



Étude et optimisation de l'impression en FDM avec l'Ultimaker

Projet Final

Auteur : **Marta Prat**

Tuteur : **Laurent Kieffer**

Juillet 2015

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier l'Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA) et à l'université Polytechnique de Barcelone (ETSEIB, UPC) pour m'avoir permis de réaliser mon projet de fin d'études au sein du centre technologique de l'IFMA et pour m'avoir donnée l'occasion de vivre l'expérience Erasmus en France.

J'adresse mes remerciements à Laurent Kieffer qui a été mon tuteur dans le cadre de ce projet de fin d'études. Je lui remercie pour me donner la possibilité de faire ce projet, ses conseils et l'attention qu'il a pu porter à mon travail.

J'aimerais également remercier tous les personnes qui travaillent à l'IFMA, au CTT, surtout à Alexis et Clément pour sa disponibilité et l'aide qui m'ont donné en tout moment, même dans les moments de manque d'inspiration.

Je voudrais remercier à Carmen Ramirez et Jose Manuel Mateo de me donner la possibilité de connaître l'impression 3D dans le secteur industriel et l'apprentissage d'autres technologies d'impression.

Je n'oublie pas non plus toutes les personnes rencontrées en France, tout d'abord les étudiants en Erasmus, ainsi que les étudiants français qui m'ont parfaitement accueilli et permis de m'adapter à la vie française.

En spécial, un grand merci à tous mes amis espagnols et de l'IFMA qui on fait de ce stage une expérience inoubliable.

Finalement, arriver ici n'aurait pas été possible sans ma famille qui m'ont soutenu en toutes circonstances, m'ont servi de modèle et m'ont permis de prendre cette opportunité. Je voudrais remercier spécialement à mon père qui a suivi le cours du projet, a mis un grand intérêt et m'a donné des conseils pour réussir aux moments difficiles.

Plan des matières

1.	Introduction général.....	6
1.1.	Contexte	6
1.2.	Origine du projet - Problématique	6
1.3.	Motivation	7
1.4.	Objectives du projet	7
1.5.	Cadre du projet.....	7
2.	Etat de l'art de l'impression 3D	8
2.1.	Prototypage rapide par dépôt de fil (FDM).....	8
2.1.1.	Ultimaker2	10
2.1.2.	Cura	11
2.1.3.	Matériaux	11
2.2.	Etudes et recherche d'information	14
2.2.1.	Paramètres d'impression	14
2.2.2.	Défauts d'impression.....	15
3.	Expérimentation.....	15
3.1.	Essais à traction et a flexion	15
3.2.	Plan d'essais	16
4.	Essai de flexion	17
4.1.	Généralités	17
4.1.1.	Eprouvette.....	17
4.1.2.	Mode opératoire	17
4.1.3.	Valeurs résultat	18
4.2.	Procédure de l'essai	19
4.3.	Matériaux	20
4.4.	Définition des paramètres.....	20
4.4.1.	Paramètres fixés.....	20
4.4.2.	Paramètres à étudier.....	20
4.5.	Résultats	21
4.5.1.	ABS.....	21
4.5.2.	PLA.....	26
4.6.	Conclusions.....	28
4.6.1.	Générales.....	28
4.6.2.	Par matériau	29

5.	Essai de traction	30
5.1.	Généralités	30
5.1.1.	Eprouvette.....	30
5.1.2.	Mode opératoire	32
5.1.3.	Valeurs résultats.....	32
5.2.	Matériaux	34
5.3.	Définition des paramètres.....	34
5.3.1.	Paramètres fixés.....	34
5.3.2.	Paramètres à étudier.....	34
5.4.	Résultats	36
5.4.1.	Dimensions, aspect visuel et défauts	36
5.4.2.	Nylon	38
5.4.3.	PET	40
5.4.4.	PLA.....	41
5.4.5.	ABS.....	43
5.5.	Conclusions.....	46
5.5.1.	Générales.....	46
5.5.2.	Par matériau	48
6.	Plan d'essais	50
6.1.	Test 1 : Température (A)	50
6.2.	Test 2 : Température (B)	52
6.3.	Test 3 : Union des couches d'une grande pièce	56
6.4.	Test 4 : Petite pièce avec des défauts	60
6.5.	Test 5 : Pièce mince avec de grands trous	62
6.6.	Test 6 : Pièce avec des surplombs importants	64
6.7.	Test 7 : Impression des trous horizontaux	66
6.8.	Test 8 : Pièce avec toutes les faces plates et fonctionnels	71
6.9.	Test 9 : Pièce avec faces courbes et des trous	73
6.10.	Test 10 : Figurine	77
6.11.	Test 11 : Pièce décorative PET et Nylon	80
7.	Conclusion	82
8.	Bibliographie.....	84
9.	Annexes	86
9.1.	Annexe 1 : Propriétés des matériaux	86

9.2.	Annexe 2. Facteurs clés de succès.....	89
9.3.	Annexe 3 : Courbes contrainte- déformation de l'essai de flexion.....	92
9.4.	Annexe 4 : Résultats des éprouvettes de l'essai de flexion	94
9.5.	Annexe 5 : Dimensions des éprouvettes de traction	95
9.6.	Annexe 6 : Erreurs et variabilité des dimensions des éprouvettes de traction	96
9.7.	Annexe 7 : Propriétés mécaniques des éprouvettes de l'essai de traction	97
9.8.	Annexe 8 : Images des éprouvettes de traction.....	98
9.9.	Annexe 9 : Distribution des mesures des trous (Test 7).....	100
9.10.	Annexe 10. Création des supports avec le MeshMixer	101

1. Introduction général

1.1. Contexte

Aujourd'hui la technologie appelée impression 3D, est une technique de fabrication révolutionnaire qui est en train de remettre totalement en cause notre manière de produire et de consommer. Ce procédé, jusqu'alors limité aux industriels sous la forme de grosses machines pour du prototypage rapide, s'apprête désormais à rentrer dans nos foyers avec des capacités de reproduction et de création quasi illimitées.

A la fois simple et novatrice, cette technique consiste en fait à superposer des couches de matières à partir des coordonnées transmises par un fichier 3D. Ce fichier qui correspond au modèle numérique de votre objet, est réalisé à partir d'un logiciel CAO, d'un scanner 3D ou peut être récupéré sur des plateformes spécialisées.

La impression 3D a apparue à la fin des années 70 et depuis en quelques années l'impression 3D a évolué et, actuellement, il y a un grand nombre de types de fabrication 3D, de machines et fabricants différents desquels dépend la qualité des produits finaux, les dimensions, les matériaux à utiliser, etc.

Avec l'expiration des brevets et la baisse des coûts des machines, aujourd'hui presque n'importe qui peut y accéder, aussi bien la petite entreprise que le particulier. Grâce à la grande polyvalence il est possible de fabriquer un large éventail d'objets. Une manière de réduire les coûts de production c'est grâce au nombre réduit de machines et l'assemblage sera simplifié voir même inexistant.

Concernant le coût des imprimantes professionnelles, les prix sont extrêmement variables, de 5000 € environ jusqu'à 1 million d'euros pour les imprimantes industrielles. Le nombre de possibles matériaux à utiliser est très grand et les machines sont bien contrôlées et avec des résultats très bons.

Cependant, il existe des imprimantes appelées de bas coût ou personnelles, entre 400€ et 3900€. Celles-ci travaillent surtout avec thermoplastiques comme l'ABS ou le PLA et les possibilités de production sont réduites. Quelques fois, c'est difficile arriver à créer des bonnes pièces et la qualité finale dépend plus de la connaissance du producteur de la pièce que du fabricant de la machine. Pour obtenir de bons résultats il faut donc étudier et tester la propre machine.

1.2. Origine du projet - Problématique

Le projet est née du besoin de l'Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA) de connaître mieux l'impression 3D, spécialement sur leurs imprimantes Ultimaker² et la qualité des pièces imprimées, du point de vue conceptuel au mécanique.

Jusqu'à ce moment les pièces étaient imprimées en utilisant les paramètres recommandés par le fabricant et la configuration n'était pas l'optimale. Les matériaux utilisés sont l'ABS et le PLA et on ne connaissait pas les propriétés des pièces fabriquées. Pourtant, la fonctionnalité des pièces c'était la conception de modèles pour vérifier géométries et dimensions.

1.3. Motivation

La principale motivation pour réaliser ce projet était la possibilité de proposer des solutions pratiques aux problèmes réels. Surtout le sujet du projet c'était la raison plus importante du choix car c'est une grande opportunité de pouvoir travailler avec cette technologie qui est en pleine croissance au marché et les domaines d'application sont nombreux.

Le travail est principalement pratique avec des résultats très visuels, néanmoins il faut une connaissance sur le sujet et une recherche d'information extensive.

1.4. Objectives du projet

L'impression 3D n'est pas une fabrication simple, pour imprimer des pièces en 3D il faut prendre en considération beaucoup de facteurs dès la conception de la pièce aux paramètres d'impression, le choix du matériau, etc. De plus chaque pièce doit être bien étudié et définir toute la configuration optimale pour obtenir la meilleure qualité.

Ce n'était pas une tâche facile et quand on a commencé à connaître mieux toutes les façons de l'impression 3D on s'est rendu compte de la complexité de l'étude.

En premier lieu, les objectifs ont été donc l'étude des paramètres et de la imprimante, connaître bien les paramètres principaux, les relations entre eux et l'effet sur la qualité des pièces. Sur Internet, il y a plein d'information et des études sur le sujet mais chaque imprimante et matériau est différent et le principal but est d'optimiser l'impression des imprimantes de l'IFMA.

Alors, on va étudier les matériaux, les paramètres d'impression, les régler correctement selon la pièce, le matériau et la fonctionnalité désiré et étudier les propriétés des pièces imprimées.

De plus on va proposer des corrections, des améliorations sur la conception des pièces et des conseils d'impression pour avoir un meilleur résultat.

1.5. Cadre du projet

Le champ d'application reste limité à l'étude des paramètres les plus importants et influents sur la qualité des pièces, il y a environ 60 paramètres à définir en chaque impression et il y en a beaucoup qui n'ont pas un fort effet sur la qualité de la plupart des pièces.

Le projet va déterminer des marges dans lesquelles les résultats se trouvent mais, après, en fonction de la géométrie de la pièce l'optimum peut être un peu différent.

La grande variété de géométries est également un fait qui limite le champ d'étude, car chaque une séparément doit être étudiée mais les temps d'impressions sont grands et c'est impossible de tester toutes les géométries différentes.

L'étude est limitée aux imprimantes Ultimaker² et aux matériaux acquis de la marque Esun.

Pour finaliser, les imprimantes ont besoin d'un contrôle technique et une calibration régulière pour maintenir leur bonne performance et réussir à avoir des pièces de bonne qualité.

2. Etat de l'art de l'impression 3D

L'impression 3D est un type de fabrication par addition qui vise à créer un objet en trois dimensions dans l'espace. Autrement dit, créer un objet de volume avec une certaine largeur (axe X), une certaine profondeur (axe Y), et une hauteur (axe Z). Actuellement, il y a nombreuses et différentes technologies, mais elles partagent toutes le même principe de base: obtenir un objet tridimensionnel à partir de la superposition progressive des couches depuis zéro jusqu'à la création complète de l'objet.

L'impression 3D est aussi communément appelée fabrication additive, ou plus communément par le terme anglais de *Additive Manufacturing* (AM). Autres terminologies sont actuellement utilisées comme *Additive Layer Manufacturing* (ALM), *Rapid Manufacturing* (RM), *Rapid Prototyping* (RP) ou *3D Printing* (3DP). Ces nouvelles techniques de fabrication sont diamétralement opposées aux méthodes traditionnelles de soustraction de matière, généralement par enlèvement de copeaux, où elles partent d'un bloc compact de matériau qui est usiné jusqu'à l'obtention de la pièce finale souhaitée, méthodes telles que fraisage ou de tournage. Ces nouvelles technologies additives ont un certains avantages, car elles permettent d'exploiter pleinement le matériau utilisé, remplacer le besoin d'outils, permettent de créer une géométrie complexes et ne génèrent pas de déchets, ceux-ci sont problèmes tous présents quand la méthode de production est par l'enlèvement de matière à partir d'un bloc de base. De plus, la fabrication additive réduit considérablement le temps de fabrication de la pièce ou prototype et nous permet de saisir tous les changements plus facilement que dans le secteur manufacturier traditionnel, il est seulement nécessaire de modifier le fichier sur l'ordinateur.

Il existe plusieurs techniques d'impression 3D, les principales différences entre elles sont la forme dans laquelle les couches sont déposées pour créer des pièces et les matériaux utilisés.

Les méthodes plus connues de fondre ou ramollir le matériau pour produire les couches sont le frittage laser (*Selective Laser Sintering*, SLS) et le dépôt de matière fondue (*Fused Deposition Modeling*, FDM)- technologie qu'utilise l'imprimante Ultimaker. Autres utilisent le principe de photopolymérisation pour fabriquer des modèles comme la *Stéréolithographie* (SLA). Il existe également la fabrication d'objet par laminage (*Laminated Object Modelling*, LOM), ce type d'impression les contours des couches individuelles sont découpés et, après, collés l'une sur l'autre.

2.1. Prototypage rapide par dépôt de fil (FDM)

Le prototypage rapide par dépôt de fil (*Fused Deposition Modeling* - FDM) est le dépôt mécanique de matière plastique par couches successives. La machine dépose un fil de plastique par l'intermédiaire d'une buse.

Le filament se trouve enroulé dans une bobine, il est déroulé pour alimenter la buse d'extrusion qui chauffe la matière qui est alors extrudé sur une plateforme se déplaçant sur 3 axes, x, y et z. La plateforme descend d'un niveau à chaque nouvelle couche appliquée, jusqu'à l'impression de l'objet.

Une fois que le matériau est extrudé, il solidifie.

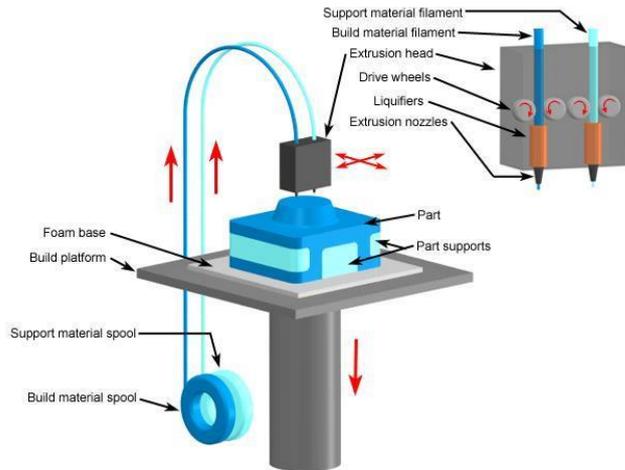


Figure 1. Procès du prototypage rapide par dépôt de fil

Cette fabrication commence par la conception de l'objet à partir d'un logiciel de CAO. Celui-ci devra être exporté au format *.STL* pour que l'impression puisse se lancer, ce format ne sert qu'à transmettre la géométrie de surface de votre objet. Le fichier qui est exporté se présente sous la forme d'un maillage composé de plusieurs triangles déterminant le volume de votre objet dans l'espace et ignore les autres caractéristiques telles que la couleur, la texture ou les unités de mesure.

Le fichier *.STL* obtenu est traité par un logiciel, appelé Slicer (comme Makerware, Cura ou Repetier), qui découpe en tranches le fichier numérique et fournit à l'imprimante les informations nécessaires pour réaliser l'impression. La pièce est définie par un ensemble de données telles que l'épaisseur des couches, la quantité de matières, la vitesse d'impression... Généralement les informations sont écrites dans un langage appelé G-Code ; cela permet de piloter les machines-outils à commande numérique.

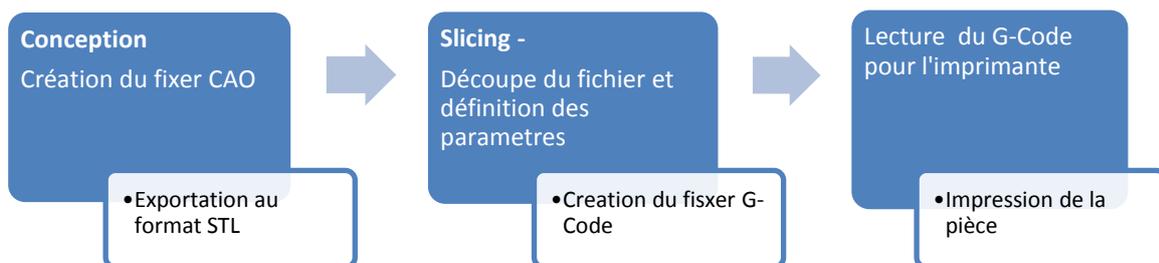


Figure 2. Diagramme du processus de création d'une pièce 3D

Il y a des machines professionnelles de toutes tailles et de toutes complexités qui utilisent cette méthode et travaillent avec une grande variété de matières disponibles. Celles-ci ont une haute performance et haute précision pour créer des prototypes de haute résolution.

D'autre part, il y a des imprimantes à bas coût qui travaillent principalement avec des filaments en plastique; thermoplastiques les plus communs sont l'ABS et le PLA, la taille des pièces est plus petite et la qualité pire.

Selon la machine utilisée, les pièces obtenues peuvent être utilisées comme prototypes ou pièces finales et fonctionnelles. C'est possible la création rapide et économique d'outils et aussi des pièces

structurelles qu'ont besoin des bonnes propriétés mécaniques (en gardant à l'esprit qu'ils sont thermoplastiques et pas métaux ou alliages).

2.1.1. Ultimaker²

Ultimaker² est la nouvelle imprimante de l'entreprise néerlandaise de l'imprimante qui est en vente depuis 2013. Elle est considérée comme une des meilleures imprimantes à bas coût en raison de leur performance.

L'imprimante Ultimaker² a été développée avec le but de rendre l'impression 3D le plus facile et flexible possible. Dans sa catégorie est l'une des imprimantes plus rapides et plus précises du marché actuel et son prix est de 1895 €.

La technologie utilisée par les imprimantes Ultimaker est le prototypage rapide par dépôt de fil (FDM). La buse d'extrusion se déplace en X et Y et le plateau se déplace en la direction Z.

2.1.1.1 Caractéristiques techniques

- Fabricant : **Ultimaker**
- Type : **Particulier/bureau**
- Pays : **Hollande**
- Matériau(x) : **PLA, ABS, Filaments spéciaux**
- Technologie : **Dépôt de matière fondue, FDM**
- Taille : **350x350x400**
- Taille maximum d'impression (mm) : **230x225x205**
- Poids (kg) : **12**
- Diamètre de la buse (mm) : **0,4mm**
- Epaisseur min. d'impression : **20 microns**
- Vitesse maximale (mm/s) : **300**
- Précision (mm) : **XY: 12.5 microns - Z: 5 microns**
- Taille de filament (mm) : **3**
- Température de la buse: **0°-260°C**
- Température du plateau: **0 ° - 100 ° C**

- Format: **.STL**
- Logiciel : **Cura, Repetier**
- Connectivité : **Wi-Fi, Carte SD**
- Compatibilité système : **Windows, Mac, Linux**
- Alimentation : **100-240V / 50 - 60Hz / 221W**
- Autres : **Plateau Chauffant, Ecran de Contrôle**



Figure 3. Ultimaker²

2.1.1.2. Fonctionnement

Le mécanisme d'extrusion du matériau est de type Bowden. Ce type de mécanisme est caractérisé pour avoir un moteur pas à pas en dehors de la tête d'extrusion pour minimiser le poids et faciliter le mouvement de celle-ci pour déposer le matériau, il faut moins de force pour se déplacer et pouvoir atteindre des vitesses plus élevées.

Le nom vient des câbles Bowden, lesquels transmettent une action mécanique d'un point à un autre, comme les freins de vélo.

La force d'extrusion du moteur est transmise à la buse par un tube en plastique.

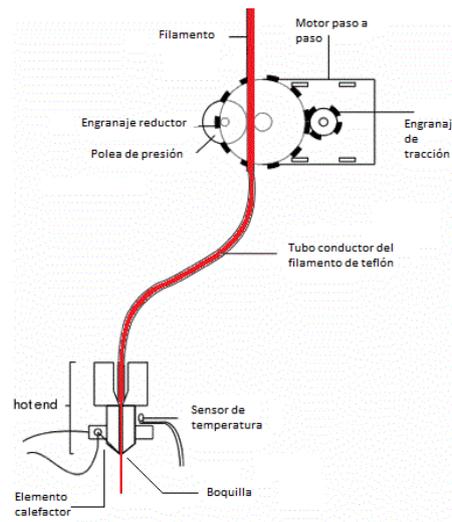


Figure 4. Extruder « Bowden »

2.1.2. Cura

Cura est le logiciel open source développé aussi par l'entreprise Ultimaker. Ce programme transforme le fichier *.STL* au format *G-code* qui contient toutes les instructions à donner à l'imprimante pour extruder la matière et fabriquer la pièce en couches.

Il comprend tout le nécessaire pour préparer un fichier 3D pour l'imprimer et l'impression est entièrement préconfigurée pour fonctionner avec l'imprimante Ultimaker 3D.

Dans le programme les paramètres d'impression sont définis, il y a environ 60 paramètres à déterminer et desquels dépend, en grande partie, la qualité d'impression de la pièce.

2.1.3. Matériaux

Les matériaux utilisés par le prototypage rapide par dépôt de fil (FDM) sont plusieurs mais les imprimantes à bas prix utilisent surtout des thermoplastiques : les plus communs sont l'ABS et le PLA.

Dans les points suivants on va décrire chacun des matériaux disponibles et sur lesquels on va travailler. Aussi, avec le logiciel *CES EduPack 2014* et avec l'information trouvée sur Internet les propriétés des matériaux ont été définies pour (Voir annexe 1).

2.1.3.1 PLA (Acide Polylactique)

Le PLA est un thermoplastique d'origine végétale et, par conséquent, c'est biodégradable.

C'est le matériau plus facile à imprimer car il a besoin d'une température plus basse, mais son coefficient de friction est plus élevé que celui de l'ABS et il nécessite une pression plus élevée.

Propriétés mécaniques: En ce qui concerne les propriétés mécaniques du PLA, c'est un matériau ayant un module de Young supérieur à l'ABS, moins élastique, avec une résistance supérieure à la déformation et plus résistante à la traction et à la flexion. L'allongement est très faible et, par conséquent, la déformation avant de se casser est presque inexistante, il présente une rupture fragile.

Aspect visuel et post-traitement: Les pièces de PLA ont un bon aspect visuel et brillant, cependant les couches sont assez visibles. Il est également une matière plastique très stable, avec bonne précision dimensionnelle parce que c'est un matériau avec une petite contraction pendant le refroidissement. Le décollement du plateau est nul. Il est difficile de faire un post-traitement des pièces et il ne résiste pas aux températures élevées.

Impression avec PLA n'est pas nécessaire de chauffer la base chauffée, cependant, avec 50 ° C une impression remarquable est assurée dans toutes les conditions.

Pièces à imprimer avec le PLA

- Sans remplissage avec des murs étroits
- Créations artistiques et modélisme
- Détails ou besoin de précision dimensionnel

2.1.3.2 ABS (Acrylonitrile Butadiène Styène)

L'ABS est un thermoplastique amorphe constitué par trois monomères : l'acrylonitrile, le butadiène et le styrène. L'ABS n'est pas biodégradable, mais peut être réutilisé. Et il dégage des gaz pendant sa fusion que ne sont pas bons pour la santé.

Propriétés mécaniques : Les pièces d'ABS ont une bonne résistance mécanique et aussi une résistance aux températures extrêmes (entre -20 ° C et 80 ° C env.). Il a une bonne ténacité, est dur et rigide, avec une résistance élevée à l'abrasion chimique mais pas aux rayons UV. Il est soluble dans l'acétone.

Aspect visuel et post-traitement: Les pièces d'ABS sont connues pour offrir une belle et propre surface. En général, les pièces ABS réagissent bien au traitement de post-production. On peut lisser les pièces en thermoplastique en faire "fondre" la surface externe avec un solvant (comme la vapeur d'acétone) pour leur donner une surface plus brillante et propre. Aussi c'est possible poncer les pièces à la main ou avec des outils électriques. On peut également percer ou peindre les pièces. Cependant, il est sensible aux changements de température. Il est nécessaire connaître bien le matériau pour réussir à faire des impressions, cet apprentissage peut mettre du temps.

Pièces à imprimer avec ABS :

- **Fonctionnalité mécanique**
- Près d'hautes températures
- Dimensions petites

Par résumer, à mode comparaison dans le tableau 1 on peut voir différences entre PLA et l'ABS et choisir le meilleur selon l'impression.

Avantages		Désavantages	
PLA			
<ul style="list-style-type: none"> • Il n'a pas besoin d'un plateau chauffant • Plus écologique • Aspect visuel mieux et plus brillant • Pas de libération de vapeurs nocives pendant l'impression • Détails plus beaux et visibles • Plus haute résistance et rigidité 	<ul style="list-style-type: none"> • Il ne résiste pas les hautes températures (moins de 60°C) • Il se casse de manière fragile • Ténacité plus basse • Sensible à l'humidité, le conserver donc dans un endroit sec • Difficile post-traitement 		
ABS			
<ul style="list-style-type: none"> • Bonne ténacité et résistance • Température de fusion plus haute • Durée de vie plus large • Possibilité de post traiter les pièces (peindre, poncer, percer, etc.) • Parfait pour la conception de prototypes 	<ul style="list-style-type: none"> • Non écologique • Décollement et déformation facile pendant l'impression • Libère gaz nocif • Plus difficile à imprimer 		

Tableau 1. Avantages et désavantages du PLA et de l'ABS

2.1.3.3. Nylon

Le Nylon est un plastique de la famille des polyamides, il est un thermoplastique cristallin. Il dégage peu d'odeur lors de l'impression 3D.

Propriétés mécaniques : Entre ces 4 matériaux, le nylon est qui a les meilleures propriétés mécaniques d'allongement à la rupture et de résistance à la fatigue. Il présente une très bonne adhésion entre les couches. Les objets 3D en nylon présentent ainsi une bonne flexibilité. Plutôt que de le casser, il va fléchir et plier. Très bonne perméabilité à l'humidité et médiocre aux gaz.

Aspect visuel et post-traitement: Il présente facilement de retrait/décollement et filaments sur la pièce. La couleur est le naturel mais il peut également être coloré avec de la teinture. Aussi c'est possible de sabler et polir.

Le nylon 618 a tendance à facilement absorber l'humidité de l'air, ce qui peut provoquer de la vapeur d'eau lors de son utilisation, il faut le stocker dans un endroit bien sec. Par ailleurs le nylon est résistant à l'acétone, à l'inverse de l'ABS et à Alcohols, Resins+MEK, Oils, Acetone, Most all Alkaline...

Pièces à imprimer avec Nylon :

- Pièces mécaniques
- Pièces minces sont très flexibles et peuvent être utiles pour créer des choses qui doivent fléchir régulièrement pendant l'utilisation telle que des sangles ou des boucles.

2.1.3.4. PET (Polytéréphtalate d'éthylène)

Le PET est le thermoplastique polyester amorphe le plus commun et notamment le matériau le plus utilisé pour les bouteilles d'eau gazeuse car il est léger, transparent, extrêmement solide, et étanche à de nombreux gaz comme le CO2. Il ne libère pas de gaz quand il est imprimé.

Propriétés mécaniques : Le PET est un matériau assez rigide et très léger, très résistant aux chocs. Il possède une résistance hors-norme qui en fait un des filaments les plus solides du marché. La rigidité est moyenne ainsi comme résistance à la chaleur. Il s'agit également d'un bon isolant électrique.

Aspect visuel et post-traitement: Surfaces brillantes, il est également ultra transparent et laisse facilement passer la lumière. Il ne présente pas de décollement et défauts importants non plus.

Pièces à imprimer avec PET :

- Récipients alimentaires (c'est le seul matériau autorisé par FDA)
- Éléments de décoration
- Composants électriques

*Toute création nécessitant transparence, solidité, étanchéité ou contact alimentaire.

2.2. Etudes et recherche d'information

2.2.1. Paramètres d'impression

En premier lieu c'est essentiel connaître bien le fonctionnement de l'imprimante et surtout le significat de tous les paramètres d'impression qu'il y a sur elle et sur Cura. Sur le manuel *Mode d'emploi Cura* [1], on trouve la description de tous les paramètres.

Les paramètres ont des limitations définies pour la mécanique de l'imprimante même mais, aussi selon le matériau les paramètres ont besoin de valeurs différentes.

Sur le fichier Excel *Paramètres d'impression* on peut trouver un cadre avec tous les paramètres, leurs valeurs ou leur intervalle recommandé.

2.2.1.1. Facteurs clés de succès

Pendant les essais, il faudra changer des paramètres et les analyser, néanmoins il y a un total de 58 paramètres d'impression : c'est impossible de les contrôler et de les changer tous au même temps. Il faudra donc les réduire et la meilleure manière de les qualifier c'est de faire une analyse de facteurs clés de succès.

Un facteur clé de succès (ou FCS) est un élément essentiel à prendre en compte pour s'attaquer à un marché ou à le objectif de l'entreprise, dans notre cas, c'est le besoin d'amélioration des pièces imprimés à l'IFMA.

Les facteurs choisis sont:

- a) **La précision des mesures :** C'est une qualité qu'on veut améliorer sur les pièces et il y a des paramètres, comme la hauteur de couche que peuvent aider être plus précis.
- b) **L'aspect visuel final :** La rugosité, la couleur et la brillance, entre d'autres, sont propriétés qu'on veut améliorer et qui sont importantes pour quelques fonctionnalités.
- c) **Le temps-vitesse d'impression :** Sans laisser de côté la qualité des pièces on veut optimiser les temps d'impressions pour n'avoir pas d'impressions très longues.

- d) **Les propriétés mécaniques** : La résistance, élongation, rigidité des pièces sont facteurs de notre intérêt et les paramètres peuvent avoir un effet sur eux.

Ensuite, on a ponctué chaque paramètre selon le degré d'importance sur le facteur de 1 à 5 ; 1 c'est si l'effet du paramètre est nul sur le facteur clé, et 5 si le paramètre a un grand effet sur le résultat du facteur (voir annexe 2).

A la fin, des 58 paramètres ont resté que 27 qu'on peut changer selon le type d'impression à notre avis. Les autres on va les laisser à la valeur prédéfinie par le fabricant.

2.2.2. Défaits d'impression

Les défauts d'impression sont plusieurs et les causes peuvent être très différentes. Avant de commencer à imprimer et fer des essais on a lu des guides [2] pour savoir qu'est qu'on peut trouver pendant les impressions et comment arranger les problèmes.

Il n'y a de plus habituels comme le décollement (« Warping »), la sous extrusion ou le pied d'éléphant (« Elephant's foot »).

3. Expérimentation

Une fois connu le fonctionnement de l'imprimante et des matériaux, on a commencé faire des essais, on peut les diviser en deux parties : essais pour déterminer les propriétés mécaniques (essais à traction et flexion) et essais d'étude et amélioration de la qualité des pièces.

3.1. Essais à traction et a flexion

Les essais à traction et à flexion ont été faits pour connaître les propriétés des pièces avec les matériaux qu'on a. En plus, l'effet de certains paramètres sur les propriétés mécaniques et, aussi, sur d'autres comme les dimensions, la qualité des pièces et des défauts.

Les essais ont été faits en même temps que d'autres du plan d'essai, mais on va commencer par présenter ces expérimentations mécaniques afin de connaître mieux les matériaux et faciliter la compréhension des tests du plan d'essais.

- Essai de flexion

On a réalisé un essai de flexion avec des éprouvettes pour connaître les propriétés à flexion des matériaux plus communs (l'ABS et le PLA), mais surtout pour regarder l'union entre les couches.

Après d'avoir lu quelques études scientifiques [4], [5], [6], [7], [8], on a décidé que les paramètres les plus importants sur les propriétés mécaniques et l'aspect visuel des matériaux imprimés par FDM sont les suivants.

Températures	Température d'impression (°C)	<i>3 options</i>
Qualité	Hauteur de couche (mm)	<i>2 options</i>
Vitesse et température	Vitesse d'impression (mm/s)	<i>3 options</i>

Tableau 2. Paramètres choisis pour les essais à traction

- Essai de traction

Le but de cet essai est de connaître les propriétés mécaniques de tous les matériels qu'on a et voir comment les propriétés changent avec la modification de certains paramètres d'impression.

A partir des résultats de l'essai de flexion réalisé, on a décidé quels paramètres on va changer à chaque matériau pour connaître leur influence sur les propriétés.

