

CONRAD



Florian Ebner
Wolfgang Lex
Andreas Meiler
Michael Rösch
Dr. Sergej Stoetzer
Christian Trösch

Académie

MANUEL

Impression 3D

Un guide à destination des débutants pour les établissements scolaires et les makers

- **Connaissances de base**
- **Exercices pratiques avec instructions pas-à-pas**
- **Supports pédagogiques**
- **Expériences avec l'impression 3D**

Table des matières

Consignes de sécurité	4
1. Introduction	5
1.1 Pourquoi imprimer en 3D ?	5
1.2 Domaines d'application de l'imprimante 3D	6
1.3 Avantages et inconvénients de l'impression 3D	7
1.3.1 Avantages et inconvénients généraux des procédés de fabrication additive	7
1.3.2 Pourquoi acquérir une imprimante 3D ?	9
1.3.3 Inconvénients de l'impression 3D	11
1.4 Impression 3D : un grand pas vers la numérisation dans l'enseignement	11
2. Procédés et matériaux	15
2.1 Procédés à dépôt de matière	15
2.2 Procédés à matériau liquide	16
2.3 Procédé à lit de poudre	18
2.4 Comment fonctionne une imprimante 3D selon le procédé FFF/FDM ?	19
2.5 Matériaux pour le procédé FDM/FFF	21
3. De l'idée à l'objet final	30
3.1 Création de modèles 3D	30
3.1.1 Construction	30
3.1.1.1 Construction d'un objet simple à l'aide d'un programme de CAO (jeton de caddie)	30
3.1.1.2 Construction d'un objet simple à l'aide d'un programme de CAO (camion avec charnière)	36
3.1.2 Programmation d'un modèle	41
3.1.3 Création d'un modèle par numérisation	48
3.1.4 Banques de données de modèles	49
3.2 Tranchage - Préparation de l'objet pour l'imprimante	50
3.3 Paramètres importants à respecter lors du tranchage : structures de soutien	55

3.4 Processus d'impression	60
3.4.1. Eléments de commande et parties d'une imprimante 3D	60
3.4.2. Calibrage du plateau d'impression	61
3.4.3. Comment savoir que le banc d'impression est mal calibré ?	63
3.4.4. Installation du filament	66
3.4.5. Chargement du filament	66
3.4.6 Lancement de l'impression	68

4. L'impression 3D dans l'enseignement : expériences avec enregistrement numérique des données **70**

Expérience 1 :	Quel est l'impact du taux de remplissage de l'objet imprimé sur les propriétés d'amortissement ?	71
Fiche enseignant n°1 :	Choc et élastomère en impression 3D. Variation de la densité	72
Fiche élève expérience 1 :	Influence de la densité sur les propriétés d'amortissement	80
Expérience 2 :	Choc et propriétés d'amortissement des corps élastiques en fonction de leur position	83
Fiche enseignant n°2 :	Choc et impression 3D en élastomère. Influence de la position	84
Fiche élève expérience 2 :	Influence de la position sur les propriétés d'amortissement	93
Expérience 3 :	Résistance des objets 3D. Influence de la position lors de l'impression	96
Fiche enseignant n°3 :	Test de résistance avec un pavé droit imprimé en 3D. Influence de la position de l'objet lors de l'impression	97
Fiche élève expérience 3 :	Test de résistance avec un pavé droit imprimé en 3D. Influence de la position de l'objet lors de l'impression.	100

Consignes de sécurité

Ce manuel a pour but d'expliquer, pas-à-pas, la mise en service d'une imprimante 3D ainsi que le processus d'impression d'un objet, afin que vous puissiez suivre chacune des étapes avec votre propre imprimante 3D et apprendre à manier cette technologie. Toutefois, ce manuel ne remplace pas le mode d'emploi de l'appareil que vous utilisez. Veuillez lire attentivement la notice d'utilisation de votre imprimante 3D avant la première mise en service afin de vous familiariser avec les différents concepts de fonctionnement ainsi qu'avec les mesures de précaution et de sécurité.

Certains éléments d'une imprimante 3D peuvent chauffer et provoquer des brûlures. Soyez particulièrement vigilant lorsque des enfants sont présents. Ne touchez jamais l'intérieur de l'imprimante 3D lorsque celle-ci fonctionne. Les pièces mécaniques mobiles représentent un risque de blessure. Les boîtiers en option protègent empêchent toute intervention involontaire dans l'appareil.

1. Introduction

1.1 Pourquoi imprimer en 3D ?

Cette idée est en fait une évidence et peut-être aussi le vieux rêve de tout créateur, celui de disposer d'un appareil permettant de fabriquer des objets aux formes souhaitées, surtout si les données sont informatisées. Les plastiques, y compris ceux que l'on appelle les matières thermoplastiques sont presque parfaits pour la fabrication d'objets. Le terme « matière thermoplastique » est composé de 2 mots de grec ancien : *plássein*, « façonnage » ou « mise en forme », et *thermos* pour « chaud » voire même « très chaud ». Les procédés classiques de fabrication sont les procédés de moulage par injection et par extrusion. Le premier procédé a pour inconvénient la nécessité d'investir dans des moules coûteux tandis que le procédé par extrusion est une approche plus directe pour aboutir au résultat final. L'extrusion consiste, en effet, à presser la matière thermoplastique par le moteur d'entraînement, laquelle passe, fondue et plus ou moins fluide, à travers le module de chauffage, appelé hotend ou extrudeur.

Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que les imprimantes 3D modernes s'appliquent principalement à faire fondre les matières thermoplastiques à travers une buse pour obtenir des filaments fluides qui se solidifient à nouveau à la position souhaitée. On exploite ici la propriété principale du matériau thermoplastique: d'abord solide, il devient fluide puis redevient solide. Cependant, cette qualité est également un problème car si ces matériaux se déforment avec la chaleur, ils risquent de ne pas garder la même forme si la température augmente. Pensez, par exemple, aux températures pouvant régner dans un véhicule exposé l'été en plein soleil. L'imprimante 3D a donc besoin d'une quantité d'énergie régulière et non excessive pour que les matériaux thermoplastiques imprimés restent thermiquement stables, c'est-à-dire qui ne se déforment pas trop sous l'effet de la chaleur.

Ainsi, de nombreuses pièces de machines, des ustensiles, des boîtiers, des modèles ou encore des **prototypes** peuvent aujourd'hui être fabriqués rapidement et sans grand effort. Le « prototypage » est essentiel, surtout dans la phase initiale de développement. Un prototype ou modèle peut, de cette manière, être évalué ou testé plus facilement sur le plan formel, esthétique ou fonctionnel qu'un simple modèle 3D sur l'écran d'un ordinateur. Ainsi, la CAO et l'impression 3D réelle font désormais partie des outils courants d'un fabricant, d'un designer ou encore d'un développeur. Mais la technologie sophistiquée de réalité virtuelle (VR) ne peut pas remplacer le contact avec les objets réels.

Une pièce de rechange perdue et difficile à obtenir peut être reproduite rapidement et à tout moment. Une fois disponible sous forme de fichier CAO, il est assez facile de l'améliorer et de procéder à des tests. Souvent, on détecte tout d'abord les faiblesses de la structure par des tests mécaniques. Il est ensuite facile de fabriquer une variante plus résistante. Une imprimante 3D permet de fabriquer des objets qu'il était jusque là difficile de produire ou de se procurer.

L'impression 3D est aujourd'hui déjà bien répandue et très appréciée dans les domaines créatif et artistique. Les bricoleurs et les makers n'ont plus besoin de machines coûteuses comme les fraiseuses ou encore les tours et ne doivent plus recourir à des procédés de fabrication onéreux. Finies également les opérations fastidieuses de sciage, rabotage, limage, lissage, colmatage ou encore de soudure. Si on n'est pas bon bricoleur et qu'on n'a pas l'esprit créatif, une imprimante 3D et un PC sont la solution ! Laissez libre cours à vos idées ! Il suffit de s'intéresser un minimum à la technologie d'impression 3D et d'en connaître les limites physiques. Il est illusoire de croire que l'impression 3D est aussi facile que d'imprimer un texte ou une image sur du papier. Ce manuel vise à vous conseiller et vous guider dans votre décision d'achat en vous présentant les points essentiels de l'impression 3D.

Les imprimantes sont utiles même pour un usage privé. Imprimez des objets que vous aurez vous-même dessinés, comme votre tasse préférée, des jouets d'enfant, des pièces de rechange et des éléments personnalisés, presque tout est possible. Dans le chapitre 2, vous apprendrez comment fonctionne une imprimante 3D et les techniques d'impression les plus courantes.

Depuis première impression en 3D, les technologies ont énormément évolué. La gamme de matériaux imprimables s'est considérablement élargie. Désormais, en plus d'imprimer avec des matériaux plastique, il est possible d'imprimer du béton, du papier, du métal mais aussi des tissus organiques et même du chocolat. Cela est devenu possible grâce aux différents procédés de fabrication comme le **frittage sélectif par laser** ou le **dépôt de matière fondue**. La **simplicité** constitue un autre avantage essentiel des modèles imprimés en 3D par rapport aux objets fabriqués avec des méthodes classiques.

L'évolution rapide des procédés d'impression 3D a bien sûr aussi éveillé l'intérêt de l'industrie manufacturière. Tout d'abord l'industrie automobile a commencé à **produire des prototypes** et des **modèles**. Ce procédé s'est très vite étendu à d'autres industries. Aujourd'hui, l'impression 3D représente l'un des procédés les plus courants pour fabriquer des prototypes car elle réduit considérablement le temps nécessaire pour programmer, développer et fabriquer un nouveau produit. Le terme « **prototypage rapide** » décrit parfaitement cette technologie.

L'imprimante 3D convient également pour la fabrication de **pièces en petite série**, **pièces détachées** ou **pièces de rechange**. L'impression 3D constitue une bonne alternative à la fabrication industrielle, trop contraignante et trop coûteuse dans ces cas-là. Par ailleurs, des pièces ou séries différentes peuvent être fabriquées directement les unes à la suite des autres. Aucun remplacement d'équipement (des moules, par exemple) n'est nécessaire.

