

Nom et prénom de l'élève ingénieur : DUBOIS Lucas
Année / Spécialité : 2024 / Matériaux composite
Tuteur Polytech : LAGACHE Manuel

RAPPORT DE STAGE FI5

3D WoodPrint

INSTITUT // // // // //
DES SCIENCES ETIENNE
DU MOUVEMENT JULES
// // // // // MAREY

IUT Aix en Provence
413 Av. Gaston Berger, 13100 Aix-en-Provence
iut-aix-scol@univ-amu.fr
Sous la direction de TADRIST Loïc, Maître de conférences,
Université Aix-Marseille
loic.TADRIST@univ-amu.fr

Mots clefs

1. Impression 3D
2. Mère de kombucha
3. Biomatériaux
4. Caractérisation mécanique
5. Approche empirique par plan d'expérience (Matrice d'Hadamard)

Résumé

Dans le cadre du projet de recherche intitulé "3D WoodPrint", nous explorons le potentiel de la mère de kombucha en tant que biomatériau pour l'impression 3D. Le travail se concentre sur la caractérisation des propriétés mécaniques et viscoélastiques de ce matériau, ainsi que sur l'étude des paramètres d'extrusion influençant la qualité des fils imprimés. En utilisant un plan d'expérience basé sur la matrice d'Hadamard, nous avons optimisé les conditions d'impression, notamment le débit d'extrusion, le diamètre de la buse, et la composition chimique des mélanges. Les résultats montrent que, bien que la mère de kombucha présente certains défis techniques, elle possède un potentiel significatif pour des applications en impression 3D durable. Les résultats montrent que, bien que la mère de kombucha présente certains défis techniques, elle possède un potentiel significatif pour des applications en impression 3D durable. Nos expériences ont mis en évidence que la variabilité dans la composition chimique et les conditions de traitement de la mère de kombucha influencent directement ses propriétés mécaniques et sa capacité à être extrudée en fils de qualité. De plus, l'étude des paramètres d'impression a permis d'identifier les conditions optimales pour obtenir des impressions avec une bonne résolution et des caractéristiques mécaniques satisfaisantes, malgré la complexité de manipulation de ce biomatériau. Les perspectives pour des travaux futurs incluent l'amélioration des formulations de mélange et l'exploration de nouvelles techniques de post-traitement pour renforcer les performances des matériaux imprimés.

Table des matières

1. Introduction : Le Kombucha un matériau prometteur pour l'impression 3D ?.....	7
2. Etat de l'art : Les recherches révèlent le potentiel de la cellulose SCOBY en impression 3D.....	7
2.1. Introduction générale et contexte : La transition de l'impression 3D des polymères synthétiques vers des alternatives biosourcées en réponse aux enjeux écologiques.....	7
2.2. Cellulose SCOBY comme matériau innovant : La cellulose bactérienne produite par le SCOBY se distingue par ses propriétés mécaniques exceptionnelles et son potentiel pour l'impression 3D.	8
2.3. Applications de la cellulose dans l'impression 3D : Les composites à base de cellulose offrent des solutions durables et adaptatives, allant de l'architecture à l'ingénierie biomédicale	8
2.4. Défis techniques et solutions potentielles.....	9
2.5. Potentiel et perspectives d'avenir : L'optimisation de la fonctionnalisation de la cellulose et le développement de matériaux réactifs ouvrent la voie à des applications futures innovantes	9
3. Méthodologie : Approche expérimentale pour optimiser les paramètres d'impression 3D... 	10
3.1. Plan d'expérience : La matrice d'Hadamard permet d'évaluer efficacement l'impact de plusieurs paramètres sur la qualité du matériau imprimé	10
3.1.1. Définition : La matrice d'Hadamard assure une indépendance statistique des facteurs testés, essentielle pour des résultats fiables.....	10
3.1.2. Utilisation en plan d'expérience : Structuration des essais pour minimiser le nombre d'essais tout en maximisant la qualité des données.....	10
3.1.3. Caractéristiques principales : L'orthogonalité et la simplicité de la matrice d'Hadamard permettent une interprétation claire des résultats expérimentaux.	11
3.1.4. Application dans notre cas : Optimisation des paramètres d'extrusion et de composition des mélanges pour améliorer les performances du matériau	12
3.2. Matériaux et équipements utilisés : Sélection et justification des matériaux et des équipements pour la réalisation des tests.....	14
3.2.1. Mère de Kombucha : Procédures de sélection, acquisition et stockage de la mère de kombucha pour l'expérimentation	14
3.2.2. Additifs : Choix des additifs, leur rôle dans les mélanges, et leur impact sur les propriétés du matériau final	15
3.2.3. Banc d'essai : Conception et assemblage du banc d'essai pour tester les propriétés du matériau Kombucha	15
3.3. Réalisation du banc d'essai : Mise en place des différents composants du banc d'essai et validation des performances	15
3.3.1. Étude du fil en sortie de buses : Analyse du comportement des fils extrudés à travers différentes buses sous diverses conditions d'extrusion	15
3.3.1.1. Pousse-seringue : Conception artisanale et utilisation d'un pousse-seringue pour une extrusion stable et contrôlée	16
3.3.1.2. Tuyaux et buses : Sélection et modification des buses pour répondre aux besoins expérimentaux spécifiques.....	17

3.3.1.3. Contrôle du pousse-seringue : Développement du système de contrôle pour gérer avec précision l'extrusion des mélanges	17
3.3.2. Étude dimensionnelle du fil après dépose : Mesure des dimensions des fils après dépose et séchage, avec une attention particulière à la rétractation volumique	18
3.3.3. Étude en flexion de poutre de kombucha : Réalisation de tests de flexion sur des poutres en Kombucha pour déterminer le module de Young avant et après séchage.	18
3.4. Récupération des données : Techniques utilisées pour capturer, analyser et interpréter les données obtenues à partir des essais.....	19
4. Résultats : Les essais montrent que les propriétés du Kombucha sont fortement influencées par les conditions d'extrusion et la composition des mélanges	20
4.1. Fils en sortie de buses : Résultats démontrant comment la distance d'extrusion affecte les dimensions des fils et leur stabilité	20
4.2. Fils déposés : Impact du séchage sur les dimensions des fils déposés, avec une analyse des taux de rétractation volumique	20
4.3. Flexion des poutres : Étude comparative des propriétés mécaniques des poutres avant et après cuisson, révélant les effets de la déshydratation	22
4.4. Tableau des résultats : Présentation synthétique des coefficients d'impact de chaque variable d'entrée sur les sorties mesurées	24
5. Discussion : Analyse approfondie des résultats obtenus et exploration des perspectives d'optimisation pour l'impression 3D avec le Kombucha.....	25
5.1. Analyse des fils en sortie de buses : Largeur de buse et débit d'extrusion plus impactant que la composition chimique.	25
5.2. Comportement des fils déposés avant et après séchage : Discussion sur la rétractation volumique, le rôle stabilisateur de l'alginate, et les défis associés à la mesure de ces phénomènes	26
5.3. Tests de flexion des poutres de Kombucha : Résultats des tests de flexion, montrant l'augmentation de la rigidité après cuisson et les implications pour différentes applications.	27
6. Conclusion : Synthèse des résultats, mise en lumière des défis techniques, et propositions pour des travaux futurs visant à améliorer les performances du Kombucha en impression 3D.....	28
7. Annexes	29
7.1. Annexes méthodologie	29
7.2. Annexes résultats	42
8. Bibliographie	44

Table des figures

Figure 1 : CAO Pousse-seringue	16
Figure 2 : CAO Pousse-seringue vu de dessus	16
Figure 3 : Mise en place de la buse sur son support imprimé en 3D et fixé sur le bâti, le fond blanc permet un bon traitement d'image et le tuyau est utilisé pour l'apport de matière	17
Figure 4 : Dashboard Node-Red pour le contrôle du pousse-seringue.....	18
Figure 5 : Poutres de Kombucha sur support plastique avant cuisson	19
Figure 6 : Caméra branchée sur le Raspberry pi	19
Figure 7 : Photo fil d'extrusion avant traitement	20
Figure 8 : Photo fil d'extrusion après traitement sur ImageJ	20
Figure 9 : Fil tiré de Kombucha avant séchage sur son support en vue de face.....	21
Figure 10 : Fil tiré de Kombucha après séchage sur son support en vue de face	21
Figure 11 : Poutre sans charge avant cuisson.....	22
Figure 12 : Poutre sans charge après cuisson	22
Figure 13 : Poutre avec charge avant cuisson	23
Figure 14 : Poutre avec charge après cuisson.....	23
Figure 15 : Poutre en retour post charge avant cuisson.....	23
Figure 16 : Poutre en retour post charge après cuisson.....	24

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à M. Loïc TADRIST, mon tuteur de recherche, pour son encadrement exceptionnel, ses conseils éclairés et sa disponibilité tout au long de ce stage. Son expertise et son soutien ont été essentiels à la progression de mes travaux de recherche.

Je remercie également M. Santiago ARROYAVE-TOBON et M. Stéphane VIOLLET, mes tuteurs secondaires au sein du laboratoire, pour leurs précieux conseils, leurs suggestions constructives et leur aide qui ont enrichi mes recherches.

Un grand merci à M. Manuel LAGACHE, mon tuteur académique et membre du jury, pour son accompagnement tout au long de ce stage. Ses conseils académiques et son rôle en tant que membre du jury ont été d'une grande aide dans la réalisation de ce travail.

Je n'oublie pas mes collègues du laboratoire, en particulier les autres stagiaires et doctorants, pour leur esprit de camaraderie, leur soutien moral et les échanges scientifiques stimulants que nous avons partagés. Leur présence a grandement contribué à la qualité de cette expérience de recherche.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à l'entreprise LOKKI-Kombucha, qui m'a généreusement fourni de la mère de kombucha pour la réalisation de mes travaux. Leur contribution a été indispensable à l'avancement de mon projet, et je leur suis très reconnaissant pour leur collaboration.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement ma famille pour leur soutien constant et leurs encouragements tout au long de ce stage. Leur présence m'a été d'une aide précieuse, et je leur en suis profondément reconnaissant.

1. Introduction : Le Kombucha un matériau prometteur pour l'impression 3D ?

Dans un contexte où l'innovation technologique s'associe de plus en plus avec la recherche de solutions durables, le développement de nouveaux matériaux pour l'impression 3D devient un enjeu crucial. L'impression 3D, initialement utilisée pour la création de prototypes, s'est progressivement étendue à des applications industrielles, médicales, et même artistiques. Cependant, l'utilisation de polymères synthétiques et de métaux dans ce domaine soulève des questions écologiques, poussant les chercheurs à explorer des alternatives plus respectueuses de l'environnement (1).

C'est dans cette optique que s'inscrit le projet "3D WoodPrint", mené au sein du laboratoire de recherche de l'Université d'Aix-Marseille, plus précisément sur le site de l'IUT d'Aix en Provence département GMP. L'objectif de ce stage de recherche était d'explorer les propriétés d'un matériau peu conventionnel : la mère de kombucha, un symbiote de bactéries et de levures (SCOBY : Symbiotic Culture Of Bacteria and Yeast) connu pour sa capacité à produire une cellulose naturelle (1). L'idée principale était de caractériser ce matériau pour évaluer son potentiel en tant que biomatériau pour l'impression 3D.

Ce projet s'inscrit dans la continuité d'une étude menée par un groupe de six étudiants du département GMP, sur laquelle j'ai pu m'appuyer. Certains éléments, comme les contacts avec des entreprises fabriquant du kombucha ou encore la préconception d'un pousse-seringue, m'ont permis de gagner un temps précieux dans l'avancement de mon étude.

Ce rapport a pour but de présenter les différentes étapes de cette recherche, depuis le développement d'un banc d'essai jusqu'à la caractérisation des propriétés viscoélastiques et mécaniques de la mère de kombucha afin d'évaluer son aptitude à être utilisée dans un processus d'impression 3D. À travers cette étude, nous espérons contribuer à l'identification de nouvelles méthodes pour la fabrication additive, en alignant les innovations technologiques avec les impératifs écologiques.

2. Etat de l'art : Les recherches révèlent le potentiel de la cellulose SCOBY en impression 3D

2.1.Introduction générale et contexte : La transition de l'impression 3D des polymères synthétiques vers des alternatives biosourcées en réponse aux enjeux écologiques.

L'impression 3D, également connue sous le nom de fabrication additive, a connu une évolution rapide au cours des dernières décennies. Initialement développée pour la création rapide de prototypes, cette technologie a rapidement étendu son champ d'application à une multitude de domaines, tels que l'industrie, la médecine, l'architecture, et même l'art. Cette expansion a été facilitée par les avancées dans les matériaux utilisés pour l'impression 3D, qui sont passés des polymères synthétiques traditionnels à des alternatives plus durables et respectueuses de l'environnement (2) (1).

2.2. Cellulose SCOBY comme matériau innovant : La cellulose bactérienne produite par le SCOBY se distingue par ses propriétés mécaniques exceptionnelles et son potentiel pour l'impression 3D.

