



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO Y DE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE COMPOSITES
OBTENIDOS MEDIANTE FABRICACIÓN
ADITIVA**

Autor:

Alonso Gil, Pablo

Responsable de Intercambio en la Uva:

Marta Herráez Sánchez

Universidad de destino

Ecole Nationale des Arts et Métiers

Valladolid, septiembre 2022.

TFG REALIZADO EN PROGRAMA DE INTERCAMBIO

TÍTULO: **Analyse du comportement et des propriétés mécaniques de
composites obtenus par fabrication additive**

ALUMNO: **Pablo Alonso Gil**

FECHA: **28/05/2021**

CENTRO: **Bordeaux**

UNIVERSIDAD: **Ecole Nationale des Arts et Métiers**

TUTOR: **MONTEMURRO Marco**

Resumen, palabras clave, (Abstract y Keywords)

Este proyecto forma parte de un estudio cuyo objetivo final es el de proporcionar una base de datos sobre las propiedades mecánicas de los materiales composites obtenidos mediante fabricación aditiva.

Se trata del estudio inicial de la puesta a punto de una campaña de caracterización de las diferentes combinaciones fibra-matriz y las diferentes estrategias en las que se depositan. Con este objetivo, he preparado y efectuado ensayos preliminares de tracción con probetas fabricadas por capas unidireccionales sucesivas en PETG y fibra de carbono con la ayuda de la máquina Anisoprint Composer A4. A su vez, he analizado las secciones transversales de las probetas ópticamente y los resultados han sido comparados con las estimaciones analíticas.

Palabras clave: Fabricación aditiva, composite, fibra, estrategia de deposición, ensayos de tracción

This project is part of an ongoing research which aims at creating a database of the mechanical properties of composite materials obtained by additive manufacturing. In fact, it consists in the initial part of a characterisation campaign in which different fibre-matrix combinations and deposition strategies will be evaluated. For that purpose, preliminary traction tests of PETG and carbon fibre multilayer unidirectional samples have been prepared and carried out in the machine Anisoprint Composer A4. The transversal sections of samples have been optically analysed and the results have been compared with analytical estimations

Keywords: Additive manufacturing, composites, fibres, deposition strategies, traction tests



ENSAM - CER de Bordeaux

33405 Talence Cedex

Anisoprint 2 : Analyse du comportement et des propriétés mécaniques de composites obtenus par fabrication additive

Rapport final

31.05.2021

Pablo ALONSO GIL

Résumé

Ce projet fait partie d'une étude dont l'objectif finale est celui de rendre disponible une base de données sur les propriétés mécaniques des matériaux composites obtenus par fabrication additive. Certes, il s'agit de l'étude initiale lors de la mise en œuvre d'une campagne de caractérisation des différentes combinaisons fibre-matrice et de différentes stratégies de dépôt. Dans ce but, on a préparé et effectué des essais préliminaires de traction avec des éprouvettes fabriquées par couches unidirectionnelles successives en PETG et fibre de carbone sur la machine Anisoprint Composer A4. On a également analysé les sections transversales des éprouvettes optiquement et les résultats ont été comparés avec des estimations analytiques.

Mots-clés : fabrication additive, composites, fibres, stratégies de dépôt, essais de traction.

Abstract

This project is part of an ongoing research which aims at creating a database of the mechanical properties of composite materials obtained by additive manufacturing. In fact, it consists in the initial part of a characterisation campaign in which different fibre-matrix combinations and deposition strategies will be evaluated. For that purpose, preliminary traction tests of PETG and carbon fibre multilayer unidirectional samples have been prepared and carried out in the machine Anisoprint Composer A4. The transversal sections of samples have been optically analysed and the results have been compared with analytical estimations.

Keywords: additive manufacturing, composites, fibres, deposition strategies, traction tests.

Table de matières

1. Introduction	5
2. Contexte, périmètre et objectifs	6
3. Intérêt du projet	7
4. Cadre théorique	8
4.1. État de l'art	8
4.2. Cahier des charges fonctionnel	8
4.3. Solutions possibles	10
4.4. Solution retenue	11
5. Cadre pratique	13
5.1. Étude des paramètres et impressions préliminaires	13
5.2. Amélioration des scripts Python	15
5.3. Définition des éprouvettes pour les essais	18
5.4. Essais de traction	21
5.5. Polissage et visualisation des échantillons	22
6. Présentation et analyse des résultats	26
7. Conclusion	28
Bibliographie	29
Glossaire	30
Annexe I	I
Annexe II	XXV

Table des figures

Figure 1. Diagramme APTE.	9
Figure 2 : Explication graphique des paramètres <i>fiber feedrate</i> et <i>extrusion width</i> (source :Aura).	14
Figure 3. Détails de quelques bouges à régler.	16
Figure 4. Relation entre <i>macrolayer height</i> sur Aura et la variation du paramètre V du G-code.	17
Figure 5. Relation entre <i>extrusion width</i> sur Aura et la variation du paramètre V du G-code.	17
Figure 6. Relation entre <i>extrusion width</i> sur Aura et la fraction volumique de fibre.	18
Figure 7. Relation entre <i>extrusion width</i> sur Aura et la fraction volumique de CFRTS.	18
Figure 8. Schéma de la géométrie des éprouvettes de traction.	19
Figure 9. Représentation des fibres à l'intérieur de l'éprouvette (source : Aura).	19
Figure 10. Représentation des constituants des composites.	20
Figure 11. Montage pour l'essai de traction.	21
Figure 12. Scie utilisée pour couper les échantillons.	22
Figure 13. Échantillon sorti de l'autocuseur.	23
Figure 14. Machine de polissage.	23
Figure 15. Schéma sur Image J (étapes 1, 2, 3 et 4).	24
Figure 16. Schéma sur Image J (analyse des résultats).	24
Figure 17. Identification de la phase vide sur ImageJ.	25
Figure 18. Identification de la phase CFRTS sur ImageJ.	25
Figure 19. Identification de la phase TP sur ImageJ.	25

Table des tableaux

Tableau 1. Fonctions de l'APTE.	8
Tableau 2. CDCF du projet.	9
Tableau 3. Décisions fondamentales et leurs critères.	11
Tableau 4. Paramètres des éprouvettes E005, E006 et E010.	14
Tableau 5. Paramètres des éprouvettes E011, E011.1, E011.2 et E011.3.	14
Tableau 6. Paramètres des éprouvettes E007.1, E007.2 et E008.	15
Tableau 7. Paramètres d'impression choisis.	19
Tableau 8. Constituants des filaments polymères chargés en fibres et avec des matrices bimatériaux.	20
Tableau 9. Nature et caractéristiques des constituants des filaments.	20
Tableau 10. Caractéristiques globales des éprouvettes de traction choisies.	21
Tableau 11. Classification des éprouvettes de traction.	22
Tableau 12. Résultats des essais de traction et des analyses optiques.	26

Liste des acronymes et symboles

APTE	Application aux Techniques d'Entreprise
CDCF	Cahier des charges fonctionnel
CF	<i>Continuous fibre</i>
CFF	<i>Carbon filament fabrication</i>
CFRTS	<i>Continuous fibre reinforced thermoset</i>
CFRTSTP	<i>Continuous fibre reinforced thermoset and thermoplastic</i>
E	Module elastique
FFF	<i>Fused filament fabrication</i>
FVF	Fraction volumique des fibres
I2M	Institut de Mécanique et d'Ingénierie
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
PETG	Polytéréphtalate d'éthylène glycolisé
R_m	Résistance mécanique
TP	<i>Thermoplastic</i>
TS	<i>Thermoset</i>

1. Introduction

Ce projet propose la mise en œuvre d'une campagne de caractérisation des propriétés élastiques et de résistance des matériaux composites obtenus par fabrication additive. Certes, ce rapport inclut une caractérisation classique d'éprouvettes fabriquées par couches unidirectionnelles successives en PETG (polytéréphtalate d'éthylène glycolisé) et fibre de carbone, à travers d'une approche expérimentale et numérique. Cette caractérisation englobe des essais de traction unidirectionnel et l'analyse optique des éprouvettes. Les impressions sont faites dans la machine Anisoprint Composer A4 à l'aide de son logiciel Aura, qui permet de générer des fichiers en langage G-code. Parallèlement, on a continué à affiner des scripts Python qui servent à créer du G-code d'une manière plus manipulable, en guise de continuation du projet réalisé au sein de la matière « Projet dont partie Recherche ».

L'objectif finale est celui de rendre disponible une base de données des propriétés mécaniques des différentes combinaisons fibre-matrice et des différents paramètres de dépôt, et de fournir un outil numérique d'aide à la conception pour extraire la loi de comportement des phases constitutives du matériau hétérogène. Dans ce but, ce rapport peut servir de guide, car on établit les paramètres d'intérêt à modifier sur le logiciel Aura correspondant à la machine Anisoprint Composer A4, ainsi que la méthodologie à suivre pour mener à terme les essais et exploiter les résultats. Toutefois, le nombre d'essais exécutés pour le moment et leur diversité ne permettent pas de construire une base de données encore.

Le projet est réalisé par un groupe de quatre élèves de 2^e année du Programme Grande École à Arts et Métiers ParisTech, au sein de la matière « Projet dont partie Réalisation ». Le reste des personnes concernées par le projet sont les suivantes : un stagiaire de master et trois enseignants encadrants qui appartiennent à l'institut I2M (Institut de Mécanique et d'Ingénierie). En outre, le projet s'est déroulé majoritairement dans l'atelier des composites et dans le laboratoire des matériaux d'Arts et Métiers à Talence.

2. contexte, périmètre et objectifs

Ce projet fait partie d'une étude dont l'objectif finale est celui de rendre disponible une base de données sur les propriétés mécaniques de différentes combinaisons fibre-matrice et de différentes stratégies de dépôt, et de fournir un outil numérique d'aide à la conception pour extraire la loi de comportement des phases constitutives du matériau hétérogène dans le cas où une stratégie de dépôt non-standard est utilisée. Afin d'atteindre ceci, une caractérisation classique d'éprouvettes fabriquées par couches unidirectionnelles successives déposés selon stratégies de dépôt différentes sera envisagée par une approche expérimentale et numérique. Des modèles aux éléments finis des essais seront générés et utilisés pour compléter les résultats issus des essais, accomplissant une caractérisation par méthode inverse.

Toutefois, ces tâches sont hors de portée du projet, qui cible la préparation et la validation de la méthodologie pour mettre en œuvre une campagne des essais de traction afin de caractériser des propriétés élastiques et de résistance. Il s'agit de la continuation du projet accompli le semestre précédent, où on a travaillé sur la compréhension de la machine Anisoprint Composer A4 et sur le logiciel Aura, ainsi que sur la programmation des stratégies simples de dépôt. Des études subséquentes pourront mener à terme des essais pour différentes combinaisons de matériaux et paramètres de dépôt, en vue de construire une base de données. Au début de l'année académique, on avait identifié les étapes suivantes :

1. Recherche bibliographique et mise à niveau à propos des composites et la fabrication additive.
2. Développement du code pour traduire la stratégie de dépôt en code lisible par la machine.
3. Définition des propriétés utilisés dans la caractérisation des composites.
4. Études sur les essais à réaliser pour caractériser les différents composites.
5. Établissement des protocoles à suivre pour les essais et prise des données selon les normes.
6. Fabrication des éprouvettes en s'appuyant sur le code développé.
7. Réalisation des essais.
8. Analyse des résultats et création des bases de données.

Compte tenu des restrictions à cause de la crise sanitaire et de la magnitude du projet, le premier semestre on avait décidé de réduire le périmètre du projet aux deux premières phases de l'étude globale. Le deuxième semestre, les mesures sanitaires ont permis d'accéder plus régulièrement aux installations de l'école, donc on vise à compléter le reste des étapes. Toutefois, on a limité le périmètre du projet, car les tâches expérimentales prennent beaucoup de temps par rapport à la charge académique de la matière « Projet dont partie Réalisation ». Certes, on a décidé de se concentrer sur la stratégie de dépôt unidirectionnelle de la fibre, de telle sorte que l'on peut se servir du logiciel Aura et utiliser les scripts Python créés pendant le premier semestre comme un outil complémentaire. De plus, on s'est limité aux essais de traction en PETG et fibre de carbone, sans faire varier les paramètres. De cette manière, on pourrait établir la liste suivante de tâches à accomplir :

1. Se documenter à propos des normes (essais de traction et de flexion).
2. Choisir les paramètres à faire varier sur Aura.
3. Définir et tester l'impression des éprouvettes.
4. Définir et accomplir la validation des impressions.
5. Améliorer les scripts Python.
6. Exécuter les essais mécaniques.
7. Analyser les résultats.

3. Intérêt du projet

La technologie de fabrication additive des polymères chargés résultant de la combinaison des procédés FFF (*fused filament fabrication*) et CFF (*carbon filament fabrication*) permet de déposer des fibres continues (entre autres, carbone et verre) sur un support (planaire ou courbée) pour générer des pièces très performantes en termes de propriétés mécaniques finales. La stratégie de dépôt a une influence importante sur le résultat final à cause de l'anisotropie locale de la structure résultante.

En fonction des exigences structurales, des limites technologiques et des coûts globaux de fabrication, plusieurs choix vis-à-vis des stratégies de dépôt du renfort et de la combinaison renfort-matrice sont possibles. Ces stratégies peuvent, par exemple, viser à renforcer les parois externes d'une pièce pour mieux supporter les sollicitations en flexion et/ou adopter un renfort de type unidirectionnel. Pour une correcte conception, la connaissance et l'intégration des propriétés mécaniques spécifiques aux différentes stratégies de dépôt du renfort sont essentielles.

Parallèlement, les combinaisons des matériaux et les processus de dépôt ont une influence directe sur le résultat. Il existe plusieurs procédés innovants qui semblent fortement prometteurs, mais les experts du domaine remarquent encore le manque des bases de données ou d'autres productions pour contraster et valider leurs résultats. C'est le cas de la fabrication à partir des filaments continus des polymères chargés en fibres et avec des matrices bimatériaux (l'un thermoplastique et l'autre thermodurcissable). Ce procédé employé dans l'imprimante Anisoprint Composer A4 réussit à combiner les avantages des constituants, en vue d'améliorer la performance mécanique des pièces.

La maîtrise de tout ceci aboutirait à des modèles optimaux pour la conception mécanique. Par conséquent, les produits seraient capables de mieux résister aux sollicitations, on pourrait minimiser le gaspillage des matériaux et le poids des structures serait diminué. Ceci entraînerait une réduction des coûts, et les entreprises concernées pourraient augmenter leurs marges. Spécialement, les entreprises qui travaillent dans la conception et la fabrication mécanique pourraient profiter de meilleurs designs. Entre autres, on pourrait remarquer les secteurs aéronautique et spatial.

4. Cadre théorique

4.1. État de l'art

Par rapport aux objectifs du projet, la littérature scientifique montre que la fabrication additive des composites est un domaine en vogue dès la fin du XX^e siècle. La fabrication additive, en général, appartient à un groupe de procédés qui se sont remarquablement développés pendant les dernières années. L'extension aux matériaux composites est un champ plus récent, et ceci a attiré l'intérêt de plusieurs secteurs industriels, notamment l'aéronautique et l'espace. Singh *et al.* ont récemment publié un article dévoilant l'état de l'art de la fabrication additive des composites [1].

Parmi la plus récente production scientifique, on observe que les auteurs mettent le focus sur l'optimisation et la modélisation. En 2016, Zhang *et al.* ont étudié l'effet de différents aspects dans la qualité des éprouvettes imprimés ; entre autres, ils ont étudié les angles aigus et les coupures des fibres [2]. En 2019, Safonov a proposé l'optimisation simultanée de la distribution du matériau et des fibres [3], et Ranaivomiarana a offert une méthode d'optimiser en parallèle la forme et la direction de l'anisotropie [4]. En même temps, Adumitroaie *et al.* présentent la fabrication à partir des filaments continus des polymères chargés en fibres et avec des matrices bimatériaux, qui est appliquée dans les machines Anisoprint [5]. D'autres mènent à terme des analyses orientées aux sollicitations que l'on trouve dans des circonstances réelles ; par exemple, Azarov *et al.* décrivent le processus d'impression 3D d'une structure composite de type grille, soumise à flexion transversale et à cisaillement interlaminaire [6]. En 2020, Regalla *et al.* ont analysé l'influence des défauts à cause du manque de fusion dans la fracture macroscopique, en vue de concevoir des prothèses [7].

En fin de compte, on pourrait conclure que la littérature sur la fabrication additive, et spécialement celle des composites, est en train de s'enrichir et d'affiner. Cependant, il s'agit encore d'une expertise en phase d'initiation et loin de l'application proprement industrielle.

4.2. Cahier des charges fonctionnel

Afin d'effectuer l'analyse fonctionnelle du produit final de projet, on s'appuie sur la méthode APTE (Application aux Techniques d'Entreprise) et une définition plus rigoureuse des fonctions est faite à l'aide d'un CDCF (cahier des charges fonctionnel).

Le diagramme APTE est le suivant :

Tableau 1. Fonctions de l'APTE.

Fonctions
FP1 : Observer et évaluer l'influence des paramètres d'impression
FP2 : Optimiser les paramètres d'impression et l'usage des matières
FC1 : Créer de connaissance des composites
FC2 : Établir une méthodologie pour la réalisation des essais
FC3 : Augmenter les possibilités d'impression
FC4 : Faire connaître les capacités de la fabrication additive
FC5 : Utiliser plusieurs méthodes d'analyse

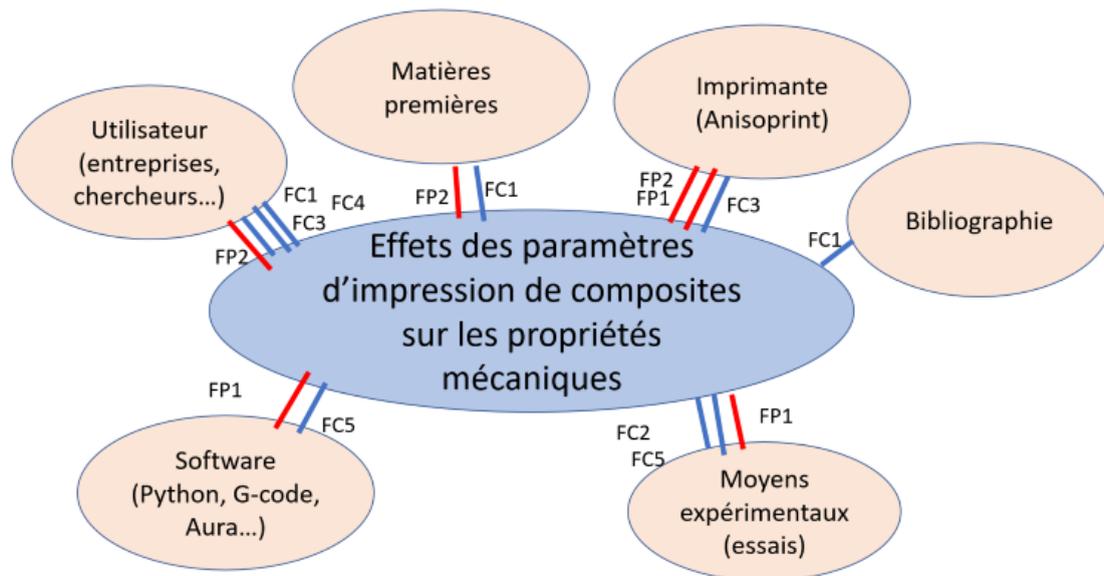


Figure 1. Diagramme APTe.