3.2. Plan d'essais

Les essais ont été réalisés sur pièces avec des géométries très différentes et pour chacun le but a été différent : arranger des défauts, connaître la précision des trous, choisir la meilleure direction d'impression des pièces... Tous les tests ont suivi une procédure que c'est la suivante :

- Objectifs** : Définition des objectifs de l'essai
- Protocole**
 - Pièce** : Dimensions, caractéristiques et images de la pièce (voir figure 3).
 - Paramètres importants fixés** : Tous les paramètres choisis pour chaque test sont dans un fichier Excel mais les plus importants (si c'est important pour comprendre l'expérimentation) sont montrés sur le plan d'essai.
 - Matériaux et conditions initiales additionnelles** : Sont les matériaux qu'on a utilisés pour faire l'essai et les conditions externes ajoutés comme la colle sur le plateau ou la boîte.
 - Procédure de l'essai** : Qu'est-ce qu'on a fait pendant l'essai ; changer des paramètres, comment et pourquoi, changer la géométrie de la pièce, le matériau...
- Résultats** : S'il y a des résultats numériques (en la plupart des essais, les résultats sont dans la procédure-même pour faciliter la compression).
- Conclusions et perspectives** : Cela qu'on a appris avec l'essai et si pendant l'essai on s'est rendu compte de quelque chose qu'on n'avait pas pensé avant.

Dimensions (mm)	X x Y x Z (selon les axes du plateau d'impression)
Taille (Grande/ Petite)	Grande : $\leq 0.05\%$ Volume d'impression maximal Petite : $\geq 0.05\%$ Volume d'impression maximal
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Si la proportion de la pièce en contact avec le plateau est importante ou normale.
Trous (Avec/ Sans)	S'il y a quelque trou
Surfaces (Plates/ Courbes)	S'il y a quelque surface non plate, on la considérera la pièce comme courbe.
Détails (Avec/ Sans)	La pièce a détails qu'on considéra importants pour l'impression
Surplombs (Avec/ Sans)	Il y a des surplombs
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec remplissage ou vide
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Haute : Hauteur de couche = 0.2 mm Basse : Hauteur de couche = 0.1 mm
Bridges (Avec/ Sans)	S'il y a ponts ou non

Tableau 3. Caractérisation des pièces

4. Essai de flexion

4.1. Généralités

La méthode est utilisée pour l'étude du comportement en flexion des éprouvettes et pour la détermination de la résistance en flexion, du module en flexion et d'autres aspects des relations entre la contrainte et la déformation en flexion dans les conditions définies.

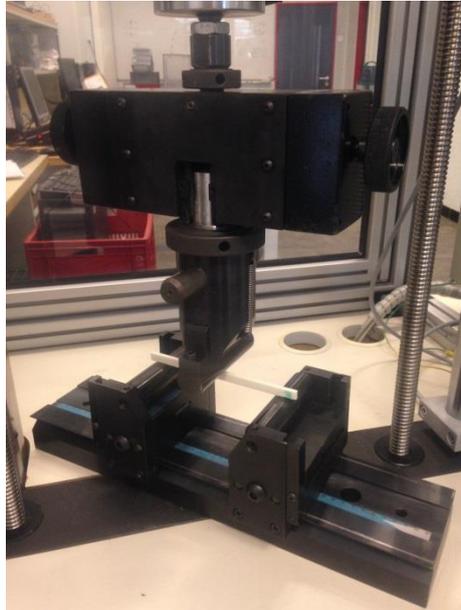


Figure 5. Essai de flexion sur la UTS 20K de ZWICK

4.1.1. Eprouvette

C'est une pièce qui permet de faire des essais à flexion et adaptée aux dimensions nécessaires dans la machine disponible au CTT.

l (mm)	180
b (mm)	4
h (mm)	10

Tableau 4. Mesures des éprouvettes

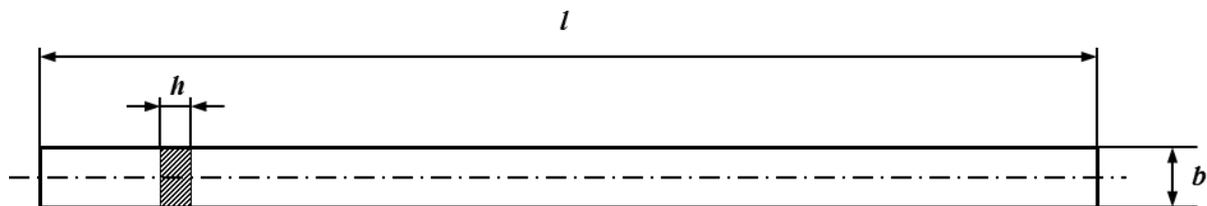


Figure 6. Mesures caractéristiques des éprouvettes

4.1.2. Mode opératoire

Elle s'applique à une poutre supportée sans contrainte, chargée au milieu de sa portée (essai de chargement en trois points). La machine utilisée est l'UTS 20 K de ZWICK qui est dans le CTT à l'Institut Français de Mécanique Avancée.

L'essai est réalisé de la forme suivante :

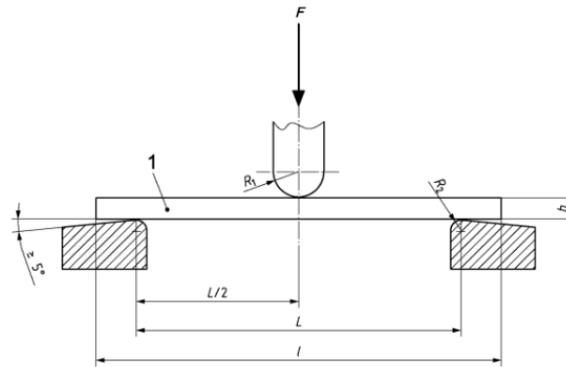


Figure 7. Mode opératoire

La vitesse d'essai va être de 0,25mm/s que c'est égal à 15mm/min, avec une « Force standard ».

4.1.3. Valeurs résultat

- **Contrainte en flexion σ_f (MPa)**

Contrainte nominale de la surface externe de l'éprouvette au milieu de la portée.

- **Contrainte en flexion à la rupture σ_{fB} (MPa)**

Contrainte en flexion à la rupture de l'éprouvette.

- **Résistance à la flexion σ_{fM} (MPa)**

Contrainte maximale en flexion supportée par l'éprouvette durant un essai de flexion.

- **Flèche s (mm).**

Distance parcourue durant la flexion, à partir de la position initiale, par la surface inférieure ou supérieure de l'éprouvette au milieu de la portée.

- **Module d'élasticité en flexion module en flexion E_f^* (MPa)**

Rapport de la différence de contrainte $\sigma_{f2} - \sigma_{f1}$ à la différence de déformation correspondante $\varepsilon_{f2} (= 0,0025) - \varepsilon_{f1} (= 0,0005)$.

* Le module en flexion représente seulement une valeur approximative du module d'élasticité de Young.

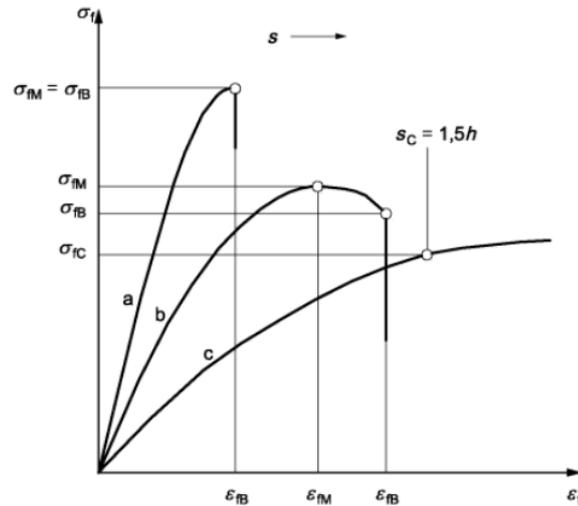
- **Déformation en flexion à la rupture ε_{fB} (sans dimension ou en pourcentage (%))**

Déformation en flexion à la rupture de l'éprouvette.

- **Déformation en flexion à la résistance en flexion ε_{fM} (sans dimension ou en pourcentage (%))**

Déformation en flexion à la contrainte maximale en flexion.

Selon le plastique, la courbe peut-être de trois types différents.



Courbe a Éprouvette avec rupture avant le seuil d'écoulement.

Courbe b Éprouvette présentant un maximum puis une rupture avant la flèche conventionnelle, s_C .

Courbe c Éprouvette ne présentant ni maximum, ni rupture avant la flèche conventionnelle, s_C .

Figure 8. Courbes typiques contrainte - déformation

Les formules de calcul nécessaires pour connaître les propriétés mécaniques sont:

On peut calculer la **tension** de la pièce à chaque force appliquée.

$$\sigma = \frac{F * L}{4 * \frac{b * h^2}{6}}$$

A partir du déplacement de l'éprouvette on peut calculer la **déformation à flexion**

$$\varepsilon = \frac{6 * s * h}{L^2}$$

A partir de la contrainte et la déformation en flexion on peut calculer le **module de flexion**

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

4.2. Procédure de l'essai

On imprimera un total de 18 pièces avec toutes les combinaisons des paramètres pour voir l'influence de chaque un aux résultats.

On fera un essai de flexion parce que cet essai permettra de voir la rigidité des pièces, obtenir la résistance à flexion et voir donc l'union des couches.

Le module de flexion est la relation entre la force appliquée sur un matériau et la tension résultante.

On essaiera toutes les pièces à flexion et on verra le déplacement maximum avant la rupture (flèche) et la force nécessaire pour les casser, la résistance à flexion de la pièce.

Les résultats qu'on va analyser sont la **résistance à la flexion** (σ_{fM}) et la **déformation en flexion à la rupture** (ε_{fB}).

4.3. Matériaux

Les matériaux à essayer à flexion sont l'ABS et le PLA. Il y a plein d'études avec des essais à traction avec ces deux matériaux mais il n'y a pas beaucoup à flexion. On va connaître les propriétés des matériaux imprimés avec FDM de la nôtre imprimante et de plus on va voir les différences entre l'union des couches.

❖ **ABS – Couleur : Gris et Blanc opaque/ Fabricant : Esun**

❖ **PLA – Couleur : Bleu Transparent/ Fabricant : Esun**

4.4. Définition des paramètres

4.4.1. Paramètres fixés

La **température du plateau** on va laisser la recommandé pour la plus part des études trouvés et pour les fabricants du filament plastique : 80°C l'ABS et 50°C le PLA.

Le **remplissage, l'épaisseur de la coque et l'épaisseur dessus/dessous** sont des facteurs qui ont un important effet sur la densité du la pièce et sa rigidité, donc on a décidé de faire les éprouvettes **100% remplis**, pour éviter que ces paramètres aient influence sur les résultats. De plus, il n'y aura pas de interaction entre eux.

Le **diamètre de la buse est de 0.4mm**, on ne peut pas le changer.

On va imprimer les pièces avec du « **Brim** » pour réduire le décollement et avoir moins déformation.

Le **ventilateur** va être **éteint** pour améliorer l'union entre les couches.

4.4.2. Paramètres à étudier

Ensuite, les paramètres qu'on veut étudier leurs effets sur les pièces sont la température d'extrusion, la vitesse d'impression et la hauteur de couche.

- La **température d'extrusion** il y a une large marge d'options et il faut le réduire et connaître le mieux.
- La **vitesse d'impression** est aussi un facteur important. Elle a un effet direct sur le temps d'impression et aussi sur l'union entre couches parce qu'à plus vitesse, la couche antérieure est plus chaud quand on imprime la suivant et le collement entre les couches est plus fort.
- La **hauteur de couche** a aussi un important effet sur la qualité des pièces et sur le temps d'impression, donc on veut savoir si elle a un effet important aussi sur leurs propriétés mécaniques.

Les niveaux choisis pour chaque matériel sont les suivants, avec 3 différents options pour la température, 3 pour la vitesse et 2 pour la hauteur de couche.

Facteurs ABS	Niveau bas (-1)	Niveau intermédiaire (0)	Niveau haut (+1)
Température (°C)	220	235	250
Vitesse (mm/s)	40	60	80
Hauteur de couche (mm)	0.1	-	0.2

Tableau 5. Niveaux des paramètres pour l'ABS

Facteurs PLA	Niveau bas (-1)	Niveau intermédiaire (0)	Niveau haut (+1)
Température (°C)	200	210	220
Vitesse (mm/s)	30	60	90
Hauteur de couche (mm)	0.1	-	0.2

Tableau 6. Niveaux des paramètres pour le PLA

4.5. Résultats

4.5.1. ABS

Les éprouvettes d'ABS ont été toutes imprimées avec des résultats différents. Dans l'annexe 4 il y a les résultats obtenus avec chaque éprouvette.

Dimensions

Pour analyser les dimensions des pièces on les a mesurées et on a calculé la moyenne, et les erreurs suivantes :

- L'erreur absolue est la différence entre une valeur et la moyenne de toutes les valeurs, pris comme la valeur réelle.
- L'erreur relative est le quotient entre l'erreur absolue et la moyenne de toutes les valeurs.
- On a calculé aussi la variation par rapport à la valeur théorique de chaque mesure pour voir si les résultats sont précis ou non.

Dir.	Mesure	Valeur théorique(mm)	Moyenne (mm)	Erreur absolue(mm)	Erreur relative (%)	Variation par rapport à la valeur théorique (%)
X	l	180	179,5	1	0,5571	0,2778
Y	b	4	3,866	0,06080	1,573	3,569
Z	h	10	9,886	0,1130	1,143	1,217

Tableau 7. Dimensions caractéristiques et résultats obtenus

On peut voir que tous les erreurs sont au tour de 1%, on peut accepter les résultats et dire que l'imprimante est bien calibrée et qu'il n'y a pas des grandes différences entre chaque pièce imprimée. Donc ces paramètres ne sont pas importants pour avoir une bonne précision dimensionnelle.

Cependant il y a des variations des mesures, lesquelles peuvent être à cause d'une mauvaise calibration des axes, de la rétraction des pièces pendant la impression, de l'outil utilisé pour prendre les mesures (d'un pied à coulisse), etc.

De plus, on a analysé la relation entre la mesure b et h, on peut voir que quand une dimension est plus grande l'autre est plus petite. C'est à cause que la même quantité de matériau est extrudé en

chaque pièce, mais si la buse est trop proche de la pièce, le matériau s'étend en direction horizontal, la hauteur totale est plus petite et la ampleur est plus grande ; et à l'inverse si la buse est plus loin de la pièce ou du plateau.

Cet effet peut nous aider connaître si le plateau de l'imprimante ou les axes sont bien calibrés. Dans cette situation, il n'y a aucune tendance très détachable mais la direction Y (dimension « b ») est toujours par-dessus de sa valeur nominale et la Z (dimension h) est par-dessous, on pourrait imaginer que la buse est trop proche du plateau. C'est pour cela qu'on a calibré le niveau du plateau en plusieurs occasions.

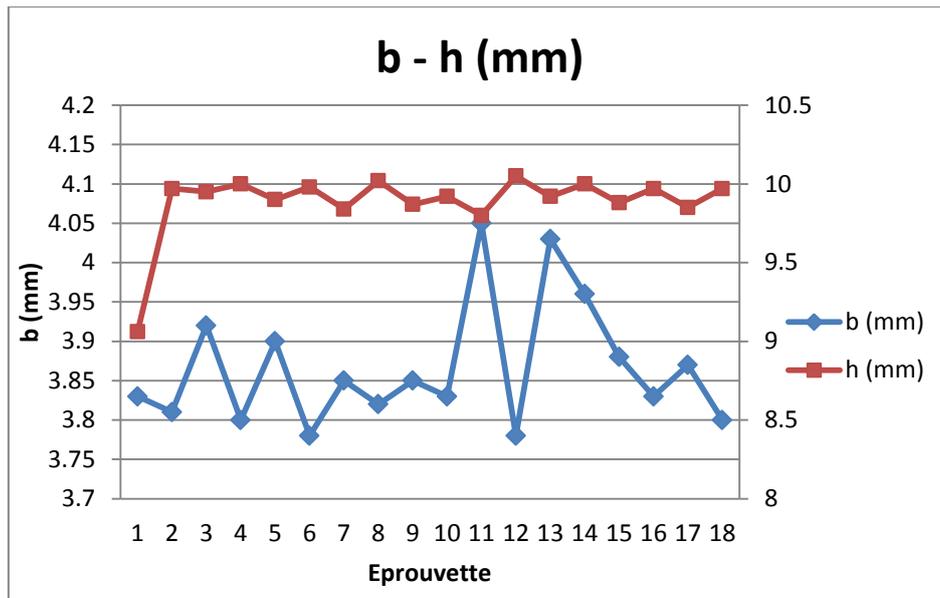


Figure 9. Comparaison des mesures des éprouvettes

Défauts

Le défaut le plus courant de l'ABS est le décollement et la rétraction des pièces. C'est à cause de la contraction de l'ABS, son coefficient de dilatation est plus grand que celui du PLA. On peut déduire à partir du graphique que :

- Plus vitesse -> moins décollement.
- Pour une même vitesse, hauteur de couche plus grande -> moins décollement
- Température à laquelle il y a moins de décollement est à 235°C mais l'aspect visuel n'est pas toujours beau.
- **Option optimale** en concernant le **décollement** et **l'aspect visuel** : T = 220°C ; v = 60 mm/s ; hc = 0,2mm.

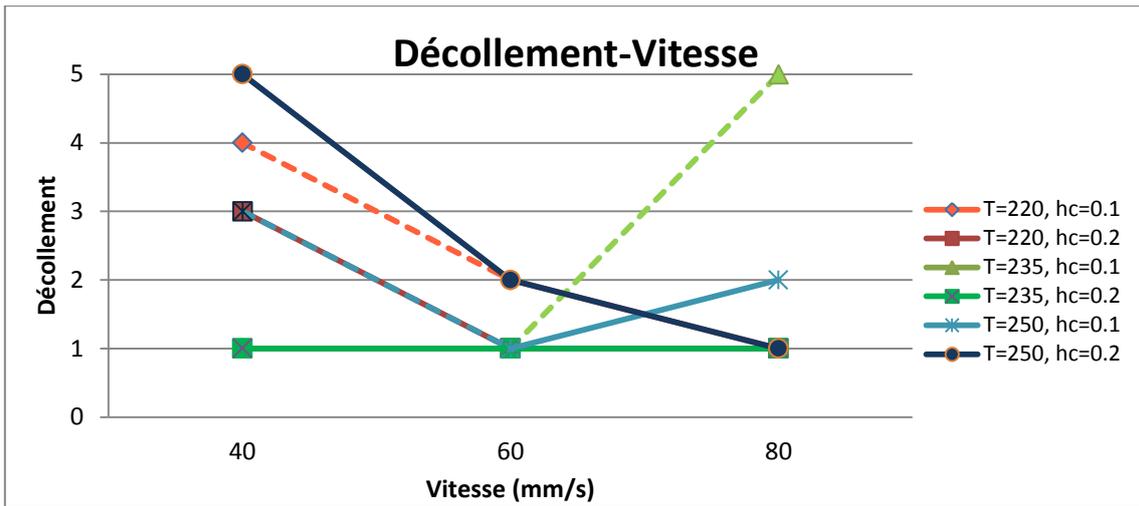


Figure 10. Relation entre le décollement et les paramètres d'impression

Ensuite, on a croit intéressant voir la relation entre le décollement des pièces et sa résistance a flexion.

On peut voir que généralement les pièces avec plus de décollement sont celles qui ont le plus de résistance, ça peut être à cause de l'accumulation de matériau au centre de la pièce, la géométrie différente, des lignes plus proches, etc.

Pour analyser les résultats il faut prendre conscience de cette problématique et étudier mieux les pièces sans décollement, lesquelles offrent des résultats plus fiables.

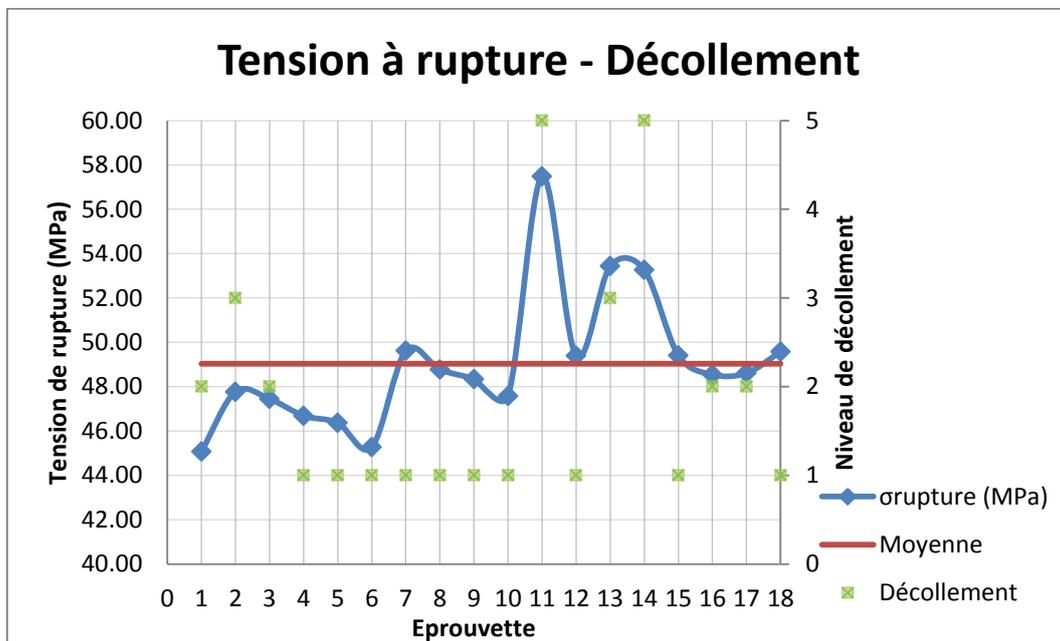


Figure 11. Tension à rupture des éprouvettes et niveau de décollement de chaque une

Tension à rupture

Toute suite on peut voir les différences des contraintes à flexion entre les niveaux de chaque paramètre. C'est clair donc que le paramètre plus influent est la température (un 5% de variation), suivi de la vitesse et la hauteur de couche, où l'influence est très petite. La contrainte à flexion du

matériau injecté est de 66 MPa, c'est normal qu'avec FDM elle soit plus basse mais pas trop loin, on est donc dans les résultats souhaités (environ 50 MPa).

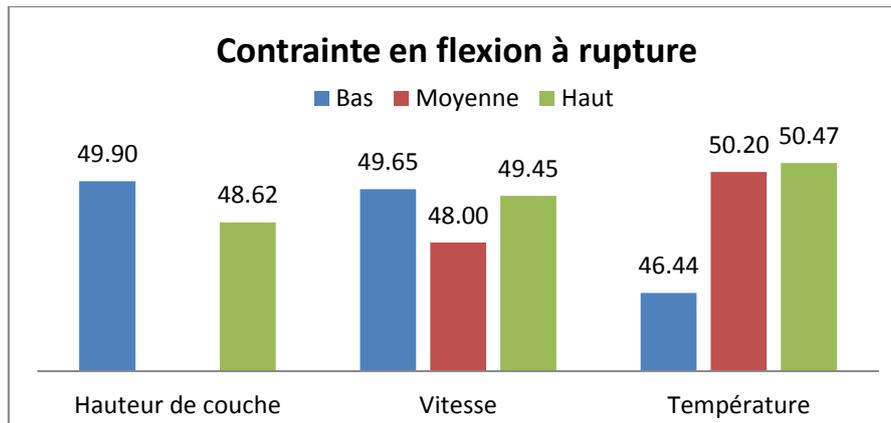


Figure 12. Moyennes des contraintes selon le niveau des paramètres

Après d'avoir vu les résultats, il faut les analyser.

Au début de l'essai, on ne connaissait pas les paramètres et leurs effets sur les pièces, toutefois maintenant selon les résultats on a vu quels sont les niveaux optimaux de notre pièce.

Pour faire plus facile l'étude, on va choisir deux niveaux pour chaque facteur et on va réaliser un plan factoriel avec les résultats. On va enlever les suivants résultats :

- Les impressions à 250°C ont une bonne résistance à flexion mais l'aspect visuel des pièces est très mauvais et très variable, c'est donc une température à laquelle on ne va jamais imprimer.
- La vitesse de 80 mm/s est très vite, on peut imprimer à cette vitesse seulement quand on a des pièces avec une géométrie très simple. Les réponses à cette vitesse sont aussi variables et on va l'exclure de l'étude factoriel.

A la fin, on va étudier la relation et la interaction entre les facteurs suivants avec deux niveaux, un haut et un bas chaque un.

L'essai est de 3 facteurs en deux niveaux, c'est une étude factorielle de $2^3 = 8$ tests.

		Facteur					Facteur		
		A	B	C			A	B	C
Test	Eprouvette	Temp.	Vitesse	H. couche	Eprouvette	Temp.	Vitesse	H. couche	
1	1	-1	-1	-1	1	220	40	0,1	
2	2	-1	-1	+1	2	220	40	0,2	
3	3	-1	+1	-1	3	220	60	0,1	
4	4	-1	+1	+1	4	220	60	0,2	
5	7	+1	-1	-1	7	235	40	0,1	
6	8	+1	-1	+1	8	235	40	0,2	
7	9	+1	+1	-1	9	235	60	0,1	
8	10	+1	+1	+1	10	235	60	0,2	

Tableau 8. Plan factoriel

L'effet nous informe de comment la réponse (contrainte maximale) va changer si on change le niveau du facteur. Aussi le signe de l'effet nous défie le niveau qui fait augmenter la réponse, si c'est positif c'est le niveau haut le plus bon, si c'est négatif c'est le bas. Dans le diagramme Pareto on voie les facteurs et interactions ordonnés selon l'importance sur la réponse.

Facteur	Effet	Coeff
Constante		47,66
Hauteur de couche	0,08165	0,0408
Vitesse	-0,2972	-0,1486
Température	1,8323	0,9162
Hauteur de couche*Vitesse	-0,8414	-0,4207
Hauteur de couche*Température	-0,8831	-0,4416
Vitesse*Température	-0,9411	-0,4706
Hauteur de couche*Vitesse*Température	0,8846	0,4423

Tableau 9. Effet des paramètres

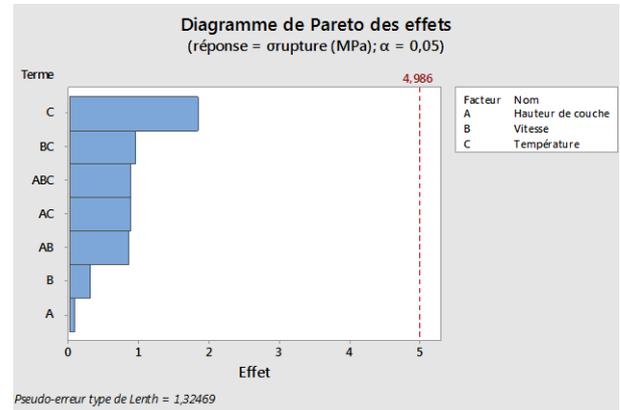


Figure 13. Diagramme de Pareto

Après on a analysé la interaction entre les facteurs, il n'y a mais l'effet est très petit. Néanmoins on peut les voir dans les graphiques pour savoir comment sont les relations entre les paramètres sur le résultat de la pièce.

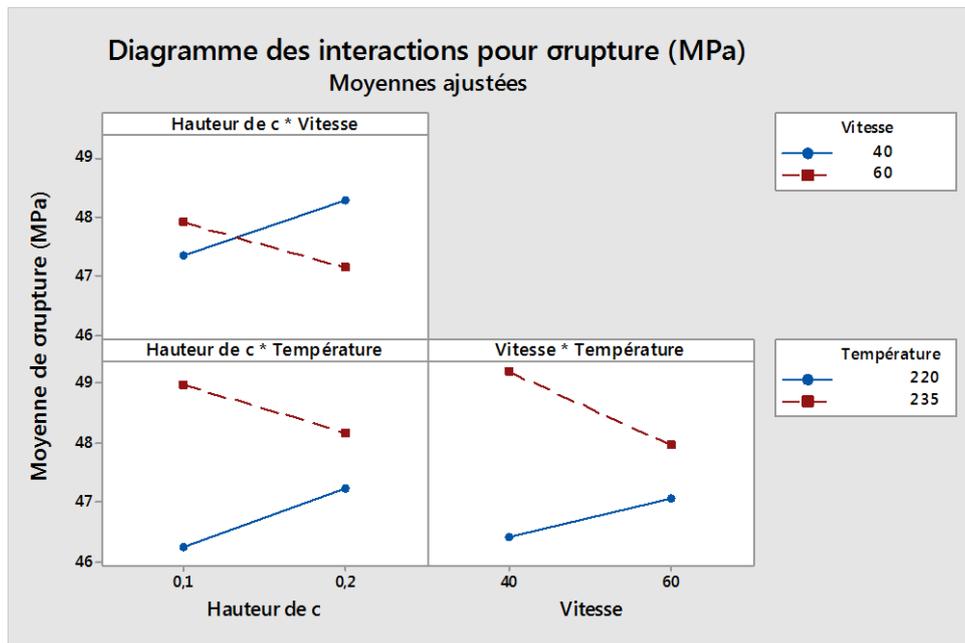


Figure 14. Interaction de l'effet des paramètres sur la contrainte à rupture

Déformation à rupture

La déformation à flexion est entre un 4,78% et un 6,712% ; la moyenne des valeurs est en 5,94%.

On ne peut rien conclure de l'effet des facteurs sur la déformation : il n'y a pas une distribution claire des valeurs mais les éprouvettes 7,8, 13, 14 (imprimées plus doucement - 40 mm/s) ont une déformation un peu par-dessus de la moyenne.

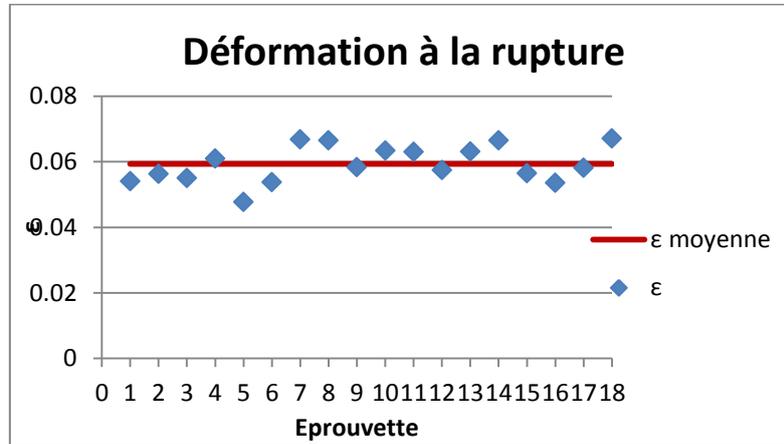


Figure 15. Déformation à la rupture de l'ABS

4.5.2. PLA

Dimensions

Comme pour l'ABS, on a calculé les erreurs des mesures, comme pour l'ABS l'erreur est petite et la variabilité peut être à cause de plusieurs facteurs.

Dir.	Mesure	Valeur théorique(mm)	Moyenne (mm)	Erreur absolue (mm)	Erreur relative (%)	Variation par rapport à la valeur théorique (%)
X	l	180	180	1	0,005556	0
Y	b	4	3,984	0,1213	3,044	3,031
Z	h	10	9,919	0,0484	0,488	0,813

Tableau 10. Dimensions caractéristiques et résultats obtenus

Défauts

La sous extrusion a été le seul défaut sur les pièces de PLA, toutefois il a été très important surtout pour températures plus basses que 220°C et vitesses plus grandes que 40 mm/s et/ou hauteurs de couche de 0,2mm. **La plupart des pièces à 200°C et 210°C ont été impossible de finir leur impression et on n'a pas pu analyser leurs propriétés.**

Ensuite, même à une température de 220°C, la sous extrusion aux éprouvettes 16 et 17 a été grande, les pièces avaient des grands trous. C'est pour ça que ces éprouvettes ont une résistance plus petite.

Tension à rupture

On va analyser seulement les éprouvettes imprimés à 220°C parce que ce sont lesquelles où on peut comparer les différents paramètres. C'est clair que la meilleure température pour imprimer le PLA est à 220°C et maintenant il faut donc comparer l'effet de la vitesse et de la hauteur de couche.

Les contraintes du PLA ont été entre 112,68MPa et 25,15 MPa, mais les deux pires résultats sont des éprouvettes qui ont beaucoup de sous extrusion.

On peut voir que la meilleure résistance à flexion est une hauteur de couche de 0,1mm et une lente vitesse d'impression, 30 mm/s.