Le SCOBY, utilisé traditionnellement dans la fermentation du kombucha, est une culture symbiotique de bactéries et de levures qui produit une cellulose bactérienne d'une pureté et d'une qualité exceptionnelle. Contrairement à la cellulose végétale, la cellulose bactérienne est produite sous forme de pellicule continue, ce qui lui confère des propriétés mécaniques intéressantes, telles qu'une résistance à la traction et une flexibilité élevée, ainsi qu'une excellente capacité de rétention d'eau (2).

Les propriétés physiques de la cellulose SCOBY ont suscité un intérêt croissant pour son intégration dans des formulations de matériaux pour l'impression 3D. Les études récentes montrent que cette cellulose peut être utilisée pour créer des composites biopolymères capables de répondre à des stimuli environnementaux, comme l'humidité et la température, ce qui ouvre la voie à des applications dans des domaines nécessitant des matériaux réactifs et adaptatifs (1) (3).

La cellulose SCOBY présente également des avantages en termes de durabilité. En effet, elle est produite à partir de ressources renouvelables et dans des conditions de faible énergie, ce qui en fait une alternative écologiquement responsable aux polymères synthétiques utilisés traditionnellement en impression 3D. De plus, sa biodégradabilité naturelle signifie qu'elle peut être réintégrée dans le cycle biologique sans impact environnemental négatif (4).

2.3. Applications de la cellulose dans l'impression 3D : Les composites à base de cellulose offrent des solutions durables et adaptatives, allant de l'architecture à l'ingénierie biomédicale.

L'utilisation de la cellulose dans l'impression 3D s'est étendue à plusieurs domaines, grâce à ses propriétés mécaniques et à sa compatibilité environnementale. La cellulose nanofibrillée, par exemple, a été largement étudiée pour son potentiel à renforcer les polymères bio-dérivés comme l'acide polylactique (PLA). Les composites formés par l'intégration de cellulose nanofibrillée dans des matrices polymères ont montré une amélioration significative de la résistance mécanique et de la durabilité, tout en maintenant une faible empreinte carbone (1) (3).

En plus de l'amélioration des propriétés mécaniques, l'intégration de la cellulose dans les matériaux d'impression 3D permet également de développer des matériaux réactifs capables de changer de forme ou de propriétés en réponse à des stimuli externes, comme l'humidité ou la température. Ces matériaux dits "4D" sont particulièrement intéressants pour des applications dans les domaines de l'architecture adaptative et de l'ingénierie biomédicale, où les propriétés du matériau doivent évoluer en fonction de l'environnement (3).

L'une des applications les plus prometteuses de la cellulose dans l'impression 3D est le développement de biomatériaux pour l'ingénierie tissulaire. En raison de sa biocompatibilité, la cellulose bactérienne peut être utilisée comme échafaudage pour la croissance cellulaire, facilitant ainsi la régénération des tissus. De plus, sa capacité à retenir l'eau et à former des structures poreuses la rend idéale pour le transport de nutriments et d'oxygène, essentiels à la survie des cellules (2).

2.4.Défis techniques et solutions potentielles

Malgré les nombreux avantages de la cellulose, son intégration dans les processus de fabrication additive présente des défis importants. L'un des principaux défis est la dispersion homogène de la cellulose dans les matrices polymères. En raison de la nature hydrophile de la cellulose, elle a tendance à former des agglomérats lorsqu'elle est mélangée avec des polymères hydrophobes, ce qui peut entraîner une dégradation des propriétés mécaniques du matériau composite (3).

Pour surmonter ce problème, des techniques de modification chimique de la surface de la cellulose ont été explorées. Ces techniques incluent le greffage de groupes hydrophobes sur les chaînes de cellulose, ce qui améliore leur compatibilité avec les polymères hydrophobes et permet une dispersion plus homogène dans la matrice (4). En outre, l'utilisation de surfactants et de procédés de traitement mécanique, comme le broyage ou l'ultrasonication ont été proposés pour améliorer la dispersion des fibres de cellulose dans les composites.

Un autre défi concerne le contrôle des propriétés rhéologiques des mélanges à base de cellulose utilisés pour l'impression 3D. Les formulations de cellulose doivent être suffisamment fluides pour être extrudées à travers les buses d'impression, tout en maintenant une viscosité adéquate pour éviter les effondrements post-impression. Des recherches sont en cours pour optimiser les formulations de ces mélanges, en ajustant la concentration de cellulose, le type d'additifs, et les conditions d'impression pour obtenir un équilibre optimal (1).

2.5.Potentiel et perspectives d'avenir : L'optimisation de la fonctionnalisation de la cellulose et le développement de matériaux réactifs ouvrent la voie à des applications futures innovantes.

La cellulose, et en particulier la cellulose SCOBY, offre un potentiel immense pour le développement de nouvelles applications dans l'impression 3D, grâce à ses propriétés uniques et sa compatibilité environnementale. Les innovations récentes dans l'impression 4D, où les objets imprimés peuvent changer de forme en réponse à des stimuli externes, montrent que la cellulose pourrait jouer un rôle clé dans la création de matériaux réactifs et adaptatifs (3).

Les recherches futures se concentreront probablement sur l'amélioration de la fonctionnalisation de la cellulose pour lui conférer de nouvelles propriétés, telles que la conductivité électrique ou des propriétés antimicrobiennes, ouvrant ainsi la voie à des applications encore plus larges dans des domaines tels que l'électronique flexible et les dispositifs médicaux (3). De plus, le développement de nouvelles techniques de post-traitement, telles que le séchage sous vide ou l'application de revêtements protecteurs, pourrait améliorer la durabilité et la stabilité des objets imprimés à base de cellulose.

En conclusion, bien que des avancées significatives aient été réalisées dans la compréhension des propriétés de la cellulose pour des applications en fabrication additive, de nombreux défis techniques subsistent, en particulier dans le contexte spécifique du travail sur la mère de kombucha. Ce projet a révélé plusieurs obstacles, notamment la difficulté de stabiliser le kombucha lors de son passage de l'état fluide à l'état solide sans compter la difficulté d'extrusion liée aux morceaux résiduels qui peuvent boucher les buses. Le fait que le kombucha utilise l'eau comme solvant a posé des problèmes de séchage, avec la formation de bulles et des variations de densité qui compromettent la qualité finale des pièces moulées ou imprimées.

Ces défis techniques n'ont pas encore été complètement résolus, même si une startup a exploré la compression de la cellulose pour d'autres applications. Cependant, l'application du kombucha en impression 3D reste largement inexplorée. Ce travail s'inscrit dans cette perspective novatrice, en cherchant à comprendre et à surmonter ces difficultés pour permettre la création de pièces solides et cohérentes à partir de ce biomatériau.

Les résultats obtenus jusqu'à présent montrent que malgré les obstacles, il existe un potentiel important pour utiliser la cellulose de kombucha dans des procédés d'impression 3D. Cela pourrait à terme révolutionner la manière dont les matériaux sont fabriqués, tout en répondant aux impératifs écologiques. Toutefois, pour que ce potentiel soit pleinement réalisé, des recherches supplémentaires sont nécessaires, notamment sur les méthodes de séchage et de stabilisation des structures imprimées.

3. Méthodologie : Approche expérimentale pour optimiser les paramètres d'impression 3D

3.1. Plan d'expérience : La matrice d'Hadamard permet d'évaluer efficacement l'impact de plusieurs paramètres sur la qualité du matériau imprimé.

La conception d'un plan d'expérience est cruciale pour mener une étude empirique de manière efficace, en particulier lorsqu'il s'agit d'explorer un grand nombre de facteurs tout en minimisant le nombre d'essais nécessaires. Pour ce faire, l'utilisation d'une matrice d'Hadamard s'est avérée être une méthode statistique puissante et pertinente. Cette méthode permet non seulement de structurer les essais de manière rigoureuse, mais aussi de garantir une qualité d'information statistique optimale, ce qui est essentiel pour tirer des conclusions fiables et précises.

3.1.1. Définition : La matrice d'Hadamard assure une indépendance statistique des facteurs testés, essentielle pour des résultats fiables.

Une matrice d'Hadamard est une matrice carrée unique, composée exclusivement d'entrées égales à +1 et -1. Ce qui distingue ces matrices des autres est leur propriété d'orthogonalité, signifiant que le produit scalaire de deux lignes distinctes est toujours égal à zéro. En d'autres termes, chaque ligne de la matrice est statistiquement indépendante des autres, ce qui permet une évaluation précise des effets des facteurs testés. Cette orthogonalité est un atout majeur lorsqu'il s'agit d'isoler les effets individuels des facteurs, en minimisant les interférences ou les interactions non désirées entre eux.

3.1.2. Utilisation en plan d'expérience : Structuration des essais pour minimiser le nombre d'essais tout en maximisant la qualité des données.

Dans le contexte de la recherche expérimentale, une matrice d'Hadamard est particulièrement utile pour organiser les essais de manière méthodique et efficace. Elle est employée pour structurer les expériences de sorte que les effets principaux des facteurs et parfois même leurs interactions puissent être évalués de manière indépendante. En utilisant cette matrice, il est possible de tester simultanément plusieurs facteurs tout en réduisant considérablement le nombre d'essais requis. Cela est particulièrement avantageux dans des expériences complexes

où de nombreux facteurs sont à considérer, car cela permet non seulement de gagner du temps et des ressources, mais aussi de réduire les erreurs expérimentales en limitant les combinaisons à tester. De plus, la structure orthogonale de la matrice garantit que chaque facteur est analysé de manière impartiale, sans interférence des autres facteurs.

3.1.3. Caractéristiques principales : L'orthogonalité et la simplicité de la matrice d'Hadamard permettent une interprétation claire des résultats expérimentaux.

Pour construire une matrice d'Hadamard, il faut d'abord en définir la taille en fonction du nombre de facteurs à tester. Prenons l'exemple de 2 facteurs, ce qui nous conduit à choisir une matrice de taille $N=4$. La première ligne de la matrice est prédéterminée et est utilisée comme base pour construire les autres lignes de la matrice.

$$N = 4 \quad + + -$$

A partir de la première ligne de ces matrices, il est possible de les construire :

- La seconde ligne se déduit de la première par permutation circulaire, par la droite.
- Cette permutation permet de construire les $N-1$ premières lignes de la matrice d'expériences.
- La dernière ligne est constituée de -1

Exemple : $N = 4 \quad + + -$
 Matrice droite :

+	+	-
-	+	+
+	-	+
-	-	-

- **Orthogonalité** : La propriété d'orthogonalité des matrices d'Hadamard est fondamentale pour assurer que chaque facteur dans l'expérience est testé de manière totalement indépendante des autres. Cela signifie que les interactions potentielles entre les facteurs sont minimisées, permettant une analyse claire et directe des effets principaux. Cette indépendance statistique est cruciale pour obtenir des résultats fiables, particulièrement dans les expériences complexes où de multiples facteurs peuvent interagir.
- **Efficacité** : Une des plus grandes forces d'un plan d'expérience utilisant une matrice d'Hadamard est son efficacité. Pour un nombre donné de facteurs k , la matrice permet de tester $2^k - 1$ combinaisons en seulement 2^k essais. Par exemple, pour $k=4$, au lieu de devoir réaliser $2^4 = 16$ essais pour tester toutes les combinaisons possibles, un plan d'expérience basé sur la matrice d'Hadamard permet de réduire ce nombre à 8 essais seulement. Cette réduction significative du nombre d'essais est particulièrement utile dans des contextes où les essais sont coûteux ou difficiles à réaliser.
- **Simplicité** : Outre son efficacité, la simplicité de la matrice d'Hadamard est un autre avantage notable. Cette méthode permet de simplifier non seulement la conception expérimentale mais aussi l'analyse des résultats. En réduisant le nombre de combinaisons de facteurs à tester tout en conservant une estimation précise des effets des facteurs principaux, cette méthode permet de rendre l'interprétation des résultats plus accessible, même dans des expériences impliquant un grand nombre de variables.

3.1.4. Application dans notre cas : Optimisation des paramètres d'extrusion et de composition des mélanges pour améliorer les performances du matériau.

Dans le cadre de cette étude, nous avons identifié quatre variables d'entrée critiques pour notre système, que nous avons paramétrées avec une valeur basse (-1) et une valeur haute (+1) :

- **Diamètre de buse d'extrusion** : (1,35 mm ; 4 mm)
- **Débit d'extrusion** : (2 RPM ; 8 RPM)
- **Pourcentage d'eau dans le mélange** : (0 % ; 20 %)
- **Quantité d'alginate dans le mélange** : (2 g/L ; 10 g/L)

Ces paramètres ont été choisis en fonction de leur impact potentiel sur les propriétés finales du matériau imprimé. Le diamètre de la buse et le débit d'extrusion influencent directement le flux et la formation du filament, tandis que le pourcentage d'eau et la quantité d'alginate affectent la composition chimique et les propriétés mécaniques du matériau.