Les fonctions identifiées sont proprement définies dans les CDCF, où on estime les critères pour vérifier la réalisation des fonctions, leurs valeurs ou leurs échelles, et leur flexibilité.

Tableau 2. CDCF du projet.

Fonctions	Critères	Valeurs	Flexibilité
FP1 : Observer et évaluer l'influence des paramètres d'impression	- Nombre de paramètres d'impression influençant sur les propriétés mécaniques	- Nombre de paramètres évalués	Grande flexibilité, car on n'envisage pas englober tous les paramètres d'impression.
FP2 : Optimiser les paramètres d'impression et l'usage des matières	- Obtention des valeurs optimales des paramètres - Adaptabilité des paramètres influençant sur la quantité déposé	- Nombre de paramètres optimisés	Flexibilité faible-moyenne, car presque tous les paramètres évalués passent cette étape.
FC1 : Créer de connaissance des composites	- Caractéristiques étudiées et analysées - Relation entre les paramètres d'impression et leur influence dans le composite	- Nombre de propriétés étudiées - Nombre de types d'essais exécutés - Nombre de relations paramètre-effet étudiées	Grande flexibilité, car le domaine de composites est très vaste et reste encore inexploré.

Fonctions	Critères	Valeurs	Flexibilité
FC2 : Établir une méthodologie pour la réalisation des essais	- Définition d'une méthodologie permettant d'obtenir et affirmer des résultats	- Robustesse, fiabilité et répétitivité des essais	Flexibilité faible, car la méthodologie suivie conditionne les résultats et leur exploitation.
FC3 : Augmenter les possibilités d'impression	- Ressemblance entre la géométrie programmée et la géométrie imprimée - Fonctionnement adéquate de l'imprimante	- Nombre de différences entre la géométrie programmée et la géométrie imprimée - Cohérence et répétabilité du fonctionnement de l'imprimante	Flexibilité faible-moyenne, car l'analyse des résultats expérimentaux est uniquement fiable si l'impression théorique correspond avec la réalisation.
FC4 : Faire connaître les capacités de la fabrication additive	- Qualité et pertinence des résultats	- Nombre de conclusions pertinentes - Intérêt montré par des tiers	Grande flexibilité, car la divulgation des résultats dépendra de la qualité des résultats et elle n'est pas une fonction essentielle de cette étude académique.
FC5 : Utiliser plusieurs méthodes d'analyse	- Pertinence et faisabilité des essais	- Nombre de essais effectués - Nombre de relations paramètre-effet étudiées	Flexibilité moyenne-faible, car les moyens employés doivent être les plus précis possibles pour obtenir des relations fiables.

Pendant le déroulement de ce semestre, le CDCF n'a pas souffert des changements remarquables. Cependant, on a limité la quantité d'essais expérimentaux, notamment à cause des contraintes de temps lors des tâches expérimentales. Toutefois, on a accompli une petite campagne d'essais de traction, en guise de validation de la méthodologie pour des campagnes plus vastes (voir annexe I).

4.3. Solutions possibles

Globalement, pendant la conception et le développement du projet, on a dû réfléchir et choisir cinq décisions fondamentales :

- La génération du G-code (Aura ou Python).
- Les paramètres d'impression à analyser.
- L'organisation des essais expérimentaux (arrangement et développement).
- Les géométries à programmer et à imprimer (niveau de complexité).
- L'analyse des résultats.

Les critères établis varient afin d'orienter la solution selon la nature de chaque décision et les différentes contraintes (voir tableau 3). Dans le cas des matériaux et de l'organisation lors des essais expérimentaux, on n'a pas eu le choix et on a dû s'adapter à l'offre de l'atelier des composites et le laboratoire de matériaux d'Arts et Métiers à Talence. En effet, ces deux laboratoires comptent déjà avec les moyens suffisants à l'exécution des essais.

Tableau 3. Décisions fondamentales et leurs critères.

Décision fondamentale	Solutions possibles	Critère 1	Critère 2	Critère 3
Génération du G-code	Des scripts Python ou le logiciel Aura	Faisabilité des éprouvettes et des stratégies désirées	Répétitivité, robustesse, fiabilité et précision des éprouvettes	Facilité d'interaction et quantité de paramètres
Paramètres d'impression à analyser	Paramètres (températures, <i>fiber feedrate</i> , <i>extrusion width</i> , <i>macrolayer height...</i>).	Importance et magnitude de l'effet sur le résultat	Accessibilité et faisabilité de la variation	
Organisation des essais expérimentaux	Traction, flexion, torsion, analyse optique...	Pertinence des résultats	Disponibilité des moyens dans le laboratoire	
Géométries à programmer et à imprimer	Géométries générales à partir des fonctions analytiques ou géométries simples	Adéquation aux normes des essais	Complexité de programmation et de validation	-
Analyse des résultats	Software d'analyse d'images et exploitation des résultats	Disponibilité et gratuité des software	Complexité de l'analyse des données	

4.4. Solution retenue

Tout d'abord, on a choisi d'utiliser le software Aura d'Anisoprint pour la génération du G-code à insérer dans la machine. En effet, les éprouvettes pour les essais de traction définies par la norme NF EN ISO 527 [8] ont une géométrie atteignable sur Aura. De plus, les fichiers G-code créés par Aura sont plus optimisés que ceux créés à partir des scripts Python, donc les temps d'impression sont plus réduits et la répétitive ainsi que la qualité de l'impression sont meilleures. Par conséquent, même si on a continué à affiner les scripts Python préalablement créés (implémentation de plusieurs paramètres et fonctionnalités), on a fait la plupart des impressions à l'aide d'Aura.

Ensuite, quant aux paramètres à étudier, on a décidé de faire varier des paramètres d'Aura qui affectent à la configuration géométrique des éprouvettes et qui font varier la fraction volumique de fibre. On s'est intéressé aussi à l'effet que ces paramètres peuvent avoir sur les interfaces entre les différents constituants du composite. Les paramètres principaux ont été les suivants : *fiber*

feedrate, *extrusion width* et *macrolayer height*. Il s'agit des paramètres que l'on peut prendre en compte dans les scripts Python aussi et dont l'effet sur le G-code est exploitable.

Troisièmement, on s'est surtout concentré sur les essais de traction en s'appuyant sur la norme NF EN ISO 527 [8], même si on a aussi analysé la possibilité de faire des essais de flexion 3 points selon la norme NF EN ISO 14125 [9]. En fin de compte, à cause de contraintes de temps, on a priorisé les essais de traction, car ils sont des essais assez simples mais significatifs en ce qui concerne la caractérisation classique des matériaux. De plus, on compte avec une machine Adamel Lhomargy/MTS DY36 de 100 kN dans le laboratoire des matériaux de l'école. Les matériaux d'impression utilisés ont été le polymère PETG et la fibre de carbone. Ces matériaux étaient disponibles dans le laboratoire des composites pour faire des impressions à l'essai.

En quatrième lieu, bien que on ait utilisé la norme NF EN ISO 527 [8] comme référence, on a décidé de réduire les dimensions des éprouvettes, car les résultats restent également significatifs ; et ceci permet d'effectuer plus d'essais, de réduire les temps d'impression et de dépenser moins de fibre de carbone. Certes, on a considéré une géométrie rectangulaire avec talons qui nous convient.

Pour l'analyse des résultats, on a utilisé les données obtenues des essais de traction, notamment la contrainte et la déformation dans la direction longitudinale de l'éprouvette, et un logiciel libre pour l'analyse des images de microscope prises pour les sections transversales des éprouvettes. L'objectif de cette partie du travail a été de définir le module élastique (E) et la résistance à la traction (R_m) dans la direction longitudinale de l'éprouvette, de déterminer les fractions volumiques des différents constituants et de les comparer avec les estimations analytiques.

5. Cadre pratique

À partir d'une première lecture des normes des essais de traction (NF EN ISO 527 [8]) et de flexion (NF EN ISO 14125 [9]) on a étudié les paramètres que l'on peut modifier sur Aura afin d'obtenir des éprouvettes avec différentes caractéristiques mécaniques, notamment en raison de la FVF (fraction volumique des fibres). Ensuite, on a testé expérimentalement la viabilité de faire varier ces paramètres, grâce à l'analyse optique, et on a aussi essayé d'implémenter ces variations dans les scripts Python. Finalement, on a défini les dimensions et les caractéristiques des éprouvettes à imprimer pour les essais de traction, on a exécuté 9 essais et on a analysé les résultats, dont 5 correspondent aux éprouvettes de matériau composite et 4 correspondent aux éprouvettes en polymère. Les matériaux utilisés sont les suivants : le filament continu de polymère thermodurcissable chargé en fibre CCF-1.5K (fibre de carbone T-300 et époxy d'Anisoprint) et le filament continu de polymère thermoplastique PolyMax PETG.

5.1. Étude des paramètres et impressions préliminaires

Les paragraphes suivants présentent un résumé des impressions accomplies et des conclusions tirées de leur analyse. Une présentation plus exhaustive et graphique est jointe en annexe I.

Tout d'abord, on a vérifié expérimentalement la longueur minimale de dépôt de fibre que l'imprimante Anisoprint Composer A4 est capable de déposer sans défauts. Les vérifications numériques suggéraient que c'était une longueur de 50 mm, donc on a imprimé deux éprouvettes trapézoïdales (E001 et E002) dans lesquelles la longueur de dépôt diminue à chaque droit aller-retour. Certes, on a imprimé des fils d'entre 30 mm et 60 mm, et on a observé que leur apparence est correcte jusqu'à un peu au-dessous de 50 mm. Par conséquent, on pourrait dire que la limite numérique est correcte. L'éprouvette E002 utilise les paramètres de base d'Aura pour PolyMax PETG, tandis que l'éprouvette E001 a des paramètres légèrement modifiés.

Deuxièmement, on a imprimé une éprouvette rectangulaire des dimensions 65x10x3,5 mm (E003), afin d'analyser la conformité des pièces obtenues avec les paramètres de base. L'analyse est effectuée optiquement, à travers de la visualisation micrographique de deux sections transversales de l'éprouvette. L'une correspond à la section centrale, et l'autre était au milieu de la section centrale et la section extérieure. Le résultat principal a été que les sections n'ont pas presque de vide, à exception des défauts particuliers. Ceci permet de mépriser la fraction du volume qui correspond au vide, lors des estimations des fractions de volume des différents composants de la section. De plus, on vérifie que la conformité intérieure des impressions est correcte.

En troisième lieu, on a voulu imprimer une éprouvette E004 à partir des scripts de Python, afin de vérifier si les résultats étaient semblables. La différence principale était la coupe de la fibre implémentée à chaque aller-retour sur les scripts. Même si les dimensions de l'éprouvettes étaient plus petites, il y a eu des soucis qui nous ont découragés de continuer à travailler régulièrement sur les scripts. Certes, on a décidé de travailler normalement sur Aura et de corriger les bogues sur les scripts plus lentement.

Ensuite, on s'est intéressé à évaluer la rectitude de chaque fil de fibre déposé. Dans ce but, on a étudié l'influence des paramètres *fiber feedrate* et *extrusion width*. Le premier fait varier la tension appliquée au fil de fibre lors du dépôt ; plus le *fiber feedrate* est petit, plus l'alimentation de fibre est faible donc le résultat est plus précontraint (100 % par défaut). Le deuxième régule la quantité de thermoplastique coextrudée avec les fils de fibre ; plus *extrusion width* est grand, plus le fil coextrudé est large et donc la quantité de thermoplastique est plus grande (0,65 mm par défaut).

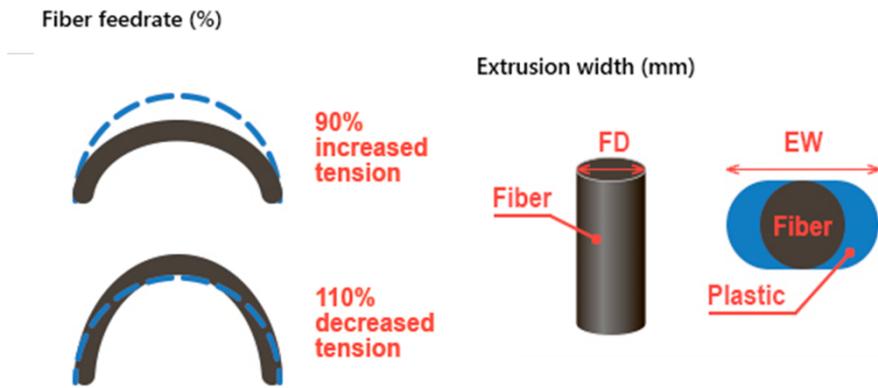


Figure 2 : Explication graphique des paramètres fiber feedrate et extrusion width (source :Aura).

L'éprouvette E005 des dimensions 130x5x1,7 mm a été imprimée avec *extrusion width* de 1 mm et *fiber feedrate* de 100 %, et l'éprouvette E009 des dimensions 130x3,87x1,8 mm a été imprimée avec *extrusion width* de 0,65 mm et *fiber feedrate* de 99 %. Dans les deux cas, on a arrêté l'impression après le dépôt de la couche de fibre, en vue d'observer le fil de fibre. On a constaté que la trajectoire du fil de la fibre dans l'éprouvette E005 avait plus d'oscillations. Pour finir, on a imprimé l'éprouvette E010 avec les paramètres par défaut et on a observé des caractéristiques intermédiaires, ce qui est cohérent.

Tableau 4. Paramètres des éprouvettes E005, E006 et E010.

	E005	E009	E010
Fiber feedrate (%)	100	99	100
Extrusion width (mm)	1	0,65	0,65

Afin d'estimer une limite inférieure d'*extrusion width*, on a exécuté 2 impressions avec une valeur *extrusion width* de 0,34 mm (E011 et E011.2) et d'autres 2 impressions avec une valeur *extrusion width* de 0,4 mm (E011.1 et E011.3). Dans les cas des éprouvettes E011 et E011.1, on a arrêté l'impression après la dernière couche de fibre pour bien visualiser l'impression des fils de fibre. Dans les cas des éprouvettes E011.2 et E011.3, on a fini l'impression pour faire l'analyse optique au microscope. Pendant l'impression de l'éprouvette E011.2, on a observé que des fibres sont sorties de la pièce, donc on peut conclure que l'*extrusion width* de 0,34 mm est trop petite.

Tableau 5. Paramètres des éprouvettes E011, E011.1, E011.2 et E011.3.

	E011	E011.1	E011.2	E011.3	Défaut
Extrusion width (mm)	0,34	0,4	0,34	0,4	0,65

En outre, on a étudié l'influence de la hauteur des couches (*macrolayer height*), qui par défaut est de 0,34 mm. Les éprouvettes E007.1, E007.2 et E008 des dimensions 65x100x3,5 mm ont été imprimées et analysées optiquement. Concrètement, les éprouvettes E007.1 et E007.2 ont été créés à partir du même fichier G-code, dont le *macrolayer height* était de 0,5 mm. La première a été imprimé avant le calibrage de la machine, tandis que la deuxième juste après son calibrage. Le *macrolayer height* de l'éprouvette E008 est de 0,3 mm.

Tableau 6. Paramètres des éprouvettes E007.1, E007.2 et E008.

	E007.1	E007.2	E008	Défaut
--	--------	--------	------	--------

Macrolayer heigth (mm)	0,5	0,5	0,3	0,34
-------------------------------	-----	-----	-----	------

Finalement, dans le but de concevoir des éprouvettes pour les essais mécaniques, on a évalué la disposition des couches thermoplastiques extérieures, pour qu'ils soient symétriques et qu'ils encapsulent correctement les fibres. L'éprouvette E012 des dimensions 65x10x1,36 mm a été imprimé avec une couche extérieure de 0,34 mm à chaque côté, tandis que l'éprouvette E012.1 des dimensions 65x10x2,04 mm avec deux couches extérieures de 0,34 mm à chaque côté. Les résultats étaient semblables, mais on a observé que la finition extérieure de l'éprouvette est meilleure avec deux couches extérieures de chaque côté.

5.2. Amélioration des scripts Python

Concernant l'implémentation des nouvelles fonctions dans les scripts créés le premier semestre, l'objectif initial était d'utiliser ces codes pour imprimer des éprouvettes dont on a besoin pour réaliser les essais mécaniques. Cependant, dû aux caractéristiques des éprouvettes à traction, on n'a pas besoin d'une géométrie ni d'une stratégie non-standard de dépôt. De plus, les éprouvettes doivent rester le plus normalisées possibles et avec le minimum de dispersion entre elles. En conséquence, on a considéré qu'il est plus convenable d'utiliser le logiciel Aura pour générer le G-code. En effet, les scripts Python créés manquent encore plusieurs fonctionnalités qui limitent la customisation et la qualité des impressions, tandis qu'Aura est un outil plus fiable et facilement paramétrable développé par Anisoprint elle-même.

