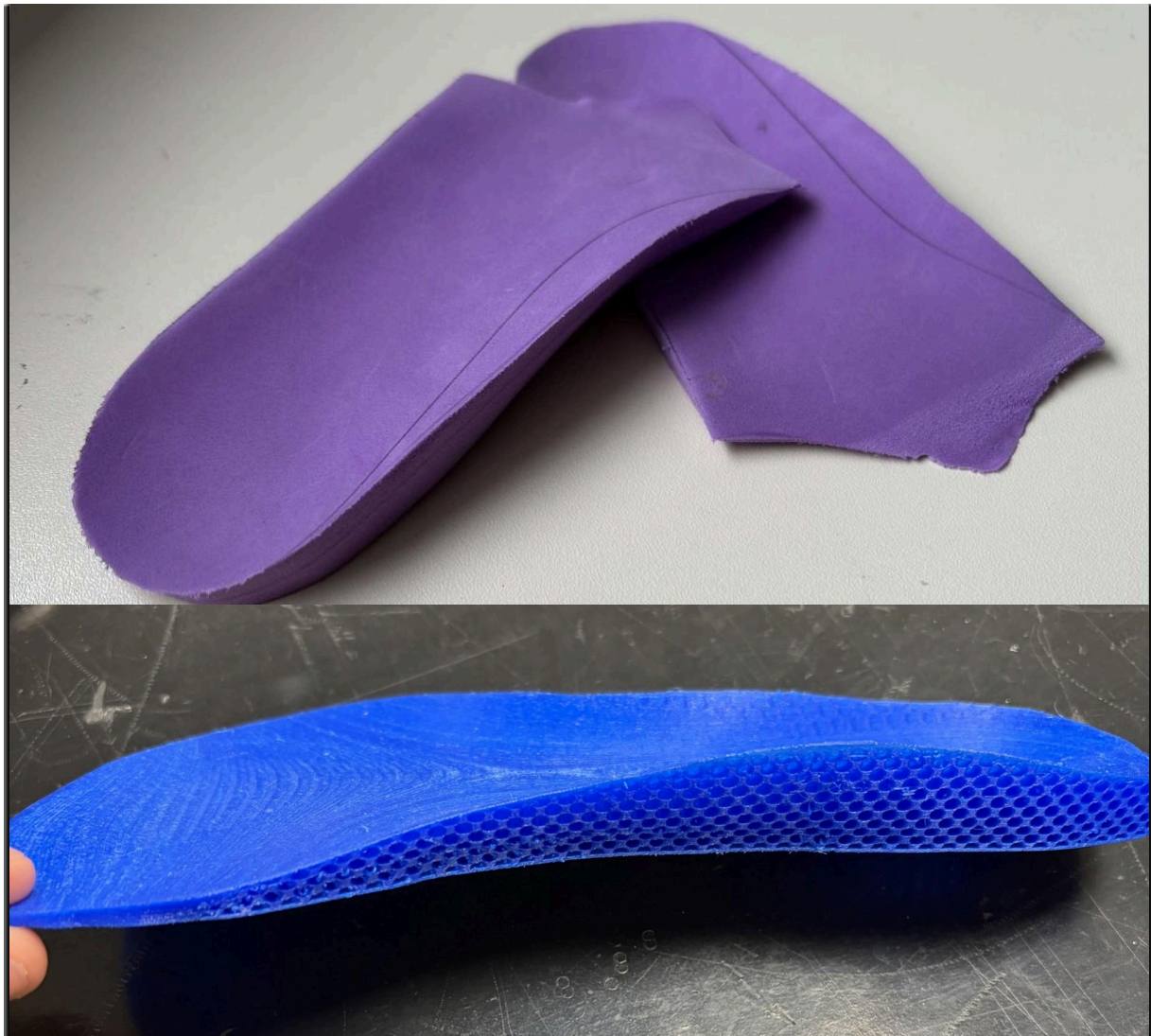


Parcours : innovation pour l'industrie

RAPPORT DE PROJET - OrthAMU



SOMMAIRE :

Partie 1 - Introduction	2
1.1 Problématique	2
1.2 - Diagramme de Gantt	3
1.3 - Contexte et technique	4
1.3.1 - Identification de la phase de vie du produit	4
1.3.2 - Diagramme des milieux extérieurs	5
1.3.3 - Cahier des charges	6
1.4 - Etat de l'art	7
Partie 2 – Développement des solutions technique	7
2.1 - Méthodes utilisés	7
2.1.1 - Etude des mousses orthopédiques	7
2.1.2 - Copie des caractéristiques	11
2.1.3 - Essais complémentaires : Caractérisation mécanique du motif gyroïde.	16
2.1.4 - Scan et reconstruction de semelles existantes.	22
2.1.5 - Fabrication semelles	23
Partie 3 - Retour critique sur le projet	24
3.1 - Problèmes rencontrés	24
3.2 - Perspective	24
3.3 - Conclusion quant au projet	25
ANNEXES	26
ANNEXE 1	26
ANNEXE 2	27
ANNEXE 3	27
ANNEXE 4	28
ANNEXE 5	28
GLOSSAIRE	28

Partie 1 - Introduction

Lors de la troisième année de BUT Génie Mécanique et Productique, dans le cadre du parcours II : Innovation pour l'industrie, il était demandé de mener un projet de conception et de réalisation d'un prototype fonctionnel. L'objectif était de développer un projet fiable, de fin septembre à fin mars, tout en suivant une démarche technique complète, allant de la maquette numérique à la fabrication des prototypes finaux.

Afin d'orienter le choix du sujet, les référents pédagogiques ont proposé plusieurs types de projets divers et variés répondant à plusieurs critères. Avec cette approche, le choix s'est porté sur le projet OrthAMU en raison de son originalité dans un cursus de BUT Génie mécanique et productique, avec ses différents partenariats notamment avec l'école de podologie et STAPS tous deux situés à Marseille. Ce projet a pour objectif de reproduire des semelles orthopédiques traditionnelles en mousse en impression 3D afin de corriger les problèmes de certains patients et d'en tirer des conclusions grâce aux essais sur patients dans la durée.

1.1 Problématique

Comment l'impression 3D peut-elle résoudre les problèmes environnementaux et sanitaires des semelles traditionnelles ?

Selon QUEChoisir.org, près de deux millions de Français reçoivent des semelles chaque année. De plus, le site d'information podoconnect.fr indique une utilisation allant de 1 à 2 années pour un adulte et de 6 à 12 années pour un enfant. Cette statistique montre à quel point le marché des orthèses plantaires est puissant et génère de la matière qui finit par être jetée.

En effet, une semelle classique est composée de plusieurs matériaux internes, des mousses en général, et d'une couche supérieure en cuir fin ([Annexe:1](#)). En fin de vie, ces semelles sont donc presque impossibles à recycler, ce qui pose un réel problème environnemental.

La création de semelles engendre également des troubles pour la santé des praticiens. Étant faites entièrement à la main, leurs créations engendrent des troubles articulaires ce qui peut freiner la production d'orthèses qualitatives. Leur production nécessite également l'utilisation de produits extérieurs nocifs tels que de la colle dégageant de la vapeur toxique ainsi que des microparticules de mousse pouvant atteindre les poumons à cause du ponçage.

Cette production traditionnelle engendre donc à la fois des problèmes environnementaux et sanitaires.

Notre objectif est donc de produire des semelles écoresponsables monomatériaux en TPU95A, un matériau souple, imprimable et recyclable ([Annexe:2](#)).

Le projet a suivi un processus structuré : en commençant par la compréhension du sujet et des sujets réalisés dans les années antérieures, ce qui est assez complexe en premier lieu, pour suivre par la caractérisation des matériaux avec la conception des échantillons, les essais mais encore l'exploitation des résultats sur Excel, par la suite la détermination des différents motifs reproduisant les caractéristiques des mousses grâce au module de Young, et pour finir la réception des semelles en mousse provenant de l'école de podologie nécessitant un scan 3D afin d'en reproduire la forme en impression 3D tout en incluant les formes de motifs déterminés précédemment. Cette démarche a permis de réaliser des semelles en impression 3D reproduisant une semelle en mousse monomatériaux qu'on pourrait avoir auprès d'un podologue.

1.2 - Diagramme de Gantt

Afin d'assurer une progression cohérente du projet, nous avons opté pour une répartition équitable des tâches, tout en maintenant une phase d'étude et de compréhension globale réalisée en binôme. Ce travail d'équipe a permis de simplifier les échanges techniques tout au long du déroulement du projet.