Pour évaluer l'impact de ces variables sur les caractéristiques du matériau, nous avons mesuré plusieurs paramètres de sortie :

- **Diamètre du filet de sortie** à différentes distances de la buse : 0, 1, 2 et 3 mm
- **Largeur (W) et hauteur (H) du fil de dépose** avant et après séchage

En tenant compte de ces quatre variables d'entrée, la technique de la matrice d'Hadamard nous permet de concevoir un plan d'expérience optimisé. Conformément à cette technique, nous avons élaboré une matrice d'expérience qui guide la réalisation des essais, en minimisant le nombre d'essais nécessaires tout en maximisant la qualité et la pertinence des données obtenues. Cette approche nous permettra de déterminer précisément l'effet de chaque variable sur les propriétés finales du matériau, tout en assurant une gestion efficace des ressources expérimentales.

N°Exp	X1 -> Largeur de buse d_b	X2 -> Débit d'extrusion Q	X3 -> % eau w	X4 -> Alginate a
1.	1	1	1	-1
2.	-1	1	1	1
3.	-1	-1	1	1
4.	1	-1	-1	1
5.	-1	1	-1	-1
6.	1	-1	1	-1
7.	1	1	-1	1
8.	-1	-1	-1	-1

Tableau 1 : Matrice d'Hadamard pour l'analyse du fil en sorti de buse et les fils de dépose

Cette matrice d'Hadamard est essentielle pour structurer notre plan d'expérience de manière systématique. En générant les différents tests à effectuer, elle nous permet de recueillir les données nécessaires sur les variables de sortie. Chaque test produit des valeurs spécifiques pour les différentes variables de sortie, que nous devons ensuite traiter et analyser. L'objectif est de déterminer l'impact de chaque entrée, ou facteur, sur les résultats finaux. Cette approche nous offre une vue d'ensemble claire des interactions entre les facteurs testés, tout en assurant une grande précision dans l'évaluation des effets individuels de chaque variable.

Pour compléter cette étude, nous avons conçu une autre série de tests visant à examiner les propriétés mécaniques des poutres fabriquées à partir de nos différents mélanges. Dans cette série d'expériences, nous avons sélectionné quatre paramètres d'entrée critiques, chacun ayant une valeur basse (-1) et une valeur haute (+1) :

- **Pourcentage d'eau dans le mélange** : (0 % ; 20 %)
- **Quantité d'alginate** : (2 g/L ; 10 g/L)

Ces paramètres ont été choisis en raison de leur influence potentielle sur les propriétés mécaniques des poutres, telles que leur flexibilité, leur rigidité et leur capacité à reprendre leur forme initiale après déformation. En ajustant ces variables, nous cherchons à comprendre comment elles affectent les performances des poutres avant et après cuisson.

Les variables de sortie que nous avons mesurées dans ces tests incluent :

- **La flèche** : Cette mesure correspond à la déformation maximale de la poutre sous une charge spécifique. Elle nous donne une indication directe de la flexibilité du matériau.
- **Le module de Young (E)** : Ce module est un indicateur de la rigidité du matériau. Il est calculé à partir de la relation entre la force appliquée et la déformation observée. Un module de Young élevé signifie que le matériau est rigide, tandis qu'un module plus faible indique une plus grande élasticité.
- **Le retour en position après enlèvement de la charge** : Ce paramètre mesure la capacité du matériau à revenir à sa forme initiale après avoir été soumis à une charge. Il est crucial pour évaluer la résilience du matériau, particulièrement dans des applications où des déformations répétées sont attendues.

En appliquant la technique de la matrice d'Hadamard avec seulement deux paramètres d'entrée, nous obtenons une matrice d'expérience simplifiée. Cette matrice nous permet de réaliser les essais de manière efficace tout en conservant la capacité d'analyser les effets principaux de chaque variable ainsi que leurs interactions potentielles. Grâce à cette méthodologie, nous pouvons non seulement identifier les paramètres qui ont le plus grand impact sur les propriétés mécaniques des poutres, mais aussi optimiser les formulations de nos mélanges pour atteindre les performances souhaitées.

N°Exp	sans	et
	avec four	
	X1 -> % eau w	X2 -> Alginate a
1.	1	1
2.	-1	1
3.	1	-1
4.	-1	-1

Tableau 2 : Matrice d'Hadamard pour l'analyse des propriétés mécaniques sur les tests de flexions

On obtient les effets estimés \hat{b}_i à l'aide de cette formule où X est la matrice d'expérience et Y la matrice contenant les valeurs de sorties des tests :

$$\hat{B} = (X^T * X)^{-1} * X^T * Y$$

Ici, \hat{B} correspond à la matrice $1 \times N$ avec N le nombre de variables d'entrées dans la matrice d'Hadamard. Cette formule basée sur la méthode des moindres carrés permet d'obtenir une estimation des valeurs de sorties en utilisant une matrice pseudo inverse de X .

Ici la pseudo inverse de X est :

$$(X^T * X)^{-1} * X^T$$

On peut utiliser cette méthode car nous obtenons un système sur-contraint étant donné que nous avons plus d'équation que d'inconnu.

Maintenant, il est important de mettre en place une méthode afin de conclure si chaque b_i est assez élevé pour être considéré comme influent dans le système.

Pour cela, nous allons utiliser la technique de Nemrodw. Nous commençons par calculer un écart type σ des valeurs expérimentales en répétant plusieurs fois un même test. Ensuite nous pouvons calculer $Var \hat{B}$.

$$Var \hat{B} = (X^T * X)^{-1} * \sigma^2$$

On obtient une matrice diagonale avec les valeurs de $Var b_i$. Par la suite, on peut obtenir les bornes qui permettront de cadrer nos valeurs.

$$Borne = \pm t_0 * \sqrt{Var b_i}$$

Le t_0 est obtenu à la suite de la lecture de la table student en Annexe 1. On prend un intervalle de confiance de 95% donc ici un γ de 0,05 et le degré de liberté se trouve en fonction du nombre de facteur que l'on prend en compte dans notre matrice d'Hadamard. Par exemple pour 4 facteurs on aura un ddl de 3 donc finalement on récupère un $t_0 = 2,353$.

Cette méthode permet d'obtenir un intervalle dans lequel, si les valeurs b_i sont incluses, elles deviennent non pertinentes car elles se trouvent dans le bruit créé par l'incertitude des mesures expérimentales.

3.2. Matériaux et équipements utilisés : Sélection et justification des matériaux et des équipements pour la réalisation des tests.

3.2.1. Mère de Kombucha : Procédures de sélection, acquisition et stockage de la mère de kombucha pour l'expérimentation.

La première étape a été de trouver un moyen efficace et peu coûteux de se procurer de la mère de kombucha. La solution la plus intéressante a été de contacter une entreprise produisant du kombucha, car pour ces entreprises, la mère de kombucha, une fois utilisée, devient un déchet sans grande valeur. Étant donné qu'un étudiant ayant travaillé précédemment sur le projet avait déjà établi un contact avec une entreprise située à Cavaillon, près d'Aix-en-Provence, il semblait logique de poursuivre cette collaboration. J'ai donc rapidement pu récupérer une trentaine de litres de mère de kombucha, facile à stocker dans un réfrigérateur pour la conserver.

3.2.2. Additifs : Choix des additifs, leur rôle dans les mélanges, et leur impact sur les propriétés du matériau final.

Étant donné que nous souhaitons étudier les propriétés de la mère de kombucha dans son état le plus naturel possible, il était important de limiter l'ajout d'additifs dans nos mélanges de base. C'est pourquoi nous avons choisi de n'étudier que l'influence de l'eau et de l'alginate (un gélifiant alimentaire). Ces deux éléments ont été sélectionnés car ils ne dégradent ni le produit de base ni l'environnement. Nous reviendrons plus tard pour discuter de la quantité d'additifs ajoutée dans nos solutions.

3.2.3. Banc d'essai : Conception et assemblage du banc d'essai pour tester les propriétés du matériau Kombucha.

Comme mentionné précédemment, l'une des tâches principales de ce stage a été de concevoir un banc d'essai permettant d'obtenir des valeurs fiables. Pour ce faire, plusieurs éléments étaient nécessaires :

- Un pousse-seringue pour assurer une stabilité du débit de solution lors de la dépose :
 - Structure de support
 - Arduino et Shield moteur
 - Moteur
 - Vis sans fin
- Des buses d'extrusion pour déterminer le diamètre de sortie
- Une plateforme de déplacement 1D pour garantir une vitesse de dépose constante et contrôlable :
 - Structure de support
 - Arduino et Shield moteur
 - Moteur
- Une caméra pour Raspberry Pi afin de capturer des images pour le traitement d'image sur les différents tests (tests de flexion et mesure des dimensions à la sortie de la buse)
- Un Raspberry Pi pour le contrôle général de notre banc d'essai : envoi des informations aux moteurs et contrôle de la caméra
- Divers supports pour installer et positionner les différents éléments :
 - Support de caméra imprimé en 3D
 - Support de Raspberry Pi imprimé en 3D
 - Support pour les tests de flexion imprimé en 3D

3.3. Réalisation du banc d'essai : Mise en place des différents composants du banc d'essai et validation des performances.

Nous pouvons diviser cette section "Réalisation" en trois parties distinctes, chacune étant détaillée pour expliquer comment les éléments du banc d'essai ont été conçus.

3.3.1. Étude du fil en sortie de buses : Analyse du comportement des fils extrudés à travers différentes buses sous diverses conditions d'extrusion.

Comme mentionné précédemment, l'objectif était d'étudier le comportement du fil en sortie de buse afin de prévoir comment le liquide réagit lors d'une extrusion sous pression. Pour ce faire, nous allons examiner les différents éléments.

3.3.1.1. Pousse-seringue : Conception artisanale et utilisation d'un pousse-seringue pour une extrusion stable et contrôlée.

Le pousse-seringue a été un élément essentiel tout au long de mes expériences, car il permettait d'assurer une poussée continue, fluide et contrôlable de notre solution. De plus, étant donné le coût très élevé des pousse-seringues disponibles dans le commerce, généralement utilisés dans le domaine médical, il était logique de développer une version artisanale.

Le système est motorisé, et le mouvement est généré par un mécanisme à vis sans fin relié au moteur. Grâce à un écrou inséré dans la pièce orange, qui sert de poussoir, un mouvement de translation est obtenu. Des glissières sont intégrées pour guider le poussoir avec précision. La pièce bleue assure le maintien de la seringue en position. L'ensemble de la structure, y compris le poussoir et la pièce de maintien, a été imprimé en 3D. (Figure 1, Figure 2).

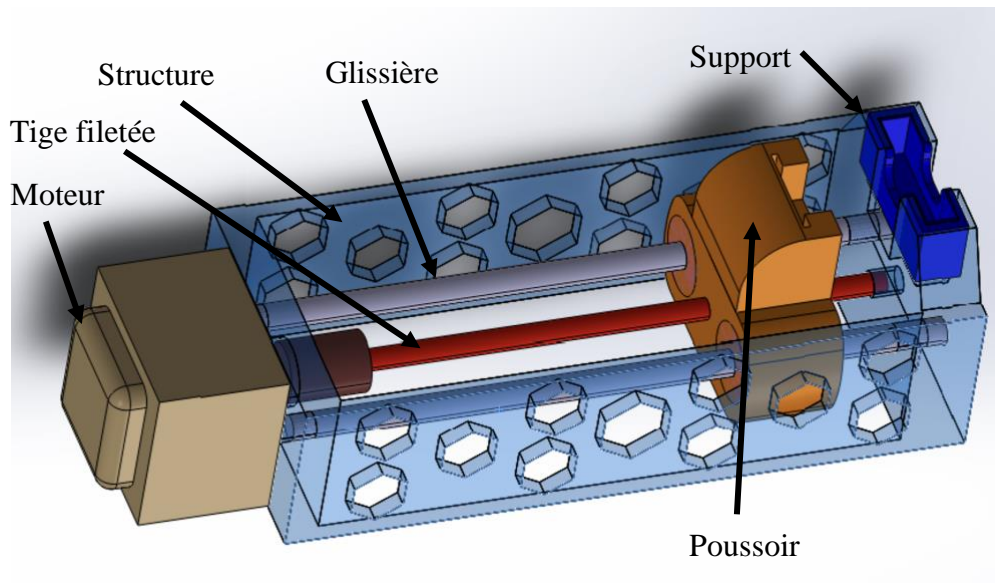


Figure 1 : CAO Pousse-seringue

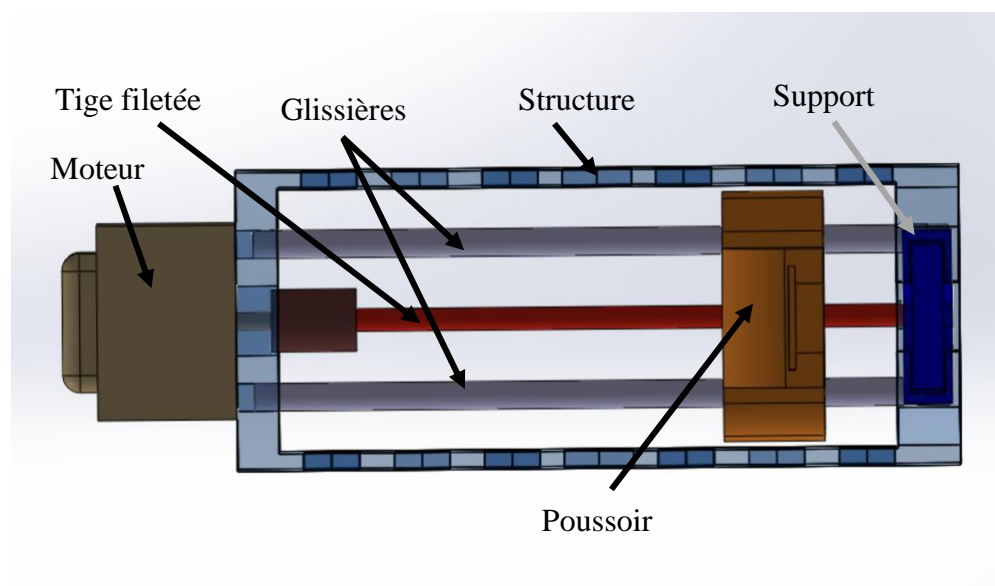


Figure 2 : CAO Pousse-seringue vu de dessus

3.3.1.2. Tuyaux et buses : Sélection et modification des buses pour répondre aux besoins expérimentaux spécifiques.

Une fois le pousse-seringue prêt à l'emploi, il ne restait plus qu'à concevoir le système d'extrusion. Pour ce faire, j'ai simplement récupéré des tuyaux pneumatiques qui se prêtaient très bien au transport de liquide tel que le kombucha. J'ai ensuite conçu des buses sur un logiciel de CAO, que j'ai pu imprimer directement en 3D afin d'obtenir une grande quantité de buses, à la fois pour disposer de pièces de rechange en cas de casse, mais surtout pour obtenir une buse avec une très grande finesse d'extrusion, toujours dans l'optique de suivre le plan d'expérience établi précédemment.