Néanmoins, quelques implémentations ont été réalisées dans notre code développé :

- Découpe de la fibre et discrétisation des trajectoires.
- Paramétrisation de la hauteur de la pièce.
- Insertion du paramètre *extrusion width*.
- Impression des bords de type *brim* : correction des bords en polymère et implémentation des bords en fibre

On a traité tous ces implémentations, mais on n'a pas réussi à les intégrer correctement dans tous les cas. En conséquence, les scripts actuels ne comptent pas avec tous ces fonctionnalités, car il y a des bogues à résoudre. Toutefois, ceci n'empêche pas d'avancer sur la ligne principale du projet, car le logiciel Aura compte avec tous les fonctionnalités nécessaires pour l'impression des éprouvettes pour les essais mécaniques.

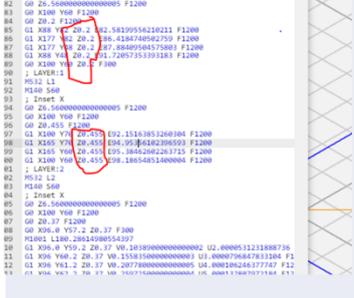
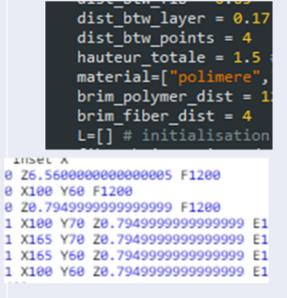
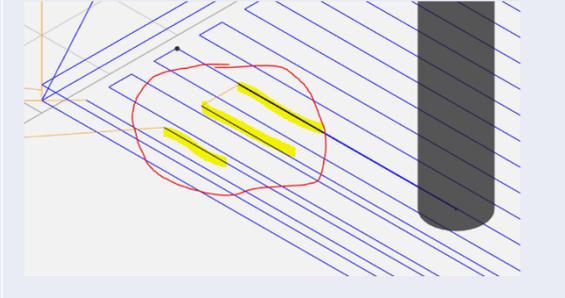
The parametrization height of the perimeters in the first layer of fiber	Number of layers	Fiber Head decalage
Rectangle_modified.py	G-code-creator.py	G-code-creator.py
		

Figure 3. Détails de quelques bouges à régler.

En revanche, la phase de programmation nous a aidé à maîtriser les différentes particularités de la machine Anisoprint Composer A4 et, au retour, ça nous a permis de comprendre le G-code généré par Aura et de modifier directement les fichiers G-code. Dans le cas où quelqu'un envisagerait de développer un nouveau code pour réaliser des trajectoires avec des caractéristiques que pour l'instant Aura n'accepte pas, une grande partie du code développé peut être réutilisable. On conseillera d'utiliser une approche de programmation orientée objet, afin que le résultat soit consistant et scalable.

En complément de la programmation, il a fallu établir la relation entre les paramètres d'Aura et les valeurs numériques du G-code, ainsi qu'entre ceux-ci et les propriétés générales des impressions. Ceci permet de connaître les règles de calcul internes utilisées par Aura et leur influence sur l'éprouvette finale, en ce qui concerne par exemple les fractions volumiques des constituants. On présente ci-dessous quatre graphiques obtenus de ces études :

Les premières deux graphiques montrent les relations entre le paramètre V (quantité totale de polymère coextrudée avec la fibre entre deux points) et les paramètres qui définissent la section de dépôt (hauteur par *macrolayer height* et largeur par *extrusion width*). Pour obtenir ces droites, on a simulé des géométries avec des différents *macrolayer height* et *extrusion width* sur Aura, et on a évalué la différence de V et de la coordonnée X entre deux points consécutifs avec la même coordonnée Y sur le G-code. On observe que les relations sont linéaires, c'est qui est cohérent puisqu'une section « rectangulaire » est proportionnel aux longueurs de ses côtés.

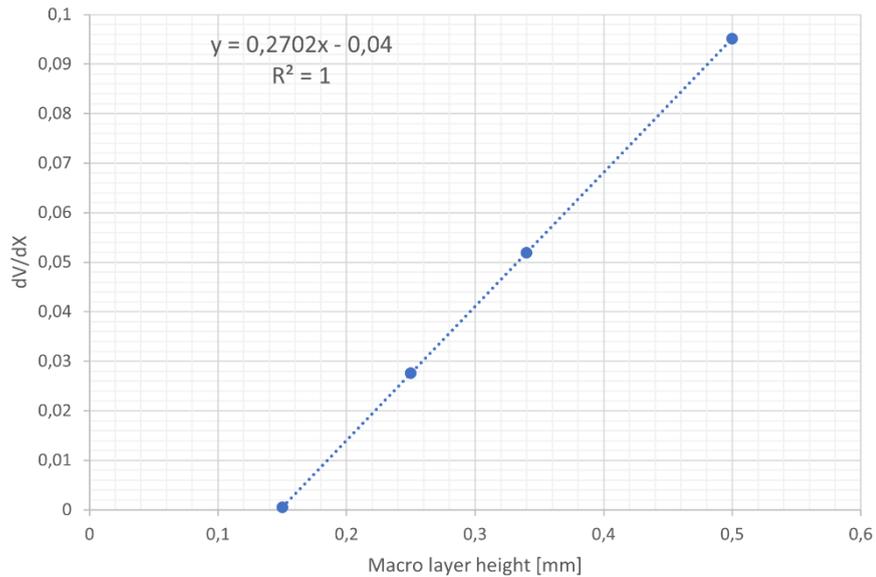


Figure 4. Relation entre macrolayer height sur Aura et la variation du paramètre V du G-code.

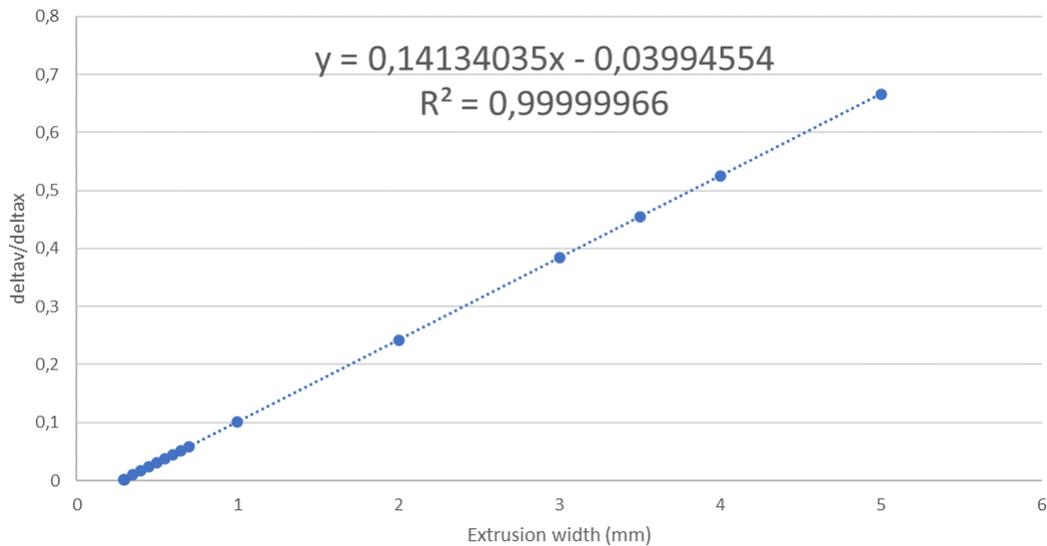


Figure 5. Relation entre extrusion width sur Aura et la variation du paramètre V du G-code.

Les autres deux graphiques montrent la relation entre la fraction volumique de fibre et celle de CFRTS (polymère thermodurcissable chargé en fibre continue, dans ce cas CCF-1.5K). On a simulé des géométries avec des différents *extrusion width* sur Aura, et la démarche suivie pour estimer les fractions volumiques est celle présentée dans l'annexe II. On observe que l'on obtient des courbes de puissance. Plus on utilise des valeurs d'*extrusion width* petites, plus la variation de la fraction volumique de fibre ou de CFRTS est grande. Ceci est cohérent, car la fraction de fibre ou de CFRTS devient insignifiant dans le cas de grandes valeurs d'*extrusion width*, donc sa variation est négligeable.

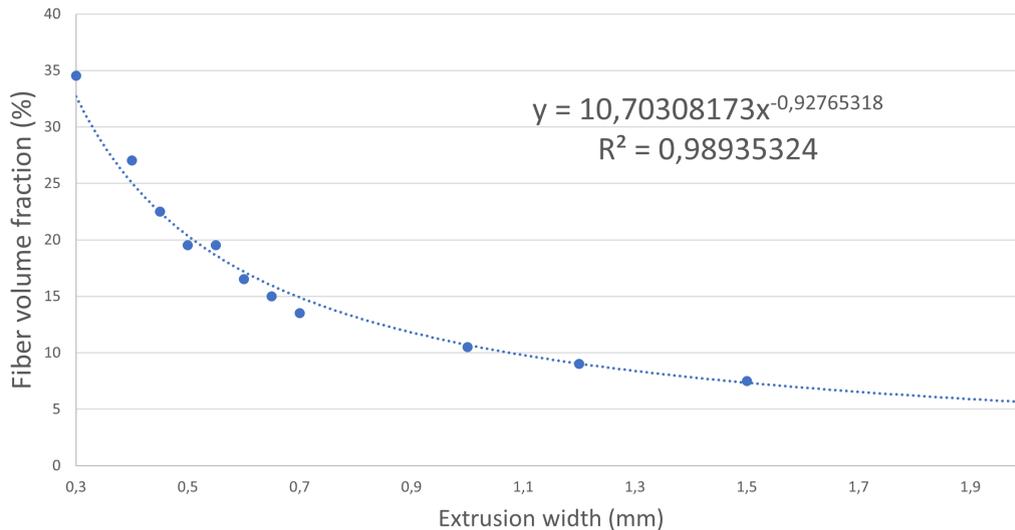


Figure 6. Relation entre extrusion width sur Aura et la fraction volumique de fibre.

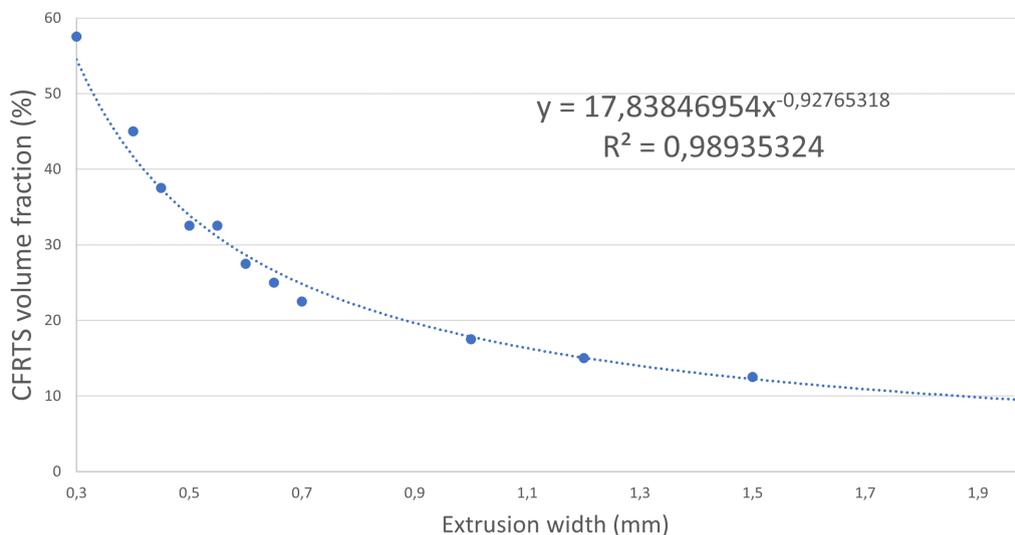


Figure 7. Relation entre extrusion width sur Aura et la fraction volumique de CFRTS.

5.3. Définition des éprouvettes pour les essais

Dans ce projet, on s'est centré sur les essais de traction, car ils sont plus simples de mener à terme et ils fournissent l'information de deux caractéristiques fondamentales : le module élastique (E) et la résistance à la traction (R_m) dans la direction longitudinale de la sollicitation, qui coïncide avec la direction des fibres dans ce cas. La norme de référence a été NF EN ISO 527 [8], qui propose 3 types d'éprouvettes. On a considéré une géométrie rectangulaire avec talons qui nous convient, car ceci permet de travailler sur Aura et de simplifier la conception des éprouvettes. De plus, on a décidé de réduire les dimensions des éprouvettes, car les résultats que l'on veut tirer sont également significatifs ; et ceci nous permet d'effectuer plus d'essais, de réduire les temps d'impression et de dépenser moins de fibre de carbone.

Par conséquent, bien que les dimensions établis par la norme soient d'une longueur ≥ 250 mm, largeur 25 mm ou 50 mm, et épaisseur de 2 à 10 mm, on a décidé de fabriquer des éprouvettes rectangulaires des dimensions 200x18,15x2,38 mm, auxquels on colle des talons de 50 mm de longueur à chaque côté. De plus, la géométrie imprimée est de 220x18,15x2,38 mm, à laquelle on

scie 20 mm à un côté de sa longueur pour obtenir un échantillon de 20x18,15x2,38 mm pour l'analyse optique.

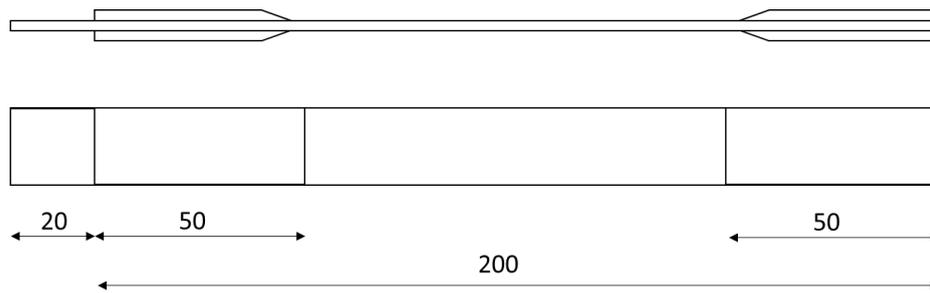


Figure 8. Schéma de la géométrie des éprouvettes de traction.

Les valeurs des paramètres les plus significatifs implémentées sur Aura sont les suivantes :

Tableau 7. Paramètres d'impression choisis.

Fiber infill pattern	Solid
Guide directions	0°
Extrusion width	0,65 mm
Macrolayer height	0,34 mm
Layer heights	0,34 mm *
Fiber feedrate	100 %

* Exception : *external shell layer height* 0,17 mm.

Le résultat est une éprouvette symétrique qui a 13 couches totales sur Aura, dont 7 sont des couches principales et le reste sont des couches seulement périmétrales. Parmi les couches principales, les 3 couches centrales contiennent 23 filaments de composite et les 4 couches extérieures sont de thermoplastique. Le temps d'impression est d'environ 1 h 30 min et on estime un coût des matériaux d'impression de 6,90 €.

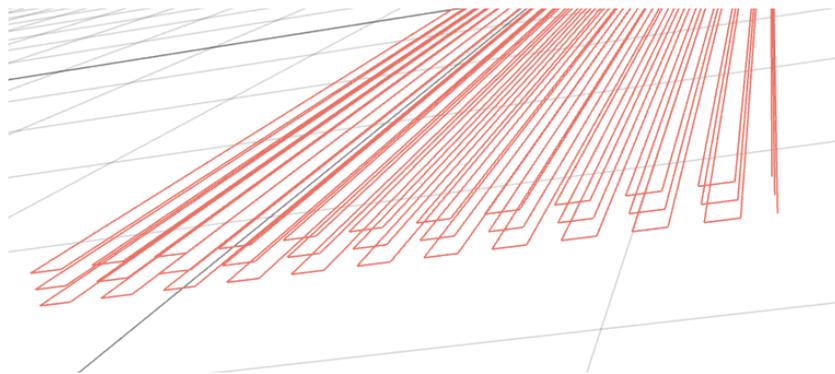


Figure 9. Représentation des fibres à l'intérieur de l'éprouvette (source : Aura).

Lors du choix des dimensions, l'estimation de la force nécessaire pour provoquer la rupture de l'éprouvette est un aspect pertinent. Étant donné que l'on dispose d'une machine de traction Adamel Lhomargy/MTS DY36 de 100 kN, on a vérifié que l'on réussit à casser les éprouvettes sans solliciter la machine au maximum. On présente ci-dessous ces vérifications.

Tout d'abord, les constituants des éprouvettes sont les suivants :

Tableau 8. Constituants des filaments polymères chargés en fibres et avec des matrices bimatériaux.

Sigle	Dénomination anglaise	Dénomination française
CF	<i>Continuous fibre</i>	Fibre continue
TS	<i>Thermoset</i>	Polymère thermodurcissable
TP	<i>Thermoplastic</i>	Polymère thermoplastique
CFRTS	<i>Continuous fibre reinforced thermoset</i>	Polymère thermodurcissable chargé en fibre continue
CFRTSTP	<i>Continuous fibre reinforced thermoset and thermoplastic</i>	Polymères thermodurcissable et thermoplastique chargés en fibre continue

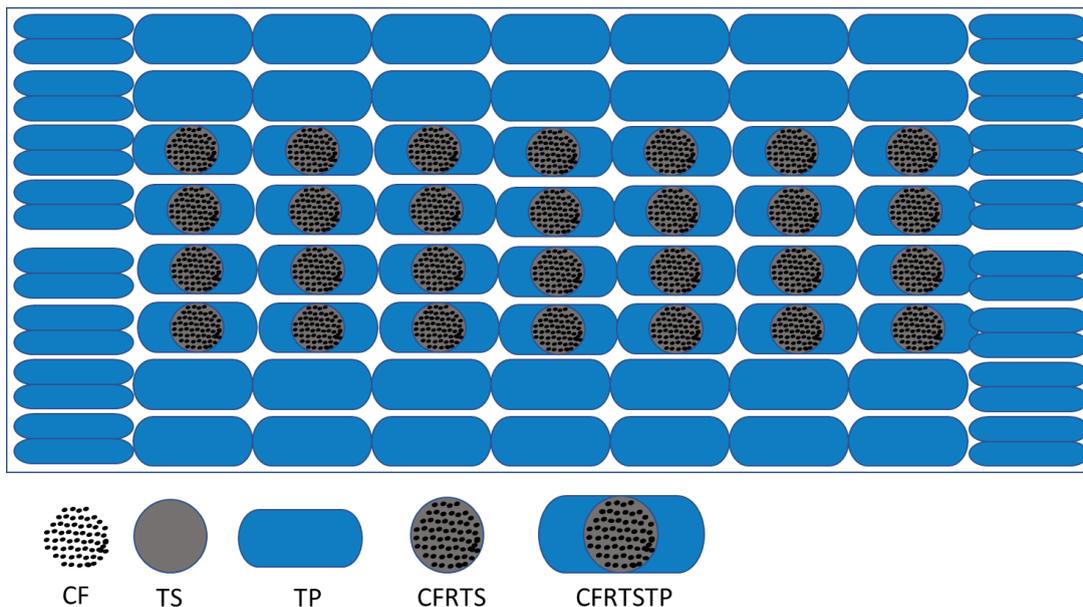


Figure 10. Représentation des constituants des composites.

