU ROMAIN
HERMAN ADRIEN

PROFESSEURS : M. DELILLE & M. LAURO

Remerciements

Avant de commencer la rédaction de ce rapport d'expérience, nous tenions tout d'abord à remercier Rémi Delille et Frank Lauro, nos tuteurs. Votre expertise, votre patience et votre soutien nous ont été d'une aide inestimable durant ces 6 derniers mois. Grâce à vos conseils éclairés, nous avons pu approfondir nos connaissances et réaliser un travail dont nous sommes fiers. Merci également à vous pour votre disponibilité.

Nous souhaitons par ailleurs adresser nos remerciements à Bernard Philippe et Jean-Hubert Anceau, nos enseignants, pour leurs conseils avisés.

Plus généralement, nous remercions l'ensemble du LAMIH pour leur accueil chaleureux et leur financement.

Salma BENHILAL, Valentin BACOUT,
Romain BOSSU, Adrien HERMAN

Remerciements du chef d'équipe

Je tiens également à remercier l'équipe du PLP Lattybrides, Salma BENHILAL, Valentin BACOUT et Romain BOSSU, sans qui ce projet n'aurait pas abouti. Le travail à leurs côtés a été très agréable et chaque personnes de l'équipe a su ajouter sa brique à l'édifice. Je suis conscient que la programmation n'est pas le domaine de prédilection de l'équipe, mais nous avons su nous former et réaliser nos objectifs pour générer nos structures lattices.

Bravo à tous et merci !
Adrien HERMAN

Liens utiles

- Lien du drive du projet (Autorisation de lecture et d'écriture) :
<https://drive.google.com>
- Lien du dossier du drive où sont stockées toutes les structures testées :
<https://drive.google.com>
- Lien du dossier du drive où sont stockées toutes les données expérimentales et les images de la caméra à grande vitesse :
<https://drive.google.com>
- Lien du GitHub Lattybrides (Code source de l'Atelier *FreeCAD* pour la génération des structures) :
<https://github.com/AdrienHerman/Lattybrides>
- Lien du GitHub TDC (Code source du logiciel de Traitement des Données) :
<https://github.com/AdrienHerman/TDC>
- Lien vers la dernière version compilée du logiciel de Traitement des Données de Crash (TDC) :
https://github.com/AdrienHerman/TDC_2.0

Table des matières

Table des matières	2
Table des illustrations	4
Liste des tableaux	5
1 Introduction	6
2 État de l'Art	7
2.1 Structures Lattices homogènes	7
2.2 Structures Lattices à gradient de réseau	8
3 Problématique	9
4 Développement et Fabrication des Structures	10
4.1 Méthode de génération des structures	10
4.2 Algorithme d'optimisation de masse	11
4.3 Méthode d'impression des structures	13
4.3.1 Principe de la technologie FDM	13
4.3.2 Paramètres du Slicer	14
5 Structures Développées	16
5.1 Structure N°1 : Losanges	16
5.2 Structure N°2 : Triangles	17
5.3 Structure N°3 : Carrés + Arc	18
5.4 Structure N°4 : Hexagones + Triangles	19
5.5 Structure N°5 : Cosinus	20
6 Expérimentations	21
6.1 Matériel utilisé	21
6.2 Protocole expérimental	22
6.3 Variables de l'étude	23
6.3.1 Gradient d'épaisseur : Épaisseur des parois des Losanges	23
6.3.2 Gradient de géométrie : Angle des Losanges	24
6.3.3 Influence de l'ajout de plateaux entre les couches de gradient	25
6.3.4 Influence des structures symétriques ou asymétriques	26
6.3.5 Influence de la direction de sollicitation pour une structure asymétrique	28
7 Résultats Expérimentaux	29
7.1 Méthode de traitement des données	29
7.2 Résultats de la géométrie N°4 : Hexagones + Triangles	30
7.3 Résultats de la géométrie N°5 : Cosinus	31
7.4 Résultats de la géométrie N°1 : Losanges	32
7.4.1 Influence du gradient d'épaisseur	32
7.4.2 Influence du gradient de géométrie	32
7.4.3 Influence de l'ajout de plateaux	32
7.4.4 Influence de la direction de sollicitation sur une structure asymétrique	32
7.4.5 Influence de l'épaisseur dans un gradient symétrique	32
7.4.6 Comparaison de gradient symétrique et asymétrique équivalents	32
7.4.7 Ajout progressif de gradient d'épaisseur	32
7.4.8 Ajout progressif de losanges suivant les axes \vec{x} et \vec{y}	32
7.4.9 Comparaison de structures à gradients multiples	32
8 Modèle numérique	35
8.1 Maillage	35
8.1.1 Structure	35
8.1.2 Impacteur	36
8.2 Paramétrage du calcul	37
8.2.1 Système d'Unités	37
8.2.2 Matériau et Pièces	37

8.2.3	Contacts	38
8.2.4	Conditions Initiales et Conditions aux Limites	38
8.2.5	Amélioration de la Rapidité du Calcul	39
8.3	Écart avec les expériences	40
9	Critiques	42
9.1	Arrêt de l'impacteur	42
9.2	Défauts de la méthode d'impression à fil fondu (FDM)	42
10	Conclusion	44
11	Perspectives	44
12	Annexes	45
12.1	Annexe 1 : Notice d'utilisation de l'atelier <i>FreeCAD</i> pour la génération des structures	45
12.2	Annexe 2 : Notice du logiciel de Traitement des Données	46
Bibliographie		47

Table des illustrations

1	Exemple de deux structures lattices homogènes. À gauche la structure est inspirée d'un réseau de modécules [1]. À droite la structure est une âme en nid d'abeille utilisé dans l'aéro-spatial [2].	7
2	Illustration des treillis à gradient de réseau dans les os [3] à gauche et dans le pomelo [4] à droite.	8
3	Logigramme décrivant l'algorithme d'optimisation de la masse	11
4	Phénomène de dépassement de l'objectif de masse à atteindre si l'augmentation de l'épaisseur des parois est trop grande	12
5	Principe de fonctionnement de la technologie d'impression 3D type FDM [5]	13
6	Problématique de fusion entre losange non réalisée lors de l'impression avec le générateur de périmètres "Classique"	15
7	Paramètres de la géométrie N°1 : Losanges	16
8	Modélisation sous <i>FreeCAD</i> d'une structure N°1 : Losanges	16
9	Paramètres de la géométrie N°2 : Triangles	17
10	Motif à répéter de la géométrie N°2 : Triangles à gauche. Modélisation sous <i>FreeCAD</i> d'une structure N°2 : Triangles à droite.	17
11	Paramètres de la géométrie N°3 : Carrés + Arcs	18
12	Modélisation sous <i>FreeCAD</i> d'une structure N°3 : Carrés + Arcs	18
13	Paramètres de la géométrie N°4 : Hexagones + Triangles	19
14	Modélisation sous <i>FreeCAD</i> d'une structure N°4 : Hexagones + Triangles Alignées à gauche. Modélisation sous <i>FreeCAD</i> d'une structure N°4 : Hexagones + Triangles Déphasés à droite.	19
15	Paramètres de la géométrie N°5 : Cosinus à gauche. Modélisation sous <i>FreeCAD</i> d'une structure N°5 : Cosinus à droite.	20
16	Plan technique du Puits de Chute original issu de la thèse de Audrey Auperrin [9]	21
17	Schéma des éléments du puits de chute modélisés sous <i>Catia V5</i>	21
18	Schéma de l'installation expérimentale	22
19	Étude de l'influence de la présence d'un gradient d'épaisseur au sein d'une structure Losange	23
20	Étude de l'influence de la présence d'un gradient de géométrie au sein d'une structure losange	24
21	Représentation de la nécessité d'ajout de plateau dans une configuration de gradient de géométrie	25
22	Étude de l'influence de la présence d'un plateau au sein d'une structure losange	25
23	Étude de l'influence de la différence entre une structure symétrique et asymétrique au travers d'une structure A à gauche (symétrique) et d'une structure B à droite (asymétrique)	27
24	Étude de l'influence de la direction de sollicitation pour une structure asymétrique	28
25	Résultats du traitement des données pour la Structure 10	29
26	Résultats du traitement des données pour la Structure 12	30
27	Résultats du traitement des données pour la Structure 28	31
28	Influence d'un gradient d'angle sur l'axe \vec{y}	33
29	Influence de l'ajout de plateaux ou non	33
30	Comparaison d'énergie moyenne d'absorption de la structure 3 et 9.	34
31	Arborescence du fichier <i>FreeCAD</i> pour la structure 27 et importation du fichier STEP sur <i>LsDyna</i> (Présence de jointures entre les couches de gradients et les plateaux)	35
32	Importation du fichier STEP sur <i>HyperWorks</i> et suppression des facettes qui ne sont pas sur le plan xOy	35
33	Projection de la structure sur une esquisse et création d'une surface fusionnée, suppression des lignes de construction (lignes sélectionnées) et conversion des lignes de construction en traits pleins.	36
34	Impacteur modélisé par une shell de 1mm d'épaisseur suivant \vec{z} et maillée par des éléments quadrilatères (100x1 subdivisions) avec l'hypothèse de déformations planes	36
35	Comparaison des résultats Expérimentaux - Éléments Finis à divers instants de déformation de la structure (Structure 11).	40
36	Comparaison des résultats Expérimentaux et du modèle Éléments Finis pour un déplacement maximal de l'impacteur de 19,73 mm	41
37	Comparaison des résultats Expérimentaux et du modèle Éléments Finis sans condition d'arrêt de l'impacteur (course libre)	41
38	Schématisation des manques ou excès de matière lors de l'impression FDM	42
39	Schématisation des manques ou excès de matière dans les angles lors de l'impression FDM	43

Liste des tableaux

1	Paramètres de l'imprimante dans <i>Prusa Slicer</i>	14
2	Paramètres du filament dans <i>Prusa Slicer</i>	14
3	Paramètres d'impression dans <i>Prusa Slicer</i>	15
4	Paramètres de la géométrie N°1 : Losanges	16
5	Paramètres de la géométrie N°2 : Triangles	17
6	Paramètres de la géométrie N°3 : Carrés + Arc	18
7	Paramètres de la géométrie N°4 : Hexagones + Triangles	19
8	Paramètres de la géométrie N°5 : Cosinus	20
9	Paramètres de la structure Numéro 1 : Structure de référence	23
10	Paramètres de la structure Numéro 15 : Influence de l'ajout d'un gradient d'épaisseur	23
11	Paramètres de la structure Numéro ??? : Structure de référence	24
12	Paramètres de la structure Numéro ??? : Influence de l'ajout d'un gradient de géométrie	24
13	Paramètres de la structure Numéro ??? et ??? : Influence de l'ajout d'un plateau entre deux couches	25
14	Variation des couches lors de l'étude des structures symétriques ou asymétriques	26
15	Paramètres de la structure Numéro ??? : Structure symétrique	26
16	Paramètres de la structure Numéro ??? : Structure asymétrique	26
17	Paramètres de la structure Numéro ??? : Influence de la direction de sollicitation	28
18	Comparaison d'énergie moyenne d'absorption entre différentes épaisseurs	32
19	Système d'unités utilisé dans <i>LsDyna</i>	37
20	Propriétés matérielles de la structure en PLA	37
21	Propriétés matérielles de l'impacteur	38

1 Introduction

Dans un environnement industriel de plus en plus concurrentiel, les entreprises cherchent continuellement des stratégies pour rester à la pointe et surpasser leurs rivaux. Avec la croissance de la demande d'économie d'énergie, l'intérêt pour les pièces légères s'intensifie également. Par exemple, dans l'industrie automobile, alléger le poids des voitures favorise l'économie de carburant. Face à ce besoin, la mise en œuvre des structures en treillis ont provoqué un changement de point de vue, en particulier dans la quête des systèmes d'absorption d'énergie efficace. En effet, les structures en treillis (lattices) représentent une catégorie de structures mécaniques dont la géométrie est caractérisée par une répétition de motifs tout en ayant un taux de porosité d'au moins 70%. Ces caractéristiques offrent des propriétés mécaniques avantageuses, telles que l'absorption d'énergie dans le cas d'un crash. La fabrication de ces structures a été facilitée par l'évolution des techniques de fabrication additive qui permet la production de géométries complexes dans les trois dimensions.

2 État de l'Art

2.1 Structures Lattices homogènes

Commençons par expliquer ce qu'est une structure lattice. Une structure lattice est une structure treillis de minimum 70% de taux de porosité. Ces treillis permettent de créer des pièces légères tout en gardant une rigidité élevée. Certaines géométries de structures lattices sont aussi utilisées pour des propriétés d'absorption d'énergie. Elles peuvent aussi trouver leur place dans des domaines d'applications thermiques ou acoustiques. Les propriétés mécaniques de ces structures sont très dépendantes de leur géométrie et de leur densité.

Pour fabriquer ces structures treillis, des techniques basées sur le pliage et le découpage de tôles métalliques existent. Cependant, ces techniques sont difficiles à mettre en place et ne permettent pas de fabriquer toutes les géométries possibles. Ces limitations sont principalement dues aux géométries en trois dimensions des structures lattices.

Les technologies de fabrication additive ont cependant grandement facilité la production des structures en treillis. La plupart des études menées sur des structures lattices utilisent des méthodes d'impression 3D métallique. Parmi elle ont retrouvé notamment les technologies Laser Beam Melting¹ et Electron Beam Melting² qui permettent de fondre couche par couche un lit de poudre métallique. Dans le cadre de ce projet, la technique de fabrication Fused Deposition Modeling a été utilisée (4.3.1).

Ces architectures sont majoritairement utilisées pour des applications mécaniques notamment pour l'allègement de structures et l'absorption d'énergie en cas d'impact. On peut par exemple les retrouver dans des casques ou encore dans les tableaux de bords de voiture³. Les structures lattices se retrouvent également en architecture et dans des applications artistiques car ce sont des structures jugées très esthétiques.

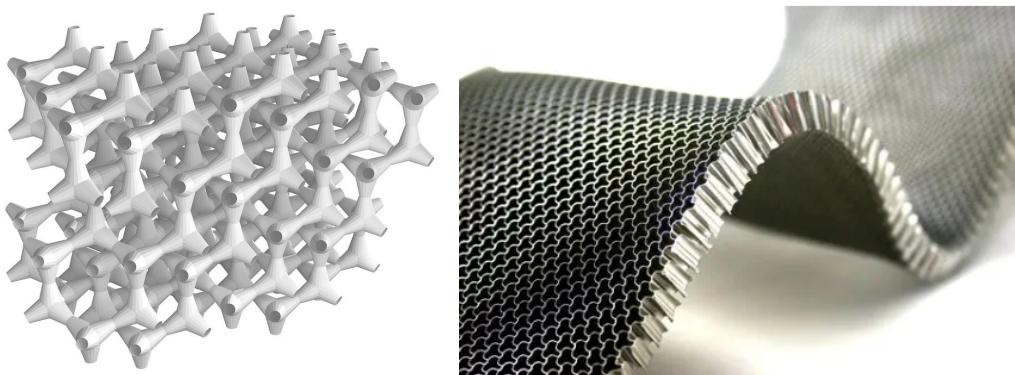


Fig. 1: Exemple de deux structures lattices homogènes. À gauche la structure est inspirée d'un réseau de modèles [1]. À droite la structure est une âme en nid d'abeille utilisé dans l'aéro-spatial [2].

¹Technologie LBM : Une fine couche de poudre métallique est fondu par un faisceau laser.

²Technologie EBM : Une fine couche de poudre métallique est fondu par un faisceau d'électrons.

³Lors de la fabrication des tableaux de bords de voiture par injection plastique, la phase de compression est suivie par une phase de léger retrait formant ainsi une mousse et allégeant la pièce finale.

2.2 Structures Lattices à gradient de réseau

Dans le contexte de la recherche avancée dans des structures absorbantes d'énergie, les structures lattices à gradients de réseaux représentent une innovation permettant une manipulation précise des propriétés mécaniques à partir d'une architecture variable. Cette géométrie intègre des variations contrôlées ou non de propriétés structurales du treillis ou de densité des cellules à travers le volume du matériau. Ces structures visent à optimiser la distribution des contraintes et l'absorption de l'énergie dans des contextes de crash.

Les os sont des exemples remarquables de structures à gradients de réseaux dans la nature. Ils présentent une variation graduelle de densité, allant de la partie compacte externe à la structure spongieuse interne, optimisant ainsi la résistance et la légèreté.

Le pomelo est également un bon exemple de structure lattice à gradient de réseau. En effet, ce fruit poussant en haut d'un arbre possède un treillis de plus en plus dense vers le cœur, protégeant ainsi le fruit lors de sa chute de l'arbre.