On trouve Figure 3 une image d'une buse une fois mise en place et des CAO en Annexe 2 et Annexe 3.

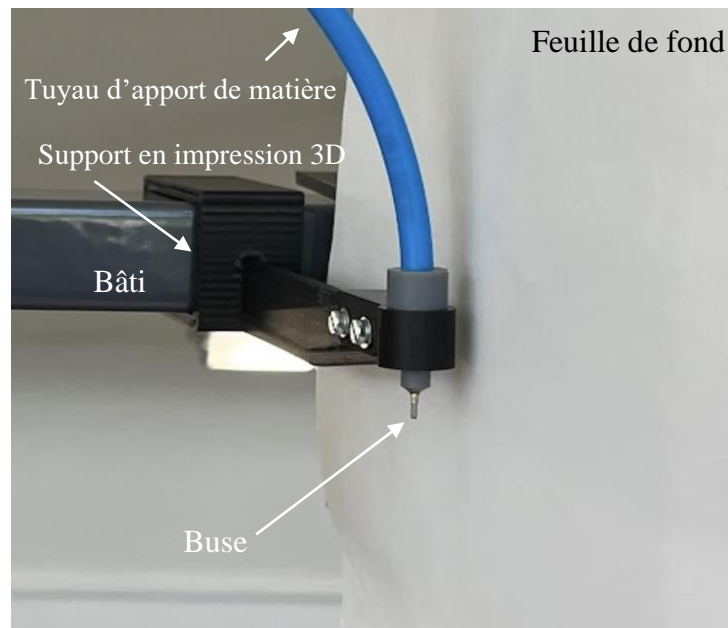


Figure 3 : Mise en place de la buse sur son support imprimé en 3D et fixé sur le bâti, le fond blanc permet un bon traitement d'image et le tuyau est utilisé pour l'apport de matière

On peut noter l'utilisation d'un micro-tube en métal pour finaliser l'embout de la buse, cette technique nous a permis d'obtenir la plus grande précision possible sur l'extrémité de notre outil.

3.3.1.3. Contrôle du pousse-seringue : Développement du système de contrôle pour gérer avec précision l'extrusion des mélanges.

Pour contrôler le pousse-seringue, la solution la plus adéquate a été d'utiliser un moteur piloté par un Arduino, assisté par un Shield moteur. En effet, l'Arduino permet de faire tourner un programme en boucle, ce qui envoie des informations au moteur et reçoit des commandes d'un ordinateur. Grâce à un programme Node-RED, nous pouvons directement choisir l'état du moteur via une interface utilisateur intuitive. L'avantage de Node-RED réside dans la création d'un tableau de bord (Dashboard) agréable et rapide à utiliser.



Figure 4 : Dashboard Node-Red pour le contrôle du pousse-seringue

Chaque bouton du Dashboard simule l'envoi d'une commande via le port série de l'Arduino, qui sera ensuite traitée par le programme Arduino (présent en Annexe 5).

Le Shield moteur est un module additionnel qui se connecte sur l'Arduino, permettant de brancher directement les fils du moteur pas à pas, ainsi qu'une alimentation externe si nécessaire. Cela a été particulièrement utile dans notre cas, car l'Arduino ne produit que du 5V, ce qui était insuffisant pour le pousse-seringue. Vous trouverez les fiches techniques des différents éléments cités en Annexe.

3.3.2. Étude dimensionnelle du fil après dépose : Mesure des dimensions des fils après dépose et séchage, avec une attention particulière à la rétractation volumique.

Pour cette expérience, nous avons réutilisé toutes les parties précédentes de notre banc d'essai, mais il a été nécessaire d'ajouter un élément permettant une dépose constante d'un fil, afin d'étudier ses dimensions. Les valeurs analysées sont la hauteur et la largeur avant et après séchage, ce qui nous a permis de conclure sur les propriétés de rétractation de notre mélange.

Sur le même principe que le système de pousse-seringue, nous avons utilisé une plaque de dépose en plastique qui effectue un aller-retour grâce à une table de positionnement Igus, 40N. (Voir Annexe 7 : Fiche technique table de positionnement).

Le tout est actionné par un moteur et contrôlé par un Arduino et un Shield moteur, pilotés depuis le même Dashboard que celui utilisé pour le pousse-seringue, sur Node-RED. Le code de contrôle du plateau est disponible en Annexe 4.

3.3.3. Étude en flexion de poutre de kombucha : Réalisation de tests de flexion sur des poutres en Kombucha pour déterminer le module de Young avant et après séchage.

Cette dernière expérience a pour objectif de déterminer le module de Young EEE de notre matériau, en utilisant un test de flèche sur les pièces que nous avons conçues grâce au même banc d'essai que pour l'étude des fils. Nous avons empilé plusieurs couches pour obtenir des

poutres d'environ 50 mm x 10 mm x 1 mm. De plus, nous avons effectué le test avant et après un passage de 30 minutes dans un four à 90°C, afin de comparer les valeurs obtenues. Le four a permis un séchage final homogène et régulier sur toutes les poutres. Dans la figure suivante, on peut observer les poutres sur le support où elles ont été déposées. Nous disposons de trois poutres de même composition afin de tester les écarts-types entre les mesures.

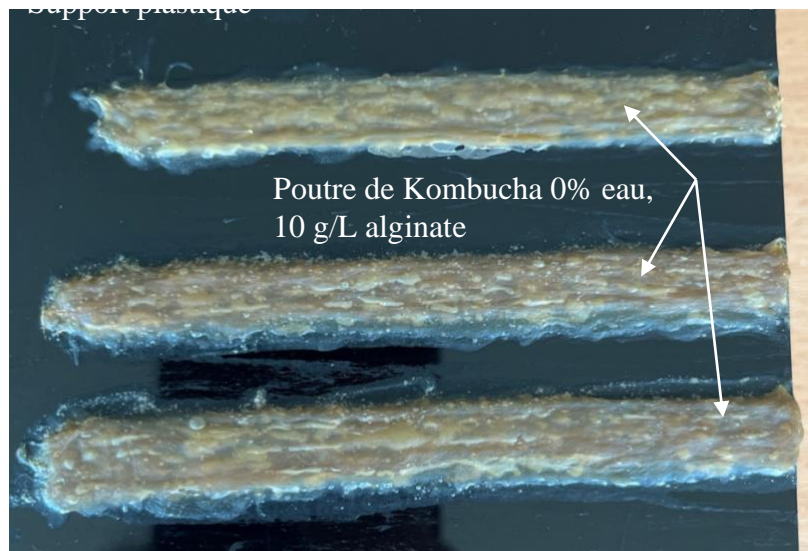


Figure 5 : Poutres de Kombucha sur support plastique avant cuisson

3.4. Récupération des données : Techniques utilisées pour capturer, analyser et interpréter les données obtenues à partir des essais.

Pour conclure cette section, les données de chacune des phases précédentes ont été récupérées et traitées à partir d'images prises à l'aide d'une caméra directement connectée au Raspberry Pi (Figure 6). Cette caméra est contrôlée par un code Python, disponible en Annexe 6. L'intérêt principal de l'utiliser via Python est de pouvoir ajuster la focale et obtenir ainsi des images aussi nettes que possible. Les images ont ensuite été analysées avec le logiciel ImageJ, qui a permis d'obtenir, dans chaque cas, les valeurs souhaitées avec la plus grande précision possible.

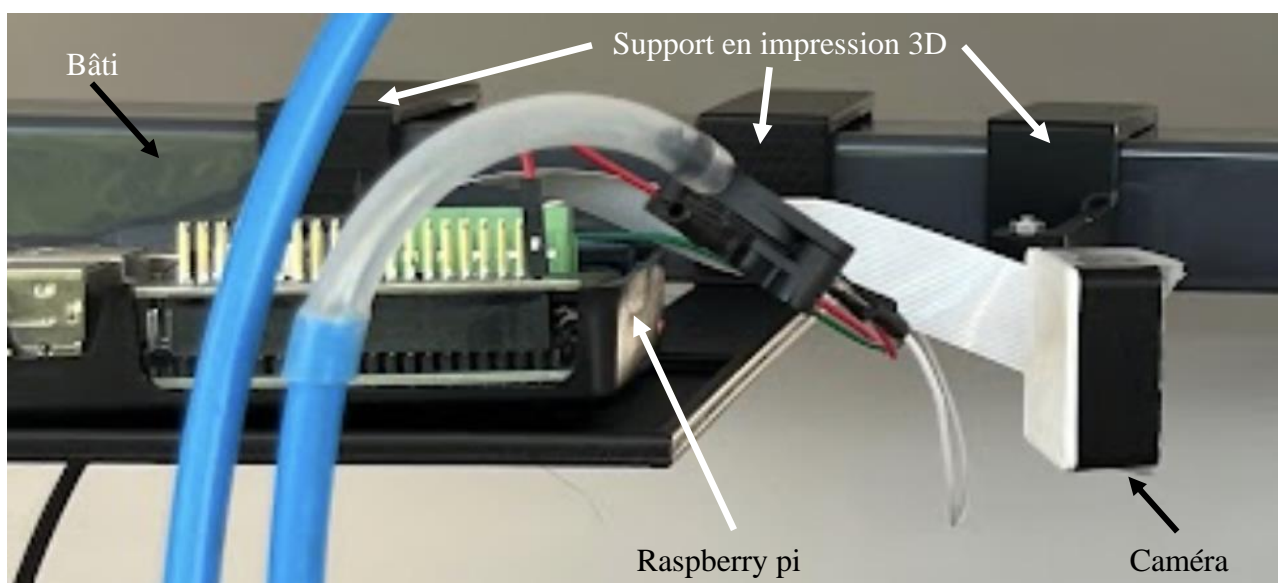


Figure 6 : Caméra branchée sur le Raspberry pi

4. Résultats : Les essais montrent que les propriétés du Kombucha sont fortement influencées par les conditions d'extrusion et la composition des mélanges.

4.1. Fils en sortie de buses : Résultats démontrant comment la distance d'extrusion affecte les dimensions des fils et leur stabilité.