Ensuite, la correspondance entre ces termes et le filament composite déposé dans nos impressions est présentée ci-dessous. Sauf précision explicite, les valeurs numériques correspondent aux fiches techniques des fournisseurs.

Tableau 9. Nature et caractéristiques des constituants des filaments.

Sigle	Matériau	FVF %	E (MPa)	R _m (MPa)
CF	Fibre de carbone T-300 (≈ 93 % C)	100	230.000	3.530
TS	Epoxy (formulation d'Anisoprint)	0	9.070 *	-
TP	PolyMax PETG	0	1.523	31,7
CFRTS	CCF-1.5K	57	135.000	1.965
CFRTSTP	PolyMax PETG + CCF-1.5K	28,7 **	67.416 *,**	981 **,***

* Valeurs calculées avec la loi de mélange : $X_{composite} = FVF \cdot X_{fibre} + (1 - FVF) \cdot X_{polymère}$

** Valeurs estimées pour la valeur de 0,65 mm d'extrusion width.

*** Valeur estimée selon la procédure proposée dans l'œuvre [10] de W. Callister.

Les éprouvettes sont la combinaison entre les dépôts de CFRTSTP et de seulement TP. En conséquence, dans le cas de l'éprouvette préalablement définie, les caractéristiques globales sont les suivantes :

Tableau 10. Caractéristiques globales des éprouvettes de traction choisies.

Dimensions (mm)	FVF %	E (MPa)	R _m (MPa)	Force requise (kN)
200x18,15x2,38	9,28	23.225	338	14,6

Quant à la force requise pour casser les éprouvettes, on se trouve dans la plage de la machine de traction (marge de sécurité de 6,85). En annexe II, on trouve des détails de calcul de ce paragraphe.

5.4. Essais de traction

On a exécuté au total 9 essais de traction sur la machine Adamel Lhomargy/MTS DY36, 5 essais de matériau composite et 4 essais de PolyMax PETG. En effet, pour bien caractériser le comportement d'un matériau composite, il est intéressant d'étudier celui de chaque constituant séparément aussi. La géométrie et la configuration des éprouvettes composites est présenté dans le paragraphe précédent, et les éprouvettes en résine ont les mêmes dimensions extérieures mais ils n'ont pas de talons. Dans tous les cas, la résine est déposée alternativement à 45° et -45° par rapport à la direction du dépôt de la fibre. La vitesse d'allongement a été de 2 mm/min pour tous les essais, et on a utilisé un extensomètre MTS avec la longueur de jauge de 25 mm.



Figure 11. Montage pour l'essai de traction.

On peut distinguer autres deux groupes parmi les éprouvettes mentionnés : les éprouvettes dont les couches extérieures en résine ont une épaisseur de 0,34 mm et les éprouvettes dont les couches extérieures en résine ont une épaisseur de 0,17 mm. Il s'agit d'une légère modification, afin d'observer si ces types de détails vont être judicieux lors de l'organisation de campagnes plus nombreuses. Ci-dessous on présente la classification des éprouvettes testés :

Tableau 11. Classification des éprouvettes de traction.

	Couches de 0,34 à l'extérieur	Couches de 0,17 à l'extérieur
Résine	E017 et E015	E022 et E021
Composite	E016, E014 et E013	E019 et E018

À partir des données récupérées des essais, on a construit les courbes de traction et on a déduit le module élastique (E) et la résistance à la traction (R_m) dans la direction longitudinale de la sollicitation, qui correspond à la direction des fibres. On a aussi observé le mode de défaillance de chaque éprouvette. Tout ceci nous a permis de valider que la conception des éprouvettes et le déroulement des essais sont corrects.

5.5. Polissage et visualisation des échantillons

Quant à l'analyse optique des impressions, on a effectué des coupes transversales qui après ont été enrobées et visualisées au microscope. Ces images ont été traitées sur le logiciel ImageJ, afin de calculer des caractéristiques comme les fractions volumiques des différents constituants de la section.

La méthode de travail est très systématique, elle consiste en trois phases bien différenciées. La première s'agit de préparer les éprouvettes. Pour ce faire, une scie est utilisée pour couper les échantillons. Dans notre cas, on a normalement coupé l'échantillon en deux sections, dans le but d'observer postérieurement les éventuelles variations dans l'axe longitudinal.



Figure 12. Scie utilisée pour couper les échantillons.

Ensuite, on a élaboré les échantillons, en plaçant les parties découpées dans des moules que l'on a recouverts d'une résine acrylique (methyl methacrylate polymérisé à partir de dibenzoyl peroxide). Pour diminuer la porosité, on a utilisé un autocuiseur à 2 bars pendant 20 minutes. Finalement, on obtient des échantillons prêts pour l'étape suivante.

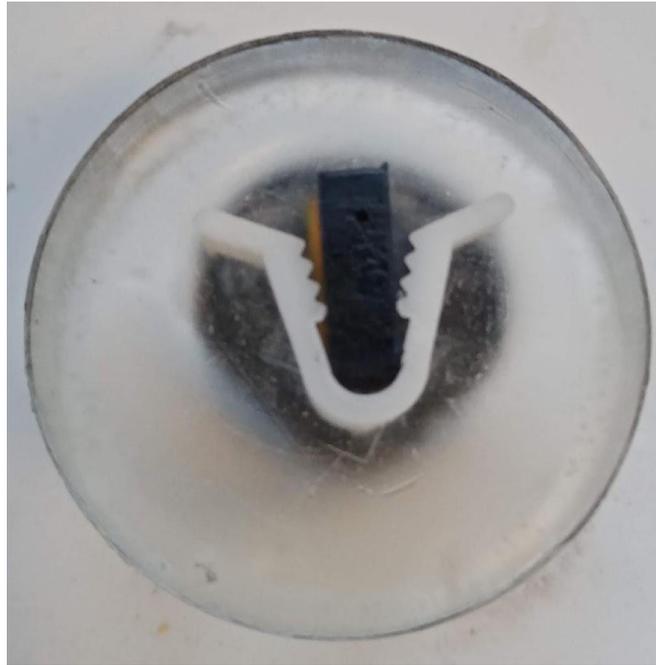


Figure 13. Échantillon sorti de l'autocuiseur.

La dernière étape est le polissage, qui consiste à polir une face de l'échantillon pour une visualisation optimale au microscope. Afin d'accomplir ceci, on a effectué quatre étapes de polissage à l'aide de papiers abrasifs. Les granularités des papiers choisies sont les suivantes : P600, P1200, P2400 et P4000.

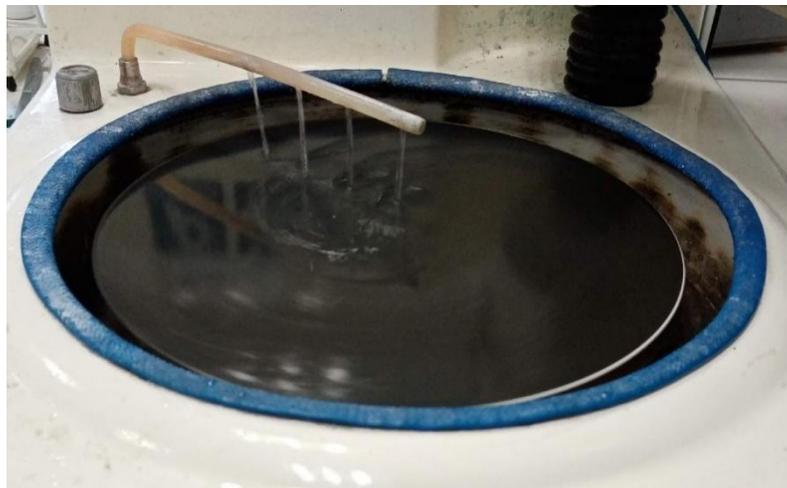


Figure 14. Machine de polissage.

Après ces trois étapes, les échantillons sont prêts pour l'analyse optique. Certes, on a pris des photographies au microscope, pour les analyser avec un logiciel de traitement d'image. On a choisi le logiciel ImageJ, grâce auquel nous avons obtenu les fractions de volume des constituants dans les sections transversales étudiées. Ce logiciel permet d'adapter l'image originale en une image finale, dont le résultat est plus adéquat pour l'étude de la composition de chaque section. Afin d'ajuster l'image finale, on a suivi les étapes suivantes (les résultats sont en annexe I) :

1. Délimiter un domaine d'étude caractéristique : on choisit une zone d'intérêt pour l'étude, en prenant une coupure rectangulaire qui contient un mélange homogène de fibre et résine.
2. Déterminer l'échelle de travail : en utilisant l'option *set scale*, le logiciel calcule le rapport « pixels/unité de longueur ». Pour ce faire, on complète la section *know distance* avec la distance que signalé dans l'image et *unit of length* avec l'unité de mesure.
3. Transformer l'image en 8 bits : le logiciel transforme les 8 bits correspondant à chaque couleur primaire (rouge, verte et bleu) en 8 bits, dans lesquels il enregistre uniquement l'intensité de la couleur réfléchie.
4. Appliquer de filtres : les principaux objectifs poursuivis par l'application de filtres sont les suivants : la réduction de la quantité de variations d'intensité entre les pixels voisins, la détection des pixels où il y a un changement brusque d'intensité et l'élimination des pixels dont le niveau d'intensité est très différent de celui de leurs voisins.

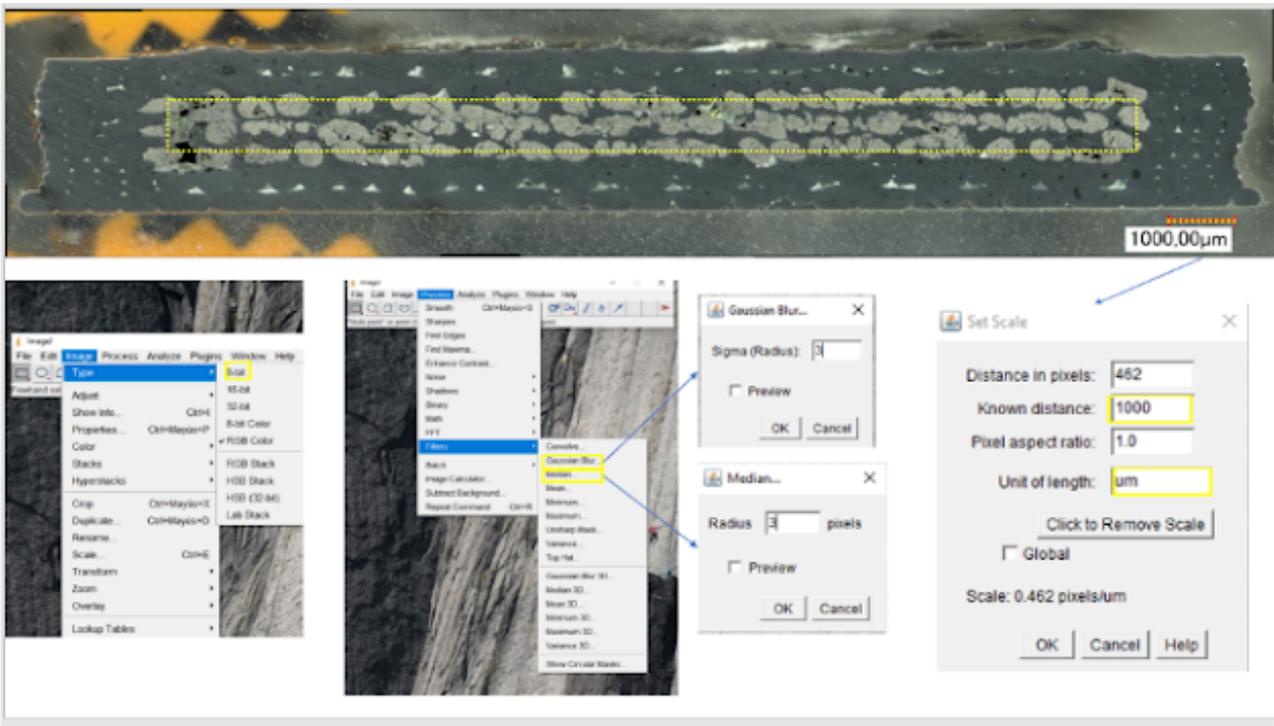


Figure 15. Schéma sur Image J (étapes 1, 2, 3 et 4).

5. Calculer les différentes phases qui composent la section : on peut distinguer trois phases qui sont le CFRTS, le TP et les vides. En utilisant la fonction *analyze*, on calcule le pourcentage de surface occupée par la phase en faisant défiler l'histogramme.

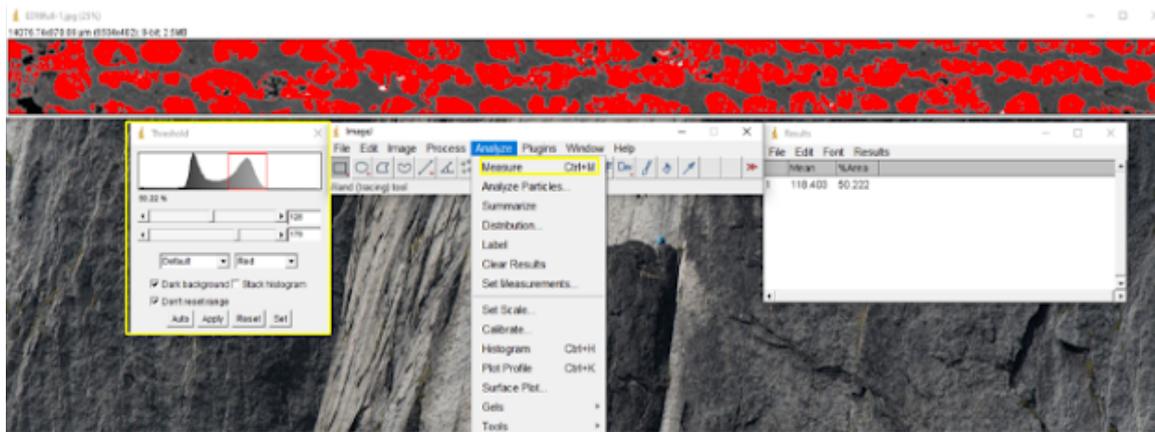


Figure 16. Schéma sur Image J (analyse des résultats).

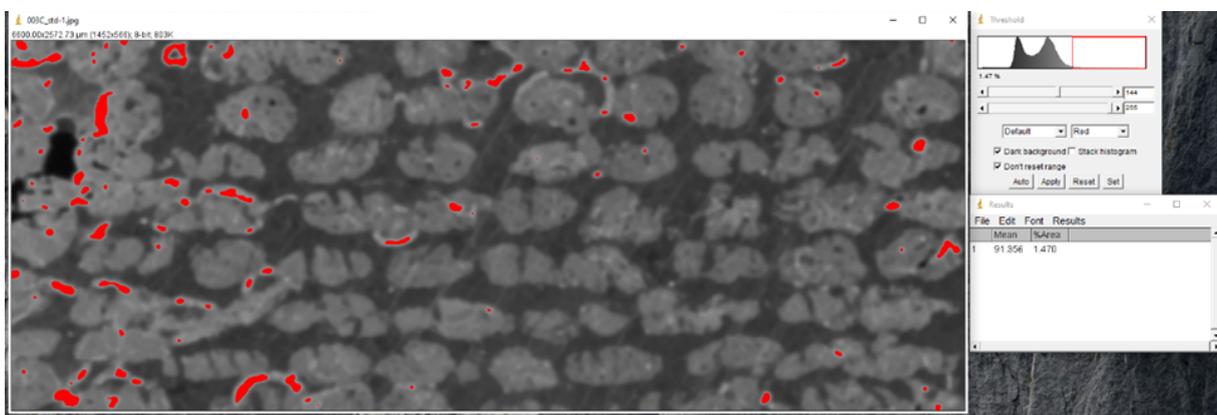


Figure 17. Identification de la phase vide sur ImageJ.

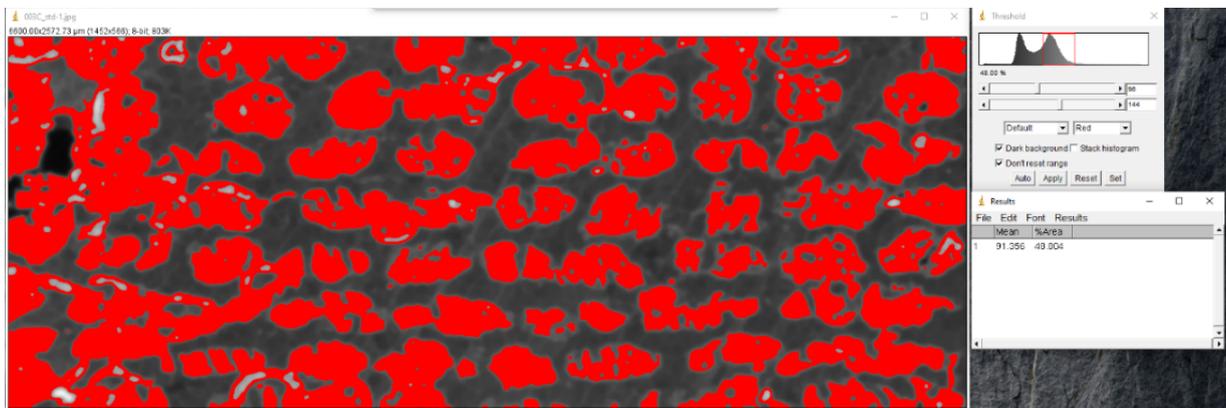


Figure 18. Identification de la phase CFRTS sur ImageJ.



Figure 19. Identification de la phase TP sur ImageJ.