La répartition des missions s'est réalisée de la manière suivante :

- **Nathan (Caractérisation et Conception) :** Je me suis principalement concentré sur la **caractérisation mécanique** des matériaux. Mon travail a consisté à concevoir différents motifs structurels (**lattices**) présentant des **modules de Young** distincts, afin de simuler avec précision le comportement élastique des mousses conventionnelles.
- **Ferry (Chaîne de fabrication digitale) :** Ferry a pris en charge l'intégralité du processus de fabrication, incluant le **scan 3D** du pied, l'étape de **reverse engineering** (ingénierie inverse) pour modéliser l'empreinte, ainsi que l'optimisation des paramètres d'**impression 3D**.

Cette complémentarité entre l'analyse des propriétés matériaux et la maîtrise de la fabrication additive a été la clé pour aboutir à un prototype de semelle fonctionnelle et personnalisé.

Bien que l'objectif du projet soit de concevoir un prototype, le projet s'inscrit dans la phase de conception pour les études effectuées et la modélisation CAO mais également dans la phase de fabrication pour les essais et la réalisation du prototype de semelles 3D. Ainsi, ce produit est réalisé pour analyser la faisabilité et ses performances avant l'utilisation sur patient.

1.3.2 - Diagramme des milieux extérieurs

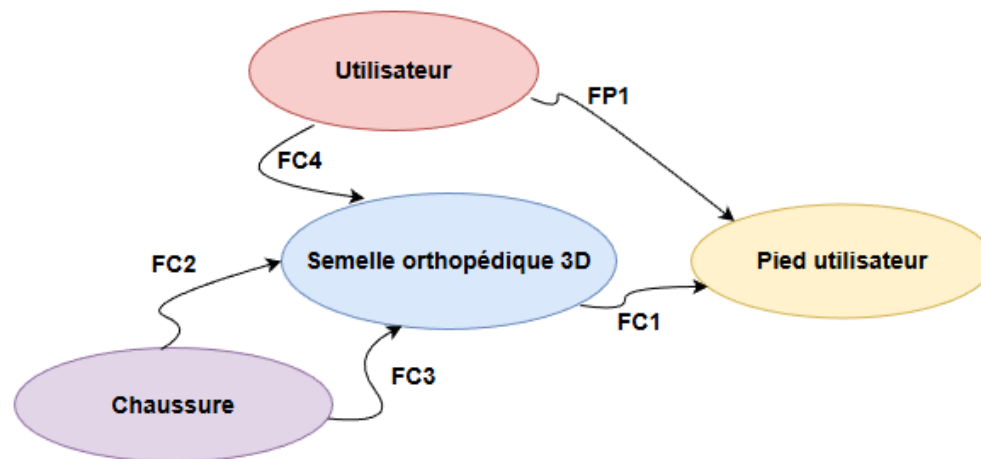


Figure 3 : Diagramme milieux extérieurs

Fonction	Description
FP1	Permettre à l'utilisateur de corriger sa posture plantaire via une structure ergonomique.
FC1	S'adapter à la morphologie spécifique du patient (via scan 3D).
FC2	Être compatible avec les dimensions standards des chaussures de l'utilisateur.

FC3	Résister aux contraintes mécaniques répétées et à l'humidité (transpiration).
FC4	Assurer un poids minimal pour ne pas gêner la marche.

Le diagramme des milieux extérieurs représente les facteurs externes pouvant influencer la semelle orthopédique. Il permet d'identifier les contraintes et les fonctions principales que devra remplir le prototype. Ces fonctions sont souvent celles présentes dans le cahier des charges. Ici, il y a trois milieux extérieurs principaux :

- **Le pied de l'utilisateur** : C'est l'élément central qui impose la géométrie de la semelle. Le système doit s'adapter parfaitement à la morphologie plantaire pour corriger la posture ou soulager des douleurs, conformément à la **fonction principale 1 (FP1)**.
- **La chaussure** : en tant qu'enveloppe extérieure, elle impose des contraintes d'encombrement et de dimensions. La semelle doit pouvoir s'insérer sans frottement excessif tout en restant stable, conformément à la **fonction contrainte 2 (FC2)**.
- **L'utilisateur** : il impose de s'adapter aux problèmes et à la morphologie de l'utilisateur afin de pouvoir corriger ses problèmes **fonction contrainte 3 (FC3)**.

Ce diagramme permet de mettre en place l'esquisse du cahier des charges et ainsi d'orienter les choix techniques, comme le choix du motif de remplissage (lattice) ou du matériau (TPU 95A), lors de la conception du prototype.

1.3.3 - Cahier des charges

Le cahier des charges permet de définir des exigences et des contraintes précises liées au développement du produit, ici, celui de la **semelle orthopédique imprimée en 3D**. Il sert de référence tout au long du projet afin d'assurer que les solutions adoptées répondent aux besoins identifiés.

Fonction	Critère	Niveau de performance
FP1 : Soutenir et corriger la posture	1.1 : Précision de la forme	Données des podologue
	1.2 : Répartition des pressions	Équilibrage des appuis plantaires (3 appuis)
FP2 : Assurer la durabilité et l'hygiène	2.1 : Résister aux cycles de marche	Tenue mécanique
	2.2 : Entretien	Lavable à l'eau
FP3 : Garantir la légèreté et la souplesse	3.1 : Masse de la semelle	Poids < 80g par semelle
	3.2 : Flexibilité	Coefficient de flexion adapté à la marche
FP4 : Optimiser la fabrication 3D	4.1 : Structure interne (Lattice)	Taux de remplissage 100%
	4.2 : Temps de production	< 18 heures d'impression

Contrainte	Contrôle
FC1 : S'adapter à la morphologie du client	Poids et forme du pied et chaussure (morphologie patient)
FC2 : Compatibilité avec les dimensions standards des chaussures	Prendre en compte dimensions des chaussures
Résister à la transpiration et aux odeurs	Test de porosité (matériau)
FC3 : Forunir une structure amortissante	Ergonomie de la semelle
	Essai de flexion manuelle
FC4 : Technologie d'impression fiable	Vérification du treanchage
	Chronométrage de la fabrication

Figure 4 : Cahier des charges

Le cahier des charges du prototype de semelle imprimée en 3D présente 4 fonctions principales. Bien que concis, il établit des objectifs simples et réalisables tout en laissant une marge de progression si nécessaire. Les 4 fonctions contraintes associées permettent de guider les choix techniques, notamment le choix du matériau (comme le TPU) et du motif alvéolaire, afin d'assurer la cohérence du projet.

1.4 - Etat de l'art

Il existe déjà plusieurs entreprises spécialisées dans la conception de semelles orthopédiques issues de la fabrication additive.

Parmi les plus connues, nous retrouvons :

- **Scientifect**. Cette entreprise française propose à la fois un scanner 3D pour le cabinet, un logiciel de conception et une fabrication par frittage de poudre (SLS) dans ses usines.
- **Aetrex**. Cette entreprise américaine installe des scanners 3D dans les magasins de sport et les cliniques. Ils utilisent l'intelligence artificielle pour recommander ou imprimer des semelles instantanément.
- **Hike Medical**. Une start-up montante qui utilise l'IA pour transformer des photos de pieds prises avec un smartphone en modèles 3D prêts à être imprimés.

Partie 2 – Développement des solutions technique

2.1 - Méthodes utilisés

2.1.1 - Etude des mousses orthopédiques

Afin de reproduire les propriétés d'une semelle traditionnelle **monomatériau**, il était primordial de réaliser une **caractérisation mécanique** des différents échantillons. Cette étude permet de déterminer le **module de Young** (module d'élasticité) pour chaque type de couleurs, garantissant ainsi que le comportement élastique du prototype imprimé en 3D correspond aux exigences de confort et de soutien.

Les orthèses orthopédiques sont produites grâce à des mousses de module de Young différents. Lors de la création d'une orthèse, le choix de la mousse se fait en fonction du poids et de la pathologie du patient.

Pour réaliser notre étude, nous avons en notre possession des échantillons de quatre mousses d'élasticité différente qui sont différenciables par des couleurs (gris-rose-rouge-blanc).



Figure 4 : Mousses de différentes raideurs

Les élèves ayant commencé le projet avant nous avaient réalisé la caractérisation mécanique d'une seule des quatre mousses, la rouge. Ils avaient également conçu des lattices capables de produire l'élasticité de cette mousse puis avaient produit des semelles avec ces lattices afin de les envoyer à l'école de podologie pour les tester directement sur des patients.

Dans cette première partie, notre objectif est de caractériser l'ensemble des mousses à notre disposition et de trouver un motif capable de produire l'élasticité de chaque mousse.

Nous étudions les matériaux dans un état statique.