Ici le traitement est assez rapide car grâce à ImageJ, on obtient directement les valeurs de diamètre du fil à 0, 1, 2, et 3mm. Voici un exemple d'une image obtenu avant et après le traitement et la mise à l'échelle du mélange avec ces propriétés :

- Petite buse
- Grand débit
- 20 % eau
- 10 g/L alginate

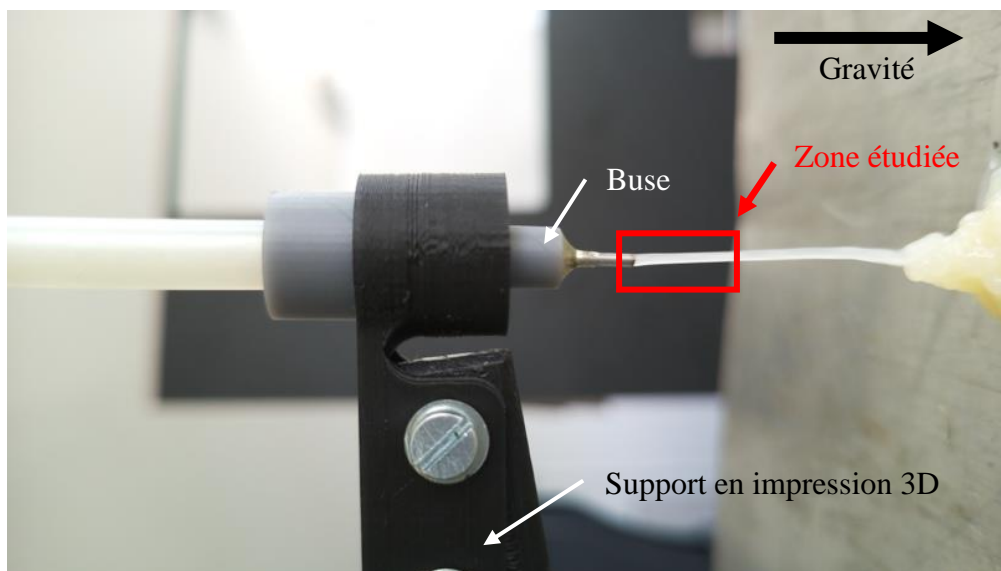


Figure 7 : Photo fil d'extrusion avant traitement



Figure 8 : Photo fil d'extrusion après traitement sur ImageJ

On obtient le tableau de valeurs brutes donné en Annexe 12.

4.2. Fils déposés : Impact du séchage sur les dimensions des fils déposés, avec une analyse des taux de rétraction volumique.

Le traitement est similaire à celui des sorties de buses, mais ici, il a d'abord été nécessaire de déposer les fils sur la plaque mobile, de prendre une image avant séchage, puis de répéter

l'expérience une fois les fils séchés afin d'observer leur évolution. De plus, un coefficient de rétractation volumique et la tenue du matériau ont été calculés à l'aide des formules suivantes :

$$\text{coefficient de rétractation} = \frac{\text{Base sèche} * \text{Hauteur sèche}}{\text{Base humide} * \text{Hauteur humide}}$$

$$\text{tenue} = \frac{\text{Base sèche}}{\text{Base humide}}$$

Les Figure 9 et Figure 10 présentent des exemples d'images prises lors des expériences. Les propriétés de la solution illustrée sont les suivantes :

- Grande buse
- Haut débit
- 20% d'eau
- 2 g/L d'alginate

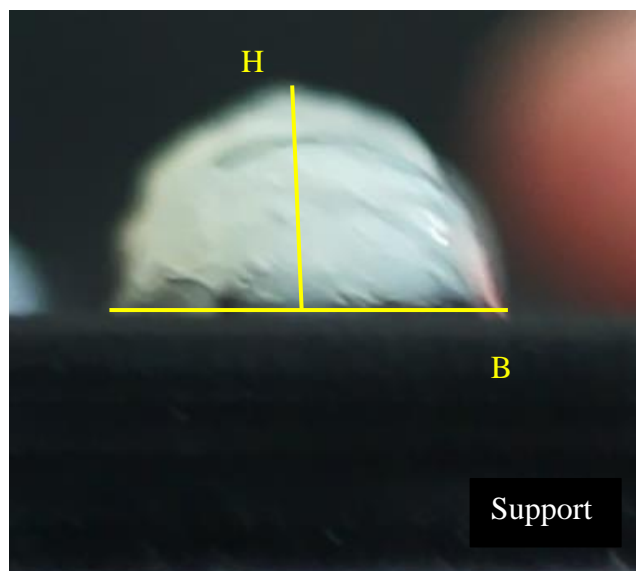


Figure 9 : Fil tiré de Kombucha avant séchage sur son support en vue de face

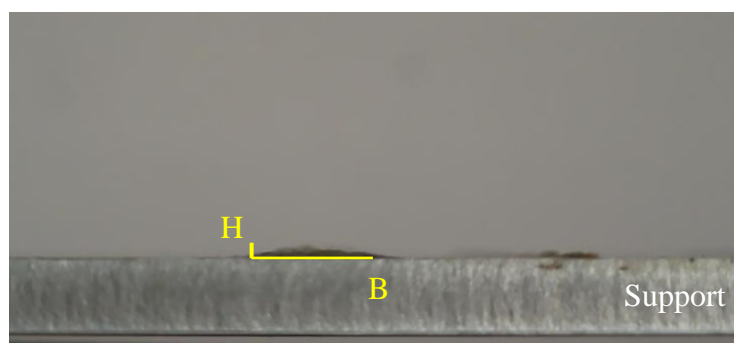


Figure 10 : Fil tiré de Kombucha après séchage sur son support en vue de face

Les valeurs brutes sont présentes en Annexe 13.

4.3. Flexion des poutres : Étude comparative des propriétés mécaniques des poutres avant et après cuisson, révélant les effets de la déshydratation.

Le traitement suit la même logique que les autres tests, en utilisant le traitement d'image. Pour mieux comprendre la succession des prises de vue, voici la série d'images capturées pour l'une des poutres testées. Les propriétés de cet échantillon sont les suivantes :

- 0% d'eau
- 10 g/L d'alginate

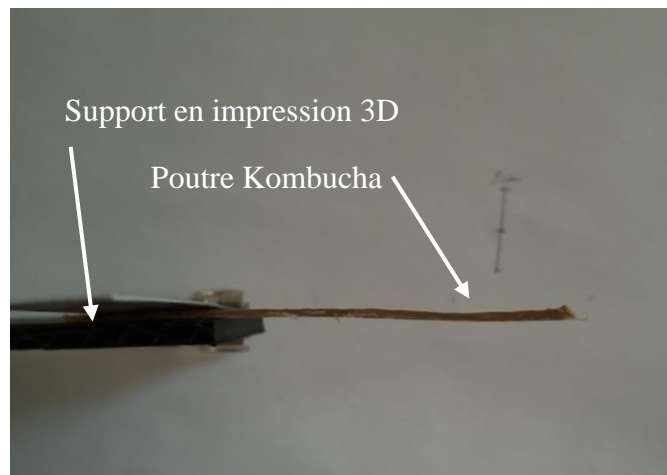


Figure 11 : Poutre sans charge avant cuisson

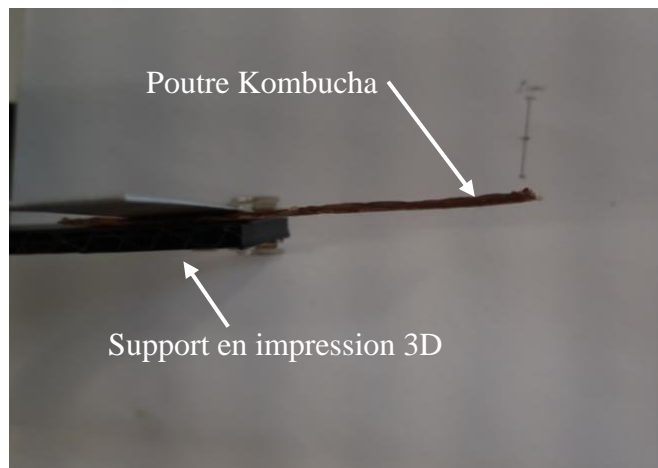


Figure 12 : Poutre sans charge après cuisson

Ensuite, une image a été prise avec une charge de 2,42 g afin de créer une flexion visible.

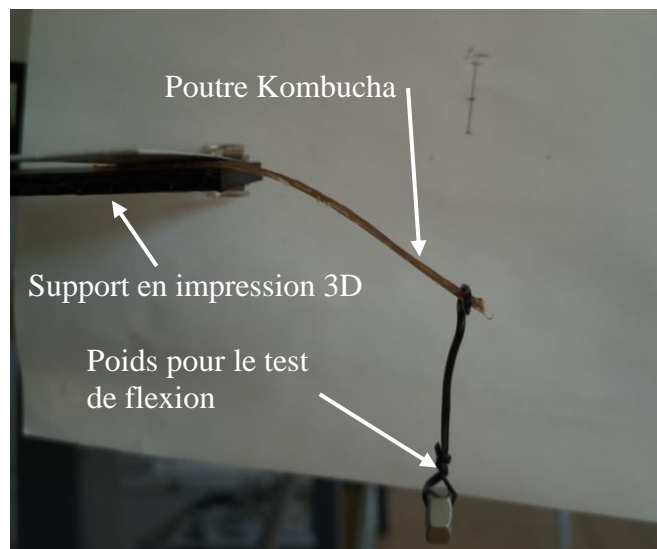


Figure 13 : Poutre avec charge avant cuisson

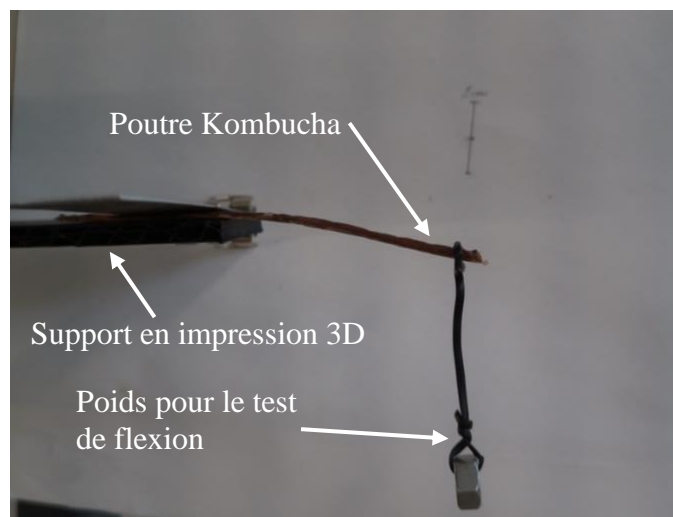


Figure 14 : Poutre avec charge après cuisson

En soustrayant les deux positions (sans et avec charge), on peut obtenir la flèche, qui sera utilisée dans le calcul du module de Young. Enfin, une image est prise après le retour en position sans charge.

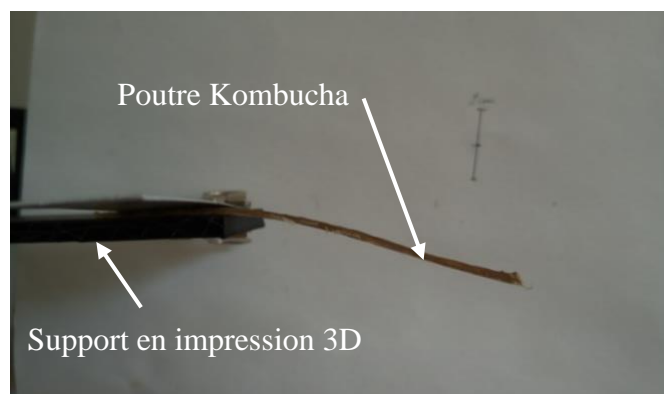


Figure 15 : Poutre en retour post charge avant cuisson

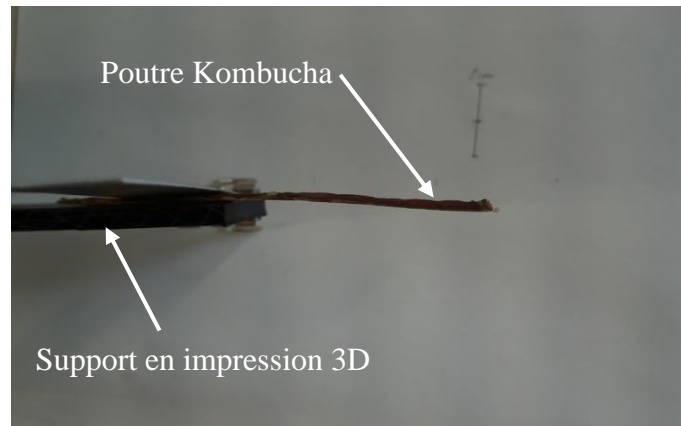


Figure 16 : Poutre en retour post charge après cuisson

Pour terminer, nous obtenons la valeur du module de Young pour chaque poutre (avant et après cuisson) en suivant cette formule :

$$f = \frac{PL^3}{3EI}$$

- F est la flèche
- P le poids appliqué
- L la longueur de la poutre
- E le module de Young
- I est moment quadratique :

$$I_x = \frac{bh^3}{12}$$

B et H correspondent aux dimensions de la poutre, respectivement la base et la hauteur. Les valeurs brutes sont présentées en Annexe 14, et en Annexe 16. Les dimensions des poutres testées sont également répertoriées dans les annexes suivantes : Annexe 15, et Annexe 17.

4.4. Tableau des résultats : Présentation synthétique des coefficients d'impact de chaque variable d'entrée sur les sorties mesurées.

En utilisant l'algorithme Excel, nous obtenons le Tableau 3, qui rapporte le coefficient d'impact de chaque variable sur nos éléments de sortie. Chaque coefficient relie de manière linéaire les valeurs des entrées à la sortie par le biais d'un modèle :

$$\begin{aligned} & \text{Diamètre fil 0 (en mm)} \\ &= 1.71 * \text{Largeur de buse (en mm)} + 0.05 \\ & * \text{Débit d'extrusion (en m}^3/\text{s)} + 0.38 * \% \text{Eau} - 0.33 * \% \text{Alginate} \end{aligned}$$

Plus la valeur est élevée, plus l'impact est important. Les valeurs en rouge sont considérées comme négligeables, car elles se situent dans le bruit généré par l'incertitude des mesures expérimentales, représentée par les valeurs qui suivent nos coefficients d'impact.