6. Présentation et analyse des résultats

Les résultats obtenus lors de ce projet sont les suivants :

- Les impressions préliminaires sur l'imprimante Anisoprint Composer A4.
- Les relations entre les paramètres d'Aura et les valeurs numériques du G-code.
- Les fonctionnalités ajoutées aux scripts générateurs de G-code.
- L'approche analytique pour estimer les propriétés mécaniques des éprouvettes de traction étudiées au long du projet.
- La mise en œuvre et les résultats des essais de traction.
- Les résultats de l'observation optique des échantillons.

Certains résultats ont été discutés dans d'autres paragraphes du rapport, puisqu'il s'agit des avancées plutôt générales (par exemple, l'amélioration des scripts Python, les évaluations des impressions préliminaires et les relations entre Aura et G-code). D'autres, en revanche, méritent d'être analysés conjointement. Le tableau ci-dessous présente les résultats des essais de traction et des analyses optiques des éprouvettes correspondants, ainsi que les estimations préalablement faites.

Tableau 12. Résultats des essais de traction et des analyses optiques.

		E (MPa)	Rm (MPa)	% CFRTS	% TP	% Vide
Composite avec couches de 0,34 à l'extérieur	E13	21538	276,8	44,8	54,1	2,2
	E14	22554	289,8	48,6	49,5	2,6
	E16	21456	265,3	51,8	47,5	1,2
	Moyenne	21849	277,3	48,4	50,4	2,0
	Déviatio n	612	12,3	3,5	3,4	0,7
Composite avec couches de 0,17 à l'extérieur	E18	22903	225,7	46,7	53,7	0,8
	E19	21485	276,9	50,5	49,1	1
	Moyenne	22194	251,3	48	51,4	0,9
	Déviatio n	1003	36,2	2,7	3,3	0,1
Estimation analytique pour composite		23224	338,0	16,3	83,7	0
Résine avec couches de 0,34 à l'extérieur	E15	1419,6	28,36	0	90,8	10,1
	E17	1403,3	28,51	0	96,2	3,9
	Moyenne	1411	28,4	0,0	93,5	7,0
	Déviatio n	12	0,1	0,0	3,8	4,4
Résine avec couches de 0,17 à l'extérieur	E21	1567,5	36,4			
	E22	1543,5	36,4			

	Moyenn e	1556	36,4			
	Déviatio n	17	0			
Estimation analytique pour résine		1523	31,7	0	100	0

Tout d'abord, on observe que les résultats pour les essais des éprouvettes en résine sont assez fidèles et justes, car ils se rapprochent aux valeurs théoriques et les déviations sont petites. Les éprouvettes avec les couches extérieures de 0,17 mm ont des valeurs plus élevées pour E et R_m ; donc on peut dire que les couches fines de polymère présentent de meilleures caractéristiques, même s'ils ont plus d'interfaces.

Ensuite, les éprouvettes composites présentent des déviations plus importantes. Ceci est cohérent, car il s'agit des éprouvettes plus hétérogènes dont les propriétés peuvent plus facilement varier. En moyenne, les éprouvettes avec les couches extérieures de 0,17 mm ont le E plus élevé et le R_m plus réduit, mais compte tenu des déviations on ne peut pas assurer que cette tendance soit réelle. Par rapport aux estimations théoriques, on observe que les éprouvettes réelles sont plus souples et moins résistantes. Ce fait est cohérent, car les interfaces entre les différents constituants sont normalement les points faibles dans les matériaux composites et le modèle analytique utilisé pour les estimations ne prend pas en compte l'existence des interfaces. Les erreurs faites dans l'estimation sont les suivantes : 5,2 % pour E et 21,8 % pour R_m .

Quant aux fractions volumiques tirées de l'analyse optique, il faut remarquer que la somme de tous les pourcentages n'est pas toujours égale à 100 %, car on a fait les mesures par rapport à la totalité des pixels choisis. La déviation maximale est de 3,5 % dans le cas des composites, ce qui est acceptable. Cependant, l'écart entre les fractions volumiques mesurées et celles des analyses optiques sont inacceptables (16,5 % de CFRTS dans l'estimation contre 48,5 % pour les mesurées). L'origine de cet écart peut être la modélisation de la géométrie de CFRTSTP, qui a l'air d'être trop simplifiée par rapport aux géométries réelles. Par conséquent, il faudrait réviser cette modélisation, en prenant en compte que les estimations des propriétés mécaniques sont plus justes.

Pour finir, on remarque que la fraction des vides est très petite, tel que l'on observe directement dans les images au microscope. Ceci peut se traduire par le fait que la conformité des pièces imprimées par Anisoprint Composer A4 est bonne. Également, il faut faire attention qu'il y a un nombre considérable des éprouvettes qui se sont cassés près des mors, ce qu'il faudrait éviter si l'on souhaitait une campagne avec des résultats certifiables (par exemple, il serait intéressant d'essayer avec des éprouvettes dimensionnées selon la norme NF EN ISO 527 [8], qui exige une longueur minimale de 25 mm).

7. Conclusion

Ce projet a donné la suite à l'étude commencée le semestre dernier par la préparation et la complétion d'une caractérisation basique des éprouvettes composites fabriquées par fabrication additive. En parallèle, on a essayé de compléter les résultats du travail accompli dans la phase précédente. Même si les objectifs initiaux étaient plus ambitieux, on a dû les adapter aux contraintes de temps et, quant à la partie expérimentale, on s'est limité à la préparation et à la réalisation de quelques essais de traction et les analyses optiques correspondantes. Ceci nous a empêché de faire une campagne d'essais pour proprement accomplir des analyses de sensibilité selon différents critères.

Néanmoins, les résultats obtenus sont cohérents et prometteurs, ce qui permet de maintenir l'objectif final de la ligne de recherche. Comme celle-ci vise une base de données avec les propriétés des composites fabriqués par fabrication additive, il faudrait dorénavant travailler sur les points suivants :

1. Choisir les paramètres ou les matériaux à faire varier.
2. Définir d'autres types d'essais ; par exemple, la flexion 3 points.
3. Tester et valider l'impression des éprouvettes.
4. Exécuter les essais mécaniques.
5. Analyser les résultats.

On pourrait aussi approfondir sur d'autres aspects, comme la connexion entre le G-code et les scripts Python.

En résumé, les résultats obtenus lors de ce projet sont une approche adéquate pour la reprise de la ligne de recherche. Cependant, on considère qu'il serait convenable de compter avec une dédication plus grande, afin de pouvoir s'investir davantage dans les tâches expérimentales qui sont essentielles pour la poursuite.

Bibliographie

- [1] SINGH Balwant, KUMAR Raman, CHOHAN Jasgurpreet Singh. *Polymer matrix composites in 3D printing: A state of art review*. Materials Today: Proceedings (Elsevier), 2020, n° 33, pp. 1562-1567.
- [2] ZHANG Yicha, DE BACKER Wout, HARIK Ramy, BERNARD Alain. *Build Orientation Determination for Multi-material Deposition Additive Manufacturing with Continuous Fibers*. Procedia CIRP (Elsevier), 2016, n° 50, pp. 414-419.
- [3] SAFONOV Alexander A. *3D topology optimization of continuous fiber-reinforced structures via natural evolution method*. Composite Structures (Elsevier), 2019, n° 215, pp. 289-297.
- [4] RANAIVOMIARANA Narindra. *Simultaneous optimization of topology and material anisotropy for aeronautic structures*. Mécanique. Châtillon : Sorbonne Université, 2019, 193 p.
- [5] ADUMITROAIE Adi, ANTONOV Fedor, KHAZIEV Aleksey, AZAROV Andrey, GOLUBEV Mikhail, V. VASILIEV Valery. *Novel continuous fiber bi-matrix composite 3-D printing technology*. Materials (MDPI), 2019, n° 18, 3011 p.
- [6] AZAROV Andrey V., ANTONOV Fedor K., GOLUBEV Mikhail V., KHAZIEV Aleksey R., USHANOV Sergey A. *Composite 3D printing for the small size unmanned aerial vehicle structure*. Composites Part B (Elsevier), 2019, n° 169, pp. 157-163.
- [7] REGALLA Srinivasa Prakash, KARWA Sagar S., RAJESH Sreeram, SHYAM P.V., SHRIVASTAVA Prakash N. *Strength and fracture behaviour of polymer matrix composite layered structures made by additive manufacturing*. Materials Today: Proceedings (Elsevier), 2020, n° 28, pp. 1030-1038.
- [8] ISO. *Plastiques : Détermination des propriétés en traction*. NF EN ISO 527, Bruxelles, 2019, pp. 116.
- [9] ISO. *Composites plastiques renforcés de fibres : Détermination des propriétés de flexion*. NF EN ISO 14125, Bruxelles, 1998, pp. 31.
- [10] CALLISTER William D. *Materials science and engineering: an introduction (seventh edition)*. York, Pennsylvania, États-Unis : John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 975.

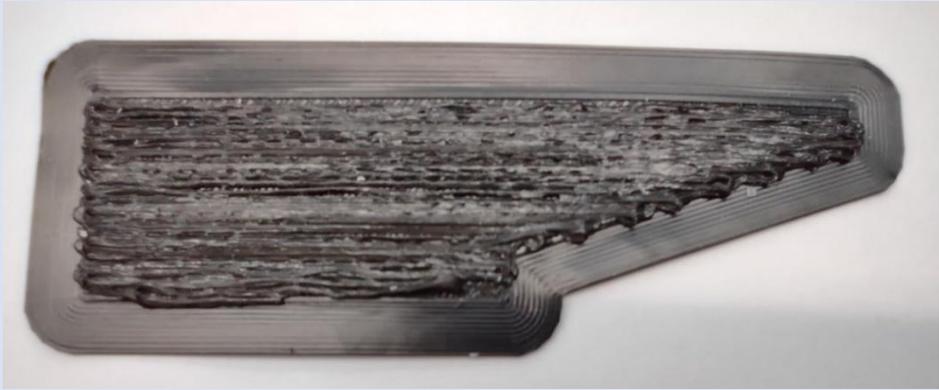
Glossaire

- **Anisotropie** : caractéristique que possède un matériau dans lequel une certaine propriété physique varie avec la direction. Ainsi, un matériau anisotrope va présenter des attributs différents en fonction de son orientation. Cette caractéristique est notamment présente dans les matériaux composites.
- **Base des données** : collection d'informations organisées afin d'être facilement consultables, gérables et mises à jour. Ces informations sont en rapport avec une activité donnée et peuvent être utilisées par des programmes ou des utilisateurs communs.
- **Composite** : matériau formé de plusieurs composants élémentaires dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants pris séparément ne possède ; par exemple, des combinaisons des polymères et des fibres. Ce type de matériau est utilisé, entre autres, dans les applications qui exigent une grande résistance mécanique pour un poids réduit.
- **Continuous filament fabrication (CFF)** : technologie de fabrication additive qui consiste à ajouter le dépôt d'un renfort en fibre de manière continue sur le principe du procédé de dépôt de filament pour la construction plastique. Normalement, cette technologie est combinée avec la technologie FFF afin d'obtenir des pièces plus fortes et rigides.
- **Essai de flexion 3 points** : essai mécanique qui consiste à tester une barrette du matériau placée sur deux appuis sous l'application au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture. La propriété la plus caractéristique de cet essai est le module de flexion.
- **Essai de traction** : essai le plus fréquemment utilisé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau. Il consiste à exercer une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation normalement constante.
- **Fabrication additive** : ensemble des procédés de fabrication qui reposent sur la superposition de fines couches de matière pour créer d'objets tridimensionnels à partir d'un fichier numérique. Elle peut produire des formes complexes impossibles avec les méthodes traditionnelles de soustraction, assemblage et déformation.
- **Fibre** : chacun des filaments qui, groupés en faisceaux, constituent certaines substances. Son origine peut être végétale, animale, minérale ou artificielle, et normalement elle peut être tissée. Dans le cas des matériaux composites, les fibres sont les renforts qui prennent l'essentiel des efforts mécaniques et elles présentent une élevée résistance à la traction (par exemple, la fibre de verre et la fibre de carbone).
- **Fibre de carbone** : matériau se composant de fibres extrêmement fines, de 5 à 15 micromètres de diamètre, et composé essentiellement d'atomes de carbone. Ceux-ci sont agglomérés dans des cristaux microscopiques qui sont alignés parallèlement à l'axe long de la fibre. L'alignement des cristaux rend la fibre extrêmement résistante pour sa taille. Plusieurs milliers de fibres de carbone sont enroulées ensemble pour former un fil, qui peut être employé tel quel ou tissé. L'application principale est le renforcement des matériaux composites.
- **Fused filament fabrication (FFF)** : technologie de fabrication additive qui consiste à déposer de la matière couche par couche en utilisant un filament polymère (thermoplastique) qui est fondu à travers un bloc chauffant puis déposé sur le plateau. La pièce est ainsi construite au fur et à mesure couche par couche.
- **Polymère** : macromolécule ou molécule de masse moléculaire élevée généralement organique ou semi-organique. Il est constitué d'un enchaînement d'un grand nombre d'unités de répétition, d'un ou de plusieurs monomères, unis les uns aux autres par des liaisons covalentes. Dans le cas des matériaux composites, les polymères sont utilisés comme résines qui forment la matrice, pour transmettre les efforts aux renforts et donner la forme souhaitée au produit.

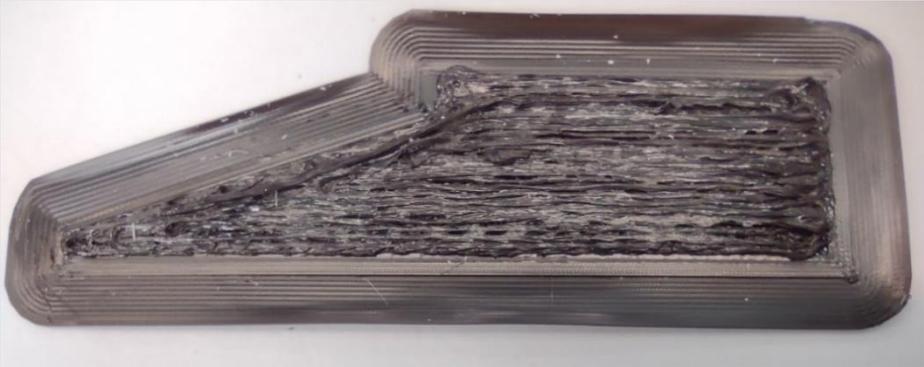
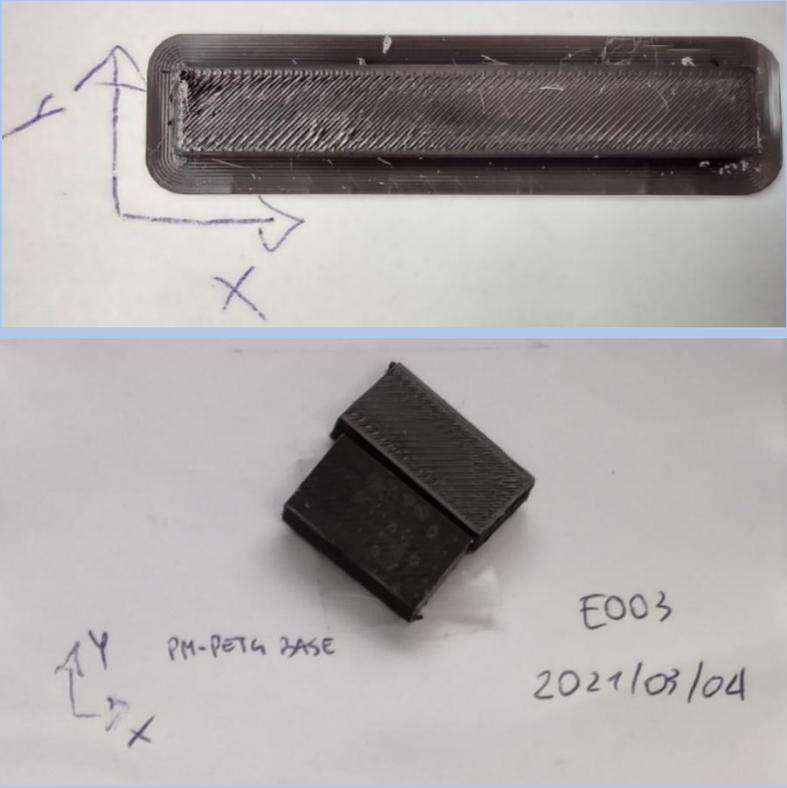
- Polytéréphtalate d'éthylène glycolisé (PETG) : thermoplastique répandu sur le marché de la fabrication additive, alliant à la fois la simplicité d'impression de l'acide polylactique (PLA) et la résistance de l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS). C'est un plastique amorphe, qui peut être recyclable à 100%, possédant la même composition chimique que le polytéréphtalate d'éthylène (PET), mais on y ajoute du glycol afin de réduire sa fragilité.
- Programmation : ensemble des activités liées à la définition, l'écriture, la mise au point et l'exécution de programmes informatiques ; c'est-à-dire, des séquences des ordres auxquels doit obéir un dispositif.
- Stratégie de dépôt : dans le domaine de la fabrication additive, la stratégie de création des couches de matière. Elle concerne la manière de déposer les différents matériaux, notamment quant aux aspects trajectoires des têtes extrudeuses. Les stratégies peuvent être standards ou non-standards.

Annexe I

Cette annexe montre les éprouvettes citées dans ce rapport, à travers de ses images et visualisations micrographiques.

Numéro d'éprouvette	E001
Taille	65x18x1 mm (dimensions extérieures)
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette trapézoïdale dans laquelle la longueur de dépôt diminue à chaque droit aller-retour. Dans la zone la plus étroite la longueur est de 35 mm. Les paramètres utilisés sont ceux utilisés le premier semestre.
Photo éprouvette	

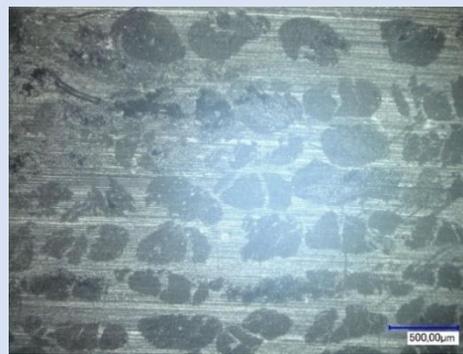
Numéro d'éprouvette	E002
Taille	65x18x1 mm (dimensions extérieures)
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette trapézoïdale dans laquelle la longueur de dépôt diminue à chaque droit aller-retour. Dans la zone la plus étroite la longueur est de 35 mm. Les paramètres utilisés sont ceux que le logiciel Aura 2.1.5 propose pour les matériaux concernés.

