

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie Mécanique

**Spécialité** : Construction Mécanique

**Par** : BENKHEDDA Issam

### **Sujet**

Etude de calibration d'une imprimante 3D (Raise3D Pro2) par l'utilisation d'un générateur de profils d'impression

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

|                       |            |                       |           |
|-----------------------|------------|-----------------------|-----------|
| M BOUKHALFA Abdelkrim | Professeur | Université de Tlemcen | Président |
| M HAMOU Said          | Professeur | Université de Tlemcen | Examineur |
| M CHEIKH Abdelmadjid  | Professeur | Université de Tlemcen | Encadreur |

Année universitaire : 2022 /2023.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents qui par leur amour, leurs prières, leurs précieux conseils, leurs compréhensions, et leurs soutiens m'ont guidé vers la voie de la réussite.*

*A mes deux chères sœurs : Zahera et Sabrine pour leur encouragement et soutien morale.*

*Ainsi que les personnes qui ont contribué de près ou de loin qu'ils trouvent ici le témoignage de ma gratitude.*

*A toute ma grande famille et mes amis.*

***BENKHEDDA ISSAM***

# *Remerciement*

*Tout d'abord, je remercie ALLAH le tout puissant pour ces faveurs et ses bontés, de m'avoir donné la bonne santé psychique et physique, le courage, la volonté et la patience de terminer ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer sincèrement ma gratitude envers mon encadreur, Monsieur CHEIKH Abdelmadjid, pour sa disponibilité, sa patience constante et son précieux encadrement. Ses conseils éclairés et son expertise ont grandement contribué à la réussite de ce travail.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury, le président Monsieur M BOUKHALFA Abdelkrim et l'examineur Monsieur M HAMOU Said, pour avoir accepté de juger ce travail. Leur volonté de consacrer leur temps à l'examen et à la correction de nos efforts est très appréciée. Je vous suis reconnaissant et j'espère être à la hauteur de la confiance que vous avez placée en moi.*

## **Résumé**

Ce travail se concentre sur l'étude de la calibration de la température et de la vitesse d'extrusion de l'imprimante 3D Raise3D Pro2 du laboratoire de recherche IS2M.

La première partie de l'étude est consacrée à la calibration de la température d'extrusion de l'imprimante 3D en utilisant l'application web "Profile Iterator" d'un côté, et le système de tranchage IdeaMaker de Raise3D de l'autre côté. L'analyse par les deux méthodes a permis de déterminer la température idéale pour l'impression et de comparer les effets des différents niveaux de température sur les modèles imprimés.

La deuxième partie s'est concentrée sur la calibration de la vitesse ou du taux d'extrusion de l'imprimante, en utilisant des analyses et des recommandations fournies par l'itérateur de profil. Les effets de la sous-extrusion sur l'impression sont également étudiés.

Grâce à cette étude de calibration, les températures et les taux d'extrusion idéaux pour l'impression avec le filament PLA sont déterminés, tout en mettant en évidence les défauts et les problèmes associés à une mauvaise calibration de ces paramètres. De plus, les capacités de l'itérateur de profil de Raise3D sont démontrées.

## **Mots clés**

Impression 3D, FDM, Profile Iterator, IdeaMaker, Température d'extrusion, Vitesse d'extrusion, Modèle STL, Profil d'impression

## **Abstract**

This master's thesis focuses on the study of temperature and flowrate calibration of the 3D printer Raise3D Pro2 at the IS2M research laboratory.

The first part of the study is dedicated to the calibration of the printer's extrusion temperature using the web application "Profile Iterator" on one hand and IdeaMaker slicing system from Raise3D on the other hand. The analysis from both methods allowed for determining the ideal temperature for printing and comparing the effects of different temperature levels on printed models.

The second part focused on the calibration of the printer's flowrate or extrusion speed, using analyses and recommendations provided by Profile Iterator. The effects of under-extrusion on printing were also studied.

Through this calibration study, the ideal temperatures and flowrate for printing with the PLA filament are determined while highlighting the defects and issues associated with improper calibration of these parameters. Additionally, the capabilities of Raise3D's profile iterator are demonstrated.

## **Keywords**

3D Printing, FDM, Profile Iterator, IdeaMaker, Extrusion Temperature, Flowrate, STL Model, Printing profile

## ملخص

يركز هذا العمل على دراسة تقويم درجة الحرارة وسرعة التدفق للطباعة ثلاثية الأبعاد Raise3D Pro2 في مختبر البحث IS2M.

يتركز الجزء الأول من الدراسة على تقويم درجة حرارة التدفق للطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام تطبيق الويب Profile Iterator من جهة، ونظام التقطيع IdeaMaker من Raise3D من الجهة الأخرى. تحليل الطريقتين سمح بتحديد درجة الحرارة المثالية للطباعة ومقارنة تأثيرات مستويات الحرارة المختلفة على النماذج المطبوعة.

يركز الجزء الثاني على تقويم سرعة أو معدل التدفق للطباعة، باستخدام تحليلات و إرشادات مقدمة من تطبيق Profile Iterator. كما يتم أيضا دراسة تأثيرات نقص التدفق على عملية الطباعة.

من خلال هذه الدراسة للتقويم، يتم تحديد درجات الحرارة ومعدلات التدفق المثالية للطباعة بمادة PLA، مع التركيز على العيوب والمشاكل المرتبطة بعدم تقويم هذه الاعدادات بشكل صحيح. بالإضافة إلى ذلك، يتم إظهار قدرات تطبيق Profile Iterator الخاص بـ Raise3D.

## الكلمات الرئيسية

الطباعة ثلاثية الأبعاد، FDM، Profile Iterator، IdeaMaker، درجة حرارة التدفق، معدل التدفق، نموذج STL، ملف الطباعة

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>                                       | <b>1</b>  |
| <b>CHAPITRE I FABRICATION ADDITIVE.....</b>                             | <b>2</b>  |
| I.1 INTRODUCTION .....  | 2         |
| I.2 TERMINOLOGIE .....  | 2         |
| I.3 HISTORIQUE .....  | 3         |
| I.4 DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE 3D [1].....        | 4         |
| I.4.1 Dépôt de fil fondu (FFF/FDM) .....                                | 4         |
| I.4.2 Impression avec polymérisation (SLA/DLP) .....                    | 4         |
| I.4.3 Frittage sélectif par laser (SLS) .....                           | 6         |
| I.4.4 Jet de matériau.....  | 7         |
| I.4.5 Projection de liant.....  | 8         |
| I.4.6 Fusion de poudre métallique DMLS/SLM EBM .....                    | 9         |
| I.5 MATERIAUX POUR IMPRIMANTE 3D [2].....                               | 10        |
| I.5.1 PLA.....  | 11        |
| I.5.2 ABS.....  | 11        |
| I.5.3 PET/PETG.....   | 12        |
| I.5.4 Nylon (PA).....   | 13        |
| I.5.5 TPU [4].....  | 14        |
| I.5.6 PEI.....  | 15        |
| I.6 ÉTAPES ET PROCESSUS DE FABRICATION ADDITIVE [3].....                | 15        |
| I.6.1 Etape 1 : Conception Assistée par Ordinateur CAO .....            | 16        |
| I.6.2 Etape 2 : Conversion en STL.....                                  | 16        |
| I.6.3 Etape 3 : Configuration des paramètres d'impression.....          | 16        |
| I.6.4 Etape 4 : Le tranchage.....                                       | 16        |
| I.6.5 Etape 5 : La fabrication.....                                     | 17        |
| I.6.6 Etape 6 : Enlèvement de la pièce .....                            | 17        |
| I.6.7 Etape 7 : Post-traitement .....                                   | 17        |
| I.7 L'IMPRIMANTE RAISE3D PRO2 .....                                     | 17        |
| I.8 IDEAMAKER .....   | 18        |
| I.9 ITERATEUR DE PROFIL «PROFILE ITERATOR» .....                        | 19        |
| <b>CHAPITRE II ETUDE DE CALIBRATION DE TEMPERATURE D'EXTRUSION.....</b> | <b>20</b> |
| II.1 INTRODUCTION .....   | 20        |
| II.2 PRINCIPE DE TRAVAIL.....   | 21        |
| II.3 METHODOLOGIE .....   | 21        |
| II.4 CALIBRATION UTILISANT L'ITERATEUR DE PROFIL PROFILE ITERATOR ..... | 22        |
| II.4.1 Test 1 200°C à 260°C.....  | 22        |
| II.4.2 Test 2 145°C à 205°C.....  | 33        |
| II.4.3 Test 3 195°C à 215°C.....  | 34        |
| II.5 RESULTAT D'IMPRESSIONS ET ANALYSE .....                            | 35        |
| II.5.1 Analyse des résultats de Test 1 200°C à 260°C.....               | 37        |
| II.5.2 Analyse des résultats de Test 2 – 145°C à 205°C .....            | 39        |
| II.5.3 Analyse des résultats de Test 3 195°C to 215°C.....              | 41        |

|                     |  |           |
|---------------------|--|-----------|
| II.6                | CALIBRATION MANUELLE UTILISANT LE SYSTEME DE TRANCHAGE IDEAMAKER .....                 | 42        |
| II.6.1              | <i>Étapes de la calibration manuelle</i> .....   | 42        |
| II.6.2              | <i>Résultat et analyse du modèle imprimé</i> .....                                     | 50        |
| II.7                | INTERPRETATIONS.....   | 53        |
| II.8                | CONCLUSIONS.....   | 53        |
| <b>CHAPITRE III</b> | <b>ETUDE DE CALIBRATION DE VITESSE D'EXTRUSION UTILISANT ITERATEUR DE PROFIL .....</b> | <b>54</b> |
| III.1               | INTRODUCTION .....   | 54        |
| III.2               | PRINCIPE DE TRAVAIL.....   | 54        |
| III.3               | METHODOLOGIE .....   | 55        |
| III.4               | TESTS DES VITESSES D'EXTRUSION ET ITERATION DES PROFILS.....                           | 55        |
| III.5               | RESULTATS DES TESTS ET INTERPRETATIONS .....   | 62        |
| III.6               | CONCLUSIONS.....   | 66        |
|                     | <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>   | <b>67</b> |
|                     | <b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>   | <b>68</b> |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| TABLEAU III-1 EPAISSEURS DES MURS DES MODELES IMPRIMES .....        | 63 |
| TABLEAU III-2 RESULTATS DES TESTS SELON L'ITERATEUR DE PROFIL ..... | 64 |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| FIGURE I-1 SCHEMATIQUE DE L'IMPRIMANTE DEPOT DE FIL FONDU [1].....     | 4  |
| FIGURE I-2 SCHEMATIQUE DE L'IMPRIMANTE STEREO LITHOGRAPHIE [1] .....   | 5  |
| FIGURE I-3 SCHEMATIQUE DE L'IMPRIMANTE DLP [1].....                    | 6  |
| FIGURE I-4 SCHEMATIQUE DE L'IMPRIMANTE SLS [1] .....                   | 7  |
| FIGURE I-5 SCHEMATIQUE DE L'IMPRIMANTE JET DE MATERIAU [1].....        | 8  |
| FIGURE I-6 SCHEMATIQUE DE L'IMPRIMANTE PROJECTION DE LIANT [1] .....   | 9  |
| FIGURE I-7 SCHEMATIQUE DE L'IMPRIMANTE DM LS [1] .....                 | 10 |
| FIGURE I-8 PLA EN DIFFERENTES COULEURS [5].....                        | 11 |
| FIGURE I-9 FILAMENT ABS [5] .....                                      | 12 |
| FIGURE I-10 FILAMENT NYLON [5] .....                                   | 13 |
| FIGURE I-11 PIECE IMPRIMEE AVEC TPU [5] .....                          | 14 |
| FIGURE I-12 LES ETAPES DE FABRICATION ADDITIVE [3] .....               | 15 |
| FIGURE I-13 L'IMPRIMANTE RAISE3D PRO2 .....                            | 18 |
| FIGURE I-14 ECRAN DE DIFFERENTS TESTS DE «PROFILE ITERATOR» .....      | 19 |
| FIGURE II-1 ECRAN DE TELECHARGEMENT DES FICHIERS DES MODELES STL ..... | 22 |
| FIGURE II-2 IMPORTATION DU MODELE STL .....                            | 23 |
| FIGURE II-3 CHOIX DU FICHER STL.....                                   | 23 |
| FIGURE II-4 LANCEMENT DE TRANCHAGE .....                               | 24 |
| FIGURE II-5 CHOIX DU PROFIL D'IMPRESSION .....                         | 25 |
| FIGURE II-6 ENREGISTREMENT DU FICHER PROFIL (.BIN).....                | 26 |
| FIGURE II-7 CHARGEMENT DU PROFIL VERS «PROFILE ITERATOR».....          | 27 |
| FIGURE II-8 SECTIONNEMENT DE FICHER .BIN.....                          | 27 |
| FIGURE II-9 CHOIX DE TYPE DE CALIBRATION.....                          | 28 |
| FIGURE II-10 CONFIRMATION DES PARAMETRES D'IMPRESSION.....             | 29 |
| FIGURE II-11 SELECTION DES TEMPERATURES POUR TEST 1 .....              | 30 |
| FIGURE II-12 TELECHARGEMENT DE CODE-G.....                             | 31 |
| FIGURE II-13 INSERTION DE CLE USB.....                                 | 31 |
| FIGURE II-14 IMPRESSION DU MODEL .....                                 | 32 |
| FIGURE II-15 SELECTION DES TEMPERATURES POUR TEST 2 .....              | 33 |
| FIGURE II-16 SELECTION DES TEMPERATURES POUR TEST 3 .....              | 34 |
| FIGURE II-17 APPAREIL PHOTO UTILISE.....                               | 35 |
| FIGURE II-18 LANCEMENT D'ANALYSE .....                                 | 35 |
| FIGURE II-19 ANALYSE DES PROBLEMES DE FILAMENT/IMPRIMANTE.....         | 36 |
| FIGURE II-20 ANALYSE DES PROBLEMES DE TEMPERATURE .....                | 37 |
| FIGURE II-21 TEMPERATURES DES SECTIONS DE LA TOUR IMPRIMEE .....       | 37 |
| FIGURE II-22 ZOOM DES SECTIONS A ET E.....                             | 38 |
| FIGURE II-23 STRUCTURES FILAMENTEUSE «STRINGING» DE SECTION A.....     | 38 |
| FIGURE II-24 TEMPERATURES DES SECTIONS DE LA TOUR IMPRIMEE .....       | 39 |
| FIGURE II-25 AFFAISSEMENT «BRIDGING».....                              | 40 |
| FIGURE II-26 DEFERENCE ENTRE 205°C ET 160°C.....                       | 40 |
| FIGURE II-27 TEMPERATURES DES SECTIONS DE LA TOUR IMPRIMEE .....       | 41 |
| FIGURE II-28 ZOOM DES SECTION E ET D.....                              | 41 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURE II-29 AFFICHAGE DE MODEL STL .....                            | 42 |
| FIGURE II-30 MODIFICATION DE LA TAILLE DE MODELE .....               | 43 |
| FIGURE II-31 CHANGEMENT DE L'EXTRUDEUR .....                         | 44 |
| FIGURE II-32 CHOIX DU PROFIL A DUPLIQUER .....                       | 45 |
| FIGURE II-33 ACCES AUX PARAMETRES AVANCES .....                      | 45 |
| FIGURE II-34 DESACTIVATION DE LA FONCTION «WIPE WALL» .....          | 46 |
| FIGURE II-35 ACCES A LA FONCTION DE SIMULATION DE IDEAMAKER .....    | 47 |
| FIGURE II-36 DETERMINATION DES NOMBRES DE COUCHE .....               | 47 |
| FIGURE II-37 L'ENTREE DES TEMPERATURES .....                         | 48 |
| FIGURE II-38 ÉCRAN TACTILE DE MACHINE .....                          | 49 |
| FIGURE II-39 MODEL IMPRIME .....                                     | 50 |
| FIGURE II-40 STRUCTURES FILAMENTEUSES DANS DIFFERENT NIVEAUX .....   | 51 |
| FIGURE II-41 DIFFERENCE DANS LA REFLEXION .....                      | 52 |
| FIGURE II-42 DIFFERENCE DANS L'AFFAISSEMENT .....                    | 52 |
| FIGURE III-1 SELECTION DU FICHIER STL .....                          | 55 |
| FIGURE III-2 AFFICHAGE DE MODEL STL .....                            | 56 |
| FIGURE III-3 EXPORTATION DU FICHIER (.BIN) DU PROFIL .....           | 56 |
| FIGURE III-4 CHARGEMENT DU PROFIL VERS «PROFILE ITERATOR» .....      | 57 |
| FIGURE III-5 SELECTION DE TYPE DE TEST .....                         | 57 |
| FIGURE III-6 SELECTION DE VITESSE D'EXTRUSION .....                  | 58 |
| FIGURE III-7 TELECHARGEMENT DU FICHIER CODE-G .....                  | 58 |
| FIGURE III-8 AFFICHAGE GRAPHIQUE DE MODELE SUR L'ECRAN .....         | 59 |
| FIGURE III-9 MESURE AVEC PIED A COULISSE .....                       | 59 |
| FIGURE III-10 L'ENTREE DES VALEURS MESUREES .....                    | 60 |
| FIGURE III-11 RECOMMANDATION DE PROFIL ITERATOR .....                | 61 |
| FIGURE III-12 TELECHARGEMENT DE PROFIL FINAL .....                   | 61 |
| FIGURE III-13 MODELES IMPRIMES .....                                 | 62 |
| FIGURE III-14 DIFFERENCE DE QUALITE D'IMPRESSION ENTRE MODELES ..... | 65 |
| FIGURE III-15 DIFFERENCE D'IMPRESSION DES COQUES ENTRE MODELES ..... | 66 |

## **Glossaire**

CAO: Conception Assistée par Ordinateur

DMLS: Direct Metal Laser Sintering (Frittage laser direct de métal)

EBM: Electron Beam Melting (Fusion par faisceau d'électrons)

FDM: Fused Deposition Modeling (Dépôt de fil fondu)

FFF : Fused Filament Fabrication (Fabrication par filament fondu)

PLA : acide polylactique

PA: Nylon

TPU: Thermoplastic polyurethane (Polyuréthane thermoplastique)

SLM: Selective Laser Melting (Fusion laser sélective)

PEI: Polyétherimide

ASTM: American Society for Testing and Materials (Société américaine pour les essais des matériaux.)

STL: STereoLitography

SLS: Selective Laser Sintering (Frittage laser sélectif)

SLA : stéréolithographie

DLP: Direct Light Processing (Traitement numérique de la lumière)

EBM: Electron Beam Melting (Fusion par faisceau d'électrons)

ABS: acrylonitrile butadiène styrène

PET: polyéthylène téréphtalate

PVA: synthetic polymer (Polymère synthétique)

AM: Additive manufacturing (Fabrication additive)

## **Introduction générale**

La fabrication additive, communément connue sous le nom impression 3D, est un procédé de fabrication qui permet de créer des objets directement à partir de modèles CAO. L'adjectif "additif" se réfère à la méthode distinctive consistant à superposer des couches les unes sur les autres pour construire l'objet final. L'imprimante 3D est une technologie relativement moderne avec plusieurs avantages par rapport au fabrication classique, comme sa flexibilité et sa capacité de fabriquer des objets complexes. Mais comme les autres technologies de fabrication, elle a aussi besoin du réglage et calibration pour maintenir un bon fonctionnement. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui a comme objectif l'étude des étapes nécessaires pour effectuer une calibration de l'imprimante 3D Raise3d Pro2 du laboratoire de recherche IS2M en utilisant l'application web Itérateur de profil «Profile Iterator» de Raise3D.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Dans le premier chapitre on introduit la fabrication additive en général et on explore son évolution et les différentes variations de la technologie. On présente aussi le système de tranchage IdeaMaker et l'itérateur de profil «Profile Iterator».

Dans le deuxième chapitre, on étudie et examine les différentes étapes nécessaires pour calibrer la température d'extrusion de l'imprimante Raise3D Pro2 du laboratoire de recherche IS2M. On fait la calibration en deux parties ; la première partie en utilisant «Profile Iterator» et la deuxième partie manuellement avec le système de tranchage IdeaMaker, pour déterminer les températures idéales d'extrusion.

Le troisième chapitre on fait une calibration de vitesse d'extrusion de l'imprimante Raise3D Pro2 en utilisant l'application web «Profile Iterator» développée par Raise3D. Ensuite on examine les étapes du processus et on analyse les résultats d'impression.

Enfin une conclusion générale est donnée.

## Chapitre I Fabrication additive

### I.1 Introduction

La fabrication additive, plus souvent appelée impression 3D, est un processus de fabrication qui crée des objets directement à partir des modèles CAO. Le terme "additif" fait référence au processus unique d'ajout de couches les unes sur les autres pour construire l'objet final. La méthode selon laquelle les couches sont créées varie largement, allant de l'utilisation de lasers sur des poudres comme les méthodes de DMLS ou EBM à l'extrusion de matériaux plastiques chauffés généralement référencé comme FDM/FFF qui a grande variation de filament (PLA, PA, TPU, PEI). Cela la distingue des processus de fabrication traditionnelle, en outre la fabrication additive a des étapes de fabrication unique à elle. Initialement, la fabrication additive était principalement utilisée pour le prototypage rapide. Cependant, à mesure que la technologie est devenue plus précise, moins chère et plus fiable, elle s'est développée pour englober une large gamme d'applications.

### I.2 Terminologie

Le terme utilisé initialement pour décrire la fabrication additive était le prototypage rapide, qui consistait à utiliser la technologie pour produire rapidement un prototype du produit final. L'importance était mise sur la rapidité et la création d'un modèle qui servirait de base pour les versions futures. Cependant, le terme de prototypage rapide est devenu insuffisant pour décrire les capacités de la technologie. En effet, le processus de création d'une copie physique à partir d'un modèle numérique présentait une gamme beaucoup plus large de cas d'utilisation, tout en offrant une qualité accrue au point où le prototype était de la même qualité que le produit final. Le comité technique de l'ASTM International a reconnu cela et a convenu d'adopter une nouvelle terminologie. Ils ont choisi le terme "fabrication additive", qui le différencie des autres formes de fabrication et met l'accent sur l'approche basée sur les couches qui lui est propre.

Avec l'évolution de la technologie et sa popularisation croissante en raison de l'émergence des imprimantes 3D de bureau dans les années 2000 et 2010, le terme "impression 3D" est devenu plus couramment utilisé. Ces machines de bureau imitent les imprimantes conventionnelles de papier, ce qui a conduit à l'appellation "impression 3D". Malgré la popularité du terme "impression 3D", il est important de reconnaître que la fabrication additive et l'impression 3D ne sont pas des termes interchangeables. Alors que l'impression 3D se réfère spécifiquement au processus de création d'un objet physique à partir d'un modèle numérique par fabrication additive, la fabrication additive englobe une gamme plus large de technologies et de processus au-delà de l'impression 3D.

### I.3 Historique

Bien que certains concepts de fabrication additive existassent dès les années 1970, la véritable histoire de l'impression 3D telle que nous la connaissons aujourd'hui a commencé dans les années 1980. À cette époque, plusieurs brevets décrivant différentes formes de fabrication additive ont été déposés par des entreprises et des institutions de recherche à travers les États-Unis, la France et le Japon. Mais le plus important fut en 1984, lorsque Charles "Chuck" Hull déposa son propre brevet pour le système de fabrication par stéréolithographie, qui utilisait des lasers à lumière UV sur des photopolymères pour former des couches les unes sur les autres. Il est également important de noter que Hull est celui qui a introduit le format de fichier STL ainsi que la stratégie de remplissage (infill) couramment utilisée aujourd'hui.