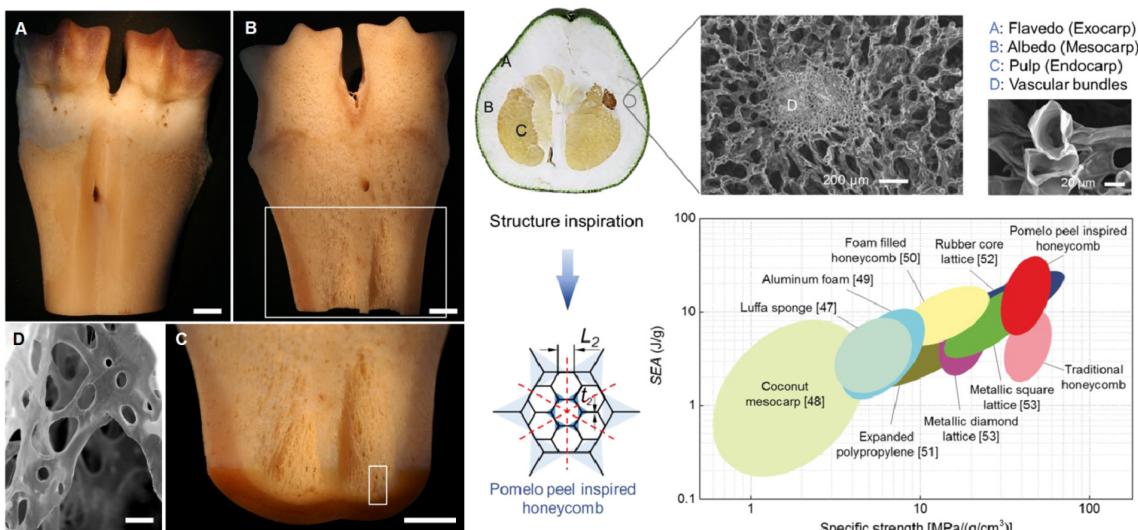


Fig. 2: Illustration des trellis à gradient de réseau dans les os [3] à gauche et dans le pomelo [4] à droite.

3 Problématique

Notre projet se base donc sur les deux constats précédemment établis. Les structures lattices homogènes permettent une légèreté des structures, très recherchée actuellement, et la nature possède des structures lattices à gradients de réseaux qui permettent une meilleure absorption d'énergie. Ces dernières sont néanmoins totalement aléatoires. La nécessité de pouvoir concevoir des structures lattices à gradient de réseau contrôlé est donc essentielle.

Nous nous sommes donc questionnés sur l'apport de gradients de réseaux contrôlés au sein d'une structure lattice, en termes d'absorption d'énergie. Nous cherchons donc à comprendre :

En quoi les gradients de réseau améliorent-ils le comportement de structures lattices en crash ?

Notre but est d'absorber 20% d'énergie en plus par rapport à une structure lattice homogène de référence.

4 Développement et Fabrication des Structures

4.1 Méthode de génération des structures

Dans le but de générer nos structures, plusieurs solutions s'offraient à nous. Dans un premier temps, nous avons cherché un logiciel / une extension *Python* existante ce qui aurait pu nous faire gagner un temps non négligeable. Grâce à ce logiciel / cette extension, nous aurions pu générer des structures rapidement mais nous n'aurions pas eu la liberté de création de géométrie que nous désirions, ni la possibilité d'ajouter des gradients. De plus, nous n'aurions pas pu obtenir des structures à masse constante, ce qui est indispensable afin d'avoir une étude dans les mêmes conditions d'expérimentation (voir 6.3). Certains logiciels existent sur le marché mais n'étaient pas adaptés à nos besoins et sont payants. L'achat d'une licence n'était pas envisageable dans le cadre de ce projet.

Nous avons réfléchi à l'éventualité de concevoir les structures manuellement, à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D comme *Catia V5* ou *SolidWorks*. Cette éventualité nous aurait permis de générer des structures facilement et d'être assez libre pour la création de géométries diverses. Cependant, il aurait été difficile voire impossible de contrôler la masse des structures. La tâche de conception aurait également été longue et fastidieuse.

Notre dernière solution était de développer une extension *FreeCAD* de génération de structures automatisée. Pourquoi utiliser le modeleur 3D *FreeCAD* ? Ce modeleur 3D est essentiellement développé en *Python* et en *C*. Son code est également open-source⁴ et permet l'ajout d'extension (d'atelier) utilisant les fonctionnalités existantes du logiciel et d'ateliers tierces. Cette solution nous permet de rester totalement libre sur la création de géométrie moyennant le temps de développement en *Python*. Nous pouvons également contrôler facilement la masse de nos structures via un algorithme d'optimisation simple. L'introduction de gradients dans des géométries de base peut se faire de manière très simple. Étant donné que nous avons un script nous permettant de générer une structure de référence, il nous suffit d'appeler ce script une fois par couche de gradient. L'utilisation de l'atelier développé est décrite dans l'Annexe 1 (??).

⁴Open-Source = En libre accès

4.2 Algorithme d'optimisation de masse

Nos essais doivent obligatoirement se dérouler dans les mêmes conditions. En effet, si plusieurs paramètres de l'étude varient en même temps, aucune conclusion ne pourra être tirée des données récoltées. La masse de la structure fait partie des conditions d'expérimentation et est directement liée à l'épaisseur des parois de la structure ainsi que le taux de porosité de celle-ci. Le taux de porosité est un paramètre utilisateur qui ne doit pas être modifié automatiquement par le script d'optimisation. En revanche, l'épaisseur des parois peut-être légèrement modifiée afin d'obtenir une masse cible.

L'algorithme d'optimisation utilisé est très basique et voici un logigramme représentant son fonctionnement :

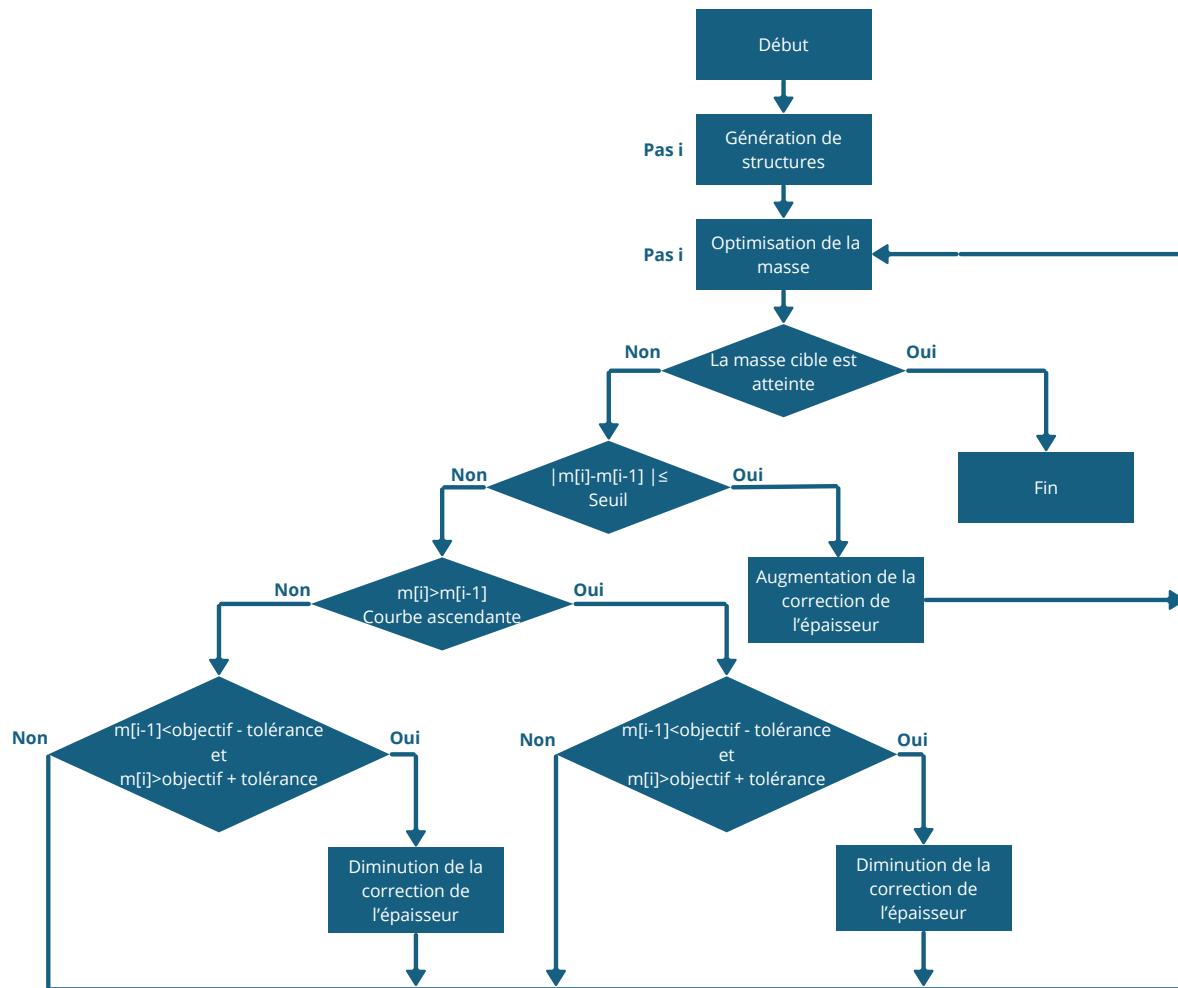


Fig. 3: Logigramme décrivant l'algorithme d'optimisation de la masse

Cet algorithme est composé de trois variables principales :

- ep : L'épaisseur des parois de la structure.
- Δep : Variable décrivant la quantité d'épaisseur à modifier à chaque pas de calcul.
- $fact_{\Delta ep}$: Pourcentage d'augmentation / diminution de Δep

Le fonctionnement est simple, si la masse actuelle de la structure est inférieure à la masse cible, ep sera augmentée de Δep . Cependant, il est possible que la variation d'épaisseur Δep engendre une trop grande augmentation de la masse (4). Dans ce cas, Δep doit être diminuée afin de converger : $\Delta ep_{i+1} = (1 - fact_{\Delta ep}) * \Delta ep_i$.

Dans le but d'améliorer la convergence de l'algorithme, donc de réduire le temps de calcul, l'algorithme est également autorisé à augmenter Δep si la variation de la masse est inférieure à un certain seuil : $\Delta ep_{i+1} = (1 + fact_{\Delta ep}) * \Delta ep_i$.

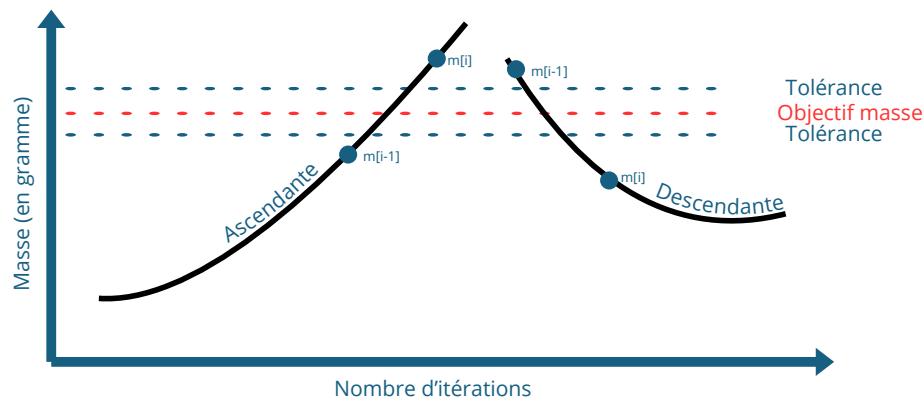


Fig. 4: Phénomène de dépassement de l'objectif de masse à atteindre si l'augmentation de l'épaisseur des parois est trop grande

4.3 Méthode d'impression des structures

4.3.1 Principe de la technologie FDM

Les structures lattices ont certes de grandes propriétés en allègement des systèmes mécaniques et en crash, mais sont malheureusement compliquées à produire. En effet, les méthodes de fabrication classiques (tournage, fraisage, etc...) permettent la fabrication de pièces de formes complexes, mais sont limités par le passage des outils d'enlèvement de matière.

Depuis les années 90, une nouvelle méthode de fabrication révolutionnaire est apparue. Cette méthode n'utilise pas un procédé d'enlèvement de matière, mais d'ajout de matière. Nous l'appelons la fabrication additive ou encore impression 3D. Le principe de la fabrication additive est de pouvoir produire un volume couche par couche en ajoutant de la matière qui peut se présenter sous plusieurs formes (Résines photosensibles, poudres, filaments, etc...). La technologie de fabrication additive utilisée dans le cadre de ce projet est l'impression 3D FDM⁵.

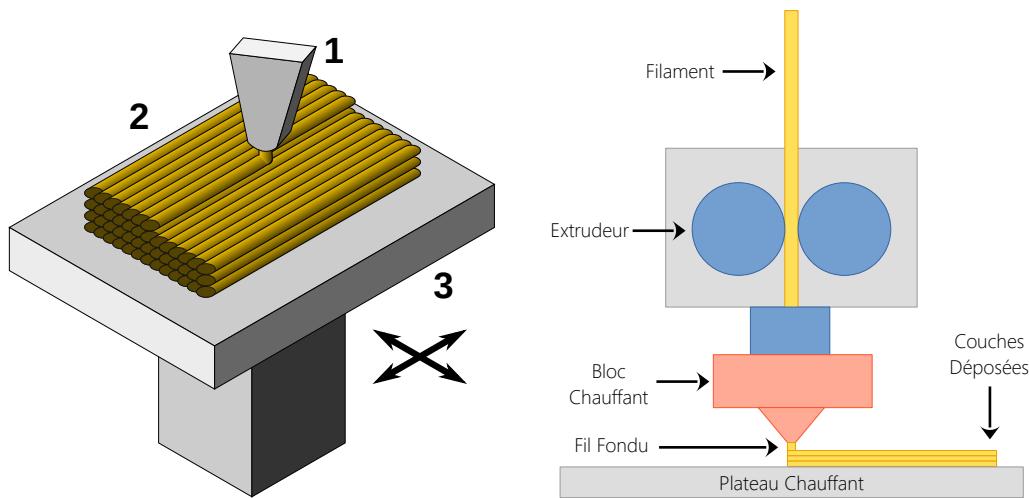


Fig. 5: Principe de fonctionnement de la technologie d'impression 3D type FDM [5]

Cette technologie utilise un filament d'un diamètre calibré. Ce filament est poussé par un extrudeur dans un corps chauffant afin de le faire fondre. Le fil fondu sort alors d'une buse d'un diamètre calibré inférieur au diamètre du filament pour être déposé sur un plateau. Le mouvement de l'ensemble extrudeur et bloc chauffant correctement coordonné avec le flux de filament imposé par l'extrudeur forme des motifs. La pièce est alors imprimée par superposition de couches. Nous avons choisi cette méthode de fabrication additive, car c'est une technologie simple, peu chère et nous possédons trois machines de ce type.

À partir d'une technologie de ce type il est très simple de produire des pièces à formes très complexes dans les trois dimensions, dont les structures lattices.

⁵Fused Deposition Modeling ou en français : Dépôt de fil fondu

4.3.2 Paramètres du Slicer

Les paramétrages du slicer ne sont pas à négliger. En effet, étant donné que nous imprimons des motifs extrêmement fins (de l'ordre de $0.2mm$), ceci implique de devoir faire des réglages très fins. Le slicer utilisé tout au long du projet est le logiciel *Prusa Slicer* basé sur le slicer *Slic3r*. Nous avons choisi ce logiciel car il nous laisse une grande liberté dans le choix des paramètres d'impression. Il est également très bien documenté ce qui facilite le paramétrage (Lien vers la documentation de *Prusa Slicer*).

Attention ! : Les paramètres ci-dessous ont été optimisés pour des machines du type Creality Ender-3, Creality CR-10, Creality Ender-3, Alfawise U20, etc... et sont susceptibles de ne pas fonctionner sur d'autres machines.

Paramètres de l'imprimante :

La première chose à faire est de paramétriser le diamètre de la buse. Dans la majorité des cas, les épaisseurs de parois des structures nous contraignaient à effectuer les impressions avec une buse de $0.2mm$. Plus le diamètre de buse est faible, plus la longueur de rétractation⁶ à besoin d'être faible. Attention à ne pas trop augmenter la longueur de rétractation et attention à ne pas effectuer trop de rétractations ! Cela pourrait boucher la buse. Pour éviter ce problème nous avons paramétré la longueur de rétractation à $2mm$ à une vitesse de rétractation de $80mm/s$, une vitesse de réinsertion de $50mm/s$ et un déplacement minimal après rétractation de $10mm$.