Un autre domaine dans lequel le procédé a fait ses preuves est la **fabrication d'outils et de moules**. Au lieu de recourir à des fournisseurs externes, il est possible de concevoir un outil ou un moule en un clin d'œil au sein même de l'entreprise.

1.2 Domaines d'application de l'imprimante 3D

Les imprimantes 3D permettent aux utilisateurs privés comme professionnels de fabriquer des objets uniques en quelques clics.

Quelques exemples d'utilisation :

Production

- Prototypage rapide, c'est-à-dire la fabrication rapide de composants de l'échantillon
- Fabrication de pièces en petite série
- Fabrication de pièces uniques personnalisées
- Fabrication d'échantillons

Modélisme / modélisme ferroviaire

- Fabrication de pièces de montage & pièces additionnelles
- Personnalisation de composants standard
- Conception de pièces de rechange
- Fabrication de miniatures à l'échelle

Artisanat

- Initiation peu coûteuse au procédé CNC
- Pièces uniques personnalisées
- Modèles à l'échelle

Formation / apprentissage - voir les applications pédagogiques à la section 1.4

- Apprendre de la fabrication en 3D : le résultat tangible est immédiat
- Amélioration de la représentation spatiale
- Faire le lien entre la théorie & la pratique

Art et design

- Fabrication de modèles et sculptures à l'échelle
- Conception de bijoux, notamment des prototypes et échantillons de design

Architecture

- Maquettes rapides et bon marché destinées aux clients et aux concours
- Transformation des plans en modèles miniatures

1.3 Avantages et inconvénients de l'impression 3D

L'impression 3D présente bien plus d'avantages que d'inconvénients : ces caractéristiques sont listées ci-dessous, de la plus générale à la plus spécifique.

1.3.1 Avantages et inconvénients généraux des procédés de fabrication additive

Le terme générique **fabrication additive** fait référence à des procédés d'impression 3D dans lesquels différentes couches sont imprimées successivement sur une plaque de fond. Sur un objet imprimé terminé, les couches sont souvent plus ou moins reconnaissables par les rainures latérales de l'objet 3D. Le procédé d'impression additive comprend différentes technologies, qui offrent chacune des avantages et des inconvénients. Ces **avantages** sont les suivants :

- Une production **plus rapide** et **plus abordable**, par exemple grâce à une baisse des dépenses en matériaux et à une diminution des erreurs lors du développement de prototypes
- Des résultats d'impression **fonctionnels, complexes** et **en filigrane**
- Une **importante flexibilité** du processus de production en permettant des modifications ad hoc et la réalisation rapide des demandes de changement
- **Conception structurelle simple** : avec l'impression 3D, vous pourrez concevoir des formes qui seraient difficiles voire impossibles à réaliser avec des méthodes de production classiques. La construction 3D définit ainsi de nouveaux standards en matière de poids, de design et de stabilité.
- Une **production en flux tendu** d'objets en 3D

Inconvénients : en raison de la construction en couches des objets et selon la complexité, le niveau de remplissage et la taille de l'objet, le processus d'impression peut prendre jusqu'à plusieurs heures. Les procédés d'impression additive en 3D ne sont pas des procédés rapides et sont donc peu recommandés lorsque le temps est compté...

Les couches obtenues par procédé additif sont visibles sur les côtés de l'objet, c'est-à-dire que la surface n'est pas lisse mais présente des rainures plus ou moins apparentes. Il est possible de poncer l'objet, d'appliquer de la peinture ou de colmater ces rainures pour les rendre moins visibles.

La durée d'impression d'une épreuve est réduite si on augmente l'épaisseur des couches ; l'objet obtenu sera plus grossier mais cela est généralement suffisant pour une évaluation approximative. Il est possible par la suite de procéder à une nouvelle impression en réduisant l'épaisseur des couches afin d'obtenir des objets avec une surface plus lisse.

Conseil : La surface de base est toujours le côté le plus lisse, et donc le plus réussi, car elle est obtenue par application du filament liquide sur le plateau d'impression. Avant le découpage, vous avez la possibilité de poser l'objet du côté optimal en procédant à une rotation à 90° , 180° ou 270° . Contrôlez à l'écran que l'objet soit idéalement placé en utilisant une vue latérale et de dessous. Sur l'écran de l'ordinateur, le plateau d'impression apparaît sous la forme d'un canevas transparent.

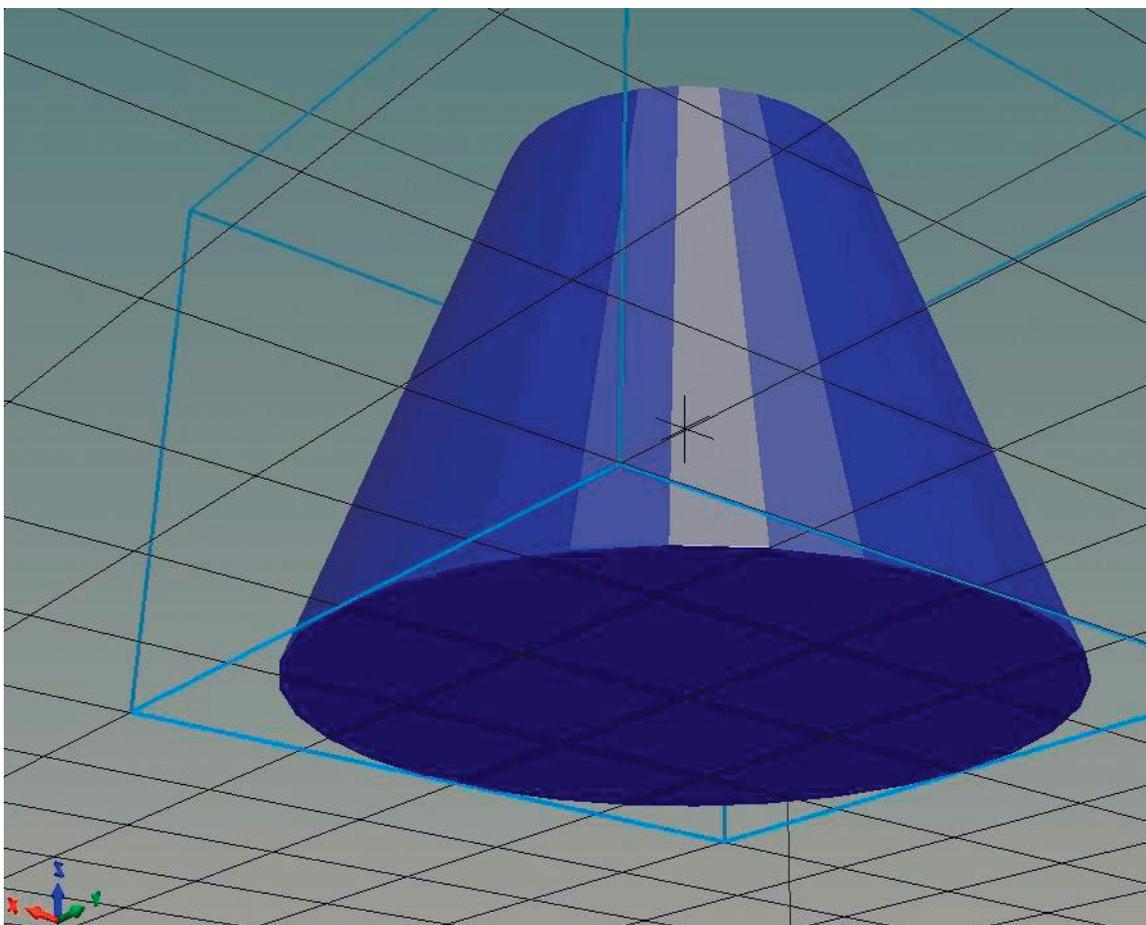


Figure 1 : Objet (cône tronqué) vu de dessous.

Parfois, il est aussi préférable de réaliser les objets en 2 étapes de fabrication, c'est-à-dire de les décomposer à l'ordinateur et d'assembler les éléments ultérieurement.

1.3.2 Pourquoi acquérir une imprimante 3D ?

Pour dissiper tous vos doutes quant à l'utilité d'une imprimante 3D, voici d'autres avantages qui finiront de vous convaincre.

Éviter les défauts

Aujourd'hui, les entreprises doivent faire preuve de flexibilité et réagir rapidement pour pouvoir suivre le rythme des évolutions de leur secteur. Réduisez le **risque de défaut** lors des processus de production complexes en détectant tôt les défauts de fabrication au moyen des prototypes imprimés en 3D.

Dans la phase de développement de nouveaux produits, les défauts relatifs au design et à la fonctionnalité sont fréquents. Les modèles 3D peuvent être utilisés rapidement et même à un stade précoce du développement. Cela permet de détecter et d'éliminer les défauts plus précocement qu'en cas de fabrication manuelle ou par moulage. Ces procédés classiques étant chronophages, les prototypes sont souvent utilisés à un stade ultérieur et les défauts n'apparaissent que tardivement, lorsqu'on a déjà passé beaucoup de temps sur le projet. Ainsi, on peut stopper la production d'une petite série et remédier au problème sans attendre la fin du processus de fabrication.

Plus l'imprimante 3D est de qualité, plus les pièces produites sont nettes et fidèles à l'original. Il est possible par exemple de concevoir des objets en différents matériaux et de reproduire les propriétés de l'objet (coloré ou transparent, caoutchouteux ou solide, avec des éléments mobiles ou non, etc.). Les **matières thermoplastiques, photopolymères** et **matériaux composites** peuvent exploiter **presque toutes les propriétés du matériau** et résister aux processus de finition comme le vernissage ou le polissage. Ainsi, les modèles ont un aspect et un toucher identiques au produit final, contrairement aux versions numériques sur ordinateur. Des tests sur les objets font apparaître les défauts et évitent de devoir y remédier sur l'objet final, ce qui permet donc de gagner du temps et de l'argent. Cela signifie que les prototypes peuvent être imprimés et les défauts éliminés à un stade précoce du développement.