Si on veut réduire le temps d'impression, on peut augmenter la vitesse d'impression où augmenter la hauteur de couche et on aura la même qualité visuel et résistance. En la figure 16 on peut voir que le plus rapide est d'augmenter la hauteur de couche en laissant la vitesse à 30 mm/ (ligne bleu à 0,2mm) ; on gagne 10min.

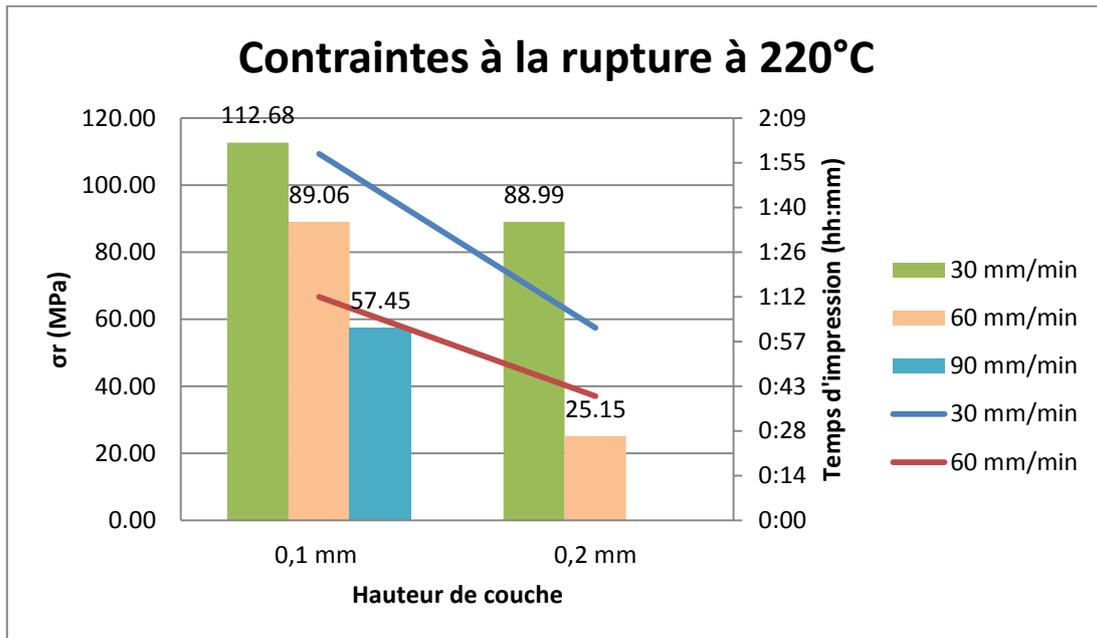


Figure 16. Contraintes à rupture selon les niveaux des paramètres

Déformation à rupture

Les déformations sont entre un 4% et un 5%, et la moyenne de toutes les éprouvettes est 4,36%, les déformations sont petites, elles ont lieu surtout à la zone élastique car le PLA est un matériau rigide qui a une rupture fragile.

La variabilité des déformations est très petite, pourtant les paramètres d'impression n'ont pas un effet important sur cette propriété.

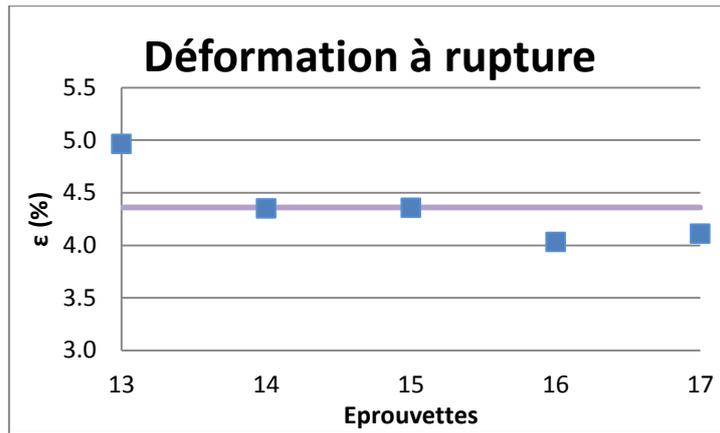


Figure 17. Déformation a rupture des éprouvettes

4.6. Conclusions

4.6.1. Générales

Le résultat significatif de l'essai est la résistance à la flexion, c'est-à-dire les contraintes maximales des matériaux. On a décidé de comparer la moyenne de toutes les éprouvettes avec la configuration qu'on a pris comme la optimale.

Dans le cas de l'ABS la optimale est inférieure à la moyenne, cela est parce que les éprouvettes imprimés à plus de température ont une meilleure union des couches, plus de résistance, mais le décollement est important et l'aspect visuel est mauvais ; pourtant on ne peut pas imprimer nos pièces à ces températures. Il faut ajouter aussi que la différence est peu significative tandis que la différence visuelle est grande.

Par contre, dans le cas du PLA la pièce avec le meilleur aspect visuel a aussi la meilleure résistance à la traction, c'est pour cela que la différence est importante. D'ailleurs, la moyenne du PLA est assez différente à la valeur optimale parce que les pièces avec sous extrusion qui ont été considérés (éprouvettes 16 et 17) ont une grande différence en termes de résistance.

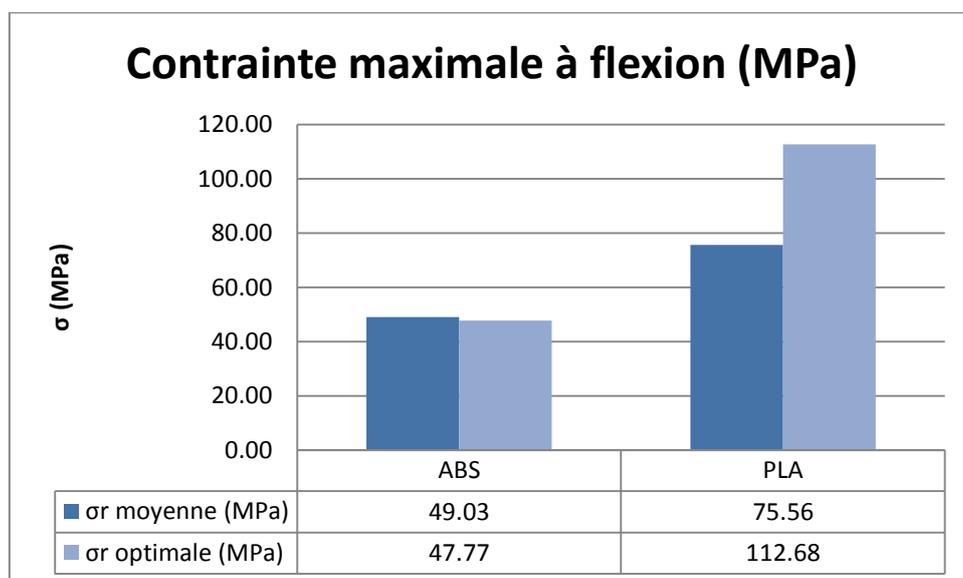


Figure 18. Contrainte maximale à flexion de l'ABS et le PLA

4.6.2. Par matériau

ABS

L'ABS est facile à imprimer dans un grand intervalle de paramètres en modifiant très peu les propriétés mécaniques (maximum entre toutes les pièces un 24% et, respecte la moyenne, un 18%). Les propriétés donc les plus importantes à l'heure de choisir la température, vitesse et hauteur de couche sont la qualité (absence de défauts) et l'aspect visuel (couleur, visualisation des couches).

ABS			
Critère	Température (°C)	Vitesse (mm/s)	Hauteur de couche (mm)
Qualité	220	30 - 60	0.1 / 0.2
Propriétés mécaniques à flexion	235	30 - 60	0.1 / 0.2
OPTIMAL	220	30 - 60	0.1 / 0.2

Tableau 11. Niveaux optimaux des paramètres pour l'ABS

PLA

Le PLA, et spécialement le Bleu transparent, est un matériau plus difficile à imprimer. Il faut avoir bien réglé les paramètres pour pouvoir l'imprimer. Cependant, une fois on a les bons paramètres, les pièces sont plus stables, la variabilité est plus petite.

Les différences entre les différentes éprouvettes sont importantes. D'abord, les propriétés mécaniques varient maximum un 40% respecte la moyenne. De plus, la capacité d'imprimer les pièces et l'apparition de sous extrusion est aussi une importante et visible différence entre les éprouvettes, le PLA est donc très sensible aux changements des paramètres.

PLA Bleu			
Critère	Température (°C)	Vitesse (mm/s)	Hauteur de couche (mm)
Qualité	220	30	0.1
Propriétés mécaniques à flexion	210- 220	30	0.1
OPTIMAL	220	30	0.1

Tableau 12. Niveaux optimaux des paramètres pour le PLA

5. Essai de traction

5.1. Généralités

L'essai est utilisé pour étudier le comportement en traction des éprouvettes pour la détermination de la résistance en traction, du module d'élasticité en traction et d'autres aspects de la relation contrainte/déformation en traction dans des conditions définies.

Le principe de l'essai est que l'éprouvette subit une traction le long de son axe longitudinal principal à une vitesse constante jusqu'à ce que l'éprouvette se brise ou jusqu'à ce que la contrainte (charge) ou la déformation (allongement) atteigne une valeur prédéterminée. Au cours de ce mode opératoire, la charge et l'allongement supportés par l'éprouvette sont mesurés.

La norme utilisée pour l'essai est la ISO 527-2 : **Plastiques - Détermination des propriétés en traction - Partie 2 : conditions d'essai des plastiques pour moulage et extrusion**

La Norme spécifie les principes généraux pour la réalisation de l'essai : les matériaux qu'on peut essayer, comment calculer les propriétés mécaniques, la géométrie des éprouvettes, le mode opératoire, etc.

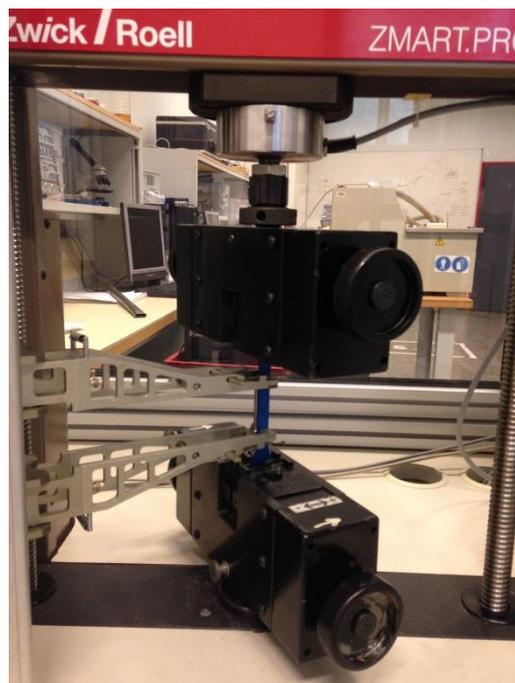


Figure 19. Essai de traction sur la UTS 20K de ZWICK

5.1.1. Eprouvette

Des éprouvettes de types 1A et 1B en forme d'altère conformes à la figure 20 et 21 doivent être utilisées chaque fois que cela est possible. L'éprouvette de type 1A doit être utilisée pour des éprouvettes à usages multiples directement moulées par injection, l'éprouvette de type 1B doit être utilisée pour les éprouvettes usinées. Alors, dans notre essai on va utiliser la éprouvette 1B qu'on a conçu ça géométrie avec le *Catia V5*.

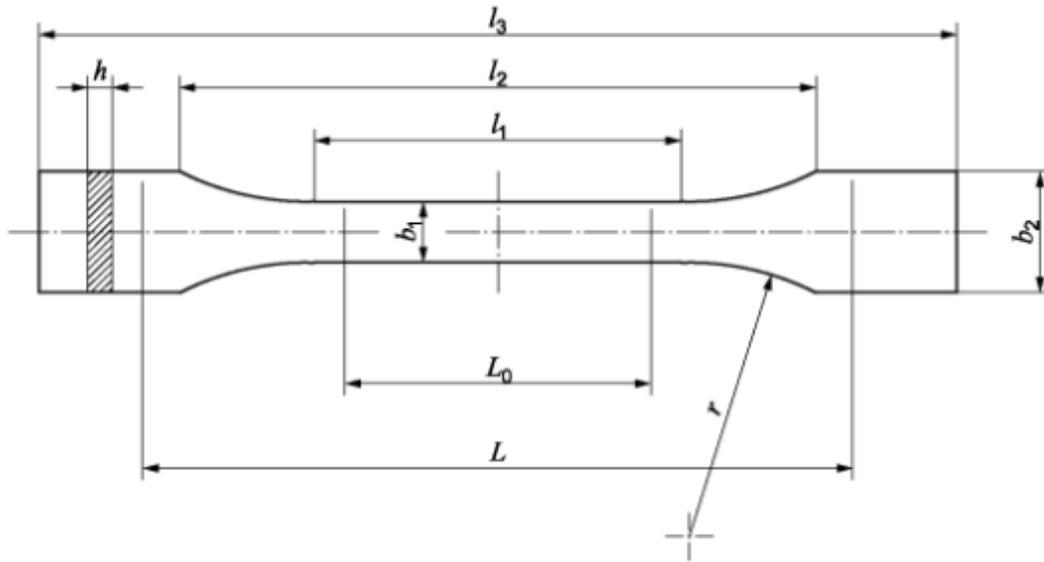


Figure 20. Dimensions caractéristiques des éprouvettes

Type d'éprouvette	1A	1B
l_3 Longueur totale ^a	170	? 150
l_1 Longueur de la partie étroite à faces parallèles	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r Rayon	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2 Distance entre les parties larges à faces parallèles ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2 Largeur aux extrémités	$20,0 \pm 0,2$	
b_1 Largeur de la partie étroite	$10,0 \pm 0,2$	
h Épaisseur recommandée	$4,0 \pm 0,2$	
L_0 Longueur de référence (recommandée)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
Longueur de référence (admissible si requise pour le contrôle qualité ou lorsque cela est spécifié)	$50,0 \pm 0,5$	
L Distance initiale entre les mâchoires	115 ± 1	115 ± 1

Figure 21. Mesures caractéristiques des éprouvettes selon la Norme ISO 527

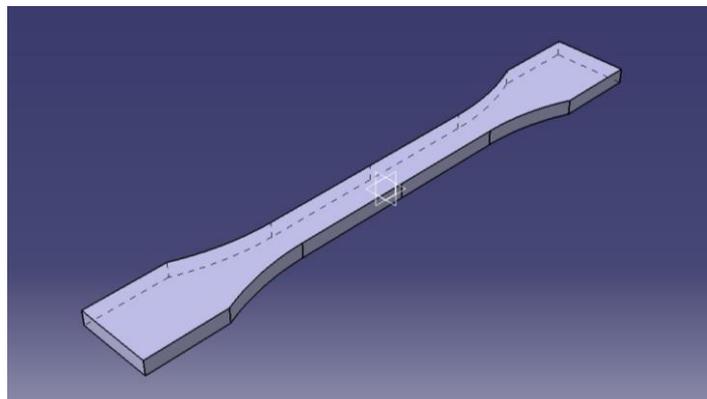


Figure 22. Epreuve conçue sur Catia V5

5.1.2. Mode opératoire

Pour effectuer l'essai, il faut tenir en compte quelques conditions, les plus importants sont les suivants :

- La vitesse d'essai doit être de 1 mm/s pour les éprouvettes.
- Une longueur de référence de 75 mm pour l'extensomètre est préférée en cas d'essai effectué sur une éprouvette à usages multiples. Une longueur de référence de 50 mm est également admissible à des fins de contrôle qualité ou lorsque cela est spécifié.
- Pour la détermination du module d'élasticité dans les conditions $v = 1 \text{ mm/s}$, $L_0 = 75 \text{ mm}$, $L = 115 \text{ mm}$ et $r = 0,0005 \text{ mm}$, la fréquence d'enregistrement pour le signal de déformation supérieure ou égale à 22 s^{-1} .
- Pour le Nylon, la vitesse de l'essai va être $v = 10 \text{ mm/min}$, donc l'éloignement est très grand et l'essai prend beaucoup de temps.
- La machine qu'on va utiliser est la même que à l'essai de flexion, la **UTS 20K de ZWICK**.

5.1.3. Valeurs résultats

Pendant l'essai de traction, on mesure les déformations et contraintes des éprouvettes. Ensuite on représente les graphiques et on peut calculer les propriétés des matériaux en appliquant les termes et définitions suivants.

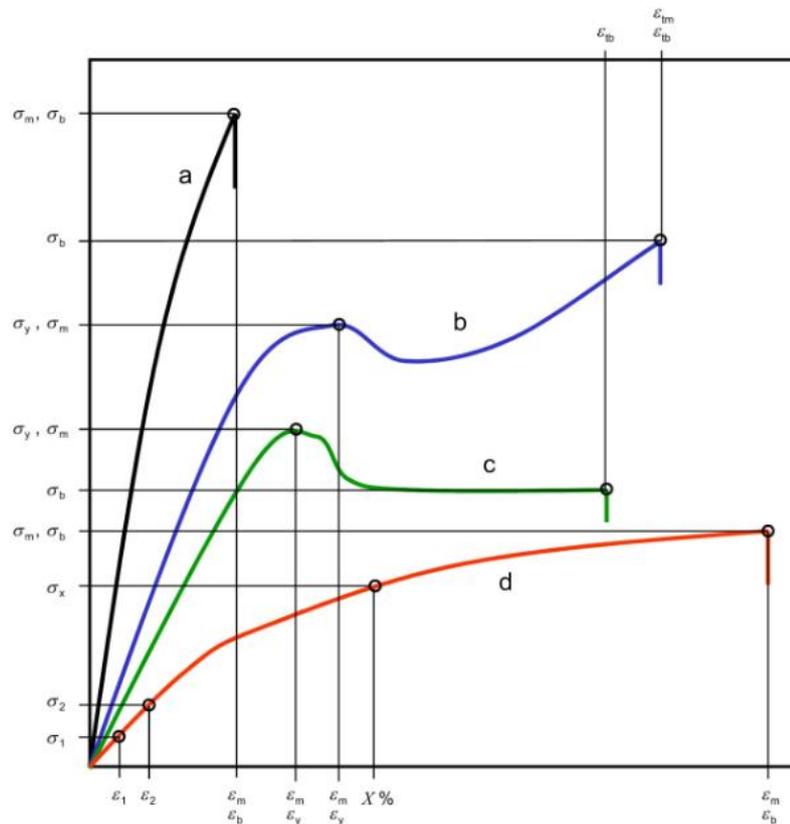


Figure 23. La courbe (a) représente un matériau fragile, se rompant aux faibles déformations sans présenter de seuil d'écoulement. La courbe (d) représente un matériau mou de type caoutchouc, se brisant à des déformations plus importantes (>50 %).

Selon le matériau la courbe contrainte/déformation est différente : La courbe du PLA et du PET est de type c ; le Nylon et de l'ABS, par contre, sont de type d.

Les propriétés qu'on peut obtenir des matériaux avec l'essai sont les suivants :

- **Contrainte** σ (MPa)

Force par unité de surface de la section transversale initiale de la longueur de référence.

- **Contrainte au seuil d'écoulement** ou **limite élastique** σ_y (MPa)

Contrainte à la déformation au seuil d'écoulement.

- **Résistance** σ_m (MPa)

Contrainte au premier maximum ponctuel observé lors d'un essai de traction.

- **Contrainte à la rupture** σ_b (MPa)

Contrainte à laquelle l'éprouvette se rompt.

- **Déformation** ε (%)

Accroissement de la longueur par unité de longueur initiale de la longueur de référence.

- **Déformation au seuil d'écoulement** ε_y (%)

Première occurrence lors d'un essai de traction d'une augmentation de déformation sans augmentation de contrainte.

- **Déformation à la rupture** ε_b (%)

Déformation au dernier point enregistré avant la réduction de la contrainte à une valeur inférieure ou égale à 10 % de la résistance lorsque la rupture se produit avant le seuil d'écoulement.

- **Déformation à la résistance** ε_m (%)

Déformation à laquelle la résistance est atteinte.

- **Déformation nominale** ε_t (%)

Déplacement de la traverse divisée par la distance de serrage.

- **Module d'élasticité** E_t (MPa)*

Pente de la courbe de contrainte/déformation $\sigma(\varepsilon)$ dans l'intervalle de déformation compris entre $\varepsilon_1 = 0,05\%$ et $\varepsilon_2 = 0,25\%$.

**On l'a calculé pour tous les matériaux et toutes les éprouvettes le module d'élasticité comme la norme indique et aussi avec la pente du graphique Contrainte-Déformation à la part élastique pour vérifier et contraster les résultats.*

5.2. Matériaux

Les propriétés des matériaux changent entre les couleurs d'un même matériau et du fabricant. Il faut énoncer qui sont ceux qu'on va étudier.

- ❖ **Nylon Bridge – Couleur : Naturel/ Fabricant : Taulman**
- ❖ **PET t-glase – Couleur : Vert transparent/ Fabricant : Taulman**
- ❖ **PLA – Couleur : Gris opaque/ Fabricant : Esun**
- ❖ **ABS – Couleur : Bleu marin opaque/ Fabricant : Esun**

5.3. Définition des paramètres

Les paramètres définis doivent être justifiés. Il y aura de paramètres égaux pour tous les matériaux et impressions mais, il y aura d'autres à changer pour étudier leurs effets sur les propriétés mécaniques.

5.3.1. Paramètres fixés

D'abord, on a défini des paramètres identiques pour tous les matériaux et éprouvettes.

La **hauteur de couche** va être de **0.2mm** qui est une hauteur de bonne qualité, à laquelle on peut imprimer de bonnes pièces sans un temps d'impression trop long. Surtout, pour des pièces faciles à imprimer, sans détails et avec les surfaces planes est une hauteur de couche bonne.

Le **remplissage, l'épaisseur de la coque et l'épaisseur dessus/dessous** sont des facteurs qui ont un important effet sur la densité de la pièce et sa rigidité, on a décidé donc de faire les éprouvettes **100% remplis**, pour éviter que ces paramètres aient une influence sur les résultats. De plus, il n'y aura pas de interaction entre eux.

Le **diamètre de la buse est de 0.4mm**, on ne peut pas le changer.

On va imprimer les pièces avec du **Brim** pour diminuer le décollement et la rétractation.

Le **ventilateur** va être **éteint** pour améliorer l'union entre les couches.

5.3.2. Paramètres à étudier

Nylon

À partir de l'expérience gagnée avec toutes les impressions réalisées et des études trouvées, on a décidé que les paramètres à étudier sont les suivants :

1. Température d'extrusion
2. Vitesse d'impression

La **température d'extrusion** est un facteur important. Celle-là ne peut être trop basse parce que le matériau ne pourra pas sortir de la buse et il va apparaître de sous extrusion. Toutefois si la température est trop élevée le matériau va brûler et cela peut créer un bouchon dans la buse.

Ensuite la **vitesse d'impression** est un facteur important. La vitesse a un effet direct sur le temps d'impression et aussi sur l'union entre couches parce que plus vite, la couche antérieure est plus chaude quand on imprime la suivante.

Les facteurs sélectionnés ont deux valeurs possibles, on peut les voir dans la Table_

	Niveau bas (-)	Niveau haut (+)
Température d'extrusion (°C)	235	250
Vitesse d'impression (mm/s)	30	60

Tableau 13. Niveaux des paramètres pour le Nylon

Alors, on devra imprimer $2^2 = 4$ combinassions possibles. Chaque éprouvette on va l'imprimer une seule fois parce la variabilité est petite et les temps d'impression sont hauts.

La **température du plateau** sera toujours la même, la définie par le fabricant, 60°C.

PET

Comme le Nylon on a choisi la température d'extrusion à étudier et la vitesse d'impression.

Les facteurs sélectionnés ont deux niveaux possibles :

	Niveau bas (-)	Niveau haut (+)
Température d'extrusion (°C)	210	230
Vitesse d'impression (mm/s)	30	60

Tableau 14. Niveaux des paramètres pour le PET

La **température du plateau** sera toujours la même, la définie par le fabricant, 60°C.

PLA

Les paramètres à étudier serrent la température d'extrusion et la température du plateau et les niveaux de chaque facteur sont :

	Niveau bas (-)	Niveau haut (+)
Température d'extrusion (°C)	210	220
Température du plateau (°C)	50	70

Tableau 15. Niveaux des paramètres pour le PLA

ABS

On a déjà fait l'essai de flexion pour l'ABS, et un fois vus les résultats antérieurs on a conclu que la température d'extrusion, la vitesse d'impression et la hauteur de couche ne sont pas très significantes pour avoir une bonne résistance de la pièce.

Alors on va imprimer une seule éprouvette d'ABS pour connaître la résistance à traction et l'éloignement qui a ce matériau.

A partir des résultats et a partir des études trouves [8], on peut voir qu'il y a de importantes différences entre les propriétés du matériau selon le remplissage de la pièce.

Pour vérifier les résultats des autres études et connaître notre ABS on a décidé d'étudier aussi ce paramètre. On va donc modifier le remplissage en 4 options différentes.

Pièce	Remplissage (%)	
1	100	Pièces complètement remplis sans espaces.
2	50	
3	20	Pièces plus habituels quand on veut optimiser le temps et on n'a pas besoin de beaucoup de résistance.
4	10	Pièces avec une fonctionnalité seulement décorative.

Tableau 16. Niveaux des paramètres pour l'ABS

5.4. Résultats

5.4.1. Dimensions, aspect visuel et défauts

Dimensions

On a mesuré toutes les pièces pour voir les variations des dimensions et on a analysé ses défauts et son aspect général. Dans l'annexe 5, on peut trouver les dimensions de chaque éprouvette et les déviations et erreurs des mesures. En analysant les dimensions, on peut affirmer qu'elles sont bonnes, la variabilité est très petite et il n'y a pas d'importantes différences entre les matériaux.

Néanmoins on peut voir que la plus parte des dimensions en directions X, Y (I3, b1 et b2) sont plus basses que la théorique et, par contre, la hauteur est plus haute à toutes les pièces. Ça peut être due que la buse est mal calibré et est trop loin du plateau : le matériau est déposé trop loin de la pièce, le matériau ne s'écrase suffisant contre la couche antérieure et la direction Z est plus grande que la X et Y. Toutefois, on ne peut pas être sûres parce que il y a des fois que les dimensions sont au-dessus de la réel. L'ABS est le matériau avec les dimensions plus précises et ça peut nous dire qu'on a des bons paramètres d'impression bien réglée (extraits de l'essai antérieur).

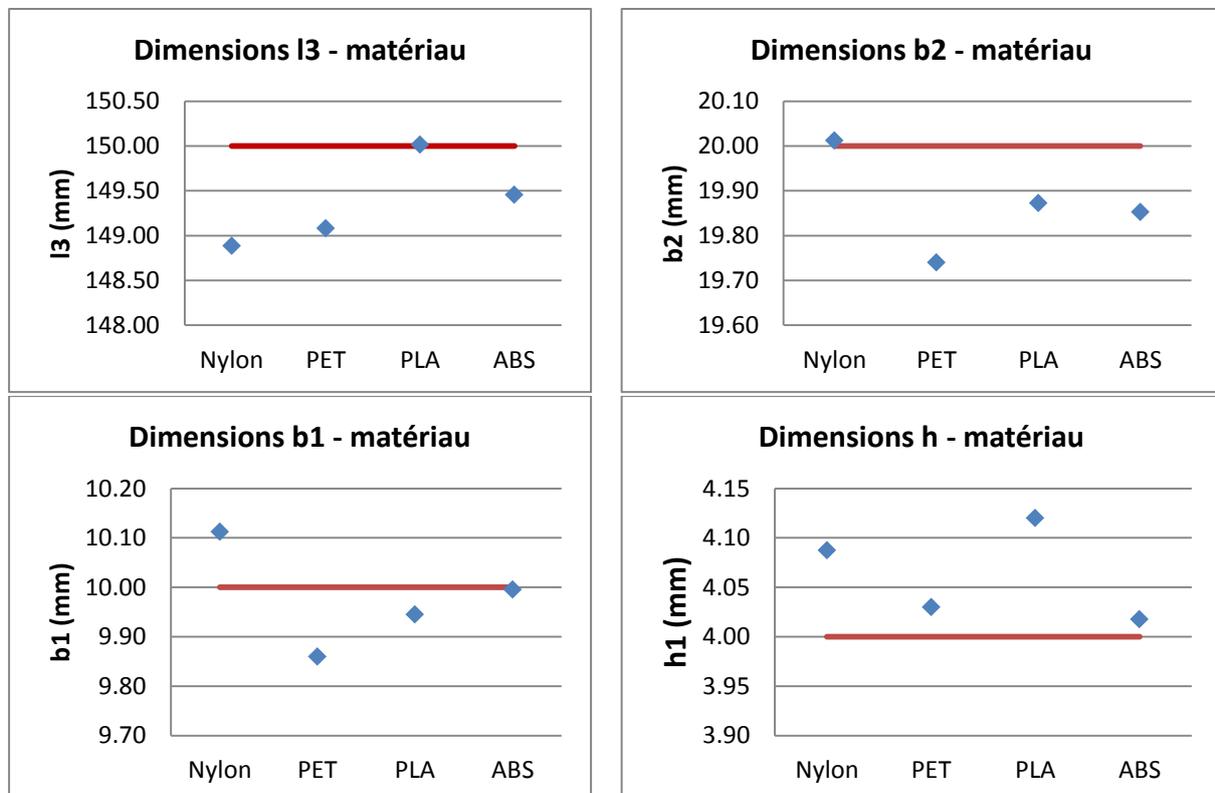


Figure 24. Dimensions caractéristiques des éprouvettes selon le matériau

Finalement, le Nylon est le matériau avec l'erreur le plus important parce qu'il a le plus de décollement. Toutefois toutes les erreurs sont par-dessous le 1.6%, on peut dire que les dimensions sont bonnes.

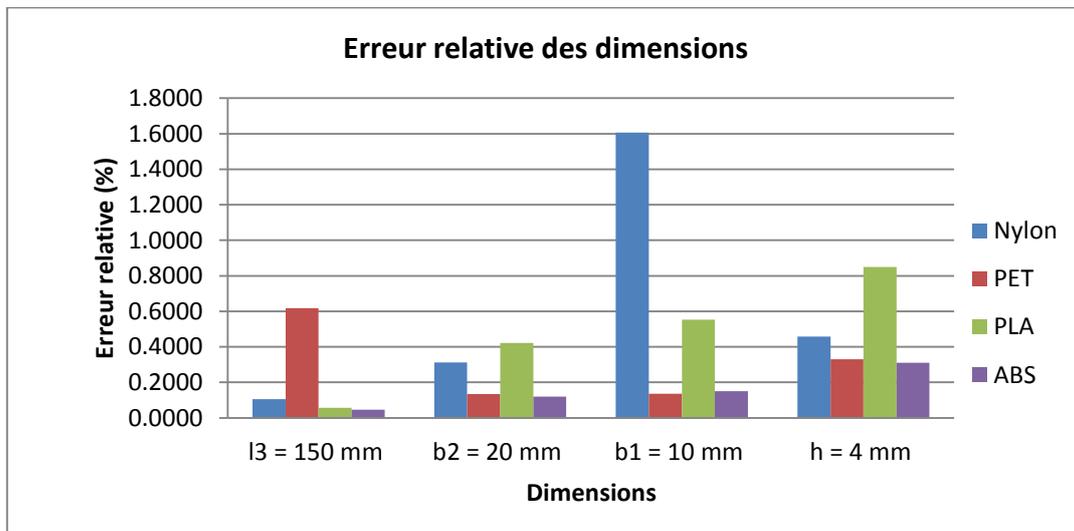


Figure 25. Erreur relative des dimensions selon le matériau

Aspect visuel et défauts

On a défini l'aspect visuel selon 3 niveaux pour ponctuer toutes les éprouvettes.

Aussi les défauts apparus a été seulement le décollement, qu'on l'a défini en 5 niveaux.

Aspect visuel	Niveau décollement
0 Pièce pas fini	0 Il n'y a pas de décollement
1 Mauvais aspect général	1 Longitude de 10mm
3 Couleur pas bon et/ou couches très visibles	2 Longitude de 20mm
5 Très bon aspect visuel	3 Longitude de 30 mm
	4 Longitude de 40mm
	5 Longitude de +50mm et hauteur de +1,5mm

Tableau 17. Ponctuation de l'aspect visuel et du décollement

Le matériau qui a présenté plus défauts et un pire aspect visuel est le **Nylon**. Le **décollement** aux pièces est très important et ça peut affecter sur les résultats de l'essai de traction.

