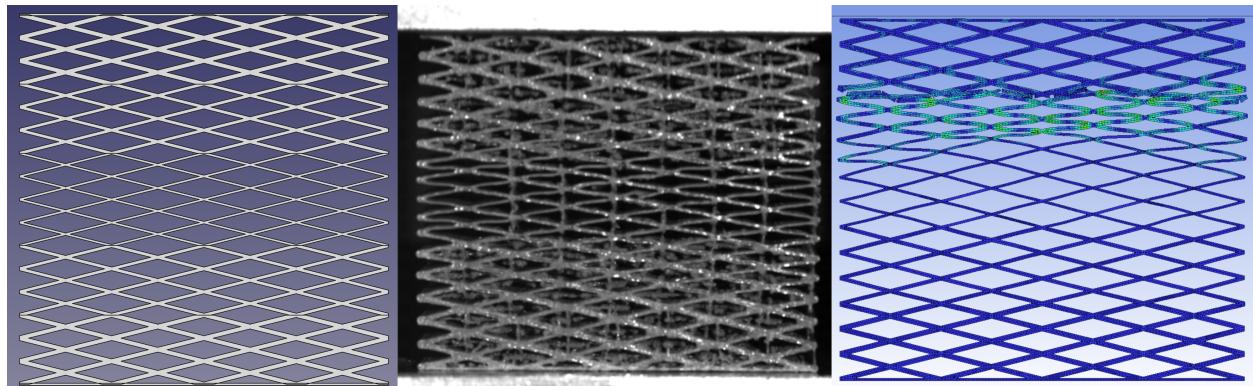


INSA HAUTS-DE-FRANCE

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 ce rapport, 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 six 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 hébergeant le code \LaTeX du rapport du projet :
<https://github.com/PLP23INT16/PLP23INT16>
- 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
- Lien des présentations Prezi :
Présentation d'Avant-Projet, Présentation de Mi-Parcours, Présentation de Fin de Projet.

Table des matières

Table des matières	2
Table des illustrations	4
Liste des tableaux	6
1 Introduction	7
2 État de l'Art	8
2.1 Structures Lattices homogènes	8
2.2 Structures Lattices à gradient de réseau	9
3 Problématique	10
4 Développement et Fabrication des Structures	11
4.1 Méthode de génération des structures	11
4.2 Algorithme d'optimisation de masse	12
4.3 Méthode d'impression des structures	14
4.3.1 Principe de la technologie FDM	14
4.3.2 Paramètres du Slicer	15
5 Structures Développées	17
5.1 Structure N°1 : Losanges	17
5.2 Structure N°2 : Triangles	18
5.3 Structure N°3 : Carrés + Arc	19
5.4 Structure N°4 : Hexagones + Triangles	20
5.5 Structure N°5 : Cosinus	21
6 Expérimentations	22
6.1 Matériel utilisé	22
6.2 Protocole expérimental	23
6.3 Variables de l'étude	24
6.3.1 Gradient d'épaisseur : Épaisseur des parois des Losanges	24
6.3.2 Gradient de géométrie : Angle des Losanges	25
6.3.3 Influence de l'ajout de plateaux entre les couches de gradient	26
6.3.4 Influence des structures symétriques ou asymétriques	27
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	33
7.4.3 Influence de l'ajout de plateaux	34
7.4.4 Comparaison de gradient symétrique et asymétrique équivalents	35
7.4.5 Influence de l'épaisseur dans un gradient symétrique	36
7.4.6 Influence de la direction de sollicitation sur une structure asymétrique	37
7.4.7 Ajout progressif de gradient d'épaisseur	38
7.4.8 Ajout progressif de losanges suivant les axes \vec{x} et \vec{y}	39
7.4.9 Comparaison de structures à gradients multiples	42
8 Modèle numérique	43
8.1 Maillage	43
8.1.1 Structure	43
8.1.2 Impacteur	44
8.2 Paramétrage du calcul	45
8.2.1 Système d'Unités	45
8.2.2 Matériau et Pièces	45

8.2.3	Contacts	46
8.2.4	Conditions Initiales et Conditions aux Limites	46
8.2.5	Amélioration de la Rapidité du Calcul	47
8.3	Écart avec les expériences	48
9	Critiques	50
9.1	Arrêt de l'impacteur	50
9.2	Défauts de la méthode d'impression à fil fondu (FDM)	50
10	Conclusion	52
11	Perspectives	53
12	Annexes	54
12.1	Annexe 1 : Notice d'utilisation de l'atelier <i>FreeCAD</i> pour la génération des structures	54
12.2	Annexe 2 : Notice du logiciel de Traitement des Données	62
Bibliographie		66

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].	8
2	Illustration des treillis à gradient de réseau dans les os [3] à gauche et dans le pomelo [4] à droite.	9
3	Logigramme décrivant l'algorithme d'optimisation de la masse	12
4	Phénomène de dépassement de l'objectif de masse à atteindre si l'augmentation de l'épaisseur des parois est trop grande	13
5	Principe de fonctionnement de la technologie d'impression 3D type FDM [5]	14
6	Problématique de fusion entre losange non réalisée lors de l'impression avec le générateur de périmètres "Classique"	16
7	Paramètres de la géométrie N°1 : Losanges	17
8	Modélisation sous <i>FreeCAD</i> d'une structure N°1 : Losanges	17
9	Paramètres de la géométrie N°2 : Triangles	18
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.	18
11	Paramètres de la géométrie N°3 : Carrés + Arcs	19
12	Modélisation sous <i>FreeCAD</i> d'une structure N°3 : Carrés + Arcs	19
13	Paramètres de la géométrie N°4 : Hexagones + Triangles	20
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.	20
15	Paramètres de la géométrie N°5 : Cosinus à gauche. Modélisation sous <i>FreeCAD</i> d'une structure N°5 : Cosinus à droite.	21
16	Plan technique du Puits de Chute original issu de la thèse de Audrey Auperrin [9]	22
17	Schéma des éléments du puits de chute modélisés sous <i>Catia V5</i>	22
18	Schéma de l'installation expérimentale	23
19	Étude de l'influence de la présence d'un gradient d'épaisseur au sein d'une structure Losange	24
20	Étude de l'influence de la présence d'un gradient de géométrie au sein d'une structure losange	25
21	Représentation de la nécessité d'ajout de plateau dans une configuration de gradient de géométrie	26
22	Étude de l'influence de la présence d'un gradient de géométrie au sein d'une structure losange	26
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)	28
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	Comparaison de la structure de référence (N°1) avec une structure à gradient d'épaisseur (N°10)	32
29	Comparaison de la structure de référence (N°1) avec une structure à gradient de géométrie (N°13)	33
30	Comparaison de deux structures avec plateau (Structure N°9) et sans plateau (Structure N°10) ayant le même gradient de géométrie	34
31	Exemple d'accumulation de rupture dans une structure lattice formant une inclusion rigide en son sein	34
32	Comparaison de deux structures symétrique (Structure N°3) et asymétrique (Structure N°10) équivalentes	35
33	Comparaison de deux structures symétriques avec l'épaisseur la plus petite au centre (Structure N°3) et l'épaisseur la plus grosse au centre (Structure N°14)	36
34	Comparaison de deux structures identiques asymétriques à gradients multiples (Structure N°6) dans deux sens de sollicitation différents	37
35	Paramètres des structure pour l'ajout progressif de gradient d'épaisseur dans une structure Losange (De gauche à droite : Structure N°1, 15, 16, 17)	38
36	Ajout progressif de gradient d'épaisseur dans une structure Losange (De gauche à droite : Structure N°1, 15, 16, 17)	38
37	Paramètres des structure pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{x} (De gauche à droite : Structure N°1, 22, 23, 24, 25)	39
38	Courbe pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{x} (De gauche à droite : Structure N°1, 22, 23, 24, 25)	39
39	Images pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{x} (De gauche à droite : Structure N°1, 22, 23, 24, 25)	40
40	Paramètres des structure pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{y} (De gauche à droite : Structure N°18, 19, 20, 21, 22)	40

41	Courbe pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{y} (De gauche à droite : Structure N°18, 19, 20, 21, 22)	41
42	Images pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{y} (De gauche à droite : Structure N°18, 19, 20, 21, 22)	41
43	Comparaison de l'évolution de l'absorption d'énergie des structures conçues durant le projet	42
44	Paramètres de la Structure N°11 : Le meilleur résultat d'absorption d'énergie obtenu	42
45	Clichés de la déformation de la Structure N°11 : Le meilleur résultat d'absorption d'énergie obtenu	42
46	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)	43
47	Importation du fichier STEP sur <i>HyperWorks</i> et suppression des facettes qui ne sont pas sur le plan xOy	43
48	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.	44
49	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	44
50	Comparaison des résultats Expérimentaux - Éléments Finis à divers instants de déformation de la structure (Structure 11).	48
51	Comparaison des résultats Expérimentaux et du modèle Éléments Finis pour un déplacement maximal de l'impacteur de 19,73 mm	49
52	Comparaison des résultats Expérimentaux et du modèle Éléments Finis sans condition d'arrêt de l'impacteur (course libre)	49
53	Illustration des manques ou excès de matière avec la technologie FDM lors de l'impression de parois plus fines que le diamètre de la buse	50
54	Illustration des manques de matière dans les coins avec la technologie d'impression FDM	51
55	Récapitulatif de toutes les masses mesurées lors de ce projet	51
56	Récapitulatif de toutes les structures testées lors de ce projet	52

Liste des tableaux

1	Paramètres de l'imprimante dans <i>Prusa Slicer</i>	15
2	Paramètres du filament dans <i>Prusa Slicer</i>	15
3	Paramètres d'impression dans <i>Prusa Slicer</i>	16
4	Paramètres de la géométrie N°1 : Losanges	17
5	Paramètres de la géométrie N°2 : Triangles	18
6	Paramètres de la géométrie N°3 : Carrés + Arc	19
7	Paramètres de la géométrie N°4 : Hexagones + Triangles	20
8	Paramètres de la géométrie N°5 : Cosinus	21
9	Paramètres de la structure Numéro 1 : Structure de référence	24
10	Paramètres de la structure Numéro 10 : Influence de l'ajout d'un gradient d'épaisseur	24
11	Paramètres de la structure Numéro 1 : Structure de référence	25
12	Paramètres de la structure Numéro 13 : Influence de l'ajout d'un gradient de géométrie	25
13	Paramètres de la structure Numéro 10 et 9 : Influence de l'ajout d'un plateau entre deux couches	26
14	Variation des couches lors de l'étude des structures symétriques ou asymétriques	27
15	Paramètres de la structure Numéro 3 : Structure symétrique	27
16	Paramètres de la structure Numéro 10 : Structure asymétrique	27
17	Paramètres de la structure Numéro 6 : Influence de la direction de sollicitation	28
18	Système d'unités utilisé dans <i>LsDyna</i>	45
19	Propriétés matérielles de la structure en PLA	45
20	Propriétés matérielles de l'impacteur	46

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.

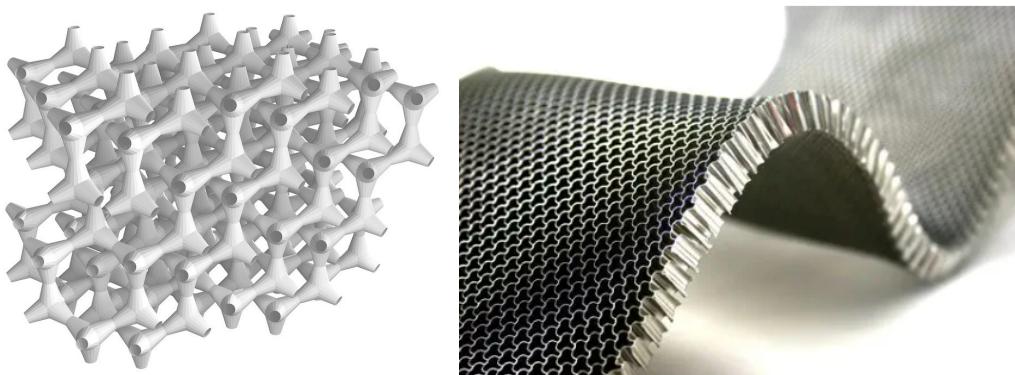


Fig. 1: Exemple de deux structures lattices homogènes. À gauche la structure est inspirée d'un réseau de modèles [1]. À droite la structure est une âme en nid d'abeille utilisé dans l'aéro-spatial [2].

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.

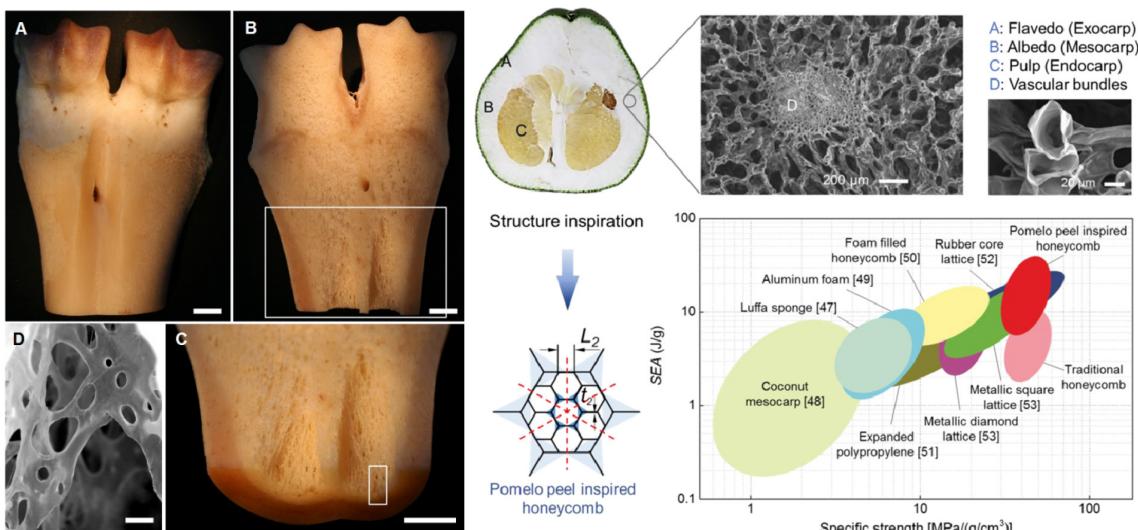


Fig. 2: Illustration des treillis à gradient de réseau dans les os [3] à gauche et dans le pomelo [4] à droite.

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 (12.1).

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 :

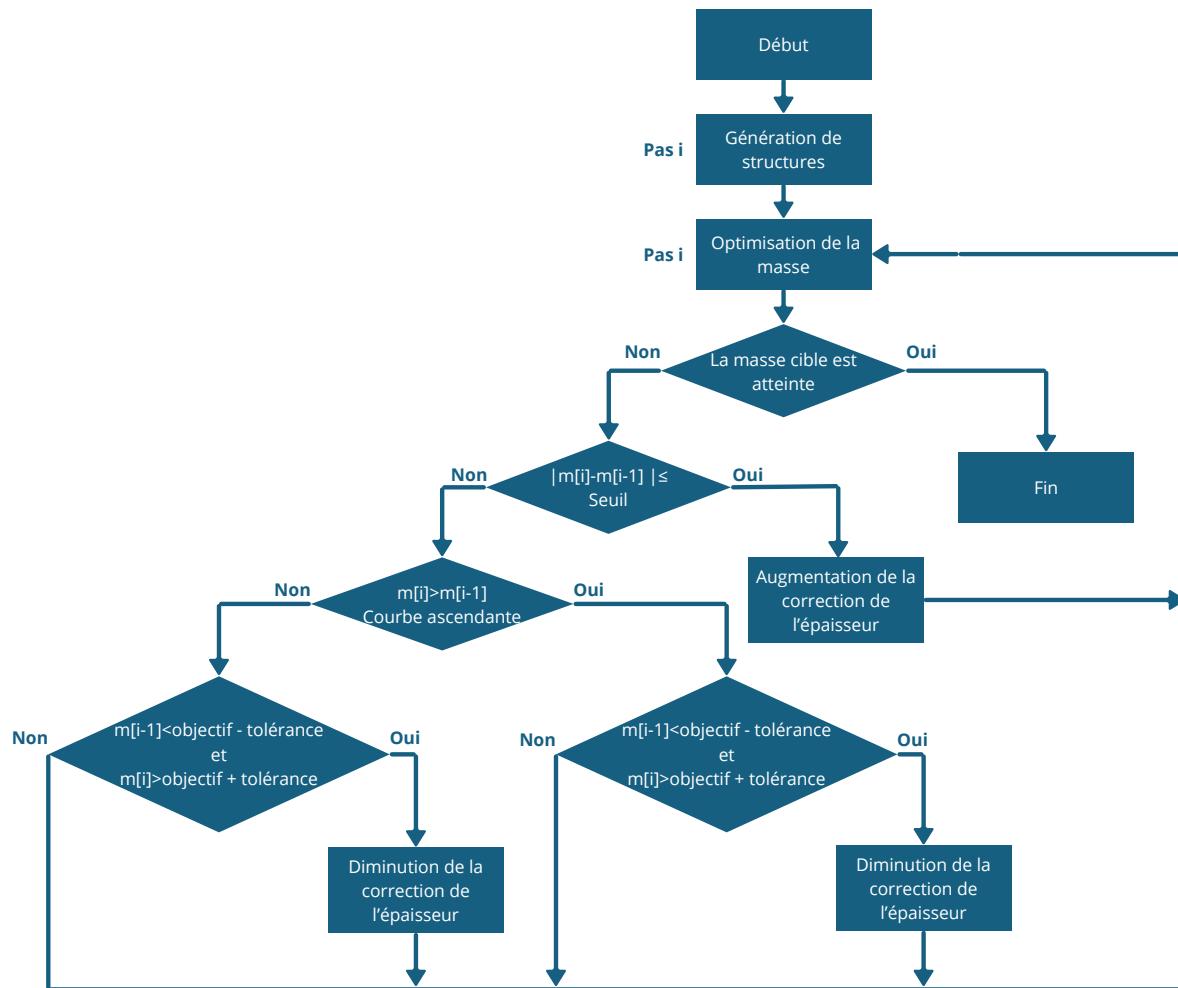


Fig. 3: Logigramme décrivant l'algorithme d'optimisation de la masse

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 (Figure 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 : $\Delta ep_{i+1} = (1 + fact_{\Delta ep}) * \Delta ep_i$.

Si la masse actuelle de la structure est supérieure à la masse cible, il s'agit du même procédé mais nous diminuons l'épaisseur des parois.

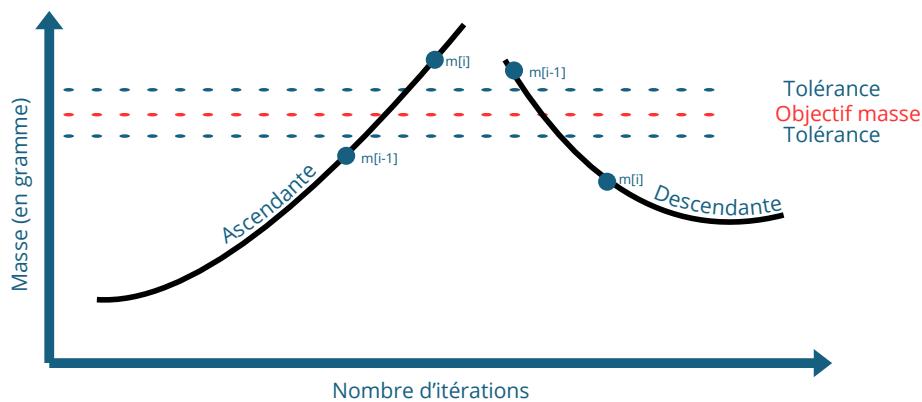


Fig. 4: Phénomène de dépassement de l'objectif de masse à atteindre si l'augmentation de l'épaisseur des parois est trop grande

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.

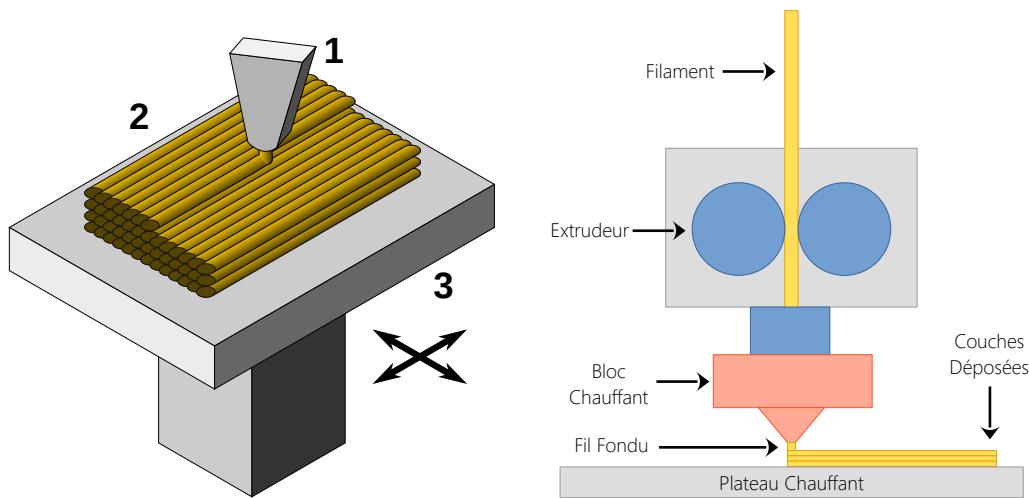


Fig. 5: Principe de fonctionnement de la technologie d'impression 3D type FDM [5]

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 relativement poussés. 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-5, 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 $220°C$, la température du plateau chauffant à $60°C$ (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	$220°C$
temperature	$220°C$
first_layer_bed_temperature	$60°C$
bed_temperature	$60°C$
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".