De plus, les modèles qui ont été préalablement créés sont modifiables et reproductibles à volonté sur l'ordinateur. Si le premier prototype présente des défauts ou s'il faut améliorer le design par exemple, il suffit de modifier certains critères avant de lancer l'impression du deuxième prototype.

La production de l'objet souhaité avec une stabilité dimensionnelle exacte permet de réduire la consommation de matériaux. L'imprimante 3D assemble le modèle à la forme et aux dimensions voulues. C'est la différence essentielle avec les pièces dont les formes d'origine n'obtiennent leur forme définitive que par un procédé d'enlèvement de matière comme la découpe, le ponçage, le perçage, le fraisage ou le tournage. La production est sensiblement plus économique grâce à la consommation réduite de matériau, aux déchets moindres, à l'utilisation restreinte d'énergie et à la quantité de travail plus faible.

Un autre avantage de l'impression 3D : il n'est pas indispensable que les objets soient fabriqués en matériau plein et sans torsion pour être solides ; ils peuvent comporter des creux. La robustesse et l'absence majoritaire de torsion sont meilleures avec les objets réticulés à l'intérieur, en fonction de la structure et du taux de remplissage. Par ailleurs, il est possible de choisir différentes structures et différents motifs de remplissage lors de la configuration de l'impression [Fig. 1]. La structure alvéolaire (en nid d'abeille) donne généralement de bons résultats, mais il est aussi possible de sélectionner la courbe de Hilbert, les structures octogonales ou les motifs rectangulaires simples.

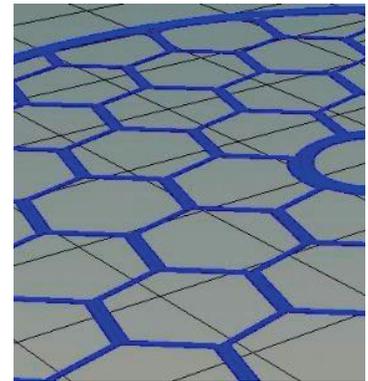
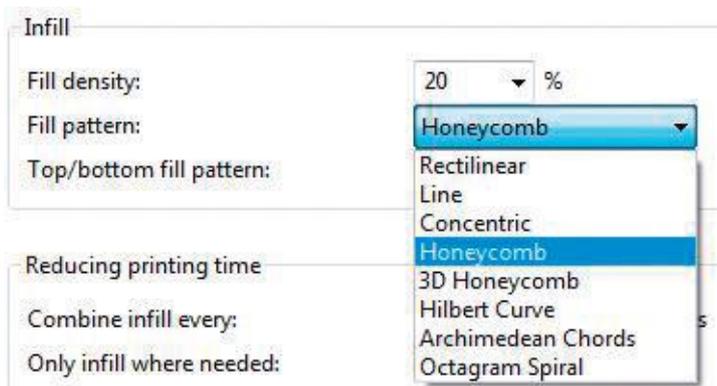


Figure 2 : possibilité de sélectionner diverses structures de remplissage.

Figure 3 : motif alvéolaire



Conseil : Même si ces structures ne sont pas visibles à l'extérieur de l'objet imprimé, elles présentent un très grand intérêt sur plusieurs plans.

La **charge de travail** que représente la production d'un objet peut être réduite à plusieurs niveaux. Tout d'abord les coûts et le temps passé lors de la phase de développement diminuent car les prototypes sont testés en amont. Lors de la production, la fabrication de **moules coûteux** et leur remplacement à chaque nouvelle série de produits n'est plus utile. Les pièces imprimées sont terminées et ne nécessitent **pas de retouches**. De plus, les coûts sont indépendants du nombre de pièces imprimées : la production de très petites quantités avec une imprimante 3D n'est pas plus onéreuse que la production d'un grand nombre de pièces. Dans la production traditionnelle, les coûts de production baissent généralement avec l'augmentation du volume de production.

Production plus rapide

L'utilisation d'une imprimante 3D permet d'accroître la production en réduisant le temps et l'effort investis dans le développement. Cela vaut tout particulièrement pour la fabrication de pièces de rechange. Sans imprimante 3D, l'activité doit être arrêtée jusqu'à la livraison d'une pièce de remplacement. Avec une imprimante 3D, il est possible de produire les pièces nécessaires sur place, suivant le principe de production en flux tendu.

Petites séries

Plutôt que d'imprimer une seule pièce, vous souhaitez tout de suite en imprimer plusieurs identiques pour gagner du temps ? Certes, il ne s'agit pas d'une production de masse et la durée d'impression est plus longue car le processus est plus complexe ; mais grâce au fameux « copier-coller » du PC, la préparation de l'impression se fait en quelques secondes, même pour des objets complexes. Le logiciel répartit automatiquement les objets sur le plateau d'impression et signale également que la quantité est trop importante.



Conseil : Une fois l'essai réussi, commencez par produire une petite série : il est toujours désagréable de devoir interrompre la production d'une grande quantité suite à un problème.

1.3.3 Inconvénients de l'impression 3D

L'impression 3D présente aussi quelques inconvénients ; pour les éviter, respectez les recommandations ci-après :

- La conception d'un modèle imprimable est un exercice relativement difficile, qui demande une expérience et des connaissances spécifiques. La maîtrise du fonctionnement de l'imprimante 3D requiert également du temps et de la patience. Le chapitre 3 (« De l'idée à l'objet final ») présente les différentes étapes à suivre et vous aidera dans la réalisation de vos premiers modèles 3D.
- L'impression peut prendre plusieurs heures, voire plusieurs jours, en fonction de la taille et de la complexité de l'objet. Il n'est donc pas possible d'effectuer une production en masse : une fabrication classique est plus rentable à partir d'une certaine quantité. Prenez en compte le temps nécessaire à une impression 3D (celle-ci est calculée par le logiciel de préparation de l'impression après le tranchage). Réalisez l'impression la nuit le cas échéant. Utilisez la surveillance à distance, par exemple à l'aide d'un serveur d'impression pour imprimante 3D, par exemple un Raspberry Pi équipé du logiciel Octoprint (<https://octoprint.org/>).
- Attention aux porte-à-faux : la présence d'éléments en porte-à-faux peut générer des objets peu esthétiques, par exemple si vous imprimez un pont ou un cadre sans soutien. Pour éviter ce problème, il est importante de positionner correctement l'objet sur le plateau d'impression : lors de la phase de préparation de l'impression dans le logiciel de tranchage, placez sur le plateau d'impression la face de l'objet ayant la plus grande surface. Placez la pointe des objets coniques vers le haut. Utilisez le cas échéant le logiciel de préparation de l'impression pour ajouter des structures de soutien (supports) ; ces structures pourront être retirées à la main après l'impression.
- Les thermoplastiques ont la particularité d'être déformables lorsqu'ils sont portés à haute température. Selon le type de filament, il est possible que l'objet imprimé se déforme si celui-ci est trop chaud. Ce phénomène peut se produire même si le point de fusion n'est pas atteint ! Comparez les propriétés des différents types de filaments (voir paragraphe 2.6). Pour obtenir des objets résistants aux hautes températures, il est également possible d'avoir recours à un service d'impression 3D : vos objets sont imprimés sur des machines haut de gamme, avec des matériaux spécifiques comme le métal ou la céramique.

1.4 Impression 3D : un grand pas vers la numérisation dans l'enseignement

Motivation des enfants, des jeunes et des adultes

Les retours que nous avons eu sur les salons et les Maker Faires montrent que la création en direct d'un objet concret est un facteur de motivation important pour tous, des enfants aux retraités, en passant par les jeunes et les adultes, qu'ils soient débutants ou techniciens confirmés.

Pour soutenir durablement l'intérêt des enfants et des jeunes pour l'impression 3D (et leur permettre d'acquérir en même temps des connaissances et compétences essentielles), commencez par une création facile, avec une phase de conception simple. De la conception à la version définitive de l'objet, les élèves acquièrent de l'expérience dans le domaine de l'impression 3D, corrigent le modèle ou en modifient entièrement la conception. Ils sont amenés à faire preuve d'esprit critique, de créativité, de coopération et de communication. Le principe pédagogique repose sur l'association de concepts abstraits, d'une forme d'apprentissage basé sur l'expérience et de modèles 3D concrets et palpables.

Utilisation pluridisciplinaire de l'imprimante 3D

L'imprimante 3D peut être utilisée pour l'enseignement de nombreuses compétences dans les matières scientifiques (mathématiques, informatique, SVT, technologie) : représentation numérique d'objets, création et édition de ces objets au cours du processus de production, contrôle de la production, comparaison du prototype imprimé avec le projet de départ pour effectuer un contrôle qualité... Il est possible de mettre ces différentes étapes en relation avec la matière que vous enseignez et de travailler sur les techniques de mesure numériques, le traitement informatisé de l'information, la connexion IoT. Ceci permet également de gagner du temps : le processus complet, de la conception de l'objet à sa réalisation concrète, peut être balayé en quelques heures de cours, de manière ludique ! 😊

Le chapitre 3 vous propose des exemples pratiques adaptés aux débutants. Le chapitre 4 présente des travaux pratiques qui associent l'impression 3D à la saisie numérique de valeurs de mesure.

Les modèles 3D imprimés permettent de rendre votre cours plus concret, qu'il s'agisse de biologie, de physique, d'informatique ou de chimie (molécules modélisées), ou même d'une discipline artistique ou de sciences sociales (conséquences de la numérisation, industrie 4.0).

La satisfaction de créer soi-même un objet est un puissant facteur de motivation, aussi bien pour les enfants que pour les adultes.