Essai de compression par indentation :

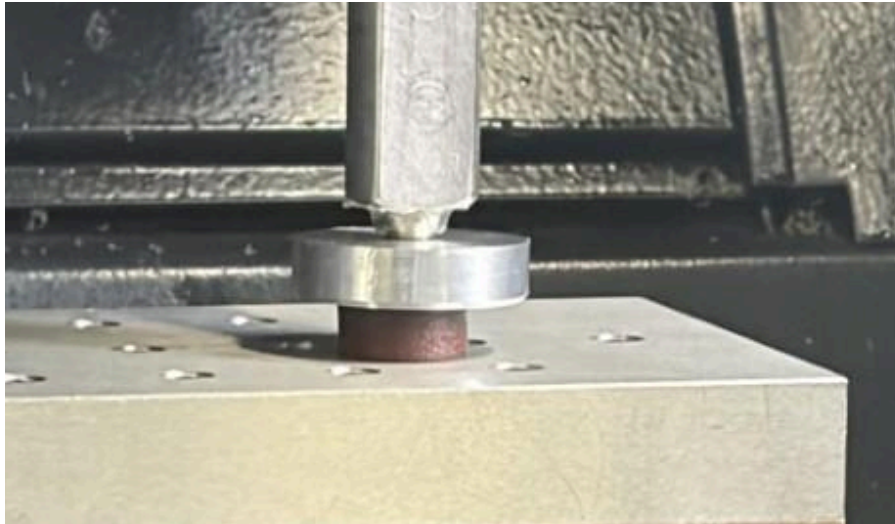


Figure 5 : Essai de compression sur échantillon

La méthode que nous avons utilisée pour déterminer le module de Young d'un matériau viscoélastique est la suivante :

L'essai a pour but d'écraser un échantillon par paliers d'enfoncement, puis de relever les valeurs utiles au calcul du module de Young.

Liste du matériel :

- platine d'effort KRISTLER piézoélectrique.
- un ordinateur pour régler la fréquence d'acquisition en hertz et visualiser les valeurs obtenus
- une machine asservie en vitesse et en position : fraiseuse CN
- une pièce d'appui pour créer une surface d'écrasement
- échantillons de matériau à tester

Principe de l'indentation :

C'est un essai de compression uniaxial écrasant un échantillon entre deux surfaces planes plus grandes que lui afin de répartir l'effort d'enfoncement équitablement sur toute sa surface. Le but est de déterminer un enfoncement cible, ici en mm, un nombre de palier à passer pour atteindre cet enfoncement final et un temps entre chaque palier à l'aide d'un programme réalisé préalablement ([Annexe:3](#)).

Comme les matériaux que nous caractérisons sont viscoélastiques, c'est-à-dire qu'ils agissent comme la combinaison d'un ressort et d'un amortisseur, il est important de laisser du temps s'écouler entre chaque marche. Ce temps permet la relaxation des contraintes internes et la dissipation de l'énergie dans la structure interne.

Voici le résultat d'un essai :

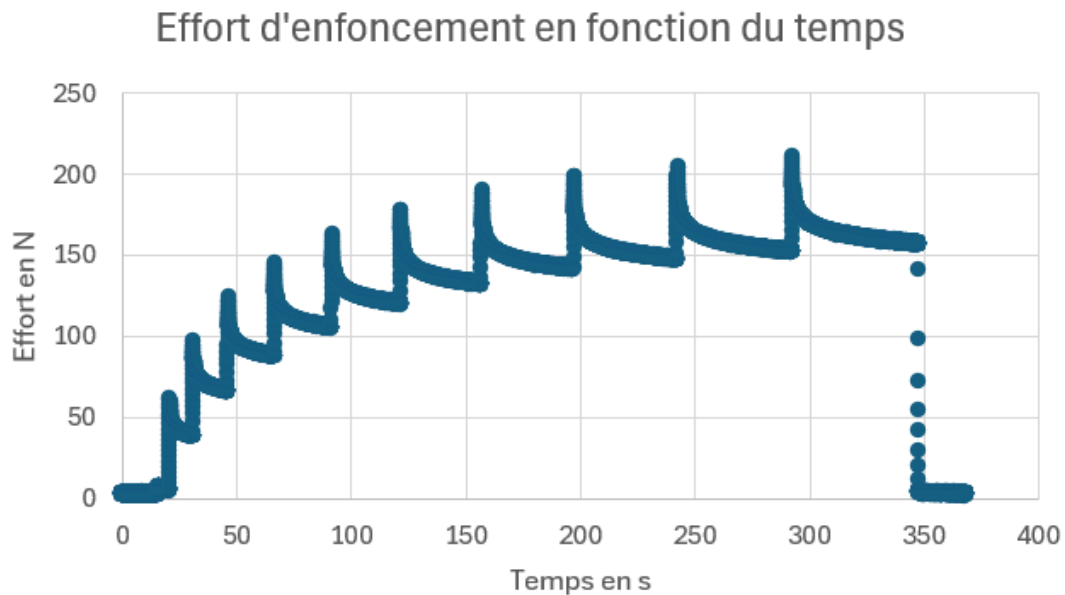


Figure 6 : Graphique d'un essai

Ce graphique se lit en effort en fonction du temps. Nous distinguons tous les palier de l'essai, avec à chaque fois un pic d'effort (encadré rouge ci-dessous) et une redescente pour atteindre un état stable (encadré orange ci-dessous). c'est cet état stable qui nous permet de calculer le module de Young car il représente l'état stable du matériau en situation statique.

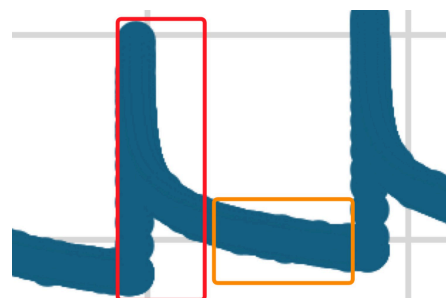


Figure 7 : Zoom sur une marche

A l'aide d'une macro Excel, nous calculons les moyennes des parties stables de chaque marche et traçons un graphique force/enfoncement avec une courbe des tendances pour obtenir une pente. En connaissant les dimensions des échantillons, nous pouvons alors calculer les modules de Young :

Déterminer le module de Young d'un échantillon :

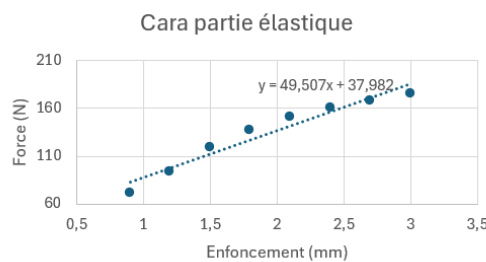
On sait que :

- $p = \frac{F}{\Delta h} = \text{la pente}$
- $S = \text{Surface échantillon en mm}^2$
- $h = \text{hauteur en mm}$
- $E = \text{Module de Young en MPa}$
- $F = \text{Force en N}$
- $\Delta h = \text{enfoncement en mm}$
- $h = \text{Hauteur échantillon en mm}$

$$\begin{aligned} \frac{F}{S} &= E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta h}{h} \\ \Rightarrow \frac{F}{S} &= E \cdot \frac{\Delta h}{h} \\ \Rightarrow E &= \frac{F}{S} \cdot \frac{h}{\Delta h} \\ \Rightarrow E &= \frac{F}{\Delta h} \cdot \frac{h}{S} \\ \Rightarrow E &= p \cdot \frac{h}{S} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= p \cdot \Delta h \\ \Rightarrow p &= \frac{F}{\Delta h} \end{aligned}$$

enf	moyenne_40_90		
0,3	2,554697583	410	910
0,6	19,54562876	1610	2360
0,9	70,74257481	3310	4310
1,2	93,62667822	5510	6760
1,5	118,5571055	8210	9710
1,8	137,1196714	11410	13160
2,1	151,3736436	15110	17110
2,4	161,0442826	19310	21560
2,7	168,340472	24010	26510
3	175,3545469	29210	31960



S		273,6921
h0		10,5975
p		49,507
E		1,916937

Figure 8 : Calculs de détermination module de Young

Nous obtenons finalement les modules des mousses et d'un bloc de TPU95A plein (remplissage 100%) :

- Mousse grise : 0,28 MPa
- Mousse rose : 0,45 MPa
- Mousse rouge : 1,55 MPa
- Mousse blanche : 1,91 MPa
- Bloc TPU95A : 35 MPa

Connaître la valeur du module de Young plein nous sert dans la partie suivante pour réaliser des essais par MEF.