	Largeur de buse	Débit d'extrusion	% Eau	% Alginate	
Diamètre fil 0mm	1,71 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,38 ± 0,01	-0,33 ± 0,01	Forme Dépôt
Diamètre fil 1mm	1,45 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,09 ± 0,01	-0,06 ± 0,01	
Diamètre fil 2mm	1,42 ± 0,07	0,10 ± 0,07	0,06 ± 0,07	-0,05 ± 0,07	
Diamètre fil 3mm	1,40 ± 0,07	0,10 ± 0,07	0,04 ± 0,07	-0,05 ± 0,07	
W humide	2,07 ± 0,07	-0,24 ± 0,07	-0,48 ± 0,07	0,52 ± 0,07	
H humide	0,83 ± 0,16	0,20 ± 0,16	-0,26 ± 0,16	-0,03 ± 0,16	Forme Séchage
W sec	1,38 ± 0,32	0,19 ± 0,32	0,32 ± 0,32	-0,27 ± 0,32	
H sec	0,09 ± 0,03	0,01 ± 0,03	-0,03 ± 0,03	0,01 ± 0,03	
Rétraction Volumique	-0,15 ± 0,07	0,04 ± 0,07	0,09 ± 0,07	0,05 ± 0,07	
Tenue	-0,24 ± 0,20	0,13 ± 0,20	0,13 ± 0,20	-0,14 ± 0,20	
Effet estimé sur flèche avant cuisson			-2,42 ± 0,21	6,52 ± 0,21	Paramètres mécaniques
Effet estimé sur flèche après cuisson			-1,78 ± 0,21	-2,32 ± 0,21	
Effet estimé sur E avant cuisson			3902 ± 3146	-2641 ± 3146	
Effet estimé sur E après cuisson			10010 ± 882	1054 ± 882	
Effet estimé sur retour sans charge avant cuisson			-1,26 ± 0,22	2,63 ± 0,22	
Effet estimé sur retour sans charge après cuisson			-1,78 ± 0,30	-1,61 ± 0,30	

Tableau 3 : Résultats exposant les effets estimés de chaque facteur d'entrée sur nos éléments de sortie

5. Discussion : Analyse approfondie des résultats obtenus et exploration des perspectives d'optimisation pour l'impression 3D avec le Kombucha.

5.1. Analyse des fils en sortie de buses : Largeur de buse et débit d'extrusion plus impactant que la composition chimique.

Tout d'abord, les résultats concernant les fils en sortie de buses montrent des variations de diamètre en fonction de la distance d'extrusion. Le tableau des résultats bruts (Annexe 12) indique une diminution progressive du diamètre des fils à mesure que la distance augmente, ce qui est cohérent avec le comportement attendu d'une solution viscoélastique extrudée sous pression. Cette tendance peut être attribuée à la relaxation des contraintes internes au sein du fil lors de son extrusion, ce qui conduit à une réduction du diamètre à mesure que le fil s'allonge et que la tension se dissipe.

Le débit d'extrusion a également montré une influence notable sur les dimensions finales du fil. Un débit plus élevé tend à augmenter le diamètre du fil, probablement en raison de la plus grande pression exercée sur le matériau au moment de l'extrusion. Cependant, des débits trop élevés pourraient entraîner des défauts dans l'impression, tels que des variations indésirables dans l'épaisseur du fil ou un mauvais contrôle de la direction de dépôt.

Il est également important de noter la différence d'impact de la largeur de la buse par rapport aux autres facteurs. Comme attendu, la largeur de la buse a un effet significatif, ce qui confirme que les valeurs obtenues avec notre tableur Excel sont cohérentes avec les prévisions du sens physique.

De plus, la similarité dans le comportement des impacts de nos deux composés chimiques, l'eau et l'alginate, est remarquable. Comme mentionné précédemment, dans les deux cas, leur influence diminue rapidement, mais cette diminution est bien plus marquée avec une réduction de leur effet d'un facteur cinq dès le passage de 0 mm à 1 mm. Au-delà de 2 mm, leur influence devient négligeable, tombant dans le bruit de mesure décrit plus tôt.

Enfin, l'utilisabilité des mélanges dans l'extrusion a été mise à l'épreuve. Certains mélanges se sont avérés particulièrement difficiles à extruder en raison de leur non-homogénéité. Cela a été particulièrement le cas du mélange contenant très peu d'alginate et aucun ajout d'eau. Concrètement, les buses fines, qui sont intéressantes pour leur précision, se retrouvent bouchées et très difficiles à nettoyer. On peut également noter la présence constante de bulles dans notre mélange, ce qui provoque des discontinuités lors de l'extrusion (les bulles d'air se regroupent et forment de grosses bulles dans le tuyau qui transporte la solution). Nous avons tenté de les éliminer autant que possible à l'aide d'une cloche sous vide, mais cette méthode n'est pas entièrement efficace et des bulles résiduelles persistent.

L'analyse des résultats obtenus lors de l'extrusion des fils montre une cohérence générale avec les attentes théoriques, confirmant la validité des modèles de comportement des solutions viscoélastiques sous pression. La diminution progressive du diamètre des fils avec la distance d'extrusion met en évidence l'importance de la gestion des contraintes internes et du contrôle précis des paramètres d'extrusion, tels que le débit et le diamètre de la buse. Bien que ces facteurs aient montré une influence prévisible sur les dimensions finales des fils, l'étude a également révélé des défis pratiques, notamment en ce qui concerne l'homogénéité des mélanges et les difficultés d'extrusion associées à certains paramètres, comme les faibles concentrations en alginate. Ces observations soulignent la nécessité de poursuivre les recherches pour optimiser les formulations de mélanges et affiner les conditions d'extrusion afin de garantir une qualité d'impression optimale et constante.

5.2. Comportement des fils déposés avant et après séchage : Discussion sur la rétractation volumique, le rôle stabilisateur de l'alginate, et les défis associés à la mesure de ces phénomènes.

L'étude de la rétractation volumique après séchage des fils a révélé une réduction substantielle des dimensions, soulignant l'importance de contrôler le pourcentage d'eau dans le mélange initial. Le taux de rétractation est particulièrement élevé dans les mélanges contenant un pourcentage plus élevé d'eau, ce qui s'explique par l'évaporation de l'eau pendant le séchage, conduisant à une diminution du volume et à une densification du matériau.

Il est intéressant de noter que l'ajout d'alginate a significativement réduit la rétractation, ce qui indique que l'alginate joue un rôle de stabilisateur, maintenant la structure du fil même après la perte d'eau. Cette observation est en accord avec la littérature existante, où les gélifiants comme l'alginate sont utilisés pour renforcer la structure des biopolymères lors de la solidification (1).

Une autre dimension importante est la "tenue" des fils après séchage. Les résultats montrent que les mélanges avec une teneur élevée en alginate ont non seulement une meilleure stabilité dimensionnelle, mais également une plus grande résistance à la déformation post-séchage. Cela suggère que l'alginate pourrait jouer un rôle clé dans l'amélioration de la stabilité mécanique du matériau imprimé, ce qui est crucial pour des applications nécessitant une haute précision et une résistance mécanique.

Il est notable que l'impact de la largeur de buse est bien plus impactante sur la hauteur du fil de dépose que sur sa base ce qui est explicable par le fait que naturellement notre solution a tendance à s'étaler et donc augmenter la largeur de la base tout en diminuant la hauteur.

Il est important de notifier que nombre de valeurs pour cette expérience sont considérés dans le bruit de mesure. Ceci est simplement justifiable par la difficulté de prise de mesure ce qui implique ici de plus grande incertitude. De plus, la présence de bulles mentionnée précédemment reste problématique. En effet, ces bulles créent des surfaces discontinues qui engendrent des fragilités au sein même du matériau.

Pour des travaux futurs, il serait intéressant de tester différentes concentrations d'alginate ainsi que d'autres additifs potentiels afin d'évaluer leur influence sur la rétractation et la tenue du matériau. De plus, l'étude de la cinétique de séchage pourrait fournir des informations précieuses pour prédire et contrôler les variations dimensionnelles post-séchage, notamment en ce qui concerne la présence de bulles à l'intérieur du matériau.

5.3. Tests de flexion des poutres de Kombucha : Résultats des tests de flexion, montrant l'augmentation de la rigidité après cuisson et les implications pour différentes applications.

Les tests de flexion sur les poutres ont fourni des informations cruciales sur la rigidité et la résistance des matériaux à base de kombucha. Les résultats montrent que le module de Young augmente après la cuisson (pour atteindre au maximum de nos expériences environ 54 kPa), ce qui est attendu en raison de la déshydratation et du resserrement des fibres de cellulose, entraînant une plus grande rigidité. L'utilisation d'un moyen pour sécher au maximum le matériau est donc primordial.

Les valeurs de module de Young obtenues (jusqu'à 54 kPa) sont très faibles, ce qui correspond au ressenti pratique : la poutre paraît très souple. À titre de comparaison, le module moyen du bois de chêne est d'environ 12 GPa. Cette faiblesse s'explique principalement par la présence de bulles à l'intérieur du matériau. Ces bulles rendent la surface du matériau rugueuse, ce qui complique les mesures de hauteur des poutres (ici, elles ont été effectuées en prenant la moyenne d'une dizaine de mesures le long de la poutre, mais cette méthode génère beaucoup d'incertitudes). De plus, les bulles présentes même à l'intérieur du matériau entraînent des fragilités structurelles qui le rendent beaucoup plus souple.

L'analyse du retour en position après déformation a montré une amélioration après la cuisson, indiquant une meilleure résilience du matériau. Cependant, il est important de noter que certains mélanges, en particulier ceux avec une forte concentration en alginate, ont montré une flexibilité réduite après cuisson. Cette rigidité accrue pourrait être bénéfique pour certaines applications où une structure rigide est nécessaire, mais pourrait être un inconvénient pour des applications nécessitant une certaine élasticité ou souplesse.

Un autre point d'analyse est la déformation rémanente des poutres après déchargement. Les résultats montrent que les poutres ont une capacité limitée à retrouver leur forme originale après avoir été soumises à une charge, ce qui pourrait limiter leur utilisation dans des applications où la récupération élastique est essentielle. Pour surmonter cela, des traitements post-impression, tels que l'addition de plastifiants ou des procédés de séchage contrôlé, pourraient être explorés pour améliorer la performance élastique.

6. Conclusion : Synthèse des résultats, mise en lumière des défis techniques, et propositions pour des travaux futurs visant à améliorer les performances du Kombucha en impression 3D.

Ce travail de recherche, centré sur l'étude des propriétés de la mère de kombucha dans le cadre du projet "3D WoodPrint," a permis d'explorer de nouvelles possibilités pour l'impression 3D avec des biomatériaux durables. L'analyse des différentes étapes, de la préparation des mélanges à l'extrusion des fils et à la caractérisation des poutres, a révélé des informations cruciales sur le comportement de ce matériau peu conventionnel.

Premièrement, l'étude de l'extrusion des fils a mis en lumière l'importance du contrôle des paramètres d'extrusion, tels que le débit et le diamètre de la buse. Ces facteurs influencent directement les dimensions finales des fils, et donc la qualité de l'impression. La gestion des contraintes internes et l'homogénéité des mélanges se sont révélées être des points critiques, nécessitant une optimisation continue pour garantir des résultats constants.

Deuxièmement, l'analyse des fils après dépose et séchage a démontré que la rétraction volumique et la stabilité dimensionnelle sont fortement dépendantes de la composition du mélange, en particulier de la teneur en eau et en alginate. L'ajout d'alginate a montré des effets stabilisateurs significatifs, suggérant son rôle potentiel dans l'amélioration des performances des matériaux imprimés.

Troisièmement, les tests de flexion des poutres ont fourni des données précieuses sur la rigidité et la résilience du matériau après séchage. Le séchage contrôlé a amélioré la rigidité des poutres, bien que certains mélanges aient perdu en flexibilité. Ces résultats soulignent l'importance d'équilibrer les propriétés mécaniques en fonction des applications ciblées, en ajustant les formulations pour répondre aux besoins spécifiques.

Finalement, la difficulté à obtenir un mélange parfaitement homogène (sans morceaux résiduels) et exempt de bulles est un enjeu primordial. En effet, ces éléments ont engendré de nombreuses difficultés expérimentales ainsi que des complications dans l'analyse des résultats. L'optimisation du mélange et l'évacuation des bulles demeurent parmi les aspects les plus importants pour améliorer les performances mécaniques de ce nouveau matériau et son extrusion, dans l'optique de l'utiliser pour l'impression 3D.