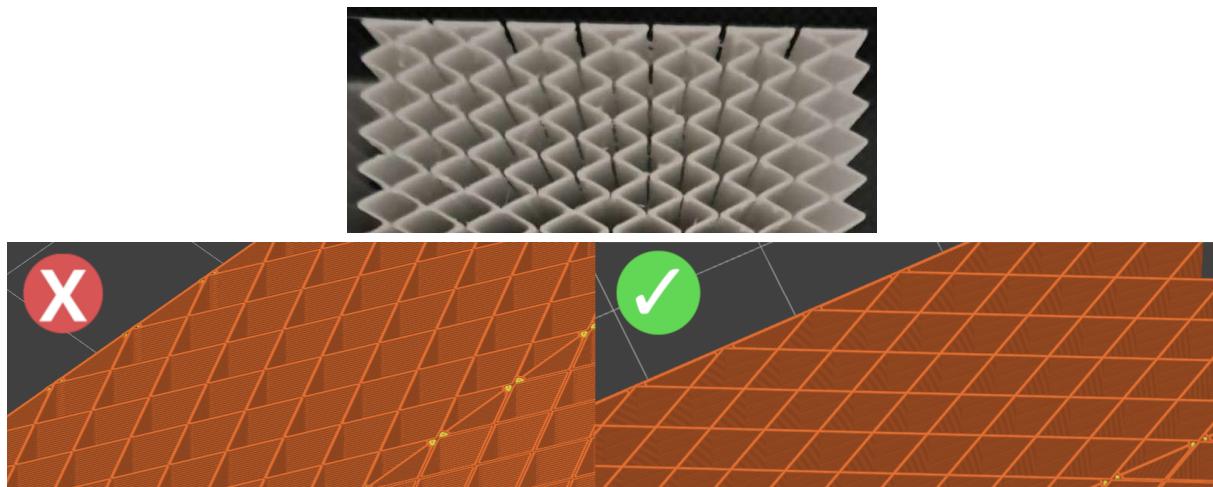


Fig. 6: Problématique de fusion entre losange non réalisée lors de l'impression avec le générateur de périmètres "Classique"

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 :

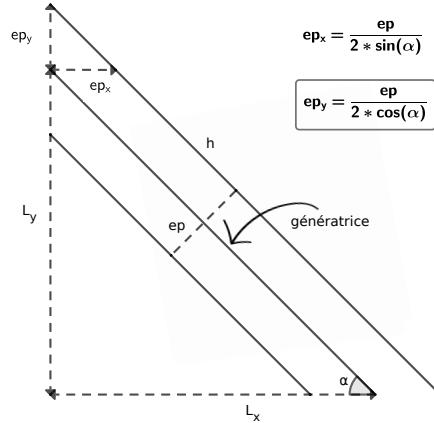


Fig. 7: Paramètres de la géométrie N°1 : Losanges

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 :

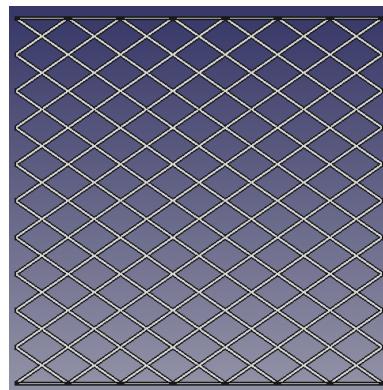


Fig. 8: Modélisation sous *FreeCAD* d'une structure N°1 : Losanges

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.

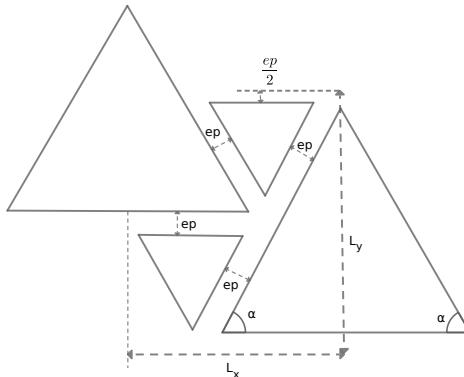


Fig. 9: Paramètres de la géométrie N°2 : Triangles

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 :

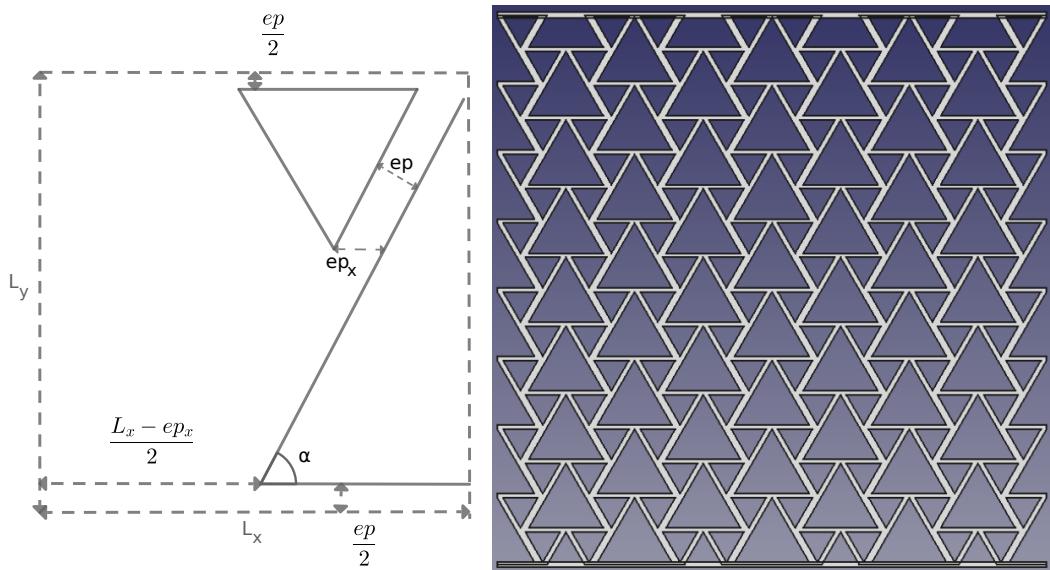


Fig. 10: Motif à répéter de la géométrie N°2 : Triangles à gauche. Modélisation sous FreeCAD d'une structure N°2 : Triangles à droite.

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.

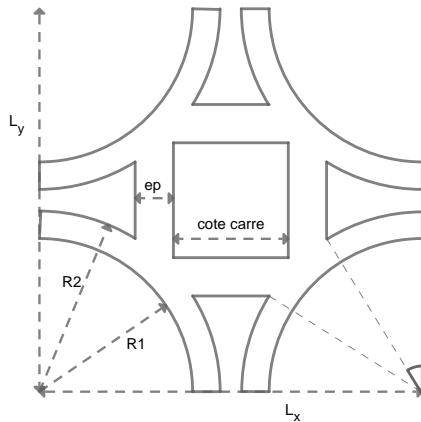


Fig. 11: Paramètres de la géométrie N°3 : Carrés + Arcs

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 :

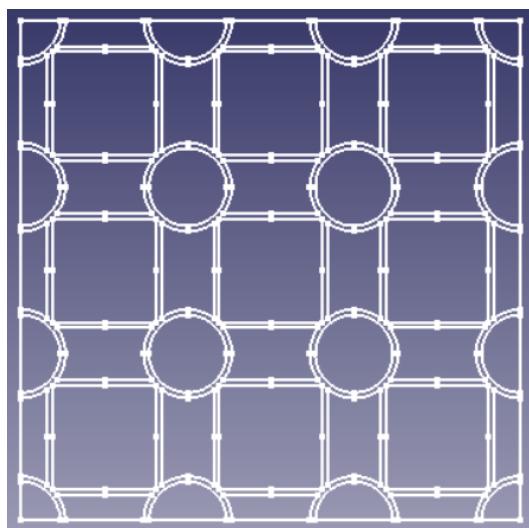


Fig. 12: Modélisation sous FreeCAD d'une structure N°3 : Carrés + Arcs

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.

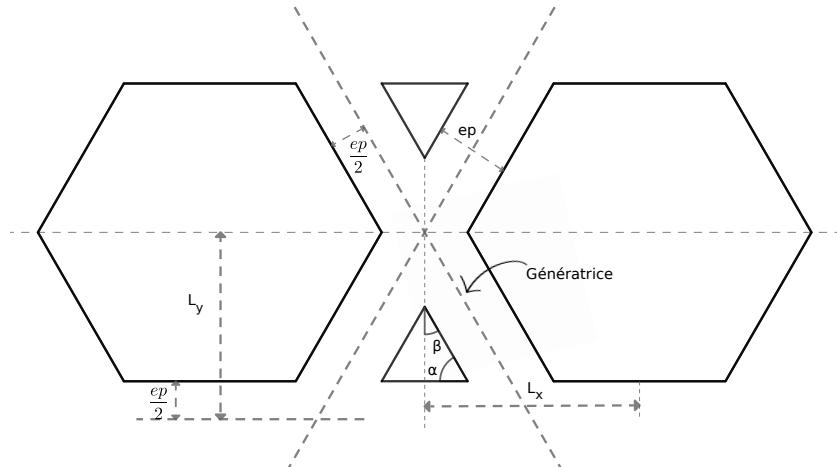


Fig. 13: Paramètres de la géométrie N°4 : Hexagones + Triangles

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} .

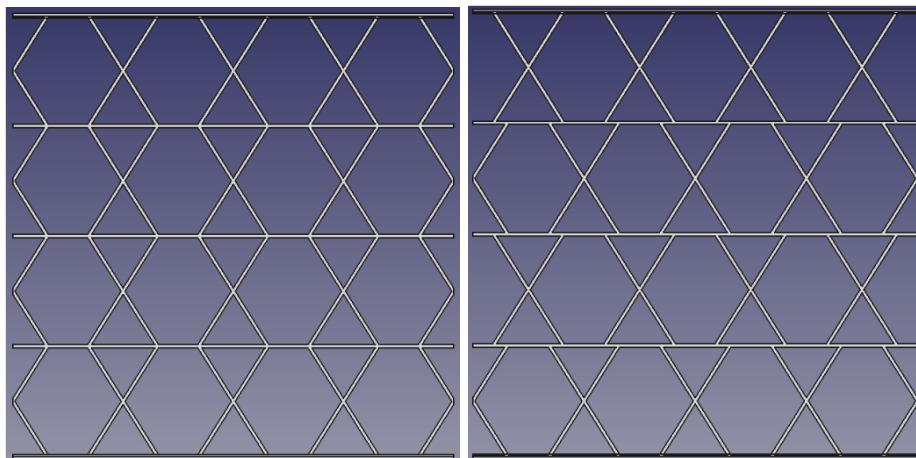


Fig. 14: Modélisation sous FreeCAD d'une structure N°4 : Hexagones + Triangles Alignées à gauche.
Modélisation sous FreeCAD d'une structure N°4 : Hexagones + Triangles Déphasés à droite.

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 :

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

En s'inspirant de cela, nous avons développé une structure en forme de cosinus. Afin de rigidifier la structure, nous avons inséré des plateaux à intervalle réguliers sur l'axe \vec{x} .

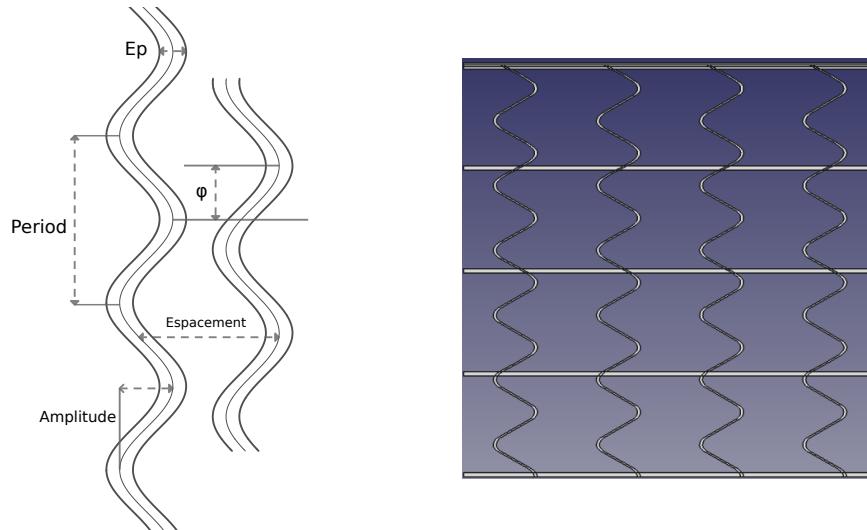


Fig. 15: Paramètres de la géométrie N°5 : Cosinus à gauche. Modélisation sous *FreeCAD* d'une structure N°5 : Cosinus à droite.

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.

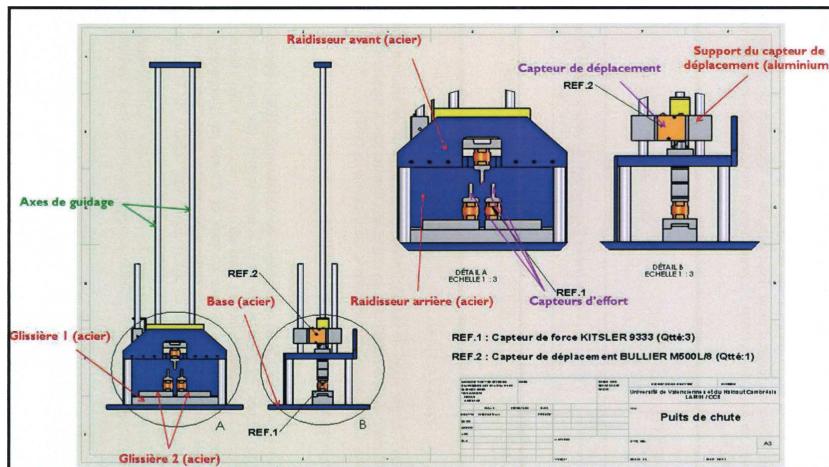


Fig. 16: Plan technique du Puits de Chute original issu de la thèse de Audrey Auperrin [9]

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 le modifier 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.

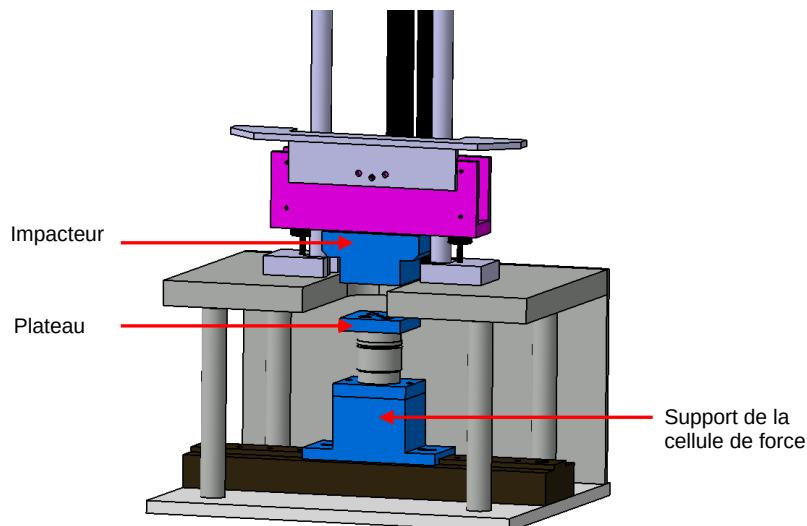


Fig. 17: Schéma des éléments du puits de chute modélisés sous *Catia V5*

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

6.2 Protocole expérimental

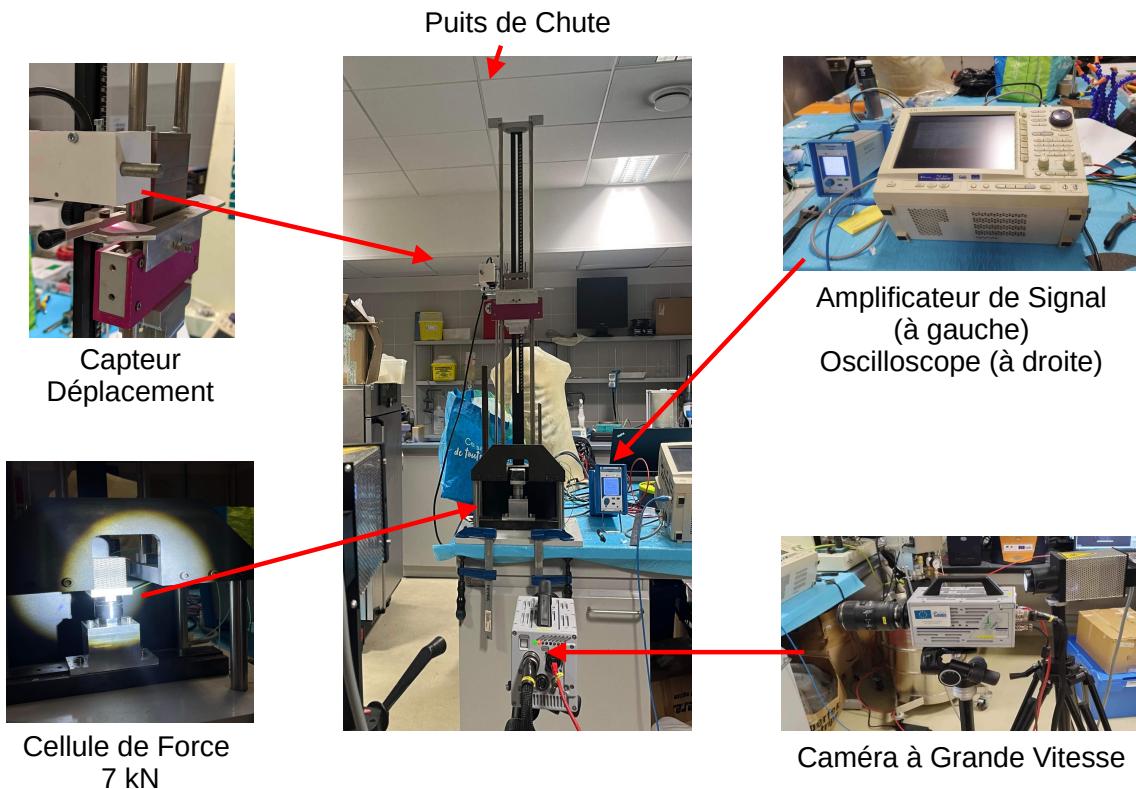


Fig. 18: Schéma de l'installation expérimentale

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 essais. 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 : Structure 1		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
1	Épaisseur des Parois	0.33 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 avec gradient d'épaisseur : Structure 10		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
2	Épaisseur des Parois	0.19 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
1	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	6
	Épaisseur des Parois	0.38 mm
1	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	8

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

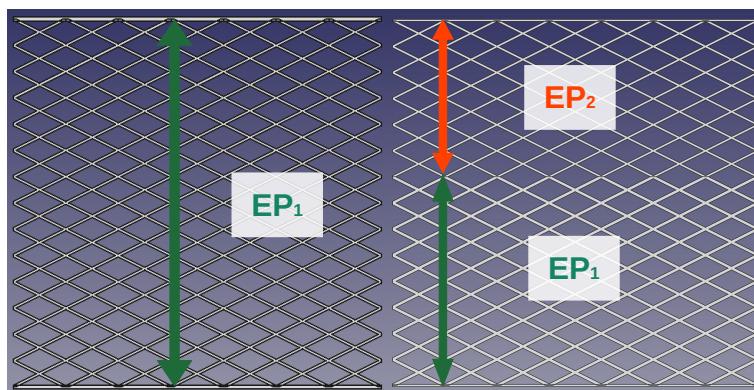


Fig. 19: Étude de l'influence de la présence d'un gradient d'épaisseur au sein d'une structure Losange

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 : Structure 1		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
1	Épaisseur des Parois	0,33 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	14

Table 11: Paramètres de la structure Numéro 1 : Structure de référence

Structure à gradient de géométrie : Structure 13		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
2	Épaisseur des Parois	0,29 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	5
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	6
1	Épaisseur des Parois	0,29 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	8

Table 12: Paramètres de la structure Numéro 13 : Influence de l'ajout d'un gradient de géométrie

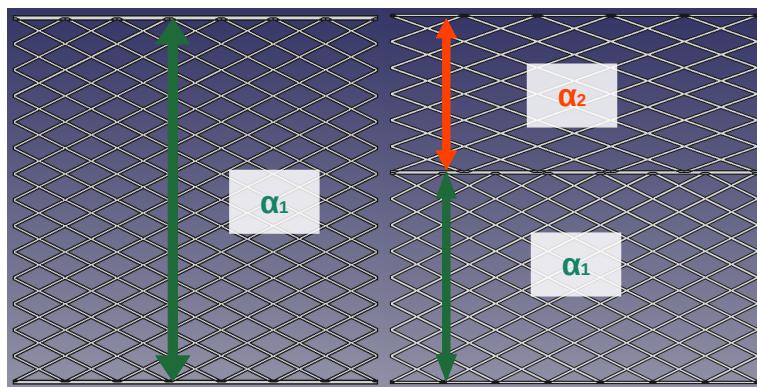


Fig. 20: Étude de l'influence de la présence d'un gradient de géométrie au sein d'une structure losange

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.

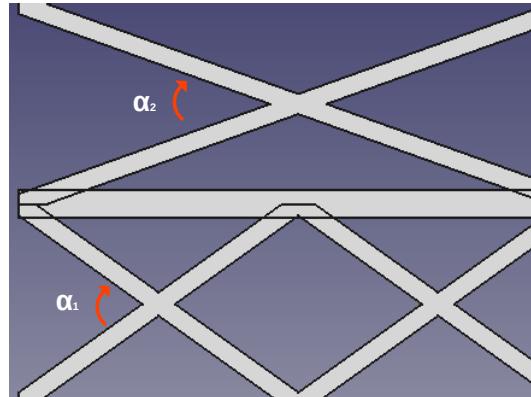


Fig. 21: Représentation de la nécessité d'ajouter de plateau dans une configuration de gradient de géométrie

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 13 (Voir Figure 20) mais avec un gradient d'épaisseur à la place du gradient de géométrie. Nous l'avons confronté avec la structure 10 (voir Figure 19), qui est identique à celle que nous venons de générer mais sans plateau.

Structure avec gradient d'épaisseur avec plateau (9) et sans plateau (10)		
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}	6
1	Épaisseur des Parois	0,38 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	8

Table 13: Paramètres de la structure Numéro 10 et 9 : Influence de l'ajout d'un plateau entre deux couches

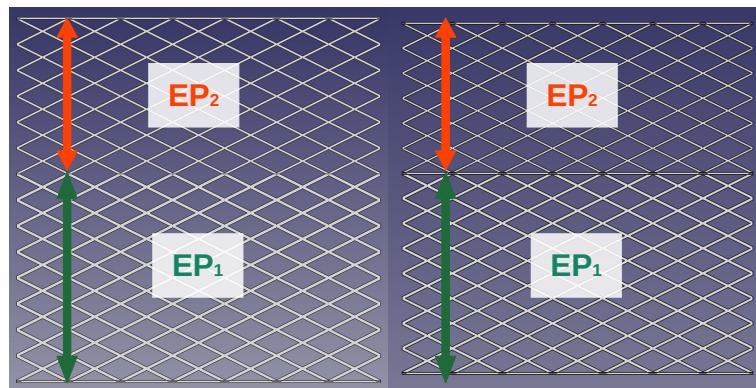


Fig. 22: Étude de l'influence de la présence d'un gradient de géométrie au sein d'une structure losange

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 Symétrique : Structure 3		
Couche de Gradient	Variable	Valeur
3	Épaisseur des Parois	0,38 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	4
2	Épaisseur des Parois	0,19 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	6
1	Épaisseur des Parois	0,38 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	4

Table 15: Paramètres de la structure Numéro 3 : Structure symétrique

Structure Asymétrique : Structure 10		
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}	6
1	Épaisseur des Parois	0,38 mm
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{x}	7
	Nombre de Losanges sur l'axe \vec{y}	8

Table 16: Paramètres de la structure Numéro 10 : Structure asymétrique

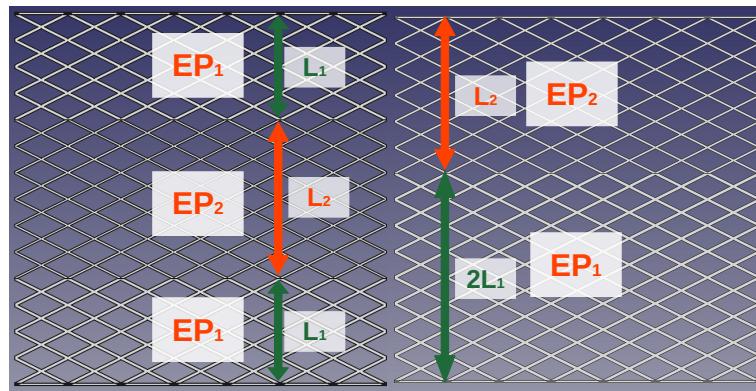


Fig. 23: Étude de l'influence de la différence entre une structure symétrique et asymétrique au travers d'une structure A à gauche (symétrique) et d'une structure B à droite (asymétrique)

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 asymétrique : Structure 6		
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 6 : Influence de la direction de sollicitation

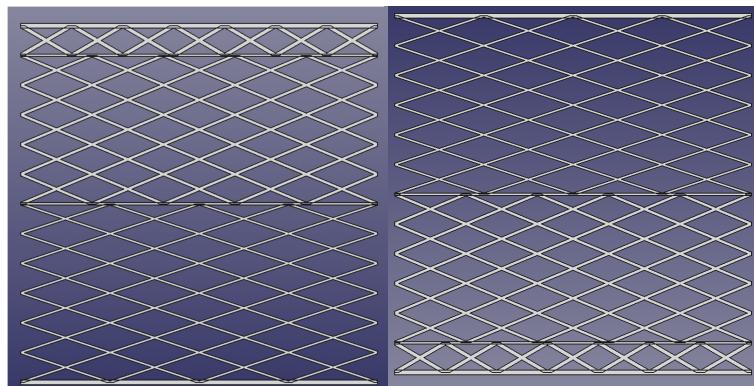


Fig. 24: Étude de l'influence de la direction de sollicitation pour une structure asymétrique

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, il est possible que la détection automatique du début d'impact ne fonctionne pas. Il est alors possible de paramétrier le début de l'essai 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. TDC 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" suivi d'un calcul de l'énergie d'impact. Nous récoltons ensuite les énergies de chaque essais afin calculer l'écart-type et de pouvoir comparer les essais entre eux.