Nom de la Variable	Valeur
nozzle_diameter[0]	$0.2mm$
min_layer_height[0]	$0.05mm$
max_layer_height[0]	$0.2mm$
retract_lift[0]	$0.4mm$
retract_length[0]	$2mm$
retract_speed[0]	$80mm/s$
deretract_speed[0]	$60mm/s$

Table 1: Paramètres de l'imprimante dans *Prusa Slicer*

Paramètres du filament :

Afin de rendre nos structures les plus homogènes possibles, il est obligatoire que les couches d'impression et les passages successifs de buse dans une même couche donne un solide le plus fusionné (homogène) possible. Cependant, il ne faut pas non plus surchauffer le filament. Cela pourrait casser les chaînes du polymère, engendrant de grands changements de propriétés mécanique. De plus, surchauffer le filament le rends moins visqueux et le risque de former des cheveux d'anges augmente. Nous avons alors décidé de paramétriser la température d'extrusion à $220^{\circ}C$, la température du plateau chauffant à $60^{\circ}C$ (afin de faciliter l'adhésion de la première couche au plateau). Nous avons également désactivé les ventilateurs de refroidissement du filament pour éviter qu'un fil déposé ne refroidisse trop vite et faciliter la fusion de plusieurs passages de buse. Cela permet également de prévenir des déformations dues au refroidissement.

Nom de la Variable	Valeur
filament_diameter	$1.75mm$
filament_density	$1.24g/cm^3$
first_layer_temperature	$220^{\circ}C$
temperature	$220^{\circ}C$
first_layer_bed_temperature	$60^{\circ}C$
bed_temperature	$60^{\circ}C$
fan_always_on	False
cooling	False
bridge_fan_speed	100%

Table 2: Paramètres du filament dans *Prusa Slicer*

⁶La rétractation est le fait de retirer légèrement le filament de la buse lors des déplacements afin d'éviter la formation de cheveux d'ange.

Paramètres d'impression :

Nous avons expliqué précédemment que la température d'extrusion du filament est importante pour obtenir une bonne fusion des couches entre-elles. Ce paramètre n'est pas le seul influent sur la fusion des couches. En effet, si la température est très élevée mais qu'il y a une hauteur de $0.5mm$ entre les couches, l'effet de la température n'aura quasiment aucun impact. Afin d'avoir un bon compromis entre temps d'impression et qualité de la fusion entre couches, nous avons choisi une hauteur de couche de $0.15mm$. De manière générale, la hauteur de couche ne doit pas dépasser 80% du diamètre de la buse.

Nos structures ont des parois fines. Cela peut les rendre difficiles à reconnaître par le slicer. Pour se faire nous lui indiquons qu'il doit effectuer un périmètre supplémentaire si nécessaire et nous paramétrons la largeur d'extrusion à $0.151mm$. Pratiquement la largeur d'extrusion ne peut pas être inférieure à la hauteur de couche, nous la paramétrons au plus bas afin d'imprimer les épaisseurs les plus fines.

Nous avons remarqué que dans le cas de structures n'ayant qu'un seul passage de buse pour l'épaisseur de la paroi, les losanges pouvaient ne pas être soudés entre eux dans certains cas. En vérifiant la configuration, nous nous sommes aperçus que le générateur de périmètre "Classique" engendrait ce phénomène. Il faut donc le paramétrer sur "Arachne".

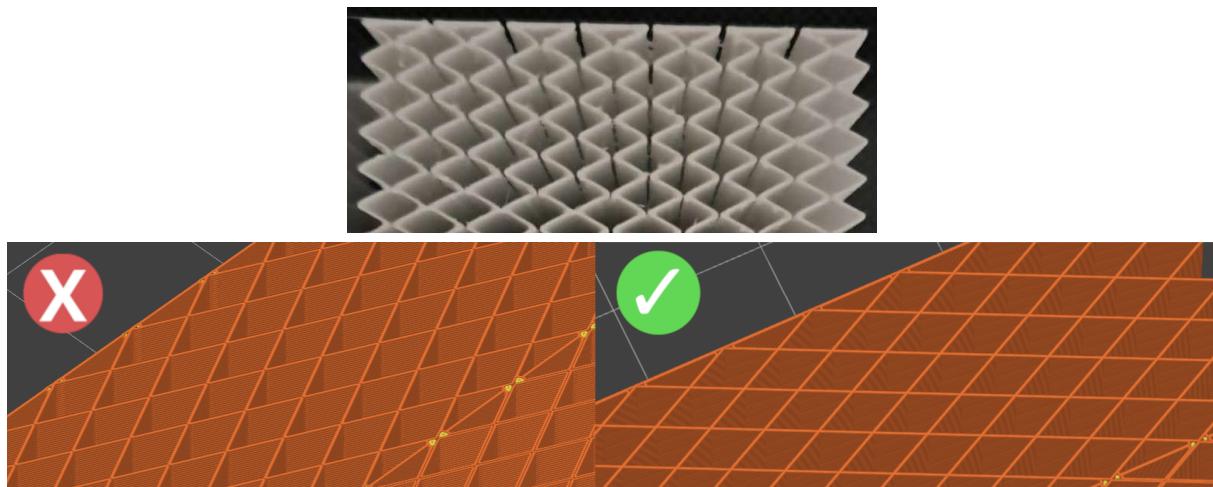


Fig. 6: Problématique de fusion entre losange non réalisée lors de l'impression avec le générateur de périmètres "Classique"

La vitesse d'impression est cruciale et doit-être abaissée par rapport à des impressions classiques avec une buse de $0.4mm$ sinon la buse peut se boucher ou l'extrudeur peut grignoter le filament. Nous avons imprimé nos structures à une vitesse de $60mm/s$.

Nom de la Variable	Valeur	Nom de la Variable	Valeur
layer_height	$0.15mm$	infill_speed	$60mm/s$
first_layer_height	$0.15mm$	solid_infill_speed	$60mm/s$
extra_perimeters	True	extrusion_width	$0.151mm$
gap_fill_enabled	True	first_layer_extrusion_width	$0.151mm$
perimeter_generator	Arachne	perimeter_extrusion_width	$0.151mm$
fill_density	100%	infill_extrusion_width	$0.151mm$
fill_pattern	Rectilinear	solid_infill_extrusion_width	$0.151mm$
perimeter_speed	$60mm/s$	top_infill_extrusion_width	$0.151mm$
small_perimeter_speed	$60mm/s$	infill_overlap	50%
extarnal_perimeter_speed	$60mm/s$		

Table 3: Paramètres d'impression dans *Prusa Slicer*

5 Structures Développées

5.1 Structure N°1 : Losanges

La première structure que nous avons développée est une structure de base, que l'on peut retrouver dans les slicer d'impression 3D par exemple. Dans le but de générer cette structure, nous avons défini les paramètres suivants :

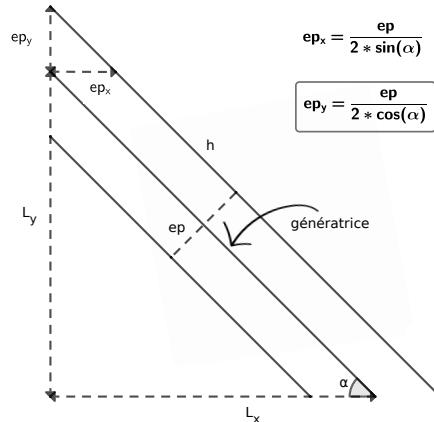


Fig. 7: Paramètres de la géométrie N°1 : Losanges

Un losange possédant deux axes de symétrie, nous n'avons représenté qu'un quart de la géométrie sur la figure ci-dessus. Afin de générer un losange entier, il nous suffisait de répéter cette forme quatre fois en appliquant une symétrie centrale. Un losange complet est donc de dimensions $(2 * L_x) * (2 * L_y)$.

Nom	Variable	Description
ep	Epaisseur des parois	Paramètre d'entrée
α	Angle des losanges	Paramètre d'entrée
L_x	Largeur du motif à répéter	Paramètre calculé
L_y	Hauteur du motif à répéter	Paramètre calculé
ep_x	Epaisseur de paroi projetée sur \vec{x}	Paramètre calculé
ep_y	Epaisseur de paroi projetée sur \vec{y}	Paramètre calculé

Table 4: Paramètres de la géométrie N°1 : Losanges

Voici un aperçu d'une structure losange de référence, modélisée sous *FreeCAD* à l'aide des paramètres prédefinis :

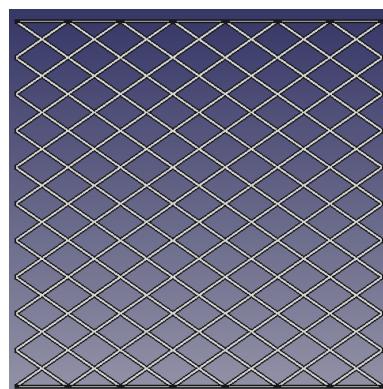


Fig. 8: Modélisation sous *FreeCAD* d'une structure N°1 : Losanges

Pour générer cela, nous commençons par générer un losange que nous répétons suivant l'axe \vec{x} , puis nous répétons la ligne entière suivant \vec{y} jusqu'en haut de la structure.

5.2 Structure N°2 : Triangles

La deuxième structure que nous avons développée est une structure à base de triangles. Ces triangles sont tous isocèles et les épaisseurs sont constantes entre tous les triangles.

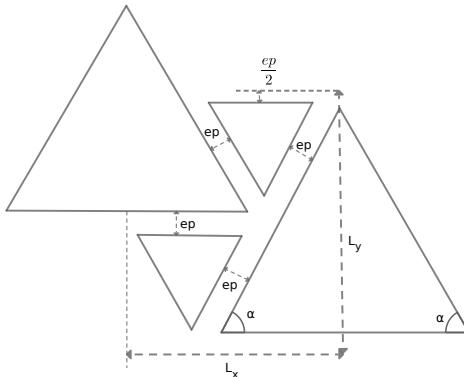


Fig. 9: Paramètres de la géométrie N°2 : Triangles

Voici les paramètres de cette structure :

Nom	Variable	Description
ep	Epaisseur des parois	Paramètre d'entrée
α	Angle du triangle	Paramètre d'entrée
L_x	Largeur du motif à répéter	Paramètre calculé
L_y	Hauteur du motif à répéter	Paramètre calculé

Table 5: Paramètres de la géométrie N°2 : Triangles

Notre structure possédant des axes de symétrie, nous avons décidé de la réduire à cette géométrie suivante, afin de simplifier la modélisation :

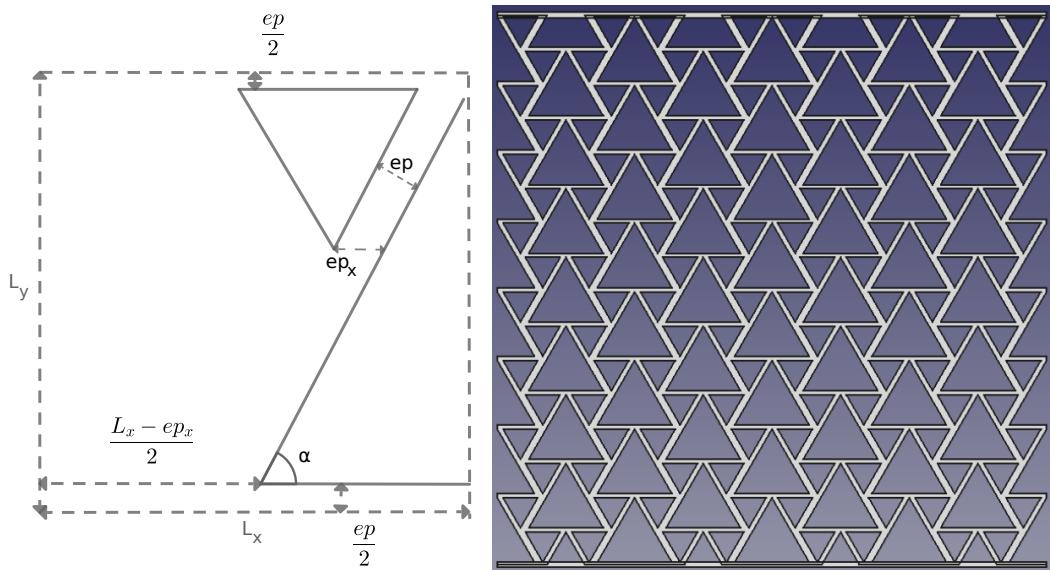


Fig. 10: Motif à répéter de la géométrie N°2 : Triangles à gauche. Modélisation sous FreeCAD d'une structure N°2 : Triangles à droite.

Nous avons répété ce motif tous les L_x suivant \vec{x} et tous les $\frac{L_y}{2}$ suivant \vec{y} afin de générer la structure dans son ensemble. Voici une représentation de la structure triangle modélisée sous FreeCAD.

5.3 Structure N°3 : Carrés + Arc

La quatrième structure que nous avons développée est une structure à base d'arcs de cercles et de carrés. Ces derniers sont tous de même dimensions tout en gardant une épaisseur de parois constante. Pour sa génération nous avons développé un motif (présenté ci dessous) auquel nous appliquerons la symétrie pour obtenir la structure finale.

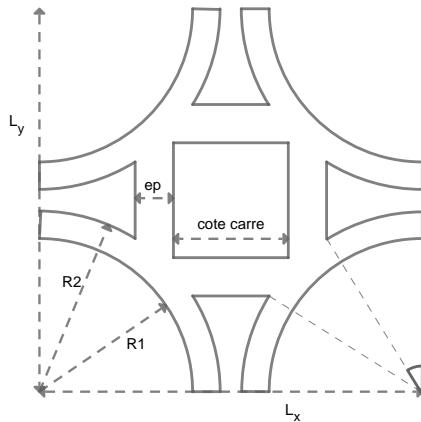


Fig. 11: Paramètres de la géométrie N°3 : Carrés + Arcs

Nom	Variable	Description
ep	Epaisseur des parois	Paramètre d'entrée
α	Angle délimitant le tracé des petits arcs de cercle	Paramètre d'entrée
L_x	Largeur du motif à répéter	Paramètre calculé
L_y	Hauteur du motif à répéter	Paramètre calculé
R_1	Rayon intérieur du cercle	Paramètre calculé
R_2	Rayon extérieur du cercle	Paramètre calculé

Table 6: Paramètres de la géométrie N°3 : Carrés + Arc

De la même manière que précédemment, le motif de la figure 11 à été répété suivant l'axe \vec{x} puis suivant l'axe \vec{y} afin de former une structure finale que voici :

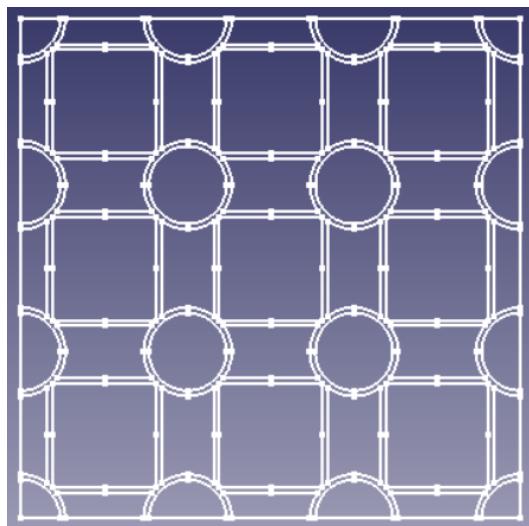


Fig. 12: Modélisation sous FreeCAD d'une structure N°3 : Carrés + Arcs

5.4 Structure N°4 : Hexagones + Triangles

Pour cette quatrième structure, nous avons voulu nous inspirer des structures en nid d'abeille, bien connues des slicers d'impression 3D et des structures lattices. Cette structure se compose d'hexagones mis côte à côté complétés par des triangles.