En 1986, Hull fonda sa compagnie, «3D Systems Corporation», et lança la première imprimante 3D commerciale, le SLA-1, en 1987. La même année, un inventeur américain nommé Scott Crump développa la technologie de dépôt de fil fondu (FDM) avec sa société Stratasys. Cette technologie utilise l'extrusion de plastique et est le type d'imprimante 3D le plus populaire maintenant.

Plus tard, dans les années 1990, la technologie d'impression 3D qui était en plein développement était «Selective Laser Sintering» ou la fusion sélective par laser (SLS), qui utilise des lasers et des matériaux en poudre. Ensuite, la prochaine avancée significative dans la technologie de l'impression 3D a été réalisée en 2005 par le projet RepRap, qui a rendu de nombreuses technologies d'impression 3D en open source, telles que la FFF, similaire à la FDM mais accessible au grand public.

Des années plus tard, en 2009, les brevets de la FDM sont tombés dans le domaine public, ce qui signifiait que de nombreuses entreprises pouvaient l'utiliser. Par conséquent, l'impression 3D est devenue beaucoup moins chère et plus populaire.

## I.4 Différentes technologies de fabrication additive 3D [1]

### I.4.1 Dépôt de fil fondu (FFF/FDM)

La Fabrication par Filament Fondu FFF (Fused Filament Fabrication), également connue sous le nom de Modélisation par Dépôt de Filament Fondu (FDM) (un terme breveté par Stratasys), est la technique de fabrication additive la plus répandue. Un fil de filament est inséré dans l'imprimante et extrudé à travers la buse d'extrusion comme c'est indiqué dans la figure I-1. Une fois que la buse de l'imprimante atteint la température désirée, un moteur propulse le filament à travers la buse chauffée en le faisant fondre. L'imprimante déplace ensuite la tête d'extrusion, déposant le matériau fondu à un emplacement prédéterminé, où il se solidifie. Le processus est répété couche par couche jusqu'à ce que la plateforme de construction descende et que le composant soit créé.

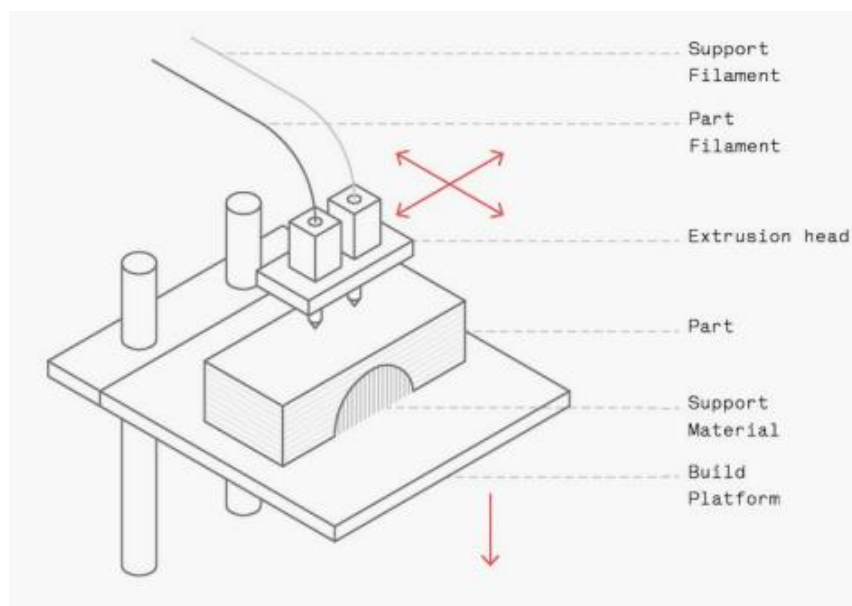


Figure I-1 Schématisation de l'imprimante Dépôt de fil fondu [1]

### I.4.2 Impression avec polymérisation (SLA/DLP)

Les techniques de polymérisation en cuve utilisent une résine photo-polymérisable dans une cuve qui est solidifiée par une source lumineuse. Les méthodes les plus répandues de polymérisation en cuve sont la stéréolithographie (SLA) et traitement numérique de la lumière DLP (Direct Light Processing).

### I.4.2.1 Stéréolithographie (SLA)

SLA, ou stéréolithographie, est la technologie originale d'impression 3D développée par Charles W. Hull, qui a breveté le processus en 1986 et a créé l'entreprise «3D Systems» pour l'utiliser. Le processus utilise des miroirs appelés galvanomètres ou «galvos» sur les axes x et y, qui dirigent rapidement un faisceau laser à travers une zone d'impression comme ça se présente dans la figure I-2, ou cuve, et solidifie la résine lorsqu'elle se déplace. La pièce est décomposée couche par couche en un ensemble de coordonnées données aux galvanomètres sous forme de points et de lignes. La majorité des machines SLA utilisent un laser à semi-conducteurs pour le durcissement.

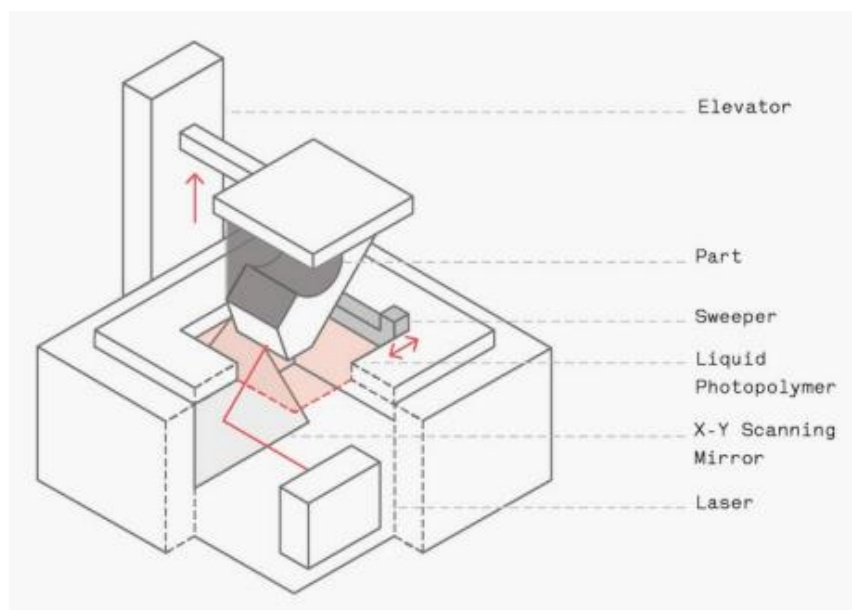


Figure I-2 Schématique de l'imprimante Stéréolithographie [1]

### I.4.2.2 Traitement numérique de la lumière (DLP)

La technologie DLP (Direct Light Processing) utilise un processus similaire à celui de la SLA, à la différence près qu'au lieu d'utiliser un faisceau laser, elle utilise un écran de projecteur (voir Figure I-3) de lumière numérique pour générer une seule ou plusieurs images de chaque couche simultanément. L'écran numérique du projecteur forme chaque couche avec des pixels carrés, ce qui donne des voxels, de petites briques rectangulaires qui composent la couche. Cette méthode offre l'avantage de temps d'impression plus rapides que la SLA.

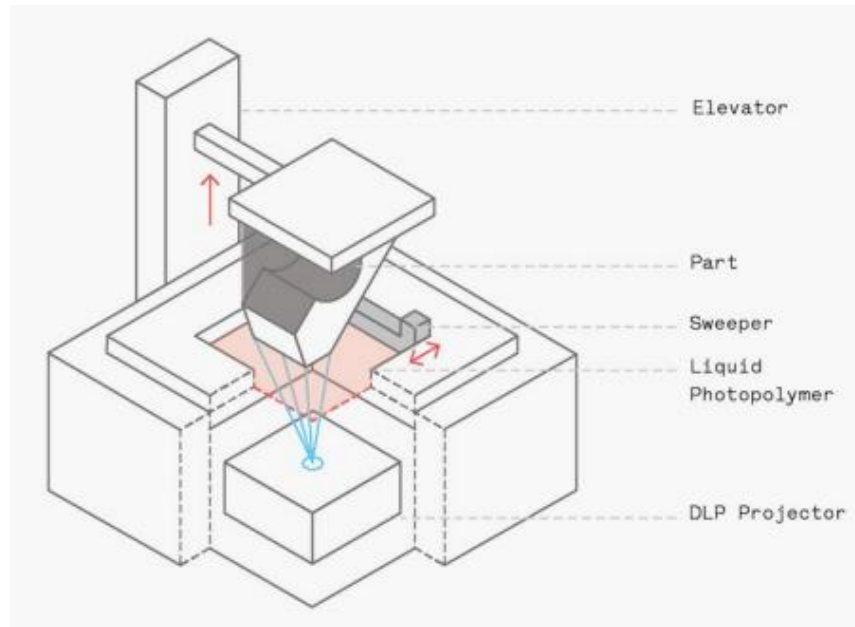


Figure I-3 Schématique de l'imprimante DLP [1]

### I.4.3 Frittage sélectif par laser (SLS)

Pour produire des pièces en utilisant la technologie de SLS (Selective Laser Sintering), on utilise fusion sur lit de poudre. Le processus SLS commence par chauffer la poudre de polymère et déposer une fine couche sur une plateforme de construction à l'aide d'une lame de revêtement (voir Figure I- 4). Ensuite, un faisceau laser balaye la surface et sinter sélectivement la poudre pour solidifier une section transversale de la pièce. Le laser est focalisé par des galvanomètres pour la bonne localisation de la fusion. Après avoir balayé toute la section transversale, la plateforme de construction descend d'une couche, et le processus est répété avec de nouvelles couches de poudre jusqu'à ce que toutes les pièces soient entièrement fabriquées.

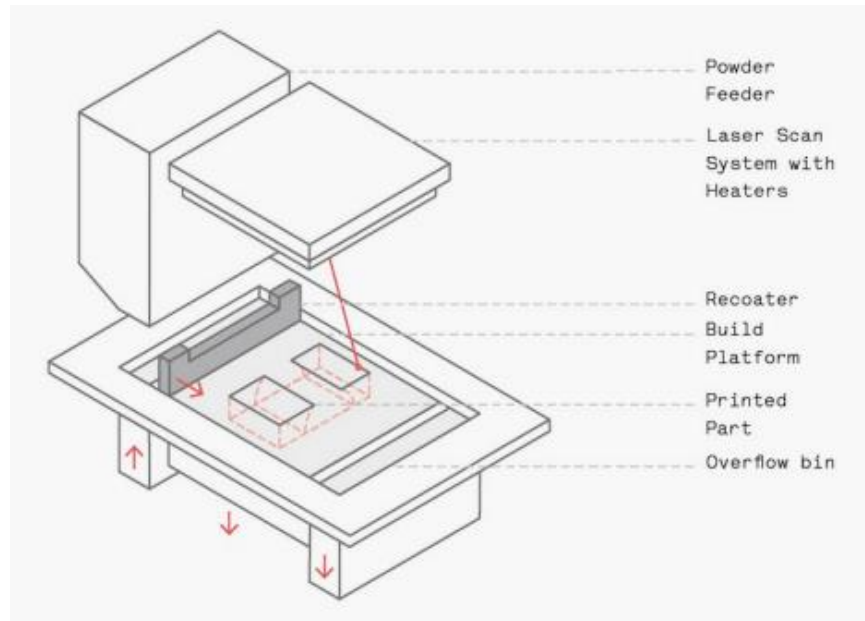


Figure I-4 Schématique de l'imprimante SLS [1]

#### I.4.4 Jet de matériau

En utilisant des photopolymères ou des gouttelettes de cire qui durcissent sous l'exposition à la lumière, le procédé de Material Jetting (jet de matériau) est un processus de fabrication similaire au processus d'impression d'encre 2D. Le processus consiste à construire plusieurs couches les unes sur les autres pour former une pièce solide, en projetant des centaines de petites gouttelettes de photopolymère comme c'est indiqué dans la figure I- 5 ou de matériau à base de cire sur une plateforme de construction à l'aide d'une tête d'impression. Les gouttelettes sont ensuite solidifiées à l'aide de la lumière UV.

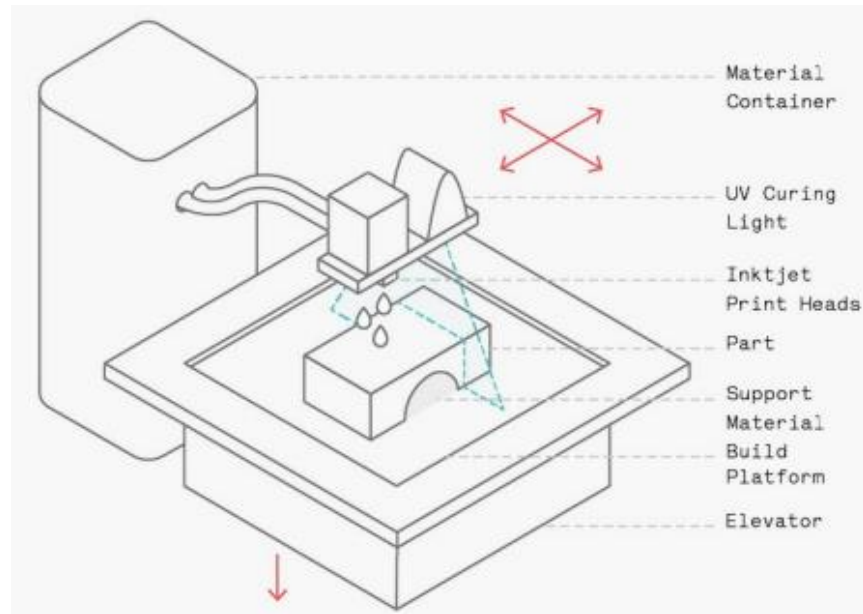


Figure I-5 Schématisation de l'imprimante Jet de Matériau [1]

### I.4.5 Projection de liant

Le processus d'impression appelé «Binder Jetting» (projection de liant) est similaire à la SLS. Il nécessite une couche initiale de poudre sur la plateforme de construction. Contrairement à la SLS, qui utilise un laser pour solidifier la poudre, le Projection de liant utilise une tête d'impression pour déposer des gouttelettes de liant à la surface de la poudre (voir Figure I- 6). Les gouttelettes lient entre elles les particules de poudre pour former chaque couche de l'objet.

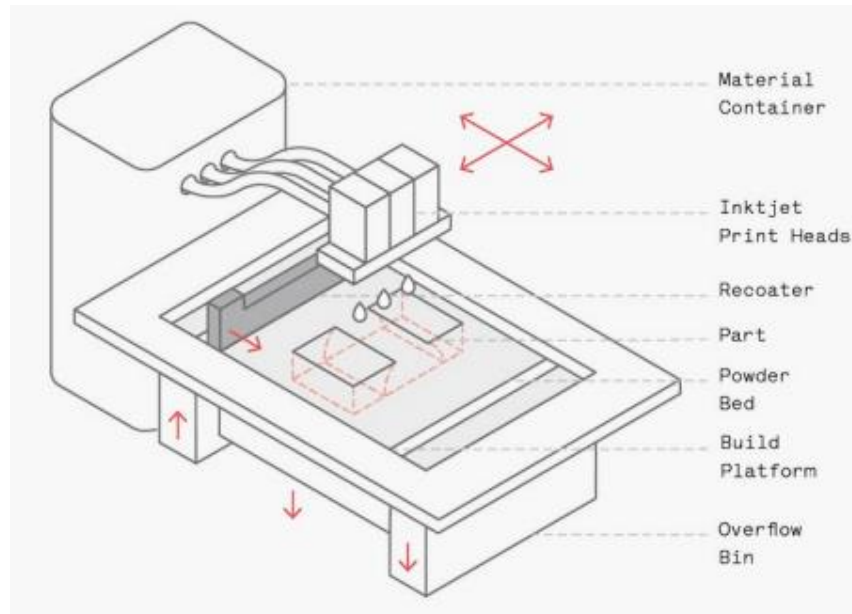


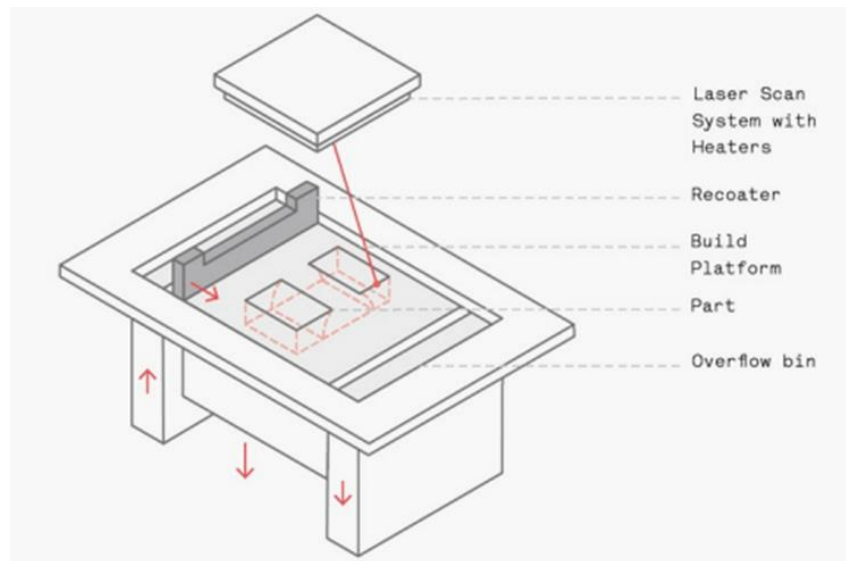
Figure I-6 Schématique de l'imprimante Projection de Liant [1]

## I.4.6 Fusion de poudre métallique DMLS/SLM EBM

La fusion sur lit de poudre métallique est une technologie qui produit des pièces solides en fusionnant des particules de poudre métallique couche par couche à l'aide d'une source thermique.

### I.4.6.1 Technique DMLS et SLM

Les deux technologies DMLS (Direct Metal Laser Sintering) et SLM (Selective Laser Melting) utilisent une méthode de production similaire à SLS, mais sont spécialisés pour les pièces métalliques. DMLS (voir Figure I-7) chauffe la poudre jusqu'à un point de fusion moléculaire, tandis que SLM fait fondre complètement la poudre métallique avec des lasers, ce qui donne une pièce homogène avec un point de fusion unique qui est impossible pour les alliages. Cela distingue DMLS de SLM, car le premier peut produire des alliages métalliques tandis que le dernier ne peut produire que des métaux simples tels que le titane.



**Figure I-7 Schématisation de l'imprimante DMLS [1]**

#### **I.4.6.2 Fusion par faisceau d'électrons (EBM)**

EBM (Electron Beam Melting) est une technologie de fusion sur lit de poudre qui utilise un faisceau d'électrons à haute énergie au lieu d'un laser pour fusionner les particules de poudre métallique. Un faisceau d'électrons balaye la couche de poudre, faisant fondre et solidifier les zones ciblées. EBM a une vitesse de construction plus rapide que SLM et DMLS en raison de sa densité d'énergie plus élevée. Cependant, EBM entraîne généralement une plus grande taille minimale des détails, des particules de poudre, une épaisseur de couche et une finition de surface. EBM ne fonctionne que sur des matériaux conducteurs, et les pièces doivent être produites dans un vide.

### **I.5 Matériaux pour imprimante 3D [2]**

La grande diversité de technologies d'impression 3D entraîne une variation considérable dans les matériaux utilisés pour l'impression. La technologie la plus couramment utilisée est la FDM, qui offre de nombreuses variations de filaments facilement accessibles. Parmi ces filaments :

### I.5.1 PLA

Le PLA, ou acide polylactique, est un bioplastique biodégradable qui est initialement transparent. C'est un excellent choix pour l'impression 3D en raison de sa température d'extrusion relativement basse. De plus, en fonction de la proportion d'additifs, il peut varier de dur à flexible. Le filament PLA est peu coûteux et largement disponible dans une grande variété de couleurs comme apparaît dans la figure I-8. Il est simple à imprimer et couramment le premier choix pour les imprimantes de bureau.



Figure I-8 PLA en différentes couleurs [5]

### I.5.2 ABS

L'ABS, ou acrylonitrile butadiène styrène (voir Figure I-9), est un filament peu coûteux avec d'excellentes caractéristiques mécaniques, ce qui en fait un matériau très couramment utilisé. Il s'imprime bien à des températures d'extrusion atteignables, ce qui permet d'obtenir des pièces solides et rigides. Les défis de l'ABS résident dans sa tendance de déformation et le détachement du lit difficiles pour les impressions avec certaines formes. Le caractère du filament ABS est

déterminé par la proportion de ses différents composants, ainsi que par les colorants utilisés pour la coloration. Par exemple, une proportion élevée de styrène entraîne une rigidité et une fragilité accrues, tandis qu'une augmentation de la fraction de butyle améliore la flexibilité. En raison de sa composition multi-composants, les filaments ABS présentent un degré significatif de variabilité.



**Figure I-9 Filament ABS [5]**

### **I.5.3 PET/PETG**

Le polyéthylène téréphtalate (PET), un plastique d'origine transparent et durable avec une grande polyvalence, a été popularisé par Taulman sous le nom commercial Tglase. Le PET est largement utilisé dans la fabrication des bouteilles en plastique et des textiles (Dacron). Cependant, il est connu pour être plus difficile à imprimer que l'ABS mais présente une très faible déformation (gauchissement). Malgré les défis d'impression, le PET donne des pièces imprimées très durables. De plus, les PET sont souvent une excellente option pour une utilisation en extérieur à long terme. Contrairement au PLA qui a tendance à se détériorer avec le temps, les PET peuvent résister à des conditions difficiles et à des facteurs environnementaux pendant de plus longues périodes.

### I.5.4 Nylon (PA)

Le nylon peut être imprimé par de nombreuses machines courantes à des températures d'extrusion allant jusqu'à 245°C, le rendant facilement accessible pour la plupart des imprimantes 3D. Cependant, le nylon est un matériau hygroscopique et doit être séché et manipulé avec précaution en présence d'humidité. Malgré cela, le nylon est un plastique extrêmement solide et flexible qui peut être imprimé sans nécessiter d'imprimantes coûteuses et sophistiquées. Le nylon Taulman (voir Figure I-10) est une version spéciale de PA qui réduit efficacement le problème d'humidité, ce qui nécessite moins de temps de séchage par rapport aux autres nylons. Le nylon est idéal pour les applications où la résistance à la traction et la flexibilité sont cruciales. Les propriétés distinguées de nylon sont :

- Idéal pour l'impression haut de gamme.
- Offre une flexibilité exceptionnelle.
- Résistance exceptionnelle aux produits chimiques.



Figure I-10 Filament NYLON [5]

### I.5.5 TPU [4]

TPU (Thermoplastic polyurethane) est le matériau de filament privilégié pour l'absorption des chocs et l'étanchéité et l'isolation contre l'huile ou la graisse grâce à sa texture. Ses propriétés les plus importantes sont son élasticité semblable au caoutchouc comme montre figure I-11, sa résilience et sa durabilité. Des exemples de pièces imprimées en 3D en TPU comprennent des tubes, des douilles et des amortisseurs de vibrations.

Un autre avantage du TPU est sa dureté ajustable qui lui permet d'être aussi souple que le caoutchouc ou aussi rigide que les plastiques. Son apparence et sa sensation sont également polyvalentes. Elle varie du transparent aux couleurs, ainsi que de la texture douce au toucher à la texture rugueuse. Le problème de TPU est sa difficulté à obtenir une impression précise.



**Figure I-11 Pièce imprimée avec TPU [5]**

### I.5.6 PEI

PEI (Polyétherimide) est un filament thermoplastique exceptionnel connu pour son excellente résistance au feu et aux produits chimiques. Il produit des impressions avec des finitions de surface lisse, le rendant très polyvalent. Cependant, en raison de ses propriétés d'adhérence élevées, il nécessite une manipulation soignée lors du retrait.