Photo éprouvette	
Numéro d'éprouvette	E003
Taille	65x10x3,5 mm
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	<p>Éprouvette imprimée avec les paramètres que le logiciel Aura 2.1.5 propose pour les matériaux concernés. Elle a été coupée et optiquement analysée, à travers la visualisation micrographique de deux sections transversales. L'une correspond à la section centrale, et l'autre au milieu de la section centrale et la section extérieure.</p>
Photo éprouvette	
Micrographie	Image du microscope de la section centrale :



Images du microscope de la section décentrée :

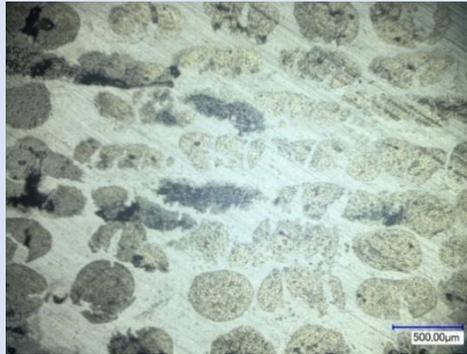
- Après le polissage de granularité P600 :



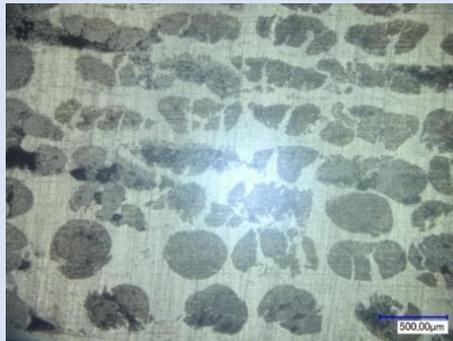
- Après le polissage de granularité P1200 :



- Après le polissage de granularité P2400 :



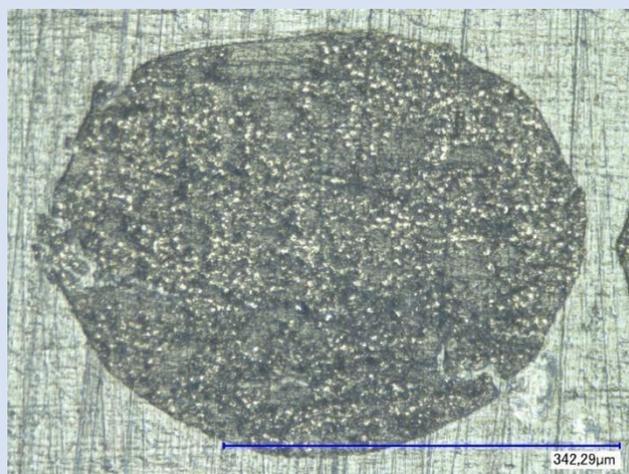
- Après le polissage de granularité P4000 :



- Après le polissage de granularité P4000 (section complète) :



- Après le polissage de granularité P4000 (détail d'un fil de composite) :

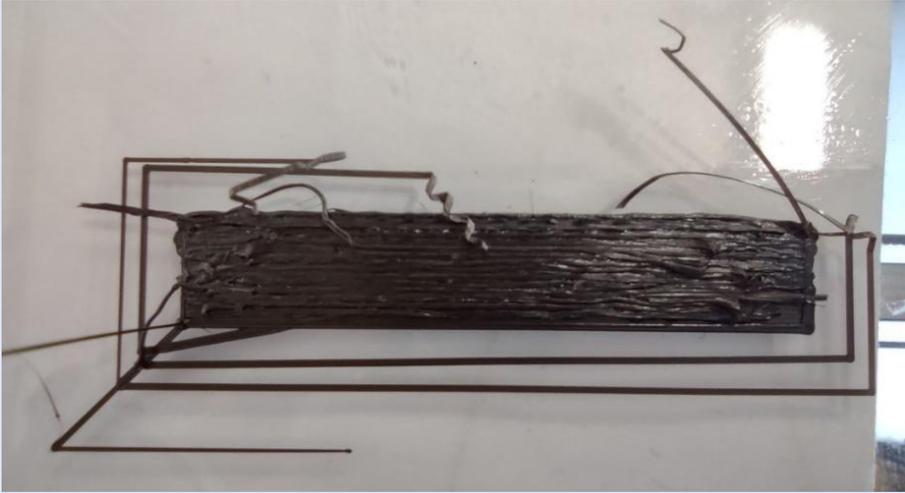


Visualisation sur ImageJ	50,825 Fibres Vf(%) / 1,642 Voids Vf(%) / 48,448 Resin Vf(%)

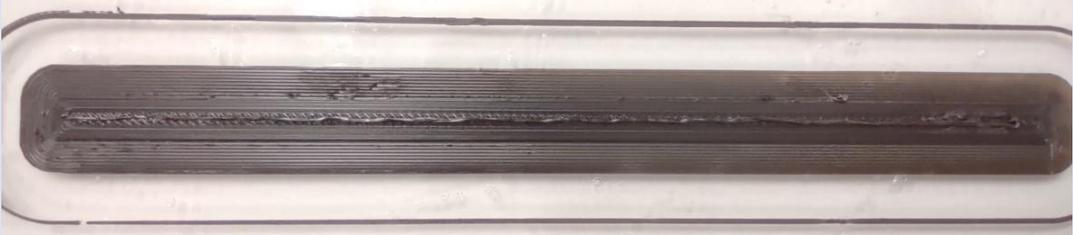
Numéro d'éprouvette	E004
Taille	60x10x0,67 mm
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée à partir de nos codes Python. La coupe de la fibre a été implémentée à chaque aller-retour sur les scripts. Il y a eu des soucis pendant l'impression.

Photo
éprouvette

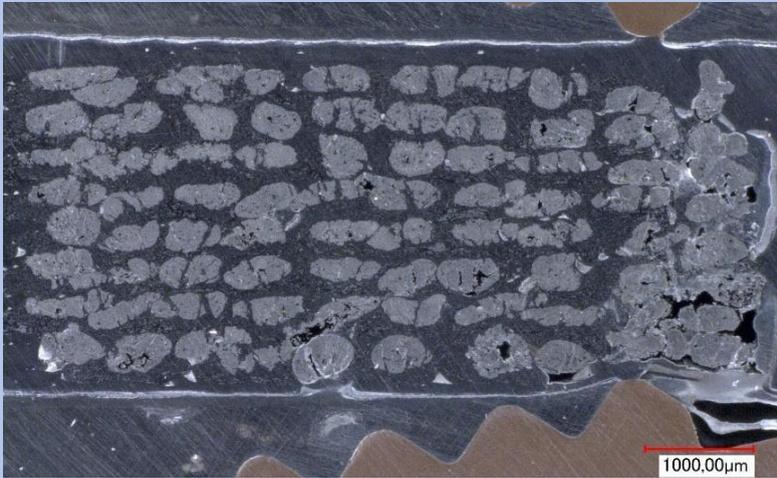
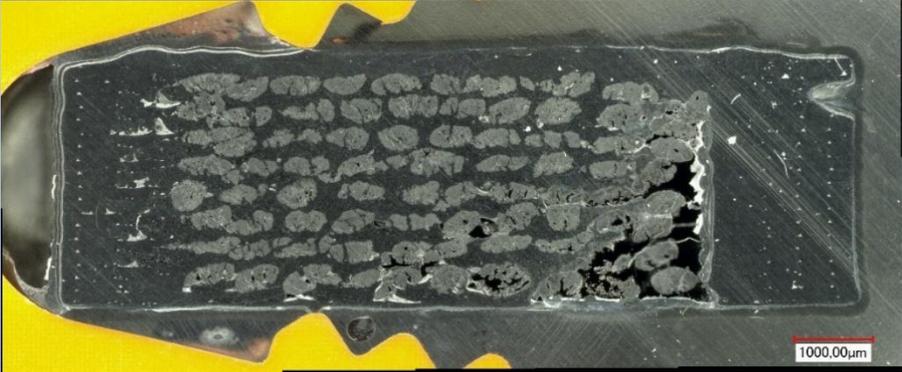
```
def main():  
    """définition des parametres"""  
    xi=100  
    yi=60  
    zi=0.2  
    lx=60  
    ly=10  
    dist_btw_poly = 0.4  
    dist_btw_fib = 0.65  
    dist_btw_layer = 0.17  
    dist_btw_points = 0.3 #discretización ajustar  
    hauteur_totale = 0.67 #1mm par exemple  
    material=["polimere","fibre"]  
    brim_polymer_dist = 12  
    brim_fiber_dist = 4  
    L=[] # initialisation de la matrice output
```



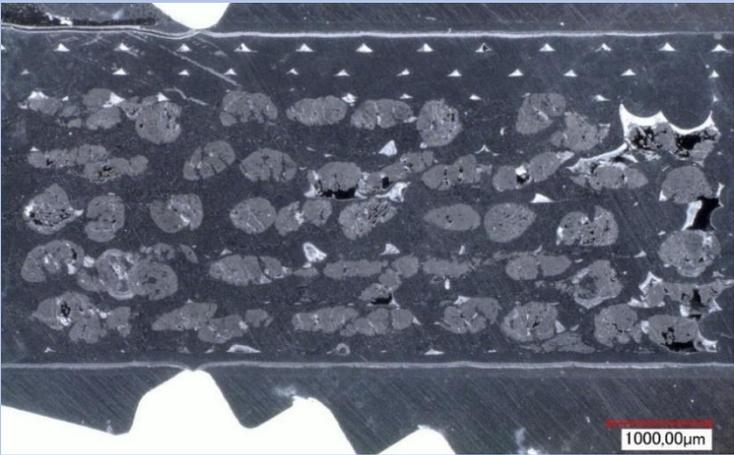
Numéro d'éprouvette	E005
Taille	130x5x1,7 mm
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)

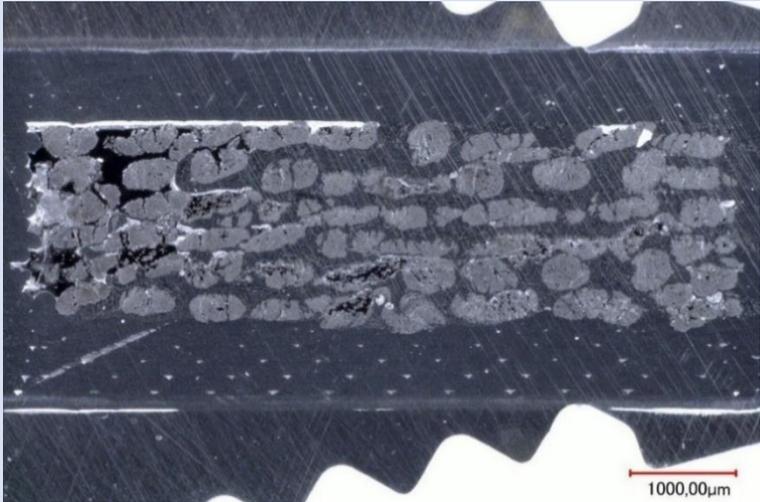
Description	Éprouvette imprimée avec <i>extrusion width</i> de 1 mm et <i>fiber feedrate</i> de 100 %. On a arrêté l'impression après le dépôt de la couche de fibre, en vue d'observer le fil de fibre.
Photo éprouvette	

Numéro d'éprouvette	E006
Taille	65x10x3,5 mm
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)

Description	Éprouvette imprimée avec les paramètres que le logiciel Aura 2.1.5 propose pour les matériaux concernés (pareil à l'éprouvette E003). Elle a été coupée et optiquement analysée, mais on observe qu'un grand espace vide a provoqué la déformation de l'éprouvette lors de l'accrochage pour l'enrober.
Photo éprouvette	
Micrographie	<p data-bbox="400 678 983 712">Image du microscope de la section centrale :</p>  <p data-bbox="400 1267 1007 1301">Image du microscope de la section décentrée :</p> 
Visualisation sur ImageJ	52,484 Fibres Vf(%) / 2,065 Voids Vf(%) / 46,249 Resin Vf(%)
Numéro d'éprouvette	E007.1
Taille	65x10x3,5 mm

Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée et optiquement analysée. Concrètement, les éprouvettes E007.1 et E007.2 ont été créés à partir du même fichier G-code, dont le <i>macrolayer height</i> était de 0,5mm. La première a été imprimé avant le calibrage de la machine.
Photo éprouvette	
Micrographie	<p>Image du microscope de la section centrale :</p> 
Visualisation sur Image J	45,995 Fibres Vf(%) / 1,944 Voids Vf(%) / 52,342 Resin Vf(%)
Numéro d'éprouvette	E007.2
Taille	65x10x3,5 mm

Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée et optiquement analysée. Concrètement, les éprouvettes E007.1 et E007.2 ont été créés à partir du même fichier G-code, dont le <i>macrolayer height</i> était de 0,5mm. La deuxième a été imprimé après le calibrage de la machine.
Photo éprouvette	
Micrographie	<p>Image du microscope de la section centrale :</p>  <p>Image du microscope de la section décentrée :</p> 
Visualization sur ImageJ	41,291 Fibres Vf(%) / 3,854 Voids Vf(%) / 55,675 Resin Vf(%)
Numéro d'éprouvette	E008
Taille	65x10x3,5 mm

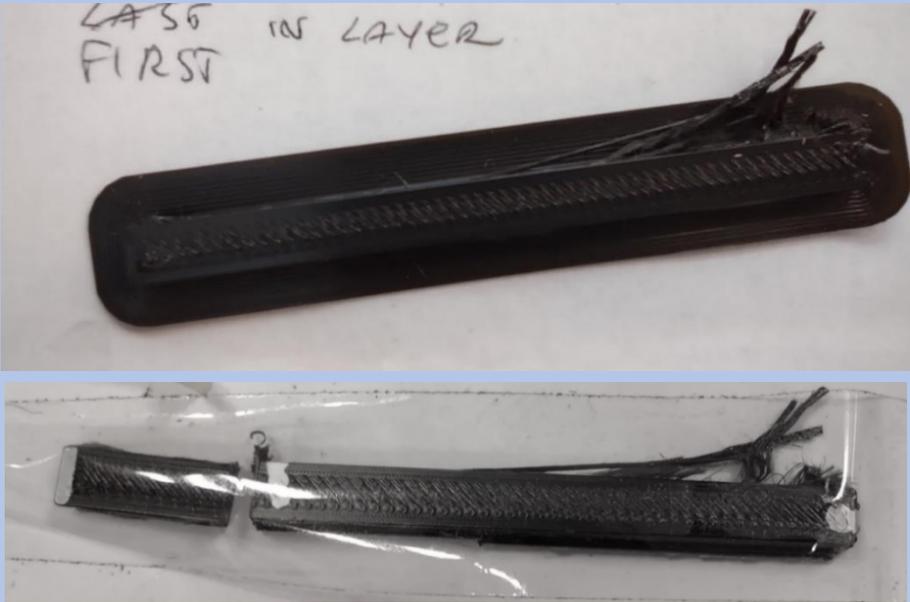
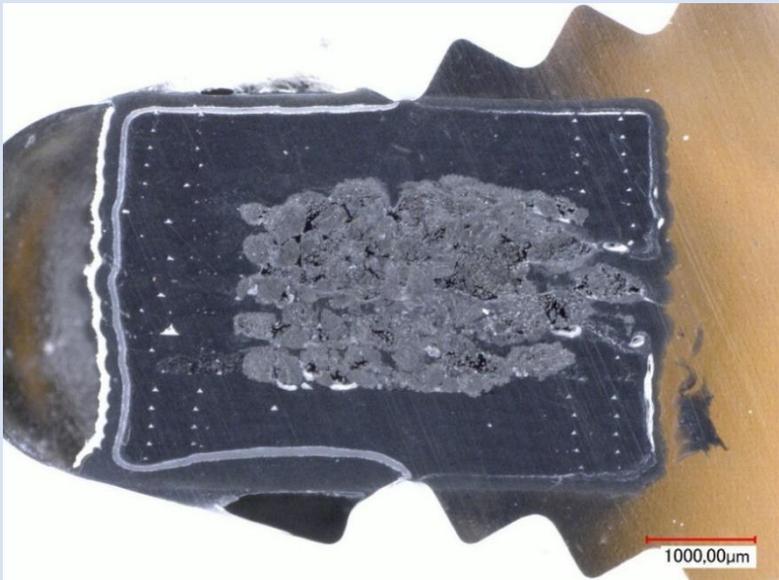
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette été imprimée et optiquement analysée. Le <i>macrolayer height</i> correspondant est de 0,3 mm.
Photo éprouvette	
Micrographie	<p>Image du microscope de la section centrale :</p>  <p>Image du microscope de la section décentrée :</p> 

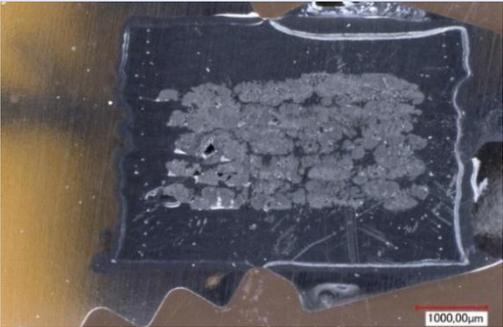
Visualisation sur ImageJ	51,764 Fibres Vf(%) / 6,523 Voids Vf(%) / 45,553 Resin Vf(%)
Numéro d'éprouvette	E009
Taille	130x3,87x1,8 mm
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée avec <i>extrusion width</i> de 0,65 mm et <i>fiber feedrate</i> de 99 %. On a arrêté l'impression après le dépôt de la couche de fibre, en vue d'observer le fil de fibre.
Photo éprouvette	