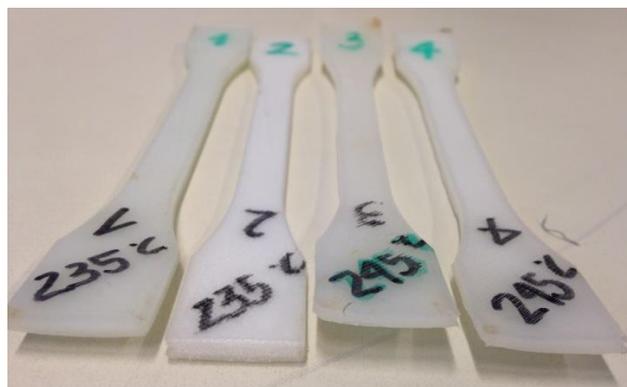


Figure 26. Décollement des éprouvettes de Nylon

D'un autre côté, l'éprouvette de **PET** a été **impossible d'imprimer à 210°C et 60 mm/s**, la buse c'est effondré parce que le matériau ne pouvait pas sortir de la buse.

Toutes les autres éprouvettes ont été bien imprimées et sans défauts.

5.4.2. Nylon

La propriété la plus différente du Nylon par rapport aux autres matériaux est la grande élongation avant de se casser, surtout la plus grande partie de cette élongation est en zone plastique (environ 90% de la déformation maximale). Alors il est assez rigide en la zone élastique mais quand il commence à se déformer plastiquement il s'étire beaucoup. Il est aussi résistant.

Sa courbe contrainte - déformation est de type c, et les paramètres qu'on va analyser sont la contrainte à la rupture (σ_b) et la déformation nominale à la rupture (ϵ_{tb}).

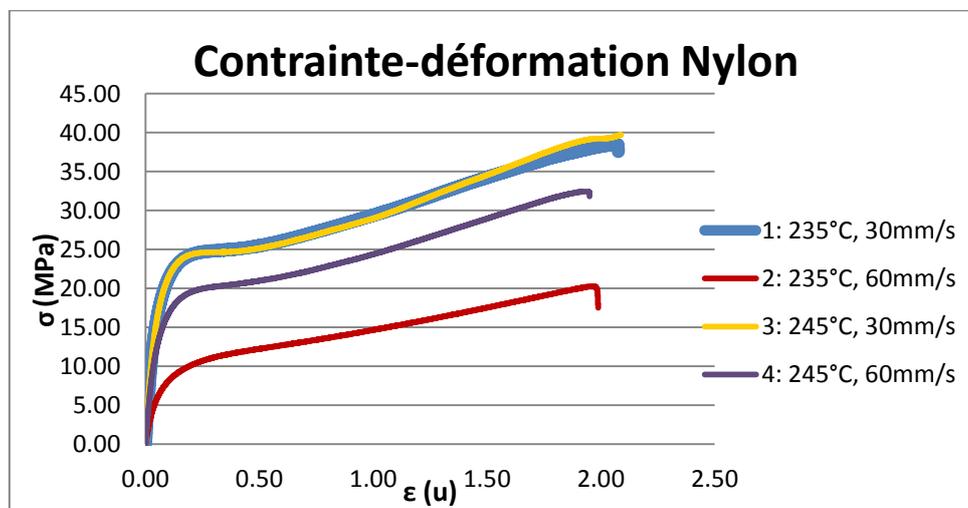


Figure 27. Courbe contrainte - déformation des éprouvettes de Nylon

Tension

Les contraintes maximales du Nylon pour chaque éprouvette sont très différentes. Les éprouvettes 1 et 3 ont presque la même résistance, 40MPa environ, tandis que la deuxième a une résistance d'environ 20MPa (un 50% moins). C'est clair que le paramètre le plus influent sur les réponses est la vitesse d'impression.

Pour arriver à comprendre les grandes différences entre les contraintes maximales des éprouvettes, on a décidé d'ajouter ses niveaux de décollement et d'aspect visuel (voir figure 28).

La éprouvette 2 est qui présente un décollement plus petit et un meilleur aspect visuel, elle a une couleur blanche, mais par contre est laquelle a une résistance plus petite. La raison est que le matériau est complètement amorphe : la vitesse de refroidissement a été haute et la température de fusion basse. Alors le matériau n'a pas trop fondu et les couches sont mal collées, la température qu'avait la pièce pendant la impression c'était plus basse, il n'y avait pas de fortes tensions internes, la contraction a été minimale et le matériau ne s'est pas dégradé.

Par contre les autres éprouvettes avec une vitesse d'impression plus petite (et pourtant la de refroidissement plus grande) et/ou une température de fusion plus haute, le nylon a pu cristalliser

dans une partie de la pièce, les pièces sont semi transparentes et l'union entre couches plus haute. Néanmoins, les tensions internes sont aussi plus hautes et la déformation donc est plus grande.

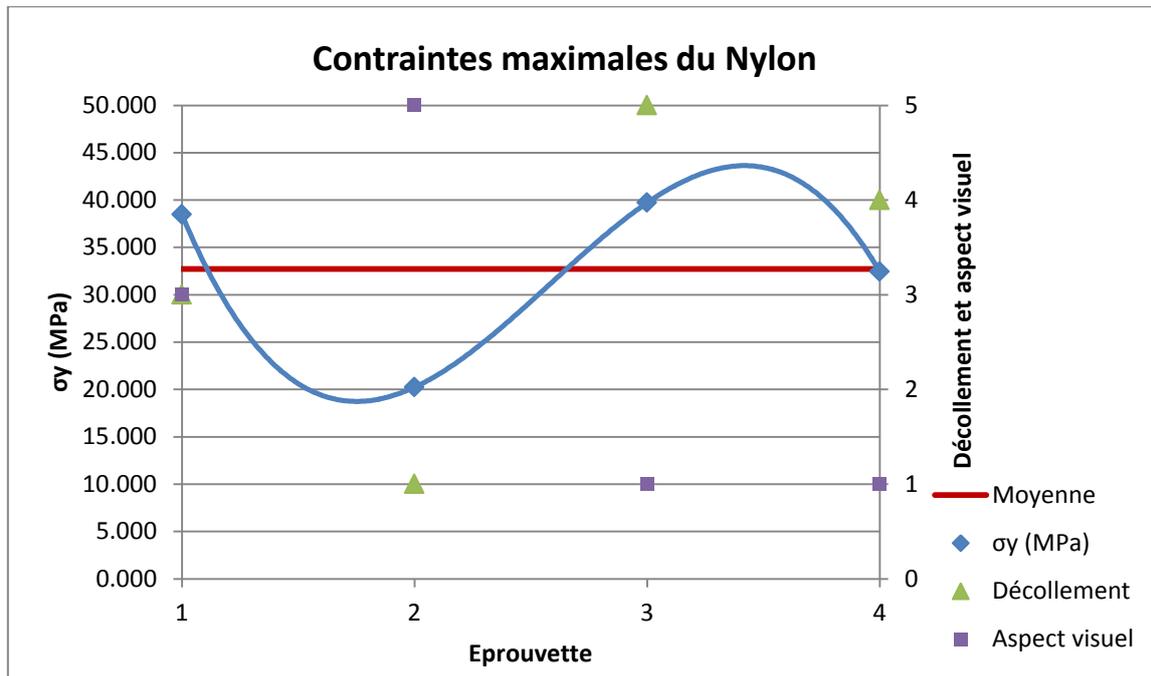


Figure 28. Contraintes maximales des éprouvettes de Nylon et représentation du décollement et l'aspect visuel de chaque une

Déformation

La déformation des éprouvettes a été grande et la distribution est plus ou moins comme la contrainte pour les mêmes raisons.

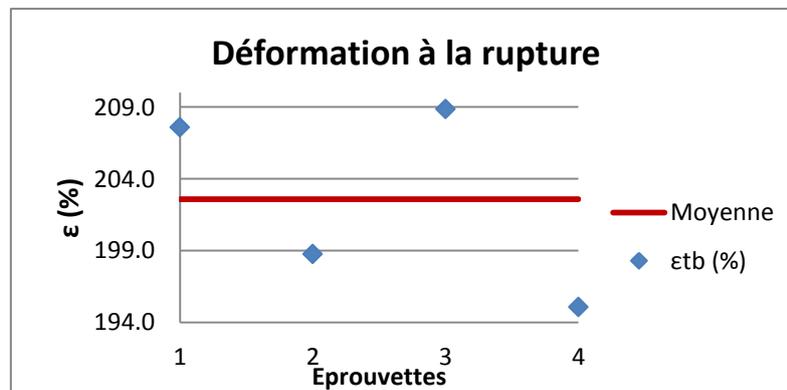


Figure 29. Déformation des éprouvettes de Nylon

Quand la réponse est la déformation le facteur plus influent est encore la vitesse et il y a une petite interaction entre elle et la température. A la figure 31, on peut voir que la interaction est minimale et on peut la considérer insignifiante, la température va être choisie selon autres critères.

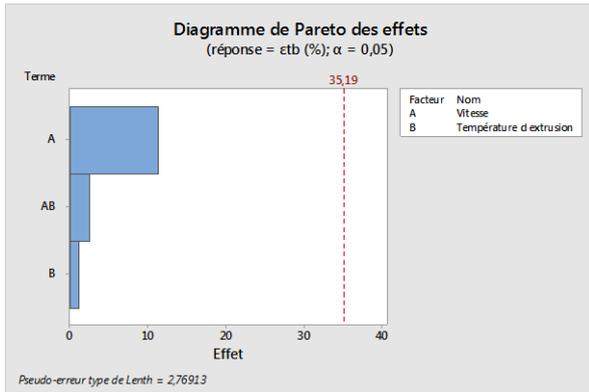


Figure 30. Effet des paramètres sur la déformation

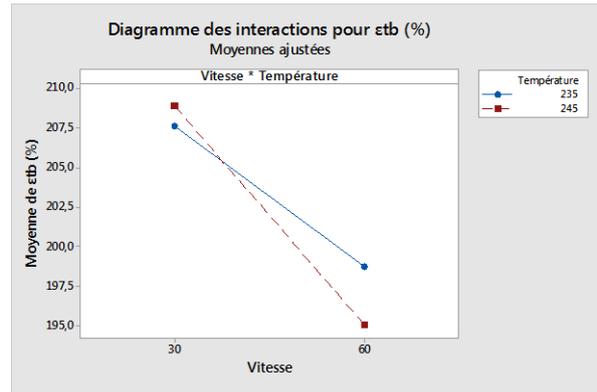


Figure 31. Interaction des paramètres sur la déformation

Module d'élasticité

Les modules d'élasticité pris sont les calculés selon la normative ISO 527, et la distribution est aussi comme celle-là des autres propriétés. Le plus haut est de 480MPa et le plus petit de 197MPa environ (un 75% moins), pourtant le Nylon est un matériau très sensible aux changements des paramètres et il faut les contrôler bien.

5.4.3. PET

Le PET présente une courbe contrainte-déformation de type c (voir point 1.1.3). Alors les valeurs qu'on va analyser va être la résistance à traction (σ_m), contrainte au premier maximum ponctuel observé lors d'un essai de traction, et la déformation nominale à la rupture (ϵ_{tb}), la maximale déformation avant de se casser.

On a seulement 3 éprouvettes à analyser parce que la deuxième a été impossible d'imprimer.

La part finale de la courbe de la éprouvette 3 est un peu différente à cause d'une erreur de mesure de l'extensomètre et on a dû utiliser la déformation nominale (ϵ_t).

On peut voir une différence claire entre l'éprouvette 1 et les autres, 2 et 3. Qu'on va analyser tout suite aux points suivants.

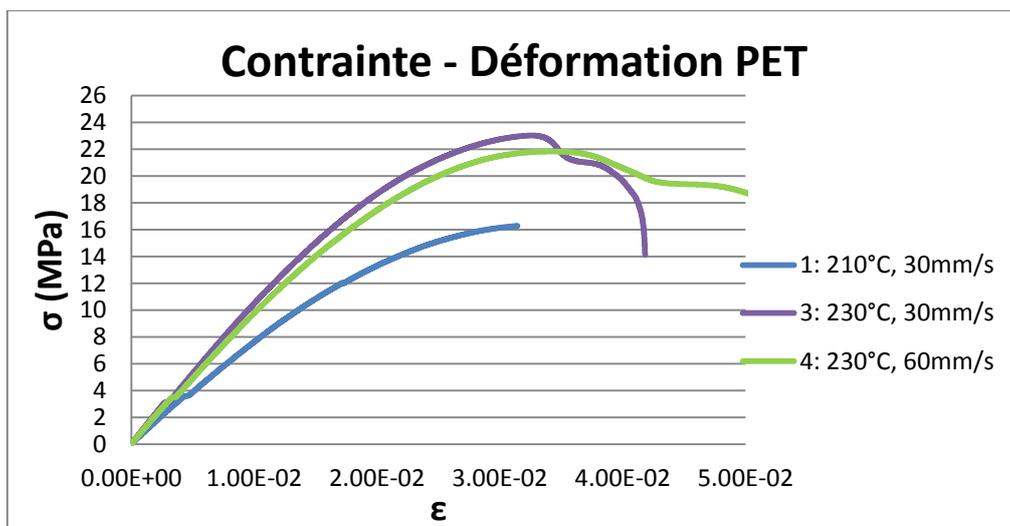


Figure 32. Courbe contrainte - déformation des éprouvettes de PET

Tension

La contrainte maximale du **PET** est la résistance σ_m . La valeur maximum obtenue a été 23,02 MPa et la moyenne de tous les essais est 20,38 MPa.

Déformation

Les valeurs de déformation sont petits aussi, le maximal est de 4,07%, le minimal est de 3,11% et la moyenne est 3,63%. Les éprouvettes avec plus et moins d'éloignement sont les mêmes que lesquelles avec plus de résistance à la traction, la 3^{ème} en premier lieu et la 4^{ème} en deuxième. Mais les résultats du 3^{ème} éprouvette ne sont pas très fiables parce que on a calculé la élongation nominale et pas avec le extensomètre. Alors, on va dire que les éprouvettes 3 et 4 ont une déformation plus grande avant la rupture que la 1.

Module d'élasticité

Le module d'élasticité a été calculé selon la normative. De la même façon que les valeurs maximales de résistance et déformation, les éprouvettes plus rigides sont la 3 et la 4, avec un module de rigidité d'environ 1000MPa.

5.4.4. PLA

On a vu que le PLA est un matériau résistant et il y avait des différences entre les propriétés des éprouvettes. On a pu conclure comment les paramètres choisis affectent au PLA.

Avec chaque éprouvette on a obtenu une courbe contrainte-déformation avec des différences entre chaque une (voir figure 33).

La courbe contrainte-déformation du PLA est de type c (voir point 1.1.3). Comme pour le PET, les valeurs qu'on va analyser va être la résistance à traction (σ_m) qui est la contrainte maximale de tout l'essai et la déformation nominale à la rupture (ϵ_{tb}), la maximale déformation avant de se casser.

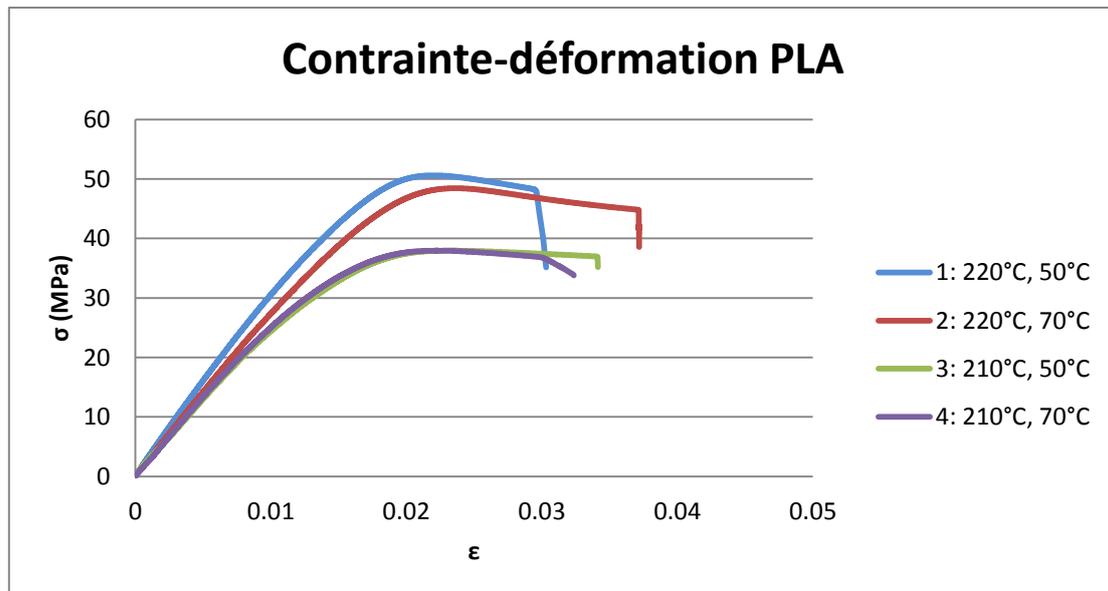


Figure 33. Contrainte - déformation des éprouvettes de PLA

Tension

La contrainte maximale du PLA est la résistance σ_m . La valeur maximale obtenue a été 50,6 MPa et la moyenne de tous les essais est 43,74 MPa. Ces résultats sont fiables parce que une étude fait par l'université *Michigan Technological University, Houghton, MI, United States* [4], les résultats ont été similaires (60,4 MPa). Les différences sont à cause de l'utilisation des imprimantes que ne sont pas la même et le fabricant du matériau non plus.

Les différences entre les éprouvettes sont visibles, surtout entre lesquelles on a modifié la température d'extrusion. Sur la courbe contrainte – déformation on peut voir que les éprouvettes 1 et 2 ont plus de résistance, elles sont les éprouvettes avec une température d'extrusion du 220°C (le niveau haute). La variation des contraintes entre les éprouvettes avec la même température du plateau et différente d'extrusion (12 et 34) est d'un 26,43% ; par contre la variation de contrainte des éprouvettes avec la même température d'extrusion et différente température du plateau (13 et 24) est d'un 2,45%, presque nulle.

Sur *Minitab* on peut voir que le paramètre qui a un effet plus important sur la réponse est la température d'extrusion et que le mieux niveau pour chaque paramètre est le niveau haut de la température d'extrusion et le bas pour la température du plateau.

Coefficients codés

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	Valeur de I	Valeur de p	FIV
Constante		43,74	*	*	*	
Température du plateau	-1,0793	-0,5396	*	*	*	1,00
Température d'extrusion	11,564	5,782	*	*	*	1,00
Température du plateau*Température d'extrusion	-1,0727	-0,5364	*	*	*	1,00

Equation de régression en unités non codées:

$$\sigma_m \text{ (MPa)} = -340,0 + 2,252 \text{ Température du plateau} + 1,800 \text{ Température d'extrusion} - 0,01073 \text{ Température du plateau} * \text{Température d'extrusion}$$

Figure 34. Effet et coefficients des paramètres sur la contrainte maximale

Facteur	Niveau optimal	Valeur optimal
Température du plateau	-1	50 °C
Température d'extrusion	+1	220 °C

Tableau 18. Niveaux optimaux du PLA sur la contrainte

Déformation

La valeur qu'on a évaluée est la déformation à la rupture ϵ_b (%) qui est la déformation au dernier point enregistré avant la réduction de la contrainte à une valeur inférieure à 10 % de la résistance ; on a pris ce nombre de la graphique contrainte-déformation, le dernier point avant la ligne vertical du final.

Les éprouvettes 2 et 3 sont lesquelles avec plus de déformation mais les différences entre tous les résultats sont petites. Ces deux éprouvettes ont les paramètres opposés, il peut exister quelque interaction entre eux qu'on va analyser tout suite.

Les déformations à la rupture du PLA sont petites, au tour d'un 3%, c'est un matériau fragile sans éloignement avant de se casser.

L'interaction entre les paramètres on peut la voir sur la figure 35. On voit que le meilleur choix pour avoir une grande déformation est une température du plateau haute et une d'extrusion haute aussi ou, par contre, les deux températures au niveau bas.

Néanmoins on ne peut pas assurer que les résultats seraient fiables et l'effet des paramètres sur la déformation est presque négligeable.

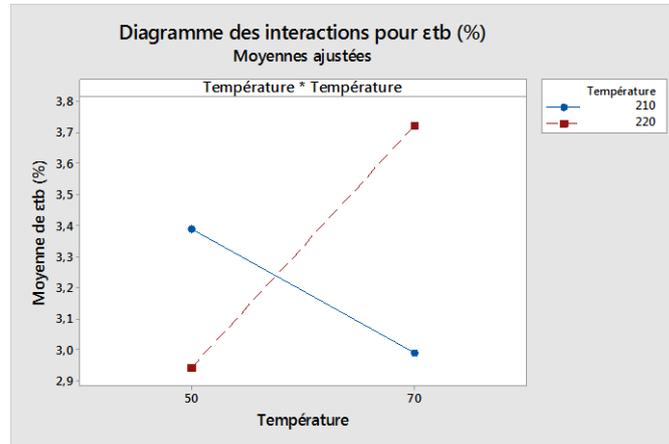


Figure 35. Interaction des paramètres sur la déformation

Module d'élasticité

Comme on a commenté antérieurement, on a calculé le module d'élasticité avec les deux manières et les différences sont petites, on va donner par bon donc le nombre calculé comme la norme indique. Le module d'élasticité plus haut est 3373,64MPa est celui de la première éprouvette et la moyenne 2932,27 MPa.

5.4.5. ABS

Le matériau ABS est de type **b** selon le graphique des différents thermoplastiques et son comportement pendant l'application d'une force à traction. Pour comparer les résultats on a pris la contrainte à la rupture (σ_b) parce que c'est la plus facile à obtenir des données (c'est la maximale) et aussi la déformation nominale à la rupture (ϵ_{tb}). Néanmoins la contrainte de rupture (σ_b) et la contrainte au seuil d'écoulement sont presque la même.

On peut voir les contraintes et déformations des éprouvettes du matériau ABS avec différents remplissages en les courbes obtenues :

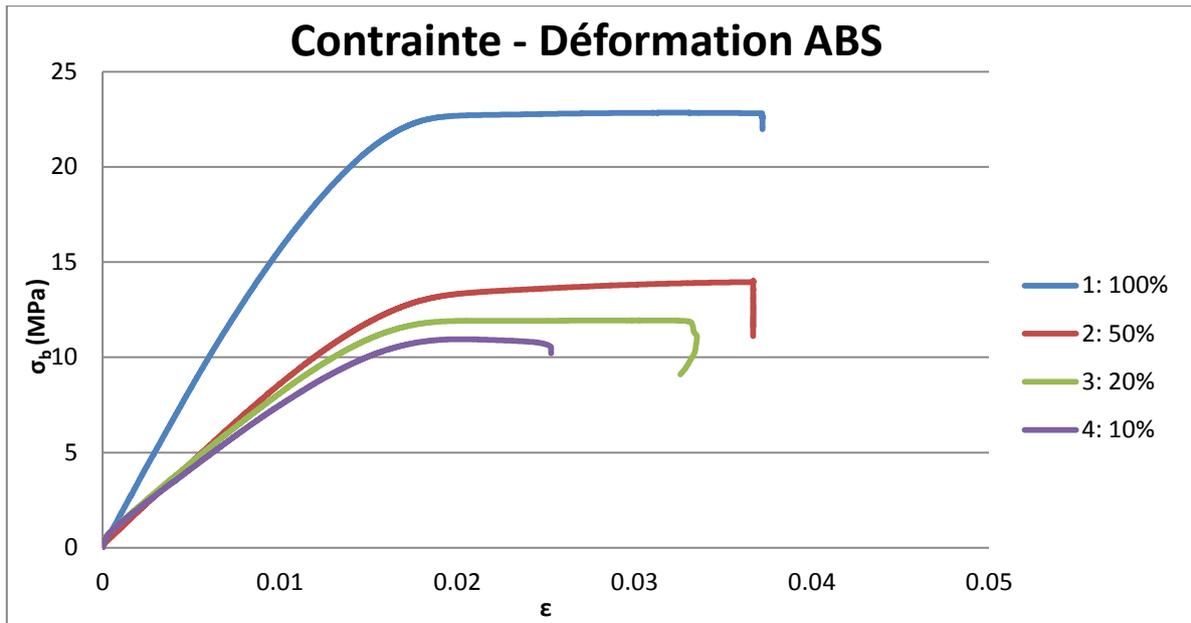


Figure 36. Courbe contrainte - déformation des éprouvettes d'ABS

La grosse différence est entre les contraintes à 100% de remplissage et les autres.

C'est évident que si on veut une pièce avec une fonctionnalité mécanique on doit l'imprimer avec 100% de remplissage, car sa résistance est environ 60% plus grande que l'imprimé avec 50% de remplissage.

Dans le cas où on veut une pièce peu résistante et vite imprimée on pense qu'il était intéressant de comparer aussi la contrainte et la déformation maximale avec le temps d'impression pour décider correctement du remplissage nécessaire selon la pièce à imprimer.

On a représenté dans un repère la contrainte en ordonnées, la déformation à rupture en abscisse et aussi le temps d'impression avec une ligne (c'est proportionnel pour voir clairement les différences dans le même graphique).

On peut voir que les différences entre la contrainte des éprouvettes avec 20% et 10% de remplissage sont très petites (6% en moyenne), mais la différence de déformation est plus importante (environ 20% de la moyenne). De l'autre côté, les différences de contraintes et d'élongation entre les éprouvettes à 50% et à 20% de remplissage sont respectivement de 13% et 10% de la moyenne. A la fin on peut voir que le temps d'impression proportionnel à une heure entre les 2 dernières éprouvettes est très petit, tandis qu'entre les éprouvettes à 50% et 20% il est plus grand. Alors, le remplissage optimal entre ces trois éprouvettes est de 20%.

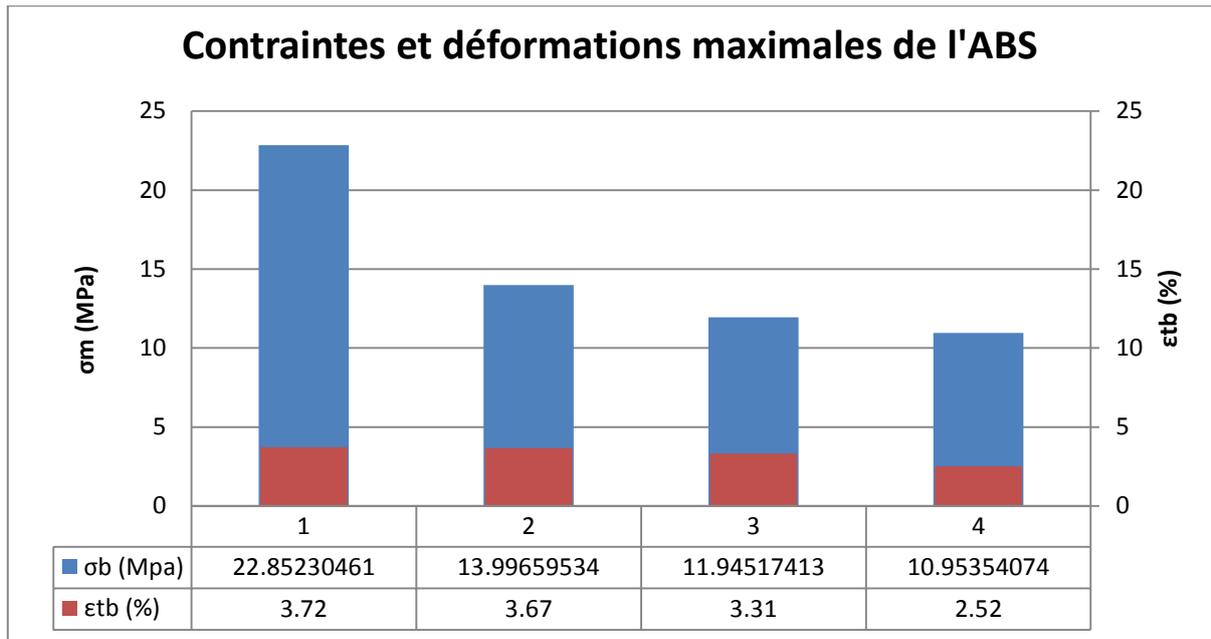


Figure 37. Comparaison entre éprouvettes de la contrainte et la déformation à rupture

Tension

La contrainte maximale théorique de l'ABS est de 47 MPa. Néanmoins les valeurs obtenues par FDM dans plusieurs études comme la nôtre montrent que la contrainte maximale obtenue est entre 20MPa et 30MPa (dans la nôtre elle est de 22,85MPa).

Il y a d'autres études réalisées avec d'autres imprimantes et fabricants de plastique comme l'étude [5] dans lesquelles compare les propriétés mécaniques de différentes couleurs d'ABS, types de remplissage et pourcentages. Le tableau 19 nous montre les résultats de cette étude et la dernière ligne montre les nôtres pour les comparer.

Contrainte maximale (MPa)	45° 100%	45° 50%	45° 20%	45° 10%	Honey 80%	Honey 50%	Honey 20%	Honey 10%
ABS NATUREL	22,03	14,48	13,21	12,61	22,37	15,7	12,19	9,8
ABS ROUGE	21,02	12,15	10,04	9,08	14,1	13,15	10,28	13,47
ABS VERT	26,61	18,95	13,05	10,36	17,38	15,53	14,01	10,28
ABS TRANSPARENT	34,45	18,22	12,2	10,75	28,31	20,62	12,82	11,77
ABS FLUORESCENT	23,66	15,03	10,33	11,95	21,15	17,57	12,48	11,08
ABS BLEU	22,852	13,997	11,945	10,953				

Tableau 19. Tableau de la contrainte maximal de l'ABS selon le remplissage de l'étude trouvé en comparaison aux nos résultats

Les résultats obtenus sont les hésités ; cela nous permet d'accepter les résultats de l'étude trouvés comparés à d'autres couleurs d'ABS différentes au bleu, et on peut avoir plus d'informations. Néanmoins, il est intéressant de vérifier les propriétés de chaque nouvelle couleur ou matériau avec un essai de traction pour bien connaître les caractéristiques avant de l'utiliser.

Ici on voit les tensions maximales et la moyenne de toutes les éprouvettes.

Déformation

La déformation de l'ABS est environ entre 2,5% et 4%. La moitié de l'élongation a lieu à la part de déformation élastique et l'autre à la plastique avant de se casser. La variation est petite et la plus différente est l'éprouvette numéro 4, laquelle a 10% de remplissage.

Module d'élasticité

Les modules d'élasticité obtenus figurent dans le tableau ci-dessus et si on les compare avec les courbes de contrainte-déformation on peut voir que les obtenus avec les lignes de régression sont plus proches aux résultats que les obtenus avec le calcul de la Normative. Avec les bons résultats on a représenté la dispersion des valeurs. Il faut faire attention et voir que la deuxième et la troisième éprouvette (50% et 20% de remplissage) ont presque le même module d'élasticité, c'est une raison de plus pour choisir 20% de remplissage au lieu de 50%.

ABS		Module d'élasticité (MPa)	
Pièce	Remplissage	Régression	Norme
1	100	1621,2	1709,619092
2	50	876,09	981,7329602
3	20	857,65	1202,205291
4	10	770,25	1178,089849
Moyenne		1031,298	1267,912

Tableau 20. Comparaison des résultats du module d'élasticité selon la normative ISO 527 ou la pente de la courbe contrainte - déformation

5.5. Conclusions

5.5.1. Générales

A mode de conclusion, on va comparer les propriétés mécaniques des matériaux entre les valeurs théoriques du matériau injecté trouvés à la base de données CES EduPack, les valeurs obtenues dans autres études faits avec pièces fabriqués par FDM (à exception du PET qu'on n'a rien trouvé) et les nos résultats expérimentaux.

		Limite élastique σ_m (MPa)	Déformation à la rupture ϵ_b (%)	Module élastique de Young E (MPa)
Nylon	Théorique	50 - 94.8	30 - 100	2620 - 3200
	FDM	32	20 - 226	197 - 1310
	Expérimental	20.2 - 39.72	195 - 208.90	197 - 466
PET	Théorique	56.5 - 62.3	30 - 100	2410 - 3090
	Expérimental	16.28 - 23.02	3.11 - 4.07	859 - 1095
PLA	Théorique	55 - 72	3 - 6	3100 - 3600
	FDM	25 - 60	2 - 5	-
	Expérimental	37.9 - 50.6	2.9 - 3.7	2626 - 3373.64
ABS	Théorique	18.5 - 51	1.6 - 100	1200 - 2800
	FDM	29.99	4	-
	Expérimental	22.85	3.72	1621

Tableau 21. Comparaisons des propriétés de traction

On a donné tout l'intervalle de nos valeurs, c'est-à-dire le résultat maximal et le minimal de toutes les éprouvettes essayés.