2.1.2 - Copie des caractéristiques

Par la suite, nous avons procédé à une série de **simulations par éléments finis (MEF)** via le logiciel **CATIA V5**. Cette étude comparative de différents motifs structurels (**lattices**) a

permis d'optimiser la géométrie interne de la semelle. L'objectif est de reproduire, par impression 3D, un comportement mécanique (souplesse et amorti) proche de celui des **mousses polymères** traditionnelles tout en maîtrisant les dimensions du prototype :

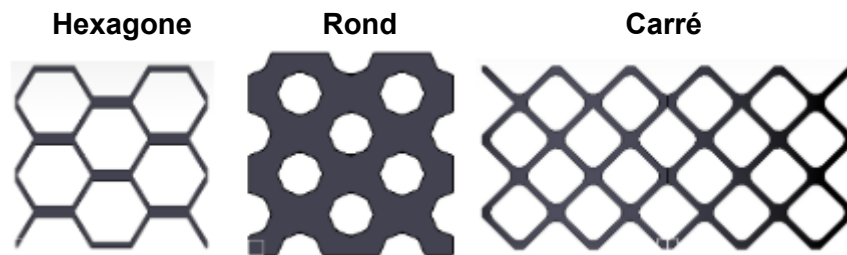


Figure 9 : Différents motifs

Afin de faire varier les caractéristiques mécaniques des échantillons, nous modifions exclusivement les dimensions internes (diamètres des perçages ou côtés des carrés) et réalisons des essais par éléments finis pour observer les différences.

Protocole de réalisation des essais éléments finis :

Afin de simuler fidèlement les contraintes réelles, l'échantillon a été divisé en quatre (modélisation par symétrie). Cette configuration permet d'appliquer précisément les conditions aux limites, notamment les blocages sur les bords et le déplacement imposé sur la face supérieure.

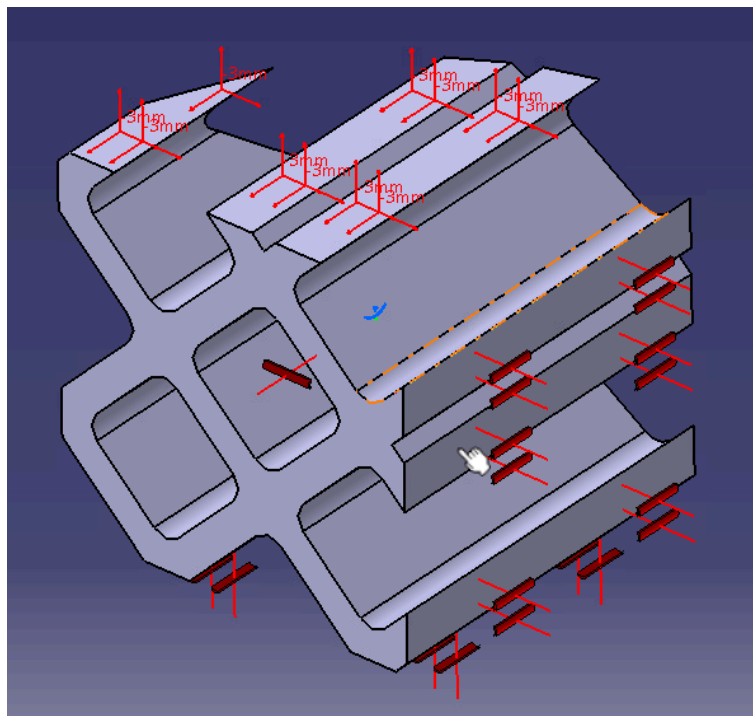


Figure 10 : Echantillon découper en 1/4

Après plusieurs tests comparatifs, une taille de maillage de **0,1** a été sélectionnée : elle représente le compromis optimal entre précision des résultats et temps de calcul. Elle a été obtenue à l'aide d'une convergence de maillage. Les données de sortie, initialement obtenues en Newtons, sont ensuite converties en mégapascals (MPa) via un outil de calcul développé sur Excel ([Annexe:4](#)).

Utilité des valeurs calculées :

Enfin, une campagne d'essais paramétriques a été menée en faisant varier les dimensions des motifs. Les résultats obtenus en MPa permettent de tracer des courbes caractéristiques pour chaque configuration géométrique. En exploitant ces abaques sur Excel, nous pouvons identifier les dimensions optimales nécessaires pour reproduire les propriétés mécaniques des mousses traditionnelles.

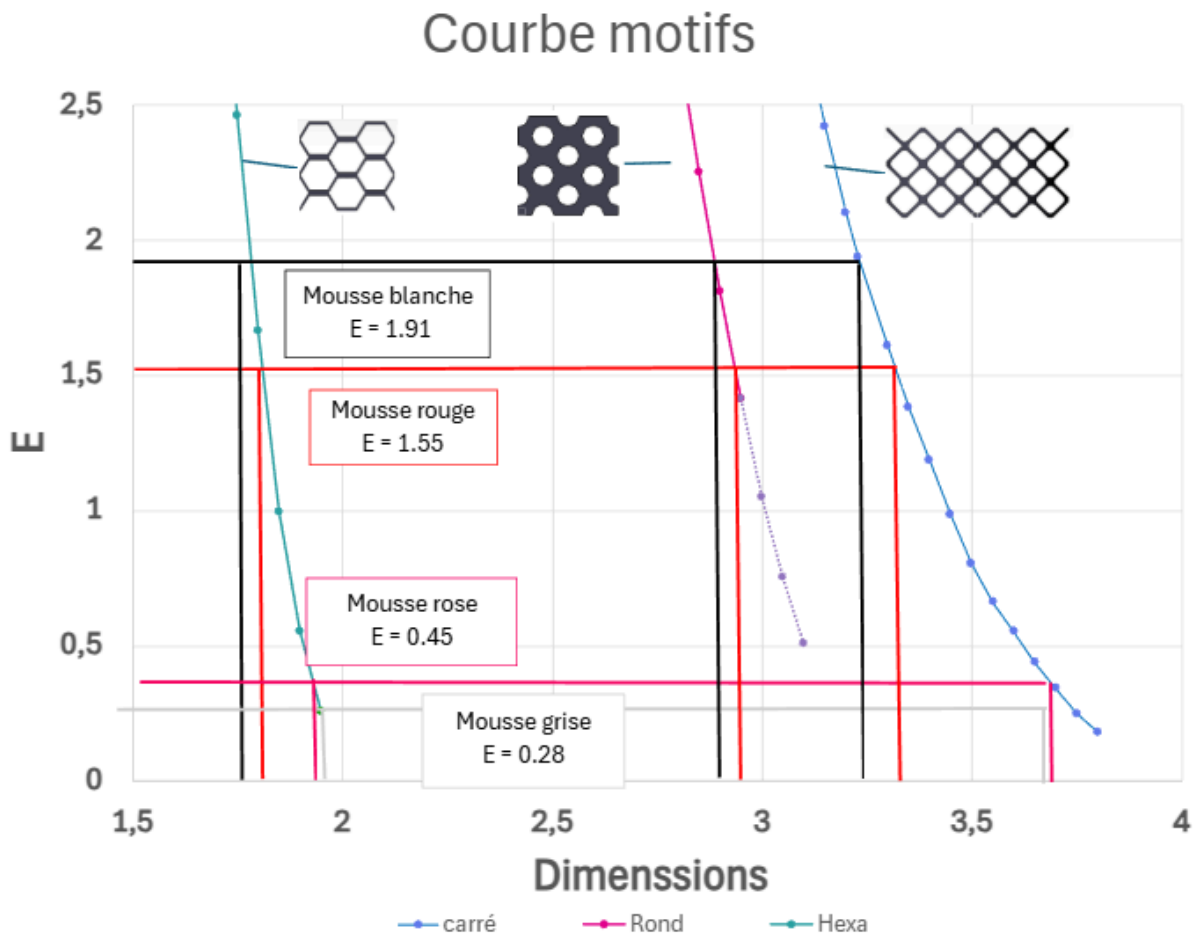


Figure 12 : Courbes des différents motifs

Il convient de préciser que la géométrie macroscopique de l'éprouvette 10mm, à savoir sa hauteur et son diamètre total 20mm, est maintenue constante durant l'ensemble des

simulations. Cette invariance géométrique permet d'isoler l'influence des motifs internes sur le comportement mécanique et de garantir la comparabilité des résultats.

Il convient de préciser que chaque motif présente des avantages et des inconvénients spécifiques, à titre d'exemple :

Motif Hexagone :

- **Avantages :**
 - **Excellent rapport résistance/poids :** C'est la structure la plus efficace pour obtenir une grande rigidité avec très peu de matière.
 - **Stabilité directionnelle :** Très bonne résistance à la compression verticale.
 - **Esthétique :** Souvent perçu comme un signe de haute technologie et de légèreté.
- **Inconvénients :**
 - **Anisotropie :** Ses propriétés mécaniques ne sont pas les mêmes selon l'angle de la force (très rigide verticalement, plus déformable latéralement).
 - **Maillage complexe :** Selon l'orientation, les parois fines peuvent nécessiter un maillage très fin pour éviter les erreurs de calcul.