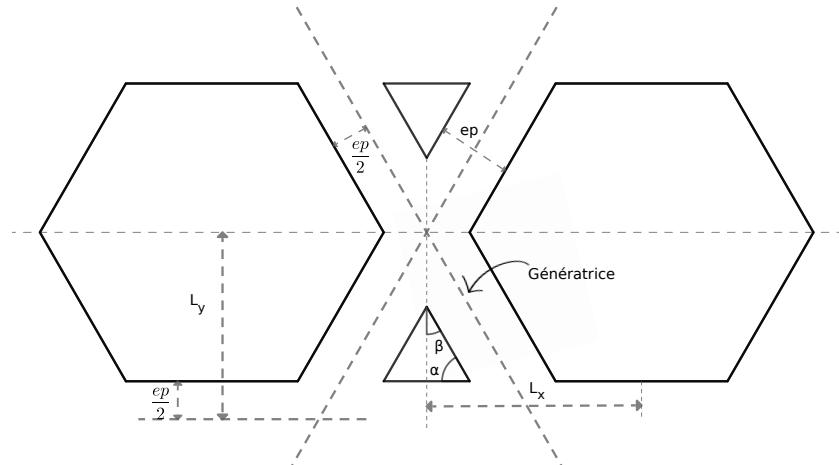


Fig. 13: Paramètres de la géométrie N°4 : Hexagones + Triangles

Nom	Variable	Description
ep	Epaisseur des parois	Paramètre d'entrée
α	Angle des losanges	Paramètre d'entrée
L_x	Largeur du motif à répéter	Paramètre calculé
L_y	Hauteur du motif à répéter	Paramètre calculé
ep_x	Epaisseur de paroi projetée sur \vec{x}	Paramètre calculé
ep_y	Epaisseur de paroi projetée sur \vec{y}	Paramètre calculé

Table 7: Paramètres de la géométrie N°4 : Hexagones + Triangles

Il existe deux cas de figure pour cette géométrie. En effet, il est possible d'obtenir une structure où les hexagones sont alignés ou déphasés suivant \vec{y} .

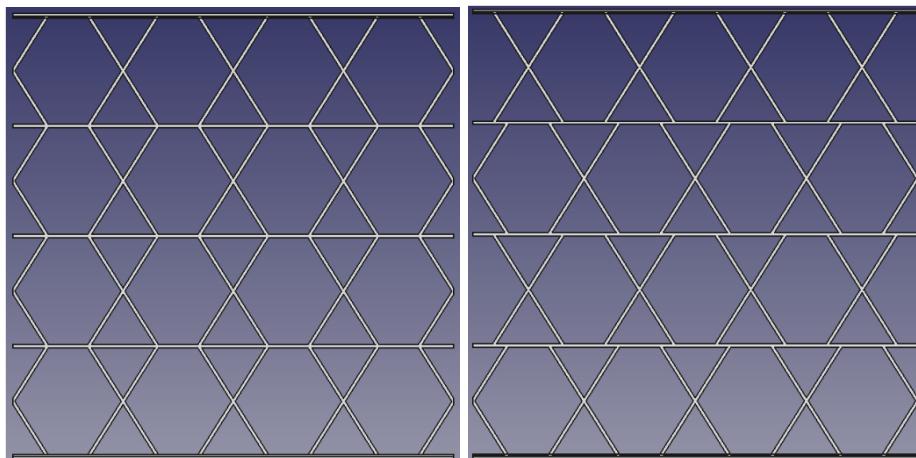


Fig. 14: Modélisation sous FreeCAD d'une structure N°4 : Hexagones + Triangles Alignées à gauche.
Modélisation sous FreeCAD d'une structure N°4 : Hexagones + Triangles Déphasés à droite.

5.5 Structure N°5 : Cosinus

Lors de nos recherches bibliographiques, nous avons observé que de nombreuses structures lattices avaient la forme d'une gyroïde. Cependant la gyroïde est une structure utilisant une fonction mathématique à trois dimensions (3D). N'étudiant uniquement des structures 2D ($y = f(x)$), nous avons choisi d'utiliser une fonction cosinus pour essayer de reproduire l'effet d'une gyroïde en 1D. En effet, l'équation d'une gyroïde se définit comme suit :

$$\sin x \cos y + \sin y \cos z + \sin z \cos x = 0$$

ce qui se traduit, lorsque $y = z = 0$, par

$$\sin x = 0$$

En s'inspirant de cela ($f(x) = \sin(x)$), nous avons développé une structure en forme de cosinus (déphasé de $\frac{\pi}{2}$) suivant l'axe \vec{y} . Afin de rigidifier la structure, nous avons inséré des plateaux à intervalle réguliers sur l'axe \vec{x} .

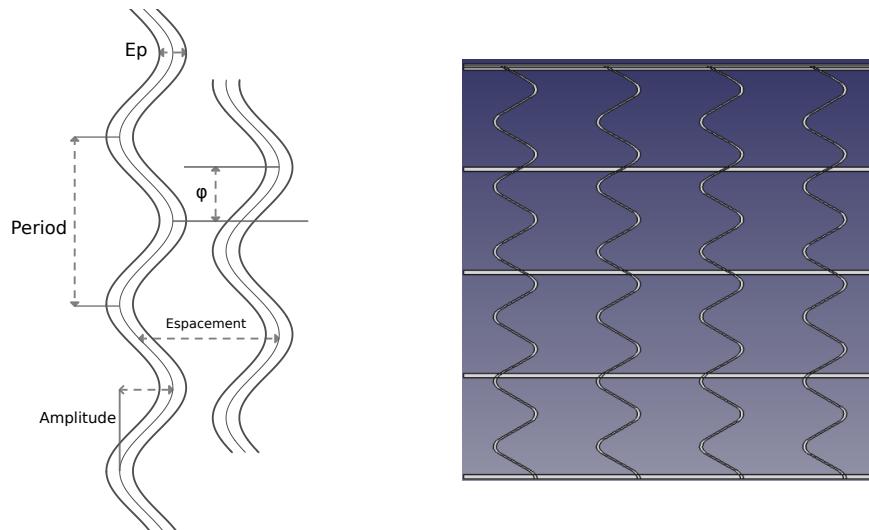


Fig. 15: Paramètres de la géométrie N°5 : Cosinus à gauche. Modélisation sous *FreeCAD* d'une structure N°5 : Cosinus à droite.

Nom	Variable	Description
ep	Epaisseur des parois	Paramètre d'entrée
ϕ	Déphasage entre les différentes couches du cosinus	Paramètre d'entrée
Period	Période du cosinus	Paramètre d'entrée
Espacement	Espacement entre deux couches du cosinus	Paramètre d'entrée
Amplitude	Amplitude du cosinus	Paramètre d'entrée

Table 8: Paramètres de la géométrie N°5 : Cosinus

Cette structure n'aurait néanmoins pas produit des résultats très probants si les cosinus s'étendaient sur une distance de 40 mm. En effet, il est très probable que les paroies des cosinus fléchissent violemment sur le côté avant de rompre. Afin de limiter cet effet, nous avons décidé d'ajouter des plateaux liant les cosinus entre eux à intervalle régulier.

6 Expérimentations

6.1 Matériel utilisé

Plusieurs systèmes existent afin de réaliser un essai de dynamique rapide. Parmi eux on peut retrouver les essais avec des barres d'Hopkinson, les machines hydrauliques ou encore les lanceurs à gaz. Nous cherchions à faire des essais mécaniques où nous puissions facilement calibrer l'énergie d'impact sur notre structure. Nous voulions également effectuer un maximum d'essais en un temps très court. La solution du Puits de Chute s'est donc imposée.

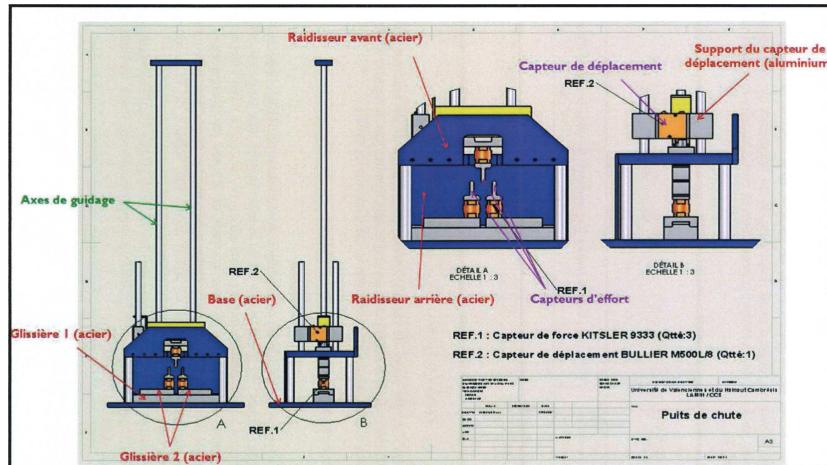


Fig. 16: Plan technique du Puits de Chute original issu de la thèse de Audrey Auperrin [9]

Le principe est simple. Une masse d'impact est lâché d'une hauteur précise sur une structure à étudier. Ceci nous permettra de mesurer la capacité de la structure à absorber l'énergie d'impact. Le puits de chute est composé de :

- Une masse coulissante sur les deux axes de guidages verticaux.
- Un capteur laser mesurant le déplacement de l'impacteur.
- Une cellule de force de 7kN mesurant l'effort subit par la structure lors de l'impact.

Le Puits de Chute originale conçu lors de la thèse de Audrey Auperrin [9] n'était pas adapté à notre utilisation. Il a donc été nécessaire de modifier le puits de chute en concevant un impacteur ainsi qu'un support pour la cellule de force. Ces pièces ont été usinées en aluminium au LAMIH⁷. Les pièces que nous avons conçues apparaissent en bleu sur la figure 17.

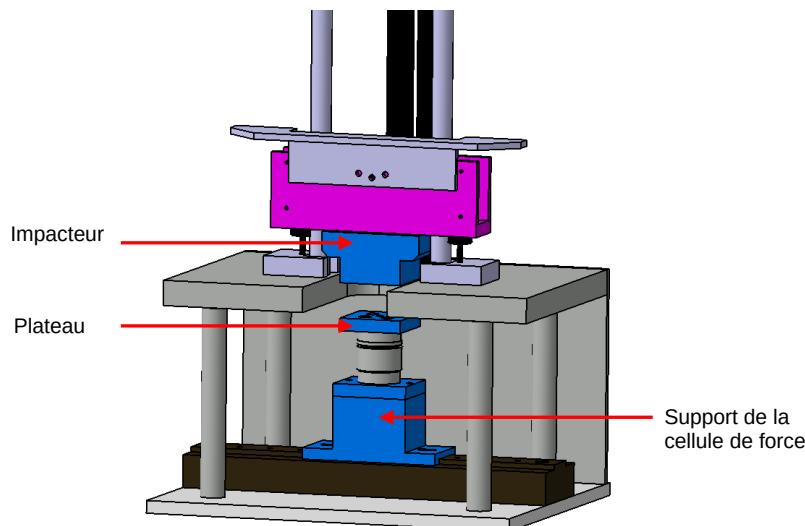


Fig. 17: Schéma des éléments du puits de chute modélisés sous *Catia V5*

⁷Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines

6.2 Protocole expérimental

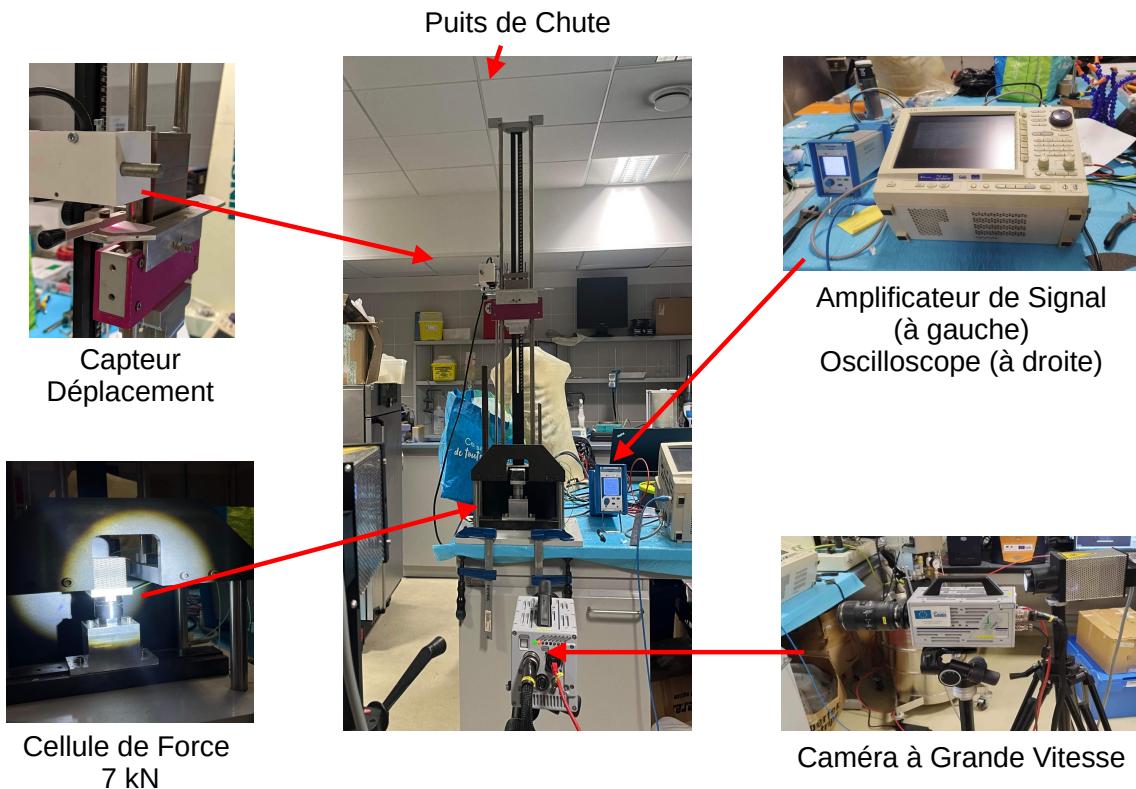


Fig. 18: Schéma de l'installation expérimentale

Le protocole expérimental est simple. Une structure est installée sur la cellule de force. Pour éviter que la base de la structure ne glisse lors de l'essai, nous l'avons fixée avec de l'adhésif double face. Une fois la structure installée, il faut impérativement effectuer le tarage de la cellule d'effort. En effet, celle-ci est de type piézoélectrique ce qui lui permet d'effectuer une mesure avec précision sur une large plage mais est extrêmement sensible et nécessite un recalibrage après chaque essai. La caméra à grande vitesse doit ensuite débuter l'enregistrement sans fin (elle effectue un enregistrement jusqu'à ce que l'oscilloscope envoie son signal de trigger). Une fois l'oscilloscope prêt, la masse peut-être lâchée. Vient ensuite la partie d'analyse des données récoltées.

Afin d'effectuer nos essais dans les mêmes conditions, nous devons effectuer ces derniers à énergie d'impact constante. Pour cela, nous avons fixé une masse et une hauteur d'impact. La masse d'impact est fixée à $3344,65g$ et la hauteur d'impact est fixée à $41,8cm$. Nous avons déterminé ces valeurs en effectuant quelques essais de calibration. Nous avons arrêté d'augmenter l'énergie d'impact lorsque la structure de référence était totalement écrasée.

Calcul de l'énergie potentielle :

$$E_p = mgh \text{ avec } g = 9,81m/s^2, \text{ on obtient: } E_p = 3,34465 * 9,81 * 0,418 = 13,7J$$

L'énergie potentielle se transforme entièrement en énergie cinétique lorsqu'elle atteint la structure et correspond donc à notre énergie d'impact.

6.3 Variables de l'étude

La structure N°1 (Losanges) s'est avérée être la seule structure prometteuse. Faute de temps et de résultats concluants pour les autres géométries, nous n'avons traité uniquement la structure N°1 (Losanges 5.1).

Comme nous l'avons dit précédemment, afin de pouvoir conclure sur l'influence des paramètres de notre étude, il est crucial que nous ne fassions varier uniquement un seul paramètre à la fois. Nous avons alors établi un plan d'étude qui nous permet dans un premier temps de traiter de l'influence de divers paramètres de la géométrie N°1 (Losanges) sur l'absorption d'énergie.

6.3.1 Gradient d'épaisseur : Épaisseur des parois des Losanges

Dans un premier temps, nous devons nous assurer que l'ajout de gradient permet en effet d'augmenter l'absorption d'énergie lors d'un crash.

La première variable que nous avons étudiée est l'épaisseur de la paroi de la structure. Sur la figure 19, la structure de gauche est celle de référence et la structure de droite reprends les mêmes paramètres que celle de référence mais avec un gradient d'épaisseur sur la moitié de sa dimension \vec{y} .