Les résultats se présentent sous la forme suivante :

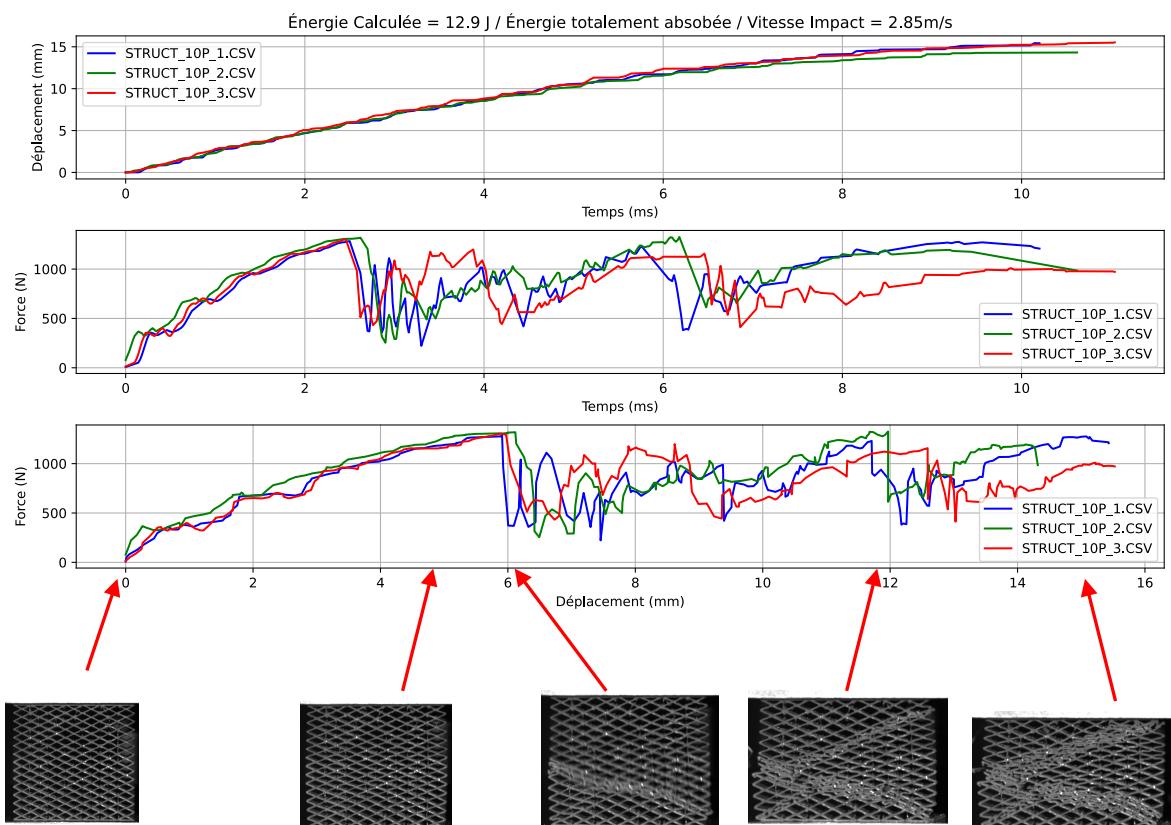


Fig. 25: Résultats du traitement des données pour la Structure 10

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'effectuant 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

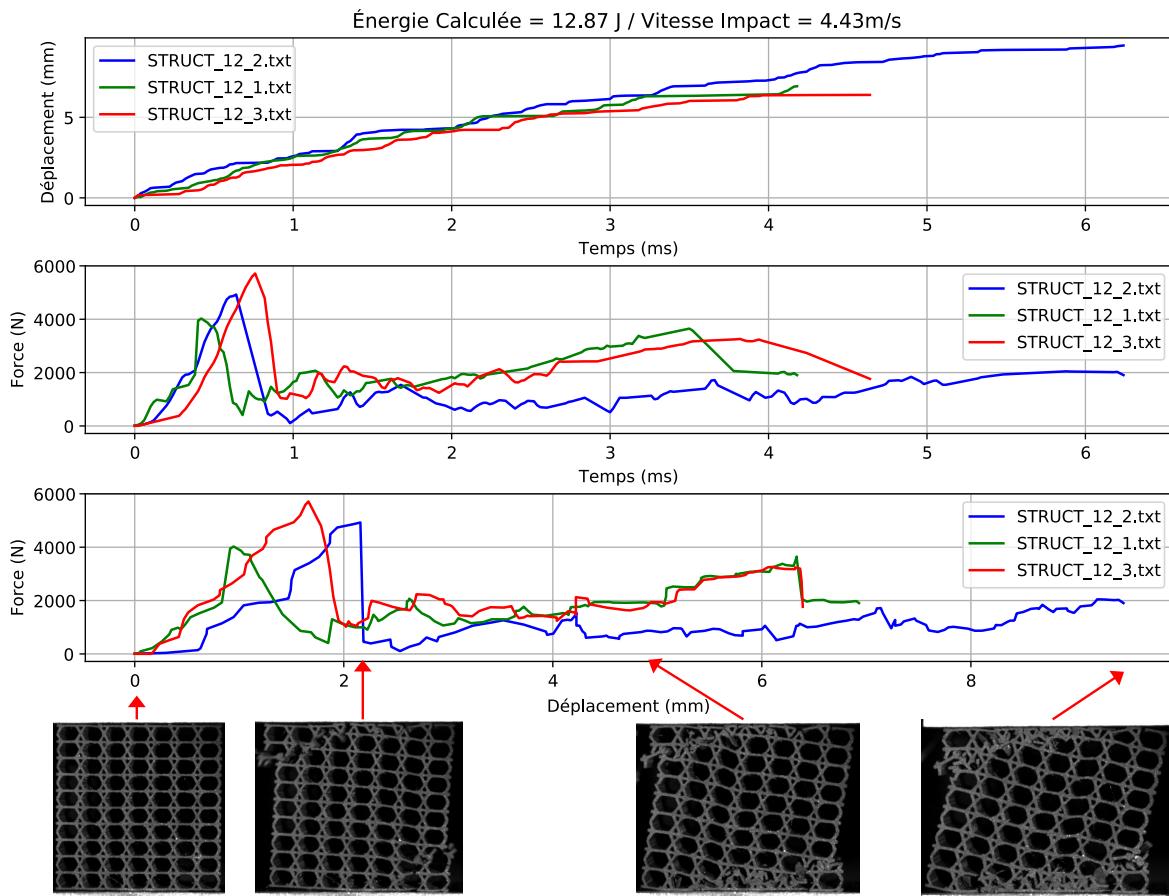


Fig. 26: Résultats du traitement des données pour la Structure 12

Au vu 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

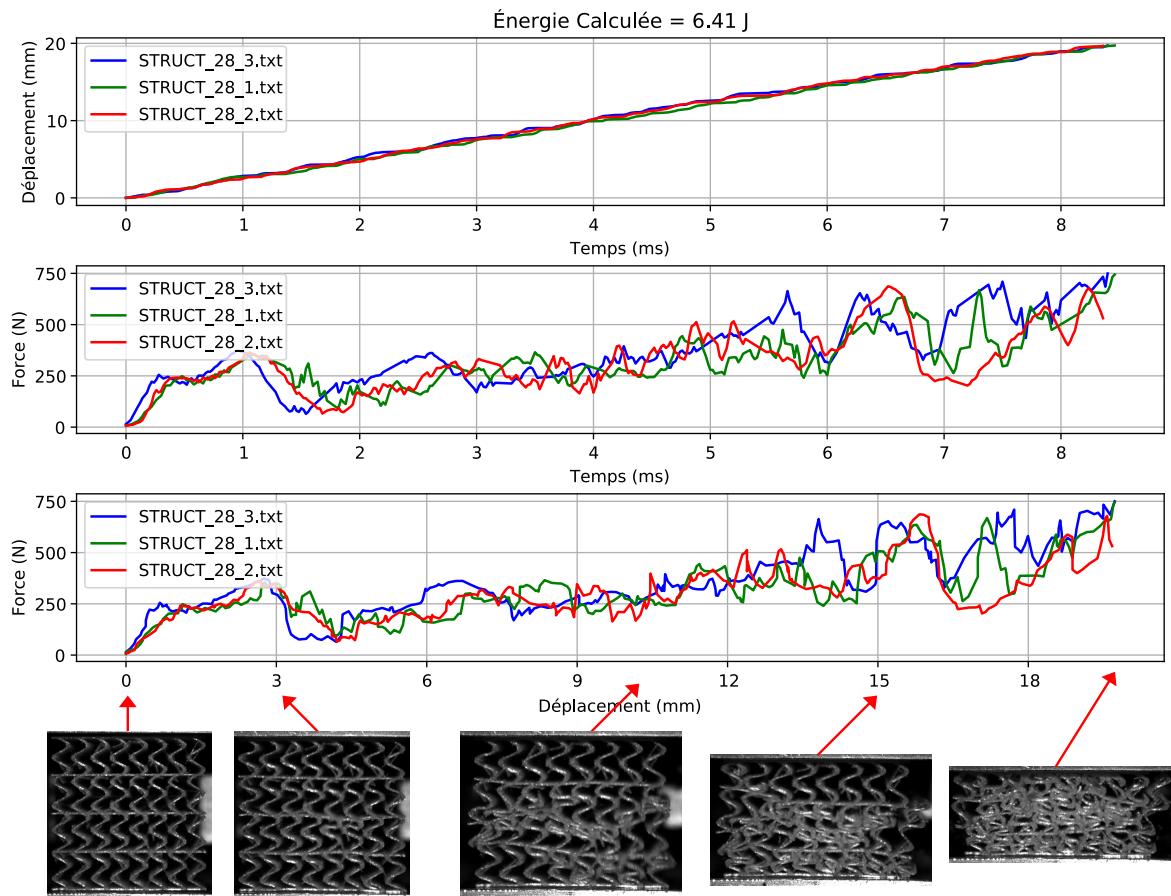


Fig. 27: Résultats du traitement des données pour la Structure 28

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

La géométrie losange (N°1) a été notre première géométrie développée. En effet, la structure losange est la plus simple à caractériser géométriquement et la plus rapide à implémenter d'un point de vue logiciel. Ayant des résultats prometteurs dès les premiers essais, nous nous sommes concentrés sur l'étude de cette structure compte tenu de la courte durée de ce projet.

7.4.1 Influence du gradient d'épaisseur

Dans le but de connaître l'influence d'un gradient d'épaisseur sur les losanges, nous avons testé deux structures. La première est notre structure de référence (Structure N°1) et la deuxième est une structure avec un gradient d'épaisseur de paroi (Structure N°10). Vous pouvez retrouver les paramètres géométriques de ces structures dans la partie 6.3.1.

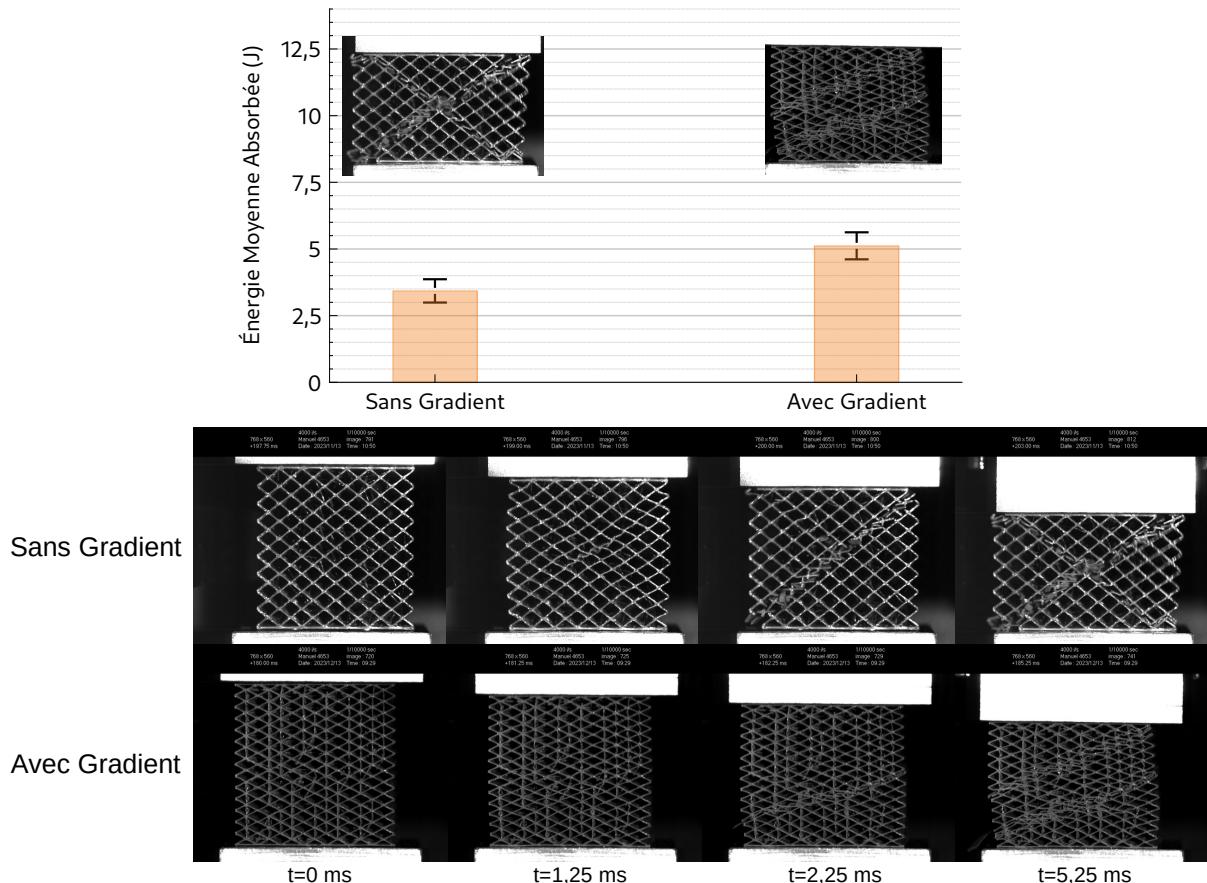


Fig. 28: Comparaison de la structure de référence (N°1) avec une structure à gradient d'épaisseur (N°10)

Au vu de ce résultats, nous pouvons conclure que l'ajout de gradients d'épaisseur favorise l'absorption d'énergie. En effet, nous pouvons remarquer que la structure de référence (sans gradient) ne se déforme que très peu avant de rompre. La structure avec gradient d'épaisseur quant à elle se déforme avant l'initiation de diverses ruptures dans la couche avec l'épaisseur de paroi la plus élevée.

7.4.2 Influence du gradient de géométrie

Dans la continuité de la partie précédente, nous avons cette fois-ci voulu étudier l'influence d'un gradient de géométrie par rapport à notre structure lattice de référence. Dans cette partie nous étudions donc la même structure de référence que précédemment (Structure N°1) et une structure à gradient de géométrie comportant deux couches à même épaisseur mais avec une densité de losanges différente (Structure N°13). Vous pouvez retrouver les paramètres géométriques de ces structures dans la partie 6.3.2.

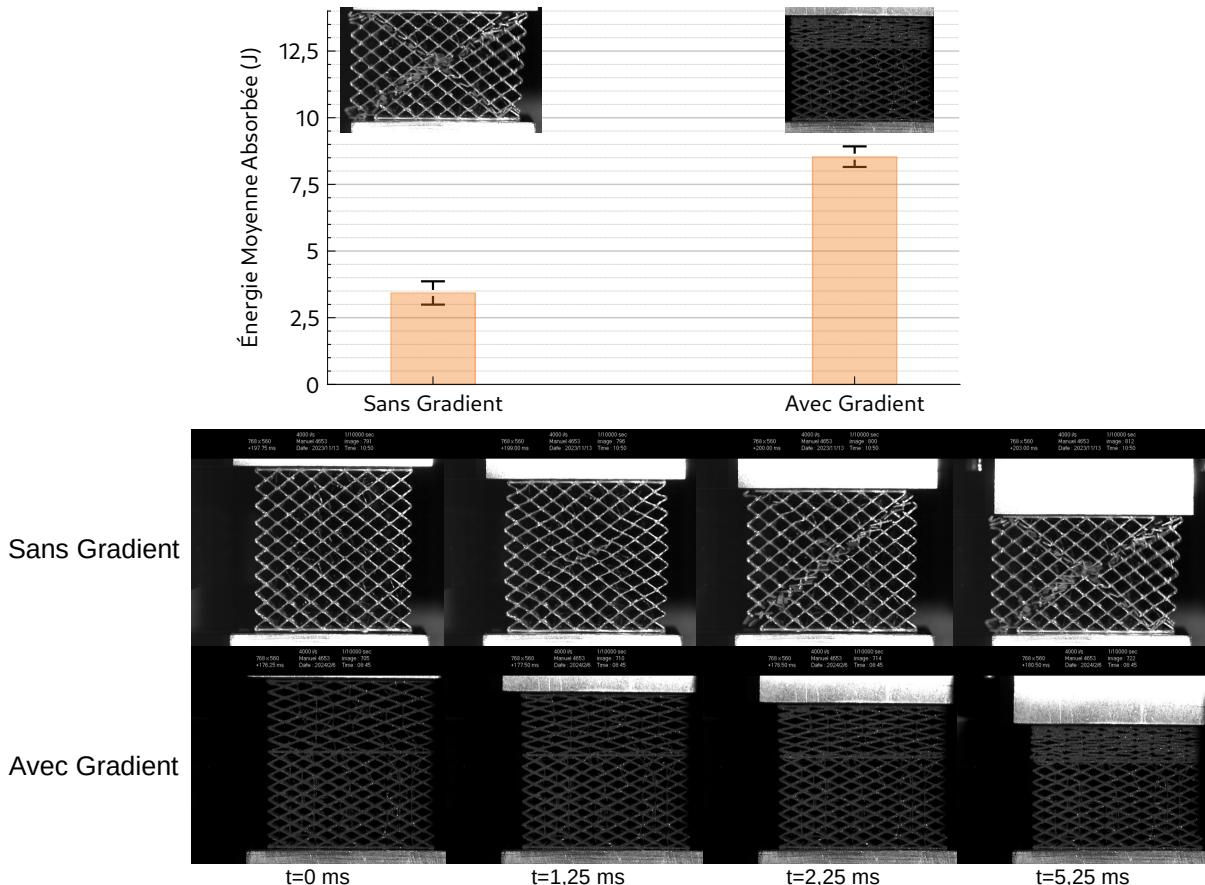


Fig. 29: Comparaison de la structure de référence (N°1) avec une structure à gradient de géométrie (N°13)

Comme précédemment, cette structure améliore effectivement l'absorption d'énergie par rapport à notre structure lattice de référence. Il est important de noter que dans la partie supérieure de la structure, nous n'observons pas de rupture tandis qu'à la fin de l'essai la partie inférieure rompt. Ceci veut dire que nous avons des comportements différents de la structure suivant l'angle du losange (voir angle α Figure 7). Nous traiterons cette problématique dans la partie 7.4.8.

Il est également intéressant de remarquer que nous avons plus tendance à absorber de l'énergie en faisant un gradient de géométrie plutôt qu'un gradient d'épaisseur. Ceci est dû aux propriétés matérielles du PLA qui est fragile pour une épaisseur de paroi supérieure à 0,4mm. Nous sommes également limités pour les épaisseurs que nous pouvons imprimer (voir partie 9.2).

7.4.3 Influence de l'ajout de plateaux

Le gradient de géométrie engendre nécessairement l'ajout de plateaux pour lier les deux couches de gradients et former une seule et même structure (voir partie 6.3.3). Il nous faut donc traiter l'influence de ces plateaux sur les résultats. Nous avons donc créer deux structures à gradient d'épaisseur afin de pouvoir avoir une structure avec et sans plateau (Structures N°9 et N°10 voir Figure 22).