Motif Rond :

- **Avantages :**
 - **Répartition des contraintes :** Contrairement aux angles droits, les cercles évitent les "points de concentration de contraintes", ce qui réduit le risque de fissures.
 - **Isotropie relative :** Le comportement est plus uniforme quelle que soit la direction de la force appliquée au sol.
 - **Durabilité :** Généralement plus robuste face à l'usure de par sa surface de contact plus pleine.
- **Inconvénients :**
 - **Poids élevé :** C'est le motif qui consomme le plus de matière par rapport au volume total.
 - **Flexibilité limitée :** La semelle risque d'être plus "raide" et moins confortable pour l'amorti dynamique.

Motif carré :

- **Avantages :**
 - **Amorti et souplesse :** Ce motif permet une déformation progressive, idéale pour simuler le comportement élastique d'une mousse.

- **Cisaillement** : Orienté à 45°, il résiste mieux aux forces de torsion et de cisaillement (lorsque le pied pivote).
- **Facilité d'impression** : En raison de ces formes non complexe l'impression est plus facile
- **Inconvénients** :
 - **Points de rupture** : Les intersections des carrés créent des contraintes dans les congés qui peuvent s'accumuler.
 - **Moins de rebond** : Il peut s'écraser de manière moins "nerveuse" que l'hexagone.

Enfin, une fois les mousses **copiées** à l'aide des essais **préalables** qui nous **avaient** permis de déterminer le module de Young des différentes mousses, nous avons **réalisé** des échantillons **reproduisant** leurs propriétés à l'aide de calculs d'éléments finis. Cela nous a permis de créer des échantillons que nous avons **testés** sur **machine** pour en tirer des résultats. L'objectif était de vérifier si nous avons réussi à caractériser les mousses via les éléments finis, en comparant le module de Young des mousses initiales à celui des échantillons copiés :

Blanc : 1.99 MPa **Rouge : 1.65 MPa** **Rose : 0.54 MPa** **Gris : 0.34 MPa**

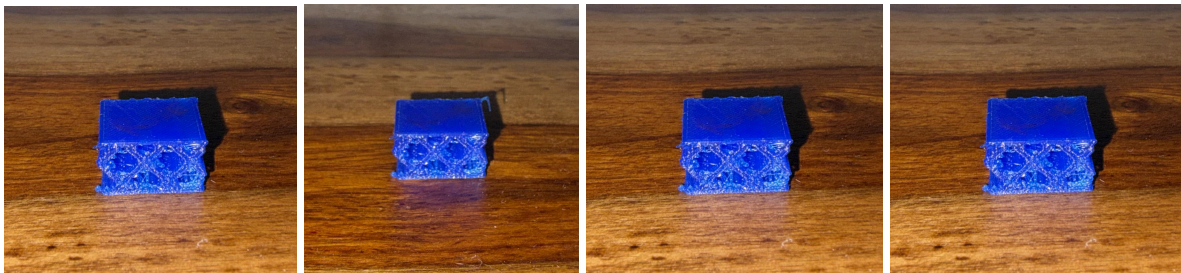


Figure 13 : Échantillons d'essai avec leurs résultats

En conclusion de cette phase de reproduction des caractéristiques, nous avons plus ou moins réussi à reproduire les propriétés des mousses ([Annexe:5](#)) avec nos échantillons imprimés en 3D. Cependant, on observe de légères différences. Celles-ci peuvent être sûrement dues à de petites erreurs dans le paramétrage de nos impressions, causant ainsi les variations que nous pouvons observer ci-contre :

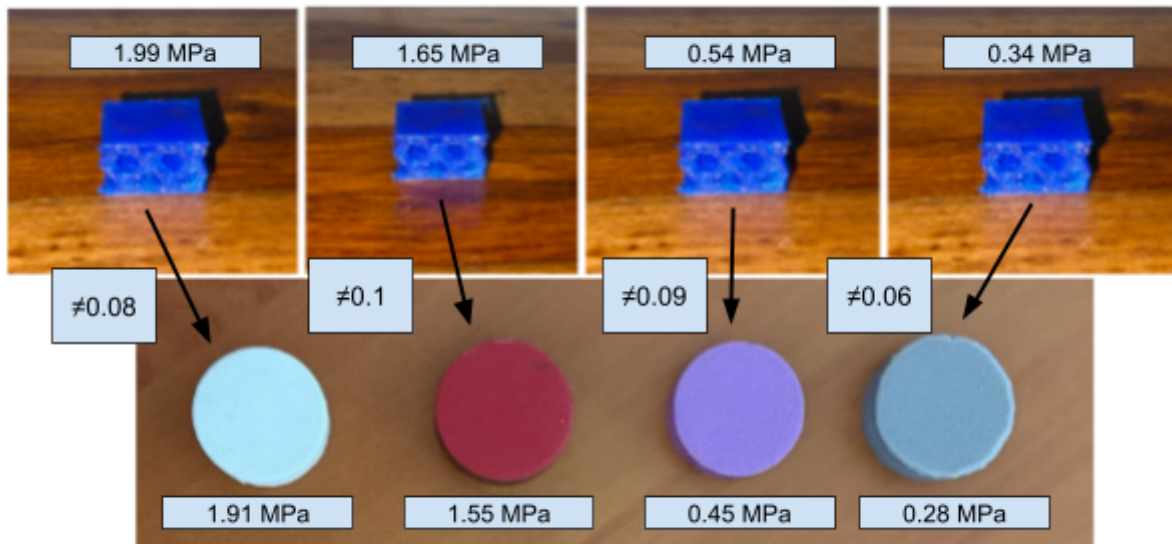


Figure 14 : Comparaison mousses et échantillons TPU

2.1.3 - Essais complémentaires : Caractérisation mécanique du motif gyroïde.

Depuis le début de l'étude, nous avons exclusivement fait le choix de travailler sur des structures lattice unidirectionnelles. Nous avons procédé de cette manière pour plusieurs raisons : les étudiants précédents avaient commencé le projet avec ce principe car c'est une solution qui correspond à la cinématique du pied. Si nous suivons ce principe, le pied est représenté par un enchaînement de liaisons pivots et il travaille suivant un mouvement de flexions :

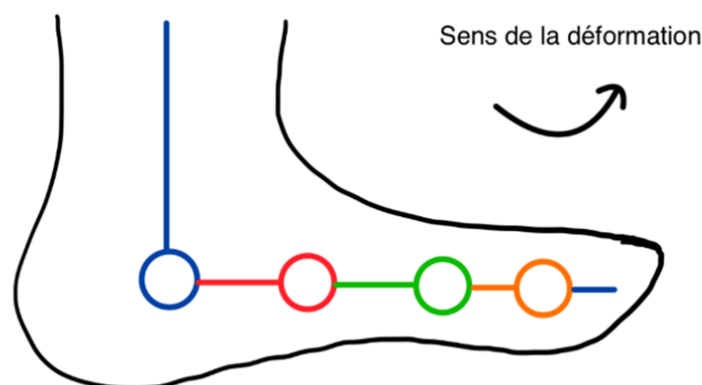


Figure 15 : Simplification de la cinématique du pied avec des pivots

Cependant, après réflexion et constat, nous pouvons représenter la cinématique du pied par un enchaînement de liaisons rotules, ce qui permet un mouvement de torsion, ce qui est plus

proche de la réalité. En effet le pied est capable de s'adapter à l'environnement qui l'entoure grâce à cette torsion dans le but de stabiliser le corps. Dans cette situation, il est envisageable de considérer un lattice multidirectionnel.

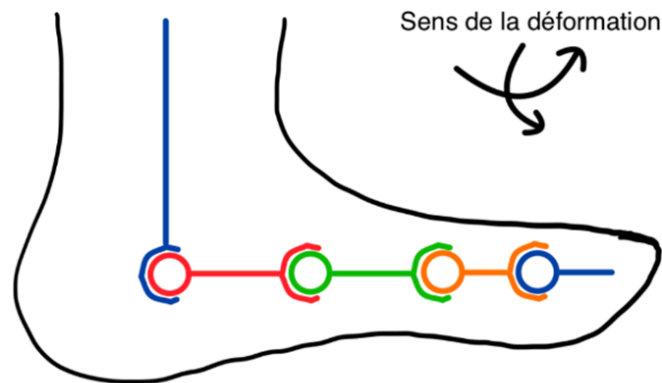


Figure 16 : Simplification de la cinématique du pied avec des rotules

De plus, les mousses utilisées en podologie pour produire les orthèses orthopédiques ont des propriétés mécaniques isotropes. Si nous voulons reproduire ces semelles en TPU tout en gardant les mêmes propriétés mécaniques, il me semble plus logique d'utiliser un lattice multidirectionnel.