En conclusion, cette étude confirme le potentiel de la mère de kombucha comme matériau pour l'impression 3D, tout en mettant en évidence les défis techniques à surmonter. Les perspectives pour des recherches futures incluent l'optimisation des formulations de mélange, l'exploration d'autres additifs, et le développement de nouvelles techniques de post-traitement. Ces efforts permettront de renforcer les performances des matériaux imprimés, en contribuant à une fabrication additive plus durable et écologiquement responsable.

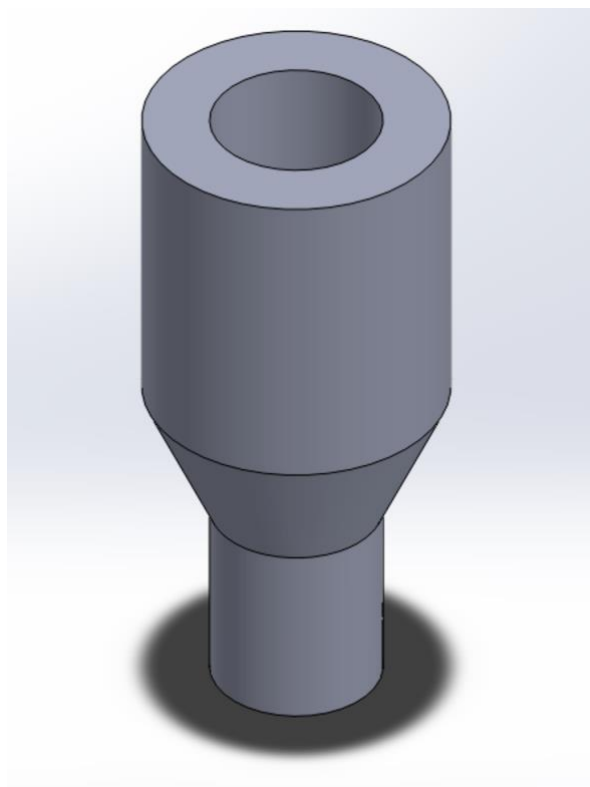
7. Annexes

7.1. Annexes méthodologie

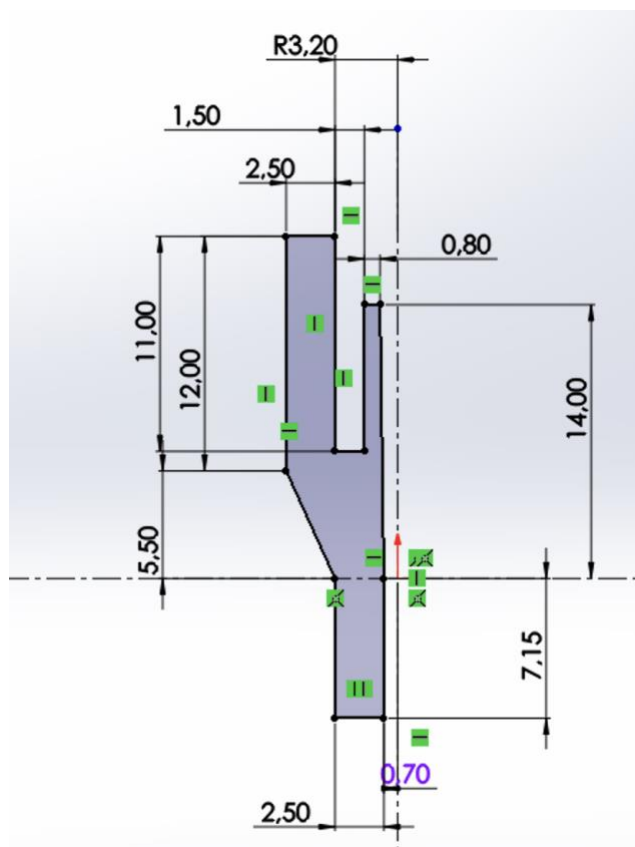
Annexe 1 : Table student

k	γ										
	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.010	0.005	0.0025	0.0010	0.0005
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

Annexe 2 : Vu 3D CAO buse d'extrusion



Annexe 3 : Vu esquisse avant révolution de la buse



Annexe 4 : Code de contrôle du plateau

```
// Program demonstrating how to control a powerSTEP01-based ST X-NUCLEO-IHM03A1
// stepper motor driver shield on an Arduino Uno-compatible board

#include <Ponoor_PowerSTEP01Library.h>
#include <SPI.h>

// Pin definitions for the X-NUCLEO-IHM03A1 connected to an Uno-compatible board
#define nCS_PIN 10
#define STCK_PIN 9
#define nSTBY_nRESET_PIN 8
#define nBUSY_PIN 4

// powerSTEP library instance, parameters are distance from the end of a daisy-chain
// of drivers, !CS pin, !STBY/!Reset pin
powerSTEP driver(0, nCS_PIN, nSTBY_nRESET_PIN);

bool enMarcheAvant2 = false;    // Variable pour indiquer si le moteur2 est en marche
bool enMarcheArriere2 = false;

char carac; // caractère pour informer de la direction

// Configuration des broches
const int chipSelectPin = 10;

void setup()
{
    // Start serial
    Serial.begin(115200);
    Serial.println("powerSTEP01 Arduino control initialising...");

    // Prepare pins
    pinMode(nSTBY_nRESET_PIN, OUTPUT);
    pinMode(nCS_PIN, OUTPUT);
    pinMode(MOSI, OUTPUT);
    pinMode(MISO, OUTPUT);
    pinMode(SCK, OUTPUT);

    // Reset powerSTEP and set CS
```

```

digitalWrite(nSTBY_nRESET_PIN, HIGH);
digitalWrite(nSTBY_nRESET_PIN, LOW);
digitalWrite(nSTBY_nRESET_PIN, HIGH);
digitalWrite(nCS_PIN, HIGH);

// Initialisation du SPI
SPI.begin();

// Configuration du mode de données
SPI.beginTransaction(SPISettings(14000000, MSBFIRST, SPI_MODE3));

// Configuration de la broche de sélection du périphérique
pinMode(chipSelectPin, OUTPUT);
digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);

// Configure powerSTEP
driver.SPIPortConnect(&SPI); // give library the SPI port (only the one on an Uno)

driver.configSyncPin(BUSY_PIN, 0); // use SYNC/nBUSY pin as nBUSY,
// thus syncSteps (2nd paramater) does nothing

driver.configStepMode(STEP_FS); // 1/128 microstepping, full steps = STEP_FS,
// options: 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128

driver.setMaxSpeed(10000); // max speed in units of full steps/s
//driver.setFullSpeed(3000); // full steps/s threshold for disabling microstepping
driver.setAcc(20000); // full steps/s^2 acceleration
driver.setDec(20000); // full steps/s^2 deceleration

driver.setSlewRate(SR_520V_us); // faster may give more torque (but also EM noise),
// options are: 114, 220, 400, 520, 790, 980(V/us)

driver.setOCThreshold(10); // over-current threshold for the 2.8A NEMA23 motor
// used in testing. If your motor stops working for
// no apparent reason, it's probably this. Start low
// and increase until it doesn't trip, then maybe
// add one to avoid misfires. Can prevent catastrophic
// failures caused by shorts

driver.setOCShutdown(OC_SD_ENABLE); // shutdown motor bridge on over-current event
// to protect against permanant damage

```



```

driver.setPWMFreq(PWM_DIV_1, PWM_MUL_0_75); // 16MHz*0.75/(512*1) = 23.4375kHz
    // power is supplied to stepper phases as a sin wave,
    // frequency is set by two PWM modulators,
    // Fpwm = Fosc*m/(512*N), N and m are set by DIV and MUL,
    // options: DIV: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,
    // MUL: 0.625, 0.75, 0.875, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2

driver.setVoltageComp(VS_COMP_DISABLE); // no compensation for variation in Vs as
    // ADC voltage divider is not populated

driver.setSwitchMode(SW_USER); // switch doesn't trigger stop, status can be read.
    // SW_HARD_STOP: TP1 causes hard stop on connection
    // to GND, you get stuck on switch after homing

driver.setOscMode(INT_16MHZ); // 16MHz internal oscillator as clock source

// KVAL registers set the power to the motor by adjusting the PWM duty cycle,
// use a value between 0-255 where 0 = no power, 255 = full power.
// Start low and monitor the motor temperature until you find a safe balance
// between power and temperature. Only use what you need
driver.setRunKVAL(64);
driver.setAccKVAL(64);
driver.setDecKVAL(64);
driver.setHoldKVAL(8);

driver.setParam(ALARM_EN, 0x8F); // disable ADC UVLO (divider not populated),
    // disable stall detection (not configured),
    // disable switch (not using as hard stop)

driver.getStatus(); // clears error flags

Serial.println(F("Initialisation complete"));
}

void loop()
{
    //Serial.println((int)driver.getStatus(), HEX); // print STATUS register

    if (Serial.available() > 0 ){

```

```

char carac = Serial.read();
// Serial.println(carac);
// Serial.println(enMarcheArriere);
// Serial.println(enMarcheAvant);

// Démarrer le moteur dans le sens hoaraire si la lettre P est entrée et que le moteur est à l'arrêt
if (carac == 'P' && !enMarcheAvant2 && !enMarcheArriere2) {
    enMarcheAvant2 = true;
}

// Démarrer le moteur dans le sens anti hoaraire si la lettre O est entrée et que le moteur est à l'arrêt
if (carac == 'O' && !enMarcheAvant2 && !enMarcheArriere2) {
    enMarcheArriere2 = true;
}

// Arrêter le moteur si la lettre I est entrée
if (carac == 'I' && (enMarcheAvant2 || enMarcheArriere2)) {
    enMarcheAvant2 = false;
    enMarcheArriere2 = false;
}
}

if (enMarcheArriere2 == true) {

    delay(1000);
    driver.move(REV, 30000); // move forward 25600 microsteps
    while(driver.busyCheck()); // wait fo the move to finish
    driver.softStop(); // soft stops prevent errors in the next operation
    while(driver.busyCheck());

    delay(500);

    driver.move(FWD, 30000); // reverse back
    while(driver.busyCheck());
    driver.softStop();
    while(driver.busyCheck());

    enMarcheArriere2 = false;
}

//Serial.println((int)driver.getStatus(), HEX);

```

```
    delay(1);  
}
```

Annexe 5 : Code de contrôle du pousse-seringue

```
#include <AFMotor.h>
```

```
AF_Stepper motor(400, 1); // déclaration du moteur et de sa borne
```

```
const int capteur1Pin = A1; // Broche du premier capteur
```

```

const int capteur2Pin = A2; // Broche du deuxième capteur

bool capteur1Touche = false; // Variable pour indiquer si le premier capteur est touché
bool capteur2Touche = false; // Variable pour indiquer si le deuxième capteur est touché
bool enMarcheAvant = false; // Variable pour indiquer si le moteur est en marche
bool enMarcheArriere = false;
char carac;
char caractere; // Variable pour suivre l'état de la validation de la vitesse
float RPM; // Variable pour stocker la vitesse en RPM

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Lancement de la boîte de dialogue
  delay(1000);

  // Demande à l'utilisateur d'entrer la vitesse
  Serial.println("Entrer une vitesse de RPM et appuyez sur 'V' pour valider :");

  while (true) {
    // Vérifie si un caractère est disponible sur le port série
    if (Serial.available() > 0) {
      // Lit le caractère entré par l'utilisateur
      caractere = Serial.read();
      // Vérifie si le caractère est un chiffre
      if (isdigit(caractere)) {
        // Stocke le chiffre pour former la nouvelle valeur de vitesse
        RPM = (caractere - '0'); // Convertit le caractère en chiffre
        Serial.println(RPM);
      } else if (caractere == 'V') {
        // Si l'utilisateur a entré 'V', sort de la boucle et continue
        break;
      }
    }
  }

  float PPS = (RPM * 400) / 60; //Conversion RPM en PPS
  //Serial.println(RPM);
  //Serial.println(PPS);

  motor.setSpeed(PPS);

```

```

pinMode(capteur1Pin, INPUT); //Déclaration capteur entrée
pinMode(capteur2Pin, INPUT);

Serial.println("Debut test");
}

void loop() {

if (Serial.available() > 0 ){
  char caract = Serial.read();
  // Serial.println(caract);
  // Serial.println(enMarcheArriere);
  // Serial.println(enMarcheAvant);

  // Démarrer le moteur dans le sens hoaraire si la lettre D est entrée et que le moteur est à l'arrêt
  if (caract == 'D' && !enMarcheAvant && !enMarcheArriere) {
    enMarcheAvant = true;
  }

  // Démarrer le moteur dans le sens anti hoaraire si la lettre R est entrée et que le moteur est à l'arrêt
  if (caract == 'R' && !enMarcheAvant && !enMarcheArriere) {
    enMarcheArriere = true;
  }

  // Arrêter le moteur si la lettre S est entrée
  if (caract == 'S' && (enMarcheAvant || enMarcheArriere)) {
    enMarcheAvant = false;
    enMarcheArriere = false;
  }
}

// Vérifier si le premier capteur est touché
if (digitalRead(capteur1Pin) == HIGH) {
  capteur1Touche = true;
  capteur2Touche = false;
}

// Vérifier si le deuxième capteur est touché
if (digitalRead(capteur2Pin) == HIGH) {
  capteur2Touche = true;