Les résultats qu'on a obtenu sont fiables, car ils sont assez proches aux autres études trouvés.

Les plus grandes différences entre les résultats qu'on a obtenu et les valeurs théoriques est le PET et on n'a pas trouvé des études d'essais de flexion d'éprouvettes fabriqués par FDM.

Cependant, on croie que les résultats sont bons parce que la variation entre les valeurs théoriques et les réelles se rassemble aux variations entre les mêmes valeurs des autres matériaux.

A la fin de l'essai et de l'analyse des dimensions, de l'aspect visuel des pièces et de ses propriétés mécaniques on a choisi le niveau optimal d'impression de toutes les éprouvettes. Alors on va comparer les propriétés obtenues entre les différents matériaux pour avoir une vision générale, et comparer la valeur maximale et la moyenne de toutes les éprouvettes.

Dans les graphiques suivants on peut voir les différences entre les propriétés de chaque matériau et cela nous permettra de choisir quel est le meilleur matériel pour notre impression.

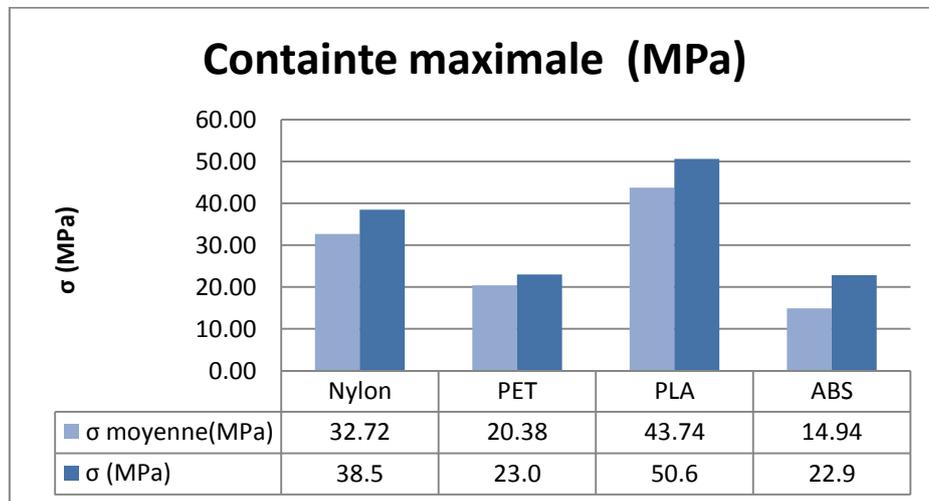


Figure 38. Contraintes maximales par matériau

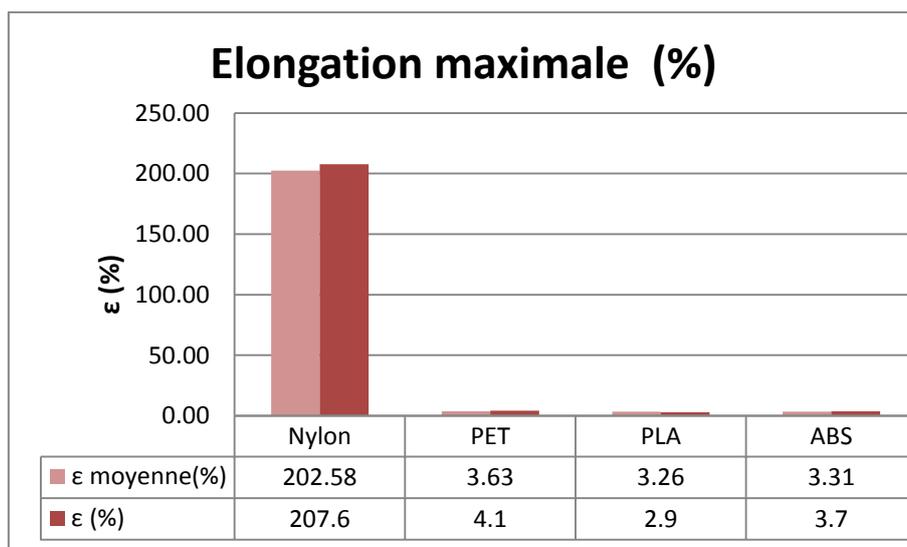


Figure 39. Elongations maximales par matériau

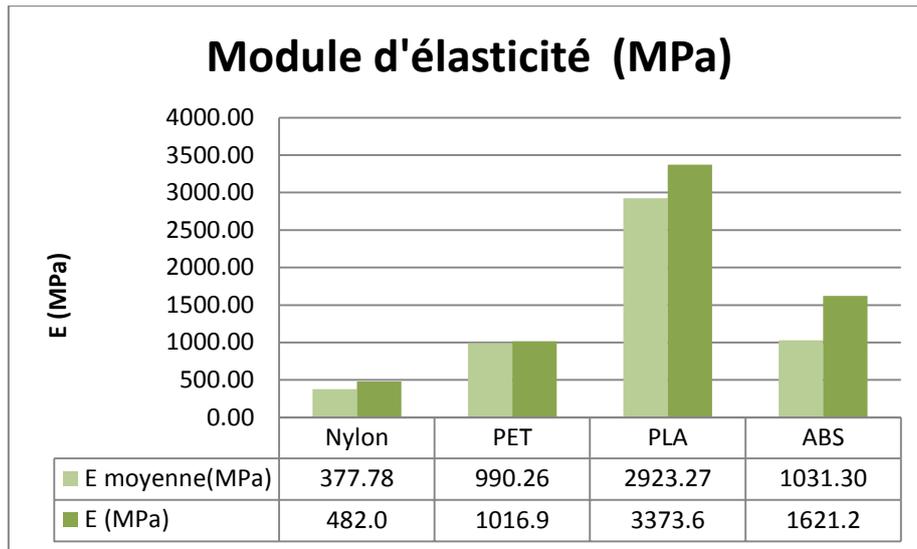


Figure 40. Modules d'élasticité par matériau

5.5.2. Par matériau

Nylon

Le Nylon est le matériau le plus difficile à imprimer et il a beaucoup de décollement. Selon la fonctionnalité de la pièce à imprimer on doit choisir l'un paramètre ou l'autre.

Nylon	Critère	Température d'extrusion (°C)	Vitesse (mm/s)
Facteurs optimales	Aspect et dimensions	235	60
	Propriétés mécaniques	235	30

Tableau 22. Valeur optimal des paramètres pour le Nylon

Perspectives du futur :

- Il serait intéressant d'essayer à d'imprimer à des niveaux intermédiaires des paramètres choisis parce qu'on voit que le résultat est très différent entre le niveau bas et le haut, ainsi le optimal peut se trouver à la moitié.
- Il peut être nécessaire d'augmenter la température du plateau jusqu'à 80°C pour moins de décollement.

PET

Les différences entre les températures d'extrusion sont grandes, surtout quand il faut imprimer à une vitesse plus haute étant donné qu'il a été impossible d'imprimer l'éprouvette à 210°C et 60 mm/s.

Les meilleures propriétés mécaniques sont à une **température de 220°C** et une **vitesse de 30mm /min**. Toutefois, on a vérifié qu'il était possible d'imprimer avec ce matériau à une vitesse aussi haute que basse avec une bonne qualité visuelle, des dimensions et des bonnes propriétés mécaniques, on peut donc imprimer à une vitesse entre 30 mm/s et 60 mm/s sans problème.

PET	Ordre	Température d'extrusion (°C)	Vitesse (mm/s)
Facteurs optimaux	1^{ère}	230	30
Facteurs alternatifs	2 ^{ème}	230	60
	3 ^{ème}	210	30

Tableau 23. Valeur optimale des paramètres pour le PET

PLA

Normalement ce matériau n'a pas de défauts d'impression et les dimensions sont correctes.

Il présente de bonnes propriétés mécaniques et le paramètre le plus influent est la température d'extrusion, comme on l'avait affirmé à l'essai de flexion.

Les niveaux de paramètres à choisir pour obtenir une pièce résistante et rigide avec PLA sont une **température d'extrusion de 220°C** et du **plateau de 50°C**.

PLA	Température d'extrusion (°C)	Température du plateau (°C)
Facteurs optimaux	220	50
Facteurs alternatifs	220	70

Tableau 24. Valeur optimale des paramètres pour le PLA

ABS

Le remplissage est un paramètre important si on veut connaître les propriétés mécaniques des pièces.

Si on a besoin d'une pièce avec très **bonne résistance** on doit mettre un **remplissage de 100%**. Par contre, si la résistance n'est pas le facteur le plus important de la pièce, avec 20% de remplissage on aura aussi une bonne résistance et la pièce sera beaucoup plus rapide à imprimer respecte la 100% et la 50% rempli.

On peut voir qu'au tableau 24 la proportion de chaque propriété respecte sa valeur maximale.

Pièce	Remplissage (%)	$\sigma_b/\sigma_{b,max}$ (%)	$\epsilon_{tb}/\epsilon_{tb,max}$ (%)	E/E_{max} (%)	% temps d'impression
1	100	100,00	100,00	100,00	100.0
2	50	61,25	98,66	54,04	74
3	20	52,27	88,98	52,90	60
4	10	47,93	67,74	47,51	55

Tableau 25. Différences des propriétés mécaniques respectant la valeur maximale selon le % de remplissage

6. Plan d'essais

6.1. Test 1 : Température (A)

a) Objectifs

Le but de l'analyse est de réguler la température pour chaque matériau et couleur avec des conditions d'impression moyennes d'une pièce sans remplissage ; afin de voir clairement l'union entre couches et la précision dimensionnelle.

b) Protocole

❖ Pièce

Dimensions (mm)	25x25x10
Taille (Grande/ Petite)	Petite
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Sans
Surfaces (Plates/ Courbes)	Plates
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Sans
Remplissage (Avec/ Sans)	Sans
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Baisse
Bridges (Avec/ Sans)	Sans

Tableau 26. Caractérisation de la pièce

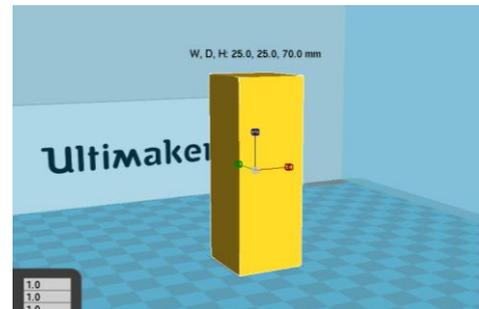


Figure 41. Pièce test

❖ Paramètres importants fixes

Ventilateurs		Oui
Qualité	Hauteur de couche (mm)	0.2
	Épaisseur de la coque	0.4
Remplissage	Épaisseur dessus/dessous (mm)	0.6
	Remplissage (%)	0
Vitesse et température	Vitesse d'impression (mm/s)	50

Tableau 27. Paramètres d'impression

❖ Matériaux

- PLA Noir

❖ Procédure de l'essai

On a essayé des pièces très simples en changeant les températures à certaine hauteur, en ordre descendant pour regarder sur la même pièce quelle est la meilleure température.

Chaque 10mm d'hauteur, la température est 5°C plus baisse.

PLA	
Hauteur (mm)	Température (°C)
0-10	220
10-20	215

ABS	
Hauteur (mm)	Température (°C)
0-10	245
10-20	240

20-30	210	20-30	235
30-40	205	30-40	230
40-50	200	40-50	225
50-60	195	50-60	220
60-70	190	60-70	215

Tableau 28. Températures à chaque hauteur des pièces

c) Résultats

PLA Noir					
Hauteur (mm)	Température (°C)	Mesures X x Y (mm)	Épaisseur (0.4mm)	Union des couches	Couleur
0-10	220	25x24.85	0.4	5	- brillant
10-20	215	25.4x25.3	0.9	4.5	Brillant
20-30	210	25.4x25.3	0.9	4	Brillant
30-40	205	25.4x25.3	0.9	4	Brillant
40-50	200	25.3x25.25	0.9	4	Brillant
50-60	195	25.3x25.2	0.9	4	Brillant
60-70	190	25.1x25.1	0.7	3.5	Brillant

Résultats et observations:

Tableau 29. Résultats du PLA à chaque hauteur

- Toutes les couches étaient très bien unies, il était très difficile de les séparer ; il a été nécessaire les couper. Les différences ont été petites et juste visuels.
- À **190°C** l'extrusion flow était 210% ; ça signifie que la buse devait trop forcer quand le matériau n'était pas très bien fondu. Après, il a créé un bouchon dans la buse.
- Les différences les plus significatives ont été les mesures, lesquelles sont plus précises à 220°C.
- Il y a une petite déviation des axes, parce que les mesures dans une direction sont quelques millimètres plus grands que dans l'autre.

d) Conclusion et perspectives

On s'est rendu compte que ce n'est pas un bon essai parce que le résultat des couches est de pire en pire avec la hauteur et, la cause de cela n'est pas seulement l'effet de la température : Avec la hauteur, la pièce est moins stable, il y a plus de vibrations et l'aspect et l'union des couches est pire. La dilatation et contraction du matériau peut aussi affecter les couches supérieures tant qu'elles ont plus de matière au-dessous.

Avec l'ABS on n'a pas pu faire l'essai, parce qu'il a un coefficient de dilatation élevé et moins rigide, à chaque hauteur l'impression était pire.

Ça a mieux marché avec le PLA parce la dilatation et la contraction sont très petites et de plus, c'est un matériau plus rigide et résistant.

Matériau	Température optimale (°C)
PLA NOIR	220°C

Tableau 30. Résultat optimal du test

6.2. Test 2 : Température (B)

a) Objectifs

C'est la continuation de l'essai précédent. Le but de l'expérimentation est le même qu'avant. On a modifié la géométrie et la procédure de l'essai pour arriver aux résultats désirés et plus fiables.

b) Protocole

❖ Pièce

Dimensions (mm)	25x25x10
Taille (Grande/ Petite)	Petite
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Sans
Surfaces (Plates/ Courbes)	Plates
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Sans
Remplissage (Avec/ Sans)	Sans
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Haute
Bridges (Avec/ Sans)	Sans

Tableau 31. Caractérisation de la pièce

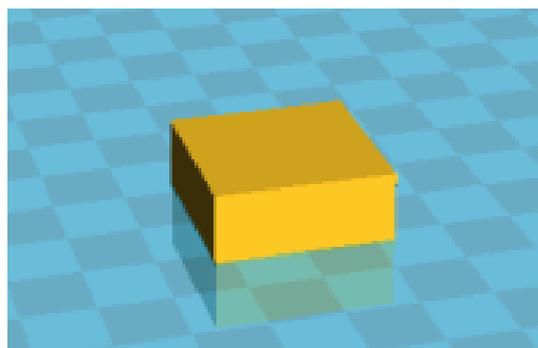


Figure 42. Pièce test

❖ Paramètres importants fixes

Ventilateurs		Oui
Qualité	Hauteur de couche (mm)	0.2
	Épaisseur de la coque	0.4
Remplissage	Épaisseur dessus/dessous (mm)	0.6
	Remplissage (%)	0
Vitesse et température	Vitesse d'impression (mm/s)	50

Tableau 32. Paramètres d'impression

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- ABS : Blanc, Gris, Rouge
- Nylon Bridge
- PET : Vert
- Mur du devant de l'imprimante fermé (pour maintenir la température).
- Cole toujours sur le plateau

❖ Procédure de l'essai

La même pièce a été imprimée avec tous les matériaux et, pour chaque un, on l'a imprimée à différentes températures (séparées de 5°C) dans les intervalles recommandés.

La pièce a été toujours à la même position sur le plateau, centrée, pour réduire la variabilité possible due aux différences de température du plateau ou de son niveau.

Après l'impression, on a mesuré les dimensions de la pièce, on a regardé l'union entre couches et analysé les possibles problèmes apparus. L'union des couches a été ponctué du 1 à 5, 1 pour un mauvais aspect général et 5 pour un aspect parfait. La meilleure ou les meilleures températures ont été surlignées en jaune.

c) Résultats

ABS

ABS Gris				
Pièce	Température (°C)	Mesures X x Y (mm)	Epaisseur (0.4mm)	Union des couches
1	240	24.8x24.85	0.6	1
2	235	24.7x24.9	0.5	2
3	230	24.8x24.7	0.5	3
4	225	24.7x24.75	0.45	4
5	220	24.7x24.6	0.4	5

Tableau 33. Résultats des pièces d'ABS Gris selon la température

- La pièce 5 a le meilleur aspect visuel et la meilleure épaisseur.
- Les différences dimensionnelles ne sont pas importantes et les différences plus visibles sont l'aspect visuel et l'union des couches.

ABS Blanc						
Pièce	Température (°C)	Mesures X x Y (mm)	Mesures X x Y (mm)	Epaisseur (0.4mm)	Union des couches	Couleur
1	240	24.8x24.7	24.7x24.85	0.5	1	Jeune
2	235	24.6x24.7	24.8x24.7	0.5	2	Blanc
3	230	24.9x24.7	24.9x24.7	0.5	3	Blanc
4	225	24.9x24.75	24.8x24.8	0.4	4	Blanc
5	220	24.85x24.65	24.8x24.65	0.4	5	Blanc

Tableau 34. Résultats des pièces d'ABS Blanc selon la température

- Les résultats ont été identiques à l'ABS gris.
- On peut donc vérifier que la température de 220°C est la meilleure pour réussir et avoir une meilleure union entre les couches.
- Les dimensions des pièces se ressemblent beaucoup et on ne peut pas trouver une tendance entre les résultats.
- Le test marche bien parce qu'on peut voir des différences claires entre les pièces imprimées.



Figure 43. Pièce d'ABS blanche imprimé à 220°C (gauche) et à 240°C (droit)

ABS Rouge					
Pièce	Température (°C)	Mesures X x Y (mm)	Épaisseur (0.4mm)	Union des couches	Couleur
1	240	-	-	-	-
2	235	24.6x24.7	0.5	2	5
3	230	24.9x24.7	0.5	4	5
4	225	24.8x24.7	0.4	5	5
5	220	24.7x24.8	0.45	3	5

Tableau 35. Résultats des pièces d'ABS Rouge selon la température

- On peut voir que la meilleure pièce est la 4.
- La précision des mesures est comme tous les autres essais.

Nylon

Nylon					
Pièce	Température (°C)	Mesures X x Y (mm)	Épaisseur (0.4mm)	Union des couches	Couleur
1	255	24.8x24.75	0.5	3	2
2	250	24.8x24.6	0.5	4	3
3	245	24.8x24.6	0.5	5	5
4	240	24.8x24.7	0.55	4.5	5
5	235	24.8x24.9	0.6	4.5	4.5

Tableau 36. Résultats des pièces de Nylon selon la température

- Toutes les températures donnent une bonne union de couches, couleur et les différences entre les mesures ne sont pas significatives.
- Les pièces se ressemblent beaucoup et on a ponctué l'union des couches en les comparant entre elles, mais les différences sont plus petites que pour les autres matériaux.
- On doit faire beaucoup de force pour séparer les couches jusqu'à les casser.
- Les plus grandes différences se trouvent sur la surface de *Brim*, dans laquelle la pièce 1 est rugueuse et blanche et, par contre, dans la 5 et la 3, la surface est lisse et presque transparente. Cela nous permet également de voir les différences entre l'effet des températures.

PET

PET						
Pièce	Température (°C)	Mesures X x Y (mm)	Épaisseur (0.4mm)	Union des couches	Transparence	Aspect visuel
1	230	24.9x24.8	0.4	5	1	1
2	225	24.8x24.75	0.35	4	2	2
3	220	24.85x24.75	0.35	3	3	4
4	215	24.8x24.7	0.35	2	4	3
5	210	24.7x25	0.4	2	5	5

Tableau 37. Résultats des pièces de PET selon la température

- Selon ce que vous cherchez dans une pièce imprimée avec PET, il faut choisir une température ou une autre : Il n'y en a pas une qui optimise tous les paramètres, on peut imprimer à toutes les températures (voir figure 44).
 - o Si nous cherchons une plus grande liaison entre les couches, on choisira une température plus élevée (230 °C).
 - o Cependant si le but de la pièce est la transparence et l'aspect visuel, on va choisir une température plus basse (210 °C).

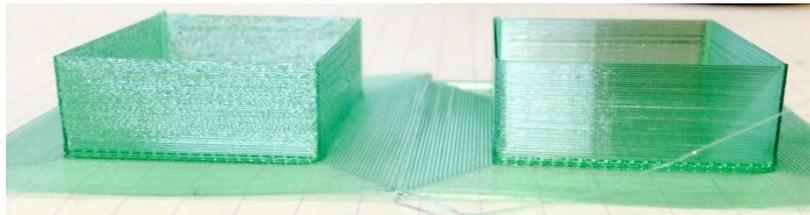


Figure 44. Pièces imprimés en PET à 230°C (gauche) et à 210°C (droit)

d) Conclusion et perspectives

L'essai a été intéressant pour mieux connaître les matériaux et l'effet des températures sur la qualité des pièces. Les intervalles de températures étaient très larges et maintenant on peut approcher plus ce paramètre à l'optimal (surtout en pièces vides et avec les paramètres choisis au début de l'essai).

De plus, avec ce test on s'est rendu compte que :

- Les températures qui étaient prédéfinies sur l'imprimante n'étaient pas suffisantes.
- La précision dimensionnelle qu'on peut obtenir de l'imprimante n'est pas parfaite, cependant on est proche de la valeur désirée et la variabilité est petite.
- La précision dimensionnelle ne dépend pas des matériaux parce que les mesures et la variabilité obtenues à toutes les pièces se rassemblent.
- La température est un paramètre important qui faut bien contrôler. Néanmoins il y a des matériaux plus sensibles au changement de température comme l'ABS, et d'autres plus robustes, comme le Nylon.

6.3. Test 3 : Union des couches d'une grande pièce

a) Objectifs

L'objectif est d'améliorer l'impression d'une pièce avec ABS parce que les couches n'ont pas été bien imprimées.

On veut voir si avec de simples changements comme celui de la température d'impression ou en fermant l'imprimante avec une boîte, on peut obtenir une meilleure pièce.

b) Protocole

❖ Pièce

Dimensions (mm)	20x70x30
Taille (Grande/ Petite)	Grande
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Avec
Surfaces (Plates/ Courbes)	Plates
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Sans
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec
Précision nécessaire (Haute/ Basse)	Basse
Bridges (Avec/ Sans)	Sans

Tableau 38. Caractérisation de la pièce

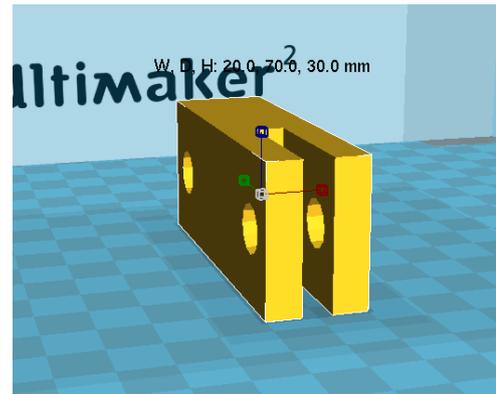


Figure 45. Pièce test

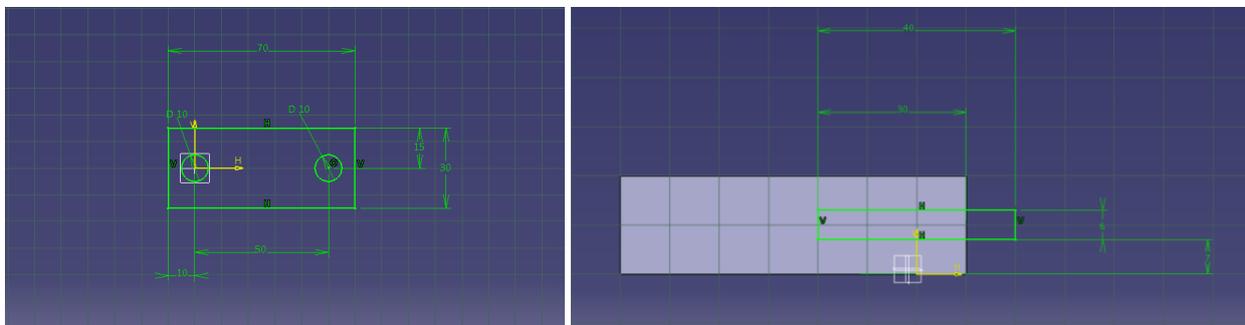


Figure 46. Mesures de la pièce conçue sur Catia V5

❖ Paramètres importants fixes

Excel_Tests_ABS

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- ABS : Rouge, Blanc et Gris
- Mur du devant de l'imprimante fermé avec une boîte (de la 1^{ère} à la 6^{ème} pièce) (voir figure 47).
- Colle sur le plateau.

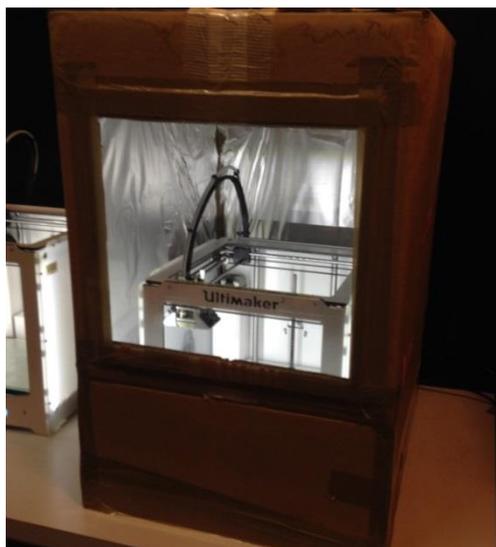


Figure 47. Boîte fabriquée pour l'essai

❖ Procédure de l'essai

#	Conditions de l'essai	Résultats
1	Imprimé à la température par défaut de l'imprimante (240°C).	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Couches mal collées ✗ Remplissage solide au-dessus et au-dessous mal collé ✗ Remplissage mauvais (points sans former une grille)
2	Changement de la température à laquelle on a trouvé au test de température (225. *Méprise avec l'épaisseur de coque (0.4mm).	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Couches mieux collées ✗ Remplissage encore mauvais ✗ Epaisseur de coque trompée ✗ Pièce très faible
3	On a changé le couleur du matériau (il n'y avait plus de rouge) et la température aussi. Rectification de l'épaisseur de la coque (1.2mm). Réduction de la vitesse du remplissage pour résoudre le problème.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Couches mieux collées ✓ Pièce rigide et résistante ✗ Décollement ✗ Couches autour des trous ne pas très bien unies ✗ Remplissage mauvais
4	Pour corriger de décollement des premières couches, on a éteint les ventilateurs pendant toute l'impression. On a augmenté aussi la température du plateau.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Couches bien collées ✓ Couches autour des trous bien collés ✓ Pièce rigide et résistante ✗ Décollement ✗ Trois zones de refroidissement très différenciées
5	Afin de corriger le décollement que la pièce présente encore, on a baissé la température du plateau et on a augmenté le nombre de lignes du «Brim».	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Couches bien collées ✓ Il n'y a pas de décollement ✓ Pièce rigide et résistante ✗ Il y a une fissure à la hauteur du commencement des trous (5mm) ✗ Trois zones de refroidissement très différenciés
6	Pour corriger le défaut des unions des couches et des 3 zones de refroidissement on a réduit l'épaisseur de coque.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Couches bien collées ✓ Il n'y a pas de décollement ✓ Pièce rigide et résistante ✗ Il y a des fissures et petits trous à la

deuxième zone (des trous) qu'on a vu avec le microscope

- ✘ Il y a des fissures à part à l'extérieur des trous où le mur est plus mince.

Finalement pour corriger la Sous extrusion et la mauvaise union des couches autour des trous on a fermé complètement l'imprimante avec une boîte qu'on a construit.

- 7 Cela a permis de maintenir la température dans l'imprimante à 35°C environ et le refroidissement a été plus lent. De plus, le ventilateur a été aussi éteint pendant l'impression.

- ✓ Couches bien collées
- ✓ Il n'y a pas de décollement
- ✓ Pièce rigide et résistante

• **Résumé des modifications de la configuration des paramètres:**

		1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}	6 ^{ème}	7 ^{ème}
Couleur d'ABS		Rouge	Rouge	Blanc	Gris	Blanc	Gris	Gris
Température	Température d'impression (°C)	240	225	220	-	-	-	-
	Température du lit (°C)	80	100	-	-	80	80	-
Qualité	Hauteur de couche (mm)	0.1	-	-	-	-	-	-
	Épaisseur de la coque (mm)	1.2	0.4	1.2	-	-	0.8	-
Remplissage	Épaisseur dessus/dessous (mm)	1.2	-	-	-	-	-	-
	Remplissage (%)	30	-	-	20	-	-	-
Vitesse et température	Vitesse d'impression (mm/s)	40	-	-	-	-	-	-
Support	Type de support	Partout	-	-	-	-	-	-
Vitesse	Vitesse de remplissage (mm/s)	0	-	30	-	0	-	-
Refroidis.	Activer le ventilateur	Oui	-	-	Non	-	-	-

Tableau 39. Paramètres changés pendant l'essai à chaque pièce

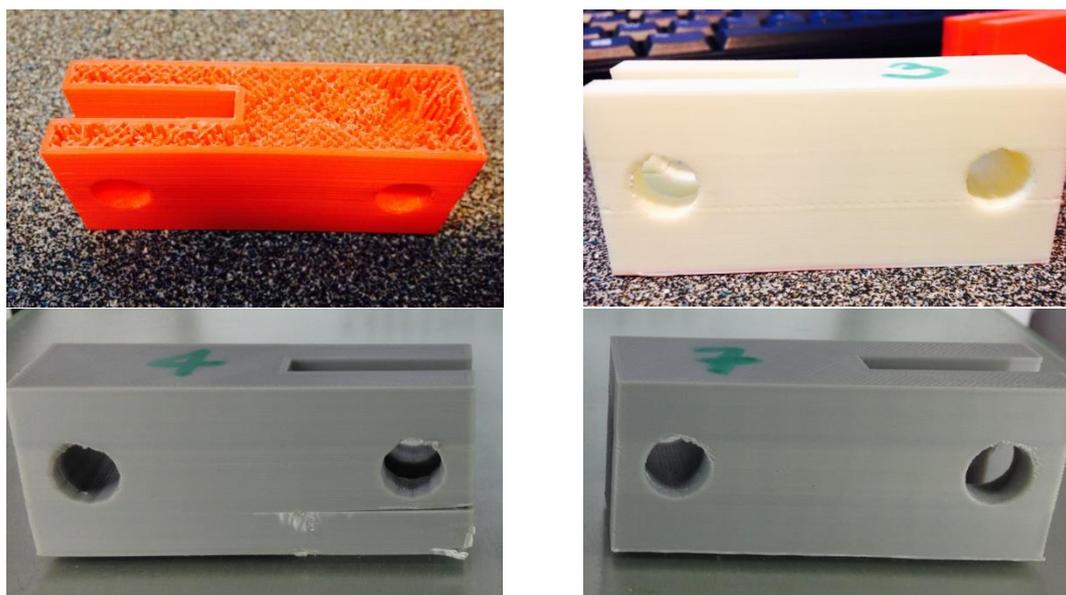


Figure 48. Pièces résultantes des essais: 1^{ère} (en haut à gauche), 3^{ème} (en haut à droite), 4^{ème} (en bas à gauche) et 7^{ème} (en bas à droite)

c) Conclusion et perspectives

On s'a rendu compte que seulement avec une petite différence de l'épaisseur de coque que la pièce est beaucoup plus rigide. La 2^{ème} pièce qui a seulement un tour de coque est beaucoup moins rigide que les autres avec 2 ou 3 tours.

Le remplissage n'est pas le paramètre plus important pour avoir une pièce rigide, parce qu'avec 20 ou 30 pourcent la pièce est assez rigide. Cependant il y a une relation avec le décollement, parce avec le remplissage bien imprimé le défaut est apparu.

Les trous sont identiques à toutes les pièces, on peut dire qu'ils ne dépendent pas de la température. Cependant, sur la première pièce et la dernière on peut voir qu'il y a des différences dans les trous, et la première à une surface plus propre. Je crois que c'est la faute du manque de refroidissement, ainsi qu'à cause du fait que les ventilateurs et les couches au-dessus des trous ne se refroidissent pas vite.

On peut voir que les problèmes d'impression de cette pièce sont : le décollement, le remplissage mauvais, l'union des couches et le refroidissement par zones.

Grâce aux informations et à l'expérience réalisée, on peut séparer les paramètres les plus influents en deux catégories : ceux qui affectent la matière elle-même (A) et ceux qui aident améliorer la rigidité de la pièce (B).