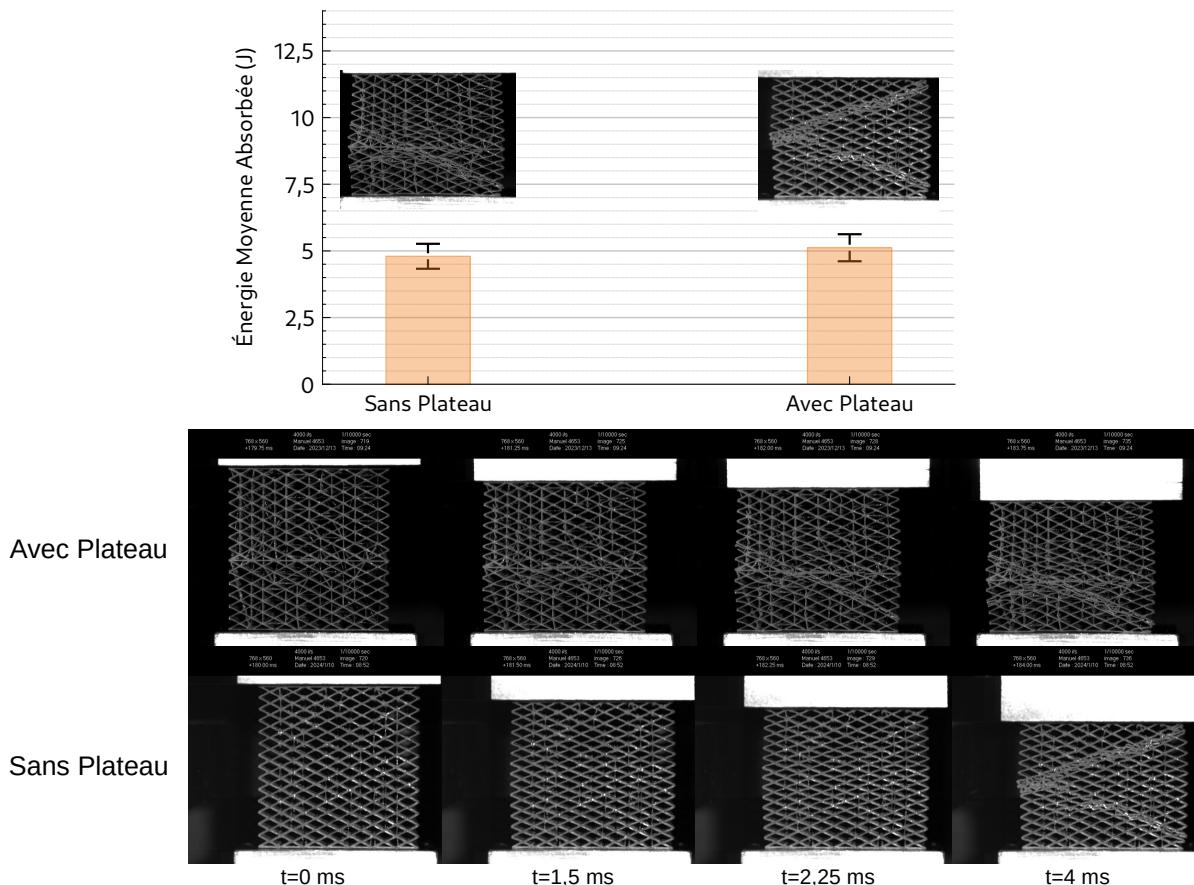


Fig. 30: Comparaison de deux structures avec plateau (Structure N°9) et sans plateau (Structure N°10) ayant le même gradient de géométrie

Au vue des résultats d'énergie (qui sont similaires) nous pouvons conclure que l'ajout de plateau n'affecte pas l'énergie absorbée par la structure. En revanche, lorsque la diagonale de rupture traverse les couches de gradients, le plateau est également rompu ($t = 2,25ms$). On peut remarquer à $t = 4ms$ qu'une nouvelle diagonale de rupture a été initiée à partir du point de rupture du plateau. Cet élément est donc à garder en considération dans la conception des structures car sur des couches de gradient très fines, ce phénomène pourrait avoir un impact sur l'absorption d'énergie. Imaginons que deux diagonales de rupture se croisent, nous allons retrouver une accumulation de ruptures d'un côté de la structure. Cette accumulation de rupture va former des morceaux de parois en contacts les uns contre les autre ce qui forme une sorte d'inclusion rigide au sein de la structure. Ceci pourrait alors former un point fragile de la structure en concentrant les contraintes à cet endroit, diminuant alors la capacité d'absorption d'énergie.

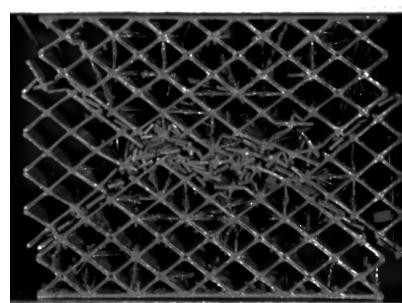


Fig. 31: Exemple d'accumulation de rupture dans une structure lattice formant une inclusion rigide en son sein

7.4.4 Comparaison de gradient symétrique et asymétrique équivalents

Pour le moment, nous ne vous avons montré uniquement des structures asymétriques. Nous avons développé notre atelier *FreeCAD* de génération des structures pour que nous soyons le plus libre possible lors de la conception de celles-ci. En particulier, nous avons fait en sorte de pouvoir créer des structures symétriques ou asymétriques.

Dans notre cas, étant donné que nous travaillons à paramètres constants (donc un volume de 40x40x40mm), nous sommes limités pour ce qui est de la création de gradients dans la direction de sollicitation de notre structure. Il serait donc préférable qu'un gradient asymétrique soit plus performant qu'un gradient symétrique équivalent (Structures N°3 et N°10, voir partie 6.3.4).

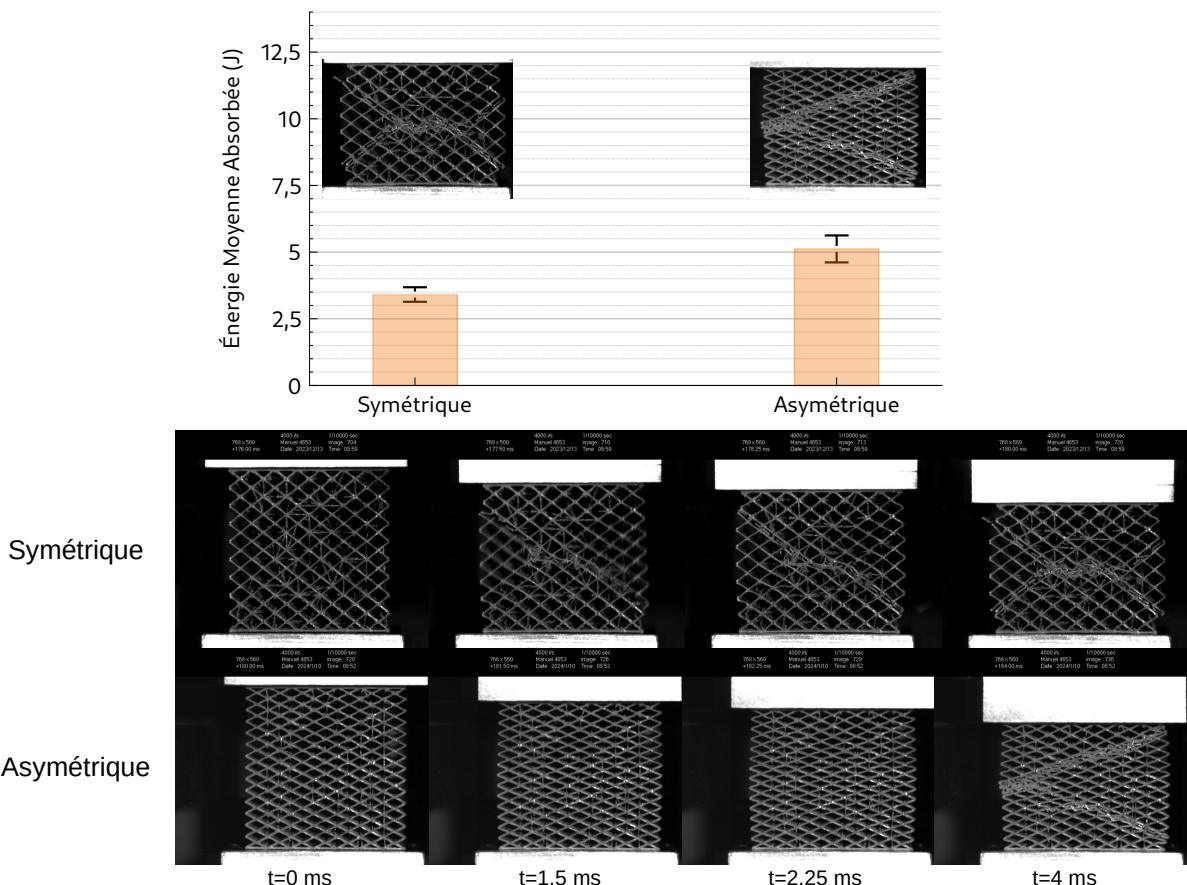


Fig. 32: Comparaison de deux structures symétrique (Structure N°3) et asymétrique (Structure N°10) équivalentes

La structure symétrique ayant une épaisseur de parois plus faible en son centre, les losanges commencent par se déformer à cet endroit. Or les contraintes étant tellement fortes (les couches aux extrémités se comportant comme des couches très rigides), la structure est très fragilisée et propage la rupture dans les couches aux extrémités (qui ont un comportement fragile). La structure à gradient d'épaisseur symétrique est donc moins performante que la structure à gradient d'épaisseur asymétrique.

7.4.5 Influence de l'épaisseur dans un gradient symétrique

Dans la partie précédente (7.4.4), nous avons comparé une structure symétrique à une structure asymétrique en mettant l'épaisseur de parois la plus faible au centre de la structure. Il serait intéressant d'effectuer la même expérience mais en mettant l'épaisseur la plus faible aux extrémités de la structure et l'épaisseur la plus élevée au centre. C'est l'objet de cette partie.

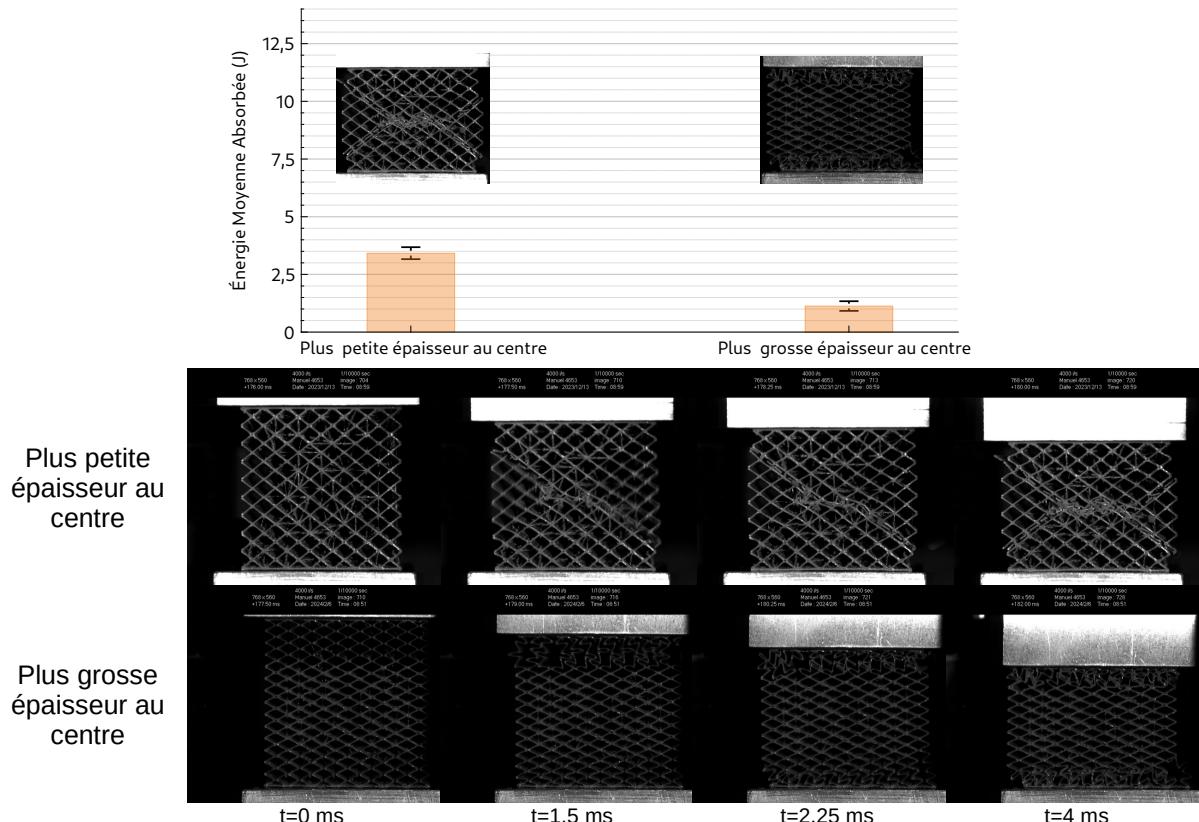


Fig. 33: Comparaison de deux structures symétriques avec l'épaisseur la plus petite au centre (Structure N°3) et l'épaisseur la plus grosse au centre (Structure N°14)

Nous ne pouvons malheureusement pas tirer de conclusion de la structure N°14 (épaisseur la plus grosse au centre). En effet, l'impression de celle-ci c'est mal passée, on peut remarquer que les losanges des parois fines ne sont pas soudés entre eux. Nous expliquons ce phénomène dans la partie 4.3.2.

7.4.6 Influence de la direction de sollicitation sur une structure asymétrique

Ayant étudié l'influence de l'épaisseur dans un gradient symétrique, nous avons trouvé pertinent d'étudier l'influence de la direction de sollicitation. En effet, nous voulions savoir si la déformation de la structure était due à la couche de gradient la moins rigide ou alors si l'impacteur produisait une onde de déformation dans la structure comme nous avons pu observer dans la partie 8.3 sur le modèle numérique. Pour cela, nous avons conçu une structure asymétrique avec trois couches de gradients que nous avons sollicitée dans deux sens (Structure N°6, voir 6.3.5).

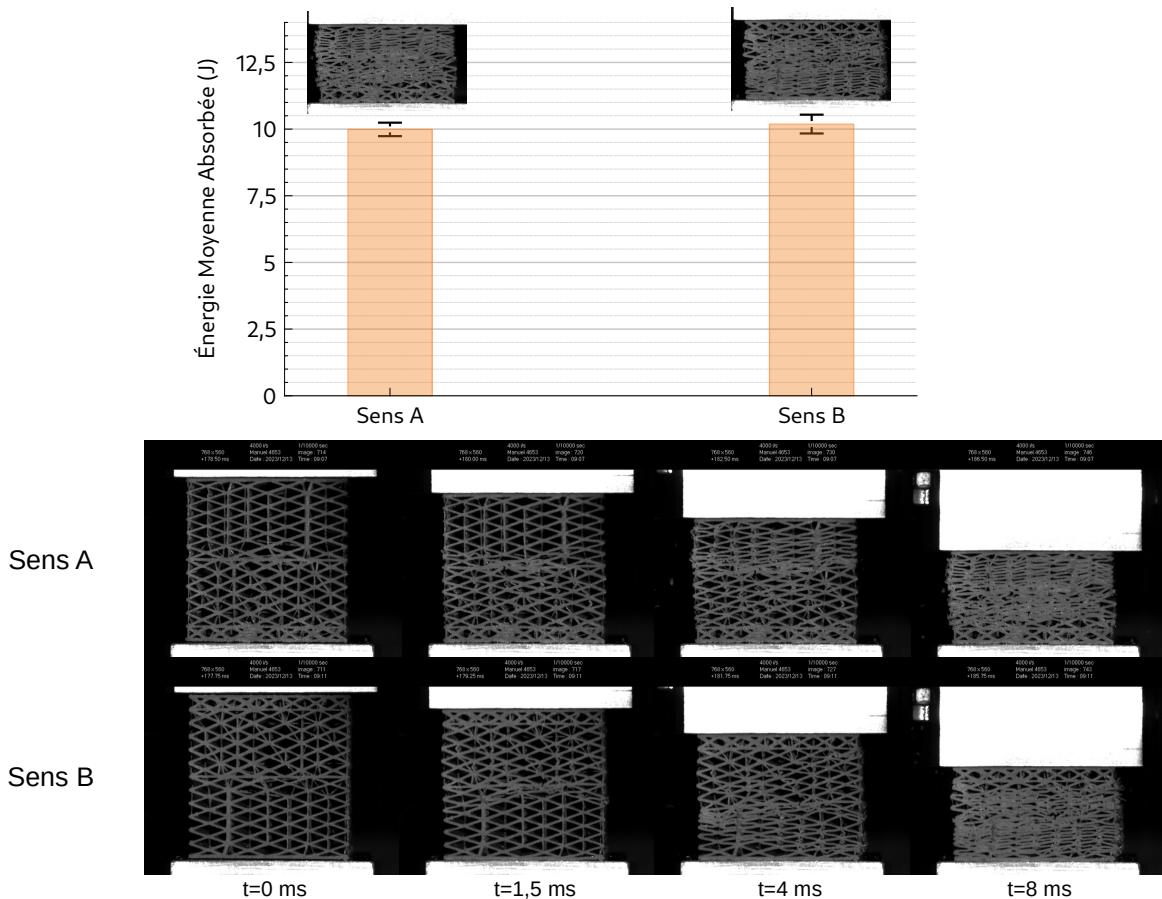


Fig. 34: Comparaison de deux structures identiques asymétriques à gradients multiples (Structure N°6) dans deux sens de sollicitation différents

Comme nous pouvons le constater, la structure se déforme de la même façon dans les deux sens de sollicitation. L'absorption d'énergie est également équivalente. Le sens de sollicitation pour une structure asymétrique n'a donc pas d'influence.

7.4.7 Ajout progressif de gradient d'épaisseur

Le but de cette partie est de pouvoir caractériser le comportement des structures à géométrie losange par rapport au gradient d'épaisseur. Nous avons alors créer plusieurs structures avec différents gradients d'épaisseur.

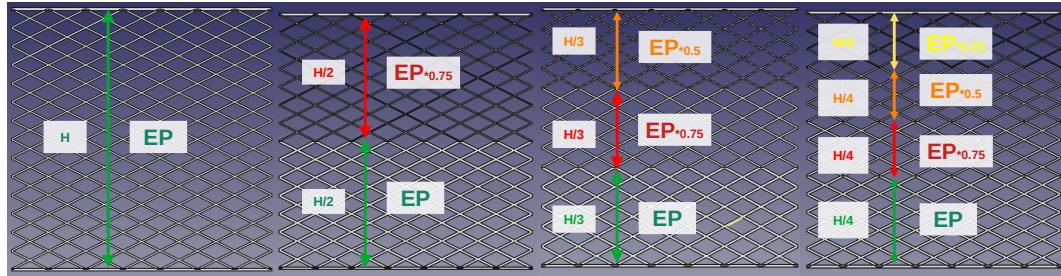
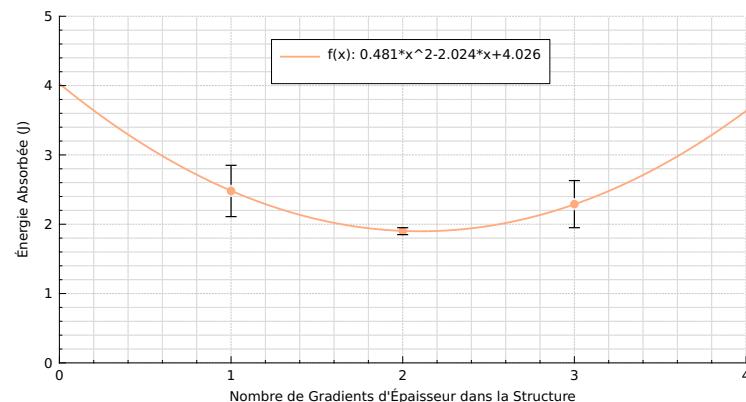


Fig. 35: Paramètres des structure pour l'ajout progressif de gradient d'épaisseur dans une structure Losange
(De gauche à droite : Structure N°1, 15, 16, 17)

La structure N°17 n'a malheureusement pas pu être imprimée car l'épaisseur des parois sont trop inférieures au diamètre de la buse.



0 Gradient d'Épaisseur

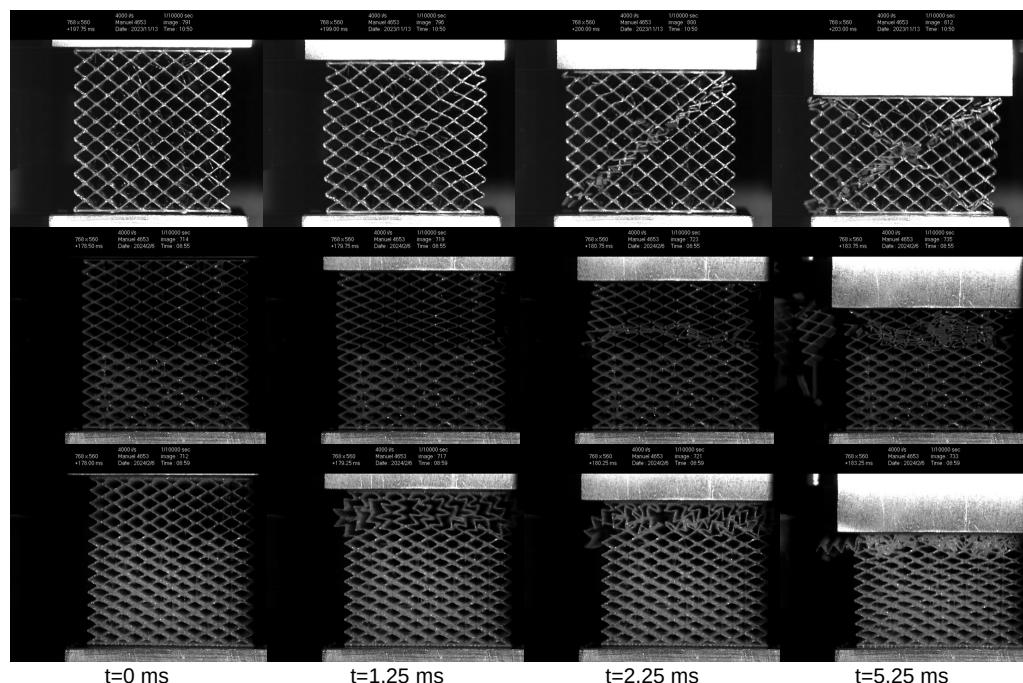


Fig. 36: Ajout progressif de gradient d'épaisseur dans une structure Losange (De gauche à droite : Structure N°1, 15, 16, 17)

Les résultats que nous avons ici ne sont pas acceptable. Nous avons le même phénomène de losanges non liés entre eux que nous avons rencontré à la partie 7.4.5. Nous expliquons en détail ce phénomène dans la partie 4.3.2.

7.4.8 Ajout progressif de losanges suivant les axes \vec{x} et \vec{y}

Nous avons remarqué dans les résultats précédents que l'angle que forment les losanges est un paramètre très influent. Dans cette partie, nous essayons de trouver un nombre de losanges optimal suivant l'axe \vec{x} et l'axe \vec{y} . Autrement dit, nous recherchons la densité de losanges et l'angle optimal dans une structure pour une absorption d'énergie maximale. Nous avons donc conçu des structures en faisant varier petit à petit le nombre de losanges suivant l'axe \vec{x} et suivant l'axe \vec{y} .