Initialement nous travaillons avec ce type de lattice :

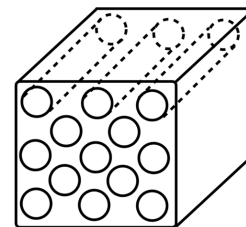


Figure 17 : Motifs transverses

Mais si nous faisons le choix d'utiliser d'autres types de structure interne, le processus change un peu.

Après un comparatif avec plusieurs structures, il semble que les gyroïdes soient le plus adaptés à notre application.

En effet, cette structure permet d'obtenir la souplesse nécessaire pour des modules plutôt faibles tout en ayant une densité suffisante pour assurer l'intégrité de la semelle. De plus, elle a une bonne résistance à la fatigue et sa forme permet de bien répartir les contraintes. Puis concernant l'impression 3D l'avantage est qu'elle ne nécessite aucun support interne afin de

minimiser les débris présents dans la semelle après impression. C'est la géométrie la plus adaptée pour simuler le comportement d'une mousse.

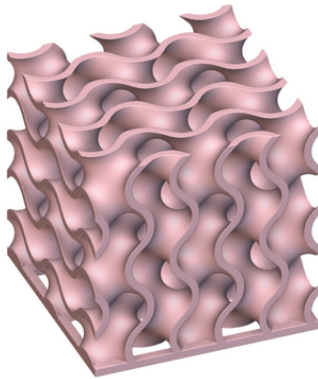


Figure 18 : Structure gyroïde

La loi Gibson-Ashby permet de mettre en lien la densité et le module de Young recherché. En manipulant la formule, nous pouvons soit déduire une densité en connaissant les deux modules de Young, soit trouver un module à viser en fonction du module du matériau à imprimer en fonction d'une densité de départ.

$$E^* \sim C \cdot E_s \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^n$$

Pour le lattice gyroïde, les paramètres sont :

- $C=1$ (constante géométrique)
- $N=2$ (exposant de déformation)
- E^* (module de young du lattice)
- $E_s= 35$ MPa (module de young du TPU)

- $\frac{\rho^*}{\rho_s}$ (densité relative)

Validation du motif :

Il existe une différence entre théorie et pratique. Il est donc primordial de comparer des résultats théoriques issus de la formule de Gibson-Ashby avec des résultats obtenus à la suite de tests que nous réalisons.

D'après la loi Gibson-Ashby, nous pouvons établir un graphique exprimant le module de Young d'une structure gyroïde en TPU en fonction de la densité d'un échantillon.

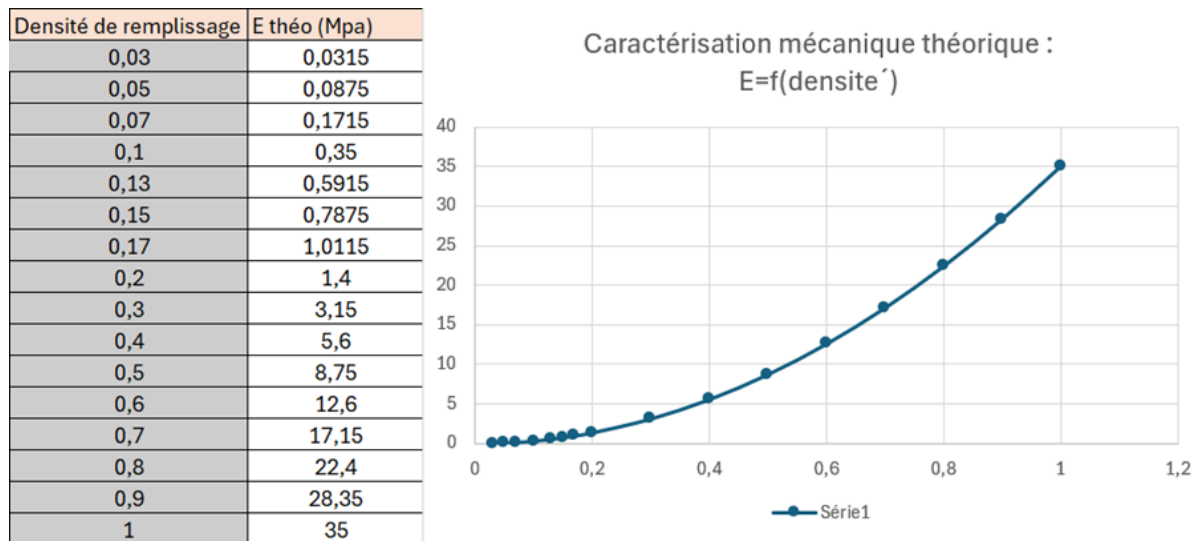


Figure 19 : Evolution du module de Young en fonction de la densité du remplissage

Nous avons choisi de modéliser cette courbe à partir de différents taux de remplissage. La fonction obtenue n'est pas linéaire, montrant que dans un intervalle de remplissage de]0 ;0,2] le module de Young n'évolue pas de manière significative.

Pour confirmer la loi et savoir si nous pouvons nous baser dessus pour déterminer une densité de remplissage correspondant aux caractéristiques d'une mousse de podologie, nous réalisons des essais de compression sur des échantillons.

Pour concevoir des échantillons avec le lattice gyroïde, il est inutile de modéliser les formes sur CATIA car le logiciel Cura possède déjà l'option de remplissage. Il nous suffit alors d'indiquer le taux de remplissage voulu, de choisir l'épaisseur des parois inférieure et supérieure et de supprimer les parois des côtés pour ne pas modifier les résultats des essais de compression.

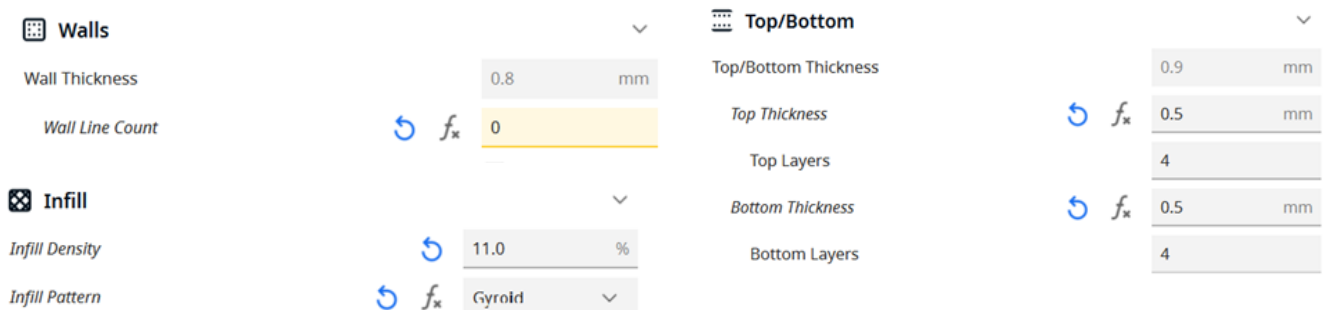


Figure 20 : Paramètres impression sur CuraUltimaker

Nous avons imprimé en TPU 7 échantillons de densités différentes : 0,1 – 0,13 – 0,15 – 0,17 – 0,2 – 0,3 – 0,4

Comme les essais de compression déjà réalisés lors de notre projet, nous utilisons une machine asservie en position et en temps ainsi qu'une platine d'effort KISTLER 9257B. Le protocole reste le même que pour caractériser la partie élastique des mousses de podologie.

Le poste traitement des données nous permet de mieux comprendre le comportement du motif gyroïde utilisé avec le TPU.

Pour faire une analyse de ce comportement, nous réalisons un graphique montrant l'évolution de l'effort d'enfoncement (en Newton) en fonction du temps (une unité = 0,1 seconde).

Nous constatons une différence de comportement entre les échantillons avec une densité inférieure et supérieure à 0,2.

Échantillons de densité < 0,2 :

Ici nous traitons le cas de l'échantillon de densité 0,15.