A		B	
Matériau		Qualité	Epaisseur de la coque
Températures	Température d'impression (°C)		
	Température du lit (°C)		
Qualité	Hauteur de couche (mm)	Remplissage	Remplissage (%)
Vitesse et température	Vitesse d'impression (mm/s)		

Tableau 40. Classification des paramètres

6.4. Test 4 : Petite pièce avec des défauts

a) Objectifs

Le but de l'expérimentation est l'impression d'une petite pièce avec des détails et sans défauts : en ABS gris et après en PLA Bleu. Mettre ensemble toutes les connaissances recueillies au préalable et vérifier qu'elles marchent bien avec différentes pièces.

b) Protocole

❖ Pièce

Dimensions (mm)	20x20x55
Taille (Grande/ Petite)	Petite
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Avec (vertical)
Surfaces (Plates/ Courbes)	Plates
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Sans
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec
Précision nécessaire (Haute/ Basse)	Haute
Bridges (Avec/ Sans)	Sans

Tableau 41. Caractérisation de la pièce

❖ Paramètres importants fixes

Excel_Tests_PLA, Excel_Tests_ABS

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- Pièce ABS - Colle sur le plateau + Boîte (à la 2^{ème} pièce)
- Pièce PLA – Colle sur le plateau

❖ Procédure de l'essai

L'impression avec l'ABS a présenté des fissures, on a ensuite utilisé la boîte pour vérifier si vraiment elle marchait bien pour réparer les fissures.

Après avec le PLA Bleu elle a présenté sous extrusion et on a vérifié si la conclusion extraite du premier test sert pour arranger ce défaut en augmentant seulement de 10°C la température.

c) Conclusion et perspectives

On a vu que les essais antérieurs et les conclusions définies marchent bien.

D'abord la boîte marche bien pour les pièces qui ont des fissures, qui ne sont pas très petites et qui n'ont pas besoin de beaucoup de précision, parce que la boîte fait que le refroidissement de la pièce soit plus lent. La différence de température entre les couches est plus petite et les couches se collent mieux.

Après la même pièce imprimée en PLA, sous les mêmes paramètres d'impression et avec la seule différence de 10°C de température, le résultat a été beaucoup plus satisfaisant. C'est-à-dire la meilleure température pour le PLA Bleu est de 220°C comme le PLA Noir. Seulement avec la modification de la température on peut corriger le problème de la sous extrusion.

La cause de ce défaut est que la buse n'a pas forcé suffisamment pour extraire le matériau à cette car il est très visqueux et a besoin de plus de pression.

- A partir de cet essai on peut voir la réelle importance de connaître la température exacte à laquelle travaille le mieux chaque matériau, et cela dépend beaucoup du résultat de l'impression.
- Ensuite il faudra tester plus l'influence de la boîte pour décider quand elle est nécessaire ou quand elle est dispensable.

6.5. Test 5 : Pièce mince avec de grands trous

a) Objectifs

L'objectif est de voir la possibilité d'imprimer une grande pièce décorative avec des grands trous sans problèmes.

b) Protocole

❖ Pièce

Dimensions (mm)	20x60x100
Taille (Grande/ Petite)	Grande
Contact avec le plateau (Grand/Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Avec
Surfaces (Plates/ Courbes)	Plates
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Sans
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Baisse
Bridges (Avec/ Sans)	Sans

Tableau 42. Caractérisation de la pièce

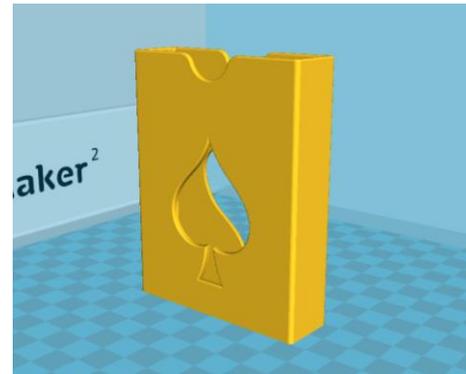


Figure 49. Pièce test

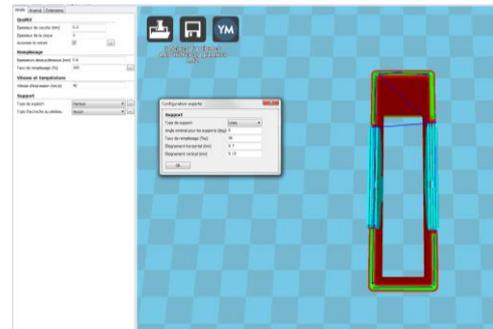
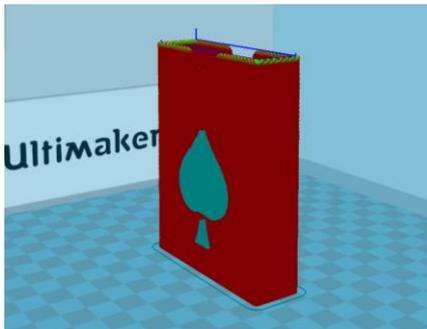


Figure 50. Vue de la pièce par couches et du support

❖ Paramètres importants fixes

Excel_Tests_PLA

C'est une pièce sans aucune fonctionnalité mécanique donc, on va l'imprimer en PLA parce que c'est plus facile et la pièce va être plus propre. On n'a pas besoin d'une précision de mesure élevée donc une hauteur de couche de 0,2mm sera suffisante.

Aussi l'épaisseur de la pièce est de 2mm et pour ça on l'a imprimée avec 2mm d'épaisseur de coque (5 tours).

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- PLA Gris
- Colle sur le plateau.

❖ Procédure de l'essai

On a imprimé la pièce avec le support plus rempli que d'habitude (50%) parce que les trous sont grands et avec des géométries différentes.

Les parois de la pièce sont minces ont et on l'a imprimé avec une épaisseur de la coque de 2mm, la même que celle de la pièce.

On a aussi décidé de les imprimer avec le support en lignes parallèles au profil de la pièce (voir figure 50) pour faciliter l'impression à la machine et pour aller plus vite (on a gagné 20min d'impression par rapport à la position en perpendiculaire).

c) Conclusion et perspectives

Le résultat est parfait, la pièce a été imprimée sans problèmes, sans défauts, le support est facile à enlever et les surfaces sont brillantes et propres.

Le PLA est un matériau facile à imprimer et avec bons résultats pour les pièces sans applications mécaniques.

C'est possible de faire ces types de pièces seulement avec un support plus grand et pour tout le trou.



Figure 51. Pièce résultante imprimée

6.6. Test 6 : Pièce avec des surplombs importants

a) Objectifs

Cet essai sert à déterminer la meilleure orientation des pièces avec des surplombs. De plus il nous permettra de déterminer les caractéristiques du surplomb (hauteur, amplitude, profondeur ou épaisseur) qu'il faut faire plus attention pour avoir une bonne impression.

b) Protocole

❖ Pièce

La géométrie de ces surplombs est la suivante :

	Vertical	Horizontal
Nombre surplombs	3 (séparés par 5mm)	1
Profondeur (x)	10.8mm	40mm
Amplitude (y)	10.4mm	10.5mm
Hauteur (z)	7,5 mm	6mm
Épaisseur	5mm	2.4mm
Inclinaison	90°C	90°C

Tableau 43. Caractérisation des surplombs selon la orientation de la de la pièce

C'est la pièce d'un support de caméra, elle doit donc être résistante, alors on va la faire de ABS.

Dimensions (mm)	10.8x26.4x40
Taille (Grande/ Petite)	Petite
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Avec
Surfaces (Plates/ Courbes)	Plates
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Avec
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Haute
Bridges (Avec/ Sans)	Avec

Tableau 44. Caractérisation de la pièce

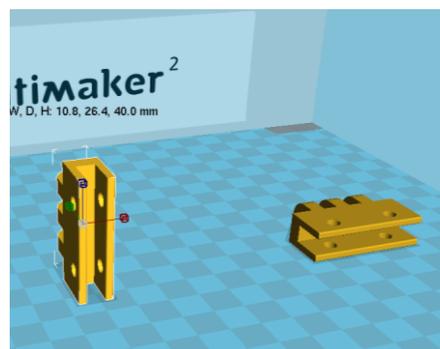


Tableau 45. Pièce test en vertical (gauche) et en horizontal (droit)

❖ Paramètres importants fixes

Excel_Tests_ABS

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- ABS Bleu
- Colle sur le plateau

❖ Procédure de l'essai

On a imprimé la pièce en deux orientations différentes, à la même fois et avec les mêmes paramètres.

c) Conclusion et perspectives

La pièce avec le meilleur résultat est sans nul doute celle qui a été imprimée à l'horizontale.

On peut voir que **le paramètre qui affecte plus la qualité des surplombs est leur épaisseur**. Ça veut dire que si on doit choisir l'orientation d'une pièce avec plusieurs surplombs, on essaiera de mettre l'orientation optimale pour le surplomb le plus épais.

Néanmoins, l'orientation de la pièce doit être choisie en premier lieu, selon les surfaces fonctionnelles qui nous intéressent.

6.7. Test 7 : Impression des trous horizontaux

a) Objectifs

Les objectifs sont d'améliorer l'impression des trous horizontaux et d'analyser leur précision.

On va modifier des paramètres d'impression ainsi que la conception des trous pour pouvoir choisir les meilleurs. On va mesurer les trous avec des calibres et des micromètres.

Les résultats qu'on va analyser vont être la précision, et on va connaître l'intervalle de tolérances qu'ont les trous. De plus, on va analyser quel est le meilleur support pour les trous et quels diamètres sont les plus faciles à imprimer.

b) Etudes

D'abord, on a trouvé différentes études concernant l'impression des trous qu'on va tester.

1. La première nous parle de la correction du diamètre à faire, parce que l'imprimante imprime au diamètre que nous l'avons conçu mais, comme le fil extrudé a une épaisseur, le diamètre résultant est plus petit. Donc, la correction est la suivant:

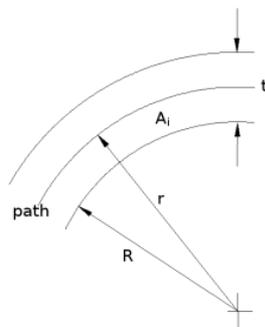


Figure 52. Correction des trous des pièces

$R > 6.5 \text{ mm} :$	$R \leq 6.5 \text{ mm} :$	$t = 0.4 \text{ mm}$ (Diamètre de la buse)
$R' = R + 0.5 * t$	$R' = \frac{t + \sqrt{t^2 + 4R^2}}{2}$	$R = \text{Rayon désiré}$
		$R' = \text{Rayon de la pièce}$

2. La seconde parle des différentes causes pour avoir des trous avec des défauts. Les problèmes les plus courants sont :
 - Les ceintures, poulies inexactes, dimensions verticales, et d'autres erreurs de montage.
 - Rétrécissement du plastique lors du refroidissement (surtout ABS).
 - En faisant un tour, vous obtenez plus de matériaux du côté intérieur que du côté extérieur.
 - Les modèles d'entrée sont des maillages polygonaux, donc toutes les courbes sont effectivement segmenté et un polygone a toujours une surface plus petite que son cercle circonscrit.

- Filaments tend à couper les coins ronds quand le chemin tourne.
- « Wobble Z » provoque aussi de rétractation des trous.
- Filament de faible qualité avec section irrégulière.

Ça qu'on peut faire pour arranger ces problèmes c'est :

- Vérifier le calibrage.
 - Vérifier la taille de la buse réelle.
 - Ajuster le plastique en utilisant la double extrusion.
 - Utiliser un bon filament.
 - Réduire les périmètres vitesse.
 - Utiliser « Flow_tweak » post-processeur et diminuer le périmètre de débit comme décrit ci-dessus en cas de trous sortant trop petit.
 - Définir la hauteur de la couche à pas plus de 0,2mm.
 - Utiliser *Tantillus Calculatrice* pour déterminer la largeur d'extrusion (utiliser la calculatrice intermédiaire ou supérieur et entrez au moins deux étapes par mm, buses et filaments tailles mm).
 - Utiliser Cura pour le tranchage et entrez une "épaisseur de la coque" qui est exactement divisible par cette largeur.
 - Utiliser la version sublime de Cura pour calibrer le flux afin d'atteindre les pièces parfaitement solides et puis utilisez la fonction d'incrustation pour insérer les périmètres pour obtenir la partie exactement à la bonne taille.
3. Aussi on propose des options pour faire des trous horizontalement : en forme de goutte ou avec la création d'une surface facile à débarrasser.

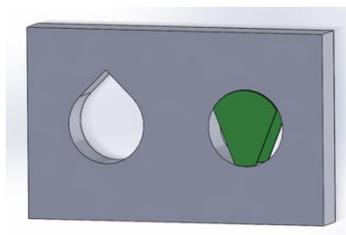


Figure 53. Trou en forme de goutte (gauche) et support créé dans le trou (droit)

c) Protocole

❖ Pièce

Dimensions (mm)	78x10x25
Taille (Grande/ Petite)	Grande
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Avec
Surfaces (Plates/ Courbes)	Plates
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Avec
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Baisse
Bridges (Avec/ Sans)	Avec

Tableau 46. Caractérisation de la pièce

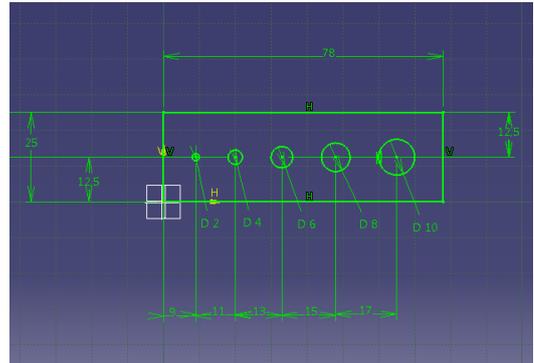


Figure 54. Pièce test initiale

❖ Paramètres importants fixes

Excel_Tests_ABS

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- ABS
- Colle sur le plateau

❖ Procédure de l'essai

On va imprimer des pièces avec quelques modifications : l'orientation du support, le type de support et la géométrie. On va améliorer le design des trous pour obtenir une surface interne plus propre et des mesures plus précises.

Les pièces de différentes géométries sont les suivantes :

Géométrie	Images
<p>Trous :</p> <p>Normaux, pièce avec des trous de 2 à 10mm séparés par 2mm</p>	
<p>Trous Corrigés :</p> <p>Trous avec les diamètres plus grands (+0,2mm) pour vérifier l'étude montré au début du test sur la correction des trous.</p>	
<p>Trous Corrigés Goute :</p> <p>Trous avec les diamètres plus grands (+0,2mm) et avec la forme de goutte.</p>	

Tableau 47. Géométries différentes des pièces du test : nom, définition et image

Les pièces qu'on a imprimé par rapport à la géométrie et au support :

#	Nom Pièce	Support/ Orientation
1	Trous	Aucun
2	Trous	Lines 0°
3	Trous Corrigés	Lines 45°
4	Trous Corrigés Goute	Lines 0°
5	Trous Corrigés Goute	Aucun
6	Trous Corrigé Goute	Lines 90°

Tableau 48. Pièces imprimés pendant l'essai: nom, type de support et son orientation

d) Résultats

Les résultats numériques obtenus des pièces sont sur les tableaux suivants. Néanmoins on a aussi représenté en graphique les résultats des mesures qui se trouvent dans l'annexe 9.

Pour obtenir les dimensions des trous on a utilisé différents outils de mesure :

- Les trous de diamètre 2mm et 4mm on les a mesuré avec des calibres qui étaient disponibles au CTT. Nous avons donc des résultats approchés à 0.05mm près.
- Les trous de 6mm, 8mm et 10mm ont pu être mesurés au micromètre. Les mesures donc sont plus exactes.

#	Pièce	Support/ Orientation	Décollement au petit trou	Décollement au grand trou	Aspect surface intérieure	Cylindricité
1	Trous	Aucun	0,35	0,4	3	4
2	Trous	Lines 0°	0,2	0,7	3	4
3	Trous Corrigés	Lines 45°	0,4	0,55	2	3
4	Trous Corrigés Goute	Lines 0°	0,2	0,45	5	3
5	Trous Corrigés Goute	Aucun	0,2	0,5	1	5
6	Trous Corrigés Goute	Lines 90°	0,15	0,25	4	4

Tableau 49. Résultats géométriques des pièces imprimées

L'aspect visuel des trous est mieux avec la correction de la géométrie en forme de goutte, car les surfaces au-dessus du trou tombent moins que dans la géométrie circulaire, parce qu'il n'y a pas une seule couche qui fa toute la surface du top du trou ; sont plusieurs couches qui se joignent en un point. Aussi c'est nécessaire d'utiliser des supports, surtout pour les diamètres de 6mm ou plus.

D _{Nominal}	2 mm				4 mm				6mm		8 mm		10 mm	
#	D _{min}	D _{max}	Moy.	IT	D _{min}	D _{max}	Moy.	IT	D	D-D _N	D	D-D _N	D	D-D _N
1	1,85	1,85	1,85	0	3,8	3,8	3,8	0	5,843	0,157	7,943	0,057	9,972	0,028
2	1,85	1,85	1,85	0	3,95	3,95	3,95	0	5,943	0,057	7,917	0,083	9,915	0,085
3	2	2,05	2,025	0,05	4	4,05	4,025	0,05	6,11	0,11	7,819	0,181	9,942	0,058
4	2,05	2,1	2,075	0,05	4	4,05	4,025	0,05	6,098	0,098	8,044	0,044	10,091	0,091
5	2,05	2,1	2,075	0,05	4,05	4,1	4,075	0,05	6,16	0,16	8,212	0,212	10,183	0,183
6	2,05	2,1	2,075	0,05	4,1	4,15	4,125	0,05	6,23	0,23	8,167	0,167	10,184	0,184

Tableau 50. Dimensions des trous à chaque pièce test imprimée

Les dimensions sont variables, on peut dire que ce n'est pas nécessaire de corriger les dimensions des trous. Les dimensions plus précises sont, généralement, pour les pièces 1 et 2. Néanmoins, on restera toujours sous la valeur nominale, la valeur désirée.

e) Conclusions et perspectives

Pour conclure on peut dire que :

- Si on imprime les trous à la dimension qu'on veut, ils vont être toujours en dessous de cette mesure.
- Si on veut un diamètre **minimum** d'un trou il faudra l'**augmenter 0.4mm** pour être sûr qu'on sera par-dessus du diamètre nominal.
- Avec trous de plus de 8mm de diamètre, pour avoir une surface intérieure plus propre c'est intéressant de modifier la **géométrie du trou** en la faisant **comme une goutte** (avec une hauteur de 2xHauteur de couche environ).
- Pour des diamètres de 6mm ou plus on doit mettre un support.
- Le support est mieux s'il est de **type Lines** ; le type « Grid » n'est pas nécessaire surtout qu'il laisse une surface moins propre, il dépense plus de matériau et le temps d'impression augmente.
- L'**orientation du support** n'est pas très importante mais, si on peut choisir, la meilleure, en termes de précision dimensionnelle et de qualité de la surface intérieure du trou, est à 0° de l'axe du trou.
- L'IT des trous obtenue est le suivant:

D _N (mm)	2	4	6	8	10
IT	11	11	13	13	13
Tolérances (µm)	60	75	180	220	220

Tableau 51. Intervalle de tolérances des trous

On a vu aussi que quand le trou est plus grand il y a plus de décollement que du côté du petit trou (approximativement le double), pourtant il faudra faire plus attention avec les pièces avec des grands trous.

6.8. Test 8 : Pièce avec toutes les faces plates et fonctionnels

a) Objectifs

On a des problèmes avec des pièces qui ont des surplombs dans toutes les surfaces fonctionnels et on veut trouver la meilleure manière de les imprimer toutes correctement.

Le logiciel **Meshmixer** va nous permettre de créer différents supports avec lesquels on va essayer d'imprimer. Dans l'annexe 10, on trouve le manuel par la création des supports avec ce logiciel.

b) Protocole

❖ Pièce

Dimensions	10x50x60
Taille (Grande/ Petite)	Grande
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Sans
Surfaces (Plates/ Courbes)	Plates
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Avec
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Baisse
Bridges (Avec/ Sans)	Sans

Tableau 52. Caractérisation de la pièce

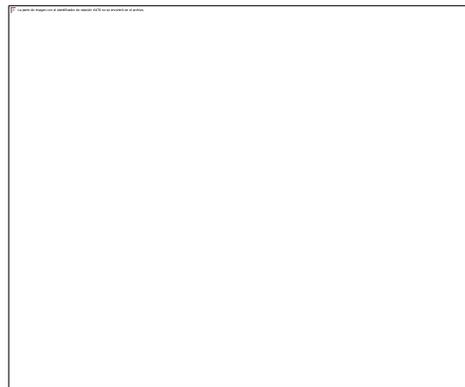


Figure 55. Pièce test

❖ Paramètres importants fixes

Excel_Tests_ABS

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- ABS
- Colle sur le plateau

❖ Procédure de l'essai

Afin d'imprimer proprement la pièce et toutes les surfaces fonctionnelles on va le faire à 45°.

On va faire différents supports avec le « **Meshmixer** » et on verra la meilleure manière de mettre le support et la qualité des pièces imprimées.

	Design	Résultat imprimé
1		La pièce était bien imprimée mais les supports ont marqué beaucoup la surface, cela n'est pas propre.

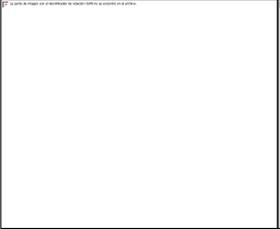
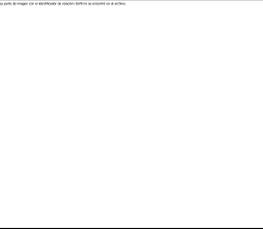
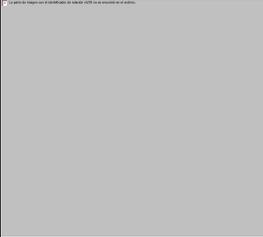
2			Les premières couches n'ont pas été bien imprimées et elles se sont difformées.
3			Pour assurer la bonne impression des premières couches on a mis des petits supports à la base de la pièce. Le résultat a été mauvais comme à la pièce 2.
4			Sans support et avec « <i>Brim</i> ». Il faut faire attention pour voir que la première couche est en contact avec le plateau. Le résultat a été très bon : surfaces plates, sans rétraction et sans décollement. Si on veut une pièce avec plus de qualité on doit diminuer la hauteur de couche.



Figure 56. Pièces imprimés en ABS Bleu en ordre de gauche à droit

c) Conclusion et perspectives

- Il est facile d'imprimer une pièce avec les surfaces plates à 45°, aussi sans aucun support.
- Il faut faire attention parce que la première couche doit toucher complètement le plateau et si on met du «*Brim*» les premières couches seront mieux collées et on n'aura pas de problèmes.
- Les supports faits avec le «**Meshmixer**» ne sont pas nécessaires pour cette pièce et c'est difficile de les enlever. Ils ont laissé des marques sur l'ABS qui ne sont pas belles.
- La meilleure pièce est celle qui n'a pas de support.

On doit essayer avec une autre géométrie si l'impression à 45° est aussi bien qu'avec cette pièce.

6.9. Test 9 : Pièce avec faces courbes et des trous

a) Objectifs

La plus part des pièces imprimés ont quelques applications fonctionnelles. Avant d'imprimer une pièce, il faut connaître les plans ou surfaces fonctionnelles car on veut une meilleure précision ou un meilleur aspect visuel pour choisir la meilleure manière de l'imprimer.

Ça peut être évident mais il y a des fois qu'on ne pense pas suffisant à cet aspect, pourtant on a fait un test pour le remarquer et démontrer.

Aussi on veut voir si la conclusion extraite à l'essai antérieur est aussi bonne pour des surfaces courbes.

b) Protocole

❖ Pièce

Il y a des problèmes avec les pièces avec des trous ou cylindres qui nous intéressent sa cylindricité et précision des mesures. On veut mesurer les différences entre la qualité des pièces qu'on aura si on imprime la même en chaque direction.

Dimensions	D15x30
Taille (Grande/ Petite)	Petite
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Avec
Surfaces (Plates/ Courbes)	Courbes
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Sans
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Haute
Bridges (Avec/ Sans)	Sans

Tableau 53. Caractérisation de la pièce

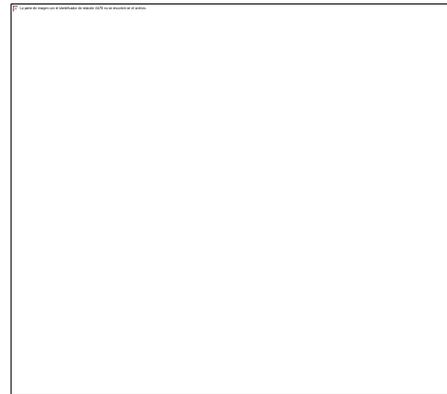


Figure 57. Conception de la pièce test

❖ Paramètres importants fixes

Test		1	2	3
Qualité	Hauteur de couche (mm)	0.1	-	-
	Épaisseur de la coque (mm)	0.8	1.2	1.2
Remplissage	Épaisseur dessus/dessous (mm)	0.6	1.2	1.2
	Remplissage (%)	10	10	0
Vitesse et température	Vitesse d'impression (mm/s)	40	-	-

Tableau 54. Paramètres d'impression

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- ABS
- Colle sur le plateau

❖ Procédure de l'essai

On va imprimer la pièce en 3 directions différents : en vertical (A), à 45° (B) et en horizontal (C).

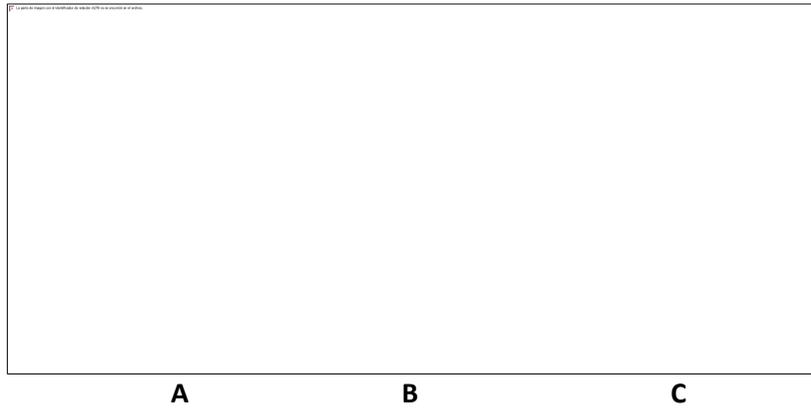


Figure 58. Pièce imprimée selon la direction

Test 1

Pièce	Résultats	Conclusions
A	<ul style="list-style-type: none"> - Défaut de cratères (« pillowing »), c'est à dire il faut avoir une épaisseur dessus/dessous de plus de 0.6mm - Cylindricité de la pièce A est très mauvaise parce que les lignes des remplissages touchent la surface du trou et la rétraction déforme le trou 	<ul style="list-style-type: none"> • Il faut une épaisseur dessus de plus de 0.6mm, on va mettre toujours une épaisseur minimum de 1,2mm • Changer le remplissage pour éviter qu'il ne touche pas la surface du trou et améliorer la cylindricité
B	<ul style="list-style-type: none"> • Surface extérieure très mauvaise 	<ul style="list-style-type: none"> • Les supports ne peuvent pas être comme on les a faits. • On va changer le support par un de lignes

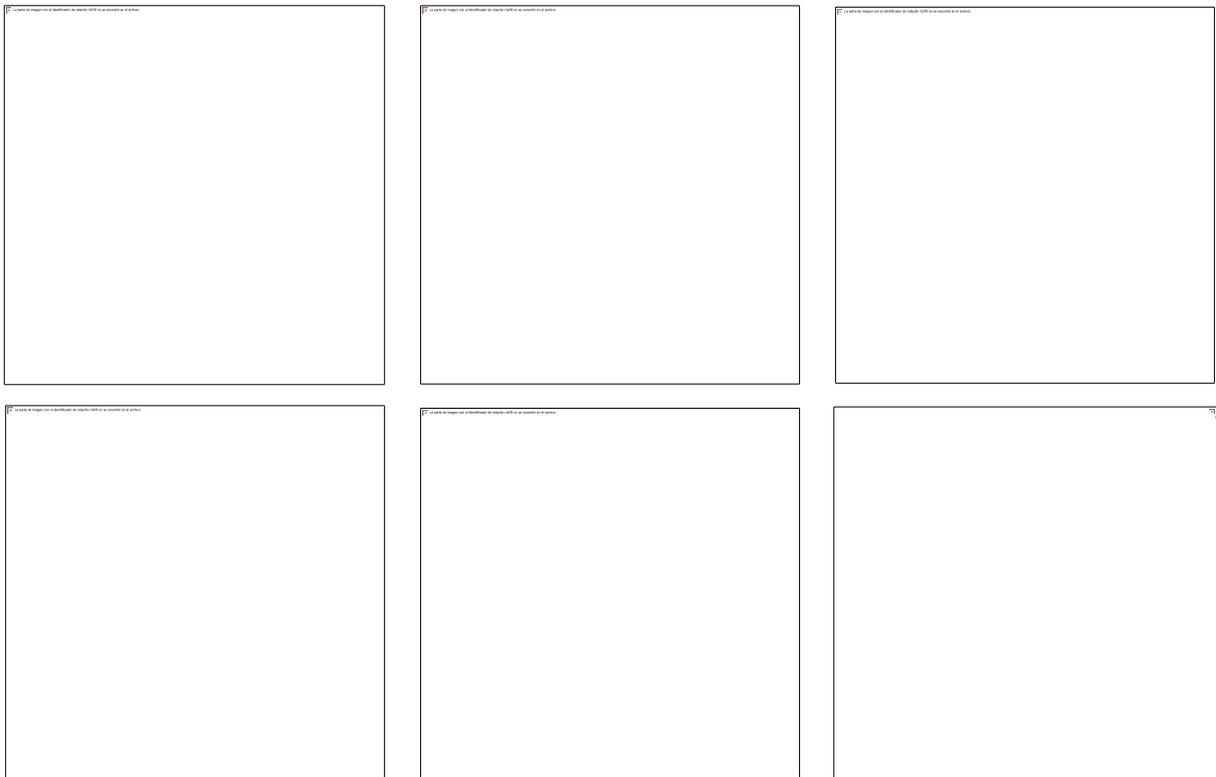


Figure 59. Pièces imprimés en vertical (gauche) et à 45° (centre et droit). Vision sur Cura et résultat obtenu

Test2

Pièce	Résultats	Conclusions
A	<ul style="list-style-type: none"> - On l'a mis pour éviter de toucher le remplissage avec la surface du trou. Néanmoins pendant l'impression on a vu que la ligne du remplissage touchait la surface et pourtant la cylindricité a été mauvaise aussi. 	<ul style="list-style-type: none"> • On doit voir si vraiment le remplissage est la cause de la mauvaise cylindricité, on va l'imprimer sans remplissage • C'est la plus belle mais la cylindricité et la précision des mesures est pire que la pièce C
B	<ul style="list-style-type: none"> • Le cylindre à 45° a été autant mauvais que celui du premier test • La surface a été autant mauvaise qu'au premier test 	<ul style="list-style-type: none"> • Il n'est pas possible d'imprimer la pièce à 45°, il faut donc éviter dans la mesure du possible de les imprimer en cette direction.
C	<ul style="list-style-type: none"> • La pièce avec l'IT le plus petit est la C mais la qualité des surfaces extérieures n'est pas propre 	<ul style="list-style-type: none"> • Il n'est pas possible d'imprimer la pièce en horizontal • Les trous imprimés en position horizontale, il ne faut pas leur corriger la mesure du trou car la précision des mesures est bonne.