Variation du nombre de losanges suivant l'axe \vec{x} :

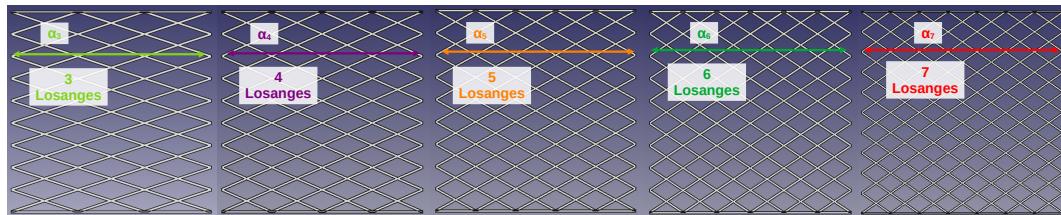


Fig. 37: Paramètres des structures pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{x} (De gauche à droite : Structure N°1, 22, 23, 24, 25)

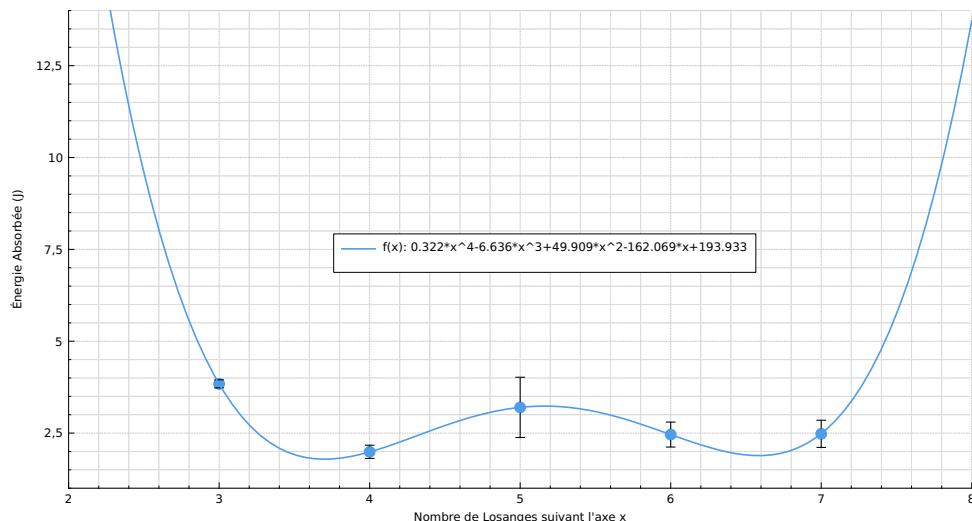
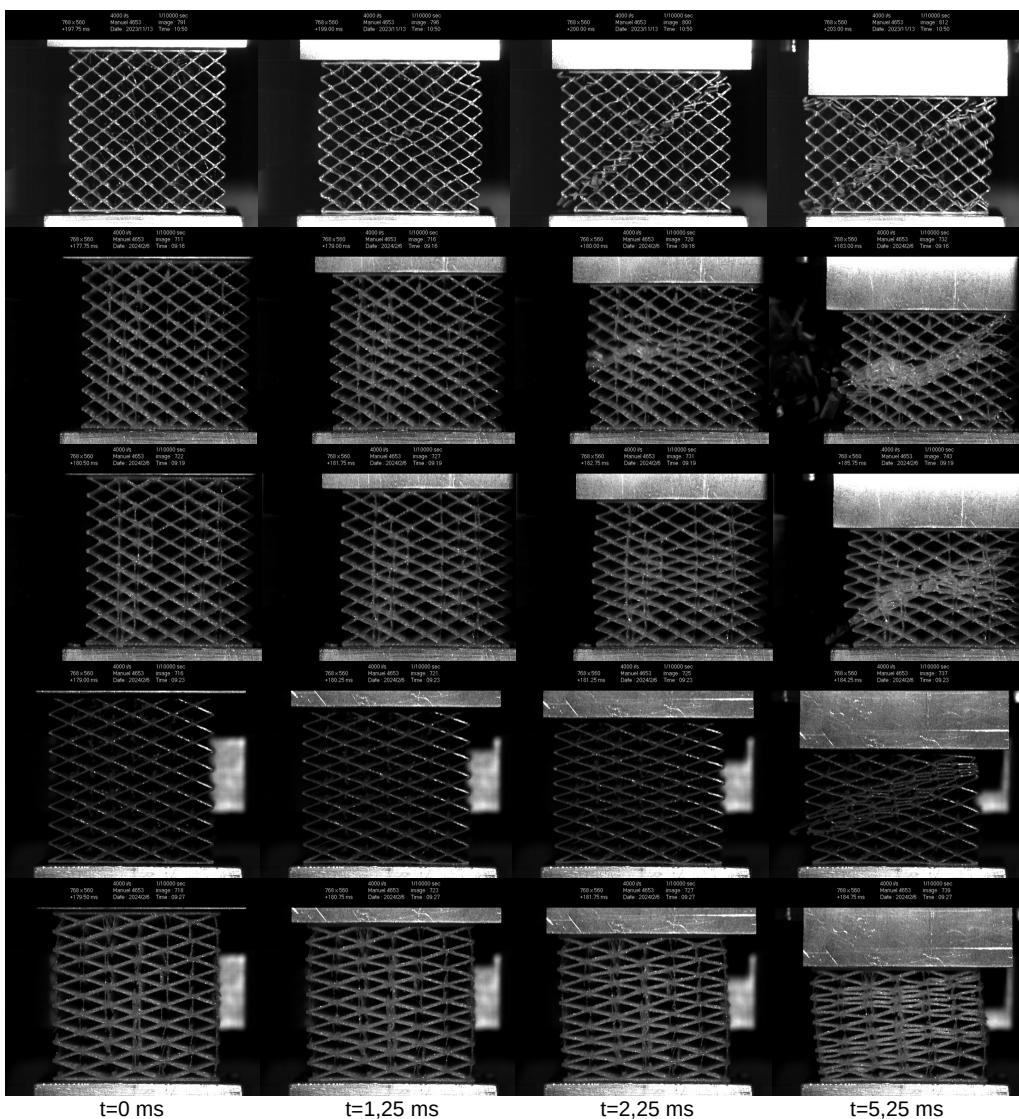


Fig. 38: Courbe pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{x} (De gauche à droite : Structure N°1, 22, 23, 24, 25)

Cette expérience ne révèle pas un changement majeur pour ce qui est de l'absorption d'énergie en faisant varier le nombre de losanges suivant l'axe \vec{x} . On remarque que plus le nombre de losange suivant l'axe \vec{x} est faible, plus la structure est souple et absorbe de l'énergie mais sans grande amélioration par rapport aux autres.

Voulant rester à masse constante, nous avons laisser l'algorithme d'optimisation de la masse fonctionner pour ces structures. Ce choix est discutable. En effet, diminuer le nombre de losanges suivant l'axe \vec{x} engendre une diminution de la densité de la structure (augmentation du taux de porosité). Si la densité de la structure diminue, sa masse pour une même épaisseur aussi. Autrement dit, pour compenser le manque de masse pour les structures avec moins de losanges suivant l'axe \vec{x} , l'algorithme d'optimisation de la masse a ajouté beaucoup d'épaisseur aux parois. Nous ne sommes donc pas dans les mêmes conditions d'expérience.

7 Losanges en
X



4 Losanges en
X

6 Losanges en
X

5 Losanges en
X

Fig. 39: Images pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{x} (De gauche à droite : Structure N°1, 22, 23, 24, 25)

Variation du nombre de losanges suivant l'axe \vec{y} :

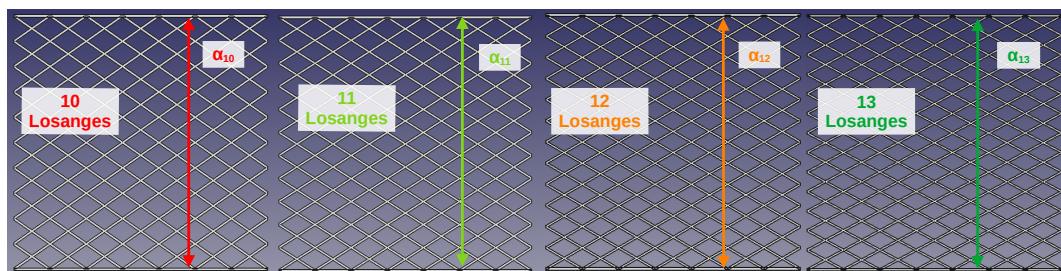


Fig. 40: Paramètres des structures pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{y} (De gauche à droite : Structure N°18, 19, 20, 21, 22)

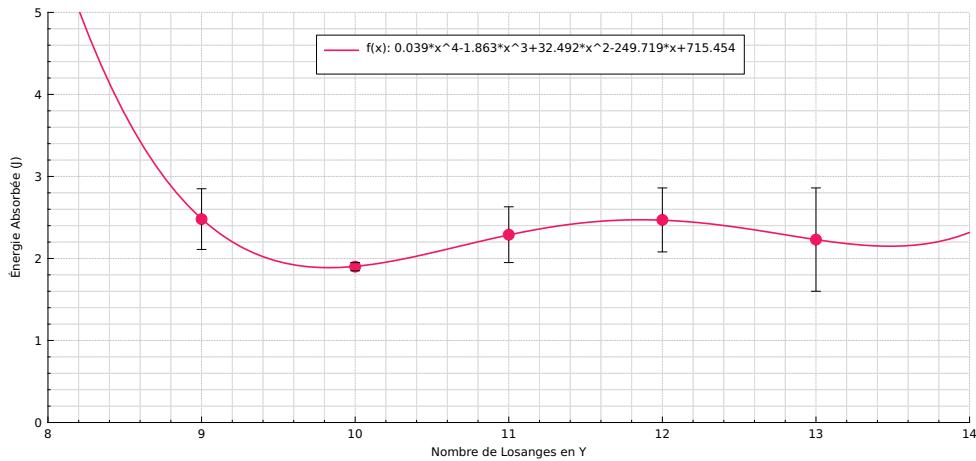


Fig. 41: Courbe pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{y} (De gauche à droite : Structure N°18, 19, 20, 21, 22)

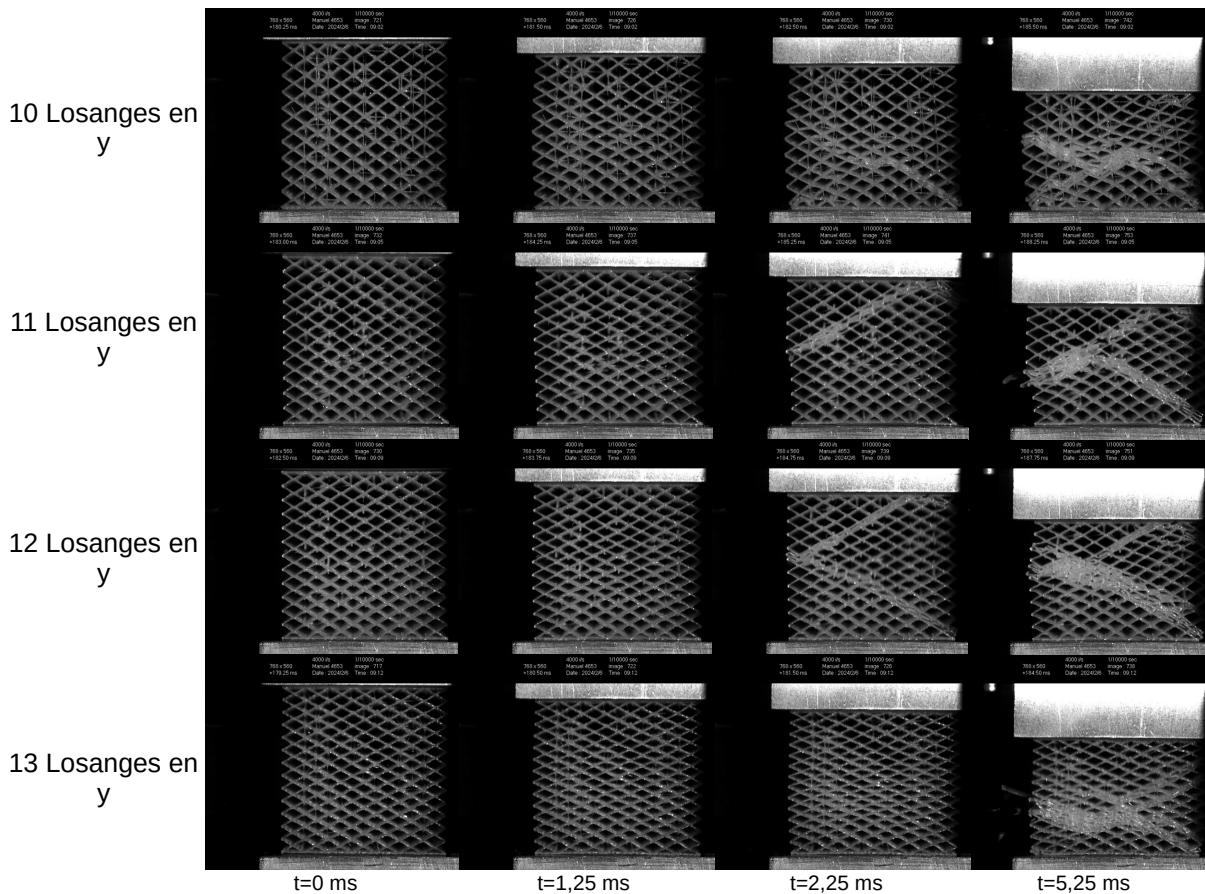


Fig. 42: Images pour l'ajout progressif de losanges suivant l'axe \vec{y} (De gauche à droite : Structure N°18, 19, 20, 21, 22)

Nous avons ici la même conclusion que pour l'ajout de losanges suivant l'axe \vec{x} . L'algorithme d'optimisation de la masse à rajouter trop d'épaisseur rendant les résultats inexploitables.

7.4.9 Comparaison de structures à gradients multiples

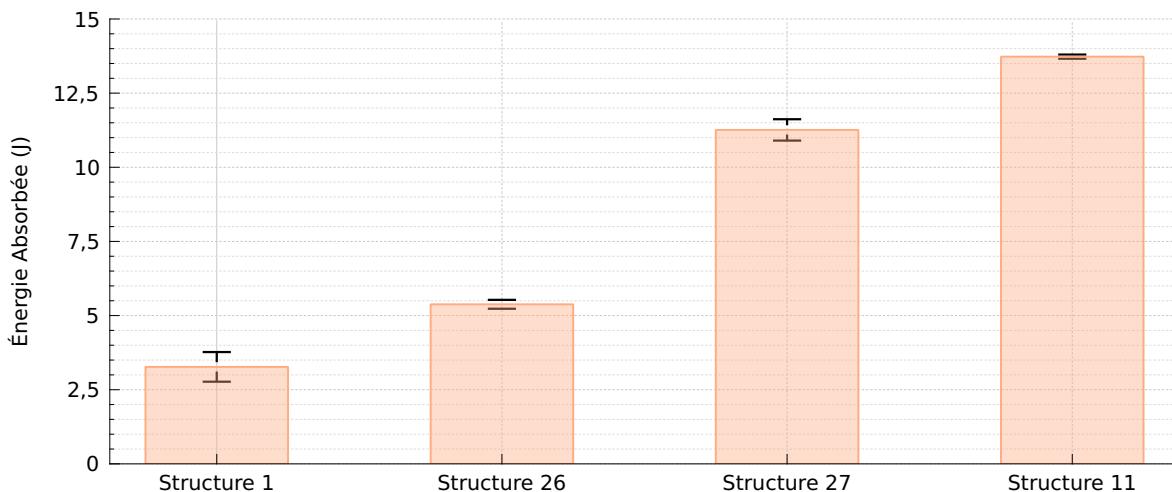
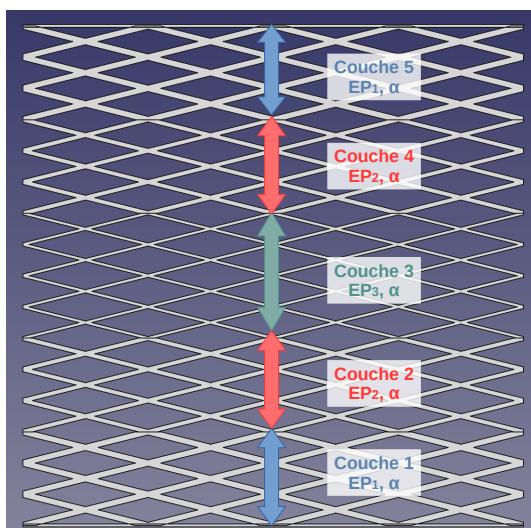


Fig. 43: Comparaison de l'évolution de l'absorption d'énergie des structures conçues durant le projet



La structure que nous avons conçue qui absorbe le plus d'énergie est une structure symétrique à gradient uniquement d'épaisseur. Cette structure comprend trois couches en symétries avec des épaisseurs respectives de 0.5mm , 0.375mm et 0.25mm .

Fig. 44: Paramètres de la Structure N°11 : Le meilleur résultat d'absorption d'énergie obtenu

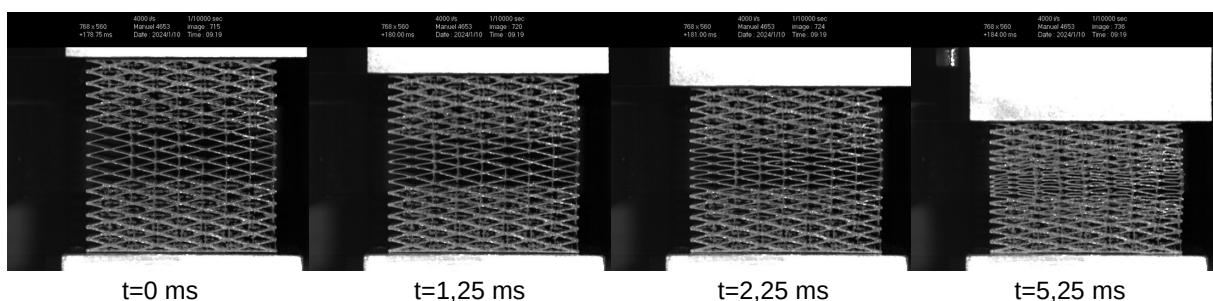


Fig. 45: Clichés de la déformation de la Structure N°11 : Le meilleur résultat d'absorption d'énergie obtenu

On peut donc remarquer que cette structure absorbe toute l'énergie de l'impact soit 13.7J . Cette structure est d'autant plus remarquable qu'elle revient quasiment à sa position initiale à la fin de l'essai. Ce qui rend cette structure très intéressante d'un point de vue de l'absorption d'énergie, c'est le fait que l'impact se fait quasiment sans rupture.

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.

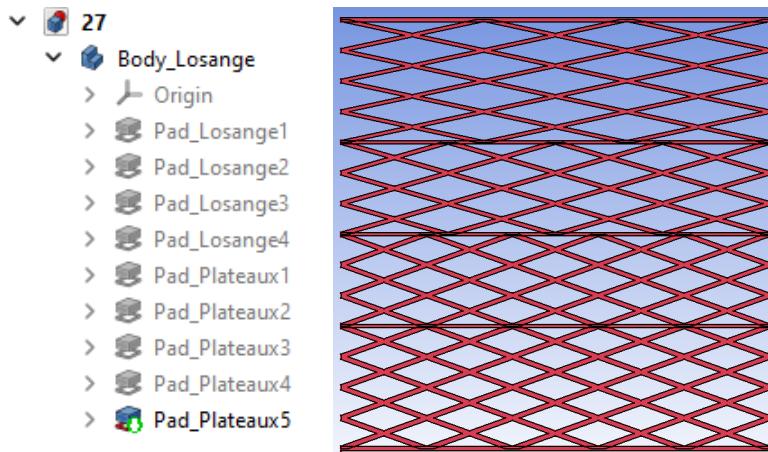


Fig. 46: Arborescence du fichier *FreeCAD* pour la structure 27 et importation du fichier STEP sur *LsDyna*
(Présence de jointures entre les couches de gradients et les plateaux)

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.

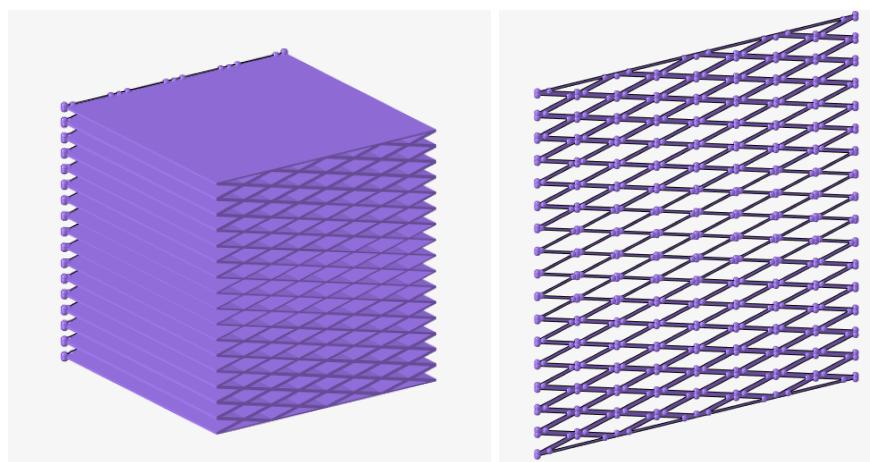


Fig. 47: Importation du fichier STEP sur *HyperWorks* et suppression des facettes qui ne sont pas sur le plan xOy

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.

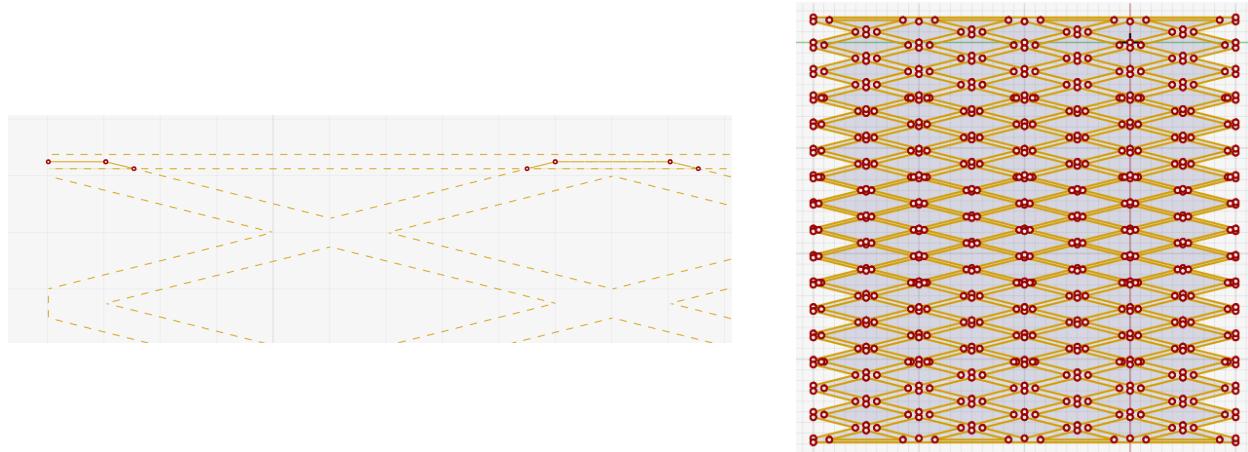


Fig. 48: Projection de la structure sur une esquisse et création d'une surface fusionnée, suppression des lignes de construction (lignes sélectionnées) et conversion des lignes de construction en traits pleins.