Structure de Référence		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
1	Épaisseur des Parois	0.38 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	14

Table 9: Paramètres de la structure Numéro 1 : Structure de référence

Structure de Référence		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
2	Épaisseur des Parois	0.19 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	7
1	Épaisseur des Parois	0.38 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	7

Table 10: Paramètres de la structure Numéro 15 : Influence de l'ajout d'un gradient d'épaisseur

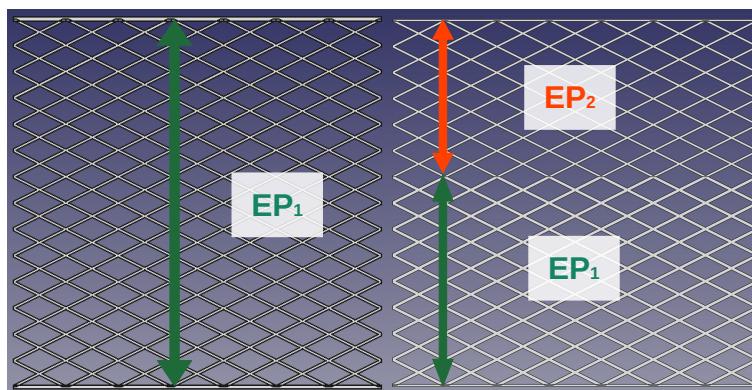


Fig. 19: Étude de l'influence de la présence d'un gradient d'épaisseur au sein d'une structure Losange

6.3.2 Gradient de géométrie : Angle des Losanges

Nous avons ensuite étudié la variation des angles des Losanges. Pour cela, nous avons réalisé une structure avec un gradient de géométrie mais à épaisseur de parois constante.

Structure de Référence		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
1	Angle des losanges	??? mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	???
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	???

Table 11: Paramètres de la structure Numéro ??? : Structure de référence

Structure de Référence		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
2	Angle des losanges	??? mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	???
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	???
1	Angle des losanges	??? mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	???
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	???

Table 12: Paramètres de la structure Numéro ??? : Influence de l'ajout d'un gradient de géométrie

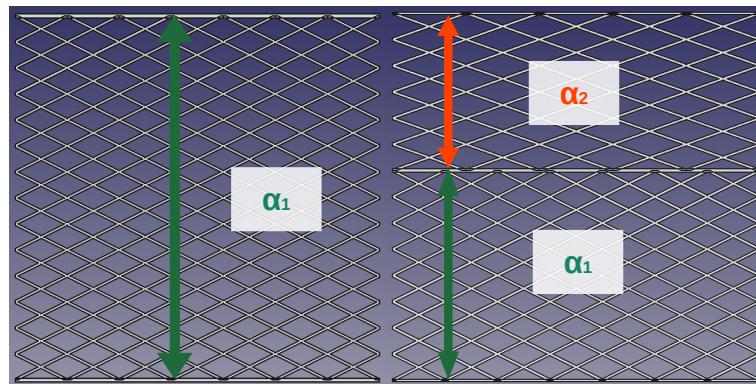


Fig. 20: Étude de l'influence de la présence d'un gradient de géométrie au sein d'une structure losange

6.3.3 Influence de l'ajout de plateaux entre les couches de gradient

Lorsque nous souhaitons faire varier les angles des losanges en intégrant des gradients de géométrie dans nos structures, nous sommes dans l'obligation d'intégrer des plateaux entre les différentes couches de losanges. En effet, les plateaux entre les couches de gradients de géométrie sont nécessaires afin de lier les deux couches de gradient entre elles.

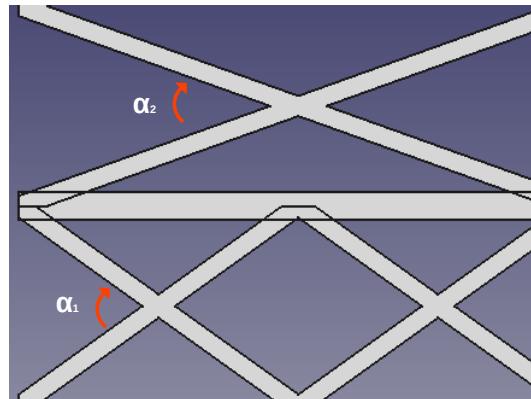


Fig. 21: Représentation de la nécessité d'ajouter de plateau dans une configuration de gradient de géométrie

Puisque nous sommes contraints d'ajouter ces plateaux, il faut que nous étudions leur influence sur l'absorption d'énergie des structures. Pour cela nous avons repris les mêmes paramètres que la structure ??? 20 mais avec un gradient d'épaisseur à la place du gradient de géométrie.

Structure de Référence		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
2	Épaisseur des Parois Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x} Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	??? mm ??? ???
1	Épaisseur des Parois Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x} Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	??? mm ??? ???

Table 13: Paramètres de la structure Numéro ??? et ??? : Influence de l'ajout d'un plateau entre deux couches

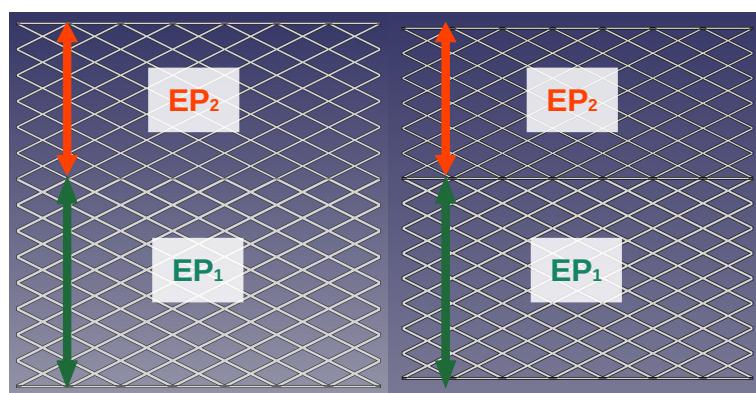


Fig. 22: Étude de l'influence de la présence d'un plateau au sein d'une structure losange

6.3.4 Influence des structures symétriques ou asymétriques

Les structures asymétriques nous offrent un avantage non négligeable. En effet, lorsque nous voulons intégrer des gradients à nos structures, les gradients asymétriques nous offrent la possibilité d'évoluer sur l'intégralité de la dimension \vec{y} de la structure alors que les structures symétriques ne nous permettent de d'évoluer que sur la moitié de celle-ci. Nous avons donc voulu comparer une structure symétrique avec une structure asymétrique pour mettre en évidence quelle configuration est la plus adaptée pour maximiser l'absorption d'énergie.

Pour cela, nous avons comparé une structure B asymétrique, possédant deux couches de gradient d'épaisseur EP1 et EP2 respectivement de longueur 2L1 et L2 avec une structure A possédant 3 couches de gradient d'épaisseur EP1 et EP2 puis EP1, respectivement de longueur L1, L2 et L1. La structure A n'est donc rien d'autre que la structure B mais avec la couche d'épaisseur EP2 prise en "sandwich" par deux couches d'épaisseur EP1.

	Structure A	Structure B
3ème couche	Epaisseur 1 - Longueur 1	Epaisseur 2 - Longueur 2
2ème couche	Epaisseur 2 - Longueur 2	Epaisseur 1 - Longueur 1
1ère couche	Epaisseur 1 - Longueur 1	Epaisseur 1 - Longueur 1
Résultat	Structure symétrique	Structure asymétrique

Table 14: Variation des couches lors de l'étude des structures symétriques ou asymétriques

Structure de Référence		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
3	Épaisseur des Parois	??? mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	???
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	???
2	Épaisseur des Parois	??? mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	???
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	???
1	Épaisseur des Parois	??? mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	???
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	???

Table 15: Paramètres de la structure Numéro ??? : Structure symétrique

Structure de Référence		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
2	Épaisseur des Parois	??? mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	???
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	???
1	Épaisseur des Parois	??? mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	???
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	???

Table 16: Paramètres de la structure Numéro ??? : Structure asymétrique

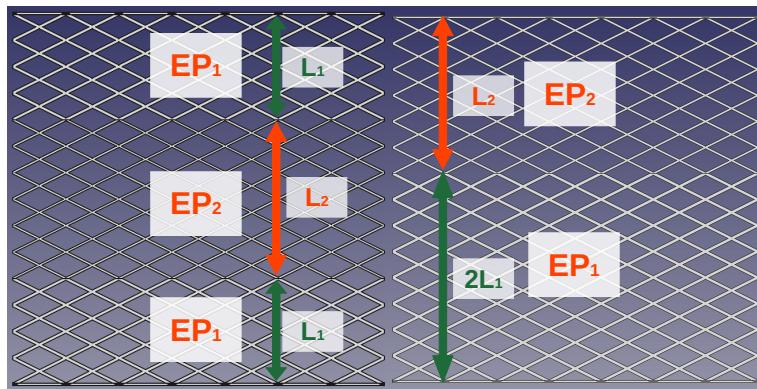


Fig. 23: Étude de l'influence de la différence entre une structure symétrique et asymétrique au travers d'une structure A à gauche (symétrique) et d'une structure B à droite (asymétrique)

6.3.5 Influence de la direction de sollicitation pour une structure asymétrique

Ayant développé des structures asymétriques, nous nous sommes interrogés sur une possible influence de la direction de sollicitation de la structure. En effet, imaginons que l'impact engendre une onde de déformation dans la structure, la réponse de celle-ci pourrait-être totalement différente suivant l'ordre des couches parcourues.

Pour cela, nous avons étudié une structure asymétrique que nous avons impacté dans un sens A puis dans un sens B. Ces deux structures étant exactement identiques.

Structure de Référence		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
3	Épaisseur des Parois	0.19 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	1
2	Épaisseur des Parois	0.38 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	5
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	5
1	Épaisseur des Parois	0.38 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	4
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	6

Table 17: Paramètres de la structure Numéro ??? : Influence de la direction de sollicitation

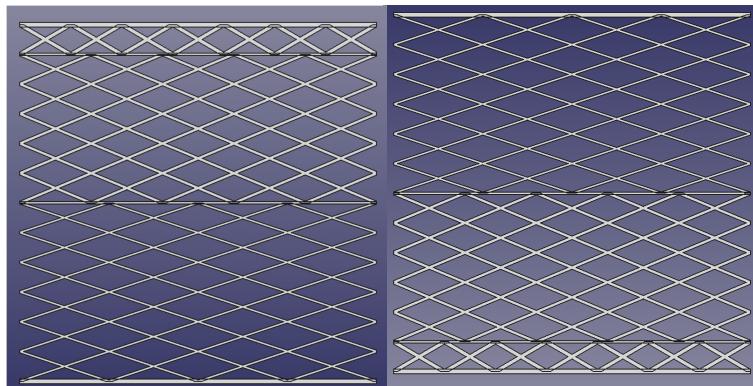


Fig. 24: Étude de l'influence de la direction de sollicitation pour une structure asymétrique

7 Résultats Expérimentaux

7.1 Méthode de traitement des données

Pour traiter les données de nos expériences, nous avons développé notre propre logiciel de traitement de données de crash (intitulé TDC⁸). Cela a pour avantage d'avoir un logiciel parfaitement adapté à nos besoins et de totalement automatiser une tâche qui aurait dû être faite sur un tableau classique. Ainsi, sur ce logiciel, il y a la possibilité d'avoir un traitement des données avec la détection automatique du début de l'impact. Dans certains cas, cela ne fonctionne pas, on peut donc également le détecter manuellement.

La démarche pour le traitement des données est la suivante : Dans un premier temps nous récupérons les fichiers au format .CSV de nos expériences. Ensuite, nous chargeons ces fichiers dans TDC. Le logiciel est déjà programmé avec des paramètres de base qui fonctionnent dans le plupart des cas pour la détection du début d'impact automatique. Il permet de filtrer les données brutes de nos expériences afin de les rendre exploitables. Nous obtenons trois tracés graphiques : un graphe “Déplacement, Temps”, un graphe “Force, Temps” et un graphe “Force, Déplacements”.

Les résultats se présentent sous la forme suivante :

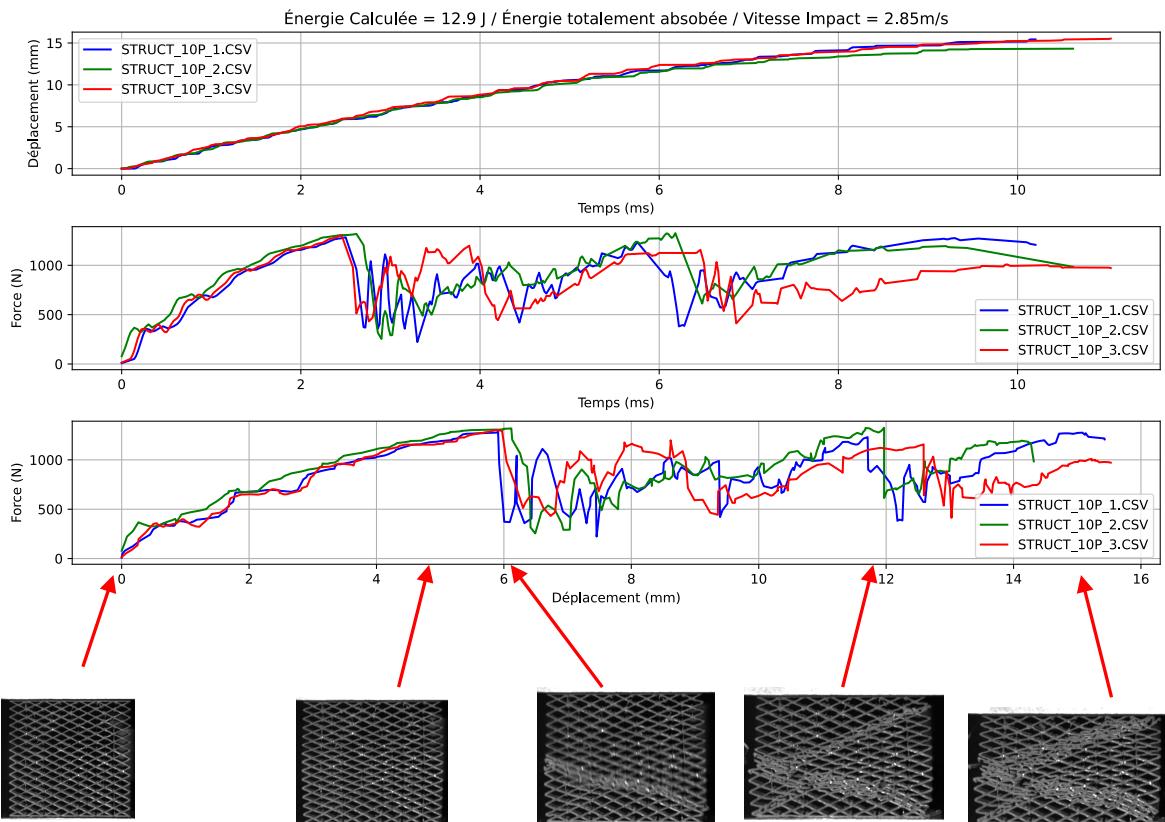


Fig. 25: Résultats du traitement des données pour la Structure 10

Note sur la vitesse d'impact :

Sur les graphes, vous pourrez remarquer que la vitesse d'impact n'est pas forcément la vitesse d'impact réelle et surtout évolue entre les graphes. Ceci est dû à l'option "suppr.rollback" du logiciel de traitement des données. Cette option interdit le déplacement de revenir en arrière par rapport au dernier déplacement lu dans le fichier CSV. Le logiciel supprime alors beaucoup de points de données. Le calcul de la vitesse s'effectue via la variation du déplacement par rapport au temps ($v_{moy} = \frac{\Delta d}{\Delta t}$), ce calcul est alors faussé.