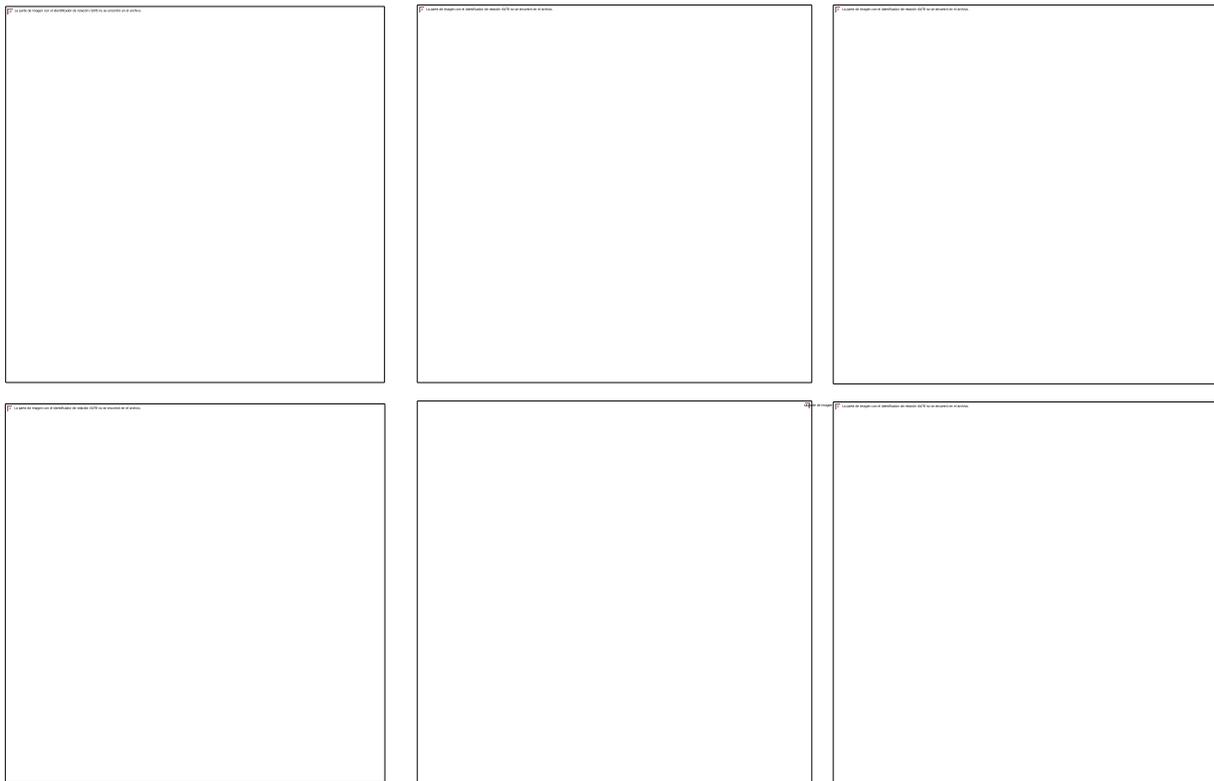


Figure 60. Pièces imprimés en vertical (gauche) et à 45° (centre) et horizontal (droit)

Test 3

On a imprimé la pièce A sans remplissage pour voir si l'effet de la rétractation des lignes de remplissage est la cause de la mauvaise cylindricité.

Pièce	Résultats	Conclusions
A	<ul style="list-style-type: none"> - La pièce a été plus cylindrique 	<ul style="list-style-type: none"> • On peut les imprimer sans remplissage mais la rigidité de la pièce va être pire

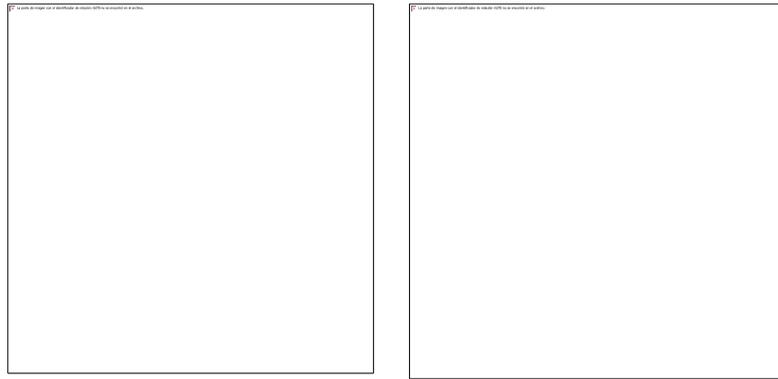


Figure 61. Pièce vertical sans remplissage vision sur Cura (gauche) et résultat imprimé (droit)

c) Résultats

L'IT des trous est de 0.5mm environ pour l'impression verticale et de 0.15mm pour l'impression horizontale.

T	P	Ci _{int}	Support	Défauts	D. Trou _{min} (mm)	D. Trou _{max} (mm)	IT _{Trou} (mm)	D. Ext _{min} (mm)	D. Ext _{max} (mm)	IT _{Diam} (mm)
1	A	0	Aucun	Cratères	6.44	6.85	0.41	14.54	14.76	0.22
	B	0	Meshmixer	Surplombs mauvais	6.61	6.68	0.07	14.59	14.74	0.15
2	A	1	Aucun	-	6.15	6.68	0.53	14.34	14.81	0.47
	B	2	Lines-Cura	Surplombs mauvais	6.35	7.62	1.27	14.78	14.92	0.14
	C	2	Lines-Cura		7.09	7.237	0.15	14.74	15.3	0.56
3	A	2	Aucun	-	6.118	6.7	0.58	14.39	14.78	0.39

Tableau 55. Résultats des pièces: Intervalles des dimensions des trous et du cylindre extérieur

d) Conclusion et perspectives

- Les surfaces courbes externes (cylindres) la meilleure orientation est en vertical.
- Les trous : du point de vu surface, la meilleure orientation est l'orientation verticale
- Les trous : du point de vu dimensionnel la meilleure orientation est l'orientation horizontale, car la rétractation n'a pas un effet aussi important.

Ces conclusions sont pour un matériau comme l'ABS ou la rétractation est importante, néanmoins si on imprime des pièces avec le PLA ou le PET qui n'ont pas de rétraction, la meilleure orientation est toujours verticale. On n'attendait pas que l'impression à l'horizontale soit bonne pour imprimer des trous, cependant on a démontré ici qu'elle est bonne.

Cependant, si on a des pièces avec différentes surfaces ou géométries fonctionnelles on doit définir la direction optimale d'impression pour chacune. Pour décider la direction de l'impression de la pièce selon notre choix :

- On peut choisir l'orientation meilleure pour la majorité des surfaces.
- La optimale par la surface la plus difficile à imprimer et qui peut avoir plus d'effets.
- La surface qui sa qualité finale nous intéresse la plus.

6.10. Test 10 : Figurine

a) Objectifs

Ce test va nous permettre d'imprimer des sculptures avec une géométrie difficile, avec détails, en PLA et ABS pour voir les différences. On veut déterminer quel est le meilleur matériau pour imprimer des figures, comment doivent être les supports, quels paramètres il faut régler...

b) Protocole

Les pièces sans aucune fonctionnalité mécanique peuvent avoir une épaisseur de couche plus petite et un remplissage petit.

On mettra toujours un remplissage de 10% ou moins et une épaisseur de couche de 0.8mm.

❖ Pièce

Dimensions	80.5x32.3x73.2
Taille (Grande/ Petite)	Grande
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Sans
Surfaces (Plates/ Courbes)	Courbes
Détails (Avec/ Sans)	Avec
Surplombs (Avec/ Sans)	Avec
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Haute
Bridges (Avec/ Sans)	Sans

Tableau 56. Caractérisation de la pièce

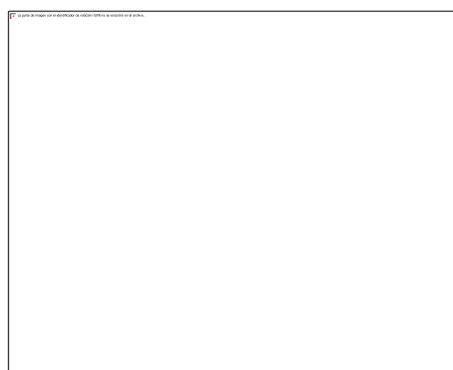


Figure 62. Model test

❖ Paramètres importants fixes

		ABS	PLA
Températures	Température d'extrusion (°C)	225	220
	Température du plateau (°C)	80	50
Qualité	Hauteur de couche (mm)	0.2	0.2/0.1
	Épaisseur de la coque	0.8	0.8
Remplissage	Épaisseur dessus/dessous (mm)	1.2	1.2
	Remplissage (%)	10	10
Vitesse et température	Vitesse d'impression (mm/s)	40	40

Tableau 57. Paramètres d'impression

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- ABS : Bleu
- PLA : Gris
- Colle sur le plateau

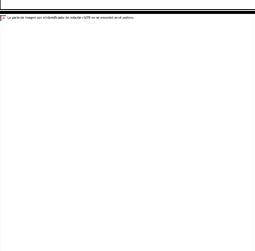
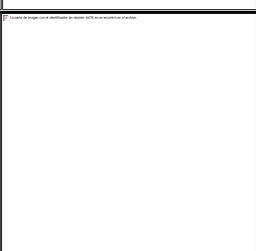
❖ Procédure de l'essai

ABS

On va commencer par imprimer la pièce avec l'ABS et déterminer les meilleurs paramètres d'impression.

Les paramètres qu'on va régler sont :

- Le support
- Le temps minimum par couche
- L'utilisation du ventilateur

#	Paramètres			Images	
1	Support	Partout	Angle min : 30°		
	Temps min couche (sec)		5		
	Ventilateur		Oui (30%)		
2	Support	Partout	Angle min : 45°		
	Temps min couche		5		
	Ventilateur		Oui (30%)		
3	Support	Aucun			
	Temps min couche (sec)		5		
	Ventilateur	Non			
4	Support	Contact avec le plateau	Angle min : 50°		
	Temps min couche (sec)	10			
	Ventilateur		Non		

PLA (Température = 220°C)

Une fois que l'on a trouvé le meilleur support et les paramètres pour l'ABS on va analyser si la figure est plus belle avec le PLA et on va changer :

- La hauteur de couche
- Le support

#	Paramètres	Images
1	Hauteur couche (mm)	0.2
	Support	Contact avec le plateau Angle min : 50°
	Temps min couche (sec)	10
	Ventilateur	Non
2	Hauteur couche (mm)	0.1
	Support	Contact avec le plateau Angle min : 50°
	Temps min couche (sec)	10
	Ventilateur	Non

<http://www.tridimake.com/2013/01/how-fine-can-ultimaker-print.html>

c) Conclusion et perspectives

- L'imprimante est capable d'imprimer des figures assez difficiles.
- L'ABS et le PLA sont autant bons pour imprimer des figures avec des différences sur le résultat :
 - Le PLA offre une surface plus brillante, pièce plus rigide mais des couches plus visibles
 - L'ABS offre une surface plus lisse mais la partie basse des surplombs ne s'imprime pas proprement.
- Avec une hauteur de couche de 0.1mm on voit une claire amélioration sur la qualité des pièces.
- Le support du Cura est assez bon mais il doit être le plus petit possible au même temps qu'il touche quelque côté de la pièce pour éviter les vibrations.
- Le plus important pour un support est d'assurer la rigidité de la partie supportée et le moins de mouvement possible de la pièce

6.11. Test 11 : Pièce décorative PET et Nylon

a) Objectifs

Cet essai sert à connaître mieux l'impression des nouveaux matériels comme le PET et le Nylon pour pièces décoratives. On verra la qualité et les défauts sur pièces avec une géométrie plus complexe.

b) Protocole

❖ Pièce

Dimensions (mm)	43.1x40.5x31.2
Taille (Grande/ Petite)	Petite
Contact avec le plateau (Grand/ Normal)	Normal
Trous (Avec/ Sans)	Avec
Surfaces (Plates/ Courbes)	Courbes
Détails (Avec/ Sans)	Sans
Surplombs (Avec/ Sans)	Avec
Remplissage (Avec/ Sans)	Avec
Précision nécessaire (Haute/ Baisse)	Baisse
Bridges (Avec/ Sans)	Avec

Tableau 58. Caractérisation de la pièce

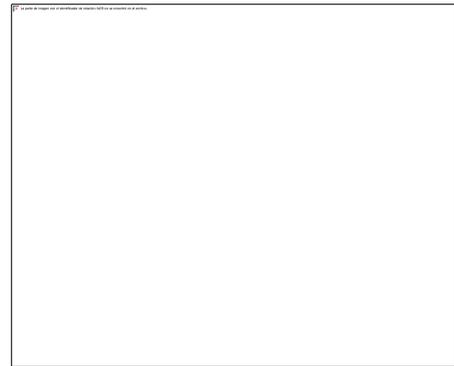


Figure 63. Pièce test

❖ Paramètres importants fixes

Excel_Tests_PET, Excel_Tests_Nylon

❖ Matériaux et conditions initiales additionnelles

- PET
- Colle sur le plateau

❖ Procédure de l'essai

Pièce PET	1	2	3	4
Support	Partout	Aucun	En contact avec le plateau	En contact avec le plateau
Distance rétraction (mm)	4.5	6	6	6
Vitesse de positionnement (mm/s)	150	150	150	80

Tableau 59. Pièces imprimées et changement des paramètres

- Le PET est assez visqueux et les pièces avaient un peu de défaut de cordage donc, on a augmenté la distance de rétraction en diminuant l'effet.
- Aussi il y avait des couches décalés avec une hauteur de 20mm où la figure est plus mince, parce que la buse collisionne contre les parties de la pièce et les bougent, donc on a diminué la vitesse de positionnement pour éviter les couches décalés et effet.



Figure 64. Pièces résultantes imprimées

Pièce Nylon	1	2	3	4	5
Température (°C)	235	235	235	240	240
Support	En contact avec le plateau				
Distance rétraction (mm)	6	4.5	4.5	4.5	6
Vitesse de positionnement	80	80	150	150	150

Tableau 60. Pièces imprimées et changement des paramètres

- Avec une vitesse de positionnement plus élevée et une distance de rétraction plus large le cordage diminue.
- Aussi avec 5°C plus, il n'y a pas de défauts d'union des couches.
- Même s'il y a de cordage à toutes les pièces, il est facile à enlever.

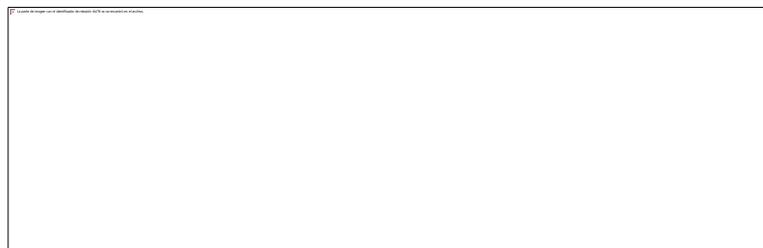


Figure 65. Pièces résultantes imprimées

c) Conclusion et perspectives

- Avec le PET on a réussi imprimer la pièce proprement et obtenir un bon aspect et une qualité générale. L'aspect est brillant et uniforme pour toute la pièce finale sans défauts importants.
- Le Nylon a été plus difficile à imprimer : le matériau brûlait un peu et les défauts ont été importants concernant les bordures de la pièce.
- Une distance de rétraction de 6mm marche mieux pour le PET et le Nylon.

Il faut chauffer le Nylon dans un four pour enlever l'eau qu'il a absorbé, car il absorbe de l'humidité et il brûle quand il est dans la buse, on peut entendre les bulles d'eau, et la qualité du matériau est pire, il prend un aspect plus blanc (à la place de transparent), sale et plus fragile, il perd de l'élasticité.

7. Conclusion

Ce travail a pour objectif l'optimisation des pièces imprimées avec la machine Ultimaker² et nous avons réalisé des études pour connaître mieux l'imprimante, les paramètres d'impression et les pièces résultantes.

En premier lieu, avec les essais mécaniques à flexion et à traction les propriétés mécaniques des pièces obtenues par FDM ont été définies. Maintenant, nous connaissons les limites des propriétés sur les pièces pour chacun des matériaux, l'effet de certains paramètres sur les propriétés et les valeurs que peuvent prendre ces paramètres pour optimiser les propriétés.

Tandis que la principale source d'erreurs provient d'une mauvaise configuration de quelques paramètres et surtout de la température, la capacité d'un bon réglage des paramètres est très importante pour éviter les défauts sur les pièces et obtenir la meilleure qualité possible dès le début. Actuellement, les paramètres les plus influents sont la température, la vitesse d'impression, la hauteur de couche, le remplissage et la température du plateau et ils sont mieux définis qu'avant. Avec les résultats et l'expérience gagnée, on peut prévoir le résultat sur les pièces en fonction des décisions prises.

Cependant, les valeurs définies comme optimales doivent être contrôlées et ajustées selon le type de pièce et sa géométrie à toutes les impressions. Dans ces situations, le plan d'essais sert à nous guider; dans celui-ci on trouvera des pièces plus complexes avec des formes différentes et il nous servira pour nous orienter dans le choix d'autres paramètres ou conditions.

D'un autre côté, le PET et le Nylon sont des nouveaux matériaux avec lesquels nous avons appris comment imprimer et avec quelles pièces les employer, car ils ont des caractéristiques très intéressantes et différentes au PLA et à l'ABS.

Les pièces imprimées présentent un aspect et une qualité meilleure qu'au commencement de ce projet, la connaissance des paramètres est plus approfondie et les pièces résultantes ont des propriétés bien définies.

Une solution pour obtenir encore plus de qualité sur les pièces réside dans l'étude continuée et plus approfondie d'autres paramètres d'impression et d'une ampliation des différentes géométries.

A mode de conclusion, ci-dessous on peut trouver les valeurs des paramètres qu'on donne par optimaux. Il y a des intervalles séparés par un tiret (-), cela veut dire qu'on peut prendre une valeur entre ces deux en fonction de la pièce à imprimer.

PLA	Aspect visuel	Propriétés mécaniques	TOTAL
Température d'extrusion (°C)	220	210 - 220	220
Température du plateau (°C)	50	50	50
Vitesse d'impression (mm/s)	30	30	30
Hauteur de couche (mm)	0.1	0.1 - 0.2	0.1
Distance de rétraction (mm)	4.5	4.5	4.5
Ventilateur	Oui	Oui	Oui
Conditions externes	Colle sur le plateau	Colle sur le plateau	Colle sur le plateau

ABS	Aspect visuel	Propriétés mécaniques	TOTAL
Température d'extrusion (°C)	220	235	225
Température du plateau (°C)	80	80	80
Vitesse d'impression (mm/s)	30 - 60	30 - 60	30 - 60
Hauteur de couche (mm)	0.1	0.1 - 0.2	0.1
Distance de rétraction (mm)	4.5	4.5	4.5
Ventilateur	Oui/ Non	Non	-
Conditions externes	Colle sur le plateau + boîte si c'est nécessaire	Colle sur le plateau	Colle sur le plateau (+boîte)

Nylon	Aspect visuel	Propriétés mécaniques	TOTAL
Température d'extrusion (°C)	235 - 240	245	240
Température du plateau (°C)	80	80	80
Vitesse d'impression (mm/s)	60	30	30 - 60
Hauteur de couche (mm)	0.2	0.2	0.2
Distance de rétraction (mm)	6	4.5 - 6	6
Ventilateur	Oui	Oui	Oui
Conditions externes	Colle sur le plateau	Colle sur le plateau	Colle sur le plateau
Vitesse de positionnement (mm/s)	150	150	150

PET	Aspect visuel	Propriétés mécaniques	TOTAL
Température d'extrusion (°C)	Transparence* : 210 Amorphe : 230	230	230
Température du plateau (°C)	60	60	60
Vitesse d'impression (mm/s)	30 - 60	30	30 - 60
Hauteur de couche (mm)	Transparence* : ≥0.2	0.1 - 0.2	0.2
Distance de rétraction (mm)	6	4.5 - 6	6
Ventilateur	Non	Non	Non
Conditions externes	Colle sur le plateau	Colle sur le plateau	Colle sur le plateau

Tableau 61. Valeurs optimales des paramètres d'impression

*Si la pièce n'a pas de remplissage

8. Bibliographie

- [1] Witbox, « Cura Manual : Mode d'emploi Cura ». [En ligne]. Disponible: <http://www.3d-printerstore.ch/images/witbox/FR/emploi%20Cura%20Witbox.pdf>
- [2] Fonda, C., « Guía practica para tu primera impresión 3D », Trieste, Italy, 2014.
- [3] SPW - DGO6 « Fiche matériaux: PET Polyéthylène Téréphtalate », Jambes, Panama.
- [4] Tymrak, B.M., Kreiger, M., Pearce, J.M., « Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions », Houghton, MI, United States, 2013. [En ligne]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914001538>
- [5] Sood, A. K., Ohdar, R.K., Mahapatra, S.S., « Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts », India, 2009. [En ligne]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909002945>
- [6] Ozcelik, B., Ozbay, A., Demirbas, E., « Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding », Turkey, 2010. [En ligne]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193310001636>
- [7] Albuquerque, A. J., « Optimización y caracterización de piezas fabricadas de PLA mediante técnicas aditivas », Madrid, Spain, 2014. [En ligne]. Disponible: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/19958>
- [8] Relaño Pastor, A. A., « Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida », Madrid, Spain, 2013. [En ligne]. Disponible: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/18015>
- [9] Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., Gu, P., « Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties » Calgary, Alberta, Canada, 2002. [En ligne]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612502701394>
- [10] Brindley, P., Ruth, « Preliminary Investigation Into the Mechanical Properties of Stratasys Polycarbonate & M30 ABS materials », Loughborough, UK, 2008.
- [11] Bagsik, A., « Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with ULTEM*9085 », Boston, ANTEC 2011.
- [12] Torradoa, A. R., Shemelyaa, C. M., Englisha, J. D., Lina, Y., Wickera, R. B., « Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical propertyanisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing », TX 79968, USA, 2015. [En ligne]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860415000111>
- [13] Rahimia, R., Esfahanianb, M., Moradi, M., « Effect of reprocessing on shrinkage and mechanical properties of ABS and investigating the proper blend of virgin and recycled ABS in injection molding », Isfahan, Iran, 2014. [En ligne]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013614001605>

[14] El-Gizawy, A. S., Corl, S., Graybill, B., « Process-induced Properties of FDM Products », STRATASYS, 2010. [En ligne]. Disponible:

<http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/FDM%20Test%20Reports/Process-induced%20Properties%20of%20FDM%20Products.pdf>

[15] Justyna Skowyras, J., Pietrzaka, K., A. Alhnan, M., « Fabrication of extended-release patient-tailored prednisolone tablets via fused deposition modelling (FDM) 3D printing », Poland, 2014. [En ligne]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928098714004370>

[16] Dupeux, M., « Introduction à la mécanique de matériaux et des structures ». Dunod, Paris, 2009.

[17] Hazard, C., « Mémotech Dessing Technique Normes – CAO ». Editions CASTEILA, Paris, 2002.

[18] Makershop, « Guide d'achat du filament 3D ». [En ligne]. Disponible: <http://www.makershop.fr/achat-guide-acheter-choisir-filament-3d/>

[19] Ferré, J., « El diseño factorial completo 2^k », Tarragona, Spain.

[20] Roudier, J., « Essai de traction ABS Imprimante 3D », Paris, France. [En ligne]. Disponible: <http://roudier.eiffelcachan.pagesperso-orange.fr/Tract%20imprim3D.htm>

Manuel Cura

Manuel CATIA V5

Guides d'impression. [En ligne]. Disponible: <http://support.3dverkstan.se/category/31-guides>

Guide RepRap. [En ligne]. Disponible: <http://reprap.org/wiki/RepRap/fr>

Web Normes : [En ligne]. Disponible: <http://sagaweb.afnor.org/fr-FR/>

9. Annexes

9.1. Annexe 1 : Propriétés des matériaux

Matériel	Nylon	Information additionnel/ Valeur approximé	PET	Information additionnel/ Valeur approximé	PLA	Information additionnel/ Valeur approximé	ABS	Information additionnel/ Valeur approximé
Densité (kg/dm ³)	1.14		1.35		1.25		1.05	
Prix (€/kg)	61.11	27.5€/bobine	88.67	39.90€/bobine	19.9	19,9 €/bobine	19.9	19,9 €/bobine
Température d'extrusion (°C)	230 - 250	242	210 - 230	220	180 - 220	210	220 - 250	225
Température plateau (°C)	30 - 80	80 recommandé	50 - 60		0 - 60	Plateau chauffant optionnel	70 - 110	
Température de transition vitreuse (°C)	52	49.4	78		60 - 65		88 - 120	112.62
Température de fusion (°C)	220		207 - 235		185		177 - 260	210
Diamètre filament (mm)	3	(2,85mm ± 0,05)	3		3		3	
Hauteur de couche (mm)	Les meilleurs résultats sont obtenus Top / bas épaisseur: 1,5 mm, ou au lorsque la hauteur de couche <80% moins 6 couches solides. du diamètre de la buse, et la Plus brillant / transparente:				-		-	

	largeur d'extrusion > = diamètre de la buse.	augmenter votre hauteur de la couche de 0,2 mm ou plus/ impression plus rapide/ seulement utiliser un seul périmètre.		
Rétraction minima	Distance (mm)	6	4,5	Peut nécessiter une distance supérieure de rétraction, car il est plus visqueux
	Vitesse (mm/s)	30	40	25
Vitesse d'impression (mm/s)	30	Pour pièces difficiles: 30 mm/s. Si la géométrie est très simple on peut arriver jusqu'à 60mm/s	30 - 60	40 (30 pour le périmètre, 60 pour le remplissage)
Fan	Oui	No	Oui	Oui
Colle pour lit adhérence	Oui	Il est recommandé d'utiliser du ruban de masquage bleu pour une meilleure adhérence à votre plateau d'impression Utilisez une fine couche de colle PVA pour lit adhérence	Oui	Il est recommandé d'utiliser du ruban de masquage bleu pour une meilleure adhérence à votre plateau d'impression.
Odeur	No	Il ne dégage pas d'odeur pendant l'extrusion.	No	No
Couleurs	Naturel (White semi - transparent) Vous pouvez toujours obtenir imprimés colorés par les teindre		Vert, Noir, Bleu, Rouge	
Transparence	Translucide		Optical qualité	Transparent
				Opaque

Tableau 62. Propriétés générales des matériaux

	Nylon		PET	PLA		ABS	
	CES EduPack	FDM	CES EduPack	CES EduPack	FDM	CES EduPack	FDM
Limite élastique σ_m (MPa)	50 - 94.8	32	56.5 - 62.3	55 - 72	25 - 60	18.5 - 51	29.99
Résistance à la flexion σ_{FM} (MPa)	68 - 100	59 - 69	50 - 60	83 - 108		40 - 80	61
Contrainte à la rupture σ_b (MPa)	90 - 165	44 - 48	48.3 - 72.4	47 - 70		27.6 - 55.2	36
Allongement élastique (%)	7.25%	250%	280 - 320	2.5 - 6 %	2 - 5 %	20 - 100%	2%
Déformation à la rupture ϵ_b (%)	30 - 100	20 - 226%		2.5 - 6 %	2 - 5 %		4%
Module élastique de Young (MPa)	2620 - 3200	197 - 1310	2800 - 3000	3300 - 3600	2650 - 3300	2000 - 2900	1807
Module de flexion (MPa)	3300	1241 - 1310	2410 - 3090	3100 - 3600		1200 - 2800	

Tableau 63. Propriétés mécaniques des matériaux trouvés dans la base de données CES EduPack et des études trouvés de FDM

9.2. Annexe 2. Facteurs clés de succès

	Facteurs clés de succès	Précision des mesures	Aspect visuel	Vitesse/temps d'impression	Propriétés mécaniques	TOTAL	Moyenne	Facteurs sélectionnés
Températures	Température d'impression (°C)	4	4	4	4	16	4	1
	Température du lit (°C)	4	3	1	2	10	2,5	1
Rétraction	Vitesse de rétraction (mm/s)	2	3	2	1	10	2	
	Distance de rétraction (mm)	1	5	2	2	10	2.5	1
Ventilateurs	Vitesse de ventilateurs	3	3	1	2	9	2,25	
Qualité	Hauteur de couche (mm)	5	5	5	3	18	4,5	1
	Épaisseur de la coque	4	3	4	3	14	3,5	1
	Autoriser le retrait	2	4	2	1	9	2,25	
Remplissage	Épaisseur dessus/dessous (mm)	2	3	3	2	10	2,5	1
	Remplissage (%)	3	4	5	4	16	4	1
Vitesse et température	Vitesse d'impression (mm/s)	5	5	4	1	15	5	1
Support	Type de support	2	5	4	1	12	3	1
	Type d'accroche au plateau	2	3	3	1	9	2,25	
Machine	Diamètre de la buse (mm)	1	1	1	1	4	1	
Qualité	Épaisseur de la première couche (mm)	2	4	2	1	10	2	
	Initial layer line width (%)	3	2	2	1	10	2	
	Découpe inférieure (mm)	1	1	1	1	4	1	
	Chevauchement de la double extrusion (mm)	1	1	1	1	4	1	
Vitesse	Vitesse de positionnement (mm/s)	1	2	3	1	7	1,75	
	Vitesse de la première couche (mm/s)	4	4	4	1	13	3,25	1
	Vitesse de remplissage (mm/s)*	2	2	4	2	10	2,5	1
	Vitesse d'impression de la coque externe (mm/s)*	3	3	4	2	12	3	1
	Vitesse d'impression de la coque interne (mm/s)*	3	2	4	2	11	2,75	1
Refroidissement	Temps minimum par couche (sec)	3	4	2	2	11	2,75	1

	Activer le ventilateur	3	4	1	3	11	2,75	1
Retraction	Distance minimum (mm)	2	3	1	1	7	1,75	
	Activer les détours	3	5	2	1	11	2,75	1
	Extrusion minimal avant rétraction (mm)	3	4	2	1	10	2,5	1
	Ecart de plateau avant retrait (mm)	3	2	3	1	10	2,25	
Skirt	Nombre de tours	1	2	2	1	6	1,5	
	Distance de la jupe	1	1	1	1	4	1	
	Longueur minimale de la jupe (mm)	1	2	1	1	5	1,25	
Cool	Vitesse maximale des ventilateurs à cette hauteur (mm)	2	2	1	1	6	1,5	
	Vitesse minimale des ventilateurs (%)	2	2	1	1	6	1,5	
	Vitesse maximale des ventilateurs (%)	2	2	1	1	6	1,5	
	Vitesse minimum (mm/s)	2	2	1	1	6	1,5	
	Refroidissement de la tête d'impression	2	2	1	1	6	1,5	
Infill	Remplissage solide au-dessus	3	5	3	2	13	3,25	1
	Remplissage solide en dessous	3	5	3	2	13	3,25	1
	Taux de chevauchement (%)	2	2	3	2	9	2,25	
Support	Type de support	3	4	4	1	12	3	1
	Angle minimum pour les supports (deg)	3	4	4	1	12	3	1
	Taux de remplissage (%)	2	3	4	1	10	2,5	1
	Eloignement X/Y du support (mm)	1	3	1	1	6	1,5	
	Eloignement Z du support (mm)	3	3	1	1	8	2	
Black Magic	Coli maçonner le contour extérieur	1	1	1	1	4	1	
	Only follow mesh surface	2	2	1	1	6	1,5	
Brim	Nombre de lignes de brim (mm)	3	3	3	1	10	2,5	1
Raft	Marge supplémentaire pour le raft (mm)	3	3	3	1	10	2,5	1
	Espacement des lignes (mm)	3	3	3	1	10	2,5	1
	Épaisseur de la couche de base (mm)	3	3	3	1	10	2,5	1
	Largeur des couches de séparation (mm)	3	3	3	1	10	2,5	1

	Airgap	2	3	1	1	7	1,75	
	Surface layers	3	3	2	1	9	2,25	
Fix Horrible	Combiner l'ensemble (option A)					0		
	Combiner l'ensemble (option B)					0		
	Conserver les faces ouvertes					0		
	Comblage les défauts de structure					0		
	TOTAL	133	164	130	75	500	127,25	27