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).

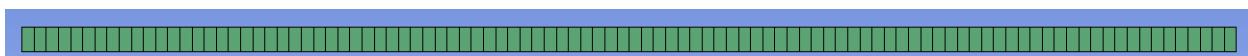


Fig. 49: Impacteur modélisé par une shell de 1mm d’épaisseur suivant \bar{z} et maillée par des éléments quadrilatères (100x1 subdivisions) avec l’hypothèse de déformations planes

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 18: 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 19: 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 20: 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 :

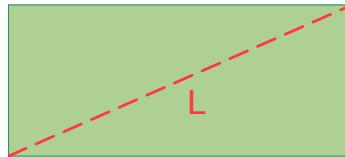
La façon la plus simple de récupérer les informations de force sous la structure serait d'effectuer un contact entre un élément shell sous la structure et la structure elle-même. Cependant, ceci engendre un coût de calcul supplémentaire que nous pouvons éviter avec l'option *RIGIDWALL_PLANAR de *LsDyna*. 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 :

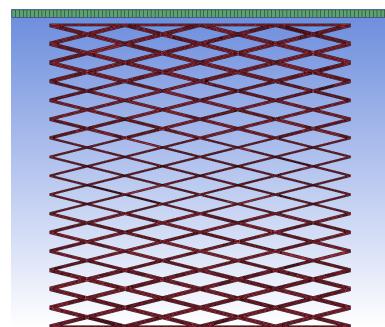
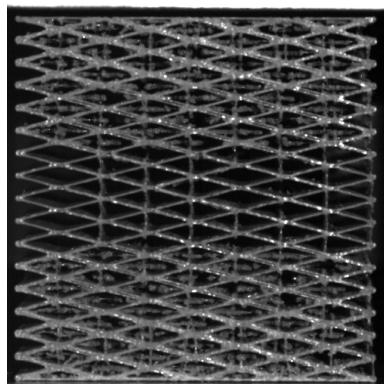
$$\Delta t = \text{fact}_{\Delta t} \frac{L}{c} = \text{fact}_{\Delta t} L \sqrt{\frac{\rho(1 - \nu^2)}{E}} = \text{fact}_{\Delta t} L \sqrt{\frac{m(1 - \nu^2)}{EV}}$$

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.

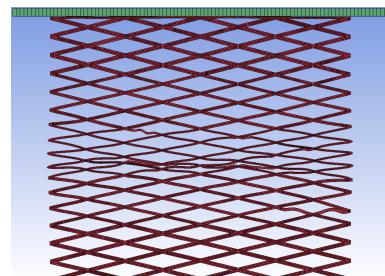
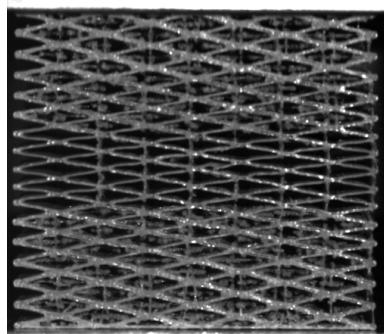
Dans notre cas, nous avons utilisé l'option de "mass scaling" à hauteur de 1.9484% c'est à dire une masse ajoutée de 1.6481g pour une masse totale de 84.589g. Nous avons vérifié que l'option de "mass scaling" n'engendre pas une augmentation de l'énergie cinétique de l'impacteur.

8.3 Écart avec les expériences

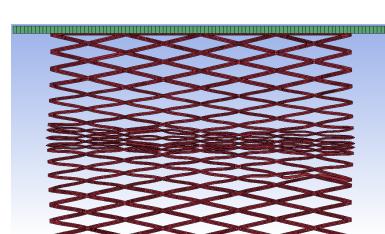
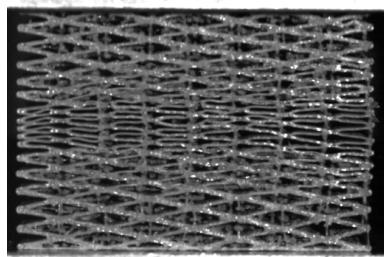
Instant 0



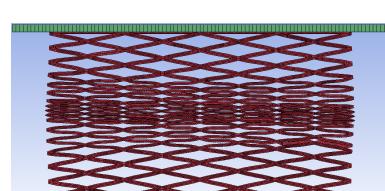
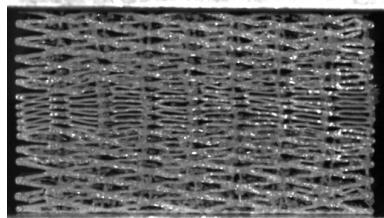
Instant 1



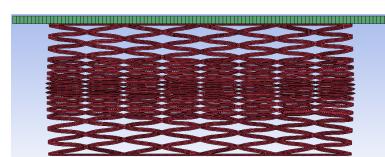
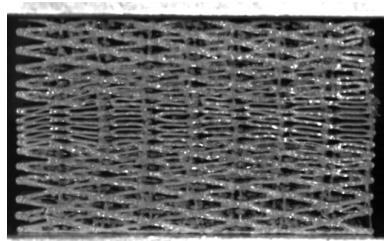
Instant 2



Instant 3



Instant 4



Instant 5

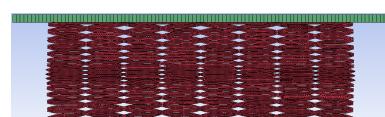
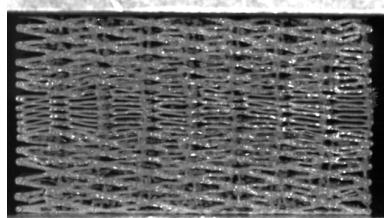


Fig. 50: Comparaison des résultats Expérimentaux - Éléments Finis à divers instants de déformation de la structure (Structure 11).

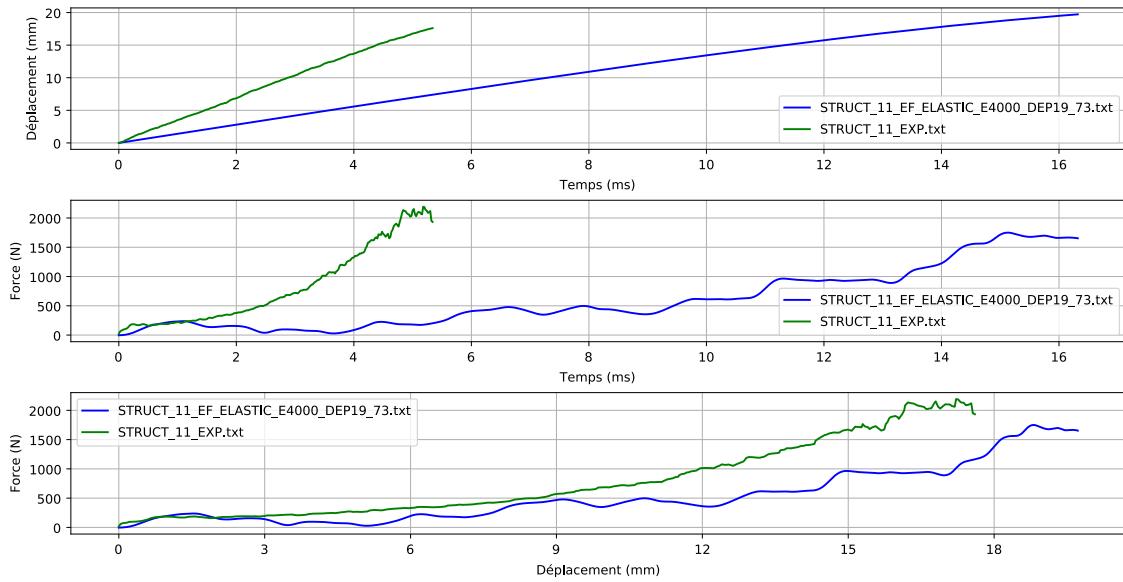


Fig. 51: Comparaison des résultats Expérimentaux et du modèle Éléments Finis pour un déplacement maximal de l'impacteur de 19,73 mm

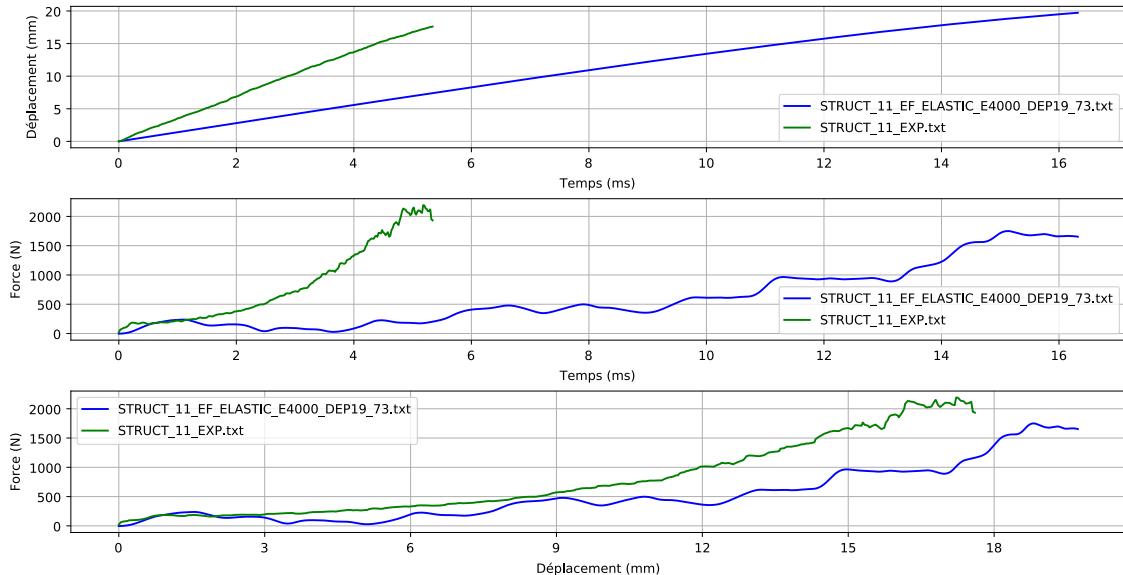


Fig. 52: Comparaison des résultats Expérimentaux et du modèle Éléments Finis sans condition d'arrêt de l'impacteur (course libre)

Comme nous le remarquons ci-dessus (50), 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. Nous avons calibré les tampons d'arrêt pour que l'impacteur ne puisse pas déformer la structure de plus de 19.73mm . Or, lors de nos essais, nous avons remarqué par moments les tampons étaient légèrement desserrés, principalement dû aux vibrations du puits de chute. Il nous a fallu les resserrer et les vérifier à plusieurs reprises. Ainsi, il est possible que certaines valeurs d'absorption soient légèrement erronées à cause de ce phénomène (variation de la distance de déformation maximale de la structure). Pour les structures qui se déforment avec rupture, ce problème n'a pas d'influence sur le résultat de l'énergie absorbée puisque nous calculons l'absorption d'énergie avant la rupture de la structure.

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 une dispersion d'environ $\pm 3\%$. Nous avons trouvé plusieurs justifications à cela.

Dans un premier temps, l'impression 3D FDM imprime difficilement des parois d'une épaisseur inférieure au diamètre de la buse. Or, durant tout ce projet, nous travaillons avec des épaisseurs de parois allant de 0.15mm à 0.5mm avec une buse de diamètre 0.2mm . Les épaisseurs des parois ne sont donc pas très précises et c'est en partie pour cela que les gradients d'épaisseurs ont un moins grand impact que les gradients de géométrie sur l'absorption d'énergie (voir partie 7.4.1 et 7.4.2).

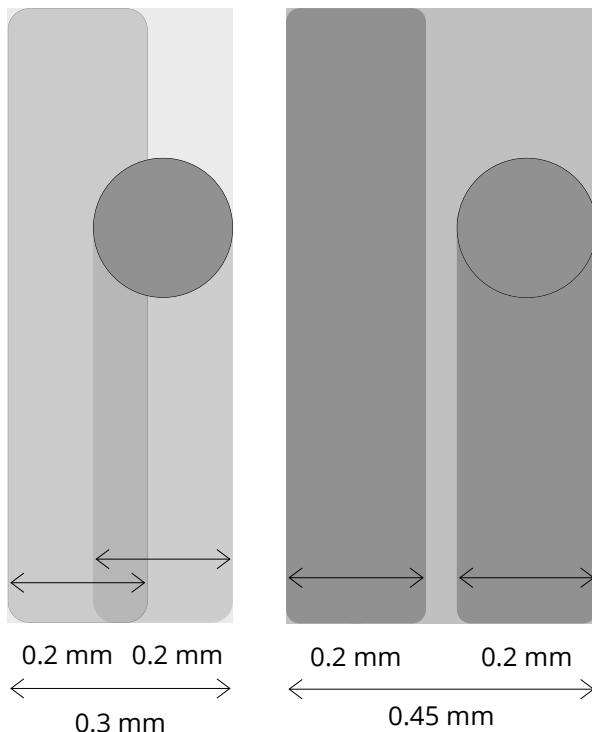


Fig. 53: Illustration des manques ou excès de matière avec la technologie FDM lors de l'impression de parois plus fines que le diamètre de la buse

De plus, la buse de l'imprimante 3D FDM étant circulaire, il n'est pas possible d'imprimer précisément dans les coins de la structure comme illustré ci-dessous.



Fig. 54: Illustration des manques de matière dans les coins avec la technologie d'impression FDM

Ces deux faiblesses liées à la technologie d'impression introduisent des approximations dimensionnelles de nos structures et également des approximations sur la quantité de matière de celles-ci.

Essayer une nouvelle technologie d'impression (La technologie SLA¹⁰ par exemple) nous permettrait d'avoir une meilleure précision pour l'impression des structures mais serait bien plus coûteuse (à cause du coût de la résine) et beaucoup plus lente (la polymérisation de la résine est un processus lent).

Voici un récapitulatif de toutes les masses mesurées lors des essais :

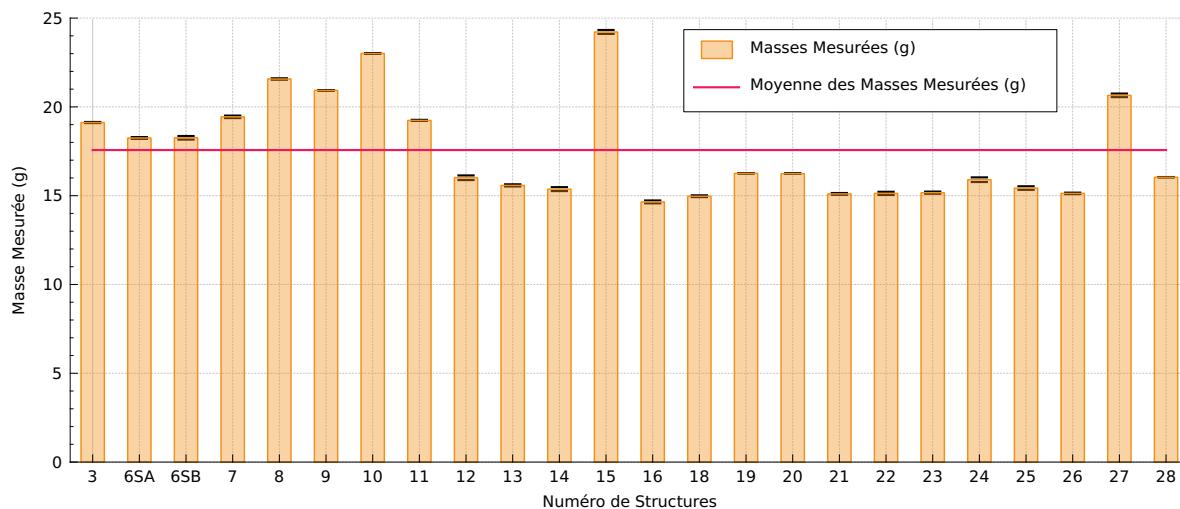


Fig. 55: Récapitulatif de toutes les masses mesurées lors de ce projet

Note : Les structures N°11 et 28 sont censées faire 24g tandis que toutes les autres sont censées faire 18g.

¹⁰SLA = StereoLithogrAphy

10 Conclusion

Tout au long de ce projet, nous avons eu le privilège d'évoluer dans un environnement de travail très stimulant, soutenus par nos tuteurs. Ce projet a été une véritable opportunité pour nous d'expérimenter un premier projet de recherche. Nous avons pu mettre en lumière les diverses capacités d'absorption des structures en treillis que nous avons développées. En explorant les domaines de la CAO, de la programmation en *Python*, de la gestion de projet de l'impression 3D et de l'expérimentation, 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'un atelier 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 par un autre groupe. 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.

Voici un récapitulatif de toutes les structures testées lors de ce projet :

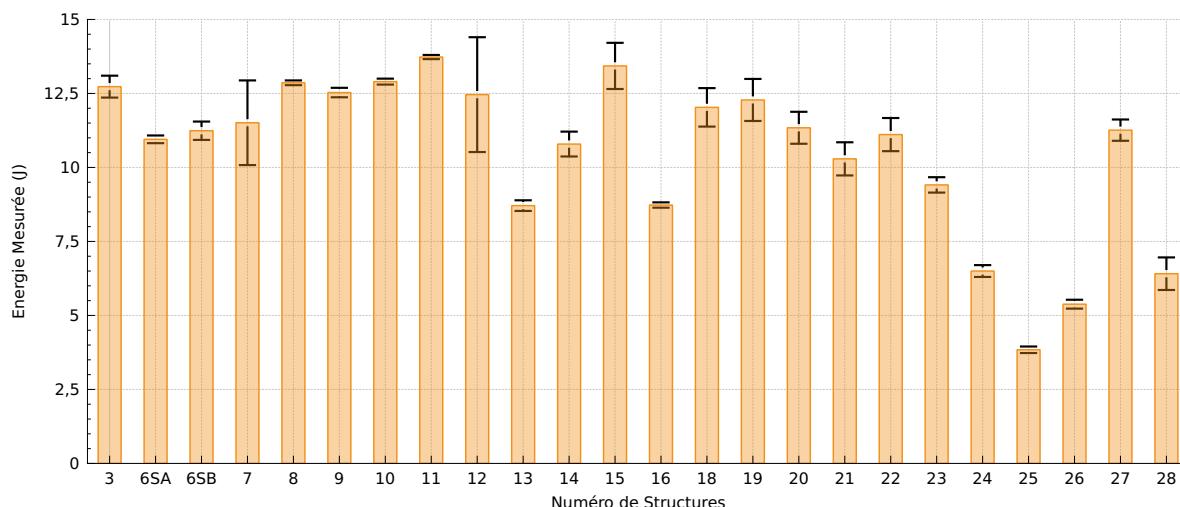


Fig. 56: Récapitulatif de toutes les structures testées lors de ce projet

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, etc...) 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.

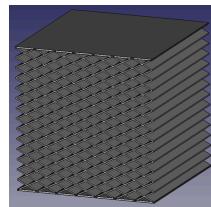
Enfin, réfléchir à un plan de production d'échantillons dès le début du projet prenant en compte les paramètres à faire varier aurait permis d'optimiser le nombre d'échantillons à produire. Nous manquions d'un fil conducteur au début du projet, et faisions varier les paramètres de nos structures de manière désordonnée.

12 Annexes

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

Table des Matières

1. Notice d'Installation.....	2
a. Dépendances.....	2
b. Installation.....	2
Installation via le gestionnaire des extensions de FreeCAD.....	2
2. Notice d'Utilisation.....	6
a. Interface Graphique.....	6
b. Paramètres du Fichier de Configuration.....	8
i. Syntaxe.....	8
ii. Variables.....	8
1. Partie Optimisation de la Masse.....	8
2. Partie Méthode de Génération.....	9
3. Partie Plateaux Liants les Extrémités de la Structure.....	9
4. Partie Géométrie Commune.....	10
5. Partie Géométrie pour chaque Structures.....	11
6. Partie Exportation du Modèle 3D.....	14
7. Partie Débogage.....	14
3. Architecture de l'Atelier.....	15
4. Développement de Nouvelles Structures.....	16



Notice d'Utilisation

Lattybrides

Génération de Structures Lattices Hybrides à Gradients de Réseau

Version 2.2

Ce logiciel a été développé dans le cadre d'un projet de fin d'étude (PLP23INT16) à l'INSA

Hauts-de-France. (Promo 2023).

Ce logiciel a été développé dans le but de filtrer et d'afficher des données de crash.

Développeurs : HERMAN Adrien (Noyau et Structure Losange), BACOUT Valentin (Structure Cosinus, Hexagones + Triangles 2D [Alignés ou Non] et Triangles 2D), BENHILAL Salma (Carré + Arcs)

Documentation écrite par : HERMAN Adrien.

1. Notice d'Installation

a. Dépendances

Les modules python nécessaires au bon fonctionnement du code de génération des structures sont les suivants :

```
- time
- datetime
- matplotlib
- PySide
```

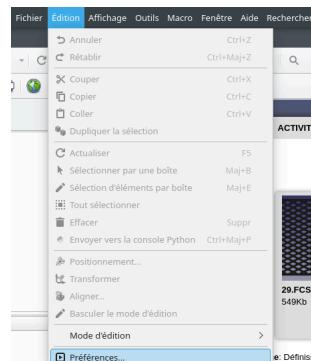
ATTENTION : L'atelier n'a été testé qu'à partir de la version 0.19 et jusqu'à la version 0.21.2, d'autres versions de FreeCAD sont susceptibles de faire dysfonctionner l'atelier !

b. Installation

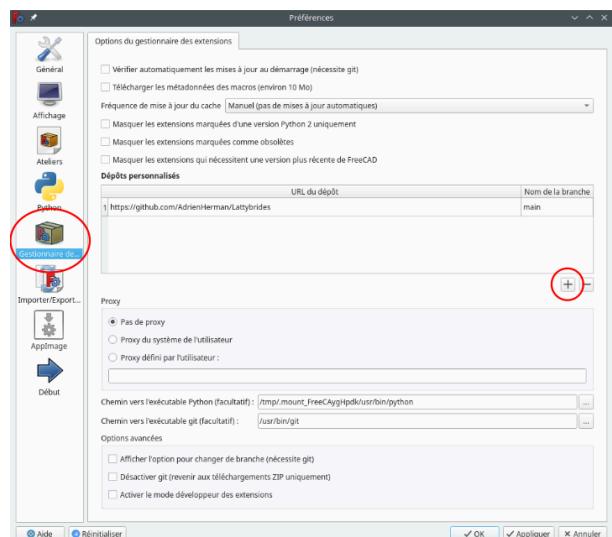
L'installation de l'atelier peut se faire manuellement en copiant le code python dans le dossier Mod de FreeCAD (voir ici : [Installation Manuelle](#)) ou en utilisant le gestionnaire des extensions (voir ici : [Installation via FreeCAD](#)).