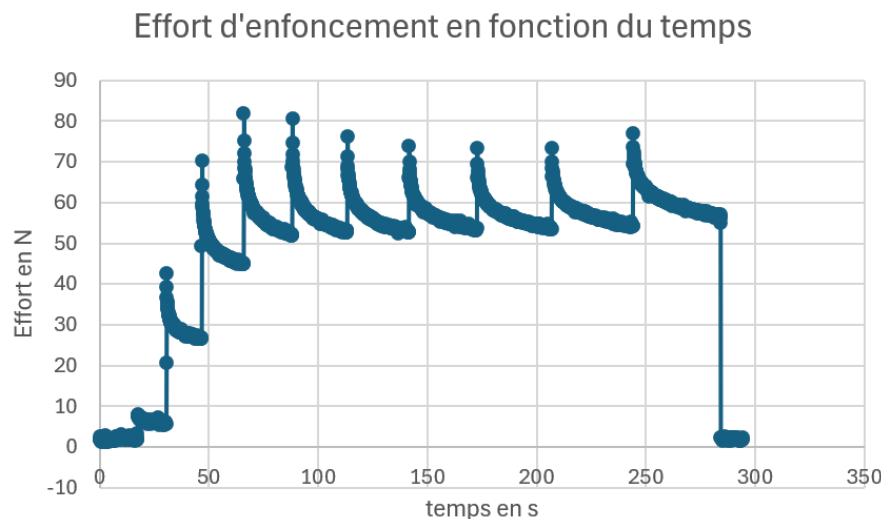


Figure 21 : Essai de compression sur un échantillon gyroïde < 20%

A première vue, le comportement de la courbe obtenue n'est pas linéaire, avec une tendance à rapidement augmenter, puis à se stabiliser. Nous identifions trois zones majeures :

Première zone (de 0 à 300) :

La première zone met en évidence de petits efforts, inférieurs à 10 Newton. C'est la mise en place de l'échantillon au contact des surfaces d'écrasement inférieures et supérieures de la machine. Ici, les imperfections de l'échantillon sont écrasées et les surfaces se mettent correctement en contact.

Deuxième zone (de 300 à 900) :

Nous observons dans cette zone les 3 premières marches significatives de l'essai. Il y a une augmentation rapide jusqu'à l'effort maximal à chaque cycle, avec un effort maxi à 82 N pour le point le plus haut, puis une relaxation de contrainte. Globalement, il y a une forte augmentation de l'effort à chaque marche. C'est dans cette partie que se trouve le module de Young réel de la structure. Pour tous les essais, nous devons considérer seulement les premières marches pour calculer les modules de Young.

Troisième zone (de 900 à 2900) :

A la quatrième marche, nous constatons un pic à 80 N. Cette valeur est inférieure aux 82 N de la marche précédant et marque le début d'un plateau. En effet, malgré l'augmentation de l'enfoncement en fonction du temps, l'effort maxi de chaque marché ne dépasse plus l'effort maxi total.

Cela peut s'expliquer par le fait que la structure soit passée dans le domaine plastique, ce qui implique la perte de toutes les caractéristiques élastiques de la structure, ou par le fait que les parois de la structure gyroïde subissent du flambement et perdent leur rigidité.

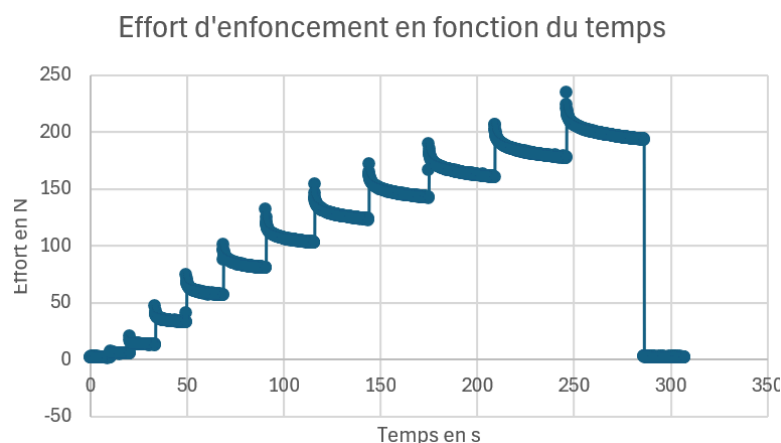
Échantillons de densité > 0,2 :

Figure 22 : Essai de compression sur un échantillon gyroïde > 20%

Dans ce cas-là, le comportement des essais semble linéaire, ce qui est en contradiction avec les résultats précédents.

Cela s'explique par le fait que la structure soit plus dense et ne permette pas le flambement des parois entraînant une stagnation de l'effort d'enfoncement.

Traitement des données :

Cette différence de comportement au sein du même lattice complexifie cette partie de l'étude. Les résultats remettent en cause l'idée d'utiliser des motifs gyroïdes ou de la façon de réaliser les essais, de traiter et d'interpréter les résultats. Le lattice gyroïde reste une piste pour améliorer les prototypes de semelle, mais il est nécessaire de continuer et d'affiner les essais pour tenter d'obtenir des résultats cohérents et similaires au modèle théorique.

2.1.4 - Scan et reconstruction de semelles existantes.

Après avoir établi la structure de remplissage des semelles, nous pouvons passer à la conception. Cette partie principale est divisée en deux sous-parties : le scan de semelle, ou d'empreinte de pied, et la reconstruction via un le logiciel de CAO CATIA V5.

Scannage :

Dans un premier temps, nous devons scanner des semelles déjà existantes envoyées par l'école de podologie afin de baser notre travail sur une semelle prête à l'emploi. Puis pour coller à l'esprit d'innovation du projet et à un aspect environnemental, nous scannons ensuite les empreintes de pied faites avec des plaques thermoformées de podologie. Ces plaques sont directement posées sous les pieds du patient lors de la prise d'empreinte, ce qui assure une géométrie optimale tout en évitant de créer des semelles en mousse non recyclable avec des méthodes de production nocives pour les podologues.

Liste du matériel :

- scanner 3D portatif - résolution au dixième de mm
- plateau rotatif
- semelle ou plaque thermoformée
- logiciel d'acquisition VXElement

Après avoir scanné et récupéré le fichier du scan au format STL, nous pouvons passer à la reconstruction de la semelle sur CATIA.

Reconstruction :

Le logiciel de CAO CATIA nous permet d'importer le nuage de points du scan 3D. Grâce au module surfacique, nous reconstruisons le plan inférieur de la semelle, l'empreinte du pied avec un outil Powerfit, et la tranche reliant les deux surfaces. Puis nous réalisons un remplissage et implémentons le lattice adéquat dans la semelle.

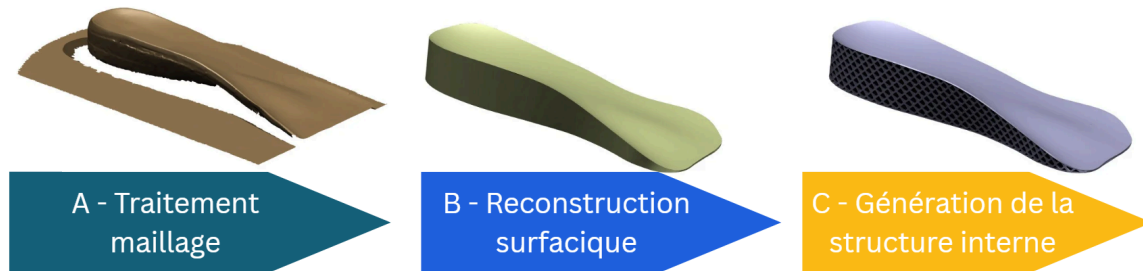


Figure 23 : Étapes de reconstruction semelle

Remarque :

Le scannage et la reconstruction sont des processus assez répétitifs et chronophages car nous devons les appliquer pour chaque semelle envoyée par l'école de podologie.

2.1.5 - Fabrication semelles

Nous avons deux modèles d'imprimante 3D à notre disposition dans la salle proto. Pour obtenir une qualité similaire entre toutes les semelles que nous produisons, nous devons comparer certains critères :

x	Ultimaker 2+ connect	Ultimaker S3
Taille plateau	220 x 205 mm	190 x 200 mm
Temps d'impression	Entre 10 et 13 heures par semelles	Entre 6 et 8 heures par semelles
Qualité d'impression	Défauts constatés plus régulièrement	Moins de défaut d'impression

Nous choisissons d'utiliser en priorité l'imprimante Ultimaker S3 car elle permet d'imprimer plus rapidement avec moins de défauts. Cependant la taille du plateau est légèrement

inférieure à celle de la 2+ Connect. Cela n'est pas un problème dans notre cas car l'école de podologie nous fournit uniquement des semelles $\frac{3}{4}$ avec des dimensions inférieures aux dimensions du plateau de la S3.

Il a été nécessaire de faire des essais afin d'optimiser les paramètres. En effet la flexibilité du TPU nous oblige à adapter l'impression pour ne pas avoir de défaut majeur :

Vitesse d'impression	20 mm/s
Température de buse	230°
Rétraction du fil	2 mm
Adhérence	Type jupe

Partie 3 - Retour critique sur le projet

3.1 - Problèmes rencontrés

Dans l'ensemble, le projet s'est bien déroulé, malgré quelques difficultés mineures rencontrées lors des essais. Initialement, la machine de compression que nous devons utiliser dans la salle InProto s'est avérée inadaptée : sa platine d'efforts, trop peu sensible, ne parvenait pas à détecter les faibles efforts exercés sur nos échantillons.