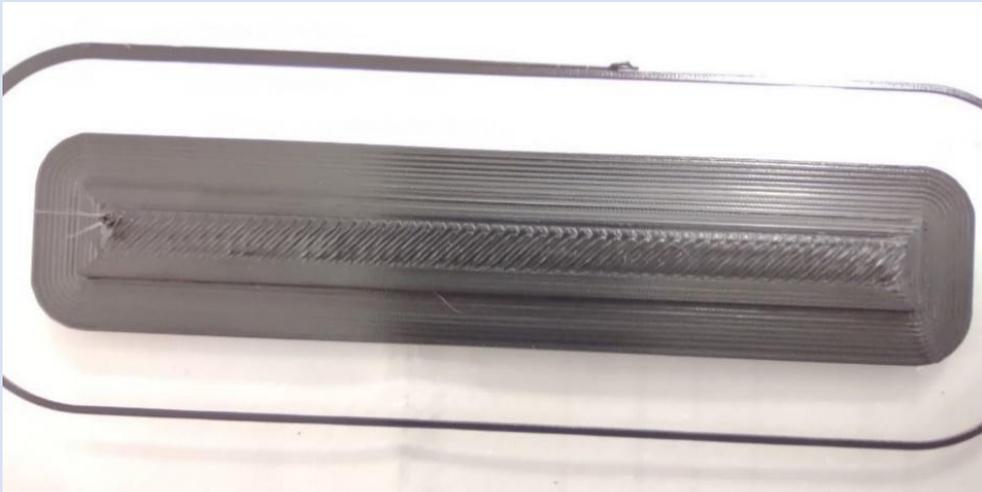
Numéro d'éprouvette	E010
Taille	130x3,87x1,8 mm
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée avec <i>extrusion width</i> de 0,65 mm et <i>fiber feedrate</i> de 100 %. On a arrêté l'impression après le dépôt de la couche de fibre, en vue d'observer le fil de fibre.
Photo éprouvette	

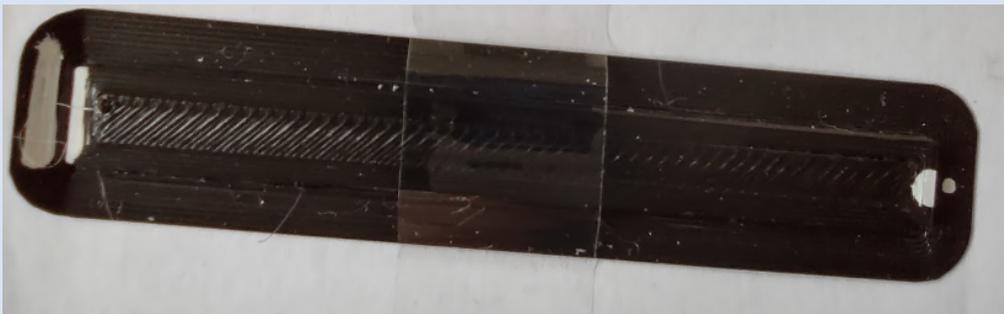
Numéro d'éprouvette	E011
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée avec une valeur d' <i>extrusion width</i> de 0,34 mm (pareil à l'éprouvette E011.2). On a arrêté l'impression après la dernière couche de fibre pour pouvoir bien visualiser l'impression des fils de fibre.
Photo éprouvette	

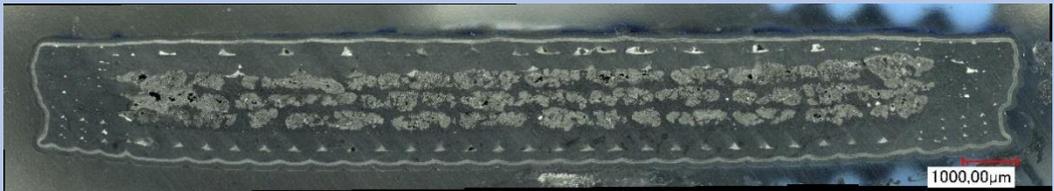
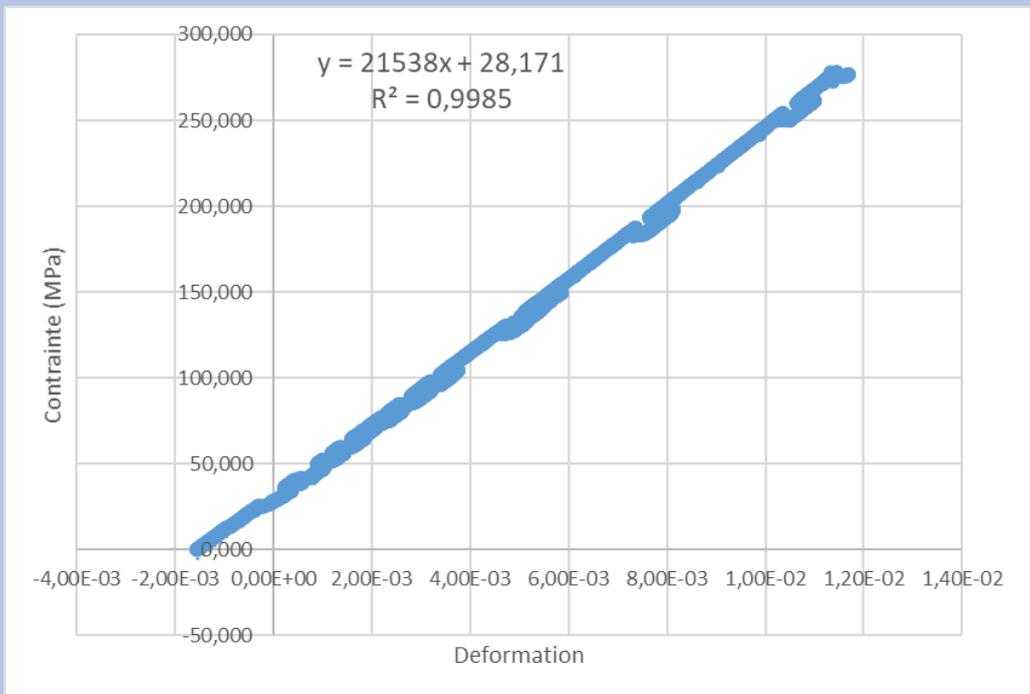
Numéro d'éprouvette	E011.1
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée avec une valeur d' <i>extrusion width</i> de 0,4 mm (pareil à l'éprouvette E011.3). On a arrêté l'impression après la dernière couche de fibre pour pouvoir bien visualiser l'impression des fils de fibre.
Photo éprouvette	

Numéro d'éprouvette	E011.2
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée avec une valeur d' <i>extrusion width</i> de 0,34 mm (pareil à l'éprouvette E011). On a fini l'impression pour faire l'analyse optique au microscope et, pendant l'impression, on a observé que des fibres sont sorties de la pièce, donc on peut conclure que l' <i>extrusion width</i> de 0,34 mm est trop petite.
Photo éprouvette	
Micrographie	Image du microscope de la section décentrée : 

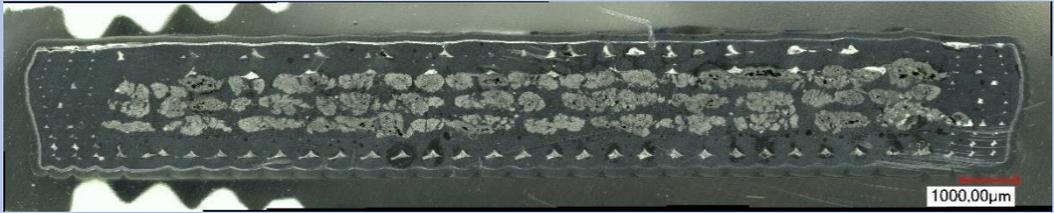
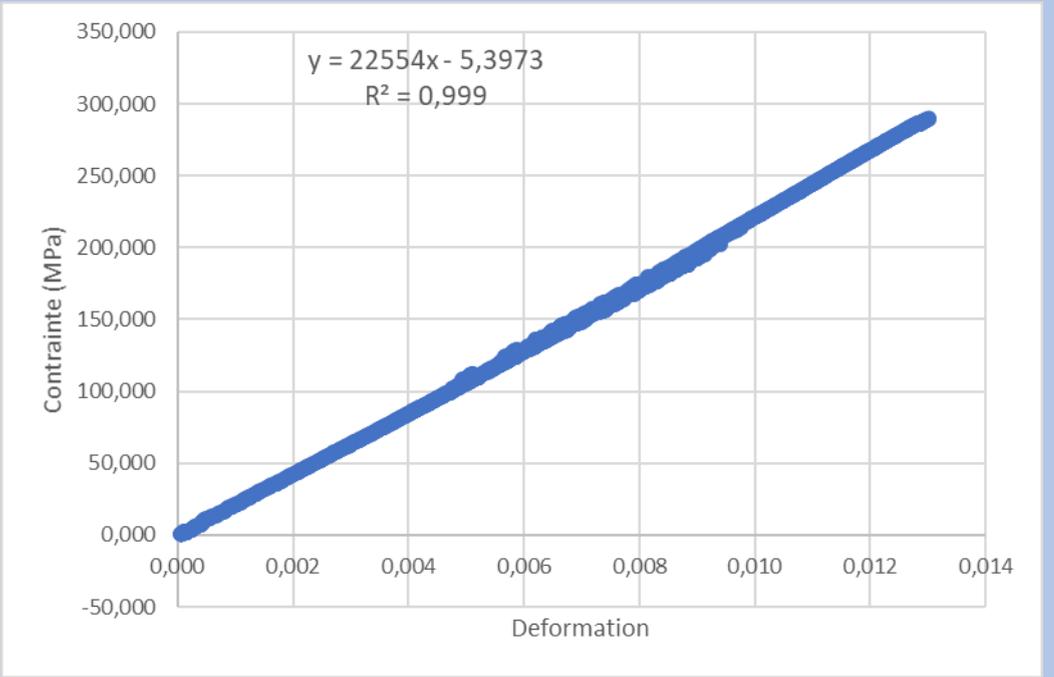
Visualisation sur ImageJ	57,805 Fibres Vf(%) / 11,495 Voids Vf(%) / 25,945 Resin Vf(%)
Numéro d'éprouvette	E011.3
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée avec une valeur d' <i>extrusion width</i> de 0,4 mm (pareil à l'éprouvette E011.1). On a fini l'impression pour faire l'analyse optique au microscope.
Photo éprouvette	
Micrographie	<p>Image du microscope de la section centrale :</p>  <p>Image du microscope de la section décentrée :</p> 

Visualisation sur ImageJ	66,461 Fibres Vf(%) / 9,735 Voids Vf(%) / 24,936 Resin Vf(%) E011.3 C 67,505 Fibres Vf(%) / 5,692 Voids Vf(%) / 17,337 Resin Vf(%) E011.3 L
Numéro d'éprouvette	E012
Taille	65x10x1,36 mm
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette imprimée avec une couche extérieure de 0,34 mm à chaque côté. À l'intérieur, il y a deux couches qui contiennent de la fibre.
Photo éprouvette	

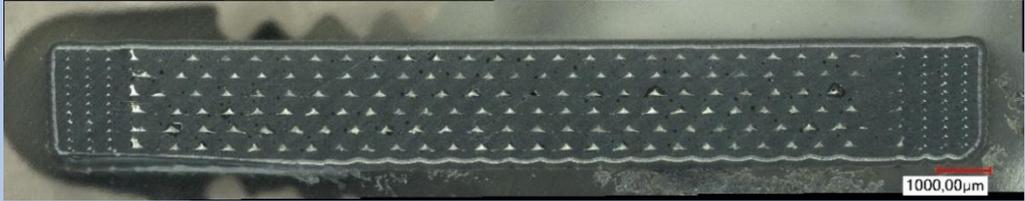
Numéro d'éprouvette	E012.1
Taille	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Matériaux	65x10x2,04 mm
Description	Éprouvette imprimée avec deux couches extérieures de 0,34 mm à chaque côté. À l'intérieur, il y a deux couches qui contiennent de la fibre.
Photo éprouvette	

Numéro d'éprouvette	E013
Taille	200x18,15x2,38 mm (traction avec talons) + 20x18,15x2,38 mm (optique)
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette de traction avec des couches de 0,34 mm d'épaisseur à l'extérieur.
Photo éprouvette	
Micrographie	
Visualisation sur ImageJ	44,828 Fibres Vf(%) / 2,171 Voids Vf(%) / 54,067 Resin Vf(%)
Graphique traction	 <p> $y = 21538x + 28,171$ $R^2 = 0,9985$ </p>

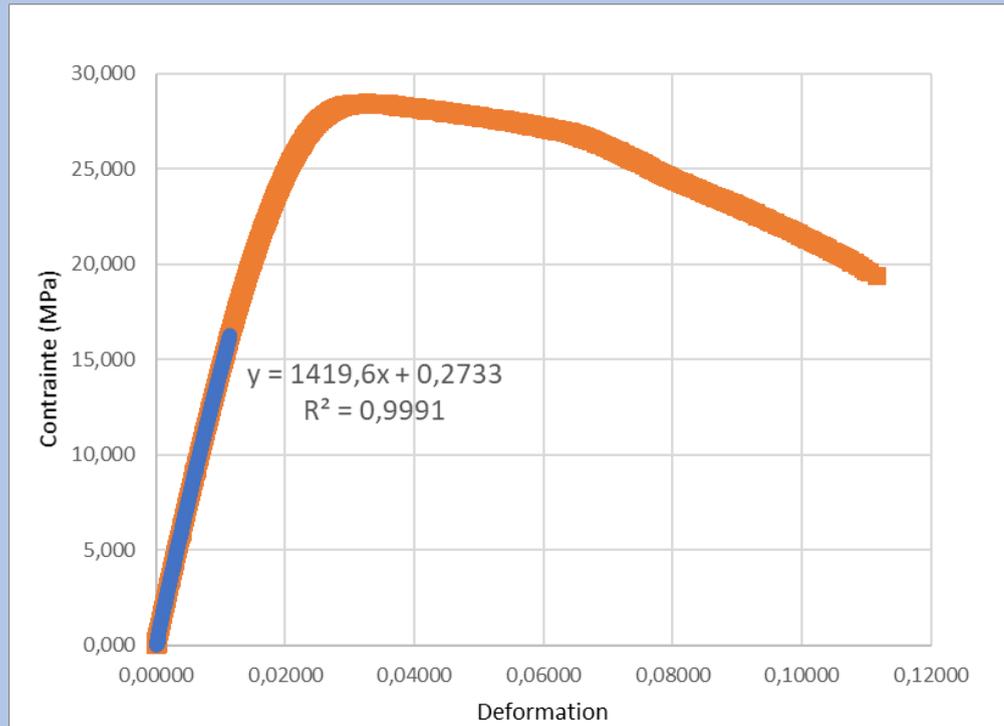
Commentaire	E = 21538 MPa et R _m = 276,8 MPa L'éprouvette s'est cassée près des talons aux deux côtés.
--------------------	--

Numéro d'éprouvette	E014
Taille	200x18,15x2,38 mm (traction avec talons) + 20x18,15x2,38 mm (optique)
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette de traction avec des couches de 0,34 mm d'épaisseur à l'extérieur.
Photo éprouvette	
Micrographie	
Visualisation sur ImageJ	48,608 Fibres Vf(%) / 2,556 Voids Vf(%) / 49,535 Resin Vf(%)
Graphique traction	 <p> $y = 22554x - 5,3973$ $R^2 = 0,999$ </p>

Commentaire	E = 22554 MPa et $R_m = 289,8$ MPa L'éprouvette s'est cassée dans la partie centrale.
--------------------	--

Numéro d'éprouvette	E015
Taille	200x18,15x2,38 mm (traction) + 20x18,15x2,38 mm (optique)
Matériaux	Résine (PolyMax PETG)
Description	Éprouvette de traction avec des couches de 0,34 mm d'épaisseur.
Photo éprouvette	
Micrographie	
Visualization sur ImageJ	0,000 Fibres Vf(%) / 10,103 Voids Vf(%) / 90,774 Resin Vf(%)

Graphique traction



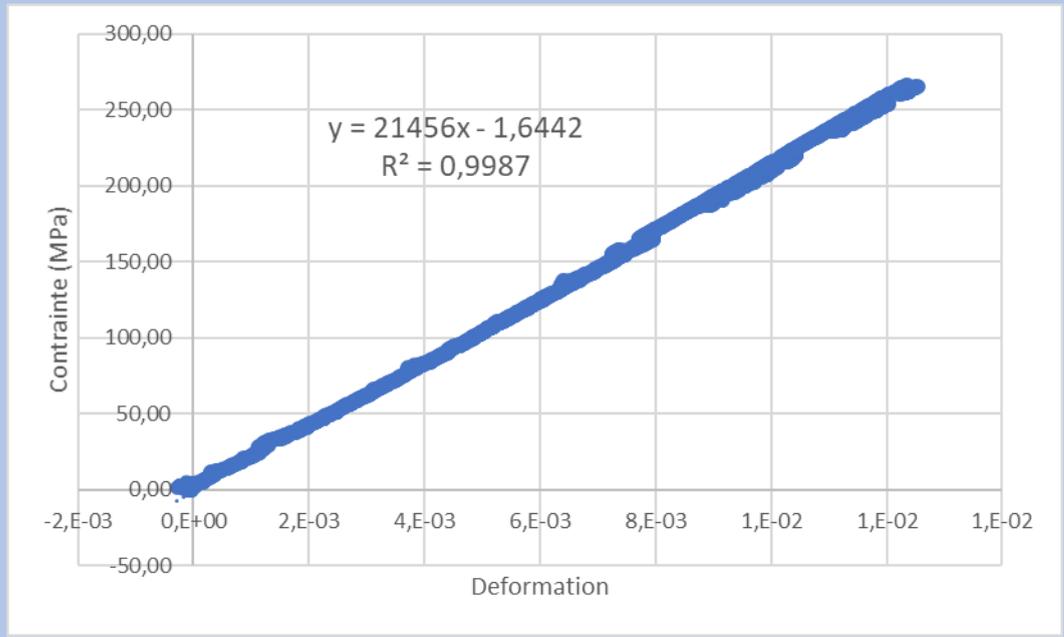
Commentaire

$E = 1419,6 \text{ MPa}$ et $R_m = 28,36 \text{ MPa}$

L'éprouvette s'est cassée dans la partie centrale à 45°.