⁸Traitement Données Crash

7.2 Résultats de la géométrie N°4 : Hexagones + Triangles

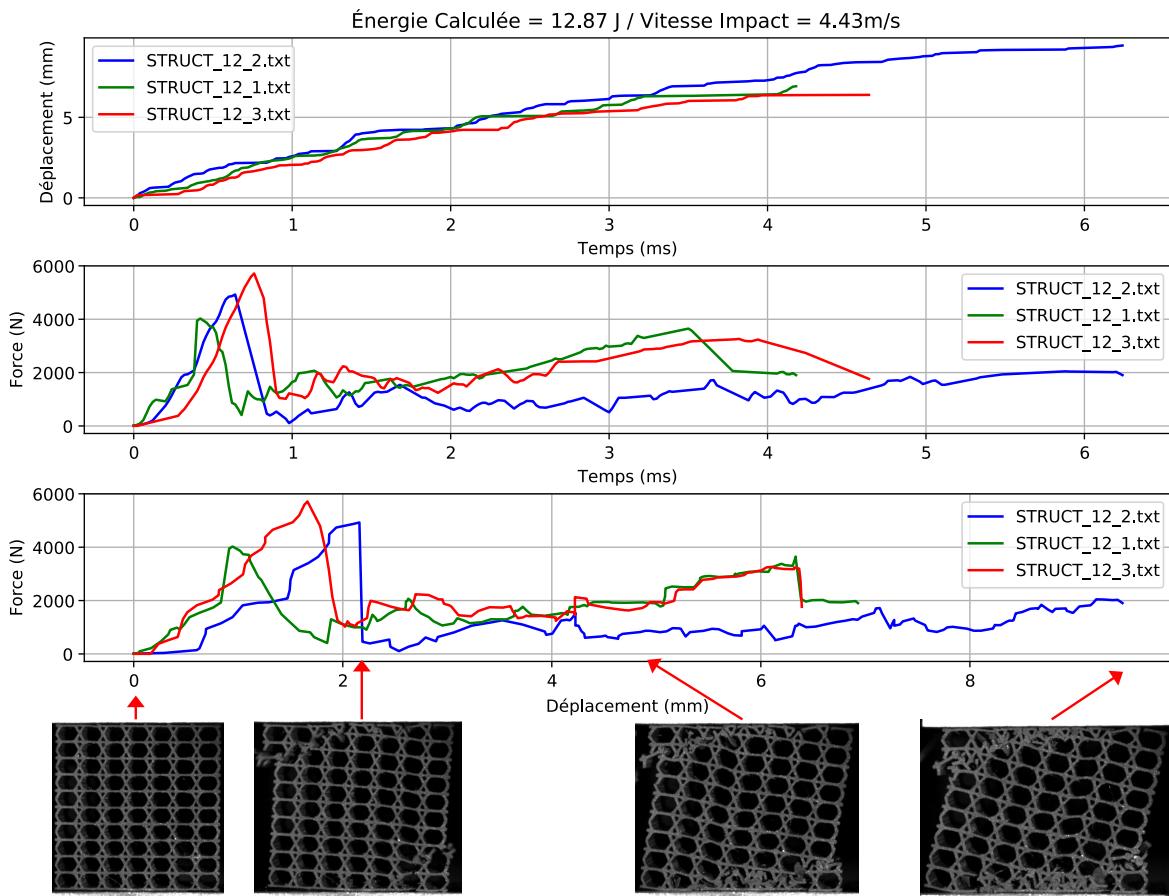


Fig. 26: Résultats du traitement des données pour la Structure 12

Au vue de ces résultats, nous concluons que la géométrie est trop rigide pour absorber l'énergie d'impact de manière efficace. On remarque sur les images que la structure rompt dès lors qu'elle est en contact avec l'impacteur. Cela explique les différences entre les courbes.

7.3 Résultats de la géométrie N°5 : Cosinus

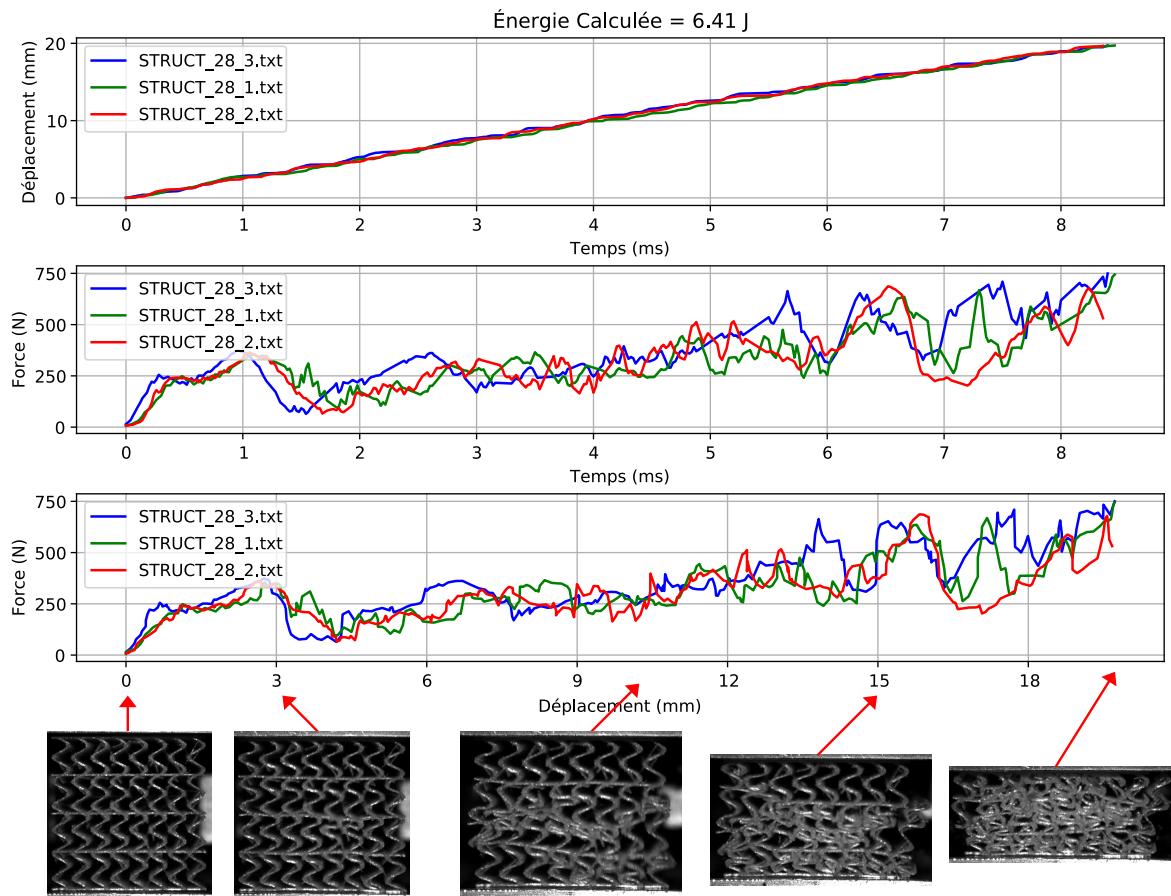


Fig. 27: Résultats du traitement des données pour la Structure 28

Cette structure semble prometteuse. En effet, nous pouvons remarquer que les plateaux jouent bien leur rôle de liant évitant ainsi les cosinus de se déformer sur les côtés. Aussi, nous remarquons que les cosinus se plient en accordéon majoritairement, ce qui est nécessaire pour absorber le plus d'énergie possible.

Par manque de temps, nous n'avons pas plus investigué des possibilités avec cette structure. Cependant, il serait intéressant de faire une étude en faisant varier les nombreux paramètres de cette structure (Voir la documentation de Lattybrides 12.1).

7.4 Résultats de la géométrie N°1 : Losanges

- 7.4.1 Influence du gradient d'épaisseur
- 7.4.2 Influence du gradient de géométrie
- 7.4.3 Influence de l'ajout de plateaux
- 7.4.4 Influence de la direction de sollicitation sur une structure asymétrique
- 7.4.5 Influence de l'épaisseur dans un gradient symétrique
- 7.4.6 Comparaison de gradient symétrique et asymétrique équivalents
- 7.4.7 Ajout progressif de gradient d'épaisseur
- 7.4.8 Ajout progressif de losanges suivant les axes \vec{x} et \vec{y}
- 7.4.9 Comparaison de structures à gradients multiples

Afin d'avoir une structure optimum qui absorbe l'énergie totale nous allons comparer plusieurs variables qui peuvent influencer le comportement des structures lattice de géométrie losange face à l'impacteur.

Influence de la présence d'un gradient d'épaisseur

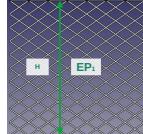
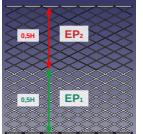
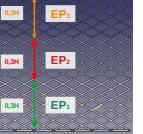
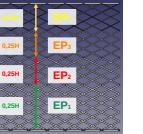
Numéro de structure	29	15	16	17
Visuel				
Energie absorbée	-	-	-	-

Table 18: Comparaison d'énergie moyenne d'absorption entre différentes épaisseurs

Influence de la variation d'angle entre deux côtés

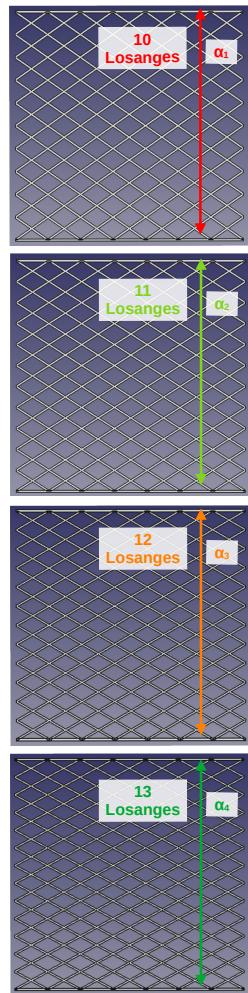


Fig. 28: Influence d'un gradient d'angle sur l'axe \vec{y}

Influence de l'ajout de plateaux

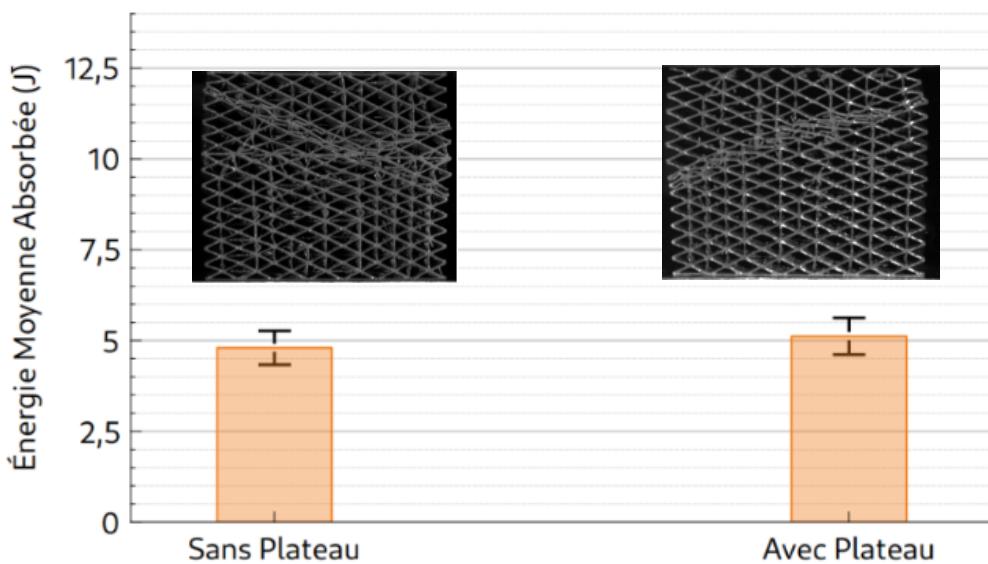


Fig. 29: Influence de l'ajout de plateaux ou non

Influence d'une symétrie ou asymétrie

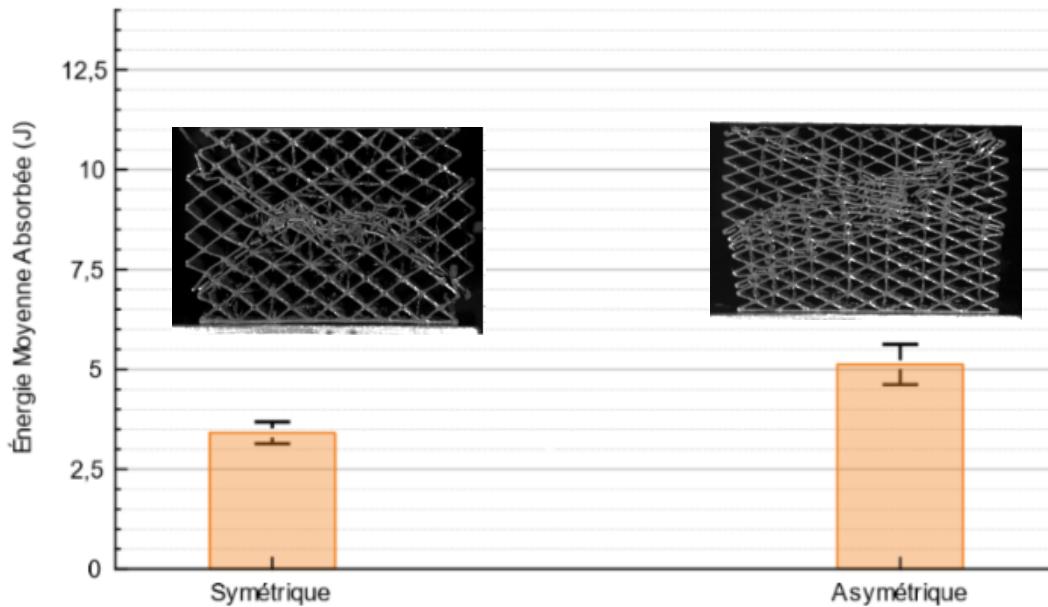


Fig. 30: Comparaison d'énergie moyenne d'absorption de la structure 3 et 9.

Influence de la direction de sollicitation

Dans cette partie nous allons étudier l'influence du gradient de symétrie sur l'absorption d'énergie ,en effet nous générerons aussi une structure avec une géométrie asymétrique afin de comparer.

- Une structure 3 symétrique.
- Une structure 9 asymétrique.

Plan d'expérience

Après avoir défini un par un les différents paramètres d'entrées pouvant intervenir dans l'absorption d'énergie, nous avons défini une stratégie d'expérience. Notre but était, en partant des résultats précédents, d'obtenir une structure présentant la meilleure absorption d'énergie.

8 Modèle numérique

8.1 Maillage

8.1.1 Structure

Il n'est malheureusement pas possible de mailler les structures générées de manière automatique avec un maillage de tétraèdres par exemple. En effet, pour faciliter la génération des structures sur *FreeCAD*, le modèle 3D des structures est séparé entre de multiples entités. Le “Body” est le corps de la pièce, c'est l'objet contenant toutes les autres entités de la pièce. Les “Pad” sont toutes les extrusions des modèles 2D “Sketch”. Pour faciliter le développement de l'atelier de génération des structures, il a été choisi de faire une seule esquisse (“Sketch”) par plateaux et par couches de gradients. Cependant, lors de l'exportation du modèle 3D au format STEP, la structure apparaît en plusieurs parties non liées entre elles.

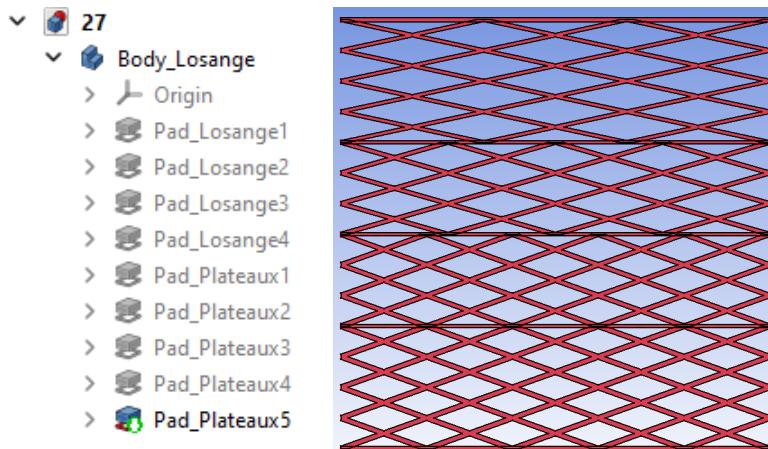


Fig. 31: Arborescence du fichier *FreeCAD* pour la structure 27 et importation du fichier STEP sur *LsDyna*
(Présence de jointures entre les couches de gradients et les plateaux)

Afin de mailler une structure unique, nous avons utilisé *HyperWorks*. La première étape a été d'importer le fichier STEP sur le logiciel. Par défaut, *HyperWorks* décompose le fichier STEP en une multitude de facettes. Le but est de supprimer toutes les facettes qui ne sont pas sur le plan xOy dans le but de réaliser un maillage unifié.