Utilisation en mathématiques, informatique, SVT, technologie

L'impression 3D, de la conception à l'objet fini, est une thématique pluridisciplinaire, qui peut être enseignée notamment dans les matières scientifiques (mathématiques, informatique, SVT, technologie) pour permettre aux élèves d'acquérir des compétences et des connaissances en biologie, technique et design. L'enseignement de la technique de l'impression 3D est déjà bien répandu dans les grandes écoles, mais ce thème n'apparaît pas dans les programmes scolaires du collège et n'est pas abordé en formation. Cependant, l'impression 3D suscite maintenant l'intérêt de certains ateliers de formation et de grandes entreprises de technologie. Les consultants (externes) sont très recherchés et l'offre n'est pas suffisante partout. Nous espérons que ce manuel contribuera à pallier les manques...

L'impression 3D offre aux élèves un environnement d'apprentissage moderne sur le plan didactique et exigeant ; les problèmes posés et les tâches proposées peuvent faire l'objet de discussions critiques et être résolus de manière interactive. L'imagination, la créativité et la motivation sont les maîtres-mots de ce concept d'apprentissage innovant. De plus, les outils utilisés (planches à dessin numériques, ordinateurs et autres tablettes) permettent un haut niveau d'interactivité et ont prouvé leur efficacité dans la pratique pédagogique. Les élèves peuvent dessiner, concevoir et appliquer leur savoir-faire de manière concrète, contrairement aux méthodes d'apprentissage basées sur l'abstraction.

De nombreux domaines relevant des matières scientifiques peuvent être mis en relation avec l'impression 3D ; il peut s'agir des technologies de base de l'impression 3D, les objets imprimés peuvent devenir des objets d'étude, ou encore la technologie 3D peut permettre de créer des outils pour l'enseignement de la matière. Pour les professeurs, cela signifie que l'apprentissage à l'aide de médias numériques (qui a prouvé son efficacité) passe à un niveau supérieur, captivant et susceptible de motiver grandement les élèves. Nous proposons ci-après quelques possibilités d'utilisation de l'impression 3D dans différentes matières, et des projets concrets dans les chapitres 3 et 4.

Technologie

- Transmissions à courroie dentée ou à broche
- Positionnement XYZ
- Cinématique en série ou en parallèle (systèmes de transmission)

SVT

En **biologie**, il est possible d'utiliser des modèles pour illustrer l'évolution et le fonctionnement des articulations :

Evolution de l'Homme :

- Modèle en 3D du crâne de Homo rudolfensis, Homo erectus, Homo neanderthalensis et Homo sapiens
- Classement des crânes dans l'ordre de l'évolution

Comparaison entre les vertébrés : fonction des vertèbres

- Disque intervertébral servant d'amortisseur chez les mammifères
- Modèle avec double extrudeuse (impression simultanée de structures fixes et flexibles)
- Hygiène - Croissance des bactéries et structure de surface

En **physique**, il est possible d'aborder à l'aide de l'impression 3D de nombreuses thématiques dans les domaines de la cinématique, de l'optique et de la thermodynamique. On peut par exemple traiter l'impulsion ou des lois des leviers sous l'aspect « contrôle des matériaux » :

Contrôle non-destructif des matériaux / impulsion :

- « Puis-je imprimer une coque pour mon téléphone portable ? »
- Test des propriétés d'amortissement d'un filament flexible

Contrôle destructif des matériaux / lois des leviers :

- « Quel est le degré de robustesse des impressions 3D ? »
- Test de résistance de différentes formes géométriques (profil rectangulaire vs. profil en T ou double T)
- Influence de la position, de la température ou de l'épaisseur sur la résistance

En **chimie**, il est également possible d'utiliser l'impression 3D avec différentes classes : par exemple, en présentant plusieurs procédés d'impression ou en fabriquant soi-même du matériel pédagogique (structures de molécules, modèles orbitaux).

Plastiques - Thermoplastiques, polymères, élastomères

- Thermoplastiques : l'impression 3D avec la méthode FDM/FFF utilise un procédé physique, sans aucune réaction chimique.
- Polymères : l'impression 3D-Druck par SLA utilise un procédé chimique ; la réaction chimique (polymérisation, durcissement) est activée par l'énergie lumineuse.

Les **mathématiques** constituent la base du fonctionnement de cette technologie :

- Systèmes de coordonnées : cartésiennes, polaires
- Calcul de cinématique en série ou en parallèle (par exemple, applicabilité de Pythagore avec une imprimante 3D Delta)
- Géométrie dans l'espace (plan formé par trois points lors du calibrage du plateau d'impression)
- Corrélations (calcul de la structure de surface à partir de nuages de points).

L'impression 3D peut être utilisée pour l'enseignement de matières autres que les sciences naturelles.

Enseignement artistique

- Modélisation de corps, métamorphoses
- Répliques de statues

Histoire

- Reproduction d'artefacts importants : il est permis de toucher !
- Manipulation d'outils de l'Antiquité, etc.

Géographie

- Modèles topographiques de l'environnement
- Impression de scanners radars 3D

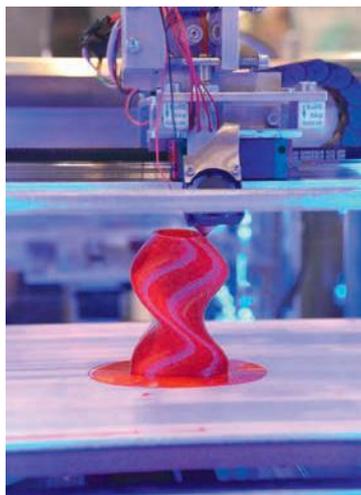
2. Procédés et matériaux

Si vous avez déjà fait l'acquisition d'une imprimante 3D ou si vous avez décidé d'en acheter une, tout un monde de possibilités s'ouvre à vous pour exprimer à tout moment votre créativité. Toutefois, il existe des cas où il peut s'avérer utile de faire appel à un service d'impression 3D qui est en mesure de réaliser des demandes spéciales, comme p. ex. des objets en métal. C'est pourquoi qu'il faut consacrer un certain temps au travail préparatoire pour aboutir à la création d'un fichier STL.

Les différentes technologies ont chacune leurs avantages et inconvénients, qui seront abordés dans ce chapitre. Dans les sections 2.2 et 2.5, le procédé FDM/FFF sera présenté plus en détail.

2.1 Procédés à dépôt de matière

Les procédés à dépôt de matière font également partie des procédés de fabrication additive, c'est-à-dire de fabrication couche par couche. L'imprimante positionne le filament exactement à l'endroit prévu par le modèle numérique. En règle générale, le filament se présente d'abord sous forme solide, puis est ramolli sous l'effet de la chaleur de façon à pouvoir être extrudé facilement par la buse. Si le modèle numérique contient des parties en surplomb ou des cavités, l'appareil imprime en plus des structures de soutien afin d'éviter les déformations du filament encore visqueux.



Le procédé le plus répandu est celui dit à dépôt de matière fondue, plus connu sous son nom anglais **FDM** (Fused Deposition Modeling) ou **FFF** (Fused Filament Fabrication). FDM est une marque ou dénomination commerciale déposée de la société Stratasys ; c'est pourquoi les membres du projet RepRap (mouvement pionnier de l'impression 3D open source) ont adopté plus tard la dénomination FFF.

Le procédé FFF/FDM se caractérise en particulier par sa mise en œuvre facile et économique. En outre, il convient à un large éventail d'applications et est adapté aux débutants comme aux professionnels. Dans le commerce, il existe de très nombreux modèles de différentes marques, et ce à tous les prix.

Figure 5 : Procédé FDM/FFF

Parfois, certains bricoleurs ingénieux et makers ambitieux se lancent dans la construction d'une imprimante 3D sur le mode DIY. Pour ce faire, il faut avoir accès à la technologie par le projet RepRap et consulter des ouvrages spécialisés. On trouve également sur Internet divers manuels intéressants et motivants. Cela permet de faire de sérieuses économies. Bien sûr, le plaisir et la satisfaction d'utiliser une imprimante que l'on a faite soi-même sont indubitables mais l'effet est parfois de courte durée car, selon l'adage, l'appétit vient en mangeant et une imprimante DIY atteint rapidement ses limites. Les exigences en matière d'impression 3D augmentent successivement avec les progrès techniques mais également dans les domaines semi-professionnels et de la création artisanale ou artistique.

Le procédé FFF/FDM est adapté aux applications exigeant de la précision. Par exemple, pour des pièces précises, qui doivent résister à des essais complexes et des environnements difficiles. Dans l'industrie automobile et dans le secteur de l'équipement médical, des pièces de fixation, des outils et des prototypes sont souvent également fabriqués de cette manière. Dans le cadre privé, toutes les pièces imaginables peuvent être imprimées, par exemple des pièces de rechange en modélisme, des figurines, des gobelets ou des jouets.

Selon le procédé FDM, l'objet est fabriqué couche après couche à partir de matière plastique. Une description du procédé FDM/FFF est présentée ci-après à la section 2.4. Puisque de la matière plastique est extrudée à travers une buse chauffée, il doit être fusible mais aussi refroidir et se solidifier rapidement. Selon la forme exécutée, parfois des **structures de soutien** sont également nécessaires.

Les **matériaux synthétiques thermoplastiques** tels que les filaments ABS et PLA. Des filaments contenant des particules de laiton, de cuivre ou de bronze obtiennent après polissage ou ponçage une brillance métallique, fidèle à la réalité.

2.2 Procédés à matériau liquide

Solidifier des liquides semble très simple à première vue si on se base purement sur le passage de l'état liquide à l'état solide. Néanmoins, des procédés spéciaux sont nécessaires pour que les objets solidifiés demeurent dans cet état et ce, dans une gamme de températures raisonnable dans la pratique, afin d'éviter des catastrophes, comme dans le mythe grec d'Icare : Son père lui avait fabriqué de grandes ailes en collant des plumes d'oiseau pour qu'il puisse s'échapper du labyrinthe du Minotaure en Crète en volant. Son erreur : l'utilisation de cire pour coller les plumes, qui a fondu à mesure qu'Icare s'approchait du soleil et a causé la chute d'Icare...