### I.6 Étapes et processus de fabrication additive [3]

Tous les processus de fabrication additive suivent des étapes et des processus similaires qui transforment un modèle virtuel CAO en un objet physique comme indiqué dans la figure I-12. Cependant, le processus peut varier en fonction du produit imprimé. Certains modèles de produits ne sont utilisés que pour la visualisation et ne nécessitent qu'une seule fabrication additive. Cependant, d'autres produits d'ingénierie plus sophistiqués peuvent nécessiter plusieurs itérations et utilisations de la machine de fabrication additive. De plus, les produits aux premiers stades de développement peuvent avoir des surfaces rugueuses et non finies, mais les produits finaux nécessitent un post-traitement, tel que la peinture. Par conséquent, il existe une chaîne d'étapes différente. Mais, la plupart des processus de fabrication additive suivent ces étapes en général.

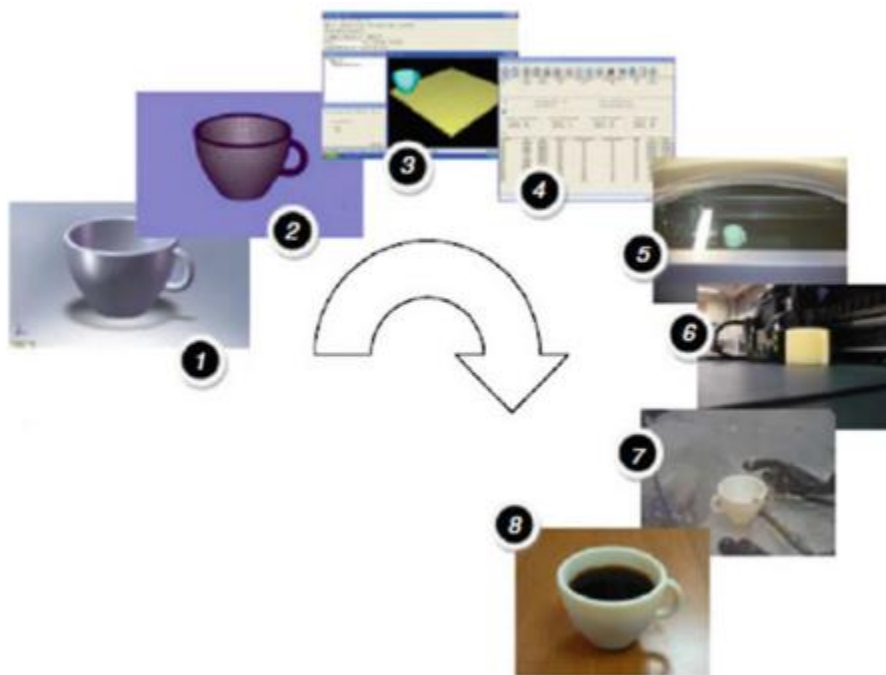


Figure I-12 Les étapes de fabrication additive [3]

### **I.6.1 Etape 1 : Conception Assistée par Ordinateur CAO**

Toutes les pièces imprimées avec l'imprimante 3D commencent sous forme d'un modèle géométrique 3D créé par un logiciel qui décrit leur géométrie de surface externe. Cela peut être réalisé à l'aide de la plupart des logiciels de CAO professionnels, tels que SOLIDWORKS, CATIA, INVENTOR, Rhinoceros... etc, à condition que la sortie représente la surface du solide. Des outils de rétroingénierie, tels que des scanners de numérisation 3D, peuvent également faire partie de cette étape.

### **I.6.2 Etape 2 : Conversion en STL**

STL, ou «STereo Lithography file», est un format de fichier qui décrit le modèle CAO comme une surface fermée. Il est utilisé par le système de tranchage pour générer le programme en Code-G. Ce format est actuellement la norme utilisée pour toutes les machines AM. Et peut être exporté par la plupart des logiciels de CAO

### **I.6.3 Etape 3 : Configuration des paramètres d'impression**

Les machines d'impression 3D disposent de paramètres d'impression très flexibles sous la forme d'options variables que l'utilisateur peut modifier en fonction de type d'impression souhaitées. Ces réglages comprennent la vitesse d'impression, l'épaisseur de couche, le diamètre de l'extrudeur et le décalage des axes. Cette collection de paramètres se présente généralement sous la forme d'un profil prédéterminé par le fabricant de la machine.

### **I.6.4 Etape 4 : Le tranchage**

Le tranchage est un processus qui peut être effectué par différents logiciels tels que IdeaMaker ou Cura. Il consiste à diviser le fichier STL en fines couches virtuelles et à les convertir en lignes de coordonnées et en instructions que la machine peut traiter et suivre sous la forme de Code-G. Le système de tranchage prend également en compte les propriétés d'impression déterminées par l'utilisateur.

### **I.6.5 Etape 5 : La fabrication**

Une fois que le fichier a été transféré à l'imprimante 3D, le processus d'impression de l'objet est principalement automatisé, sans nécessiter de surveillance. Seule une supervision modérée est recommandée pour vérifier d'erreurs d'impression, une pénurie de matériau ou des problèmes de logiciel.

### **I.6.6 Etape 6 : Enlèvement de la pièce**

La pièce est retirée après que l'impression est terminée, ce qui peut nécessiter une intervention manuelle. Parfois, l'imprimante est verrouillée par mesure de sécurité, par exemple lorsqu'une température élevée est utilisée, de sorte que le retrait de la pièce nécessite une interaction avec le protocole de sécurité de la machine.

### **I.6.7 Etape 7 : Post-traitement**

Après la fabrication et le retrait de la pièce, il peut être nécessaire d'effectuer des étapes supplémentaires avant de pouvoir l'utiliser, telles que le nettoyage ou le retrait des supports pour certains types de constructions. Dans les fabrications plus avancées, le post-traitement peut inclure l'usinage, le polissage ou d'autres processus en fonction du matériau utilisé et de l'objectif de l'application.

## **I.7 L'imprimante Raise3D Pro2**

La Raise3D Pro2 est une imprimante de bureau (voir Figure I-13) du fabricant Raise3D, avec deux extrudeurs qui permettent de nombreuses fonctionnalités, telles que l'impression en multi-couleurs. Elle a un volume d'impression maximal de 305×305×300 mm, Cette imprimante peut imprimer à des températures allant jusqu'à 300°C, ce qui lui permet d'imprimer dans de nombreux matériaux tels que l'ABS et le nylon. Parmi les caractéristiques importantes et utile, on trouve son écran tactile de 7 pouces et les logiciels multiples de Raise3D dédiés au travail avec le Pro2, comme le système de tranchage IdeaMaker . Elle peut imprimer avec une résolution relativement élevée, puisque sa hauteur minimale de couche est de 0,01 mm.



**Figure I-13 L'imprimante Raise3D Pro2**

### **I.8 IdeaMaker**

IdeaMaker est un système de tranchage de Raise3D avec de nombreuses fonctionnalités. Il est conçu pour fonctionner avec les imprimantes Raise3D, mais il n'est pas limité à celles-ci. En plus de faire le tranchage des fichiers géométriques 3D et de générer du Code-G pour l'imprimante, il s'agit également d'un simulateur et contient de plusieurs fonctionnalités permettant à l'utilisateur de redimensionner le modèle, d'ajouter des supports, d'ajouter des textures, de dupliquer et bien d'autres options. Il dispose également de fonctionnalités plus modernes telles que la connexion à la machine via le Wi-Fi.

## I.9 Itérateur de profil «Profile Iterator»

Il s'agit d'une extension de «IdeaMaker» développée par Raise3D pour aider l'utilisateur à traverser le processus de test des filaments et l'étalonnage de l'imprimante. Elle fonctionne sous forme d'une application web online. Elle propose une calibration de base pour la température et la vitesse d'extrusion, ainsi que d'autres calibrations plus avancées comme indiqué dans la figure I-14. Elle fonctionne en recevant un profil exporté depuis «IdeaMaker» ou en créant un nouveau profil complet, puis en guidant l'utilisateur à travers différentes étapes pour sélectionner les paramètres d'impression. Une fois le profil complet, le «Profile Iterator» génère le Code-G du modèle de test à imprimer. Une fois le modèle est réalisé, l'itérateur guide l'utilisateur dans le processus d'analyse et enregistre les résultats de l'utilisateur. Si les résultats sont bons, il génère un profil à télécharger avec ces derniers paramètres. Si les résultats sont mauvais, il demande à l'utilisateur de modifier les paramètres et, ça dépend du type de test, il effectue des calculs et fait une recommandation sur les paramètres à utiliser pour le prochain test d'impression. Le processus est répété et les profils sont itérés jusqu'à ce que les résultats optimaux soient atteints.

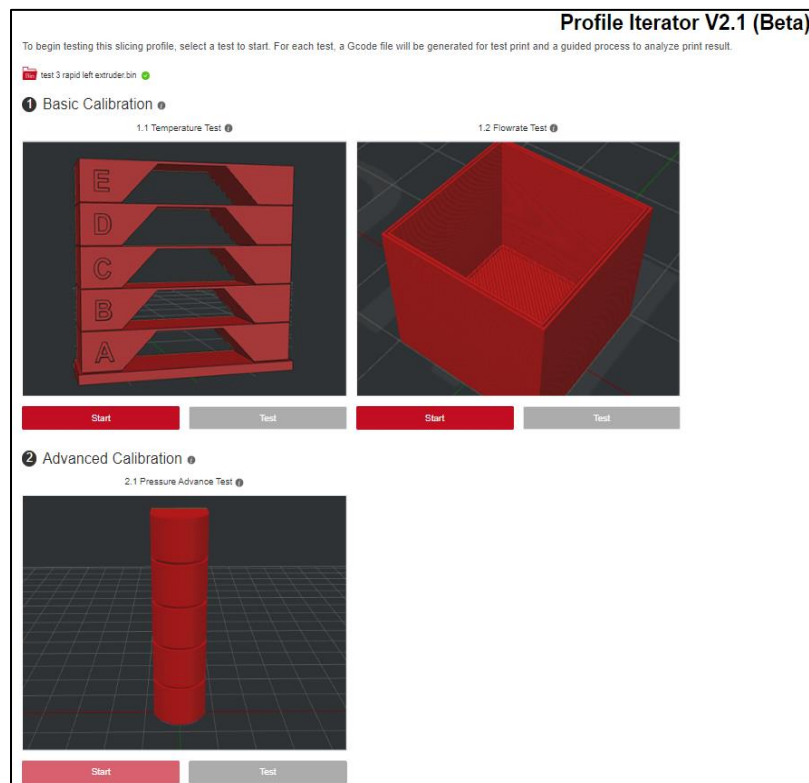


Figure I-14 Ecran de différents tests de «Profile Iterator»

# Chapitre II Etude de calibration de température d'extrusion

## II.1 Introduction

La température d'extrusion est le facteur le plus important dans l'impression 3D FDM ou FFF. Elle a un effet direct sur la qualité de l'impression, sa rigidité et son esthétique. Une température inappropriée peut causer des problèmes à l'imprimante, par exemple, des températures trop basses peuvent provoquer un colmatage, tandis que des températures trop élevées endommageront la buse à long terme et réduiront sa durée de vie. Par conséquent, il est toujours recommandé de calibrer la température de l'extrusion après des changements majeurs sur la machine, tels que le remplacement du type de filament, en particulier les filaments flexibles tels que le TPU, qui sont sensibles même aux variations de 5°C, ou le changement de marque de filament, car il y a toujours de petites variations de point de fusion entre les marques du même matériau de filament.

Différents filaments ont des températures d'impression différentes. Par exemple :

- PLA: 190-230°C
- ABS: 230-260°C
- PETG: 220-250°C
- Nylon: 240-260°C
- TPU: 200-230°C
- PVA: 180-220°C

Dans ce chapitre, on va étudier et examiner les différentes étapes nécessaires pour calibrer la Température d'extrusion de l'imprimante Raise3D Pro2 du laboratoire de recherche IS2M et on va analyser l'effet de température inappropriée sur les modèles imprimés. On fera la calibration en deux parties ; la première partie en utilisant «Profile Iterator» (itérateur de profil) de Raise3D et la deuxième partie manuellement avec le system de tranchage IdeaMaker, pour déterminer les températures idéales d'extrusion.

### II.2 Principe de travail

La calibration de la température se fait en testant différentes températures d'extrusion pour le même filament en maintenant toutes les autres conditions et paramètres constants. Ensuite, une étude est réalisée sur les résultats d'impression en analysant des défauts courants liés à une mauvaise température d'impression. Ces instances de cas sont les suivants :

- Trop brillante
- Trop matte
- Affaissement des couches
- Apparition des structures filamenteuses «stringing»

### II.3 Méthodologie

Il existe deux méthodes pour la calibration de la température :

- La première méthode consiste à imprimer le même modèle à différentes températures et à comparer les résultats. Ces modèles ont une géométrie complexe avec beaucoup de vide. Cette méthode nécessite l'impression de plusieurs modèles, ce qui prend beaucoup de temps car l'impression 3D est généralement lente. En plus, ça coûte car elle consomme une grande quantité de filament.
- La deuxième méthode, qui est la plus courante, consiste à utiliser un modèle appelé «temperature tower» (tour de température). Il s'agit d'un modèle en forme de tour avec plusieurs niveaux. Chaque niveau a une température différente de l'autre et contient des formes pointues avec des écarts entre les niveaux.

Faire varier la température pendant la même impression et pour le même modèle peut être fait manuellement en utilisant un système de tranchage ou une application de calibration comme l'itérateur de profil «Profile Iterator» de Raise3D.

### II.4 Calibration utilisant l'itérateur de profil Profile Iterator

Pour commencer la calibration avec Profile Iterator nous devons d'abord avoir un profil initial que nous pouvons obtenir de IdeaMaker ou en le créant à l'aide de l'itérateur de profil lui-même. Après ça, le programme va utiliser les paramètres dans ce profil et les données qui ont été entrées (températures à tester) pour générer le Code-G. Lorsque l'impression est terminée, Profile Iterator nous aidera à analyser le modèle imprimé pour déterminer la température appropriée, puis créera un nouveau profil à télécharger avec cette température spécifique.

#### II.4.1 Test 1 200°C à 260°C

On commence le processus en ouvrant la page web <https://www.Ideamaker.io/iterator-home.html> et on télécharge les modèles de test en cliquant sur «Download All Test Models» tel qu'indiqué par le rectangle rouge sur la figure II-1.

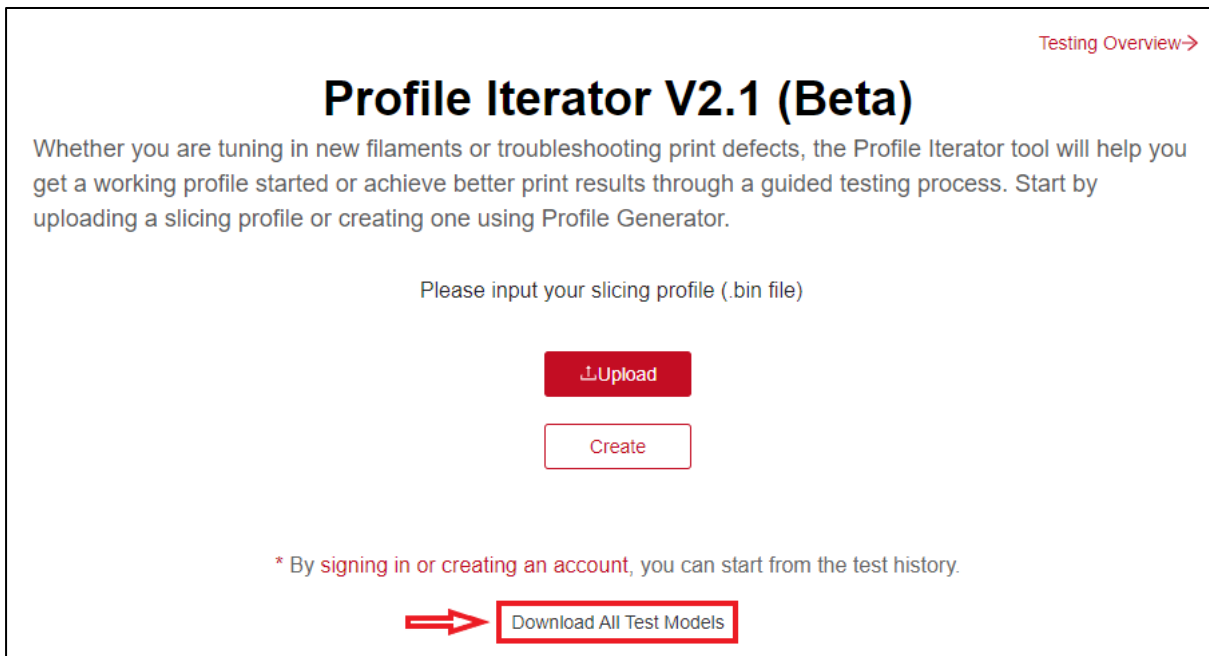
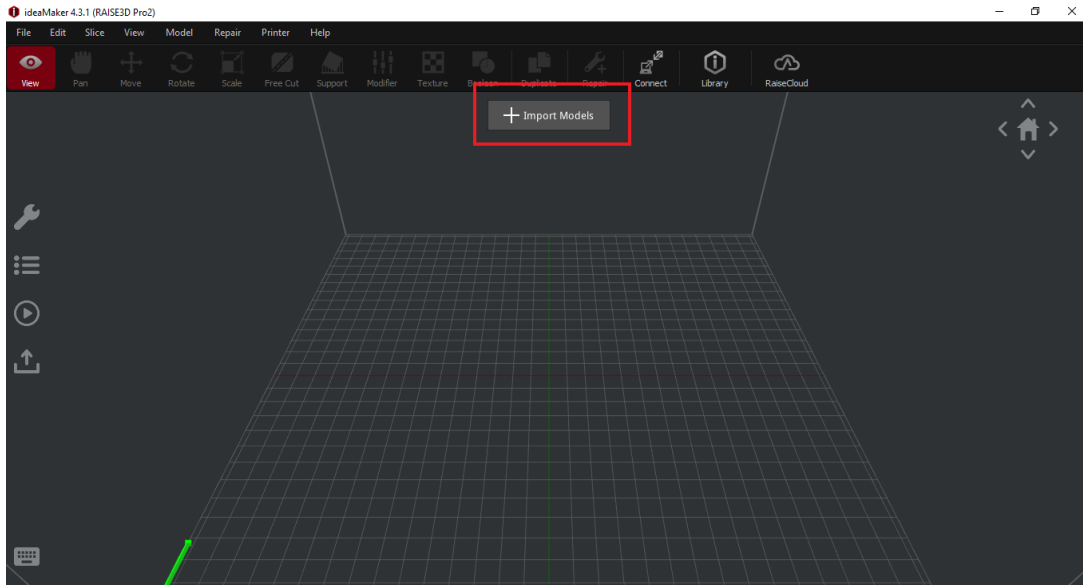


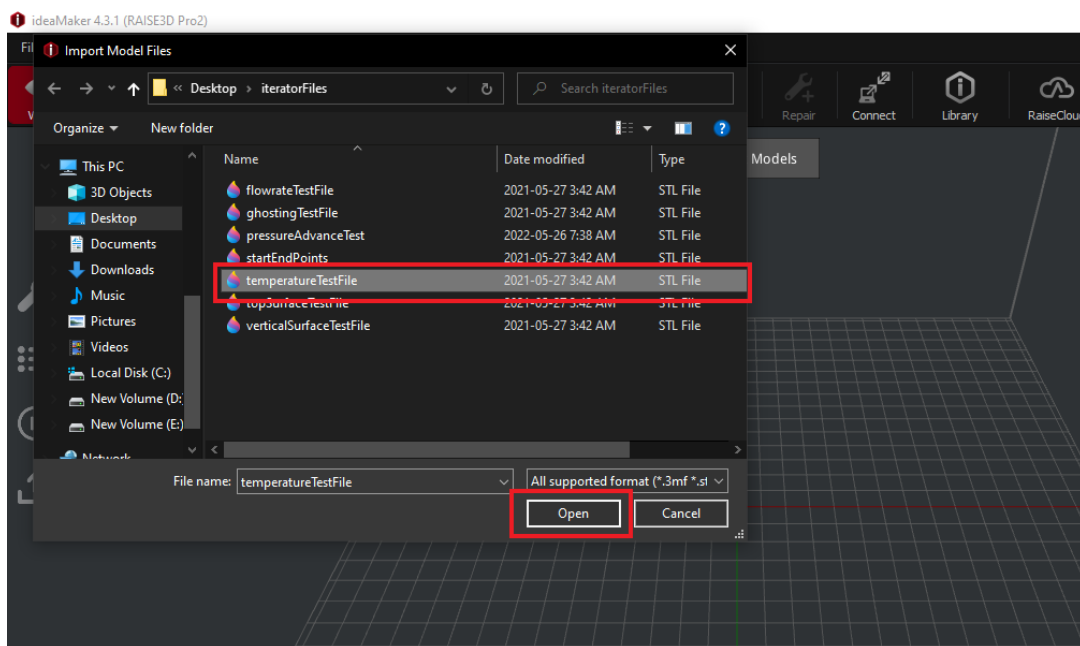
Figure II-1 Ecran de téléchargement des fichiers des modèles STL

Après avoir téléchargé les fichiers STL, on ouvre IdeaMaker et on clique sur «Import models» (voir Figure II-2)



**Figure II-2 Importation du modèle STL**

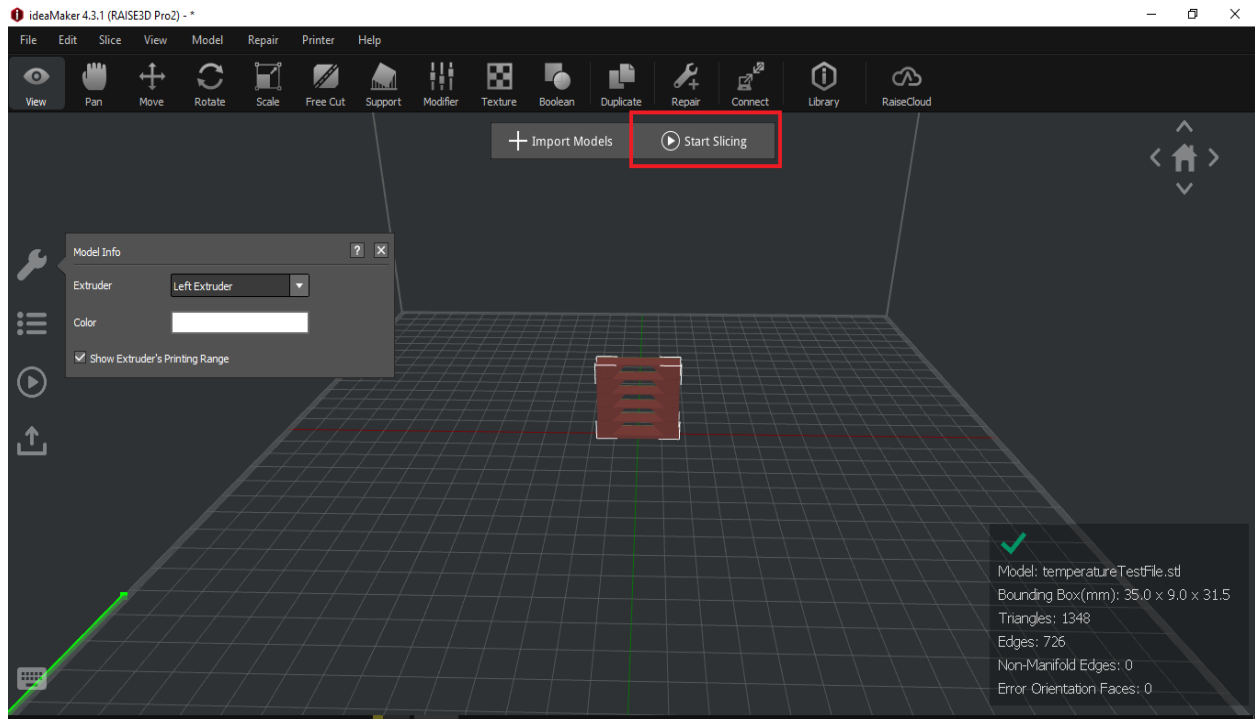
La fenêtre «Import model files» s'ouvrira, on sélectionne le fichier de test de température et on clique sur «Open» (voir Figure II-3).