Installation via le gestionnaire des extensions de FreeCAD

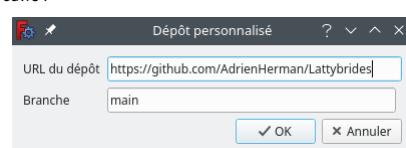
L'atelier n'étant pas répertorié dans les dépôts de FreeCAD, il vous faudra l'ajouter manuellement. Pour ce faire, ouvrez la fenêtre de "Préférences" de FreeCAD (Menu Édition -> Préférences) :



Ouvrez ensuite l'onglet "Gestionnaire des extensions" et cliquez sur le bouton "+" :



Une fenêtre s'ouvre :

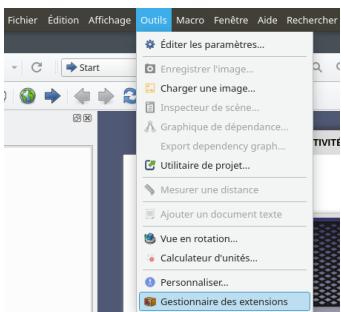


Il vous suffit ensuite de copier-coller les informations suivantes :

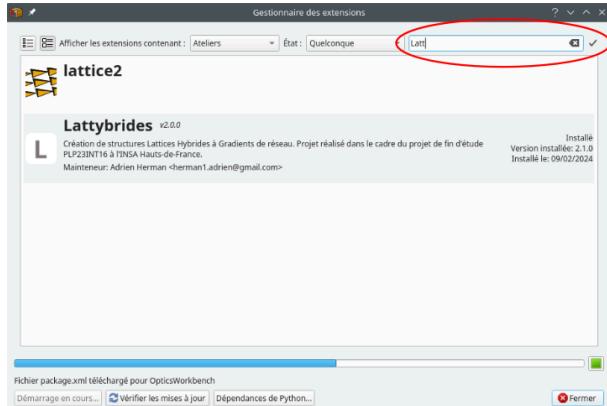
```
URL du dépôt : https://github.com/AdrienHerman/Lattybrides
Branche : main
```

Cliquez sur "OK" et une nouvelle fois sur "OK" dans la fenêtre des préférences de FreeCAD.

Allez ensuite dans le menu "Outils" et cliquez sur "Gestionnaire des extensions" :

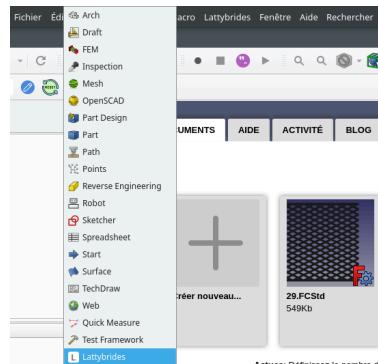


Une fenêtre s'ouvre. Recherchez "Lattybrides", l'atelier s'affiche dans la liste. Il ne vous reste plus qu'à le sélectionner et à cliquer sur le bouton "Installer" :



Les mises à jour s'effectueront également via cette fenêtre. Vous pouvez maintenant fermer cette fenêtre. FreeCAD vous demandera de redémarrer l'application afin de recharger tous les ateliers fraîchement installés.

Une fois redémarré, vous pouvez accéder à l'atelier de cette façon :



L Lattybrides

p.4/25

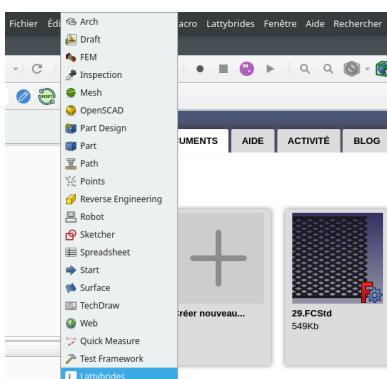
L Lattybrides

p.5/25

2. Notice d'Utilisation

a. Interface Graphique

Après avoir démarré FreeCAD, l'atelier est censé être chargé en mémoire. Pour afficher l'atelier, il vous suffit de le sélectionner dans la liste des ateliers :



Une fois l'atelier chargé, les icônes suivantes sont affichées :



Dans ce qui suit, l'icône de gauche est l'icône numéro 1 et l'icône de droite est l'icône numéro 5.

- L'icône numéro 1 sert à lancer le calcul de la structure. Le calcul peut être long (surtout si l'optimisation de la masse est engagée) et ne peut pas être arrêté à moins de fermer le programme via le gestionnaire des tâches. Attention, le calcul ne prendra en compte les options du fichier config.py présent dans les fichiers d'installation de l'atelier. Si vous ne sauvegardez pas les modifications effectuées dans ce fichier, la configuration ne sera pas appliquée. À la fin du calcul, si l'exportation du fichier 3D STL est activée, une fenêtre de sauvegarde s'ouvrira afin d'enregistrer la structure à l'endroit souhaité par l'utilisateur. Même chose pour la sauvegarde du fichier FreeCAD. Une fois les fichiers sauvegardés, si l'optimisation de la masse est activée, un graphique s'affiche montrant la masse pour chaque itération du calcul.
- L'icône numéro 2 sert à ouvrir le fichier de configuration config.py dans l'éditeur de texte de FreeCAD. Vous pouvez sauvegarder les changements effectués à ce fichier de configuration avec les raccourcis Ctrl+S ou via la disquette ou le menu Fichier -> Enregistrer de FreeCAD.
- L'icône numéro 3 permet de rétablir la configuration par défaut du fichier de configuration. Cette fonctionnalité permet de revenir totalement en arrière au cas où une variable serait mal orthographiée ou manquante par exemple.
- L'icône numéro 4 permet d'ouvrir un fichier de configuration sauvegardé à un endroit extérieur aux fichiers du logiciel.
- L'icône numéro 5 permet d'effectuer une copie du fichier de configuration config.py à un endroit souhaité par l'utilisateur.
- L'icône numéro 6 permet d'afficher l'aide de l'atelier.

Les icônes 4 et 5 peuvent se révéler très utiles pour sauvegarder les fichiers de configuration pour chaque structure. Ceci permet de les générer une nouvelle fois même si le modèle 3D de la structure a été perdu ou corrompu.

Le détail des variables du fichier de configuration est explicité dans la partie suivante.

L Lattybrides

p.6/25

L Lattybrides

p.7/25

b. Paramètres du Fichier de Configuration

i. Syntaxe

Dans ce fichier les commentaires sont représentés par les caractères "#:". Pour les commentaires, la ligne ne sera pas traitée par le script de lecture des paramètres. La ligne doit obligatoirement commencer par "#:" sans espaces ou tabulations avant.

Les lignes vides ne sont pas acceptées dans le fichier de configuration. Chaque ligne doit être soit un commentaire soit sous le format "nom_variable:valeur:". Chaque ligne qui n'est pas un commentaire doit obligatoirement terminer par ":".

ii. Variables

1. Partie Optimisation de la Masse

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
optimisation_masse	Activer ou désactiver l'optimisation de la masse.	True / False
objectif_masse	Objectif de masse à trouver par l'algorithme d'optimisation de la masse (g).	Float
tolerance	Tolérance sur l'objectif de la masse (+- x g).	Float
nb_pas_max	Nombre de pas de calcul maximum avant l'arrêt de l'algorithme d'optimisation de la masse même si le critère d'objectif n'est pas atteint.	Integer
correction_ep_par_pas	Valeur à niter=0 de correction de l'épaisseur des parois à chaque pas (mm).	Float
pourcentage_modification_correction_augmentation	Pourcentage de modification de correction_ep_par_pas par pas de calcul (augmentation).	Float
pourcentage_modification_correction_diminution	Pourcentage de modification de correction_ep_par_pas par pas de calcul (diminution).	Float
seuil_augmentation_correction	Seuil à partir duquel correction_ep_par_pas est modifié. Critère : abs(masse[pas] - masse[pas - 1]) <= seuil_augmentation_correction	Float
rho	Masse volumique du matériau utilisé pour la structure.	Float

2. Partie Méthode de Génération

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
gen_losange_basic	Activer / Désactiver la génération de la structure Losange sans gradients.	True / False
gen_losange_grad	Activer / Désactiver la génération de la structure Losange avec gradients.	True / False
gen_hex_tril_2D_aligne_basic	Activer / Désactiver la génération de la structure Hexagones + Triangles 2D Alignés sans gradients.	True / False
gen_hex_tril_2D_aligne_grad	Activer / Désactiver la génération de la structure Hexagones + Triangles 2D Alignés avec gradients.	True / False
gen_hex_tril_2D_naligne_basic	Activer / Désactiver la génération de la structure Hexagones + Triangles 2D Non Alignés sans gradients.	True / False
gen_hex_tril_2D_naligne_grad	Activer / Désactiver la génération de la structure Hexagones + Triangles 2D Non Alignés avec gradients.	True / False
gen_tri_2D_basic	Activer / Désactiver la génération de la structure Triangles sans gradients.	True / False
gen_tri_2D_grad	Activer / Désactiver la génération de la structure Triangles avec gradients.	True / False
gen_cos_2D_basic	Activer / Désactiver la génération de la structure Cosinus sans gradients.	True / False
gen_cos_2D_grad	Activer / Désactiver la génération de la structure Cosinus avec gradients.	True / False

3. Partie Plateaux Liants les Extrémités de la Structure

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
generation_plateaux_ex tremitees	Activer / Désactiver la génération des plateaux liant les extrémités des structures.	True / False
ep_plateau_dessous	Épaisseur du plateau du dessous de la structure.	Float
ep_plateau_dessus	Épaisseur du plateau du dessus de la structure.	Float

4. Partie Géométrie Commune

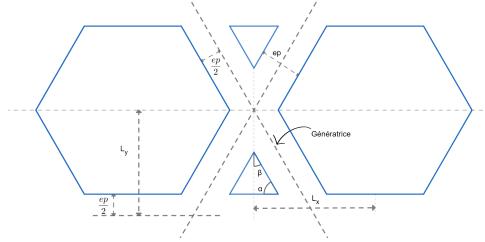
Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
ep	Épaisseur des parois de la structure (mm).	Float
dimlat_ep	Dimension d'extrusion de la structure (mm).	Float
dimlat_x	Dimension de la structure dans la direction x (mm).	Float
dimlat_y	Dimension de la structure dans la direction y (mm).	Float
nb_motif_x_sg	Nombre de motifs élémentaires à répéter suivant l'axe x.	Integer
nb_motif_y_sg	Nombre de motifs élémentaires à répéter suivant l'axe y.	Integer

5. Partie Géométrie pour chaque Structures

Variables communes :

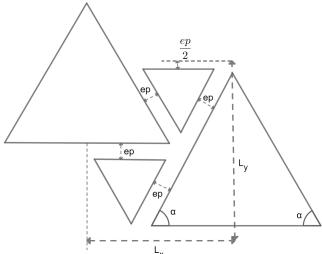
Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
nb_x_par_couche	Nombre de motifs élémentaires à répéter suivant l'axe x par couches. Chaque couche est délimitée par une ",".	List(Integer)
nb_y_par_couche	Nombre de motifs élémentaires à répéter suivant l'axe y par couches. Chaque couche est délimitée par une ",".	List(Integer)
dimlat_par_couche_manuel	Cette option permet de renseigner manuellement la dimension suivant y de chaque couche. Si cette option est activée, la variable dimlat_par_couche doit-être renseignée et remplace la variable dimlat_y. Sinon, dimlat_y est considéré et chaque couche aura une épaisseur au prorata du nombre de motifs.	True / False
dimlat_par_couche	Dimensions suivant y de chaque couche de gradients.	List(Float)
ep_par_couche	Pourcentage de l'épaisseur de chaque couche par rapport à l'épaisseur nominale ep.	Float
ep_plateaux	Épaisseur des plateaux entre chaque couche de gradients (nécessairement positif ou nul) en mm.	Float

Structure Hexagones + Triangles 2D :



Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
alpha_hex_tril_2D	Angle (voir schéma).	Float
alpha_hex_tril_2D_grad	Angle pour chaque couche de gradients (voir schéma).	List (Float)

Structure Triangles 2D :



Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
alpha_tri_2D	Angle (voir schéma).	Float
alpha_hexalpha_tri_2D_grad_tril_2D_grad	Angle pour chaque couche de gradients (voir schéma).	List (Float)

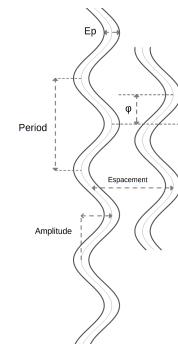
6. Partie Exportation du Modèle 3D

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
extrude	Activer / Désactiver l'extrusion de la structure.	True / False
export	Activer / Désactiver l'exportation du modèle 3D de la structure au format STL. Si <code>export=True</code> alors <code>extrude</code> doit être activé.	True / False
enregistrement_fichier	Activer / Désactiver l'enregistrement du fichier FreeCAD.	True / False
sketch_visible	Activer / Désactiver la visibilité des esquisses à la fin du calcul.	True / False

7. Partie Débogage

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
semi_debug	Activer / Désactiver l'effacement des lignes de construction.	True / False
debug	Activer / Désactiver l'affichage des messages dans le terminal et l'écriture des messages dans le fichier log. Si cette option est activée alors debug_current_folder doit-être renseigné.	True / False
debug_current_folder	Dossier où doit-être stocké le fichier de log.	String

Structure Cosinus 2D :



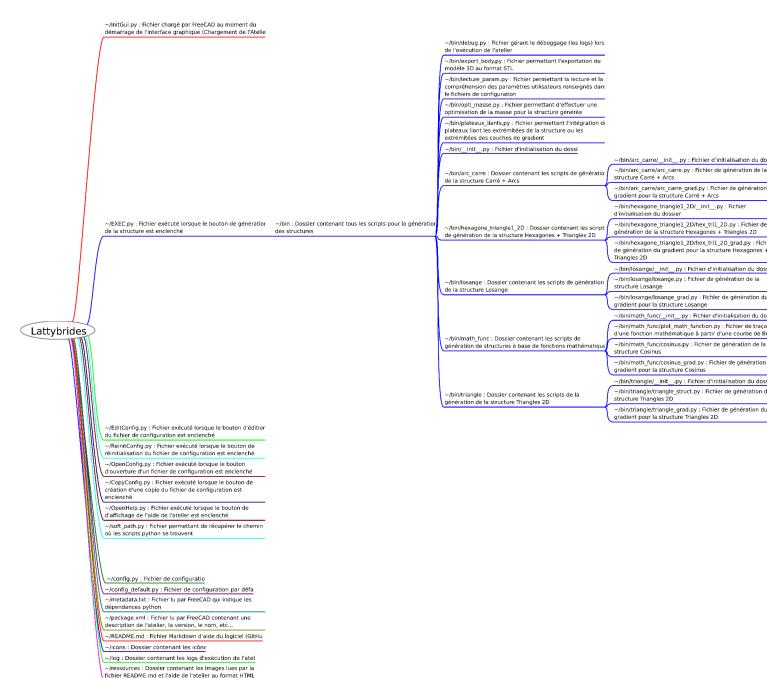
- Sans Gradients :

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
phi	Angle (voir schéma).	Float OU List(Float)
period_fact	Période du cosinus (voir schéma).	Float OU List(Float)
amp	Amplitude du cosinus (voir schéma).	Float OU List(Float)
nbpts_cos	Nombre de points de discréttisation du cosinus sur la longueur dimlat_y.	Integer

- Avec Gradients :

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
phi_grad	Angle (voir schéma).	List(Float) OU List(List(Float))
period_fact_grad	Période du cosinus (voir schéma).	List(Float) OU List(List(Float))
amp_grad	Amplitude du cosinus (voir schéma).	List(Float) OU List(List(Float))
nbpts_cos_grad	Nombre de points de discréttisation du cosinus sur la longueur dimlat y.	List(Integer)

3. Architecture de l'Atelier



4. Développement de Nouvelles Structures

Étape 1: Création d'une structure via une esquisse

Afin de rendre l'ajout de structures à l'atelier plus facile, chaque structure différente doit se trouver dans un script python différent. Pour ce faire, vous devez créer un nouveau dossier dans le dossier `~bin` portant le nom de votre structure. Dans le dossier nouvellement créé, placez trois fichiers portant les noms suivants, `__init__.py`, `nom_structure.py`, `nom_structure_grad.py` (`nom_structure` doit être remplacé par le nom de votre structure et ne doit pas comporter d'accentus ou de caractères spéciaux).

Le fichier `__init__.py` sert à faire lire à python des modules présent dans le dossier et doit donc rester vierge. Dans le fichier `nom_structure.py`, vous devez créer une fonction prenant en argument tous les paramètres de votre structure ainsi que les arguments suivants obligatoires :

Nom de l'Argument	Description
ep	Épaisseur de la paroi
doc	Objet document FreeCAD
file_debug	Objet du fichier de débogage ouvert
nb_motifs_x / nb_motifs_y	Nombre de motifs élémentaires suivant l'axe x / y
dimlat_x / dimlat_y / dimlat_ep	Dimensions du volume occupé par la structure
ep_plateaux = [épaisseur 1, épaisseur 2]	Épaisseur des plateaux liants les extrémités de la structure
semi_debug = True / False	True = Traçage des lignes de construction
debug = True / False	True = Écrire tous les messages de débogage dans le terminal et dans le fichier de log
sketch_visible = True / False	True = Laisser l'esquisse de la structure visible.
extrude = True / False	True = Extruder la structure à partir de l'esquisse
nom_sketch_nom_structure	Nom de l'esquisse de la structure
nom_sketch_plateaux_extremites = [nom1, nom2]	Noms des plateaux liants les extrémités de la structure
nom_body_nom_structure	Nom du body de la structure
nom_pad_nom_structure	Nom du pad de la structure

nom_pad_plateau_extremitees = [nom1, nom2]	Noms des pad des plateaux liants les extrémités de la structure
gen_plateaux	Fonction de génération des plateaux
generation_plateaux_extremitees = True / False	True = Générer les plateaux liants les extrémités de la structure
wdebug	Fonction gérant le déboggage
sketch	Objet contenant l'esquisse de la structure

Globalement, le script dans nom_structure.py doit avoir cette trame :

Lattybrides

p. 16/25

Lattybrides

p.17/25

```

lx = dimlat_x / nb_losange_x
ly = dimlat_y / nb_losange_y
if file_debug != None and debug: wdebug("'''sp:{0}\n"
                                         '\n|{1}|\n'
                                         '\n|{2}|'''.format( ep,
                                         lx,
                                         ly,
                                         file_debug))

"""
--- Modélisation 2D ---
"""

# Création d'une nouvelle esquisse et de la pièce
if sketch == "":
    if file_debug != None and debug:
        wdebug("Création de l'esquisse : {0}\n".format(nom_sketch_nom_structure))
file_debug = wdebug("Création du body : {0}\n".format(nom_body_nom_structure)),
file_debug

    sketch = doc.addObject("Sketcher::SketchObject", nom_sketch_nom_structure)
doc.addObject("PartDesign::Body", nom_body_nom_structure)

# Construction du rectangle de délimitation de la structure
# Points de délimitation du quadrilatère dans le sens anti-horaire)
point_delimitation = [
    App.Vector(dimlat_x, 0, 0),
    App.Vector(dimlat_x, dimlat_y, 0),
    App.Vector(0, dimlat_y, 0),
    App.Vector(0, 0, 0)]
# Construction du quadrilatère si le mode semi_debug est activé
if semi_debug:
    for i in range(1, 5):
        sketch.addGeometry(Part.LineSegment(point_delimitation[(i - 1) % 4],
point_delimitation[i % 4]))
    if file_debug != None and debug:
        wdebug("\n\n Construction du rectangle de délimitation de la structure\n{n", file_debug)
structure{n", file_debug}
        wdebug("Construction de la ligne entre ({0}, {1}, {2}) et ({3},\n({4}, {5})\n".format(point_delimitation[(i - 1) % 4].x,
point_delimitation[i % 4].x,
point_delimitation[(i - 1) % 4].y,
point_delimitation[i % 4].x,
point_delimitation[i % 4].y,
point_delimitation[i % 4].z),
file_debug)
wdebug("\n", file_debug)

# Curseur de position (repère local à chaque losange)
current_pos = (0,0,0)

# i = Numéro de losange y (ligne)
# j = Numéro de losange x (colonne)
for j in range(nb_motifs_y * 2):
    for i in range(nb_motifs_x):
        current_pos = (lx * i, (ly / 2) * j, 0)

```

```

# Extrusion de l'esquisse & Génération des plateaux
if extrude:
    # Crée un Pad
    pad_nom_structure =
    doc.getObject((nom_body,nom_structure)).newObject('PartDesign::Pad',
    nom_pad_nom_structure)
    pad_nom_structure.Profile = sketch
    # Mettre l'esquisse dans le pad
    pad_nom_structure.Length = dimlat_ep
    # Définir la longueur d'extrusion
    pad_nom_structure.ReferenceAxis = (sketch, ['N_Axis'])
    # Définir la direction d'extrusion
    doc.recompute()
    # Lancer les calculs
    sketch.Visibility = sketch.Visible

    # Affichage de l'esquisse après l'extrusion
    if file_debug != None and debug:
        wdebug("Extrusion de la structure\n", file_debug)

if generation_plateaux_extremites:
    # Génération des plateaux liants les extrémités
    if file_debug != None and debug:
        wdebug("Création des plateaux liants les extrémités de la
structure.\n", file_debug)

    gen_plateaux(nb_couches=1,
                ep_plateaux=ep_plateaux,
                dimlat_x=dimlat_x,
                dimlat_y=dimlat_y,
                dimlat_z=dimlat_z,
                sketch.Visible=sketch.Visible,
                nom_body=nom_body,nom_structure,
                doc=doc,
                nom_sketch=plateaux.nom_sketch,
                nom_plateaux=plateaux.nom_plateaux,
                debug=debug,
                file_debug=file.debug,
                wdebug=wdebug)

```

Lattybrides

p. 18/25

Lattybrides

p.19/25

Étape 2 : Création de la fonction gradient

Dans le fichier `nom_structure_grad.py` vous devez créer une fonction qui vient appeler la fonction de génération de la structure une fois par couche de gradient.