Dans le cadre des procédés à matériau liquide, on solidifie des résines spéciales. En règle générale, cela s'effectue par une réaction chimique, la polymérisation de monomères, p. ex. de résines époxy. Si cette polymérisation se produit de façon ciblée dans certains endroits et aux moments adéquats, la photopolymérisation est une excellente technologie qui se révèle particulièrement impressionnante comme chez le dentiste. Dans le domaine de l'impression 3D, de la résine photosensible est d'abord versée dans une cuve qui servira de plaque de base. Ensuite, l'ensemble est commandé par ordinateur et la résine est exposée à un faisceau laser UV à des endroits précis conformément au modèle 3D et durcit en même temps. Ce procédé appelé stéréolithographie (SLA) fut le premier procédé d'impression en 3D et fait donc partie des méthodes classiques.

Sur le marché, deux procédés sont établis : Dans le premier, le faisceau laser UV irradie la résine à sa surface supérieure, puis le plateau s'abaisse couche après couche. Dans le second, le faisceau laser UV irradie la résine à sa surface inférieure et l'objet ① est sorti du bain de résine ⑨, suspendu au plateau de base ④ (p. ex. sur la Form 2 du fabricant Formlabs et sur la Nobel 1.0A de XYZprinting).

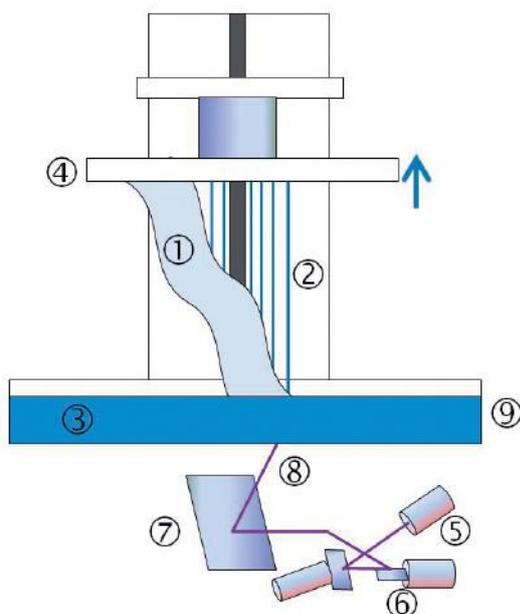


Figure. 6 : Principe du procédé SLA. © Conrad Electronic SE

La SLA permet surtout de fabriquer des filigranes, des modèles avec une profusion de détails et des pièces : notamment des modèles de fonderie, des pièces fonctionnelles et des prototypes en mécanique, dans l'industrie automobile et l'ingénierie médicale. Ce procédé convient également pour la réalisation de produits finaux comme par exemple des appareils auditifs sur mesure.

Ainsi, le modèle ① est fabriqué couche après couche dans un bain liquide ③ de résine photopolymère¹. Un faisceau laser ④ durcit chaque couche, puis selon le procédé utilisé, le modèle résultant descend ou monte pour pouvoir réaliser la couche suivante avec le liquide. Afin que l'objet conserve sa position pendant tout le processus d'impression, des **structures de soutien** ② (colonnes ou entretoises) doivent être prévues, lesquelles seront enlevées plus tard mécaniquement, une fois l'objet solidifié. N'ayez crainte : le logiciel intègre ces structures automatiquement lors de la préparation de l'impression. Il est important à la fin de laisser s'égoutter l'objet réalisé avant de le plonger dans un récipient rempli d'alcool isopropylique pour enlever l'excédent de résine non-solidifiée. Il est impératif donc de porter des gants de protection spéciaux ainsi que des lunettes de sécurité pour éviter tout contact avec la peau ou les yeux. Une **chambre à UV** permet ensuite de solidifier définitivement la pièce imprimée.

L'imprimante Nobel 1.0A (Advanced) de XYZprinting offre quelques fonctions qui simplifient l'utilisation en prélevant la résine nécessaire automatiquement à partir de la bouteille et en surveillant le niveau de liquide. Ainsi, il n'est plus nécessaire de la transvaser.

Avantages du procédé SLA :

- Très précis : une épaisseur de couche à partir de 25 µm
- La résine époxy en se solidifiant devient très robuste par rapport aux contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques.

Inconvénients :

- Fastidieux
- Coût élevé des matériaux (1 litre de résine p. ex. à partir de 122 € env.) et des appareils
- Chambre à UV nécessaire
- Port obligatoire de gants de protection et de lunettes de sécurité (respecter la fiche de données de sécurité !)



Conseil : Il est recommandé de recourir à un service impression 3D pour tester la qualité des objets imprimés avant de décider d'acheter une imprimante SLA.

Dans ces **procédés à traitement de surface**, un faisceau laser ne durcit pas la couche superficielle point par point mais suit une matrice d'exposition.

Pour ce faire, on peut utiliser le procédé DLP (Digital Light Processing) employant un vidéoprojecteur : Le procédé développé par Texas Instruments exploite la surface de millions de micromiroirs présents sur une puce, lesquels sont orientables individuellement. Ainsi, les différents pixels d'une matrice d'image sont activés pour être lumineux ou sombres, selon la manière dont la lumière incidente est réfléchi. En guise d'alternative, il existe également un procédé de combinaison, qui expose des photopolymères par en dessous, ces photopolymères consistant en une suspension constituée d'une solution de photomonomère et de particules de céramique par exemple, qui font ensuite l'objet d'un frittage. Le liant (polymère) est enlevé ultérieurement par traitement thermique. Ce procédé est désigné LCM (Lithography-based Ceramic Manufacturing), c'est-à-dire la fabrication de céramique basée sur la lithographie.

¹ Un mélange spécial d'ester d'acide méthacrylique, ou - selon le fabricant - d'uréthane-acrylate et d'un monomère acrylique avec un photoinitiateur. Les photoinitiateurs sont des substances sensibles à la lumière UV, qui provoque une polymérisation (réticulation) où se forme un radical, à savoir un produit de fission très réactif avec un seul électron.

2.3 Procédé à lit de poudre

Les procédés à lit de poudre font partie des procédés d'impression 3D additive, également appelés de « fabrication générative ».

Dans le cadre d'un procédé à lit de poudre, de la poudre est d'abord appliquée, couche après couche, dans une cuve. Cette poudre servira à imprimer l'objet. Ensuite, les zones contenant l'objet en 3D seront assemblées ensemble en aspergeant du liant de façon ciblée ou en les faisant fondre par la chaleur dégagée. Après chaque couche, le plateau d'impression s'abaisse d'un niveau de couche et l'opération se répète.

Le schéma suivant présente le déroulement de ce procédé d'impression 3D :

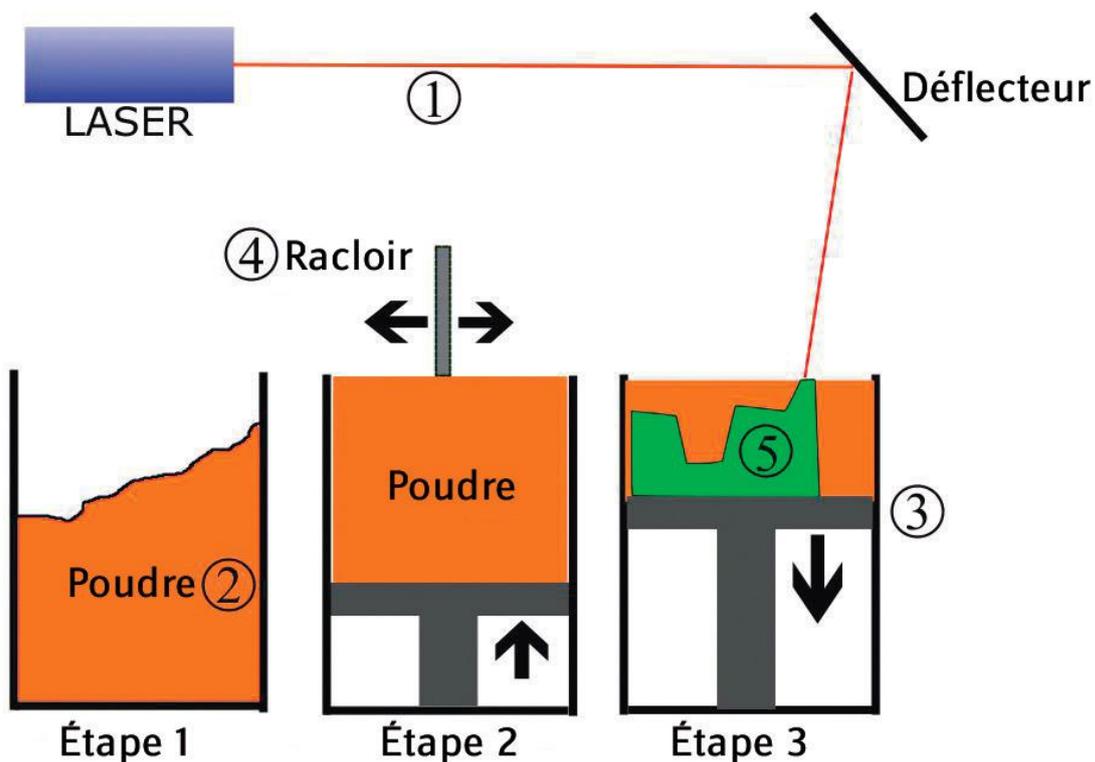


Figure 7 : Procédé à lit de poudre - frittage sélectif par laser (SLM). © Conrad Electronic SE

A l'étape 1, la chambre d'impression est remplie de poudre ② fusible et, à l'étape 2, la surface est lissée par un racloir ④. Ensuite, un ou plusieurs faisceaux laser ① balayent la surface supérieure de la poudre qui fond. Comme dans d'autres techniques additives, on commence par une couche de base. Ensuite, le plateau d'impression ③ s'abaisse d'un niveau d'épaisseur de couche souhaité, une nouvelle couche de poudre est appliquée puis est lissée à l'aide du racloir ④. Le faisceau laser fait fondre (fritter) de façon sélective la poudre de la couche suivante et ainsi de suite. Pour une meilleure compréhension, l'étape 3 présente dans le schéma l'objet imprimé vert ⑤ après la fusion (ou le frittage) de plusieurs couches.