**Figure II-3 Choix du fichier STL**

## CHAPITRE II

Le modèle STL apparaît dans le «Workspace», ensuite on clique sur «Start Slicing» pour lancer le tranchage (voir Figure II-4 ).



**Figure II-4 Lancement de tranchage**

**Remarque importante :** Après avoir examiné et effectué plusieurs tests, nous avons constaté que le Profile Iterator conserve ses fichiers STL online et que le Code-G qu'il crée est déjà conçu pour ses modèles. Cela signifie que le fichier STL importé n'est pas important. Mais, étant donné que le système de tranchage nécessite un modèle pour ouvrir la fenêtre des profils, nous devons suivre les étapes précédentes. Nous avons également remarqué que les paramètres sélectionnés avant le tranchage comme l'extrudeur à utiliser, ne sont pas transmis au Profile Iterator et n'affectent pas l'impression finale. Par exemple lors de nos essais on a voulu utiliser le deuxième extrudeur pour changer la couleur du filament utilisé mais on pas peut car Profile Iterator utilise uniquement le premier extrudeur par défaut.

## CHAPITRE II

La fenêtre « select template» apparait et permet de choisir le type d'imprimante, le filament et le profil à utiliser. Dans notre cas, on sélectionne "RAISE3D PRO2" pour l'imprimante avec le filament "PLA 1.75mm". Puisque on effectue de nombreux tests et que les modèles imprimés ne sont pas destinés à une utilisation finale mais uniquement à des tests (la qualité n'est pas importante mais le temps l'est) on a choisi le profil «Speed - Pro2 - PLA». Ce profil favorise la vitesse par rapport à la qualité.

Comme le montre la figure II-5, après avoir sélectionné notre profil nous cliquons sur "Exporter".

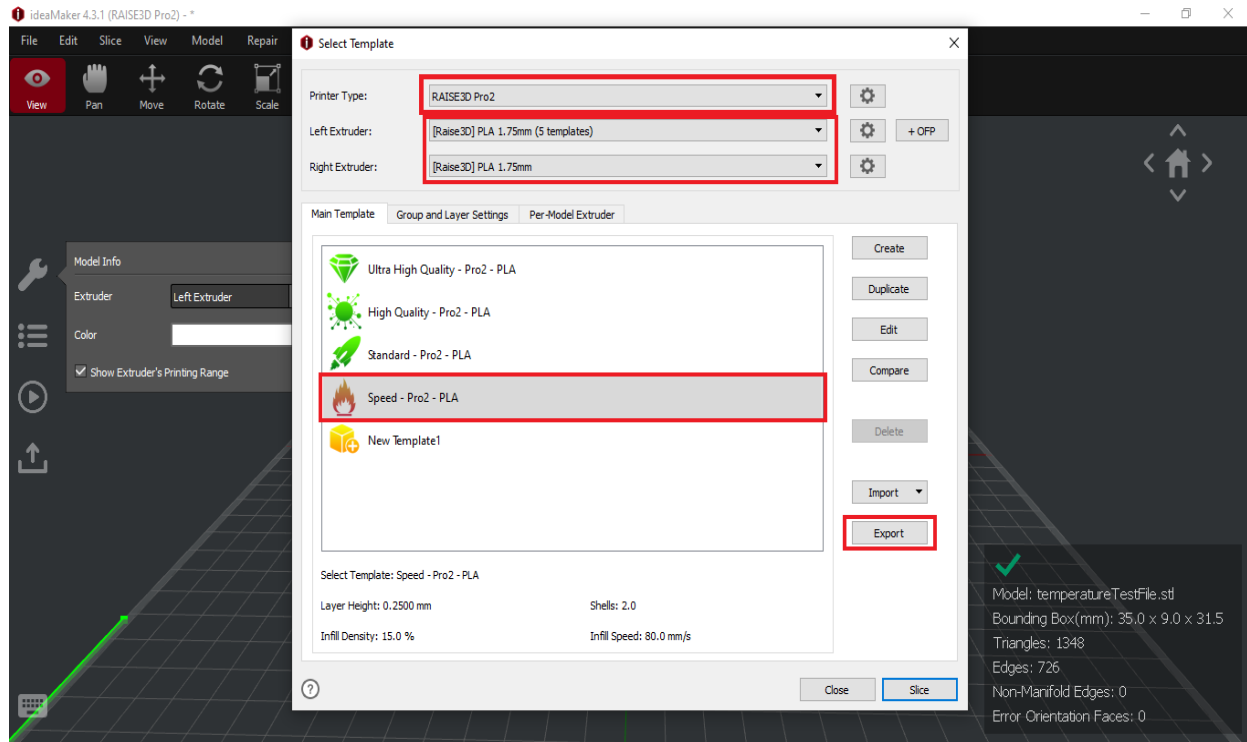


Figure II-5 Choix du profil d'impression

La fenêtre "Export Speed - Pro2 - PLA-export.bin" apparaît, nous sélectionnons où mettre le fichier (.bin) qui représente les informations concernant le profil de test et cliquons sur «Save» pour enregistrer le fichier comme le montre la figure II-6.

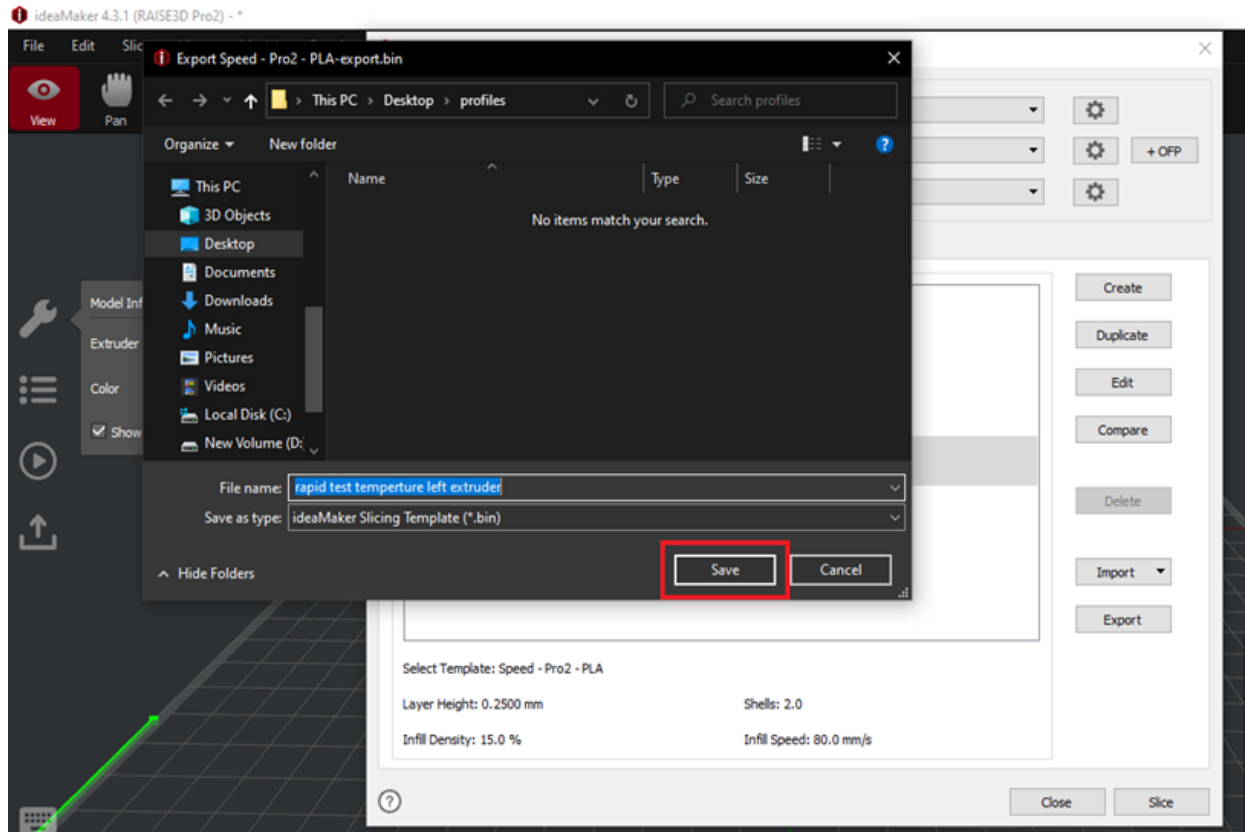
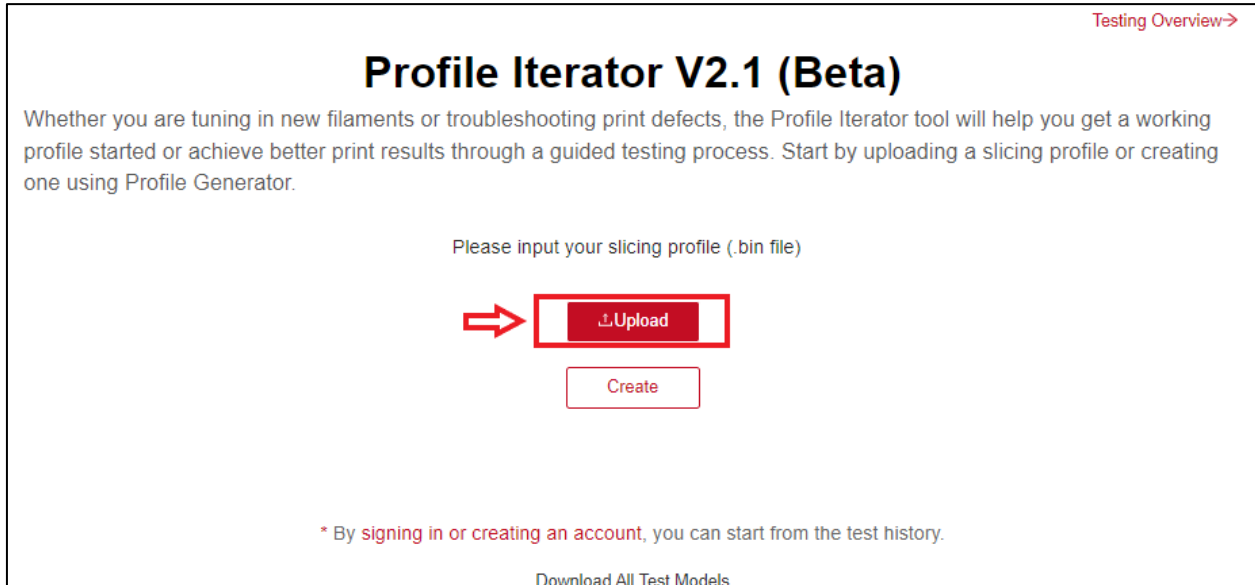


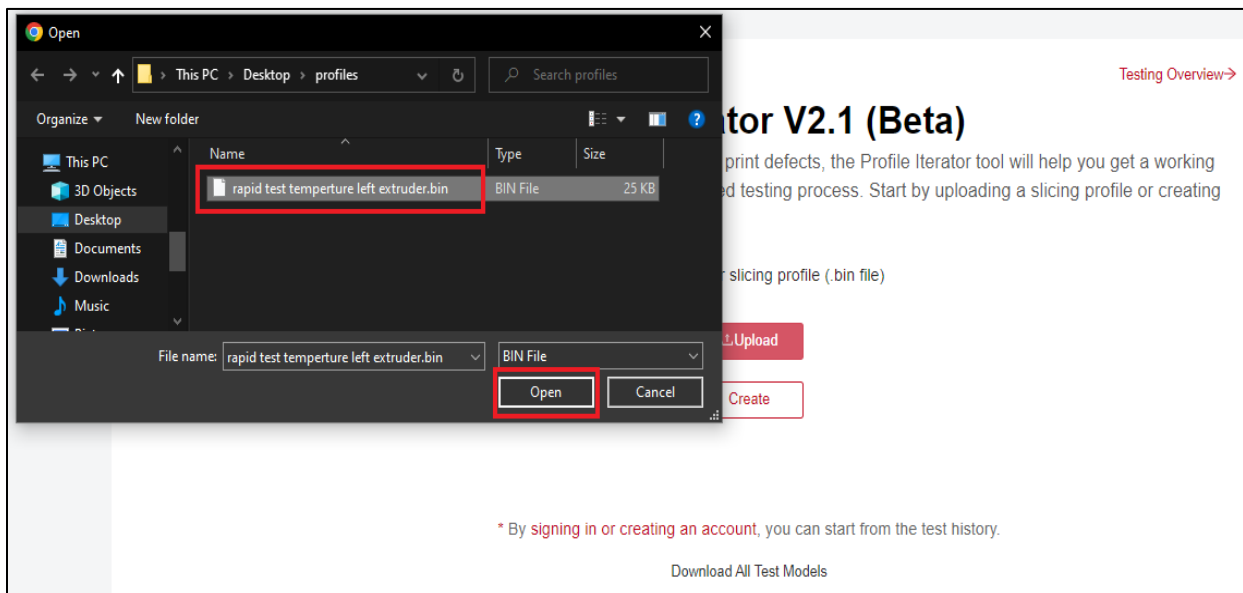
Figure II-6 Enregistrement du fichier profil (.bin)

Ensuite, nous ouvrons l'application web à distance du Profile Iterator et cliquons sur «Upload» pour charger le fichier «rapid test temperture left extruder.bin» dans la plateforme Raise3D (voir Figure II-7).



**Figure II-7 Chargement du profil vers «Profile Iterator»**

Nous naviguons jusqu'à notre fichier de profil (.bin) comme le montre la figure II-8, le sélectionnons et cliquons sur «Open».



**Figure II-8 Sectionnement de fichier .bin**

L'étape suivante nous propose plusieurs calibrations à choisir comme apparaît dans la figure II-9. Nous sélectionnons le test de température et cliquons sur « Start »

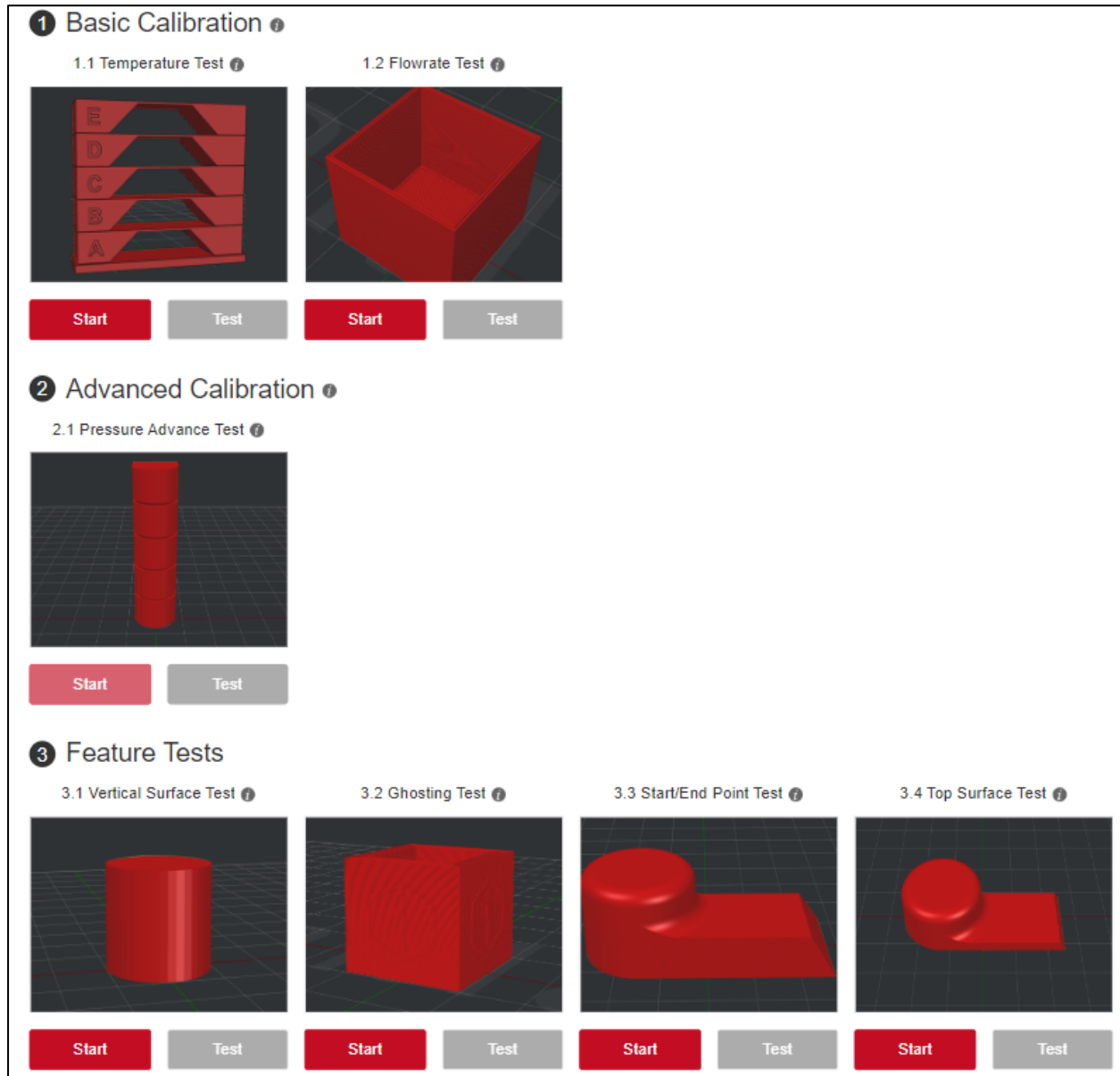


Figure II-9 Choix de type de calibration

Ensuite, Profile Iterator permet de changer d'autres paramètres tels que la marque du filament et de modifier la résolution d'impression ou la hauteur de couche. Nous conservons les paramètres prédéfini de profil «Speed PLA» et cliquons sur «Next».(voir la Figure II-10)

**Filament Temperature Test**

Confirm the settings for your printer and slicing profile. Continue to start this test. In this test, you will be printing a temperature tower model with sections labeled for printing at different temperatures.

- \* Printer Model: RAISE3D Pro2
- Filament Brand: Raise3D
- \* Filament Type: PLA 1.75mm
- \* Nozzle Size: 0.4mm
- \* Print Resolution: [Speed] 0.25mm layer height

Next

**Figure II-10 Confirmation des paramètres d'impression**

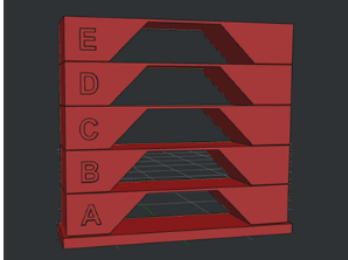
L'étape suivante est la plus importante car c'est là que nous sélectionnons nos températures. Le Profile Iterator ne nous permet pas de choisir la température pour chaque niveau, mais nous donne la possibilité de sélectionner la température de base et l'intervalle entre chaque niveau.

Pour ce test, nous avons choisi de commencer à 200°C avec un intervalle de 15°C entre les niveaux. Nous pouvons également modifier la vitesse d'extrusion, la densité de remplissage, la température du plateau et le refroidissement de la pièce. Nous avons choisi de conserver ces paramètres identiques au profil «Speed» par défaut.

Après avoir sélectionné nos paramètres, nous cliquons sur «Next» comme illustré dans la Figure II-11

### Filament Temperature Test

To set up the test print, define the temperature range to test for the filament. We recommend starting with the filament manufacturer recommended values.



Enter the minimum value for the temperature range.

PLA 1.75mm

Temperature Range(°C)  ~  Interval(°C)

[How to find temperature range?](#)

| A      | B      | C      | D      | E      |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 260 °C | 245 °C | 230 °C | 215 °C | 200 °C |

Infill Density (%)

Bed Temperature (°C)

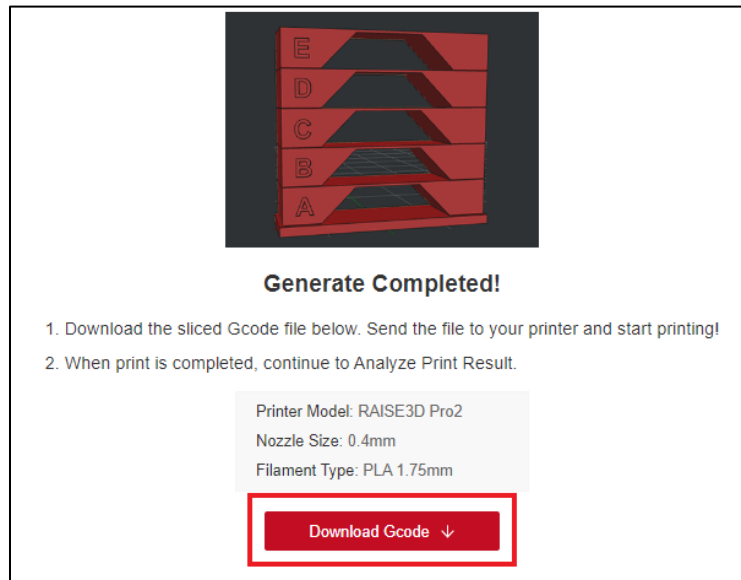
Filament Flowrate (%)

Part Cooling (%)

Next

**Figure II-11 Sélection des températures pour test 1**

Finalement après traitement, Profil Iterator nous donne le Code-G a télécharger pour l'imprimante avec un diamètre du buse de 0.4mm et le filament PLA 1.75mm. Nous cliquons sur «Download Gcode» comme le montre la figure II-12 pour télécharger le fichier Code-G.



**Figure II-12 Téléchargement de Code-G**

On copie le fichier (.gcode) nommé «tempertureTestFile.gcode» sur une clé USB, puis on l'insère dans la machine d'impression 3D comme apparait dans la figure II-13.



**Figure II-13 Insertion de clé USB**

On accède à notre fichier (.gcode) via l'écran d'interface de la machine et on clique sur "Imprimer".  
et la machine commencera l'impression (voir Figure II-14).



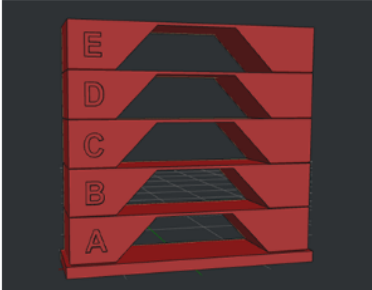
**Figure II-14 Impression du model**

## II.4.2 Test 2 145°C à 205°C

Le processus reste le même, à l'exception de cette étape où on entre différentes températures. On a choisi une température de base de 145°C et un intervalle de 15°C comme le montre la figure II-15.

### Filament Temperature Test

To set up the test print, define the temperature range to test for the filament. We recommend starting with the filament manufacturer recommended values.



Enter the minimum value for the temperature range.