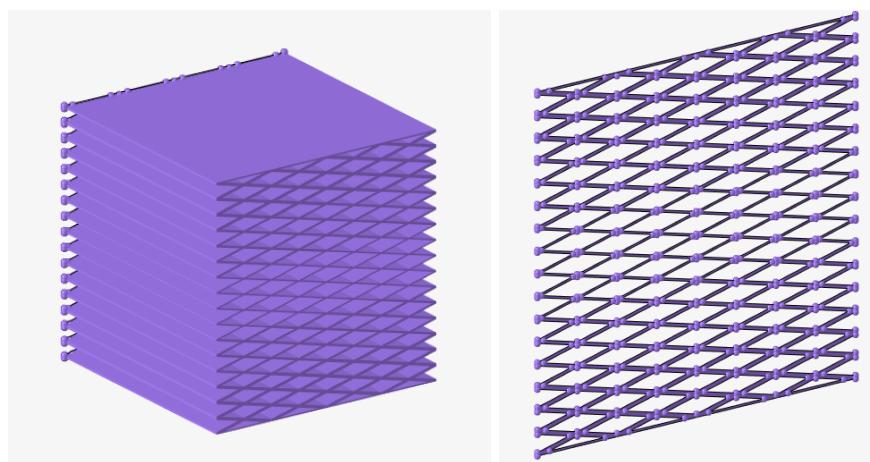


Fig. 32: Importation du fichier STEP sur *HyperWorks* et suppression des facettes qui ne sont pas sur le plan xOy

Une fois extraites, nous avons sélectionné les surfaces de la structure sur le plan xOy et nous avons créé une esquisse recevant la structure comme projection. Sur cette esquisse, on remarque des traits horizontaux indésirables. Nous devons alors les supprimer afin de fusionner les différentes parties de la structure. Une fois fait, les traits dessinés sont des traits de construction qui doivent-être passés en traits pleins pour pouvoir générer une surface.

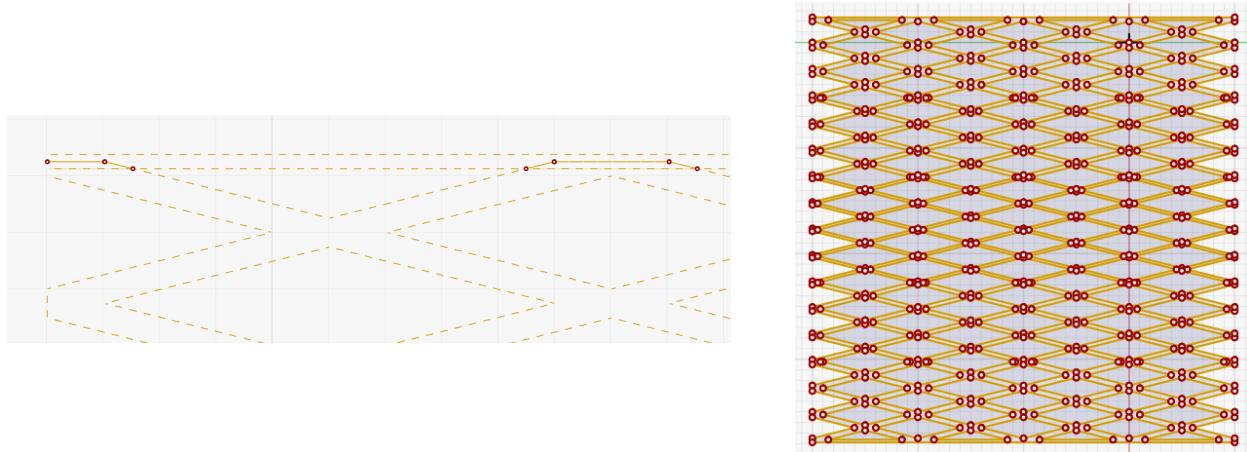


Fig. 33: Projection de la structure sur une esquisse et création d'une surface fusionnée, suppression des lignes de construction (lignes sélectionnées) et conversion des lignes de construction en traits pleins.

Maintenant que nous avons une unique surface, il est assez aisément de la mailler. Pour ce faire, dans le menu *HyperMesh*, nous sélectionnons la fonctionnalité “automesh” dans l’onglet “2D” en sélectionnant des éléments quadrilatérales uniquement de taille 0.15 mm. Il ne reste plus qu’à exporter le maillage 2D sur *LsDyna* au format *.k.

Sur *LsDyna*, l’élément shell est modélisé par une épaisseur suivant \bar{z} de 1mm en déformations planes (ELFORM = 13). L’hypothèse de déformations planes permet de sauver un temps de calcul plutôt élevé (3h de calcul avec un solide de 1mm d’épaisseur suivant \bar{z} contre 14min avec l’hypothèse de déformations planes). Afin d’obtenir une bonne précision de calcul, nous avons paramétré l’élément shell pour qu’il ait 5 points d’intégration dans l’épaisseur (NIP = 5). Nous avons également utilisé l’option *CONTROL_SHELL afin de paramétriser l’ajout de points d’intégration de Lobatto sur les peaux des éléments shells (INTGRD = 1).

8.1.2 Impacteur

L’impacteur est quant à lui modélisé par un shell d’épaisseur 1mm positionné à 2mm (fibre neutre) du haut de la structure et débordant de 5mm de part et d’autre de la structure. Un maillage quadrilatère de dimension x = 100 subdivisions et y = 1 subdivision est choisi. L’épaisseur de l’élément shell choisie est de 1mm suivant \bar{z} avec des éléments en déformations planes (ELFORM = 13).



Fig. 34: Impacteur modélisé par une shell de 1mm d’épaisseur suivant \bar{z} et maillé par des éléments quadrilatères (100x1 subdivisions) avec l’hypothèse de déformations planes

8.2 Paramétrage du calcul

8.2.1 Système d'Unités

Avec le fichier de maillage de la structure, nous sommes contraints de travailler avec le millimètre comme unité de longueur. Au vu de la rapidité de l'impact, il est judicieux de choisir la milliseconde comme unité de temps.

En appliquant la 2^e loi de Newton on trouve l'unité de masse complémentaire du système d'unité :

$$\sum F = m\gamma \Rightarrow N = \frac{kg * m}{s^2} = kg * \frac{m}{s^2} \Rightarrow ?kg * \frac{10^3 mm}{10^6 ms^2} = \frac{?kg * 10^3 mm}{10^6 ms^2}$$

Afin d'obtenir des Newton en unité de force, nous passons l'unité de masse au gramme :

$$10^3 g * \frac{10^3 mm}{10^6 ms^2} = \frac{10^3 g * 10^3 mm}{10^6 ms^2}$$

Les unités utilisées sont donc les suivantes :

Type de Grandeur	Unité choisie
Masse	Gramme (g)
Longueur	Millimètre (mm)
Temps	Milliseconde (ms)
Force	Newton (N)
Contrainte	Mégapascal (MPa)

Table 19: Système d'unités utilisé dans *LsDyna*

8.2.2 Matériau et Pièces

Propriétés matérielles de la structure :

Nous avons tout d'abord tenté d'utiliser une loi de comportement du type Johnson-Cook pour modéliser les propriétés matérielles du PLA⁹. En effet, lors de cette expérience, la structure va subir une très grande déformation élastique mais aussi plastique. C'est pour cela que nous avons besoin d'un modèle incluant la plastification pour modéliser correctement les propriétés matérielles du PLA.

Grandeur	Valeur
Masse Volumique	$\rho = 1.24g/cm^3 = 1.24 \frac{g}{10^3 mm^3} = 1.24e^{-3} g/mm^3$
Module de Young	$E = 1390 MPa = 1390 \frac{N}{mm^2}$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0.35$
Coefficients de la loi de Johnson-Cook	$A = 68.55 MPa, B = 960.43 MPa, n = 5.37, C = 0.25$

Table 20: Propriétés matérielles de la structure en PLA

La loi de comportement Johnson-Cook exprimées ci-dessus ont été trouvées sur internet dans les deux articles suivants : [6], [7]. Après plusieurs essais de calculs, nous avons abandonné cette loi, donnant des valeurs d'efforts 7 à 8 fois supérieures aux valeurs expérimentales. Nous avons alors utilisé un modèle de matériau purement élastique (*MAT_ELASTIC) avec un Module de Young $E = 4000 MPa$. La valeur du Module de Young peut paraître élevée pour du PLA mais elle a été ajustée dans le but de diminuer les efforts maximum subis par la structure.

Ces propriétés matérielles ne sont évidemment pas représentatives du matériau réellement utilisé. L'établissement d'une loi de comportement avec le PLA provenant de notre fournisseur *Grossiste3D* aurait été nécessaire.

⁹Acide Polylactique

Propriétés matérielles de l'impacteur :

Grandeur	Valeur
Masse Volumique	$\rho = 7810 \text{ kg/m}^3 = 7810 \frac{10^3 \text{ g}}{10^9 \text{ mm}^3} = 7.81 \text{ e}^{-3} \text{ g/mm}^3$
Module de Young	$E = 210000 \text{ MPa} = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0.3$
Masse	$m = 3344.65 \text{ g}$

Table 21: Propriétés matérielles de l'impacteur

Les propriétés matérielles de l'impacteur ne sont pas très importantes. En effet, l'inertie de l'impacteur ne va être uniquement conditionnée par le paramètre *ELEMENT_MASS_PART de *LsDyna*. Cette option nous permet de renseigner la masse de l'impacteur en s'affranchissant de la valeur de la masse volumique précédemment renseignée (la masse volumique doit nécessairement être renseignée pour ne pas générer d'erreurs par le solveur). L'impacteur est modélisé avec un matériau rigide (*MAT_RIGID).

8.2.3 Contacts

Deux contacts sont nécessaires dans ce problèmes, le contact entre l'impacteur et la structure ainsi que le contact entre la structure et elle-même (lorsque la structure est totalement écrasée). Le contact entre l'impacteur et la structure est défini entre deux pièces (SURFTYP_A = SURFTYP_B = 3) par l'option *CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE sans coefficient de friction. Pour le contact entre la structure et elle-même, il est nécessaire de créer un *SET_PART au préalable. Le contact utilisé est alors défini entre les deux sets (SURFTYP_A = SURFTYP_B = 2) par l'option *CONTACT_2D_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE sans coefficient de friction.

8.2.4 Conditions Initiales et Conditions aux Limites

Vitesse d'impact :

L'énergie d'impact calculée précédemment (6.2) est de $E_p = 13.7 \text{ J}$. Avant de toucher la structure, toute l'énergie potentielle de l'impacteur se transforme en énergie cinétique.

On obtient alors la vitesse de l'impacteur via la relation :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 * 13.7}{3344.65}} = 2.86 \text{ m/s} = 2.86 \text{ mm/ms}$$

La vitesse initiale de l'impacteur est alors renseignée dans *LsDyna* via l'option *INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY.

Masse de l'Impacteur :

Notre problème n'est modélisé que sur 1mm d'épaisseur contrairement à 40mm expérimentalement. L'énergie d'impact doit donc être diminuée par 40. D'après la formule de l'énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, diviser la masse par 40 revient donc à diviser l'énergie d'impact par 40 également. La masse de l'impacteur renseignée dans *LsDyna* est donc $\frac{m}{40} = \frac{3344.65}{40} = 83.62 \text{ g}$.

Condition de maintiens de la structure à sa base :

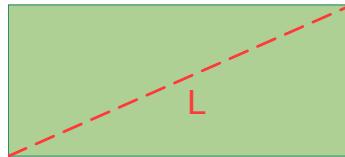
La façon la plus simple de récupérer les informations de force sous la structure serait d'effectuer un contact entre un élément shell sous la structure et la structure elle-même. Cependant, ceci engendre un coût de calcul supplémentaire que nous pouvons éviter avec l'option *RIGIDWALL_PLANAR de *LsDyna*. Cette option créer un mur rigide où nous pourrons récupérer les forces facilement sans gérer de contact.

8.2.5 Amélioration de la Rapidité du Calcul

Les calculs étant relativement lourds, nous avons choisi d'utiliser une option de *LsDyna* qui s'appelle le "mass scaling". Pour que le solveur de *LsDyna* converge, le pas de temps de calcul est calculé de cette façon [8] :

$$\Delta t = \text{fact}_{\Delta t} \frac{L}{c} \leq \Delta t^{crit} = \frac{2}{\omega_{max}} \quad (1)$$

- L : Dimension caractéristique de l'élément le plus petit du modèle. Pour un élément shell il s'agit de la diagonale.



- c : Vitesse du son dans le matériau. Pour un élément shell, le son dans l'élément suit cette expression :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}}$$

Où E est le Module de Young, ρ la masse volumique de l'élément et ν le coefficient de poisson du matériau.

- $\text{fact}_{\Delta t}$: Facteur de sécurité utilisé pour être sûr que le pas de temps calculé Δt soit inférieur au pas de temps critique Δt^{crit} . Dans *LsDyna* le paramètre $\text{fact}_{\Delta t}$ est représenté par la variable TSSFACT.
- Δt^{crit} : Est le pas de temps critique à ne pas dépasser pour que le solveur puisse converger.
- ω_{max} : Correspond à la plus grande fréquence propre du modèle élément finis.

Dans cette formule 1, la masse volumique intervient directement au numérateur du pas de temps calculé donc la masse du modèle intervient également au numérateur :

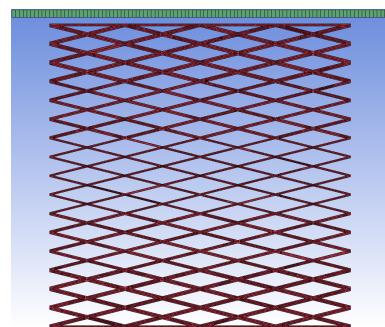
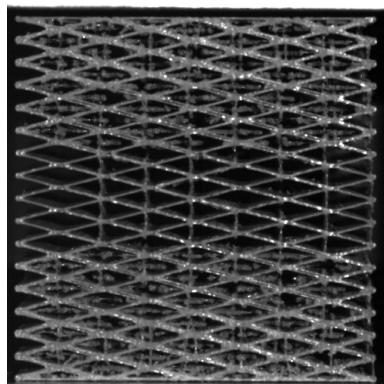
$$\Delta t = \text{fact}_{\Delta t} \frac{L}{c} = \text{fact}_{\Delta t} L \sqrt{\frac{\rho(1 - \nu^2)}{E}} = \text{fact}_{\Delta t} L \sqrt{\frac{m(1 - \nu^2)}{EV}}$$

L'option de "mass scaling" de *LsDyna* va artificiellement augmenter la masse du modèle dans le but d'augmenter le pas de temps de calcul. Cependant, une augmentation trop importante (supérieure à 3%) est dangereuse à cause des effets d'inertie qui ne seront plus du tout les mêmes qu'expérimentalement.

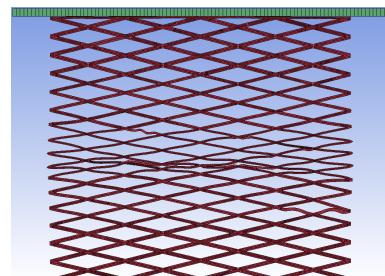
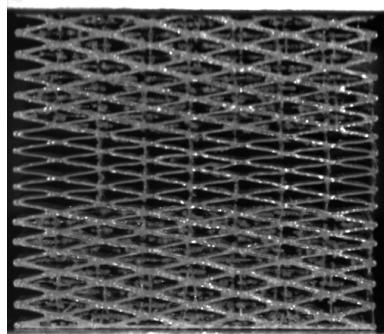
Dans notre cas, nous avons utilisé l'option de "mass scaling" à hauteur de 1.9484% c'est à dire une masse ajoutée de 1.6481g pour une masse totale de 84.589g. Nous avons vérifié que l'option de "mass scaling" n'engendre pas une augmentation de l'énergie cinétique de l'impacteur.