Les éléments de l'objet sont associés à une structure de soutien, qui est soudée fermement à la plaque de base. Cela permet ainsi une dissipation thermique et une fixation au cours de la production. Les structures de soutien seront ensuite enlevées manuellement à la fin du processus d'impression.

Avantage : Différents métaux peuvent également être utilisés ; ainsi les objets créés à partir d'un tel lit de poudre métallique ne nécessitent aucune structure de soutien supplémentaire.

Inconvénients : Forte consommation d'énergie (jusqu'à 2 800W) et processus mécanique complexe pour l'application de poudre et son lissage.

Les procédés suivants fonctionnent également avec des matériaux sous forme de poudre, ils portent des dénominations spécifiques correspondant à la manière dont la poudre est assemblée pour devenir une pièce :

Fusion par faisceau d'électrons (EBM) : Par ce procédé, de la poudre de métal fusionne également couche par couche. L'énergie nécessaire à la fusion est générée ici par un canon à faisceau d'électrons dans le vide poussé et la matière doit ainsi s'échauffer. La déviation du faisceau d'électrons se produit un peu comme dans un tube cathodique d'un téléviseur classique par déviation magnétique.

Grand avantage : Différents métaux peuvent être utilisés.

Inconvénients : Forte consommation en énergie de plusieurs centaines de kilowatts. En outre, les électrons produisent des rayons x lors de la collision avec la matière et un blindage est nécessaire pour s'en protéger.

Frittage sélectif par laser (SLS) : Comme dans le procédé SLM, de fines couches de poudre d'un lit de poudre sont compactées au moyen d'un puissant faisceau laser. Les particules de plastique, de métal ou de céramique ne sont pas totalement fondues, c'est-à-dire liquéfiées, mais s'agglomèrent ensemble par dilatation sous l'effet de la chaleur. Les poudres doivent pouvoir s'écouler. Un racloir, une combinaison de plusieurs raclours ou un rouleau permet d'appliquer une fine couche de poudre sur la plateforme de fabrication, laquelle est portée à une température, juste en dessous du point de fusion.

Avantage : Différents matériaux sont possibles : plastique, céramique et métaux

Inconvénient : Coûteux en énergie et nécessitant un appareil complexe, ce qui en fait un procédé onéreux.

Selon le procédé par jet de matière **PJM (PolyJet modeling)** ou **MJM (Multijet-Modeling)** des polymères de résine acrylique liquide sont appliqués par une tête d'impression en couches sur une plaque de base à l'aide d'une ou de plusieurs buses. La solidification s'opère à l'aide de la lumière ultraviolette. Comme dans d'autres procédés, un ordinateur commande le déplacement des buses sur le plateau d'impression. Comme des lampes UV sont montées directement sur la tête d'impression, la matière plastique encore fluide est solidifiée de façon ciblée et précise juste après l'application. On commande également la liaison solide existant entre les couches en réglant de façon optimale l'intensité de la lampe UV. Le but est ne pas solidifier complètement la couche pour pouvoir lier les couches entre elles avant la solidification totale.

Enfin, l'objet imprimé est irradié dans son intégralité encore plusieurs fois pour atteindre la dureté finale souhaitée.

2.4 Comment fonctionne une imprimante 3D selon le procédé FFF/FDM ?

Une imprimante 3D permet de fabriquer, couche par couche, divers objets en trois dimensions qu'on a créés soi-même. L'objet, que vous souhaitez imprimer, doit également exister sous forme de modèle tridimensionnel numérique. Pour ce faire, vous pouvez télécharger des projets 3D complets disponibles sur Internet ou bien les créer vous-même à l'aide d'un logiciel adapté. Pour qu'un objet réel puisse être fabriqué à partir du fichier existant dans une imprimante 3D, tous les appareils sont livrés avec un logiciel correspondant. Ce dernier calcul les déplacements nécessaires et les commandes qui en

découlent pour les moteurs des axes linéaires. Les 3 axes spatiaux X, Y et Z ainsi que l'avance pour l'alimentation du filament à travers le hot-end doivent ainsi être commandés et synchronisés.

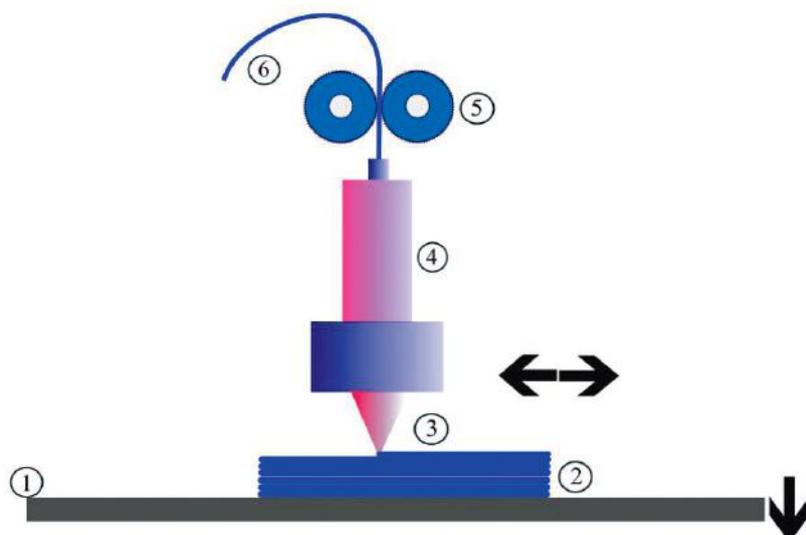


Figure. 8 : Principe d'impression selon le procédé FFF/FDM © Conrad Electronic SE

L'impression s'effectue à l'aide d'une buse ③, de laquelle sort le filament plus ou moins visqueux sous forme de fil très fin. Le filament ⑥ est amené, via deux rouleaux de pression ⑤ moletés, au hot-end et y est fondu. Le hot-end ④ avec la buse ③ se déplace dans les voies précalculées au-dessus du lit d'impression ① et applique le fil en plusieurs couches ② les unes au-dessus des autres. L'objet en 3D s'élève ainsi de bas en haut, couche après couche, le matériau appliqué durcissant rapidement. Un objet fermé imprimé en 3D n'est pas complètement rempli de filament. À l'intérieur de l'objet imprimé, l'imprimante 3D réalise une structure de remplissage prédéfinie, sachant qu'il est possible de personnaliser l'épaisseur de matière en termes de pourcentage de remplissage. Cela permet d'économiser de la matière et stabilise également l'objet.



Remarque : Vous pouvez adapter à votre guise l'épaisseur de l'objet imprimé et la structure de remplissage et ainsi imprimer un corps creux (0 % de remplissage) jusqu'à un corps plein (100 %). Ce réglage a bien sûr un effet important sur la stabilité et le temps d'impression. Le réglage standard est de 20 % et cela suffit pour la plupart des buts d'utilisation.



Conseil : Il existe aujourd'hui des imprimantes 3D à tous les prix. Toutefois, il faut se rendre à l'évidence : les appareils apparemment bon marché ne peuvent pas rivaliser en termes de précision et de qualité, avec des appareils haut de gamme. C'est ennuyeux pour l'impression de pièces uniques ou de pièces de rechange, là où la précision est requise. Conrad Electronic vous propose donc des imprimantes 3D de haute qualité, qui vous fourniront des résultats utiles et vous donneront entière satisfaction. Si vous ne savez pas quelle imprimante choisir ou si vous avez des doutes, nous vous recommandons de visiter un de nos magasins. Vous y trouverez d'une part des conseils clairs et, d'autre part, notre pôle d'impression sur place vous offre la possibilité de réaliser des épreuves, ce qui facilitera également votre décision d'achat en discutant avec nos experts.

2.5 Matériaux pour le procédé FDM/FFF

Des matériaux sous forme de filament sont utilisés, ils deviennent fluides sous l'effet de la chaleur et sont adaptés au procédé FDM/FFF. Il peut s'agir de matériaux thermoplastiques tels que le PLA, l'ABS, le PET, le nylon mais aussi certains métaux, la cire voire même le chocolat. Dans ledit hot-end, un conduit cylindrique chauffé électriquement, le matériau est porté à une température supérieure au point de fusion. La fluidité ou viscosité du matériau est décisive pour qualifier son aptitude à l'impression 3D. Poussé par le moteur d'avance, le filament fluide sort de la buse et est appliqué sur le plateau d'impression ou bien sur la couche déjà solidifiée. La structure en couches est caractéristique du procédé FDM. La vitesse d'écoulement, la position, les déplacements et la température sont commandés précisément par le processeur de l'unité centrale intégrée à l'imprimante 3D : La température est même régulée, dans l'idéal, au dixième de degré C près. C'est un critère de qualité important pour les imprimantes 3D haut de gamme. Réguler signifie, dans le domaine de l'automatisation, que la température est constamment mesurée de façon précise de manière électrique et est comparée à la valeur consigne (soit la température idéale selon le filament). En fonction de l'écart constaté, la puissance thermique du hot end est ajustée afin d'assurer une qualité d'impression homogène. Le capteur de température nécessaire est intégré dans le hot-end.

Une fois sorti de la buse d'impression, le filament se solidifie le plus rapidement possible en refroidissant tout en fusionnant avec la couche située en dessous ou y en adhérant. Souvent, le refroidissement est commandé par un ou plusieurs petits ventilateurs (cela n'a pas été mesuré ici à titre de simplification). La solidification du matériau peut se produire plus ou moins rapidement selon la quantité appliquée, la température et la vitesse d'application et sa capacité thermique. En cas de paramétrage incorrect ou si l'emplacement de l'imprimante est inadapté, des déformations peuvent survenir lors de l'impression de l'objet.