PLA 1.75mm

Temperature Range(°C)  ~  Interval(°C)

How to find temperature range?

| A      | B      | C      | D      | E      |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 205 °C | 190 °C | 175 °C | 160 °C | 145 °C |

Infill Density (%)

Bed Temperature (°C)

Filament Flowrate (%)

Part Cooling (%)

Next

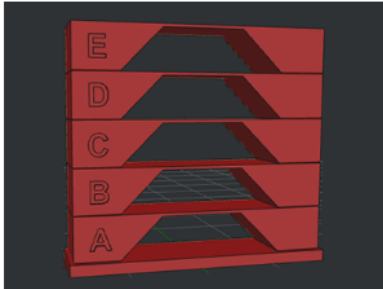
Figure II-15 Sélection des températures pour test 2

### II.4.3 Test 3 195°C à 215°C

Pour ce test, on a choisi des températures recommandées pour le filament PLA (190°C - 235°C) avec un petit intervalle de 5°C, comme indiqué dans la figure II-16.

### Filament Temperature Test

To set up the test print, define the temperature range to test for the filament. We recommend starting with the filament manufacturer recommended values.



Enter the minimum value for the temperature range.

PLA 1.75mm

Temperature Range(°C)  ~  Interval(°C)

How to find temperature range?

| A      | B      | C      | D      | E      |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 215 °C | 210 °C | 205 °C | 200 °C | 195 °C |

Infill Density (%)

Bed Temperature (°C)

Filament Flowrate (%)

Part Cooling (%)

Next

Figure II-16 Sélection des températures pour test 3

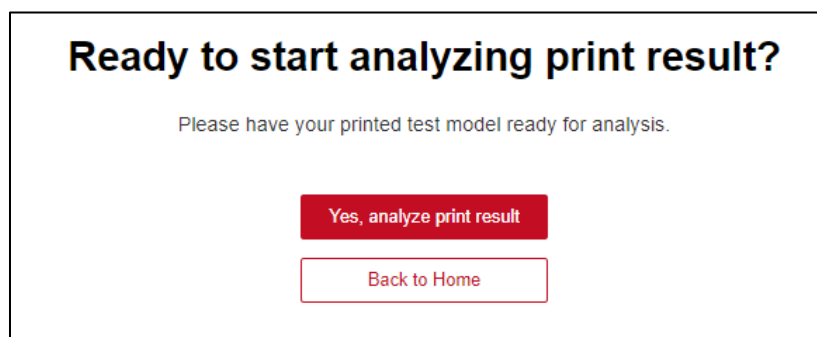
### II.5 Résultat d'impressions et analyse

Étant donné que l'analyse sera effectuée visuellement, il est important de pouvoir voir les modèles imprimés avec un grand niveau de détail. Pour cela, nous avons utilisé un appareil photo DSLR avec un objectif qui permet la photographie macro. L'appareil utilisé est le Canon EOS 1100D, comme indiqué dans la figure II-17.



**Figure II-17 Appareil photo utilisé**

Après avoir imprimé les modèles, nous pouvons passer à la section d'analyse du Profile Iterator en cliquant sur «yes, analyze print results» (voir Figure II-18)

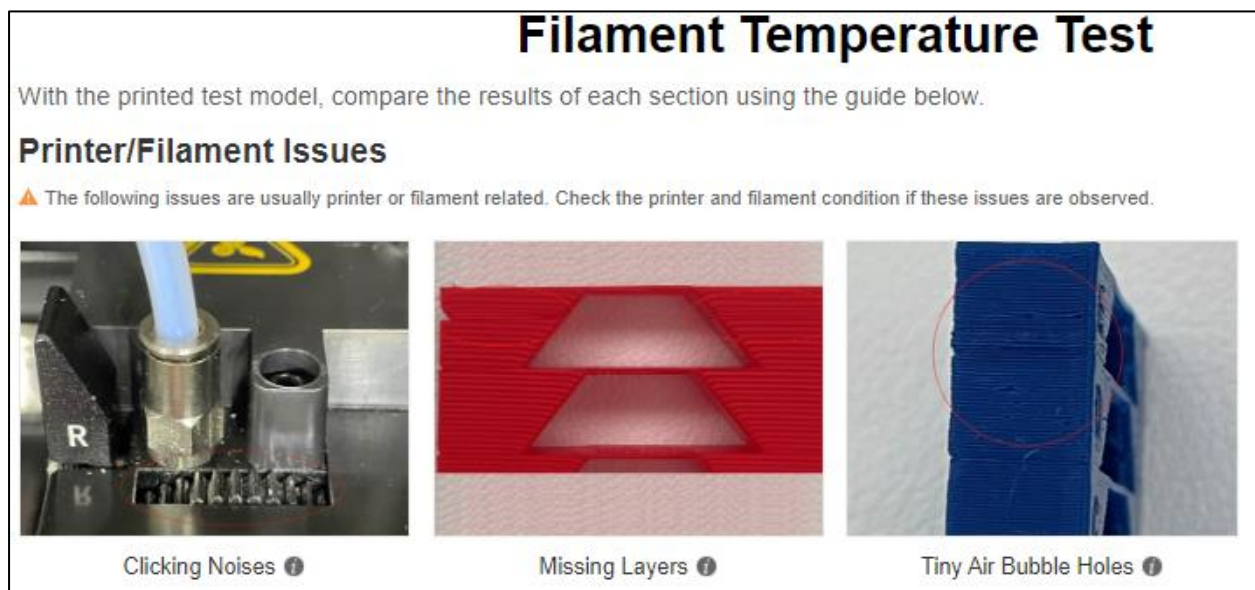


**Figure II-18 Lancement d'analyse**

La première partie de l'analyse «Printer/Filament issues» comme indiqué dans la figure II-19, nous sommes invités à vérifier si l'imprimante ou le filament présente des problèmes. Cela se fait en vérifiant si l'un des problèmes suivants est observé :

- Bruits de clics
- Couches manquantes
- Petits trous de bulles d'air

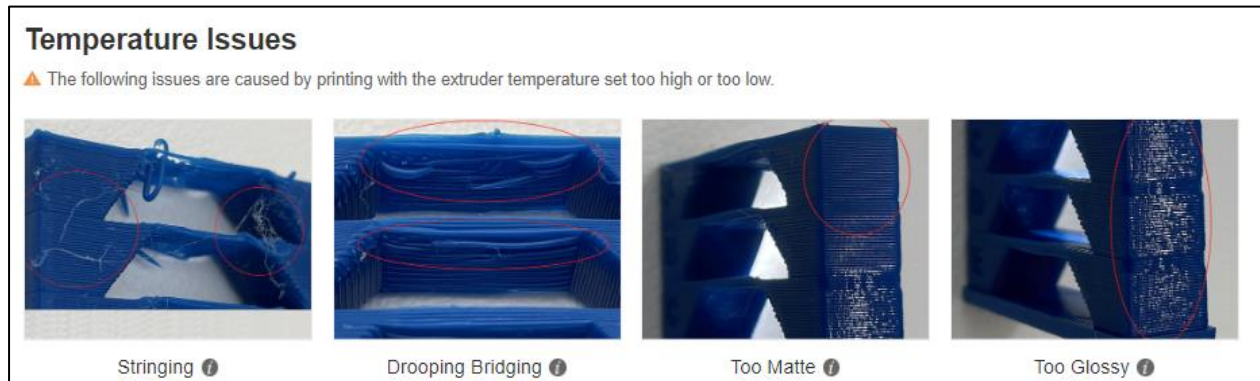
Nous n'avons pas remarqué de problèmes liés à l'imprimante pendant l'impression.



**Figure II-19 Analyse des problèmes de filament/imprimante**

Dans la deuxième partie intitulée «Temperture Issues» comme indiqué dans la figure II-20, Profile Iterator nous demande de vérifier les problèmes suivants pour les différents niveaux de températures :

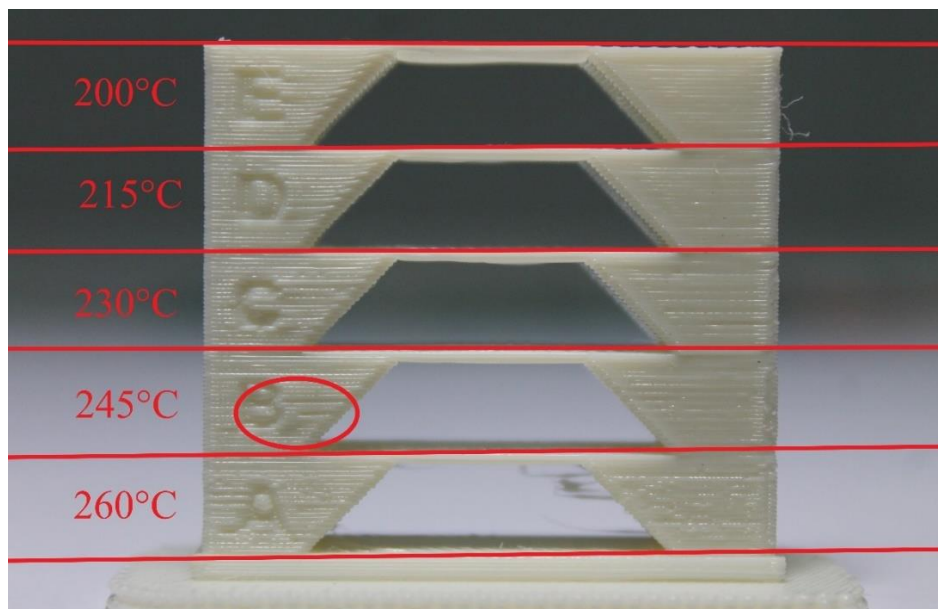
- Trop brillante «too glossy»
- Trop matte « too mate»
- Affaissement «bridging»
- Apparition de structures filamenteuses «stringing»



**Figure II-20 Analyse des problèmes de température**

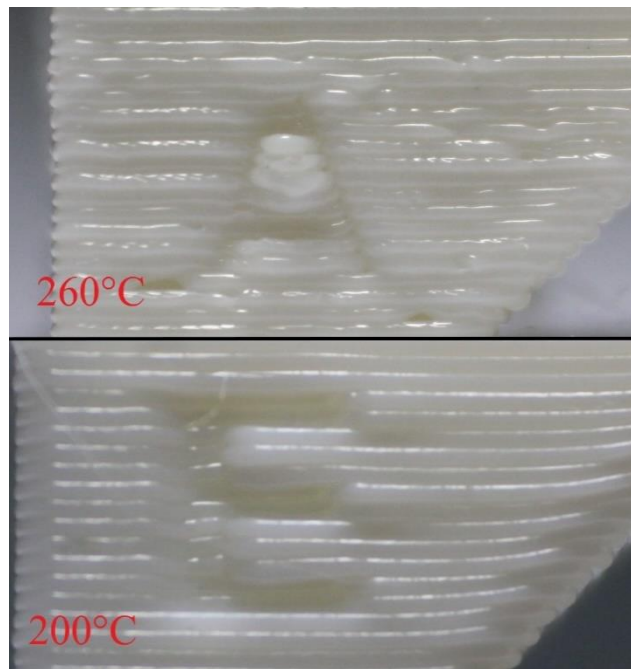
### II.5.1 Analyse des résultats de Test 1 200°C à 260°C

Dans notre premier test, où l'on fait varier la température de 200°C à 260°C, on constate une nette dégradation de la qualité après avoir augmenté la température au-dessus de 230°C comme les quelques couches extérieure manquantes dans la section B de 245°C comme indiqué dans la figure II-21.



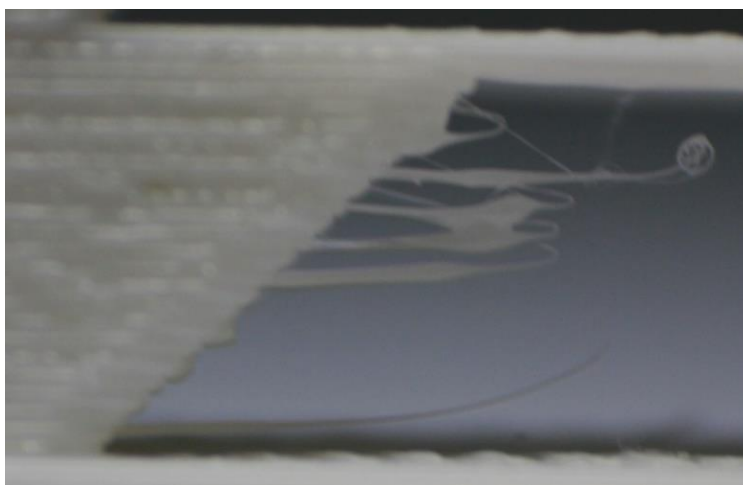
**Figure II-21 Températures des sections de la tour imprimée**

On remarque également que la section A de 260°C est trop brillante «too glossy» et les couches sont déformées et non uniformes par rapport à la section E de 200°C comme le montre la figure II-22.



**Figure II-22 Zoom des sections A et E**

En plus, des structures filamenteuses «stringing» apparaissent dans la section A de 260°C comme la montre la figure II-23.



**Figure II-23 Structures filamenteuse «stringing» de section A**

### II.5.2 Analyse des résultats de Test 2 – 145°C à 205°C

Dans notre deuxième test, nous avons varié la température de 205°C à 145°C, où nous remarquerons de nombreuses structures filamenteuses «stringing» lors de l'impression à 160°C, en plus, la section E de 145°C est complètement absente car l'imprimante a cessé d'extruder (voir Figure II-24). Cela est dû au fait que 145°C est bien inférieur à la température de fusion du PLA.

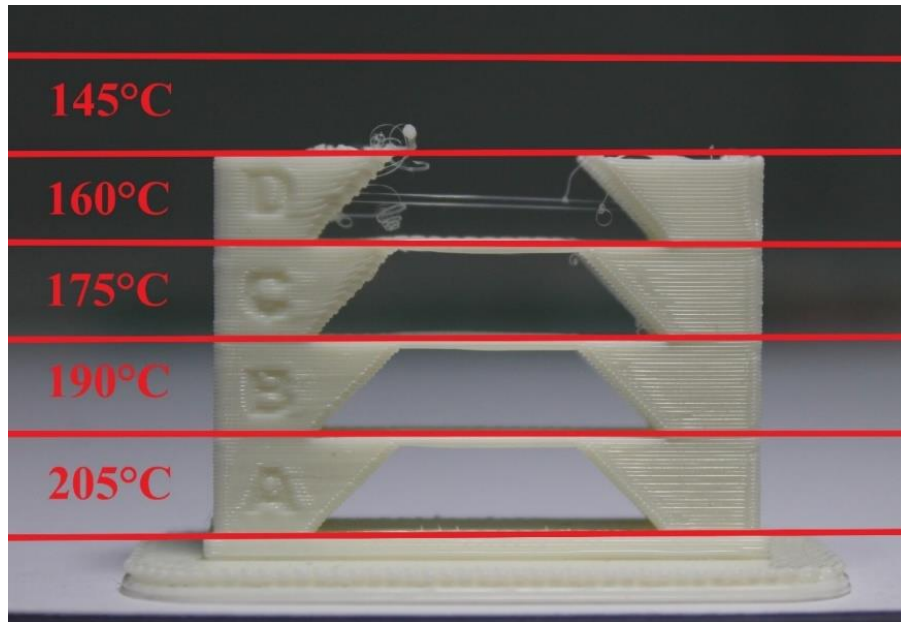
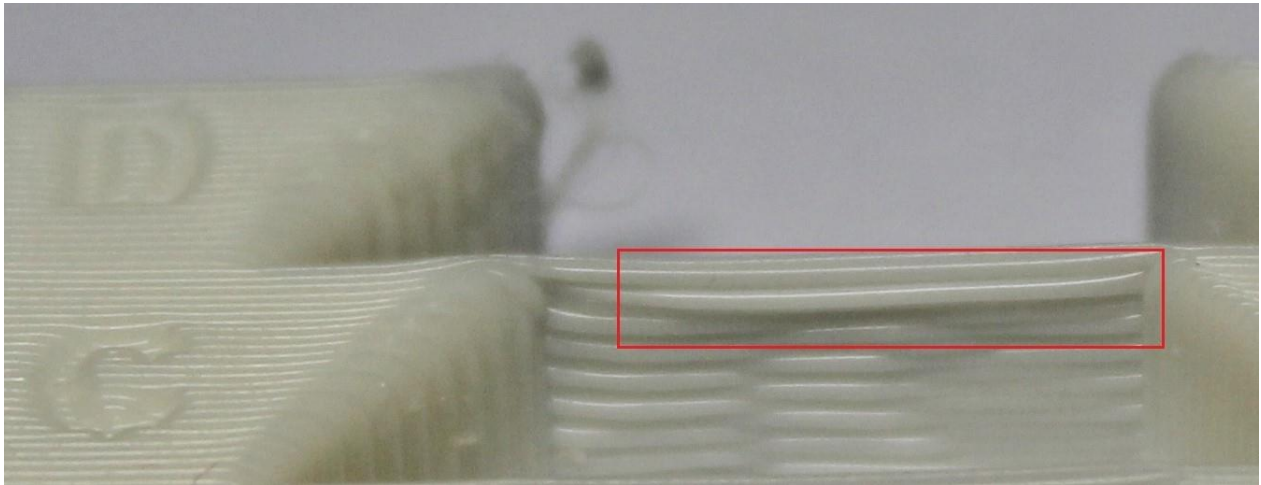


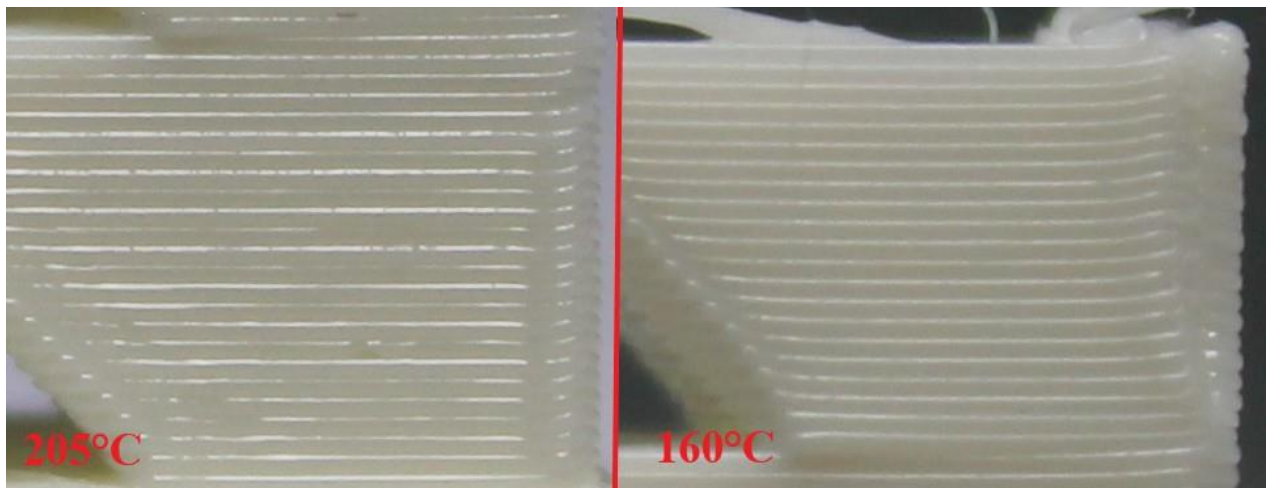
Figure II-24 Températures des sections de la tour imprimée

On peut aussi observer un affaissement dans la section C de 175°C comme c'est indiqué dans la figure II-25.



**Figure II-25** Affaissement «bridging»

Nous remarquons également que la section C de 160°C est trop mate par rapport à la section A où nous avons imprimé à une température de 205°C. La différence est montrée dans la figure II-26.



**Figure II-26** Différence entre 205°C et 160°C

### II.5.3 Analyse des résultats de Test 3 195°C to 215°C

Dans ce test, nous avons imprimé dans l'intervalle des températures recommandée par le fabricant du filament, et nous observons qu'il n'y a moins voir aucun défaut par rapport des test 1 est 2 (voir Figure II-27). De plus, les couches sont uniformes et homogènes comme montre la figure II-28.



Figure II-27 Températures des sections de la tour imprimée

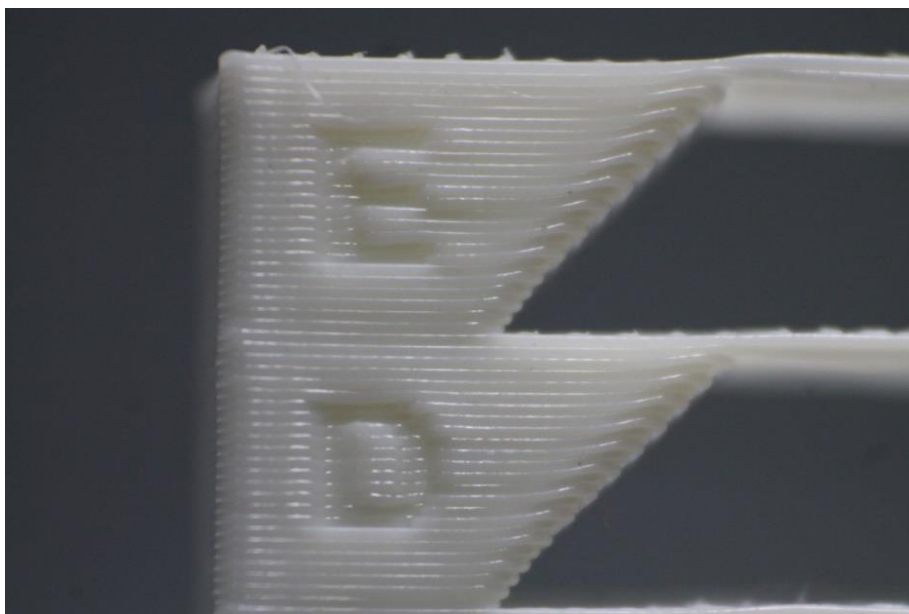


Figure II-28 Zoom des section E et D

### II.6 Calibration manuelle utilisant le système de tranchage IdeaMaker

Dans cette méthode, nous utiliserons un modèle STL d'une tour de température avec 10 niveaux et des détails complexes tels que des bords pointus et des espaces dans la structure mettant en évidence les défauts causés par une température d'extrusion inappropriée. Ensuite, on définit manuellement différentes températures pour différentes sections (niveaux) à l'aide de la fonction de simulation de IdeaMaker et des paramètres de profil.

#### II.6.1 Étapes de la calibration manuelle

On commence par importer le modèle STL «Temperature\_Tower.stl» à IdeaMaker et le modèle s'affichera dans Workspace (voir Figure II-29).