8.3 Écart avec les expériences

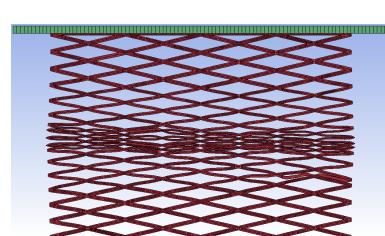
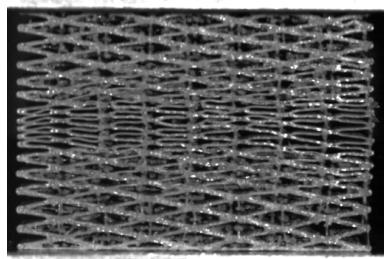
Instant 0



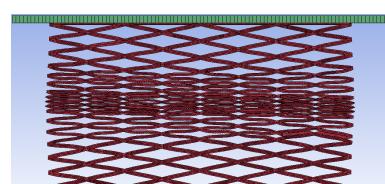
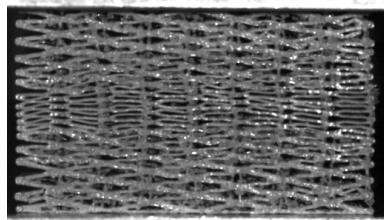
Instant 1



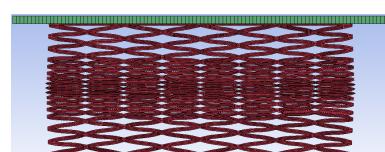
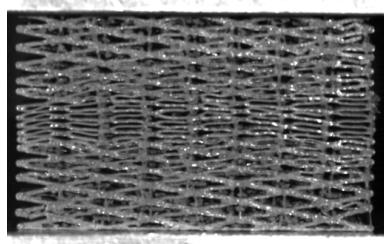
Instant 2



Instant 3



Instant 4



Instant 5

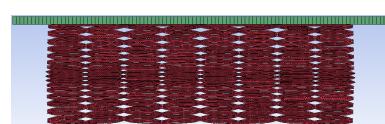
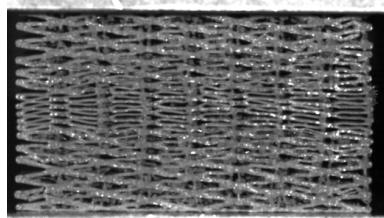


Fig. 35: Comparaison des résultats Expérimentaux - Éléments Finis à divers instants de déformation de la structure (Structure 11).

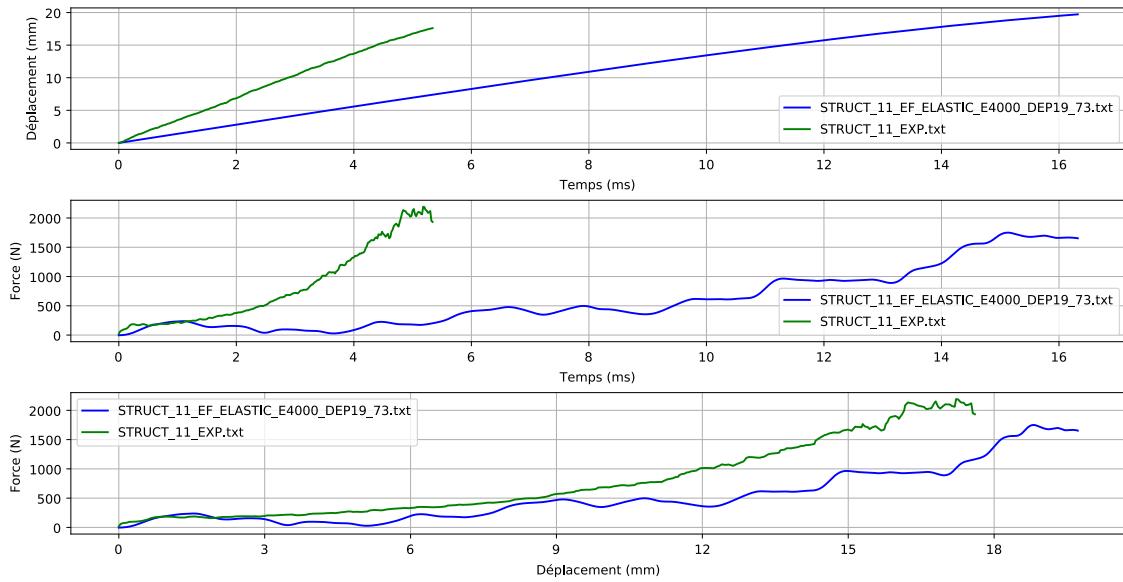


Fig. 36: Comparaison des résultats Expérimentaux et du modèle Éléments Finis pour un déplacement maximal de l'impacteur de 19,73 mm

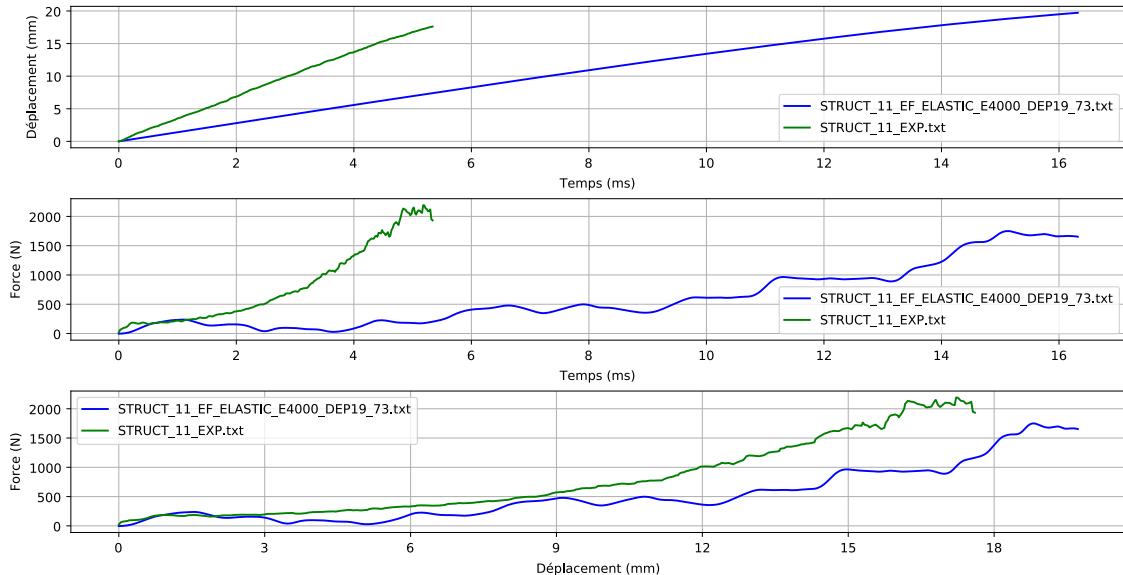


Fig. 37: Comparaison des résultats Expérimentaux et du modèle Éléments Finis sans condition d'arrêt de l'impacteur (course libre)

Comme nous le remarquons ci-dessus (35), la structure se déforme avec une propagation d'onde allant des couches supérieures vers la couche centrale. Cette onde rebondit sur la 2^e couche en partant du bas puisqu'elle est plus rigide que la 3^e couche qui est au milieu de la structure. La déformation est ensuite homogène dans les couches symétriques.

Le modèle numérique ne se déforme pas totalement comme la structure expérimentale. On remarque également que la vitesse de déformation de l'essai expérimental est bien plus rapide que la vitesse de déformation du modèle Éléments Finis. L'allure de la courbe Force = f(Déplacement) est globalement la même.

Les écarts entre le modèle numérique et les essais expérimentaux sont dûs aux propriétés matérielles qui ne sont pas adaptées à la réalité. La structure maillée et la structure imprimée en 3D également pas totalement les mêmes. En effet, nous avons eu des problématiques de dimensions des épaisseurs de parois des structures. Ces problématiques sont expliquées dans la partie 9.2.

9 Critiques

9.1 Arrêt de l'impacteur

Notre puit de chute est équipé de tampons d'absorption qui ont pour but de stopper l'impacteur lorsque toute l'énergie de la chute ne peut pas être absorbée par la structure. Ainsi, nous avons une valeur par défaut de 19.73mm de déformation maximale de la structure. Une fois cette valeur atteinte, le logiciel de traitement des données est programmé pour interrompre l'essai et peut donc calculer l'énergie absorbée par la structure. Lors de nos essais, nous avons remarqué que par moments les tampons étaient légèrement desserrés, principalement dû aux vibrations des nombreux essais. Il nous a fallu les resserrer et vérifier à plusieurs reprises. Ainsi, il est possible que certaines valeurs d'absorption soient moins précises à cause de ce phénomène. Pour les structures avec rupture, ce problème n'a pas d'influence sur le résultat de l'énergie absorbée.

9.2 Défauts de la méthode d'impression à fil fondu (FDM)

Afin d'avoir des résultats comparables, nous avons fait le choix de fixer un certain nombre de paramètres dont la masse. Pour ce faire, nous avons développé un programme d'optimisation capable de générer des structures à masse constante. Or, la masse réelle imprimée s'avère être généralement différente de celle théorique. Nous avons trouvé plusieurs justifications à cela. Dans un premier temps, la technique de prototypage est en partie responsable de cette disparité de masse. En effet, selon la taille de la buse que l'on choisit, l'épaisseur des couches ne pourra pas être parfaitement celle donnée par le programme. Par exemple, avec une buse de 0.2mm, pour tracer une paroi de 0.4mm, il va falloir 2 passages de buse. Mais si nous souhaitons une paroi de 0.3mm, un passage de buse n'est pas suffisant donc il y aura 2 passages dont une partie de superposition sur 0.1mm. La masse sera donc plus importante que celle théorique.

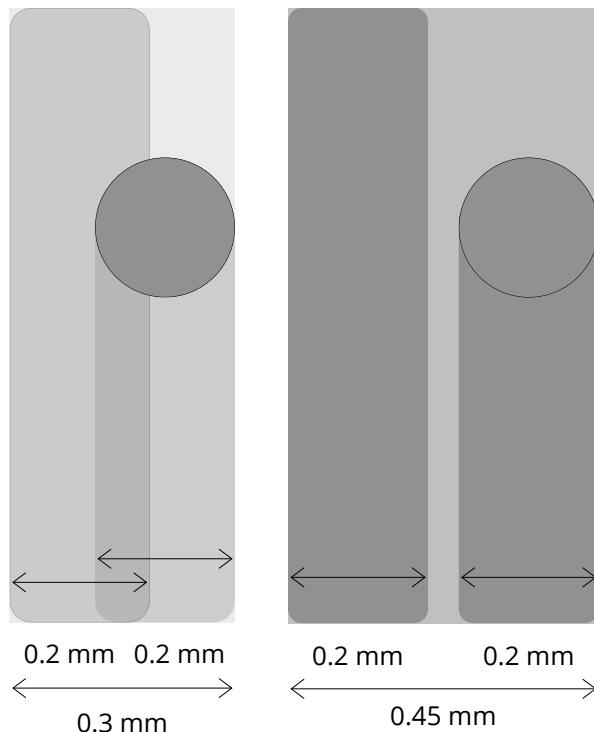


Fig. 38: Schématisation des manques ou excès de matière lors de l'impression FDM

Dans certaines situations, les angles des structures pourraient ne pas être entièrement comblés. Cela est dû à la forme arrondie de la buse, qui laisse des parties non recouvertes dans les angles à 90°. La région marquée en rouge illustre cette lacune, ce qui entraîne un volume réel inférieur à celui estimé par le code d'optimisation.

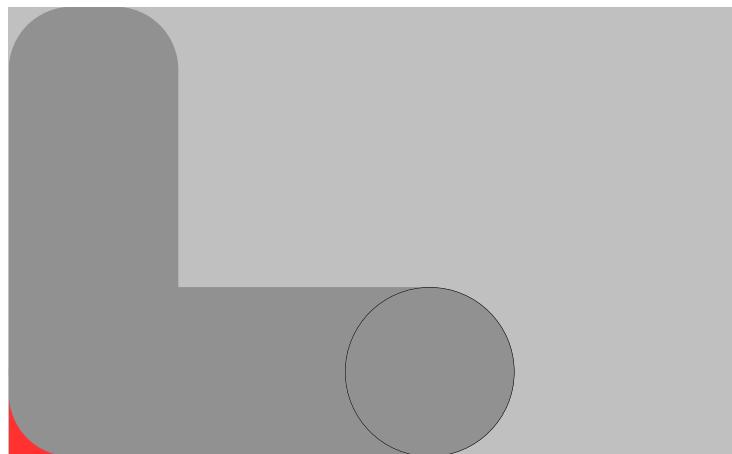


Fig. 39: Schématisation des manques ou excès de matière dans les angles lors de l'impression FDM

Ces différents constat reflètent les limites de notre méthode de prototypage. Cependant, bien que les masses réelles de nos structures divergent de celles calculées par le code d'optimisation, on remarque qu'à partir du moment où les paramètres d'impression sont fixes, les masses des structures imprimées sont toutes comparables. Cela ne remet donc pas en cause la comparaison de nos résultats entre eux.

10 Conclusion

Tout au long de ce projet, nous avons eu le privilège d'évoluer dans un environnement de travail sain et stimulant, soutenus par nos tuteurs. Ce projet a été une véritable opportunité pour mettre en lumière les diverses capacités d'absorption des structures en treillis que nous avons développées. En explorant les domaines de la CAO, du langage de programmation *Python*, de la gestion de projet et du prototypage, cette approche pluridisciplinaire a offert à chaque membre de l'équipe la possibilité de cultiver de nouvelles compétences. En mettant nos expertises respectives au service du projet, nous avons été en mesure de mener à bien notre démarche avec succès.

Notre contribution principale à ce projet a été le développement d'une extension pour le logiciel *FreeCAD*, ainsi que la création de notre propre logiciel de traitement des données de crash. En parallèle nous avons pu réaliser le développement de nouvelles structures. Bien que ces aspects représentent une part importante de notre travail, ils constituent également une base solide pour une poursuite approfondie de nos recherches. En effet, une étude plus poussée sur de nouvelles structures en treillis pourrait donner lieu à la constitution d'une base de données conséquente, exploitée potentiellement par des algorithmes d'intelligence artificielle. Cette perspective ouvre la voie à des possibilités d'exploration et d'innovation continues dans le domaine des structures légères et de leur application dans divers secteurs industriels.

11 Perspectives

Bien que nos expérimentations aient produit des résultats significatifs, certaines lacunes subsistent, nécessitant une exploration plus approfondie pour une compréhension plus complète.

Et si c'était à continuer ?

La continuité de nos efforts de recherche est essentielle pour capitaliser sur les découvertes actuelles et pour explorer de nouvelles perspectives qui élargissent notre compréhension. En effet, il serait intéressant de pouvoir continuer les expérimentations en élargissant le plan d'expériences. Le but serait de pouvoir établir une base de données complète qui traite de manière exhaustive les paramètres d'entrée (épaisseurs des parois, gradients de géométrie,...) et de récolter les données de sortie (énergie absorbée) afin de pouvoir déterminer une loi liant les paramètres d'entrées à l'énergie absorbée par la structure.

Et si c'était à refaire ?

Durant ces 6 mois de projet, nous avons pu évaluer certains aspects à améliorer si nous devions recommencer ce projet.

Dans un premier temps, nous devrions nous assurer d'un meilleur contrôle de l'épaisseur des parois imprimées en 3D. Cela impliquerait également un meilleur contrôle de la masse des échantillons. En effet, même si nous essayions de générer des structures à masse constante (18g, voir 4.2) tout au long du projet, les paramètres des imprimantes 3D, en particulier les buses d'impression (9.2), ne nous permettaient pas d'avoir un contrôle total sur l'épaisseur des parois et aussi précis que nous le voulions.

Ensuite, nous avons remarqué qu'il était nécessaire de faire attention à la maintenance des machines qui peut fortement impacter la production d'échantillons.

Enfin, réfléchir à un plan de production d'échantillons dès le début du projet prenant en compte les paramètres à faire varier aurait permis d'optimiser le nombre d'échantillons à produire.

12 Annexes

12.1 Annexe 1 : Notice d'utilisation de l'atelier *FreeCAD* pour la génération des structures

12.2 Annexe 2 : Notice du logiciel de Traitement des Données

Bibliographie

- [1] Structure est inspirée d'un réseau de modécules <https://www.flickr.com>
- [2] Âme en nid d'abeille utilisé dans l'aéro-spatial <https://www.aeroexpo.online>
- [3] Aurélien Gourrier, Ina Reiche. Chapitre 3 L'os : morphologie, structure et composition chimique. "Message d'os, Archéométrie du squelette animal et humain", Ed. des Archives Contemporaines (EAC), coll. "Sciences Archéologiques", pp 23-37, 2015, 9782813001641. hal-01131757 <https://hal.univ-grenoble-alpes.fr>
- [4] Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb, Zhang Wen, Yin Sha, Yu T.X., Xu Jun <https://www.sciencedirect.com>
- [5] Impression 3D : Extrusion de Matière (Material Extrusion) FDM (Fused Deposition Modeling) <https://fr.wikipedia.org>
- [6] Dynamic Characterization of Additively Manufactured Polylactide (PLA) <https://www.researchgate.net>
- [7] Study on the static and dynamic mechanical properties and constitutive models of 3D printed PLA and PLA-Cu materials <https://deliverypdf.ssrn.com>
- [8] Time step in *LsDyna* - ANSYS Forum <https://forum.ansys.com>
- [9] Caractérisation tissulaire pour la détermination du comportement de l'os crânien : essais mécaniques et imagerie médicale, AUPERRIN Audrey