C'est pourquoi une rétraction aussi faible que possible lors du refroidissement est un critère important pour qu'une matière plastique serve de filament d'impression 3D. Cette propriété thermique est caractérisée par la température de stabilité dimensionnelle à chaud (en anglais : Heat Deflection/ Distortion Temperature, HDT) et doit figurer dans la fiche technique du produit.

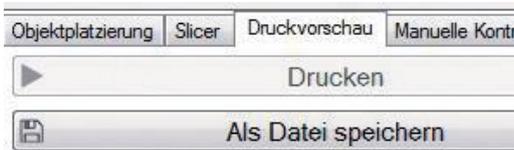
Les imprimantes 3D selon le procédé FDM ou FFF et le filament correspondant sont relativement bon marché à l'achat et conviennent également aux particuliers, aux bricoleurs ou aux makers. Il existe de nombreuses sortes de filaments pour l'impression 3D et tous les filaments ne se valent pas. Les types de filaments se distinguent par leur processus de fabrication chimique, mais aussi par leur dureté, leur résistance thermique, leur résistance aux chocs et leur flexibilité. En outre, certains filaments possèdent des propriétés particulières : ils peuvent être aptes au contact alimentaire, hydrosolubles, transparents, résistants aux UV, résistants aux produits chimiques, ignifuges, phosphorescents et résistants aux intempéries, pour ne citer que quelques propriétés.

Aujourd'hui, il existe un vaste choix de filaments. Conrad Electronic propose actuellement plus de 600 filaments différents, disponibles sur <http://www.conrad.fr/>, qui peuvent être sélectionnés facilement par filtre selon les critères suivants : coloris, poids, matériau, marque, diamètre ou propriété de matériau.



Conseil : Commencez si possible avec le PLA car ce filament est simple à imprimer et donne les meilleurs résultats, qui sont suffisants pour des exigences normales. Il existe également des packs bon marché de filament, qui contiennent divers filaments en petite quantité à tester. Veuillez respecter également le diamètre de filament et la gamme de température autorisée de l'imprimante. Les diamètres habituels sont 1,75 mm et 2,85 ou 3 mm. Venez dans les magasins Conrad Electronic pour bénéficier de conseils professionnels !

En cas de doute sur la quantité de filament dont vous avez besoin pour l'impression prévue ou si vous ne savez pas si la bobine existante suffit pour imprimer, le logiciel de préparation de l'impression comme p. ex. CURA ou Repetier Host vous dira avant de commencer quelle quantité est nécessaire (par exemple, pour un filament de 3 mm) [Figure 9]



Druckstatistiken	
Geschätzte Druckzeit:	17m:41s
Layer-Anzahl:	14
Zeilen gesamt:	3722
Benötigtes Filament:	342 mm

Figure 9 : Calcul automatique du temps d'impression et de la quantité de filament nécessaire

Dans le cadre de l'utilisation des technologies d'impression 3D, il convient de respecter entre autres les consignes générales de sécurité des machines d'impression 3D, les rejets dans l'air et la qualité de l'air ambiant. Pendant leur traitement, les filaments peuvent rejeter des substances chimiques et des particules dans l'air intérieur - il est donc impératif de ventiler la salle de travail ! A savoir : le PLA est l'un des filaments les plus écologiques et les moins nocifs pour la santé.

Respectez scrupuleusement les instructions du mode d'emploi de l'imprimante utilisée ainsi que les consignes de sécurité afin d'utiliser le filament adapté, de l'insérer et le traiter de façon conforme. Le stockage du filament doit s'effectuer dans la plage de température prescrite par le fabricant afin que le produit conserve ses propriétés caractéristiques. Des filaments sont conditionnés en règle générale dans des packs scellés hermétiquement. Veuillez ne les ouvrir que lors de l'utilisation et stockez les bobines inutilisées si possible dans des sacs refermables hermétiquement (p. ex. sacs zip ou boîtes fraîcheur avec gel silice) puisque de nombreux filaments sont hygroscopiques, c'est-à-dire qu'ils absorbent l'eau. L'absorption de la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant détériore les propriétés d'impression. La lumière, notamment la lumière du soleil ou de lampes halogènes (émettant plus ou moins des UV), a au fil du temps un effet négatif sur la qualité. Veuillez utiliser les filaments dans les délais indiqués. En cas de doute, consultez les fiches de produit ou des fiches de données de sécurité et respectez les instructions du fabricant.



Conseil : Faites éventuellement un essai pour vous assurer que le filament soit bien adapté avant de lancer une plus grande impression.

Tour d'horizon des principaux matériaux

Il existe une grande diversité de filaments qui présentent, en fonction de leur composition chimique, différentes températures de traitement et éventuellement d'autres exigences spécifiques. Pour débiter, l'idéal est le PLA : ce filament ainsi que les filaments principaux sont présentés en détail ci-après, pour d'autres sont indiquées uniquement les propriétés et les dénominations.

PLA (Acide polylactique)

Bioplastique car issu de matières premières naturelles. Le polymère se compose sur le plan chimique de groupes d'acide lactique :

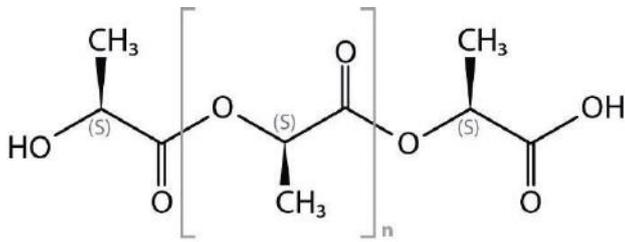


Figure 10 : Formule structurale du PLA. © Conrad Electronic SE

Le PLA sous sa forme pure est même biodégradable ; toutefois, les filaments sont souvent des copolymères, c'est-à-dire qu'ils contiennent des additifs, comme p. ex. des colorants ou d'autres polymères, qui anéantissent malheureusement cette propriété positive. Nous faisons donc référence aux fiches techniques de produits de différents fabricants.

- Filament idéal pour une impression facile
- Ecologique
- Généralement inodore, dégageant occasionnellement une odeur sucrée
- Propriétés d'impression optimales, presque aucun retrait lors du refroidissement
- Parfaitement adapté aux débutants
- Très grand choix de marques, de couleurs et de modèles
- Abordable
- Température d'impression : 180 à 230°C
- Lit d'impression : Tempérage pas forcément obligatoire, à 60°C

Avantages

- Peut être traité par presque toutes les imprimantes 3D
- Ecologique et fabrication durable
- Presque aucun retrait lors du refroidissement
 - optimal pour les débutants
- Niveau d'émission (liaisons organiques, particules fines) en partie en dessous de la limite de détection

Inconvénients

- Matériau dur, difficile à traiter après solidification
- Faible résistance à la rupture
- Température de ramollissement basse : les objets imprimés ne résistent pas à la chaleur

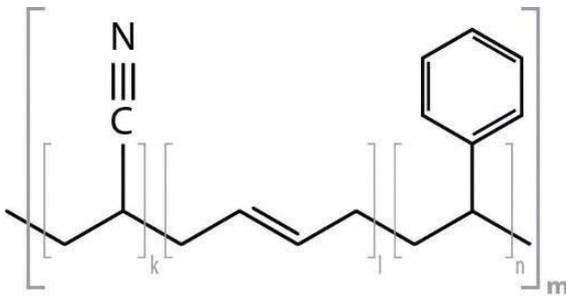
PLA Compound, acide polylactique avec additifs

PLA avec additifs assurant des effets matériels spéciaux

- Selon l'additif, des propriétés spéciales comme p. ex. des effets colorés, imitation pierre, terre cuite, béton, etc.
- PLA Compound aluminium et cuivre : polissable pour un aspect métallique particulier
- PLA Compound bois : avec différents réglages de température, des effets de bois véritable, même les cernes peuvent être simulés.
- Bon post-traitement
- Idéal pour les créations artistiques

- Température d'impression : 210 à 250°C
- Lit d'impression : Tempérage pas forcément obligatoire, à 60°C

ABS Copolymérisat d'acrylonitrile butadiène styrène [Figure10]



Filament léger, robuste et résistant aux chocs. Pour pouvoir imprimer avec des filaments d'ABS, il vous faut un lit d'impression chauffé car les filaments ABS ont tendance à rétracter en refroidissant, ce qui fait gondoler les bords.

Figure 11 : Formule structurale de l'ABS.

Instructions d'impression :

- Température d'impression : entre 220 et 270°C (selon le fabricant)
- Lit d'impression : 50 à 100°C

Avantages

- Haute résistance aux chocs
- Optimal pour le post-traitement
- Faible déformation (peu de retrait)
- Haute capacité de charge
- Haute résistance à la rupture
- Résistance à la chaleur jusqu'à env. 85° C
- Surface dure résistant aux rayures et aux chocs

Inconvénients

- Tendance à se rétracter en refroidissant
- Confinement recommandé
- Lit d'impression chauffé nécessaire
- Emission nette (particules fines, composés organiques), comparable à une imprimante laser

ABS Pro présente un retrait nettement plus faible par comparaison à l'ABS classique. De ce fait, il s'imprime facilement et est également adapté pour des plus modèles de grande taille.