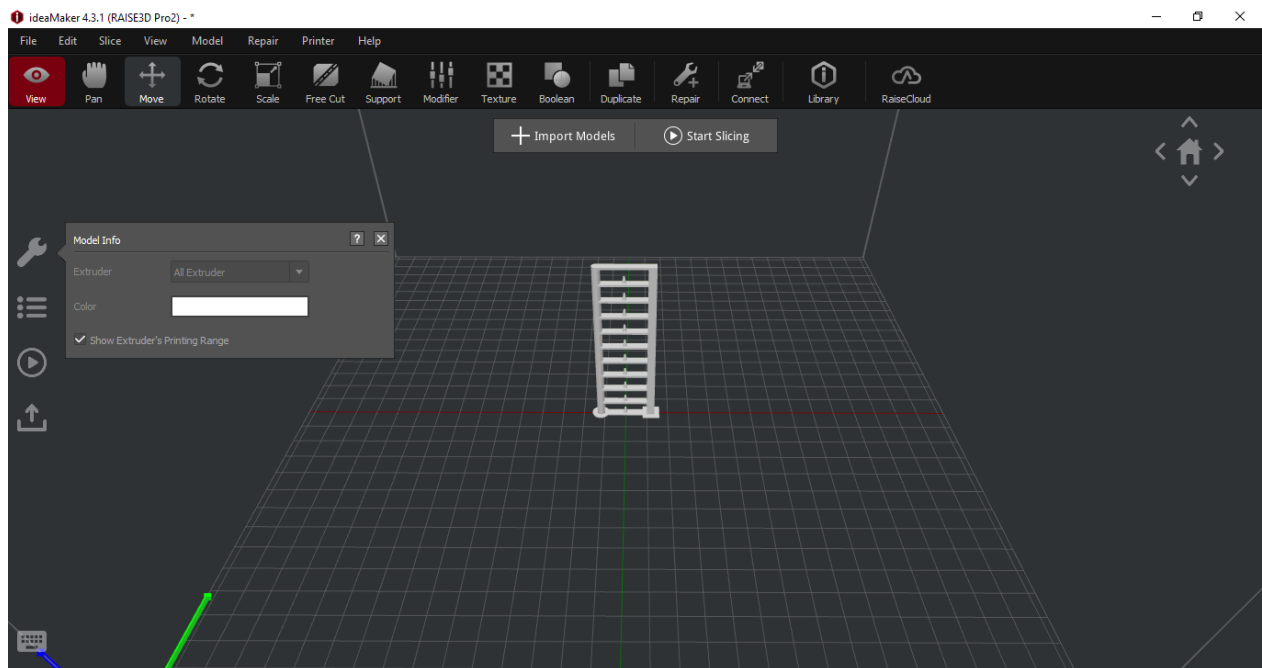


Figure II-29 Affichage de model STL

## CHAPITRE II

Le modèle original n'est pas assez grand pour notre test et surtout pour la hauteur de couche que nous allons utiliser, donc on augmente la taille du modèle en changeant l'échelle de 100% (1) vers 160% (1.6). On fait ça en sélectionnant le model et cliquant sur «scale», la fenêtre de dimension apparaît, on saisit «160» et on valide en s'assurant que la mise à l'échelle est uniforme comme le montre la figure II-30 pour ne pas déformer le modèle.

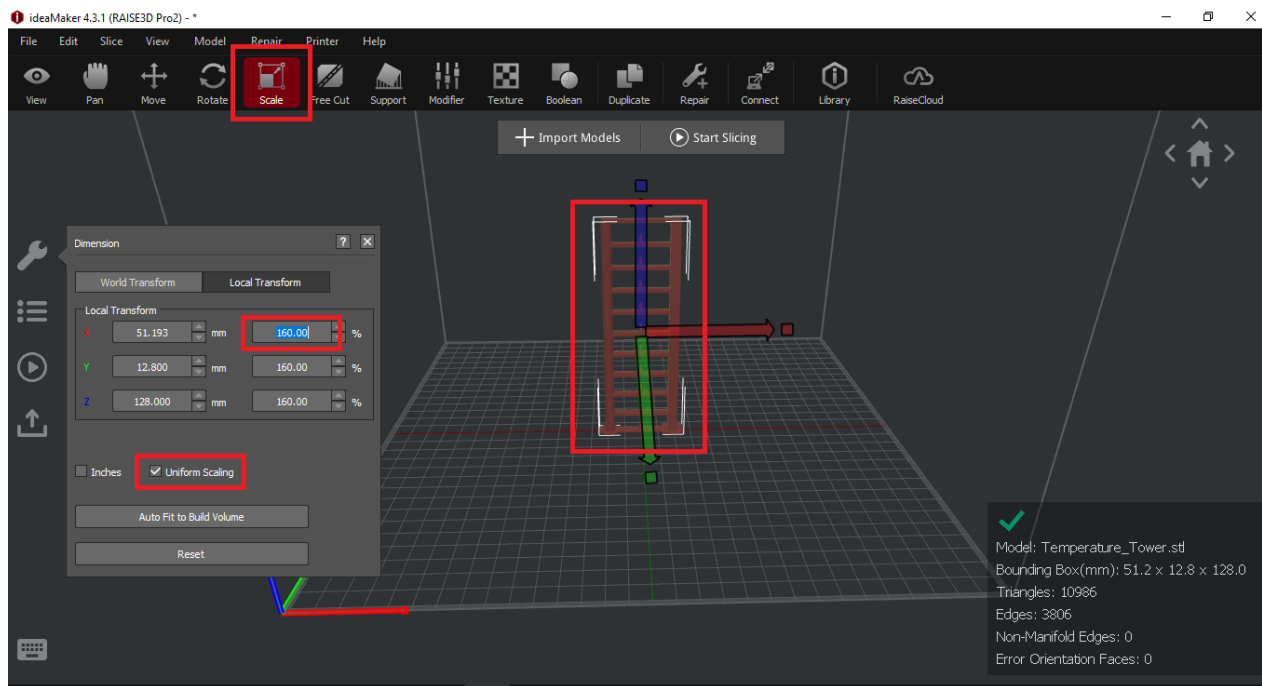
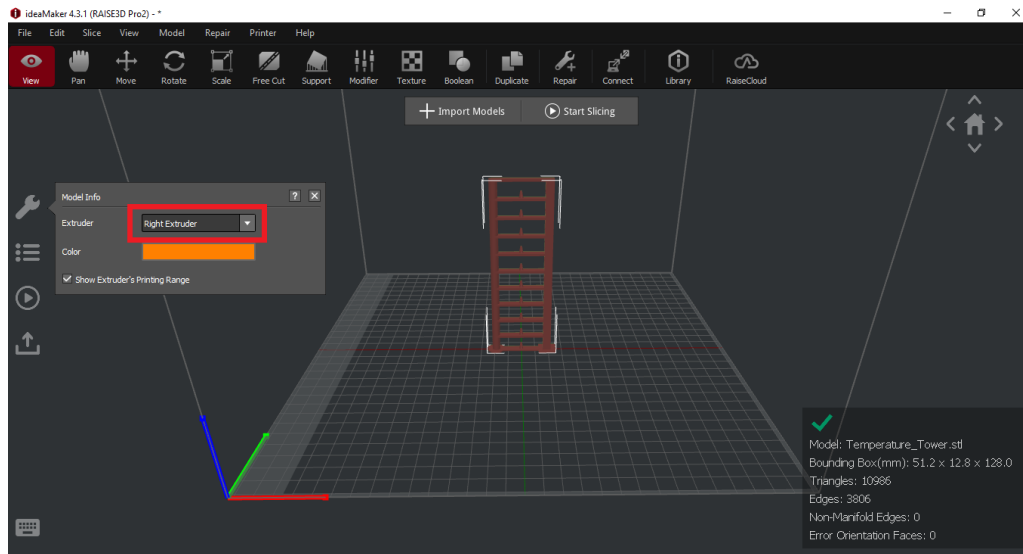


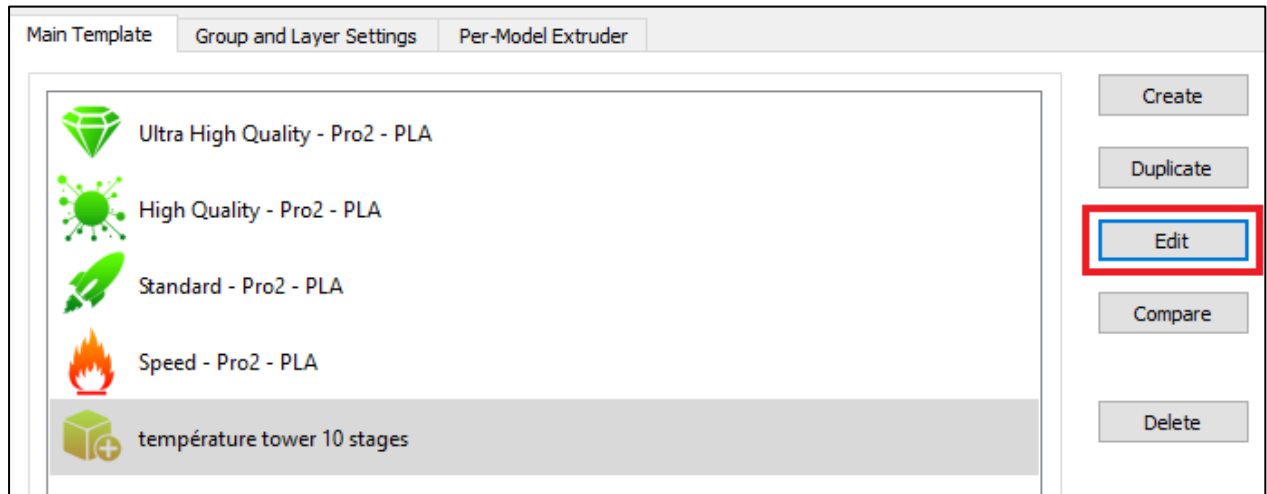
Figure II-30 Modification de la taille de modèle

La couleur rouge permet une meilleure visibilité des détails que le blanc, alors on change l'extrudeur pour changer la couleur puisque l'extrudeur 2 utilise un filament rouge. Le changement de l'extrudeur est effectué par la fenêtre «Model info» situé à gauche (voir Figure II-31) et nous changeons l'option «extruder» de "Left extruder" à "Right extruder".



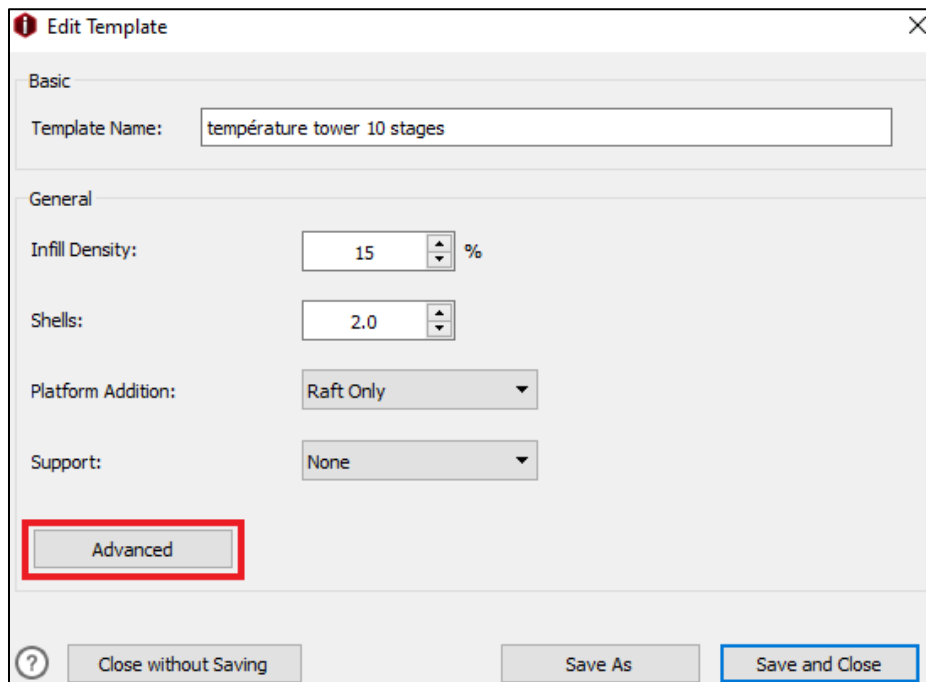
**Figure II-31** Changement de l'extrudeur

Ensuite, nous commençons le tranchage en cliquant sur «Start Slicing», et la fenêtre «Select Template» s'ouvre (voir Figure II-32). Ici, nous n'utiliserons pas le profil «Speed PLA», à la place, nous le dupliquerons pour conserver ses paramètres par défaut original en vue d'une utilisation ultérieure. On fait ça en cliquant sur «duplicate». Le test sera effectué en utilisant le nouveau profil nommé «température tower 10 stages» dupliqué à partir des paramètres de «Speed PLA».



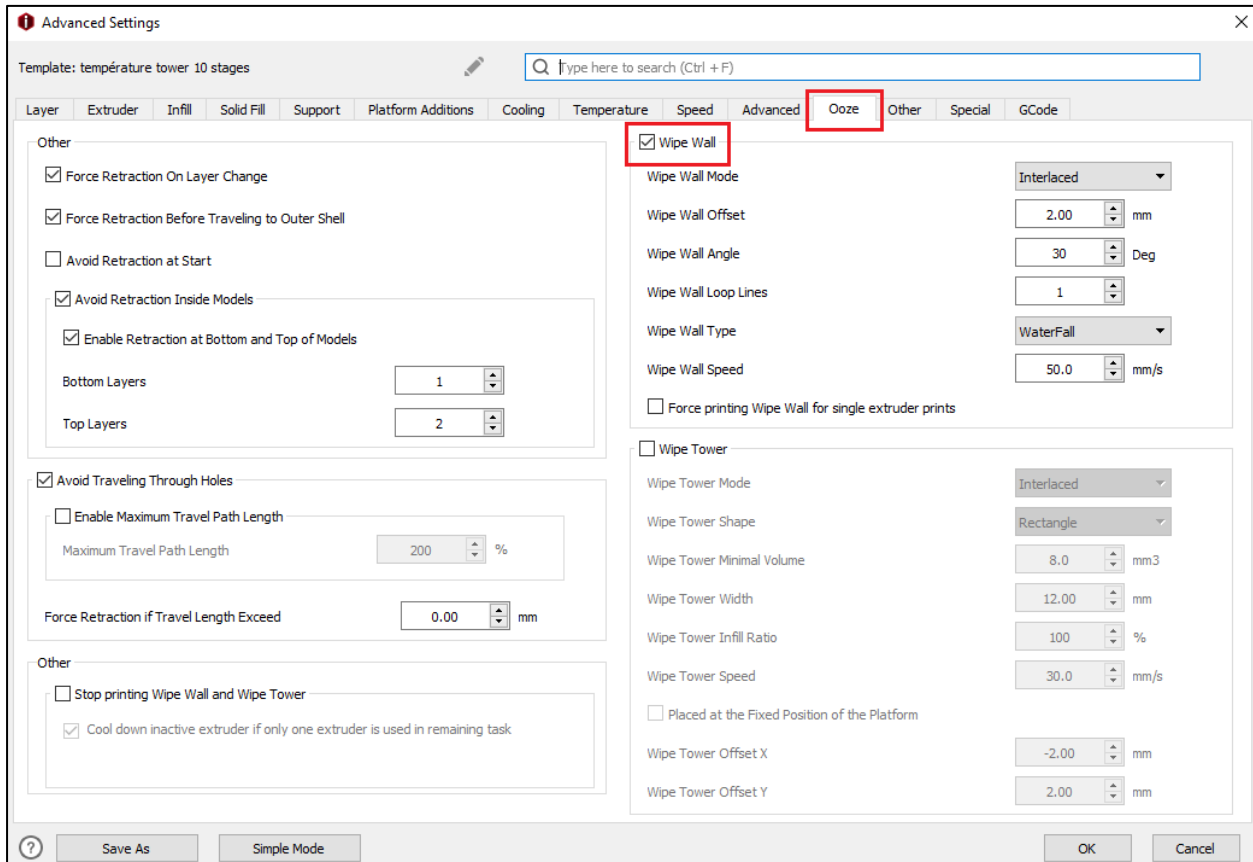
**Figure II-32 Choix du profil à dupliquer**

Ensuite, Nous ouvrons les paramètres avancés du profil en cliquant sur « Edit » puis sur «Advanced» (voir Figure II-33).



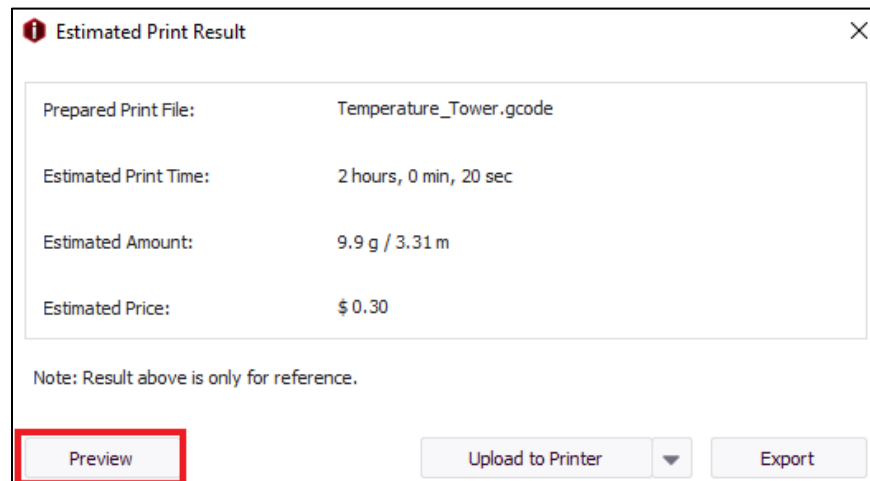
**Figure II-33 Accès aux paramètres avancés**

Une fois que la fenêtre des paramètres avancés s'ouvre, on sélectionne les paramètres de «Ooze» et on désactive «wipe wall». Ce paramètre est activé automatiquement lors de l'utilisation du deuxième extrudeur et crée un mur sur lequel il peut essuyer les restes de matière fondue avant du passage à l'autre extrudeur. Puisque nous n'utiliserons pas deux extrudeurs donc nous le désactivons par en décochant l'option «wipe wall» comme montre la figure II-34.



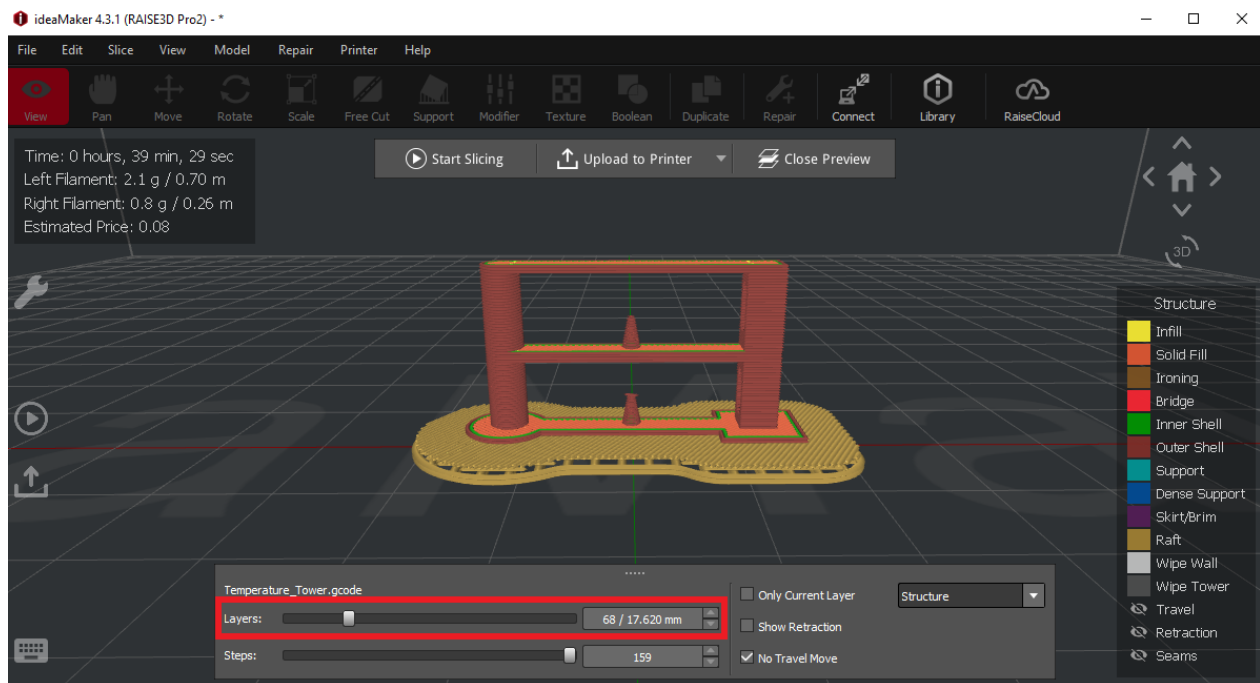
**Figure II-34 Désactivation de la fonction «wipe wall»**

Après ça, on commence le tranchage et on passe à la simulation en cliquant sur «Preview» (voir Figure II-35).



**Figure II-35 Accès à la fonction de simulation de IdeaMaker**

Ensuite, nous déterminerons exactement dans quelle couche le niveau où la section commence. Cela se fait en utilisant le curseur du numéro de couche illustré dans la figure II-36. Puis on observe visuellement dans la simulation le début du niveau et on note le numéro de couche pour l'utilisation dans l'étape suivante.



**Figure II-36 Détermination des nombres de couche**

Nous fermons la simulation et revenons aux paramètres avancés du profil. Nous sélectionnons la section des paramètres de température comme indiqué dans la figure II-37. Dans cette section en cliquant sur l'extrudeur droit, une fenêtre de saisie nous permet d'entrer le numéro de la couche où le niveau commence et la température pour ce niveau. Nous remplissons les données pour ce niveau et nous répétons cette étape pour les 10 niveaux de la tour de température. Une fois terminé, nous cliquons sur OK pour valider.

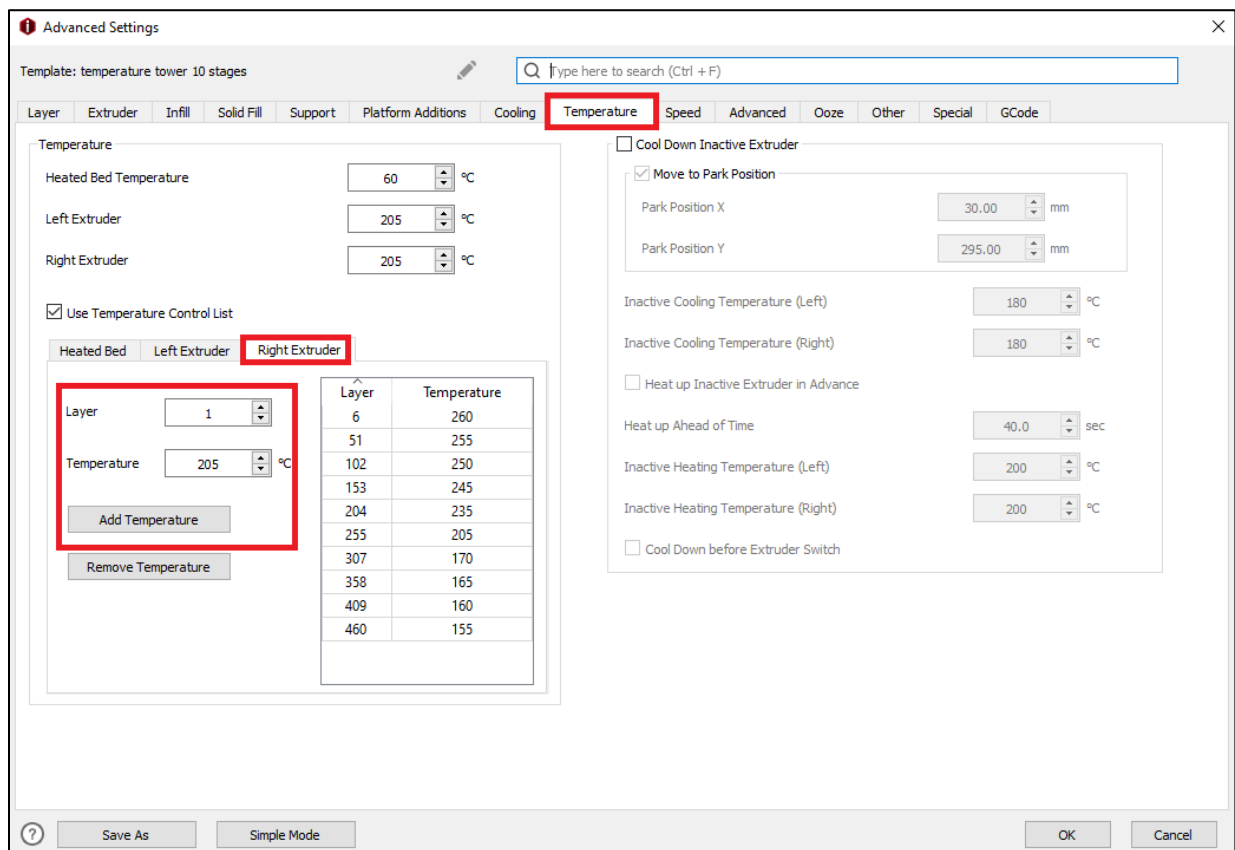


Figure II-37 L'entrée des températures

Ensuite, nous commençons le tranchage et générons le Code-G. Nous exportons le fichier (.gcode) vers une clé USB. Après nous l'insérerons clé dans l'imprimante 3D. A l'aide de l'écran tactile, nous naviguons vers notre fichier et lançons l'impression en cliquant sur « Imprimer » comme le montre la figure II-38.