3.2 - Perspective

Le projet que nous avons mené cette année possède plusieurs axes d'amélioration et d'approfondissement.

Tout d'abord, un point que nous avons envisagé d'aborder est la comparaison entre les empreintes thermoformées, les semelles orthopédiques classiques et les semelles imprimées. En utilisant le scanner, il serait possible de scanner les trois éléments cités précédemment afin de connaître la fiabilité des différents modèles. En comparant les scans, nous pourrions mesurer les variations de distance et donc connaître la solution la plus fidèle à la géométrie de l'empreinte de pied d'un patient.

De plus, il serait intéressant de continuer les recherches sur les lattices gyroïdes ou d'autres lattices isotropes en perfectionnant les essais de caractérisation réels.

3.3 - Conclusion quant au projet

Ce projet s'est révélé particulièrement enrichissant, nous permettant d'approfondir nos connaissances en sciences des matériaux tout en consolidant nos compétences techniques en fabrication additive. L'aspect concret de la réalisation nous a amenés à maîtriser des outils de pointe indispensables à l'ingénieur moderne :

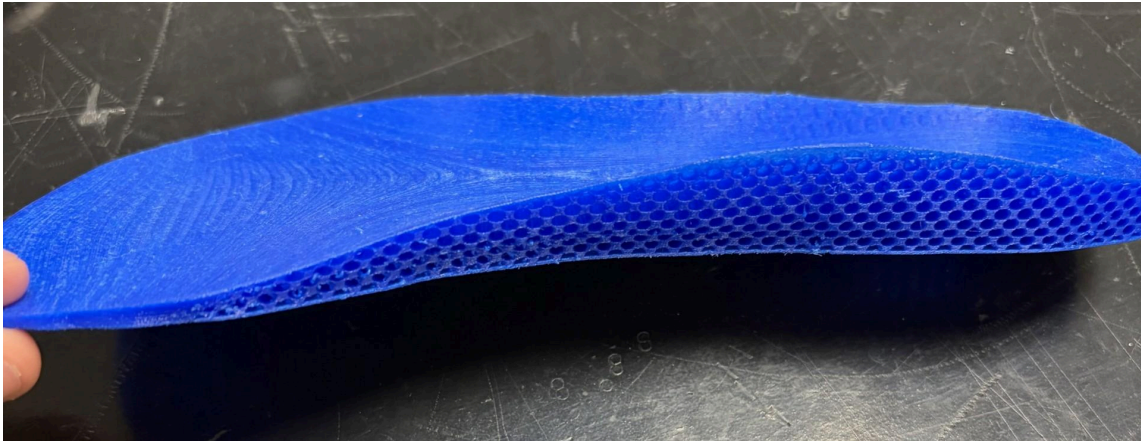
- Ingénierie numérique : L'utilisation des calculs par éléments finis sur CATIA a permis de valider scientifiquement nos choix de conception et de reproduire les mousses.
- Chaîne de numérisation : Nous avons pu exploiter le potentiel du scan 3D et nous perfectionner en reverse engineering sur CATIA pour transformer une donnée anatomique réelle en un modèle numérique exploitable.
- Ouverture disciplinaire : Au-delà du pur génie mécanique et productique, ce projet nous a immergés dans le domaine de la podologie. Cette ouverture a nécessité une communication avec l'équipe enseignante/élèves de l'école de podologie afin de mieux comprendre les enjeux du projet et d'avoir des retours sur les semelles que nous leur avons livrées. Cela nous a permis d'enrichir notre culture générale et d'approfondir notre vision du métier d'ingénieur.

En conclusion, le travail que nous avons mené cette année a démontré que l'alliance de la théorie mécanique et des nouvelles technologies de fabrication permet de répondre à des problématiques de santé concrètes et personnalisées.

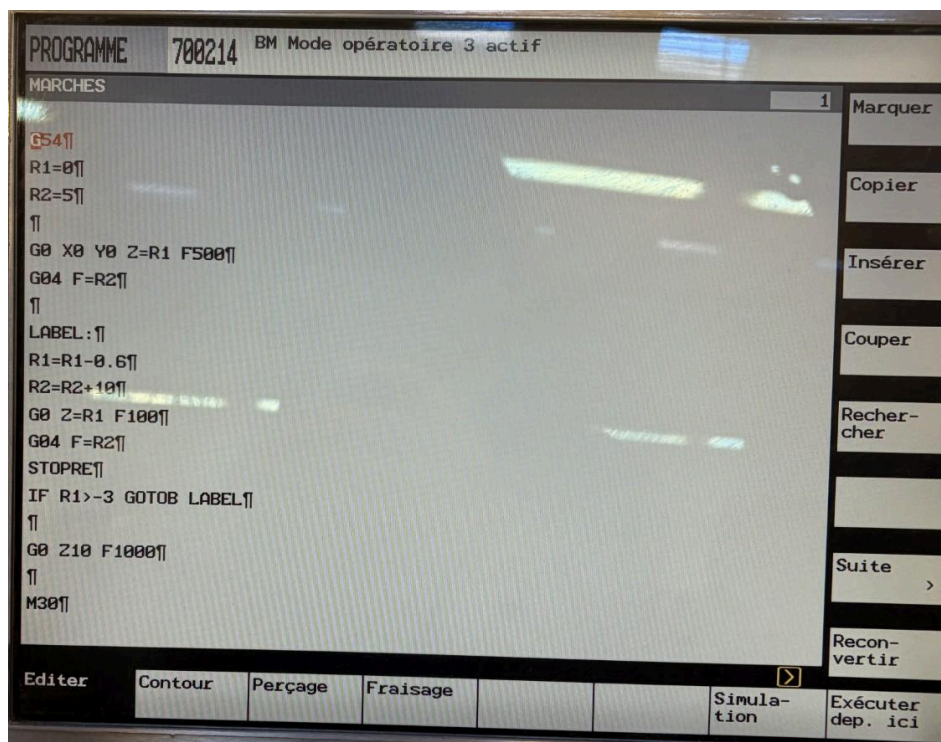
ANNEXES



ANNEXE 1



ANNEXE 2



ANNEXE 3

$= (H11 / \$K\$4) * (\$L\$4 / \$M\$4)$

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
E hexa	Dimension rond	F rond	E rond	Dimension carré	Force carré	E carré	Diff dim	Section	h0	Δh	
65750289	2,2	250,531	10,63286588	2,9	100,212	4,253129375	0,2	78,54	10	3	
52622955	2,25	231,642	9,831191821	2,95	90,39	3,836270748					
28278381	2,3	215,009	9,125265376	3	82,073	3,483286305					
97856211	2,35	198,022	8,404314704	3,05	73,373	3,114046837					
65592087	2,4	181,263	7,693040653	3,1	65,304	2,771587841					
3231786	2,45	163,113	6,922730729	3,15	57,023	2,420131285					
06042206	2,5	147,274	6,25050269	3,2	49,512	2,101354545					
69334476	2,55	132,206	5,610996908	3,23	45,567	$= (H11 / \$K\$4) * (\$L\$4 / \$M\$4)$					

ANNEXE 4

<i>Blanc</i>		<i>Rouge</i>		<i>Rose</i>		<i>Gris</i>	
S	273,692	S	278,507	S	278,167	S	311,823
h0	10,5975	h	9,3355	h0	7,844	h0	9,7495
p	51,507	p	49,282	p	19,224	p	11,0592
E	1,99438	E	1,65192	E	0,54209	E	0,34578

ANNEXE 5

GLOSSAIRE

Fabrication additive : La fabrication additive est un **procédé de création d'objets tridimensionnels à partir d'un fichier numérique**. Ce procédé est dit additif, car la fabrication repose sur la superposition de fines couches de matière, une par une.

Monobloc : D'une seule pièce, d'un seul bloc.

Lattice : Les structures lattices peuvent être définies comme étant **une combinaison d'un matériau et de zones vides, assemblés d'une manière créant des caractéristiques physiques inatteignables par un matériau seul**.

TPU95A : Le TPU 95A est un **filament flexible hautes performances offrant un excellent compromis entre élasticité, précision d'impression et résistance mécanique**. Grâce à sa dureté Shore 95A, il est plus souple que le TPU 98A tout en restant parfaitement maîtrisable sur la majorité des imprimantes 3D modernes.

Monomatériaux : Comme son nom l'indique, un film mono-matériau **remplace le mélange de plusieurs composants par un seul type de matériel**. L'exigence typique pour être considéré comme mono-matériau est de 90 % du même matériel en poids.

Isotrope : Qui présente les mêmes propriétés dans toutes les directions.

Gyroïde : Un gyroïde est une **surface minimale triple périodique infiniment connectée** découverte en 1970 par Alan Schoen (en).