Globalement, le script dans `nom_structure_grad.py` doit avoir cette trame :

```
def nom_structure_grad(ep=0.4,
                      doc=None,
                      file_debug=None,
                      nb_couches=3,
                      nb_motifs_x_nb_couches=[2,3,2],
                      dimlat_par_couche=[40/7*2,40/7*3,40/7*2],
                      ep_par_couche=[1,0.5,0.5,1],
                      nom_sketch_par_couche="Sketch_Nom_Structure1",
                      nom_pad_par_couche=["Pad_Nom_Structure1","Pad_Nom_Structure2","Pad_Nom_Structure3"],
                      dimlat_x_nb_couches=[10,10,10],
                      nb_motifs_x_nb_couches=[7,4,7],
                      nom_sketch_plateaux=["Sketch_Plateaux1","Sketch_Plateaux2","Sketch_Plateaux3","Sketch_Plateaux4"],
                      nom_pad_plateaux=["Pad_Plateaux1","Pad_Plateaux2","Pad_Plateaux3","Pad_Plateaux4"],
                      nom_body_nom_structure="Body_Nom_Structure",
                      ep_plateaux=[1,0.5,0.5,1],
                      gen_plateaux=None,
                      gen_structures=None,
                      sketch_visible=False,
                      extrude=True,
                      semi_debug=False,
                      debug=False,
                      wdebug=None):

    # Importation des modules externes
    import FreeCAD as App
    import Part, Sketcher

    if doc == None: FreeCAD.newDocument() # Créeation du document
    posy = 0 # Position y de l'origine des esquisses à créer
    sketches = [] # Liste contenant toutes les esquisses

    if file_debug != None and debug:
        wdebug("Création du body : {} \n".format(nom_body_nom_structure), file_debug)

    body = doc.addObject("PartDesign::Body", nom_body_nom_structure) # Crée un body

    for no_couche in range(nb_couches):
        # Créeation de l'esquisse de la couche
        if file_debug != None and debug:
            wdebug("Création de l'esquisse pour la couche {1}: \n{0}\n".format(nom_sketch_par_couche[no_couche], no_couche), file_debug)

        sketches.append(doc.addObject("Sketcher::SketchObject",
                                      nom_sketch_par_couche[no_couche]))
        sketches[no_couche].Placement = App.Placement(App.Vector(0, posy, 0),
                                                    App.Rotation(0, 0, 0, 1))

        if file_debug != None and debug:
            wdebug("Génération de la structure pour la couche {0}: \n{1}\n".format(no_couche, posy = posy, file_debug))

    if file_debug != None and debug:
        wdebug("Génération de la structure pour la couche {0}: \n{1}\n".format(no_couche, posy = posy, file_debug))
```

```
# Génération de la structure sur le couche no_couche
gen_structure(ep=ep * ep_par_couche[no_couche],
              doc=doc,
              file_debug=file_debug,
              nb_motifs_x_nb_couches=[no_couche],
              nb_nb_couches=nb_couches,
              motifs_par_couche=dimlat_par_couche[no_couche],
              dimlat_x=dimlat_x,
              dimlat_y=dimlat_y,
              dimlat_x_dimlat_y=dimlat_x,
              ep_plateaux=[0, 0],
              semi_debug=semi_debug,
              debug=debug,
              sketch_visible=False,
              extrude=extrude,
              sketch_nb_couches=sketch_nb_couches,
              nom_sketch_nb_couche=nom_sketch_nb_couche[no_couche],
              nom_sketch_plateaux_extremites=nom_sketch_plateaux[no_couche],
              nom_body_nb_structre=nom_body_nb_structre,
              nom_nb_structre=nom_nb_structre,
              nom_nb_couches=nom_nb_couches,
              gen_plateaux=None,
              generation_plateaux_extremites=False,
              wdebug=wdebug,
              sketch_nb_sketches[no_couche])

# Incrémentation de la position y dans le repère
posy += dimlat_par_couche[no_couche]

# Extrusion des l'esquisses & Génération des plateaux
if extrude:
    # Extrusion de chaque couches
    for no_couche in range(nb_couches):
        body.newObject('PartDesign::Pad', nom_pad_par_couche[no_couche]) # Crée un Pad
        doc.getObject(nom_pad_par_couche[no_couche]).Profile = sketches[no_couche] # Mettre l'esquisse dans le pad
        doc.getObject(nom_pad_par_couche[no_couche]).Length = dimlat_ep # Définir la longueur
    d'extrusion
        doc.getObject(nom_pad_par_couche[no_couche]).ReferenceAxis = (sketches[no_couche], "N_Axis") # Définir la direction d'extrusion
        doc.recompute()

    # Lancer les calculs
    sketches[no_couche].Visibility = sketch_visible # Affichage de l'esquisse après l'extrusion
    if file_debug != None and debug:
        wdebug("Extrusion de la structure : Couche no {0} \n".format(no_couche), file_debug)

    # Génération des plateaux liants les couches de la structure
    if file_debug != None and debug:
        wdebug("Création des plateaux liants les couches de la structure.\n", file_debug)
        gen_plateaux(nb_couches=nb_couches,
                    ep_plateaux=ep_plateaux,
                    dimlat_x=dimlat_x,
                    dimlat_y=dimlat_y,
                    motifs_par_couche=dimlat_par_couche,
                    dimlat_x_dimlat_y=dimlat_x_dimlat_y,
                    sketch_visible=sketch_visible,
                    nom_body_nb_structre,
                    doc=doc,
                    nom_sketch_plateaux=nom_sketch_plateaux,
                    nom_nb_couches=nom_nb_couches,
                    debug=debug,
                    file_debug=file_debug,
                    wdebug=wdebug)
```

Note : Il est possible que pour certaines structures (comme la structure Cosinus) ce script ne soit pas valable. Il doit donc être développé au cas pas cas.

L Lattybrides

p.20/25

L Lattybrides

p.21/25

Étape 3 : Ajout des paramètres dans le fichier de configuration.

Au minimum deux paramètres sont obligatoires dans le fichier de configuration. Ce sont les paramètres qui permettent à l'atelier de savoir quelle fonction de génération est utilisée.

Ces paramètres doivent être renseignés de la façon suivante :

```
gen_nom_structure_basic=False
gen_nom_structure_grad=False
```

Lorsque la valeur est à True, la fonction de génération est paramétrée comme active et sera utilisée pour le calcul de la structure. Une fois ces deux variables ajoutées, il va falloir modifier le fichier `~/bin/lecture_params.py` pour qu'il liste ces paramètres.

- 1) Ligne 30 :Modifier le nombre d'éléments de la liste `return_nok`. Il faut ajouter autant de nombre d'éléments que de variables ajoutées au fichier de configuration c'est à dire minimum 2.

```
return_nok = [False for i in range(53)]
```

- 2) Il faut ensuite ajouter les variables avec une valeur None dans le code python.
Exemple :

```
# -
gen_cos_2D_basic = None
gen_cos_2D_grad = None
gen_nom_structure_basic = None
gen_nom_structure_grad = None
nom_structure_param1 = None
# Etc...
```

- 3) Il faut également ajouter +2 au nombre d'éléments de la liste `gen_func` au début du fichier.

```
gen_func = [None for i in range(10)]
```

- 4) Ajout de la lecture du paramètre `gen_nom_structure_basic/grad` dans la boucle de traitement des données.

```
elif lignes[i][0] == "gen_nom_structure_basic":
    if lignes[i][1] == "False":
        gen_nom_structure_basic = False
    elif lignes[i][1] == "True":
        gen_nom_structure_basic = True
    gen_func[10] = True
else:
    if debug:
        log += "lecture_param\nCommande inconnue pour gen_nom_structure_basic\n"
```

5) Ajout de la lecture des paramètres de la structure dans la boucle de traitement des données.

```
# Exemple pour un paramètre booléen
elif lignes[i][0] == "nom_structure_param1":
    if lignes[i][1] == "False": nom_structure_param1 = False
    elif lignes[i][1] == "True": nom_structure_param1 = True
else:
    if debug:
        log += "lecture_param\nCommande inconnue pour nom_structure_param1\n"

# Exemple pour un paramètre à virgule flottante
elif lignes[i][0] == "nom_structure_param2":
    try:
        nom_structure_param2 = float(lignes[i][1])
    except:
        if debug:
            log += """ lecture_param\nLe type de données entrée dans nom_structure_param2 n'est pas correct ! \n nom_structure_param2={0}\n""".format(lignes[i][1])

# Exemple pour un paramètre entier
elif lignes[i][0] == "nom_structure_param3":
    try:
        nom_structure_param3 = int(lignes[i][1])
    except:
        if debug:
            log += """ lecture_param\nLe type de données entrée dans nom_structure_param3 n'est pas correct ! \n nom_structure_param3={0}\n""".format(lignes[i][1])

# Exemple pour un paramètre sous forme d'une liste avec la , comme séparateur
elif lignes[i][0] == "nom_structure_param4":
    try:
        nom_structure_param4 = [(int(lignes[i][1].split(',')[j])) for j in range(len(lignes[i][1].split(',')))]
    except:
        if debug:
            log += """ lecture_param\nLe type de données entrée dans nom_structure_param4 n'est pas correct ! \n nom_structure_param4={0}\n""".format(lignes[i][1])
```

Note : D'autres types de données ou des listes à doubles entrées (voir plus) sont possibles. Inspirez-vous de ce format de récupération de données.

- 6) Ajouter les paramètres dans la liste `return_ok`.

```
return_ok = [
    True,
    gen_nom_structure_basic,
    gen_nom_structure_grad,
    nom_structure_param1,
    ...
    debug_current_folder]
```

L Lattybrides

p.22/25

L Lattybrides

p.23/25

7) Ajout de la vérification de remplissage des paramètres par l'utilisateur.

```

if gen_nom_structure_basic:
    if nom_structure_param == None:
        if debug:
            log += "lecture_param\nnom_structure_param n'est pas
définie !\n"
        return_nok.append(log)
        return return_nok
    # Etc ...
if gen_nom_structure_grad:
    if nom_structure_param == None:
        if debug:
            log += "lecture_param\nnom_structure_param n'est pas
définie !\n"
        return_nok.append(log)
        return return_nok
    # Etc ...

```

8) Ajout des variables réceptrices dans ~/EXEC.py.

```

# Lecture des paramètres du programme
lecture_param_ok,
...
gen_nom_structure_basic,
gen_nom_structure_grad,
nom_structure_param,
...
log] = lecture_param(softpath + "/config.py")

```

Étape 4 : Ajout de l'exécution des fonctions de génération dans le fichier ~/EXEC.py.

Dans la partie génération des structures sans gradients :

```

elif gen_nom_structure_basic:
    nom_body = "Body_Nom_Structure"
    if optimisation_masse:
        masse, pas_final, ep_finale, porosite = opti_masse(
            doc,
            nom_body,
            "Pad_Losange",
            ["Pad_Plateau_Dessous", "Pad_Plateau_Dessus"],
            "Sketch_Losange",
            ["Sketch_Plateau_Dessous", "Sketch_Plateau_Dessus"],
            gen_losange,
            file_debug,
            wdebug,
            debug,
            tolérance,
            nb_pas_max,
            [0 for i in range(nb_pas_max + 1)],
            ep,
            0,
            correction_ep_par_pas,
            pourcentage_modification_correction,
            seuil_augmentation_correction,
            seuil_diminution_correction,
            objectif_masse,
            rho,
            volume_max,
            PARAMETRES DE LA FONCTION DE GENERATION)
    else:
        gen_losange(PARAMETRES DE LA FONCTION DE GENERATION)

```

Dans la partie génération de structures avec gradients :

```

elif gen_losange_grad or gen_hex_trii_2D_aligne_grad or gen_hex_trii_2D_naligne_grad or
gen_tri_2D_grad or gen_cos_2D_grad or gen_nom_structure_grad:
    # ETC...
    elif gen_nom_structure_grad:
        nom_body = "Body_Nom_Structure"
        if optimisation_masse:
            masse, pas_final, ep_finale, porosite = opti_masse(
                doc,
                nom_body,
                nom_pad_par_couche,
                nom_pad_plateaux,
                nom_sketch_par_couche,
                nom_sketch_plateaux,
                losange_grad,
                file_debug,
                wdebug,
                debug,
                tolérance,
                nb_pas_max,
                [0 for i in range(nb_pas_max + 1)],
                ep,
                0,
                correction_ep_par_pas,
                pourcentage_modification_correction,
                seuil_augmentation_correction,
                seuil_diminution_correction,
                objectif_masse,
                rho,
                volume_max,
                PARAMETRES DE LA FONCTION DE GENERATION)
        else:
            losange_grad(PARAMETRES DE LA FONCTION DE GENERATION)

```

12.2 Annexe 2 : Notice du logiciel de Traitement des Données



Table des Matières

1. Architecture du Logiciel.....	2
2. Notice d'utilisation.....	3
a. Installation.....	3
b. Interface Graphique.....	5
c. Variables.....	7
i. Lecture des Données.....	7
ii. Enregistrement des Données.....	7
iii. Traitement des Données.....	8
iv. Graphiques à Afficher.....	10
d. Stratégies d'utilisation.....	11

Notice d'Utilisation

TDC - Traitement des Données de Crash

Version 2.2

Ce logiciel a été développé dans le cadre d'un projet de fin d'étude (PLP23INT16) à l'INSA Hauts-de-France. (Promo 2023).

Ce logiciel a été développé dans le but de filtrer et d'afficher des données de crash.

Développeur: HERMAN Adrien

Documentation écrite par: BOSSU Romain et HERMAN Adrien.

TDC

p.1/11

1. Architecture du Logiciel

TDC est un logiciel téléchargeable à partir du GitHub suivant : https://github.com/AdrienHerman/TDC-Traitement_des_Donnees_de_Crash/releases/tag/TDC_2.2. Plusieurs options de téléchargement sont disponibles, un installateur pour Windows, une version portable compilée pour Windows et le code source python*on.

Une fois le logiciel installé, vous pouvez retrouver les fichiers sources compilés dans :

Ce PC > Windows (C) > Programmes (x86) > TDC >

Le dossier TDC se compose des fichiers suivant :

📁 _internal	09/02/2024 09:18	Dossier de fichiers
📁 DATA	09/02/2024 09:18	Dossier de fichiers
📁 UI	09/02/2024 09:18	Dossier de fichiers
📄 config_default.conf	01/02/2024 23:44	Fichier CONF
📄 help.pdf	02/02/2024 09:54	Microsoft Edge P...
executable TDC.exe	05/02/2024 14:16	Application
📄 unins000.dat	09/02/2024 09:18	Fichier DAT
executable unins000.exe	09/02/2024 09:17	Application

_internal comporte l'ensemble des librairies python et modules développés pour cette application compilés.

DATA comporte des exemples de courbes .CSV (brutes) et .TXT (traitées)

UI est le dossier contenant l'icône du logiciel

config_default.conf est le fichier de configuration du logiciel par défaut.

help.pdf est ce fichier d'aide. Il y est résumé le fonctionnement du logiciel, son architecture et sa méthode d'utilisation.

TDC.exe est le fichier exécutable pour le lancement.

unins000.exe est le fichier exécutable pour désinstaller le logiciel.

2. Notice d'utilisation

a. Installation

Dans un premier temps, vous devez télécharger le fichier .exe.

[TDC 2.0 beta4 Win64 installer.exe](https://objects.githubusercontent.com)

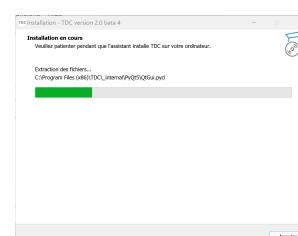
<https://objects.githubusercontent.com>

TDC

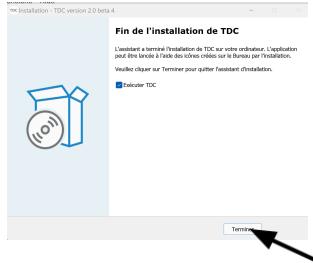
Ensuite, vous pouvez alors lancer l'exécutable. Une fenêtre d'installation s'ouvre.



Suivez maintenant les instructions affichées à l'écran. Puis cliquer sur installer. Le processus d'installation se lance. Il dure moins d'une minute (selon les capacités de votre ordinateur).



Une fois l'installation terminée, vous pouvez cliquer sur terminer et le logiciel se lance.



Lorsqu'il démarre, deux fenêtres s'ouvrent. Une invite de commande où s'afficheront les éventuelles erreurs internes à python et au logiciel, mais à ne pas fermer (sinon le logiciel se ferme également). Puis une interface dont l'utilisation est décrite dans la section suivante.

b. Interface Graphique

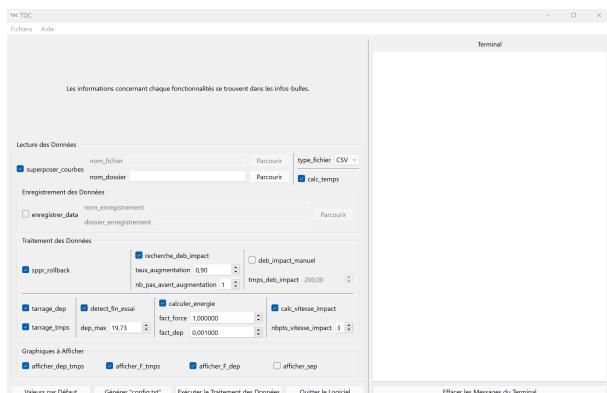
Le logiciel fonctionne avec un fichier de configuration (éditable via l'interface graphique). Ce fichier de configuration décrit, au travers des variables ci-dessous, où le logiciel doit aller chercher les fichiers d'expérience et comment il doit les traiter.

Toutes les instructions concernant les fonctionnalités et variables sont disponibles dans les infos bulle du logiciel.

À l'ouverture de TDC, l'interface graphique s'affiche de la manière suivante :



Fonctions des boutons :



Effacer les Messages du Terminal permet de supprimer tous les messages du terminal.
Valuer par Défaut permet de réinitialiser les valeurs du logiciel par défaut.
Générer config.txt permet de générer un fichier de configuration avec vos propres paramètres et de pouvoir les réutiliser par la suite.
Exécuter le traitement des Données permet de lancer le logiciel et d'exécuter le traitement des données pour afficher les courbes.
Quitter le Logiciel permet de fermer le logiciel.

c. Variables

Les marqueurs [UI] indiquent que l'explication concerne l'interface graphique tandis que les marqueurs [CONF] indiquent que l'explication concerne le fichier de configuration texte.

i. Lecture des Données

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
superposer_courbes	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Choisir de superposer plusieurs courbes (c'est-à-dire d'avoir plusieurs fichiers en entrée) ou d'afficher uniquement une seule courbe.	True / False
nom_fichier	Nom du fichier à ouvrir	String
nom_dossier	Chemin vers le dossier à ouvrir si superposer_courbes = False. Chemin vers le dossier de fichiers à ouvrir si superposer_courbes = True.	String
type_fichier	Type du fichier à lire.	CSV / TXT
calc_temps	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Choisir si le vecteur temps doit-être calculé à partir du temps d'échantillonage.	True / False

ii. Enregistrement des Données

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
enregistrer_data	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Choisir d'enregistrer les données de traitement des courbes au format .txt. Si superposer_courbes=True alors le noms des fichiers d'enregistrement seront sous cette forme : nom_fichier_NoFichier.txt	True / False
nom_enregistrement	Nom du fichier à enregistrer	String
dossier_enregistrement	Chemin vers le fichier à enregistrer	String

iii. Traitement des Données

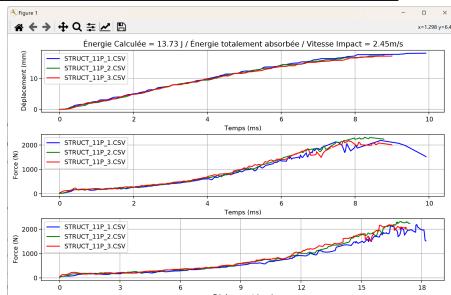
Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
sppr_rollback	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Choisir de supprimer ou non les données de déplacement qui reviennent en arrière ($dep[i] < dep[i-1]$ est impossible et doit-être supprimé).	True / False
recherche_deb_impact	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Permet de rechercher automatiquement le début de l'impact. Fonctionne seulement si <code>deb_impact_manuel=False</code>	True / False
taux_augmentation	Taux d'augmentation en % (ex: 10% => taux augmentation = 0.1) à partir duquel le début d'impact est considéré comme détecté. <code>pas(i) >= pas(i-1) * (1 + taux_augmentation) => Impact</code>	Float
nb_pas_avant_augmentation	Nombre de pas de données à garder avant le début de l'impact trouvé.	Integer
deb_impact_manuel	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Permet de trouver manuellement le début de l'impact en renseignant le temps au début de l'impact. Fonctionne seulement si <code>calc_temps = True</code> et <code>recherche_deb_impact = False</code>	True / False
tmps_deb_impact	Temps en ms du début de l'impact.	Float

Nom de la Variable	Description	Valeurs Possibles
tarrage_dep	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Choisir de tarer le déplacement par rapport au début de l'impact. <code>recherche_deb_impact</code> ou <code>deb_impact_manuel</code> doivent être activés.	True / False
tarrage_tmgs	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Choisir de tarer le temps par rapport au début de l'impact. <code>recherche_deb_impact</code> ou <code>deb_impact_manuel</code> doivent être activés.	True / False
detect_fin_essai	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Choisir de détecter la fin de l'essai à partir du déplacement maximal de l'impacteur. Si <code>detect_fin_essai=True</code> alors <code>dep_max</code> doit-être renseigné.	True / False
dep_max	Valeur en mm du déplacement maximum de l'impacteur.	Float
calculer_energie	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Permet de calculer et d'afficher l'énergie absorbée durant l'essai.	True / False
fact_force	Facteur multiplicateur de la force. Permet le changement d'unité par exemple. Fonctionne si <code>calculer_energie=True</code>	Float
fact_dep	Facteur multiplicateur du déplacement. Permet le changement d'unité par exemple. Fonctionne si <code>calculer_energie=True</code>	Float
calc_vitesse_impact	Case à cocher [UI] / Variable booléenne [CONF] Permet de calculer et d'afficher la vitesse d'impact. ATTENTION : Si <code>suppr_rollback</code> est actif, le calcul de la vitesse d'impact peut être très faussé ! En effet, beaucoup de données de déplacement ont pu être supprimées.	True / False
nbpts_vitesse_impact	Permet de choisir le nombre de points nécessaire pour calculer la vitesse d'impact. En général 3 points donne de bons résultats.	Integer

iv. Graphiques à Afficher

Une fois que l'ensemble des paramètres de traitement sont définis, vous pouvez lancer le calcul pour afficher les graphiques en cliquant sur : Exécuter le Traitement des Données

Le tracé des courbes s'affiche dans une fenêtre de la manière suivante :



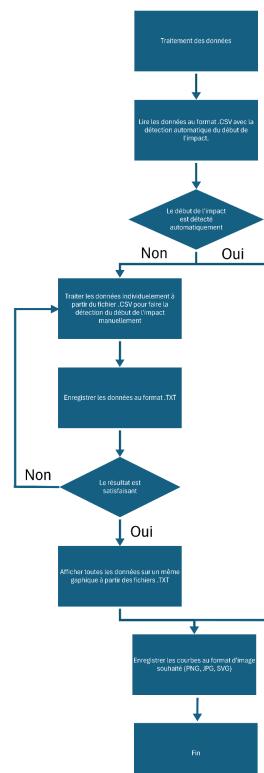
- 🏠 Réinitialiser le mode de vue par défaut de la fenêtre
- ⬅ ➡ Avancer/reculer dans les modifications de visualisation
- ➕ Se déplacer dans la fenêtre du graphique
- Zoomer sur une partie du graphique
- Modifier la taille de la fenêtre des graphiques
- Modifier les paramètres des axes
- Enregistrer les courbes

d. Stratégies d'utilisation

Lors du lancement des calculs, il est possible que la détection du début de l'impact ne fonctionne pas. Il faut alors rechercher le début de l'impact manuellement.

À noter qu'il est également possible que les valeurs des vitesses calculées ne soient pas très précises. En effet, l'option `suppr_rollback` supprime un certain nombre de données, ce qui dégrade la qualité du calcul de la vitesse.

On peut résumer la stratégie d'utilisation grâce au logigramme suivant :



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