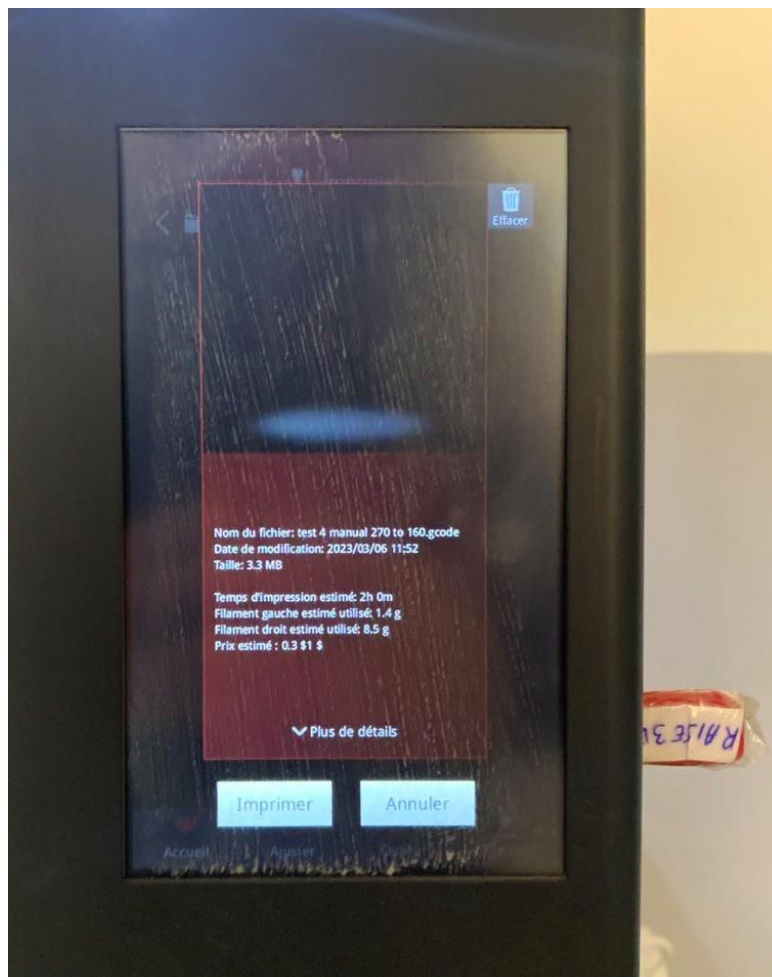


Figure II-38 Écran tactile de machine

### II.6.2 Résultat et analyse du modèle imprimé

Dans ce test, nous avons varié la température de 155°C à 260°C et nous avons remarqué que la qualité diminue progressivement en s'éloignant de 205°C vers 155°C ou 260°C comme le montre la figure II-39.

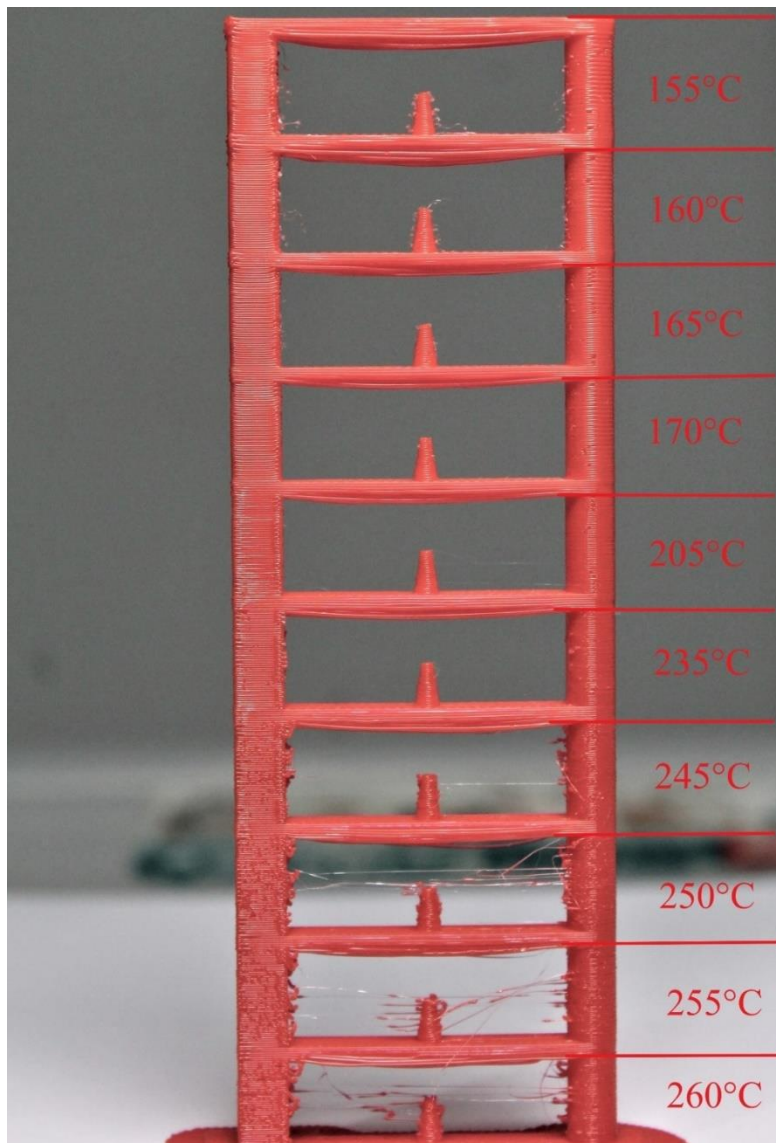
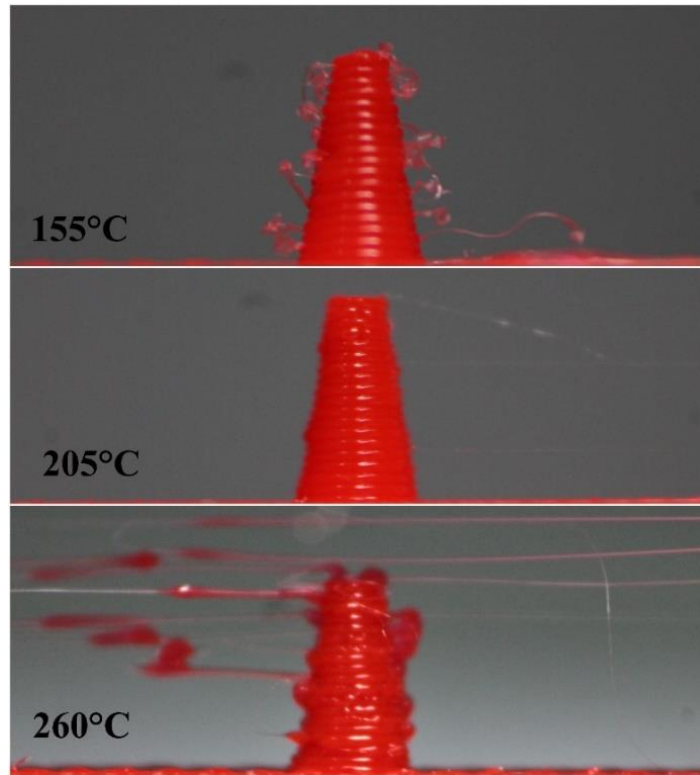


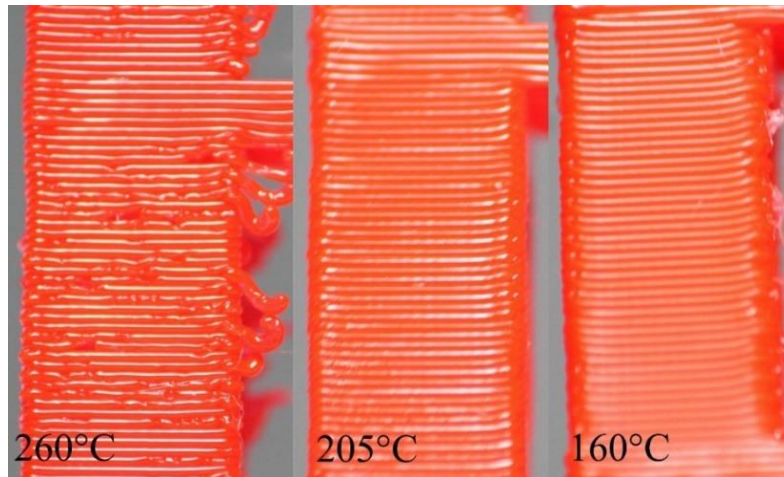
Figure II-39 Model imprimé

Nous avons remarqué l'apparition de structures filamenteuses pour les intervalles de températures de 245°C à 260°C et de 155°C à 165°C. La différence est mise en évidence sur la figure II-40.



**Figure II-40 Structures filamenteuses dans different niveaux**

Nous remarquons également que l'augmentation de la température après 235°C rend les couches plus brillantes et que la diminution de la température en dessous de 170°C la rend plus matte. Comme la montre la figure II-41, cette différence est mieux mise en évidence par rapport à la température normale de 205 °C avec les températures 260°C dans le cas brillant et 160°C dans le cas matte



**Figure II-41 Différence dans la réflexion**

Nous avons remarqué des cas d'affaissement à des températures supérieures à 235°C et inférieures à 170°C. L'effet est plus apparent à des températures élevées qu'à des températures plus basses, comme le montre la figure II-42.



**Figure II-42 Différence dans l'affaissement**

### II.7 Interprétations

En analysant tous les tests de température par les deux méthodes, nous avons déterminé que la température d'extrusion appropriée pour le filament PLA est entre 190°C et 230°C. Nous avons également remarqué que l'application web online Profile Iterator est limité en termes de choix de modèles que nous pouvons utiliser. Aussi, elle ne nous permet pas le choix de l'extrudeur dans le cas d'une imprimante à deux extrudeurs. Donc, elle ne nous permet pas de faire des tests avec le deuxième extrudeur. En plus, Profile Iterator n'est pas flexible pour la sélection des températures à tester à des différents niveaux d'intervalles. Toutefois, il est plus rapide et plus simple que d'utiliser un système de tranchage. A la différence de l'utilisation de Profile Iterator, la méthode de calibration par préparation d'impression manuelle sur IdeaMaker est plus flexible et offre beaucoup de possibilités de modification des paramètres.

### II.8 Conclusions

En conclusion, ce chapitre nous a permis d'étudier et d'examiner les différentes étapes nécessaires pour calibrer la température d'extrusion de l'imprimante Raise3D Pro2 en utilisant l'itérateur de profils "Profile Iterator" et une méthode de préparation d'impression manuelle avec le système de tranchage IdeaMaker. Il nous a également montré les effets d'une température d'extrusion mal calibrée et nous a permis de déterminer les températures idéales pour l'impression avec le filament PLA.

### **Chapitre III Etude de calibration de vitesse d'extrusion utilisant itérateur de profil**

#### **III.1 Introduction**

Dans l'impression 3D, plus précisément sur les machines à extrusion FFF/FDM, la vitesse ou le taux d'extrusion c'est la quantité de filament extrudé exprimée sous forme de pourcentage. Ce pourcentage représente le taux d'extrusion utilisé par rapport au taux d'extrusion par défaut de l'imprimante. Il peut être réglé par le logiciel de l'imprimante 3D ou le système de tranchage.

La vitesse d'extrusion idéale varie légèrement en fonction du type de filament, mais les facteurs les plus importants qui influent sur la vitesse d'extrusion sont la hauteur de couche et la vitesse d'impression. Augmenter le taux d'extrusion permet une impression plus rapide, mais cela peut compromettre la qualité de l'impression.

Dans ce chapitre on va faire une calibration de vitesse d'extrusion de l'imprimante Raise3D Pro2 du laboratoire de recherche IS2M en utilisant l'application web «Profile Iterator» développée par Raise3D. On examinera les étapes du processus et nous analyserons les résultats d'impression.

#### **III.2 Principe de travail**

La vitesse d'extrusion de l'imprimante 3D est considérée comme calibrée lorsque le diamètre de la buse est égal à l'épaisseur de la coque du modèle imprimé. Ainsi, si l'épaisseur est supérieure au diamètre de la buse, cela indique une sur-extrusion et l'extrusion doit être réduite, tandis que si l'épaisseur est trop fine par rapport au diamètre de la buse, cela indique une sous-extrusion et l'extrusion doit être augmenté.

## III.3 Méthodologie

Le processus de calibration utilise un modèle spécial, généralement un cube ouvert avec deux coques. Ce modèle est généralement de petite taille car seule l'épaisseur de la coque est nécessaire pour effectuer la calibration. Après l'impression du cube, nous mesurons à l'aide d'outils de mesure tels qu'un pied à coulisse les épaisseurs des couches supérieures des quatre côtés. Étant donné que le diamètre de la buse doit être égal à l'épaisseur de la coque, l'épaisseur mesurée des deux coques devrait être le double du diamètre. En comparant les deux valeurs, nous prenons la décision d'augmenter ou de réduire l'extrusion. Puis nous répétons le processus jusqu'à atteindre l'extrusion idéale. L'itérateur de profil «Profile Iterator» simplifie ce processus et aussi fait des recommandations sur la vitesse d'extrusion à utiliser pour les test et nous informe si l'extrusion idéale est atteinte.

## III.4 Tests des vitesses d'extrusion et itération des profils

Pour commencer le processus nous avons besoin d'un profil initial. On obtient ce profil premièrement en ouvrant IdeaMaker. Ensuite on importe le model STL de test nommé «Flowrate Testfile» (voir Figure III-1) qu' on a téléchargé de Raise3D.

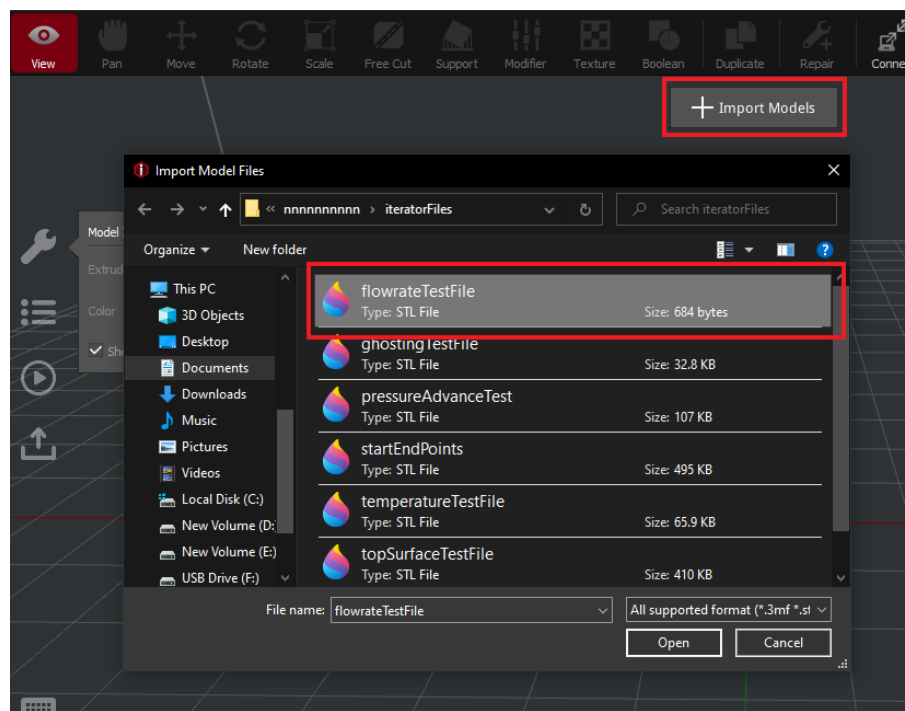


Figure III-1 Sélection du fichier STL

## CHAPITRE III

Après que le model STL s'est affiché (voir Figure III-2), on lance le tranchage et la fenêtre des profils apparait. On sélectionne le profil «Speed - Pro - PLA» qu'on va utiliser pour nos tests et on clique sur «export » comme s'est indiqué dans la figure III-3.

**Remarque :** Profile Iterator utilise ce modèle sous forme du cube mais imprime juste les murs sans la surface supérieure et sans remplissage pour nous permettre de vérifier l'épaisseur.

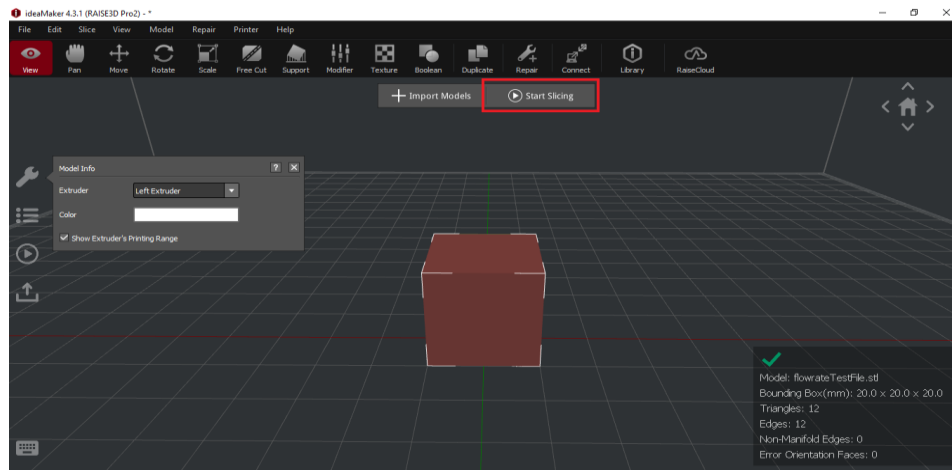


Figure III-2 Affichage de model STL

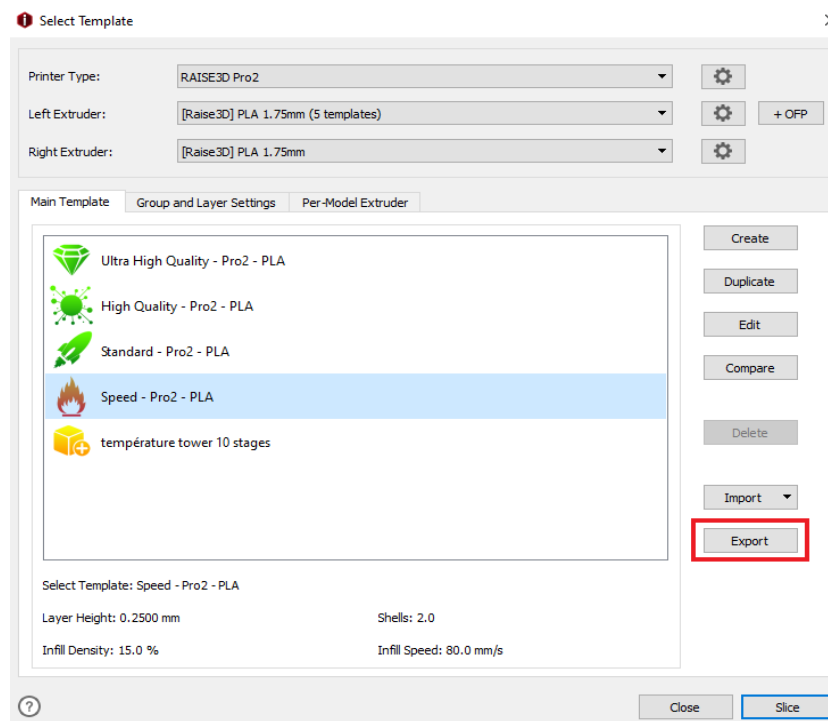
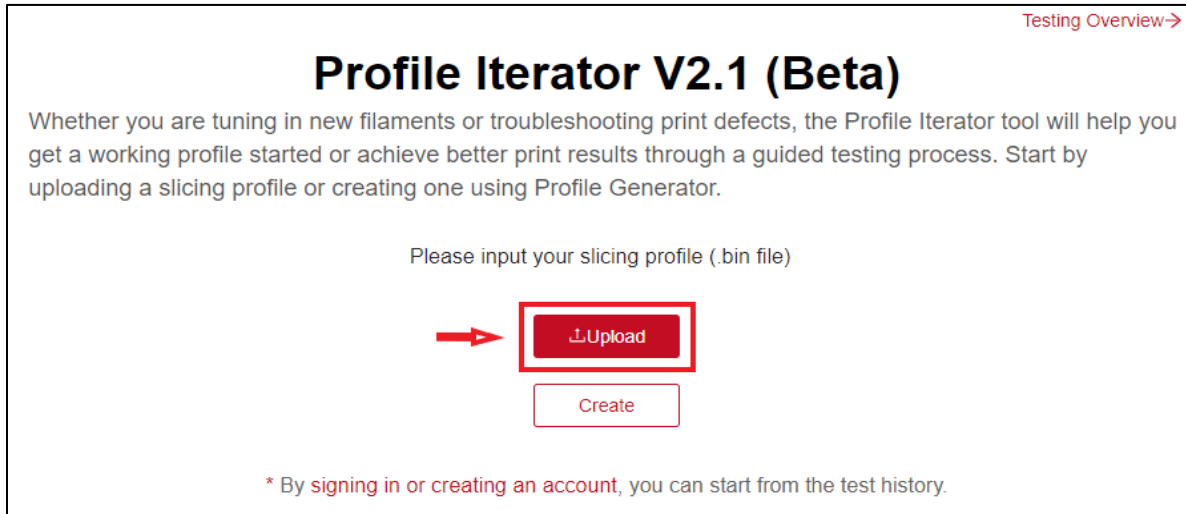


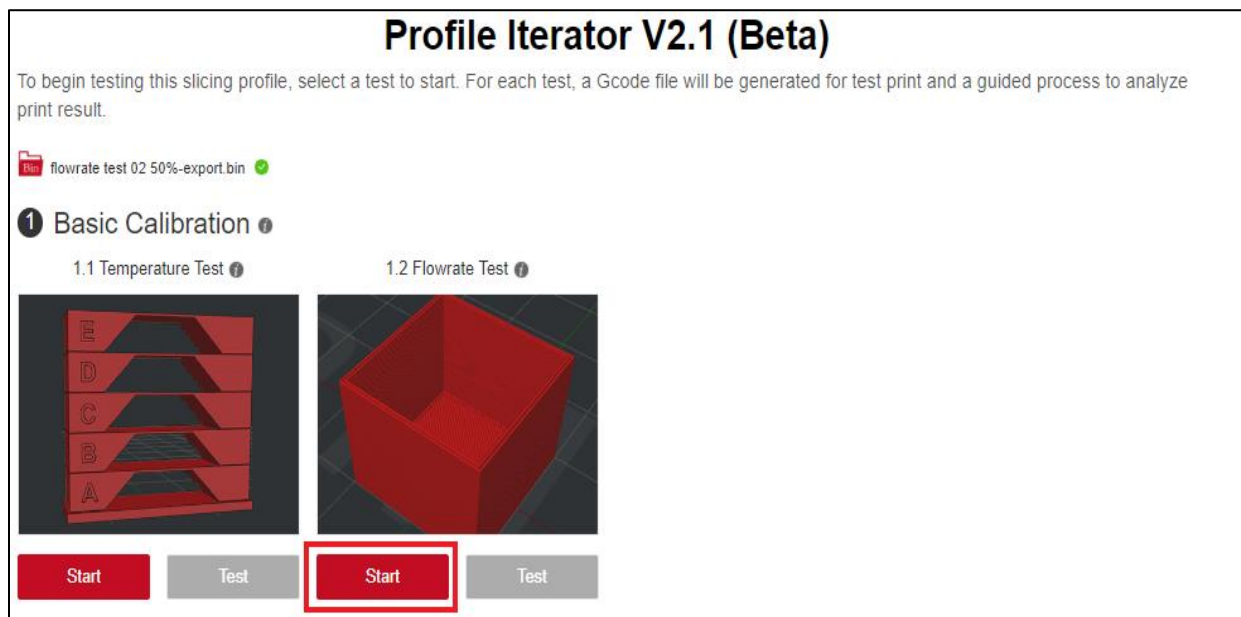
Figure III-3 Exportation du fichier (.bin) du profil

Ensuite, on ouvre l'application web online Profile Iterator et on clique sur «upload» pour charger le profil dans la plateforme (voir Figure III-4).