9.3. Annexe 3 : Courbes contrainte- déformation de l'essai de flexion

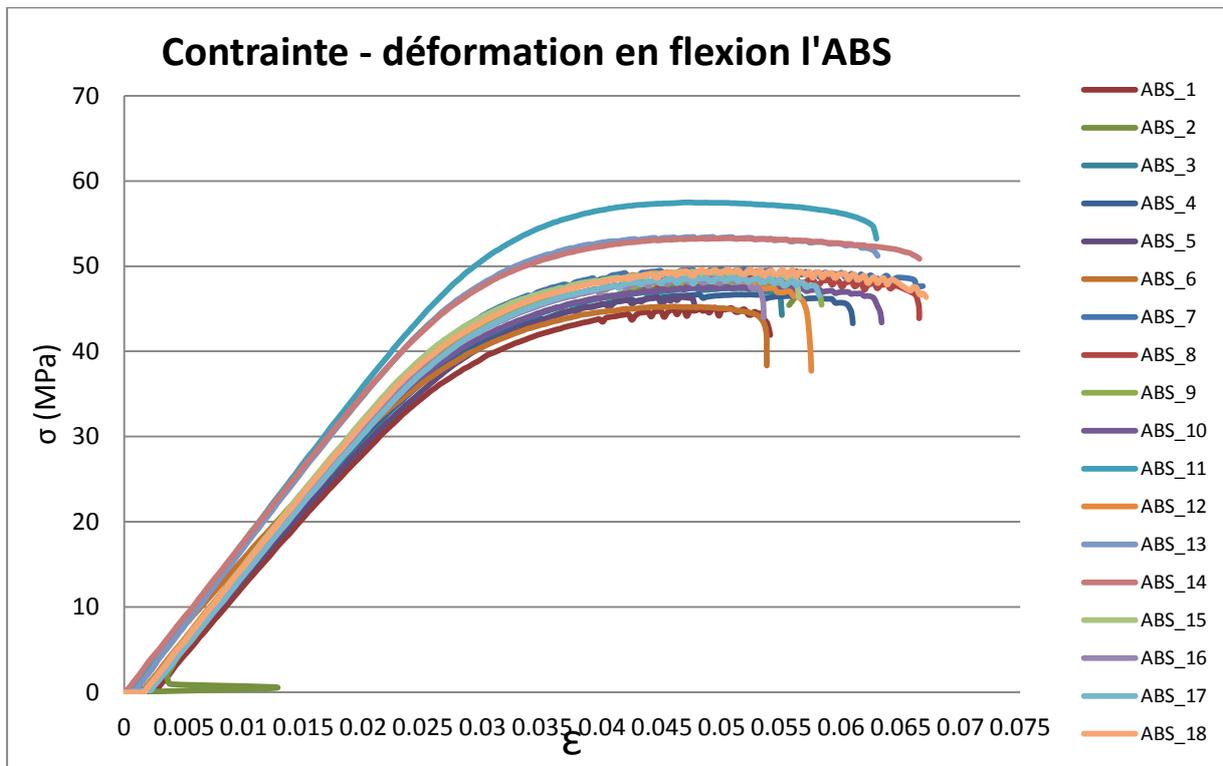


Figure 66. Courbe contrainte - déformation des éprouvettes d'ABS

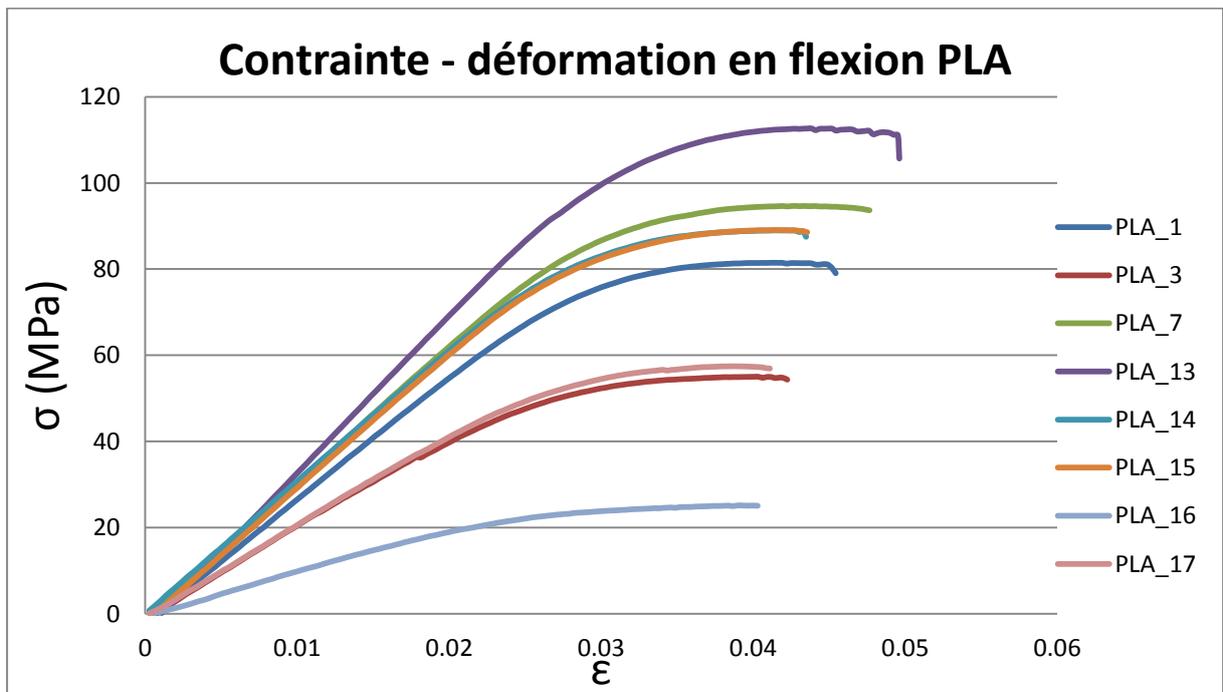


Figure 67. Courbe contrainte - déformation des éprouvettes de PLA qu'il a été possible imprimer

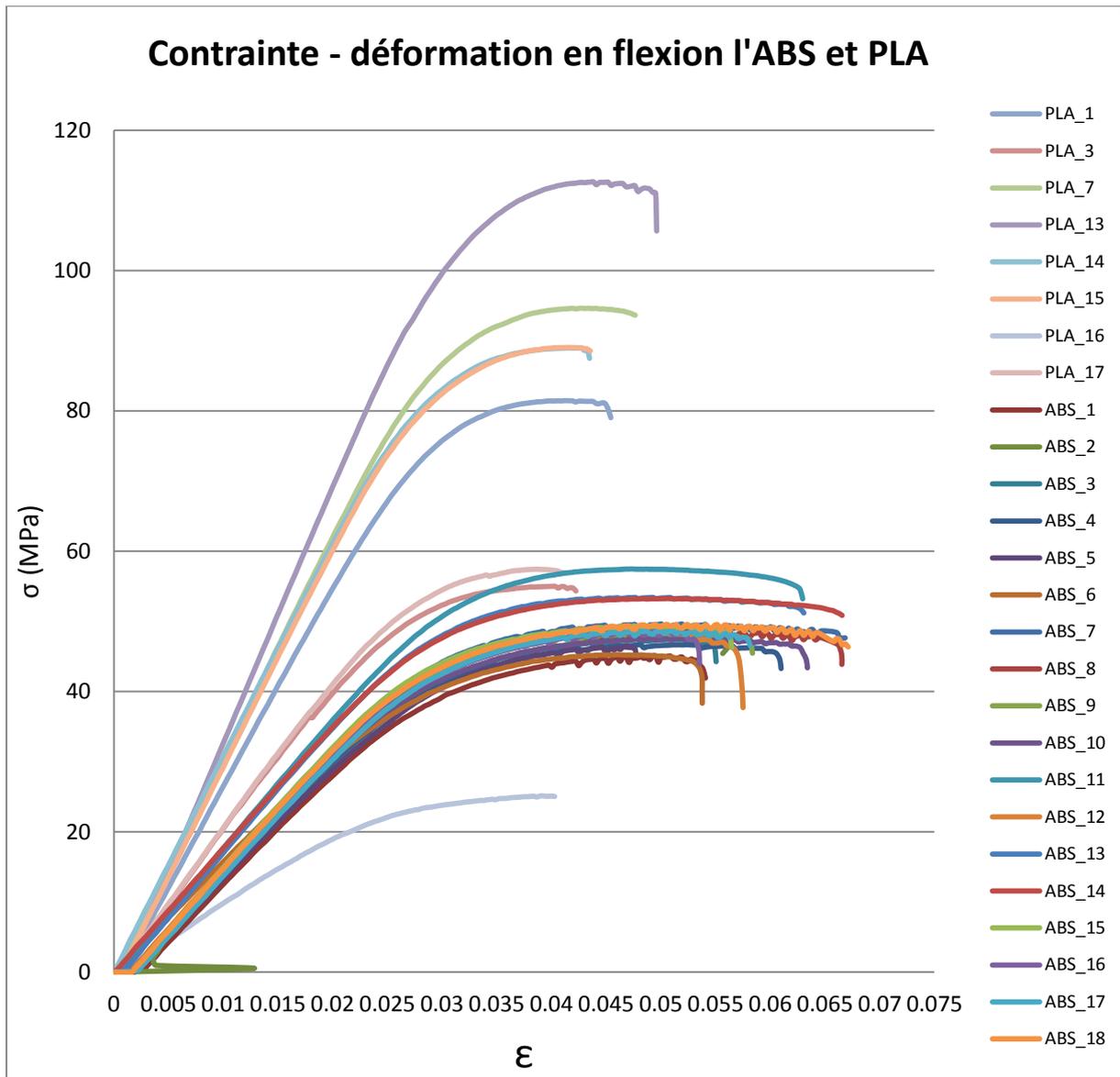


Figure 68. Courbes contrainte - déformation du PLA et ABS pour les comparer

9.4. Annexe 4 : Résultats des éprouvettes de l'essai de flexion

N°	T (°C)	Vitesse (mm/s)	H. couche (mm)	ABS			Décollement	Aspect visuel	σ_{\max} (MPa)	$\epsilon_{\text{rupture}}$
				l (mm)	h (mm)	b (mm)				
1	220	40	0,1	179,5	3,83	9,06	2	4	45,08	0,054
2	220	40	0,2	179,5	3,81	9,97	3	5	47,77	0,056
3	220	60	0,1	179,5	3,92	9,95	2	4	47,45	0,055
4	220	60	0,2	179,5	3,8	10	1	5	46,68	0,061
5	220	80	0,1	179,5	3,9	9,9	1	4	46,37	0,048
6	220	80	0,2	179,5	3,78	9,98	1	5	45,27	0,054
7	235	40	0,1	179,5	3,85	9,84	1	3	49,62	0,067
8	235	40	0,2	179,5	3,82	10,02	1	3	48,77	0,067
9	235	60	0,1	179,5	3,85	9,87	1	4	48,34	0,058
10	235	60	0,2	179,5	3,83	9,92	1	3	47,58	0,063
11	235	80	0,1	179,5	4,05	9,8	5	1	57,49	0,063
12	235	80	0,2	179,5	3,78	10,05	1	3	49,38	0,058
13	250	40	0,1	179,5	4,03	9,92	3	2	53,43	0,063
14	250	40	0,2	179,5	4,28	10	5	2	53,27	0,067
15	250	60	0,1	179,5	3,88	9,88	1	3	49,41	0,056
16	250	60	0,2	179,5	3,83	9,97	2	3	48,55	0,054
17	250	80	0,1	179,5	3,87	9,85	2	3	48,61	0,058
18	250	80	0,2	179,5	3,8	9,97	1	2	49,57	0,067

Tableau 64. Dimensions, décollement, aspect visuel, contrainte maximale et élongation maximale des éprouvettes d'ABS

N°	T (°C)	Vitesse (mm/s)	H. couche (mm)	PLA			Under-extrusion	Aspect visuel	σ_{rupture} (MPa)	$\epsilon_{\text{rupture}}$
				l (mm)	h (mm)	b (mm)				
1	200	30	0,1	180	3,9	9,9	4	3	81,47	0,045
2	200	30	0,2							
3	200	60	0,1	180	3,75	9,85	3	3	55,01	0,042
4	200	60	0,2							
5	200	90	0,1							
6	200	90	0,2							
7	210	30	0,1	180	4	9,9	4	4	94,66	0,048
8	210	30	0,2							
9	210	60	0,1							
10	210	60	0,2							
11	210	90	0,1							
12	210	90	0,2							
13	220	30	0,1	180	4,02	9,9	5	5	112,68	0,050
14	220	30	0,2	180	3,9	9,95	4	4	88,99	0,043
15	220	60	0,1	180	3,9	9,85	4	4	89,06	0,044
16	220	60	0,2	180	4,3	10	1	2	25,15	0,040
17	220	90	0,1	180	4,1	10	2	2	57,45	0,041
18	220	90	0,2							

Tableau 65. Dimensions, décollement, aspect visuel, contrainte maximale et élongation maximale des éprouvettes de PLA.
En rouge les éprouvettes qui ont été impossibles d'imprimer

9.5. Annexe 5 : Dimensions des éprouvettes de traction

Nylon								
Pièce	T (°C)	Vitesse (mm/s)	l ₃ (mm)	b ₂ (mm)	b ₁ (mm)	h (mm)	Aspect visuel	Décollement
1	235	30	148,75	20	10,15	4,1	3	3
2	235	60	149,2	19,9	9,82	4,05	5	1
3	245	30	148,85	20,1	10,4	4,1	1	5
4	245	60	148,75	20,05	10,08	4,1	1	4

Tableau 66. Dimensions et qualité des éprouvettes de traction en Nylon

PET								
Pièce	T (°C)	Vitesse (mm/s)	l ₃ (mm)	b ₂ (mm)	b ₁ (mm)	h (mm)	Aspect visuel	Décollement
1	210	30	149,85	19,75	9,85	4,05	5	1
2	210	60	-	-	-	-	-	-
3	230	30	147,7	19,7	9,88	4,02	5	0
4	230	60	149,7	19,77	9,85	4,02	3	0

Tableau 67. Dimensions et qualité des éprouvettes de traction en PET

PLA								
Pièce	T (°C)	T plateau (°C)	l ₃ (mm)	b ₂ (mm)	b ₁ (mm)	h (mm)	Aspect visuel	Décollement
1	220	50	150,1	20,04	10,05	4,05	5	0
2	220	70	149,98	19,8	9,95	4,13	5	0
3	210	50	150,1	19,8	9,9	4,15	5	0
4	210	70	149,88	19,85	9,88	4,15	5	0

Tableau 68. Dimensions et qualité des éprouvettes de traction en PLA

ABS								
Pièce	Remplissage (%)	l ₃ (mm)	b ₂ (mm)	b ₁ (mm)	h (mm)	Aspect visuel	Décollement	
1	100	149,56	19,84	9,98	4	5	0	
2	50	149,49	19,9	10,02	4,01	5	0	
3	20	149,39	19,85	10	4,02	5	0	
4	10	149,38	19,82	9,98	4,04	5	0	

Tableau 69. Dimensions et qualité des éprouvettes de traction en ABS

9.6. Annexe 6 : Erreurs et variabilité des dimensions des éprouvettes de traction

$l_3 = 150 \text{ mm}$	Moyenne des mesures (mm)	Erreur absolue (mm)	Erreur relative (%)
Nylon	148,8875	0,1562	0,1049
PET	149,0833	0,9222	0,6186
PLA	150,0150	0,0567	0,0567
ABS	149,4550	0,0700	0,0468

$b_2 = 20 \text{ mm}$	Moyenne des mesures (mm)	Erreur absolue (mm)	Erreur relative (%)
Nylon	20,0125	0,0625	0,3123
PET	19,7400	0,0267	0,1351
PLA	19,8725	0,0838	0,4214
ABS	19,8525	0,0237	0,1196

$b_1 = 10 \text{ mm}$	Moyenne des mesures (mm)	Erreur absolue (mm)	Erreur relative (%)
Nylon	10,1125	0,1625	1,6069
PET	9,8600	0,0133	0,1352
PLA	9,9450	0,0550	0,5530
ABS	9,9950	0,0150	0,1501

$h = 4 \text{ mm}$	Moyenne des mesures (mm)	Erreur absolue (mm)	Erreur relative (%)
Nylon	4,0875	0,0188	0,4587
PET	4,0300	0,0133	0,3309
PLA	4,1200	0,0350	0,8495
ABS	4,0175	0,0125	0,3111

Tableau 70. Moyenne des mesures caractéristiques et ses erreurs des éprouvettes de traction

9.7. Annexe 7 : Propriétés mécaniques des éprouvettes de l'essai de traction

Nylon					
Pièce	Température d'extrusion (°C)	Vitesse (mm/s)	σ_y (Mpa)	ϵ_{tb} (%)	Module d'élasticité (MPa)
1	235	30	38,474	207,6	481,967
2	235	60	20,236	198,8	197,396
3	245	30	39,718	208,9	465,613
4	245	60	32,434	195,1	366,138
Moyenne			32,715	202,6	377,778

Tableau 71. Propriétés mécaniques de l'essai de traction du Nylon

PET					
Pièce	Température d'extrusion (°C)	Vitesse (mm/s)	σ_y (Mpa)	ϵ_{tb} (%)	Module d'élasticité (MPa)
1	210	30	16,28	3,11	858,66
2	210	60	-	-	-
3	230	30	23,02	4,07	1016,90
4	230	60	21,83	3,70	1095,23
Moyenne			20,38	3,63	990,262

Tableau 72. Propriétés mécaniques de l'essai de traction du PET

PLA					
Pièce	Température extrusion (°C)	Température plateau (°C)	σ_m (MPa)	ϵ_{tb} (%)	Module d'élasticité (MPa)
1	220	50	50,595	2,940	3373,644
2	220	70	48,443	3,720	2897,656
3	210	50	37,959	3,390	2795,544
4	210	70	37,953	2,990	2626,233
Moyenne			43,738	3,260	2923,269

Tableau 73. . Propriétés mécaniques de l'essai de traction du PLA

ABS							
Pièce	Remplissage (%)	σ_b (MPa)	ϵ_{tb} (%)	Module d'élasticité (MPa)	$\sigma_b/\sigma_{b,max}$ (%)	$\epsilon_{tb}/\epsilon_{tb,max}$ (%)	E/E_{max} (%)
1	100	22,852	3,72	1621,2	100,00	101,00	102,00
2	50	13,997	3,67	876,09	61,25	98,66	54,04
3	20	11,945	3,31	857,65	52,27	88,98	52,90
4	10	10,953	2,52	770,25	47,93	67,74	47,51
Moyenne		14,937	3,305	1031,298			

Tableau 74. Propriétés mécaniques de l'essai de traction de l'ABS et les proportions de chaque propriété par rapport à la valeur maximale (100% rempli)

9.8. Annexe 8 : Images des éprouvettes de traction



Figure 69. Eprouvettes de Nylon

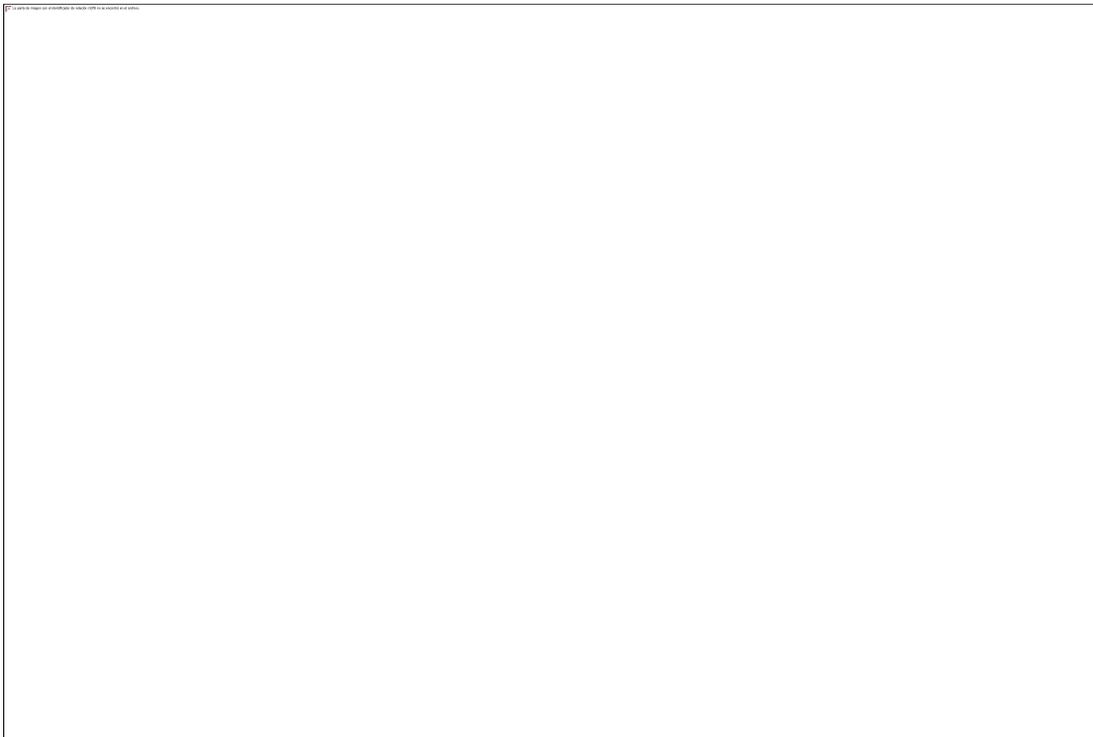


Figure 70. Eprouvettes de PLA

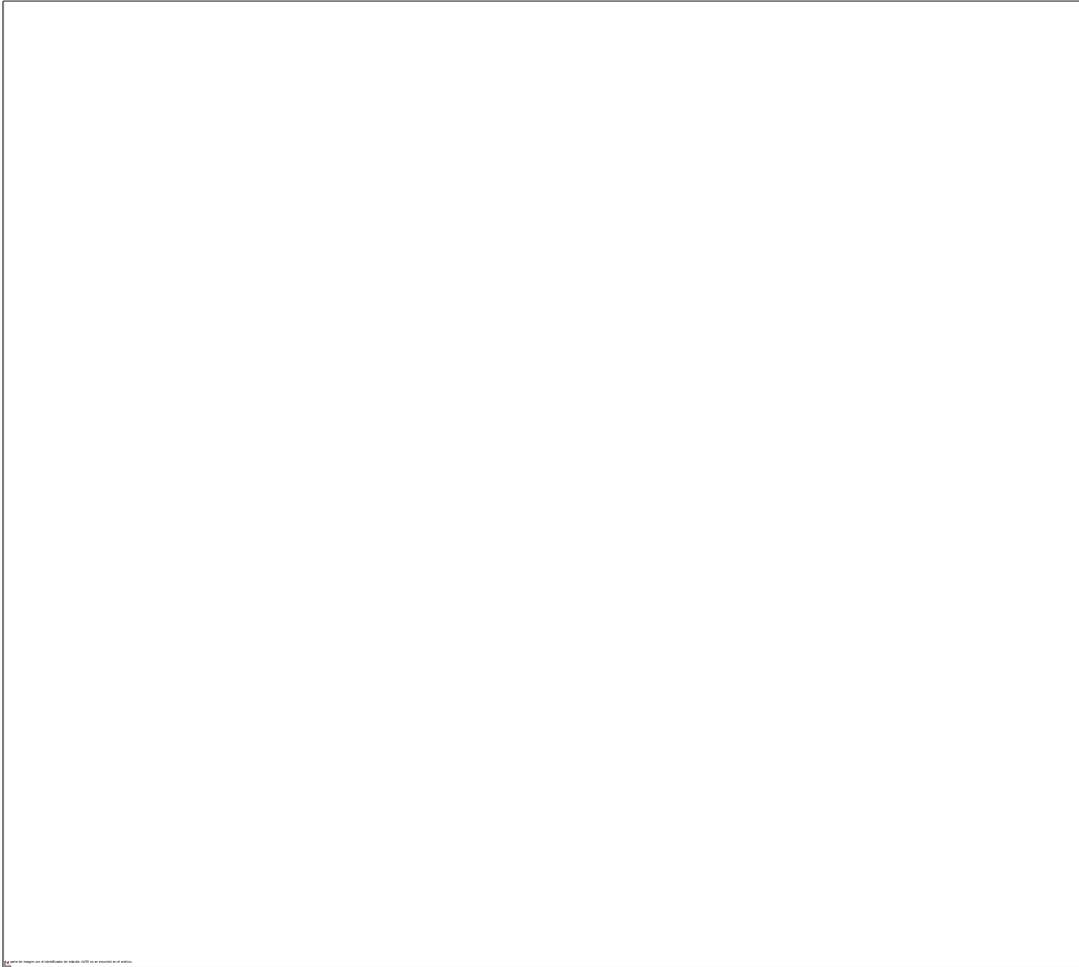


Figure 71. Eprouvettes de PET (la numéro 2 a été imprimé 2 fois sans réussir)

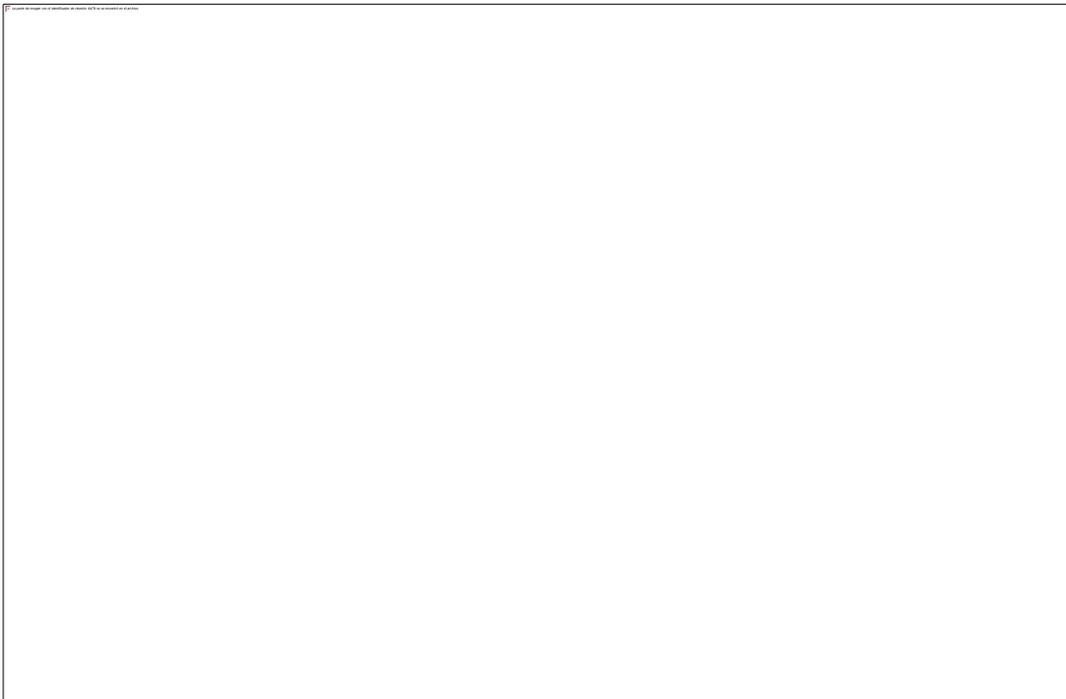


Figure 72. Éprouvettes d'ABS

9.9. Annexe 9 : Distribution des mesures des trous (Test 7)

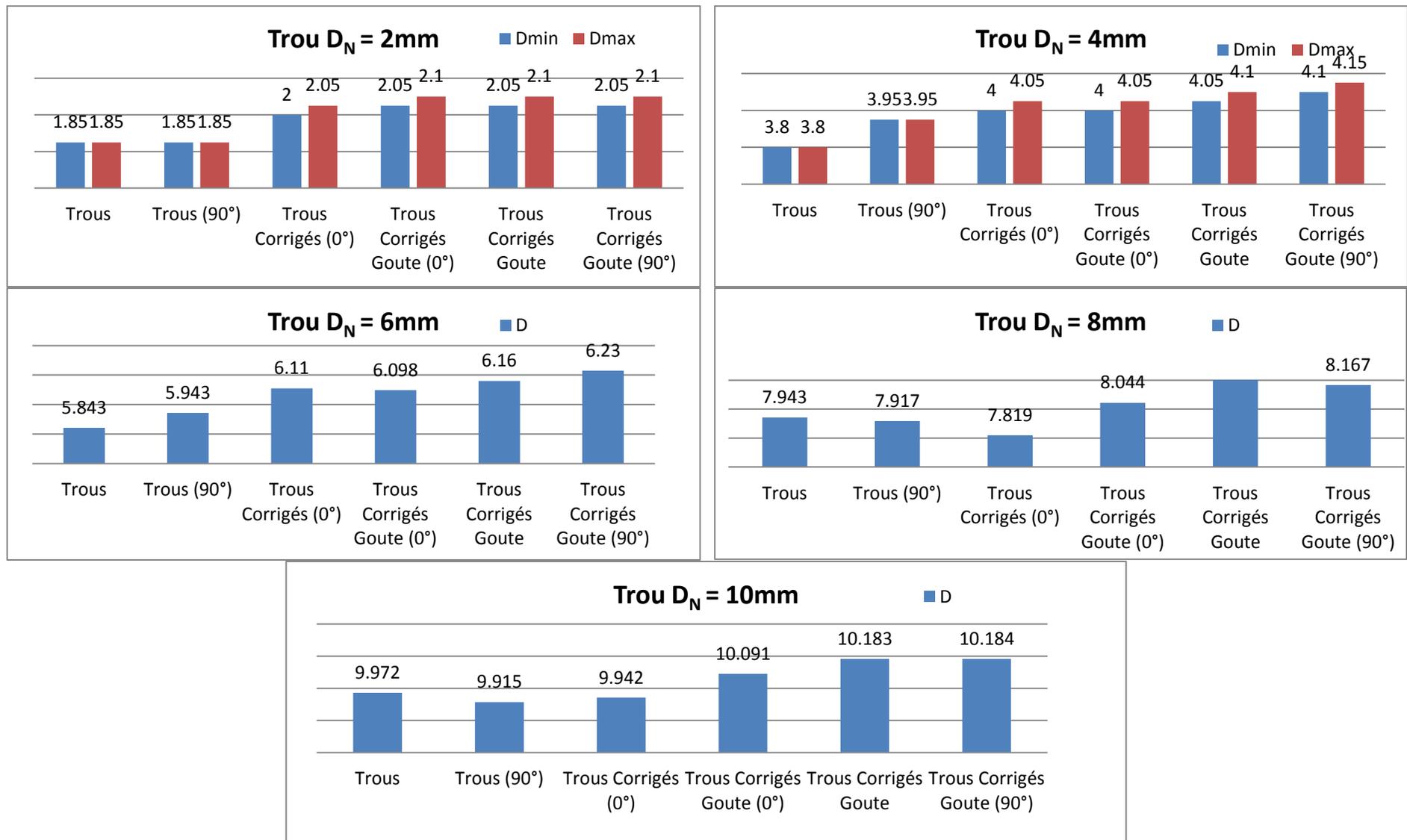


Figure 73. Distribution des mesures des trous

9.10. Annexe 10. Création des supports avec le MeshMixer

MeshMixer est un logiciel gratuit de modélisation 3D permettant de créer et de corriger des modèles 3D facilement. Sa spécificité consiste à créer des modèles 3D sur la base de volumes existants, combinés grâce à des outils simple d'utilisation.

On va l'utiliser surtout pour créer des supports aux pièces. On peut générer les supports dans le menu *Analysis > Overhangs*. Dans le menu on a différents paramètres.

En premier lieu, on doit définir quels surplombs de la pièce ont besoin d'un support :

Overhangs

- Angle Tresh

Définir l'angle minimum des surplombs où on veut créer un support.

- Contact Tol

Ce paramètre n'a d'effet que lorsque vous ne vous convertissez à massif. Ce "pousse" la maille solide hors de la maille du modèle, par cette distance. Cela peut aider à rendre les conseils détachent plus proprement, et d'éviter des connexions quasi-contact étant créés entre les poteaux et le modèle.

- Y-Offset

Ceci définit la distance sur laquelle le modèle est soulevé au-dessus de la plate-forme de construction.

Support Generator

- Max Angle

Ceci définit le seuil de soutenir surplombs d'un modèle.

Tout surplomb d'un modèle qui est à un angle par rapport à l'horizontale au-dessous du seuil d'angle sera pris en charge.

- Density

Ceci définit la densité de la structure de support. Plus la valeur des points de contact plus par unité de surface.

- Layer Heigh

Ceci définit la hauteur de la couche des supports. Doit être la même que la hauteur de couche d'impression de la pièce.

- Post Diameter

Ceci définit le diamètre des montants de support. Plus la valeur de la chunkier les supports.

- Tip Diameter

Diamètre de la zone de contact entre le support et le modèle. Comme vous augmentez le diamètre de la pointe de l'articulation entre le support et le modèle, plus va augmenter la force.

- Base Diameter

Diamètre de la base du support. Plus le diamètre de la base, plus forte adhérence au plateau d'impression.

Advanced Support

- Allow Top Connections (Yes/No)

Cette case permet de générer des supports entre la surface du modèle. Ceci est utile s'il y a des surplombs qui ne peuvent être atteints à partir du plateau.

- Optimization (%)

- Solid Min Offset (mm)

Lorsque vous cliquez sur *Convertir en solide* cela définit une distance de décalage entre le modèle et les poteaux du support.

- Tip layers (#)

Nombre de couches de pointe. Si le *tip layers* augmente, le ratio de cône de la pointe de support augmente. Un ratio de cône plus élevé signifie plus de temps et pointes plus minces.

- Base layers (#)

Nombre de couches de base. L'augment des couches de base donnent une base plus épaisse aux supports.

- Strut Density (%)

Contrôler l'espacement des lignes horizontales dans le matériau de support.

- Post Sides (#)

Nombre de côtés sur les poteaux de soutien. Si vous augmentez le nombre de côtés de poste, le support section tend vers un cylindre.