Numéro d'éprouvette	E016
Taille	200x18,15x2,38 mm (traction avec talons) + 20x18,15x2,38 mm (optique)
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette de traction avec des couches de 0,34 mm d'épaisseur à l'extérieur.
Photo éprouvette	
Micrographie	
Visualisation sur ImageJ	51,823 Fibres Vf(%) / 1,228 Voids Vf(%) / 47,537 Resin Vf(%)

Graphique traction



Commentaire

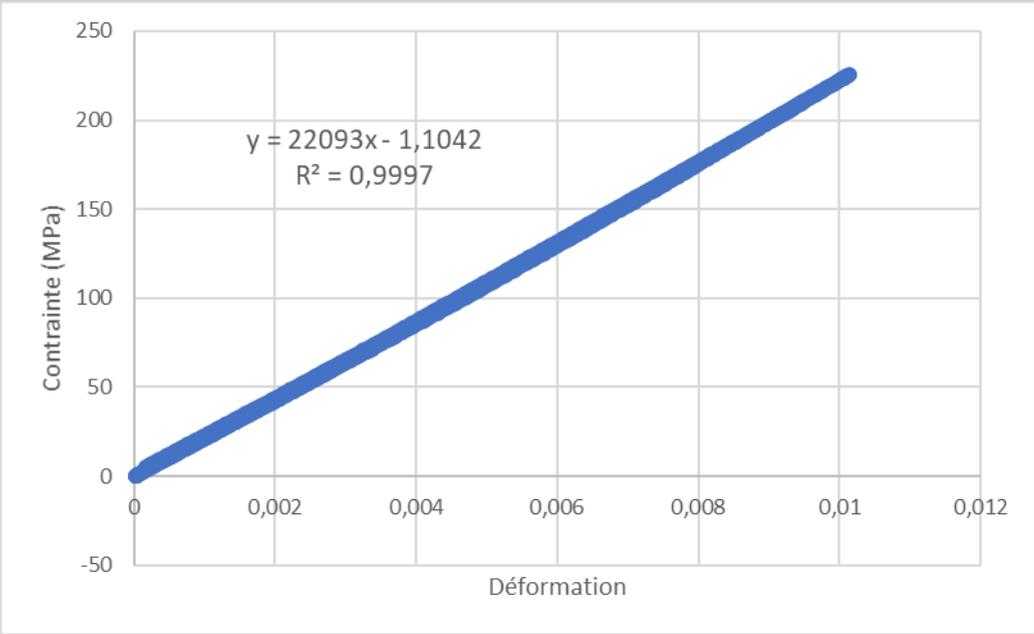
$E = 21456 \text{ MPa}$ et $R_m = 265,3 \text{ MPa}$

L'éprouvette s'est cassée en deux points, l'un étant près des talons.

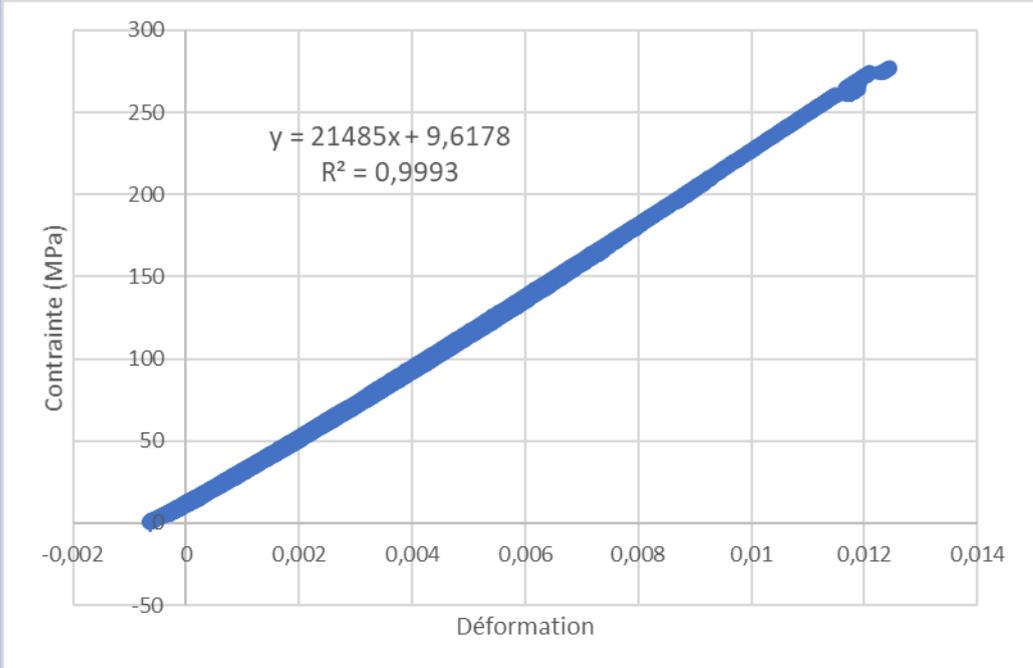
Numéro d'éprouvette	E017
Taille	200x18,15x2,38 mm (traction) + 20x18,15x2,38 mm (optique)
Matériaux	Résine (PolyMax PETG)
Description	Éprouvette de traction avec des couches de 0,34 mm d'épaisseur.
Photo éprouvette	
Micrographie	

Visualisation sur ImageJ	0,000 Fibres Vf(%) / 3,887 Voids Vf(%) / 96,237 Resin Vf(%)
Graphique traction	<p>Contrainte (MPa)</p> <p>Déformation</p> <p>$y = 1403,3x + 0,0593$ $R^2 = 0,9993$</p>
Commentaire	<p>$E = 1403,3 \text{ MPa}$ et $R_m = 28,51 \text{ MPa}$</p> <p>L'éprouvette s'est cassée dans la partie centrale à 45° et la plastification est facilement perceptible.</p>

Numéro d'éprouvette	E018
Taille	200x18,15x2,38 mm (traction avec talons) + 20x18,15x2,38 mm (optique)
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette de traction avec des couches de 0,17 mm d'épaisseur à l'extérieur.
Photo éprouvette	

Micrographie	
Visualization sur ImageJ	46,700 Fibres Vf(%) / 0,846 Voids Vf(%) / 53,706 Resin Vf(%)
Graphique traction	
Commentaire	<p>E = 22903 MPa et $R_m = 225,7$ MPa</p> <p>L'éprouvette s'est cassée près du talon d'un côté.</p>

Numéro d'éprouvette	E019
Taille	200x18,15x2,38 mm (traction avec talons) + 20x18,15x2,38 mm (optique)
Matériaux	Composite (PolyMax PETG et CCF-1.5K)
Description	Éprouvette de traction avec des couches de 0,17 mm d'épaisseur à l'extérieur.
Photo éprouvette	

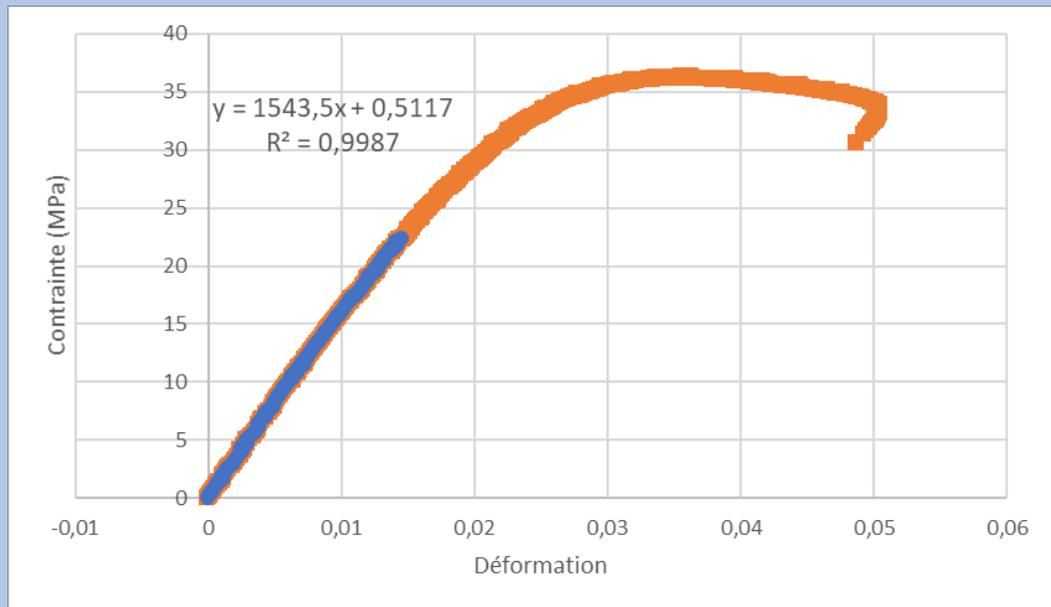
Micrographie	
Visualization sur ImageJ	50,526 Fibres Vf(%) / 0,957 Voids Vf(%) / 49,094 Resin Vf(%)
Graphique traction	
Commentaire	<p>E = 21485 MPa et R_m = 276,9 MPa</p> <p>L'éprouvette s'est cassée en deux points, l'un étant près des talons.</p>

Numéro d'éprouvette	E021
Taille	200x18,15x2,38 mm (traction) + 20x18,15x2,38 mm (optique)
Matériaux	Résine (PolyMax PETG)
Description	Éprouvette de traction avec des couches de 0,17 mm d'épaisseur.
Photo éprouvette	

Graphique traction	
Commentaire	<p>$E = 1567,5 \text{ MPa}$ et $R_m = 36,4 \text{ MPa}$</p> <p>L'éprouvette s'est cassée près des mors, de manière assez droite.</p>

Numéro d'éprouvette	E022
Taille	200x18,15x2,38 mm (traction) + 20x18,15x2,38 mm (optique)
Matériaux	Résine (PolyMax PETG)
Description	Éprouvette de traction avec des couches de 0,17 mm d'épaisseur.
Photo éprouvette	

Graphique traction



Commentaire

$E = 1543,5 \text{ MPa}$ et $R_m = 36,4 \text{ MPa}$

L'éprouvette s'est cassée près des mors, de manière assez droite.

Annexe II

Cette annexe présente les calculs pour l'estimation de E et R_m pour une éprouvette de traction de dimensions 200x18,15x2,38 (mm) avec les paramètres et les matériaux définis dans le paragraphe 6.3 de ce rapport.

D'abord, on calcule E et R_m pour chaque constituant, à partir des données des fournisseurs :

Sigle	Matériau	FVF %	E (MPa)	R _m (MPa)
CF	Fibre de carbone T-300 (≈ 93 % C)	100	230.000	3.530
TS	Epoxy (formulation d'Anisoprint)	0	-	-
TP	PolyMax PETG	0	1.523	31,7
CFRTS	CCF-1.5K	57	135.000	1.965
CFRTSTP	PolyMax PETG + CCF-1.5K	-	-	-

On commence par estimer le module élastique du époxy à travers la loi de mélange du CFRTS :

$$E_{cl} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f$$

On considère que le CFRTS est un mélange parfait entre CF et TS ; c'est-à-dire, il n'y a pas de vide. Par conséquent, V_f = FVF = 0,57 et V_m = 1-FVF = 0,43. On obtient alors que E_{TS} = E_m = 9070 MPa.

On calcule aussi les caractéristiques de CFRTSTP pour la valeur de 0,65 mm d'*extrusion width*. En s'appuyant sur le schéma géométrique d'Aura, on calcule le FVF.

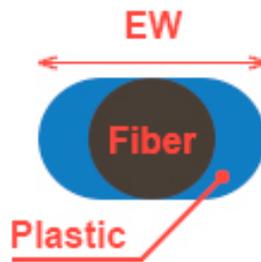


Figure : schéma d'*extrusion width* (source : Aura).

$$\text{Diamètre de CFRTS (fiber dans l'image)} = D = 0,36 \text{ mm}$$

$$\text{Extrusion width (EW)} = 0,65 \text{ mm}$$

$$\text{Section transversale de CFRTS} = A = \pi \cdot \left(\frac{0,36 \text{ mm}}{2} \right)^2 = 0,1018 \text{ mm}^2$$

$$\text{Section transversale totale du filament} = S = (EW - D) \cdot D + A = 0,2062 \text{ mm}^2$$

Les fractions de volume dans un filament sont les suivantes :

$$\text{Fraction de volume de CFRTS} = \frac{A}{S} = 0,494$$

$$\text{Fraction de volume de TP} = 1 - FV_{deCFRTS} = 0,506$$

$$\text{Fraction de volume de TS} = FV_{deCFRTS} \cdot 0,43 = 0,212$$

$$\text{Fraction de volume de CF} = FV_{deCFRTS} \cdot 0,57 = 0,281$$

E et R_m sont calculés à partir de la loi de mélange et une procédure proposée dans l'œuvre [4] de W. Callister, respectivement.

$$E_{cl} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \rightarrow E_{CFRTSTP} = 67416 \text{ MPa}$$

Pour le calcul de R_m , on considère que le CFRTS est fragile et, par conséquent, son comportement est parfaitement élastique. De plus, la matrice va se casser au même moment que la fibre, car elle ne sera pas capable de plus résister. La résistance de traction est calculée de la manière suivante :

$$R_{mCFRTSTP} = \sigma_{cl}^* = \sigma_m' \cdot (1 - V_f) + \sigma_f^* \cdot V_f = 981 \text{ MPa}$$

$$\text{avec } \sigma_m' = 22,17 \text{ MPa}, V_f = 0,494, \sigma_f^* = 1965 \text{ MPa}.$$

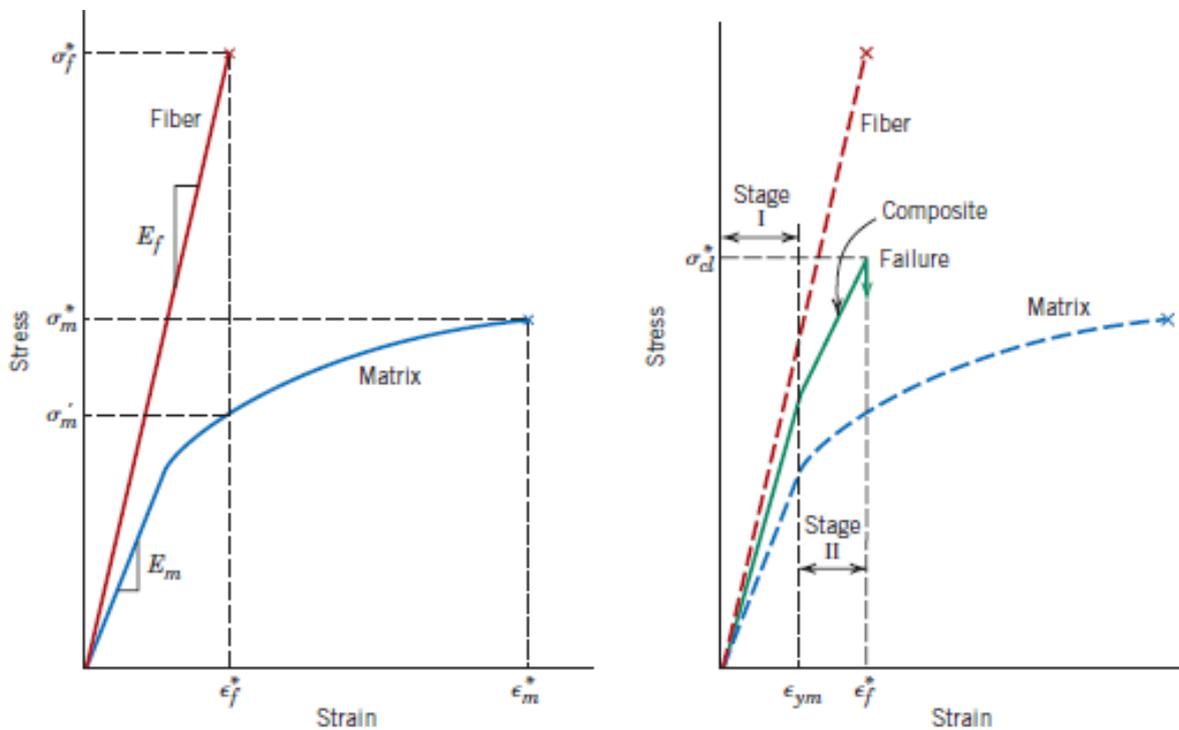


Figure : schéma des paramètres pour le calcul de R_m d'un composite (source [4]).

Ensuite, pour calculer les caractéristiques de l'éprouvette, on va étudier une section transversale de l'éprouvette :

$$\text{Nombre de filaments de CFRTSTP par section} = 23 \frac{\text{filament}}{\text{couche}} \cdot 3 \text{ couche} = 69 \text{ filaments}$$

$$\text{Superficie de la partie fragile (CFRTS)} = 69 \cdot A = 7,023 \text{ mm}^2$$

$$\text{Superficie totale} = 18,15 \text{ mm} \cdot 2,38 \text{ mm} = 43,197 \text{ mm}^2$$

$$\text{Fraction volumique de CFRTS} = \frac{7,023}{43,197} = 0,163$$

De la même manière que pour le CFRTSTP, on estime E et R_m pour l'éprouvette.

$$E_{\text{épreuve}} = E_{TP} \cdot (1 - V_{CFRTS}) + E_{CFRTS} \cdot V_{CFRTS} = 23225 \text{ MPa}$$

$$R_{m \text{ épreuve}} = \sigma'_{TP} \cdot (1 - V_{CFRTS}) + \sigma^*_{CFRTS} \cdot V_{CFRTS} = 338 \text{ MPa}$$

On obtient aussi les fractions volumiques totales pour l'éprouvette :

$$\text{Fraction volumique de CFRTS} = 0,163$$

$$\text{Fraction volumique de TP} = 0,837$$

$$\text{Fraction volumique de la fibre de carbone} = 0,093$$

$$\text{Fraction volumique de TS} = 0,070$$

$$\text{Fraction volumique des filaments de CFRTSTP} = 0,329$$

Avec ces informations, on remplit le tableau montré au début de l'annexe :

Sigle	Matériau	FVF %	E (MPa)	R _m (MPa)
CF	Fibre de carbone T-300 (≈ 93 % C)	100	230.000	3.530
TS	Epoxy (formulation d'Anisoprint)	0	9.070	-
TP	PolyMax PETG	0	1.523	31,7
CFRTS	CCF-1.5K	57	135.000	1.965
CFRTSTP	PolyMax PETG + CCF-1.5K	28,7	67.416	981

Les caractéristiques globales des éprouvettes sont les suivantes :

Dimensions (mm)	FVF %	E (MPa)	R _m (MPa)	Force requise (kN)
200x18,15x2,38	9,28	23.225	338	14,6