```

```

    capteur1Touche = false;
}

//Serial.println(String(capteur1Touche) + " " + String(capteur2Touche));

// Changement de direction en fin de course
if (capteur1Touche && enMarcheAvant) {
    enMarcheAvant = false;
    enMarcheArriere = true;
    capteur1Touche = false;
}

// Inverser le sens du moteur si le deuxième capteur est touché et s'arrêter après 2 tour dans le sens horaire
if (capteur2Touche && enMarcheArriere) {
    motor.step(800, FORWARD); // Avance de 200 pas dans le sens horaire
    // delay(1000); // Attendre une seconde
    // motor.release(); // Arrêter le moteur
    enMarcheAvant = false;
    enMarcheArriere = false;
    capteur2Touche = false;
    Serial.println("fin test");
}

// Mise en marche moteur en avant ou en arrière
if (enMarcheAvant == true) {
    motor.step(1, FORWARD);
}
else if (enMarcheArriere == true) {
    motor.step(1, BACKWARD);
}
delay(1);
}

```

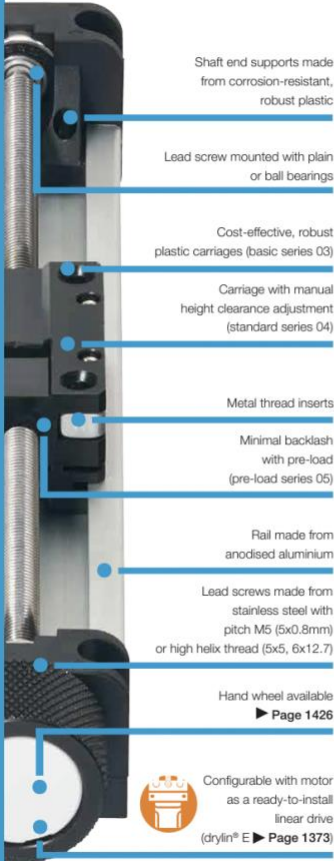
Annexe 6 : Code python pour le contrôle de la caméra avec une focale à 5

```
1 from picamera2 import Picamera2, Preview
2 from libcamera import controls
3 import time
4 picam2 = Picamera2()
5
6 #config = picam2.create_still_configuration()
7 #picam2.configure(config)
8
9 picam2.start(show_preview=True)
10
11 picam2.set_controls({"AfMode": controls.AfModeEnum.Manual, "LensPosition": 5})
12
13 time.sleep(10)
14
15 picam2.start_and_capture_files("/home/admin/Images/3DWoodPrint/Tests méca cuisson 15min*2 90°C/
    20240718_Poutre4_0_H2O_2_Alg_0g_Post.jpg")
16 picam2.stop_preview()
17 picam2.stop
18
```

Annexe 7 : Fiche technique table de positionnement

drylin® SLN | Miniature linear modules | Advantages

Compact, precise and lubrication-free



Lubrication-free miniature linear modules – drylin® SLN

drylin® SLN linear axes is a compact solution. The axis measures 28 x 22mm and can be configured with stroke lengths of up to 250mm. Thanks to the lubrication-free plastic sliders, it is quiet and very light. The axis is based on the tried-and-tested drylin® N system, size 27. It is available both mounted on plain bearings or on ball bearings in the shaft end supports. The drylin® SLN linear axis can be adjusted manually using the hand wheel or combined with the drylin® E stepper and DC motors.

- Ultra-compact design
- 3 carriage types (basic/adjustable/pre-load)
- Lubrication-free drylin® low-profile linear guide
- Modular design

Typical application areas

- Sensors
- Inspection technology
- Laboratory technology
- Medical technology

Quick delivery

Detailed information about delivery time online.

Price breaks online

No minimum order value. No minimum order quantity.

Carriage length: 35mm

Stroke lengths: up to 250mm

Product finder

▶ www.igus.co.uk/sln-productfinder

drylin® SLN | Miniature linear modules | Product range

Miniature linear module, pre-load version

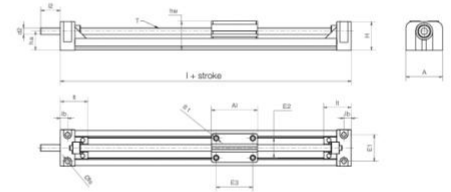


Order key

SLN-27-14-0008

- Based on maintenance-free drylin® N low-profile linear guides size 27
- BB version (ball bearing) for low backlash run
- Manual and motorised operation possible
- Linear carriage with individual height clearance adjustment and pre-load (optional)
- Available accessories
- ▶ Page 1419
- Available with motor
- ▶ Page 1373
- Also see econ chapter
- ▶ Page 1370

Pitch:
0008: M5x0.8
0050: Sg5x5
0025: Ds6.35x2.54
0127: Sg6.35x12.7
0254: Ds6.35x25.4
 Carriage version
4: Standard, adjustable
5: Standard, pre-load
 Shaft end support design
0: Plain bearing
1: Ball bearing
 drylin® N size 27
 Linear module



Technical data

Part No.	Max. stroke length ¹⁰¹⁾ [mm]	Weight [kg]	additional [kg] (per 100mm)	Max. static load capacity axial [N]	Max. static load capacity radial [N]	Max. speed [rpm]	Max. drive torque [Nm]
SLN-27-04	250	0.06	0.04	10	40	100	0.1
SLN-27-05	250	0.06	0.04	10	40	100	0.1
SLN-27-14	250	0.06	0.04	10	40	300	0.1
SLN-27-15	250	0.06	0.04	10	40	300	0.1

Dimensions [mm]

Part No.	A	Al	H	E1	E2	E3	E1 ¹⁰²⁾	I	hw	lt	lb	ts	d ²⁰⁾	I2	ha
	±0.2	-0.1	±0.2	±0.15	±0.15	±0.15			±0.2	±0.2			Ø		
SLN-27-04	28	35	21.5	15	15	28	15	77	22	20.2	5	3.5	5	15	14
SLN-27-05	28	35	21.5	15	15	28	15	77	22	20.2	5	3.5	5	15	14
SLN-27-14	28	35	21.5	15	15	28	15	77	22	20.2	5	3.5	Ø4h9 ²⁰⁾	15	14
SLN-27-15	28	35	21.5	15	15	28	15	77	22	20.2	5	3.5	Ø4h9 ²⁰⁾	15	14

¹⁰¹⁾ Fixed stroke lengths for SLN option with ball bearings: 100/150/200/250mm

¹⁰²⁾ The dimension E11 can only be found in conjunction with the igus® motor connection ²⁰⁾ Thread/ remaining thread visible

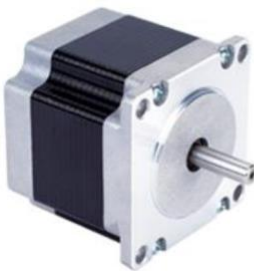


3D CAD files, prices and delivery time online ▶ www.igus.co.uk/drylinSLN 1341

1340 Online tools and more information ▶ www.igus.co.uk/drylinSLN



Annexe 8 : Fiche technique moteur pas à pas



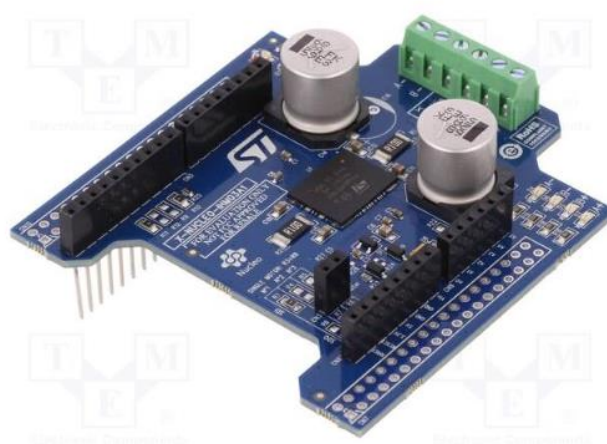
Electrical Specifications:

Series Model	Step Angle (deg)	Motor Length (mm)	Rated Current (A)	Phase Resistance (ohm)	Phase Inductance (mH)	Holding Torque (N.cm Min)	Detent Torque (N.cm Max)	Rotor Inertia (g.cm ²)	Lead Wire (No.)	Motor Weight (g)
23HS2430	1.8	112	3.0	1.6	6.8	280	12	800	4	1700

Annexe 9 : Shield moteur pour Arduino pour le pilotage du pousse-seringue



Annexe 10 : Shield moteur pour Arduino pour le pilotage du pousse-plaque



Annexe 11 : Arduino utilisé pour le contrôle des moteurs du pousse-seringue et du pousse-plaque



7.2. Annexes résultats

Annexe 12 : Tableau valeurs brutes sortie de buse

N° essai	0 mm	1 mm	2 mm	3 mm
1.	5,31	4,13	4,21	4,15
2.	1,08	1	0,96	0,93
3.	1	0,88	0,84	0,81
4.	3,69	3,65	3,61	3,59
5.	0,9	0,84	0,83	0,85
6.	4,94	3,76	3,5	3,42
7.	3,74	3,66	3,65	3,6
8.	1	0,92	0,92	0,94
3.2	1	0,9	0,86	0,84
3.3	1,02	0,9	0,95	0,93

Annexe 13 : Tableau valeurs brutes fils de dépose

N°Exp	W fil de dépose	H fil de dépose	W fil de dépose sec	H fil de dépose sec	Rétraction volumique	Tenue
1.	4,4	2,6	5,78	0,32	0,16	1,31
2.	1,42	0,6	2,4	0,28	0,79	1,69
3.	1,14	0,49	1,13	0,2	0,40	0,99
4.	7,6	2,59	4,7	0,47	0,11	0,62
5.	1,32	1,42	1,85	0,33	0,33	1,40
6.	4,38	1,94	4,34	0,46	0,23	0,99
7.	5,16	2,85	3,08	0,46	0,10	0,60
8.	1,1	0,84	1,46	0,2	0,32	1,33
2.2	1,45	0,99	3,15	0,32	0,70	2,17
2.3	1,3	0,85	2,62	0,26	0,62	2,02

Annexe 14 : Tableau valeurs brutes tests mécanique sans cuisson

N°Exp sans four	x sans charge (mm)	x avec charge (mm)	Flèche	x retour sans charge (mm)	Module de Young E (Pa)
1.	2,51	26,45	23,94	14,65	9,84E+03
2.	0	29,68	29,68	13,94	1,15E+04
3.	0	11,81	11,81	6,18	2,46E+04
4.	2,62	18,36	15,74	11,91	7,32E+03
2.2	0	29,55	29,55	14	1,16E+04
2.3	0	29,58	29,58	13,86	1,16E+04

Annexe 15 : Dimension des poutres et moment quadratique avant cuisson

N° Echantillon	Longueur L (mm)	Base b (mm)	Hauteur h (mm)	Moment quadratique I
1.	44,38	12,4	1,13	1,49E-12
2.	61,16	9,83	1,2	1,42E-12
3.	36,18	10,82	1,03	9,85E-13
4.	40,22	12,62	1,38	2,76E-12

Annexe 16 : Tableau valeurs brutes tests mécanique après cuisson

N°Exp avec four	x sans charge (mm)	x avec charge (mm)	Flèche	x retour sans charge (mm)	Module de Young E (Pa)
1.	0	9,84	9,84	1,20	3,29E+04
2.	0	8,31	8,31	2,08	3,57E+04
3.	0	9,4	9,4	1,75	5,36E+04
4.	0	18,04	18,04	7,98	1,08E+04
2.2	0	8,38	8,38	2	3,54E+04
2.3	0	8,25	8,25	1,89	3,60E+04

Annexe 17 : Dimension des poutres et moment quadratique après cuisson

N° Echantillon	Longueur L (mm)	Base b (mm)	Hauteur h (mm)	Moment quadratique I
1.	57,27	11,95	1,12	1,40E-12
2.	49,84	9,7	1,18	1,33E-12
3.	46,56	10,9	0,93	7,31E-13
4.	48,97	12,53	1,24	1,99E-12

8. Bibliographie

1. Hoenerloh A, Sonne K, Nicholas P. A 3d printable Biopolymer Composite incorporating Kombucha SCOBY: Towards a locally adaptive architecture using living biomaterials. *Res Dir Biotechnol Des*. 5 janv 2024;
2. Laavanya D, Shirkole S, Balasubramanian P. Current challenges, applications and future perspectives of SCOBY cellulose of Kombucha fermentation. *J Clean Prod*. 1 mai 2021;295:126454.
3. Gauss C, Pickering K, Muthe LP. The use of cellulose in bio-derived formulations for 3D/4D printing: A review. *Compos Part C Open Access*. 31 janv 2021;4:100113.
4. Pillai MM, Tran HN, Sathishkumar G, Manimekalai K, Yoon J, Lim D, et al. Symbiotic culture of nanocellulose pellicle: A potential matrix for 3D bioprinting. *Mater Sci Eng C*. 1 févr 2021;119:111552.