**Figure III-4** Chargement du profil vers «Profile Iterator»

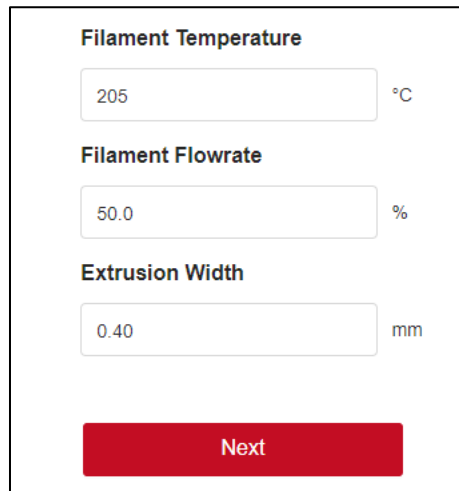
Après, on sélectionne le test de vitesse d'extrusion «Flowrate Test» sous «basic calibration» illustré sur la figure III-5, et on clique sur «Start» pour commencer le processus.



**Figure III-5** Sélection de type de test

Ensuite, on sélectionne l'épaisseur de coque, la température et la vitesse d'extrusion.

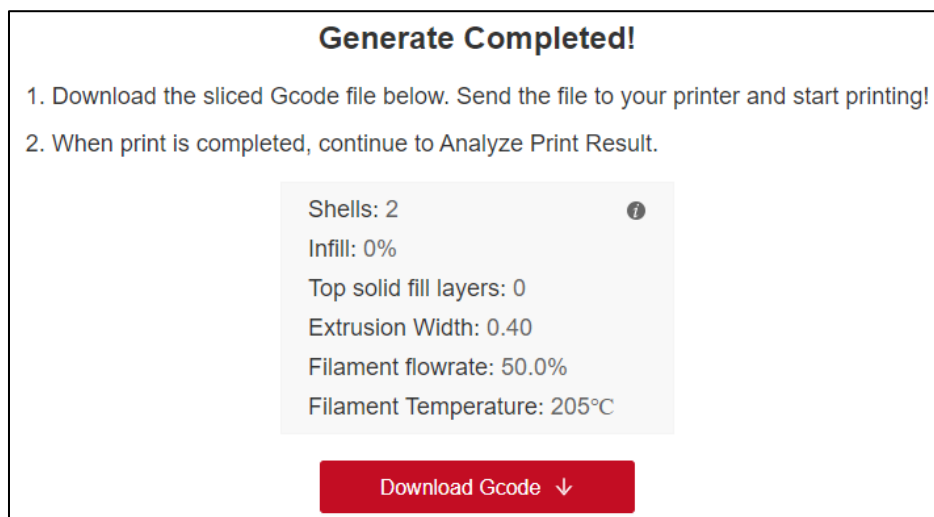
Pour le premier test on choisit une extrusion de 50% (voir Figure III-6).



The image shows a settings panel with three input fields and a button. The first field is labeled 'Filament Temperature' and contains the value '205' with a '°C' unit to its right. The second field is labeled 'Filament Flowrate' and contains '50.0' with a '%' unit to its right. The third field is labeled 'Extrusion Width' and contains '0.40' with a 'mm' unit to its right. Below these fields is a red button with the text 'Next' in white.

**Figure III-6 Sélection de vitesse d'extrusion**

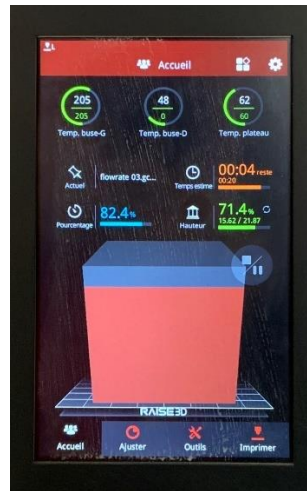
Après, on télécharge le Code-G accompagné avec les fichiers (.data) et (.bin) en cliquant sur «download Gcode» comme montre la figure III-7.



The image shows a confirmation screen titled 'Generate Completed!'. It contains two numbered instructions: '1. Download the sliced Gcode file below. Send the file to your printer and start printing!' and '2. When print is completed, continue to Analyze Print Result.' Below the instructions is a grey box listing the print parameters: 'Shells: 2', 'Infill: 0%', 'Top solid fill layers: 0', 'Extrusion Width: 0.40', 'Filament flowrate: 50.0%', and 'Filament Temperature: 205°C'. At the bottom of the screen is a red button with the text 'Download Gcode' and a downward-pointing arrow.

**Figure III-7 Téléchargement du fichier Code-G**

Ensuite, nous transférons les fichiers téléchargés via une clé USB vers l'imprimante, puis nous lançons l'impression avec le fichier Code-G. L'écran affichera le temps restant jusqu'à ce que l'impression soit terminée avec une représentation graphique du modèle comme indiqué dans la figure III-8 utilisant les données du fichier (.data).



**Figure III-8 Affichage graphique de modèle sur l'écran**

Une fois le modèle est réalisé, nous le retirons de la plate-forme d'impression, puis mesurons l'épaisseur des couches supérieures de chaque côté du cube en utilisant un pied à coulisse comme indiqué sur la figure III-9.




**Figure III-9 Mesure avec pied à coulisse**

Ensuite, on donne les valeurs mesurées à l'itérateur de profil et on clique sur «submit» (voir Figure III-10)

[Back](#)

### Filament Flowrate Test

Measure the width of your printed test model on all four sides and enter the values below.  
Note: Filaments vary in quality and may affect the level of accuracy. Despite what the measurements are, visible gaps between the 2 shells mean that it is under extruded and flowrate needs to be increased.



**Filament flowrate tested**  
50 %

**Expected Shell Width**  
0.8 mm

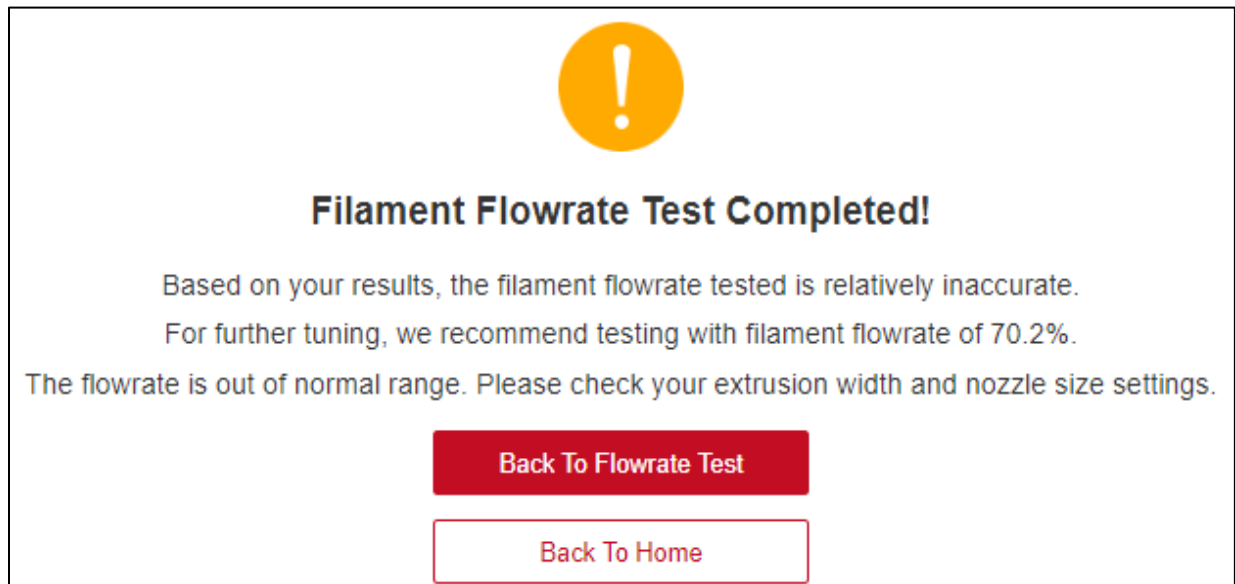
**Measured shell width**

|       |         |       |         |
|-------|---------|-------|---------|
| Side1 | 0.57 mm | Side2 | 0.58 mm |
| Side3 | 0.58 mm | Side4 | 0.56 mm |

[Submit](#)

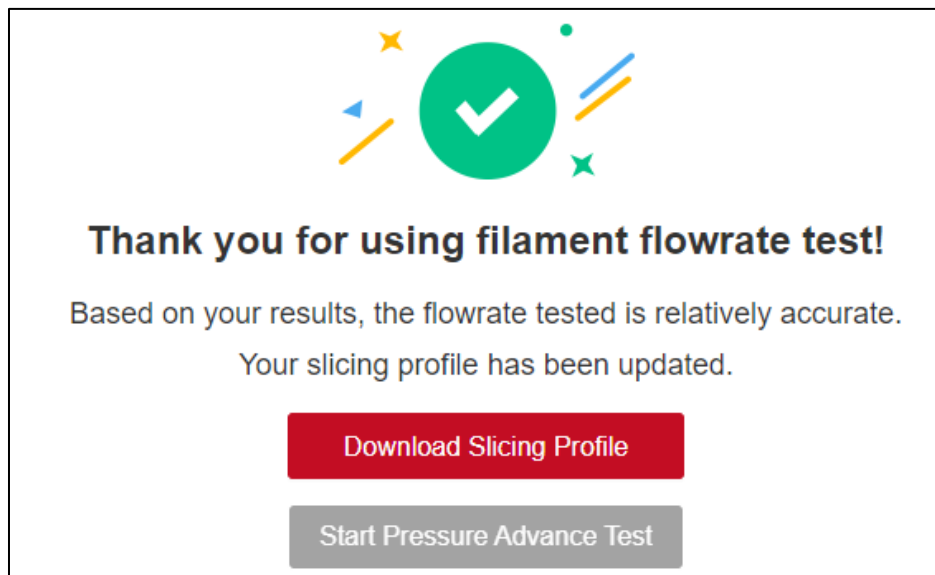
**Figure III-10 L'entrée des valeurs mesurées**

L'itérateur de profil analyse nos résultats mesurés et nous informe si notre vitesse d'extrusion est idéale ou non. Pour notre premier test de 50 % l'extrusion n'était pas idéale et l'application a recommandé une vitesse d'extrusion de 70,2 % pour le prochain test comme indiqué sur la Figure III-11.



**Figure III-11 Recommandation de Profil Iterator**

Ce processus et les étapes précédentes sont répétés jusqu'à ce que nous atteignons la vitesse d'extrusion idéale. Une fois la vitesse d'extrusion idéale atteinte, «Profile Iterator» crée un nouveau profil avec cette vitesse. On a la possibilité de télécharger ce profil en cliquant sur «Download Slicing Profile» comme le montre la figure III-12.



**Figure III-12 Téléchargement de profil final**

### III.5 Résultats des tests et interprétations

On a effectué quatre tests et imprimé quatre modèles avec différentes vitesses d'extrusion en pourcentage de la vitesse par défaut du profil utilisé comme s'est indiqué dans la figure III-13.

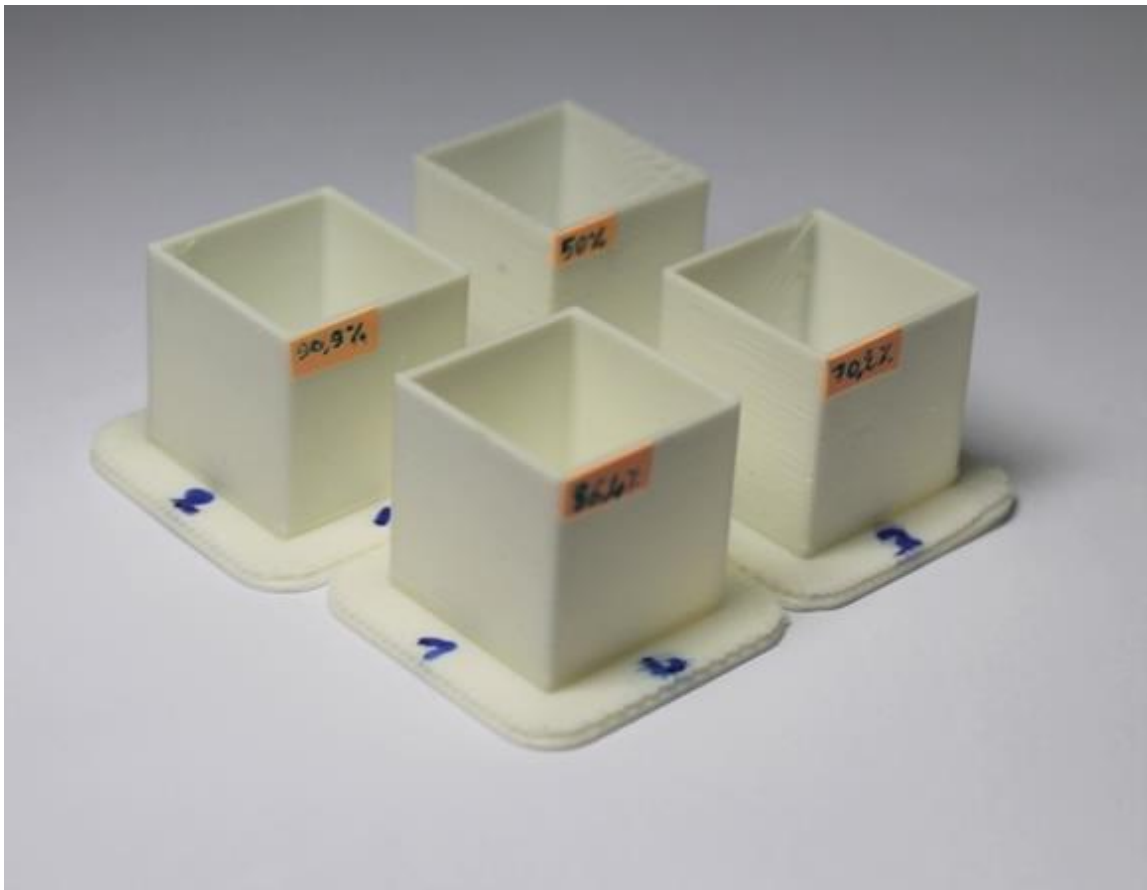


Figure III-13 modèles imprimés

Les résultats de ces tests sont résumés dans les tableaux III-1 et III-2. Nous avons commencé notre premier test avec une vitesse d'extrusion de 50 %, et après trois itérations, guidées par l'itérateur de profil, nous avons atteint une extrusion optimisée de 90,9 %.

**Tableau III-1 Epaisseurs des murs des modèles imprimés**

| Numéro du test | Taux d'extrusion | Mur (coté) Mesuré | Mesure 1 (mm) | Mesure 2 (mm) | Mesure 3 (mm) | Moyenne (mm) |
|----------------|------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| 1              | 50%              | 1                 | 0.56          | 0.58          | 0.58          | 0.57         |
|                |                  | 2                 | 0.59          | 0.57          | 0.57          | 0.58         |
|                |                  | 3                 | 0.59          | 0.57          | 0.56          | 0.58         |
|                |                  | 4                 | 0.55          | 0.56          | 0.56          | 0.56         |
| 2              | 70.2%            | 1                 | 0.64          | 0.65          | 0.65          | 0.65         |
|                |                  | 2                 | 0.65          | 0.64          | 0.64          | 0.64         |
|                |                  | 3                 | 0.65          | 0.65          | 0.64          | 0.65         |
|                |                  | 4                 | 0.65          | 0.65          | 0.64          | 0.65         |
| 3              | 86.4%            | 1                 | 0.76          | 0.75          | 0.76          | 0.76         |
|                |                  | 2                 | 0.76          | 0.76          | 0.75          | 0.76         |
|                |                  | 3                 | 0.76          | 0.76          | 0.75          | 0.76         |
|                |                  | 4                 | 0.75          | 0.76          | 0.76          | 0.76         |
| 4              | 90.9%            | 1                 | 0.78          | 0.78          | 0.79          | 0.79         |
|                |                  | 2                 | 0.78          | 0.78          | 0.79          | 0.79         |
|                |                  | 3                 | 0.78          | 0.78          | 0.78          | 0.78         |
|                |                  | 4                 | 0.80          | 0.8           | 0.78          | 0.79         |

Chaque mur (coté) du modèle est obtenu par deux coques de 0.4mm (le diamètre de la buse). Donc la valeur idéale d'épaisseur du mur est de 0.8mm. A partir des résultats des tests effectués, on a remarqué que la sous-extrusion cause une impression avec des dimensions incorrectes comme montré dans le tableau III-1 pour les cas des test 1, 2 et 3.

**Tableau III-2 Résultats des tests selon l'itérateur de profil**

| Numéro du test | Vitesse d'extrusion à tester | Résultat de vérification par «Profile Iterator»  | L'extrusion recommandée pour le test suivant |
|----------------|------------------------------|--|--|
| 1              | 50%                          | Relativement imprécis<br>«Relatively inaccurate» | 70.2%  |
| 2              | 70.2%                        | Relativement imprécis<br>«Relatively inaccurate» | 86.4%  |
| 3              | 86.4%                        | Relativement imprécis<br>«Relatively inaccurate» | 90.9%  |
| 4              | 90.9%                        | Relativement précis<br>«Relatively accurate»     |  |

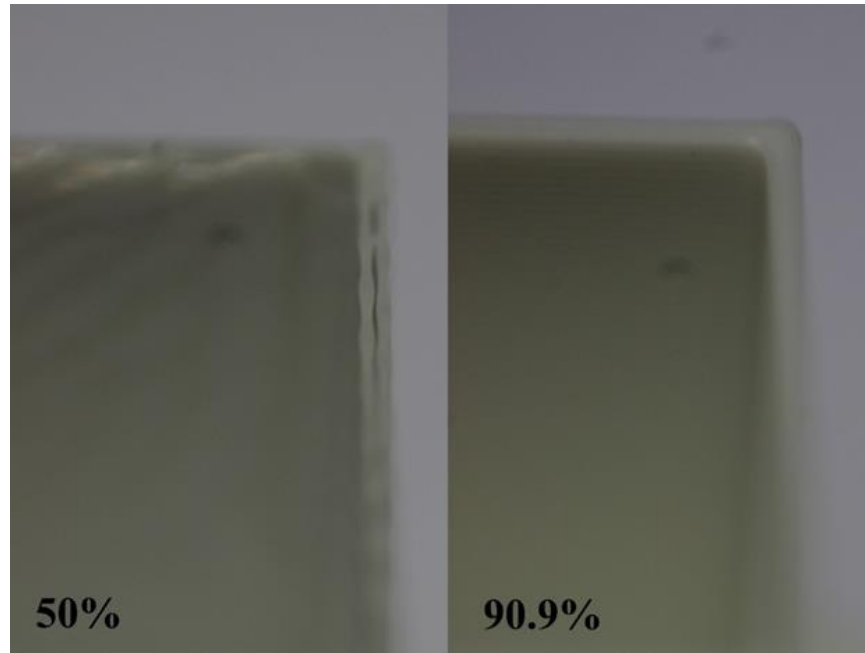
Pour confirmer les recommandations de Profile Iterator, on a effectué une analyse visuelle de l'état physique des modèles imprimés. Ceci n'est pas possible à œil nu. Pour cela, nous avons utilisé l'appareil photo DSLR avec l'objectif qui permet la photographie macro (Canon EOS 1100), présenté au chapitre II (Figure II-17).

On a pris des photos zoomés des murs des quatre modèles comme le montre la figure III-14. Nous pouvons observer sur la figure que la qualité de l'impression s'améliore progressivement après chaque itération en passant du taux 50% à 90.9% ce qui confirme les recommandation de Profile Iterator.



**Figure III-14** Différence de qualité d'impression entre modèles

A partir des tests effectués, on a aussi remarqué que la sous-extrusion crée un vide entre les coques du modèle dans les couches supérieures comme s'est indiqué sur les photos de la figure III-15.



**Figure III-15** Différence d'impression des coques entre modèles

### III.6 Conclusions

En conclusion, ce chapitre nous a permis d'examiner les étapes de calibration de vitesse d'extrusion de l'imprimante Raise3D Pro2 du laboratoire de recherche IS2M en utilisant l'application web «Profile Iterator» de Raise3D, et nous a également montré les effets et les inconvénients d'une vitesse d'extrusion mal calibrée de l'impression 3D sur les résultats d'impression.

## **Conclusion générale**

L'objectif de ce mémoire est l'étude des étapes nécessaires pour effectuer une calibration de l'imprimante 3D Raise3d Pro2 du laboratoire de recherche IS2M en utilisant l'application web Itérateur de profil «Profile Iterator» de Raise3D.

Après une recherche bibliographique sur l'impression 3D en général et le procédé FDM en particulier, on a présenté d'un côté l'imprimante et le matériau utilisé dans l'étude pour l'impression des modèles de test, de l'autre côté on a présenté le système de tranchage IdeaMaker et l'application web Profile Iterator utilisé pour générer les profils de calibrage et fichier Gcode d'impression.

Une calibration de température d'extrusion est effectuée en utilisant en premier l'application web à distance Profile Iterator, suivie d'une méthode manuelle de préparation à l'impression avec le système de tranchage IdeaMaker. A partir des deux processus, on a déterminé que la température d'extrusion idéale pour le filament PLA utilisé est entre 190°C et 230°C. On a également montré que l'utilisation de Profile Iterator est plus rapide mais un peu limité par rapport à la méthode manuelle de préparation qui est plus flexible et offre beaucoup de possibilités de modification des paramètres.

Ensuite, on a examiné les étapes de calibration de vitesse d'extrusion de l'imprimante Raise3D Pro2 en utilisant l'itérateur de profil. On a réalisé quatre tests d'impression et remarquer que la sous-extrusion cause une impression de mauvaise qualité avec des dimensions incorrectes et aussi crée un vide entre les coques du modèle dans les couches supérieures.

Après avoir réalisé ce travail de calibration et effectué plusieurs tests d'impression, on a mieux compris le principe de fonctionnement des imprimantes FDM et découvert l'influence importante des paramètres d'impression sur les model imprimé.

Dans l'avenir, on propose l'exploration des autres capacités de Profile Iterator comme la calibration de la surface supérieure et verticale et aussi l'utilisation d'une autre méthode pour calibrer la vitesse d'extrusion.

## Références bibliographiques

- [1] Redwood, Ben. The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications. Amazon Fulfillment, 2017.
- [2] Smyth, Clifford T., and Adrienne Smyth. Functional Design for 3D Printing: Designing Printed Things for Everyday Use. Clifford Smyth, 2017.
- [3] Gibson, Ian, et al. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer Verlag, 2016.
- [4] <https://www.raise3d.com/filaments/tpu/>
- [5] <https://www.matterhackers.com/>