ASA Copolymère acrylonitrile-styrène-acrylate

- Alternative à l'ABS pour des applications d'extérieur car résistant aux UV
- Stabilité dimensionnelle très élevée sous l'effet de la chaleur
- Résistance aux produits chimiques
- Haute résistance aux chocs
- Particulièrement bon pour les pièces fonctionnelles techniques.
- Insoluble dans l'eau
- Température d'impression : entre 235 et 270°C (selon le fabricant)

BVOH Copolymérisat d'alcool vinylique haute performance

- Matériau support hydrosoluble pour appareils à double extrudeuse
- Les déchets peuvent être jetés dans les eaux usées
- Excellente formation de couches, pouvoir émulsifiant, adhérence
- Photosensibilité et sensibilité aux rayons UV
- Bonne solubilité dans l'eau
- Principaux domaines d'application : matériau support pour filaments, projets d'impression avec des parties en surplomb ou objets complexes
- Température d'impression : entre 200 et 220°

BendLay : Mélange d'un copolymère de styrol-butadiène et de polystyrène

- Elasticité supérieure à celle de l'ABS
- Paramètres d'impression de l'ABS
- Densité : 1,05 g/cm³
- Température d'impression : entre 215 et 240°C

CPE : Copolyester

- Résistance aux produits chimiques
- Robustesse et stabilité dimensionnelle
- Bonne adhérence inter-couche
- Faibles concentrations en particules ultrafines (PUF) et en composés organiques volatiles (COV)
- Dureté 72 (Shore D)
- Température d'impression : entre 245 et 260°C

CPE + : Copolyester amélioré

- Résistance aux produits chimiques
- Plus grande résistance à la température et aux chocs que le CPE
- Température d'impression : entre 250 et 260°C

Elastic : polyuréthane thermoplastique (TPU)

- Semiflexible
- Aspect du caoutchouc au toucher
- Flux propre et meilleurs résultats d'impression
- Température d'impression : entre 180 et 230°C

Filament flexible : Copolyester thermoplastique TPC

- Base biologique
- Élastique de type caoutchouc
- Température d'impression : entre 210 et 250°C

HIPS Polystyrène high impact (modifié par l'ajout de caoutchouc)

- Haute résistance aux chocs (en anglais : « high impact »)
- Soluble dans l'extrait de d-limonène
- Température d'impression : 220 à 235°C
- Lit d'impression : 50 à 100°C

Laybrick Compound

- Filament avec des particules de bois véritable
- Température d'impression : 165 à 200°C

Nylon, voir PA (polyamide)

PA - Polyamide (nylon)

- Forte résistance à la chaleur
- Solide
- Forte résistance à la traction
- Température d'impression : 250 à 260°C
- Lit d'impression : 50 à 100°C

PC - Polycarbonate

- Résistance thermique jusqu'à 110 °C
- Excellentes propriétés mécaniques
- Température d'impression : 250 à 270°C

PC ABS

- Fluidité optimisée
- Stabilité dimensionnelle à une température comprise entre 110 et 135°
- Possibilité d'appliquer de la peinture, du vernis ou de la colle après séchage
- Très bonnes propriétés d'isolement électrique (résistivité en surface de 1015 ohms)
- Forte résilience sur une large gamme de température
- Haute stabilité dimensionnelle
- Faible tendance au retrait
- Température d'impression : jusqu'à 280°C
- Lit d'impression : 90 à 110°C

PEEK - Polyétheréthercétone : une matière synthétique thermoplastique résistant à haute température, qui, en raison de sa température d'impression très élevée, n'est adaptée qu'à certaines imprimantes 3D très spécifiques.

- Résistant à de nombreux fluides
- Température de fusion : 343°C
- Température élevée d'utilisation permanente : 260 °C
- Faible dégagement de fumée en cas d'incendie
- Adapté pour l'aéronautique, les transports, les oléoducs et gazoducs (anneau de support et canalisations)
- Le matériau s'utilise en ingénierie médicale et est même implantable dans certaines conditions
- Température d'impression : de 375°C à 410°C

PET (Polytéréphtalate d'éthylène)

- Très solide et résistant
- Résistant à la température
- Différents niveaux de transparence disponibles
- Température d'impression : 220 jusqu'à 250°C
- Lit d'impression : Tempérage inutile

PET G (Polytéréphtalate d'éthylène glycolisé)

- Haute transparence
- Faible viscosité (s'écoule mieux)
- Apte au contact alimentaire
- Résistance aux chocs
- Température d'impression : 230 et 260°C
- Lit d'impression : tempérage inutile

PET G Compound - voir aussi PET G

- PET G avec 20 % de fibres de carbone ajoutées
- Pour produire des pièces très légères et résistantes : déjà utilisé dans le sport, notamment la course
- L'effet abrasif des fibres de carbone sollicite fortement la buse : en raison de la friction des fibres de carbone dans la buse, l'orifice de la buse s'élargit. Les buses en laiton devraient être changées après chaque bobine. Eventuellement, une buse en acier peut être nécessaire (selon l'imprimante 3D)
- Température d'impression : 230 à 252°C (respecter les indications du fabricant)

Polyamide (nylon) voir PA

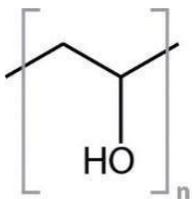
PP (polypropylène)

- Durable
- Indéformable
- Résistant aux produits chimiques
- Bonne propriétés mécaniques en termes de rigidité et de résistance à la traction
- Haute qualité de surface
- Résistance aux produits acides, basiques et aux solvants organiques
- Matériau très léger
- Apte au contact alimentaire (selon le fabricant : cf. fiche technique du produit)
- Bonne transparence
- Résistant à la chaleur jusqu'à env. 100°C
- Température d'impression : 220 à 240°C
- Lit d'impression : 120 jusqu'à 150°C

PPA (polyphthalamide)

- Les PPA sont des thermoplastiques particulièrement stables et ont une bonne résistance thermique et mécanique.
- Matériau particulièrement rigide
- Haute solidité et dureté
- Température élevée d'utilisation permanente
- Application comme substitut au métal p. ex. dans le compartiment moteur
- Particulièrement bien adapté à l'impression 3D
- Contrairement au **PET G Compound**, les buses ne s'usent pas
- Retrait minimal
- Température d'impression : 260 à 275°C
- Lit d'impression : tempérage à 110°C

PVA - alcool polyvinylique



PVA est idéal comme matériau support pour les matières telles que PLA, Elastic, Flex, etc. Après l'impression, le modèle 3D est simplement placé dans de l'eau tiède pour dissoudre le PVA.

Figure 12 : Formule structurale du PVA. Source : Conrad Electronic SE

Instructions d'impression :

- Idéal comme matériau de soutien
- Hydrosoluble
- Température d'impression : 180 à 220°C
- Lit d'impression : Tempérage pas forcément nécessaire, jusqu'à 60°C max.

TPE - abréviation regroupant des Elastomères Thermoplastiques de différentes compositions chimiques. Les températures d'impression varient aussi selon le fabricant :

- Elastomère polyester thermoplastique haute performance
- Très flexible
- Résistant aux huiles, aux graisses, au frottement et aux solvants
- Bonne stabilité dimensionnelle
- Bonne résistance aux intempéries
- Principaux domaines d'application : éléments flexibles comme des pinces, des semelles intérieures pour des chaussures, des tuyaux, des barrettes, des isolations, des ballons, des pneus, etc.
- Température d'impression : 175 à 250°C (selon le fabricant)
- Lit d'impression : tempéragé à 40°C

TOUGH PLA réunit les meilleures qualités du PLA et de l'ABS. Grâce à une meilleure élasticité et flexibilité, il y a moins de retrait.

- Extrêmement fiable
- Très stable
- Impression à grande vitesse
- Température d'impression : 195 à 240°C
- Lit d'impression : 60 à 65°C

Si vous vous sentez perdu avec cette longue liste de matériaux, commencez si possible avec le PLA si vous n'avez pas besoin de propriétés matérielles particulières et vous obtiendrez les meilleurs résultats d'impression sans problème particulier, ni coût exorbitant !

3. De l'idée à l'objet final

3.1 Création de modèles 3D

Il est possible de créer des modèles 3D « manuellement », en les dessinant à l'aide d'un **logiciel de construction** (CAO : Conception Assistée par Ordinateur), en déterminant les dimensions ou en les programmant à l'aide d'un **langage de programmation**. Une autre possibilité consiste à scanner un objet déjà existant à l'aide d'un scanner 3D et de retravailler le modèle 3D ainsi généré. Enfin, il est aussi possible de télécharger des modèles d'objets 3D depuis une **banque de données** disponible sur Internet.

Avantages et inconvénients des trois méthodes :

Méthode	Avantages	Inconvénients
Construction	Grande précision si les dimensions des éléments sont déjà connues ou pour des créations personnelles	L'utilisation d'un logiciel de CAO professionnel nécessite un apprentissage.
Programmation	Adaptation rapide Automatisation de pièces techniques (roues dentées par exemple)	Il faut disposer d'un modèle déjà terminé.
Scanner	Idéal pour la modélisation plastique (art, sculptures) Brouillon de modèles plus complexes, déjà existants	Nécessite d'être retravaillé Le logiciel peut ne pas détecter certains creux et les ouvertures intérieures cachées.
Banque de données de modèles	Modèles déjà prêts et disponibles	Copyright

3.1.1 Construction

Il existe deux méthodes de construction d'éléments en 3D : la construction à l'aide de corps en 3D, combinés (ajoutés, soustraits, ...), et la variante paramétrique, retravaillée à l'aide de vues de face, de côté et de dessus, et qui est entièrement définie par les représentations en 2D et les caractéristiques de l'objet.

La première méthode est accessible aux débutants et ne nécessite pas d'apprentissage ; elle est adaptée aux projets pédagogiques courts (quelques semaines) et aux activités extra-scolaires. Pour des constructions plus complexes, il est judicieux d'utiliser une méthode paramétrique. Avec cette méthode, toutes les étapes jusqu'à la pièce finale sont enregistrées et peuvent être éditées a posteriori ; il est possible par exemple de modifier le perçage de M3 à M4 à l'étape de construction 16 sur 89 : les 73 étapes suivantes seront également modifiées en conséquence. La définition complète des propriétés des corps modélisés (dans les vues partielles) permet de lier les étapes de construction entre elles.

3.1.1.1 Construction d'un objet simple à l'aide d'un programme de CAO (dans l'exemple, un jeton de caddie)

Le logiciel utilisé ici est le logiciel Tinkercad (disponible sur www.tinkercad.com). Il suffit de s'inscrire sur le site et de le télécharger gratuitement (pour les utilisateurs privés).

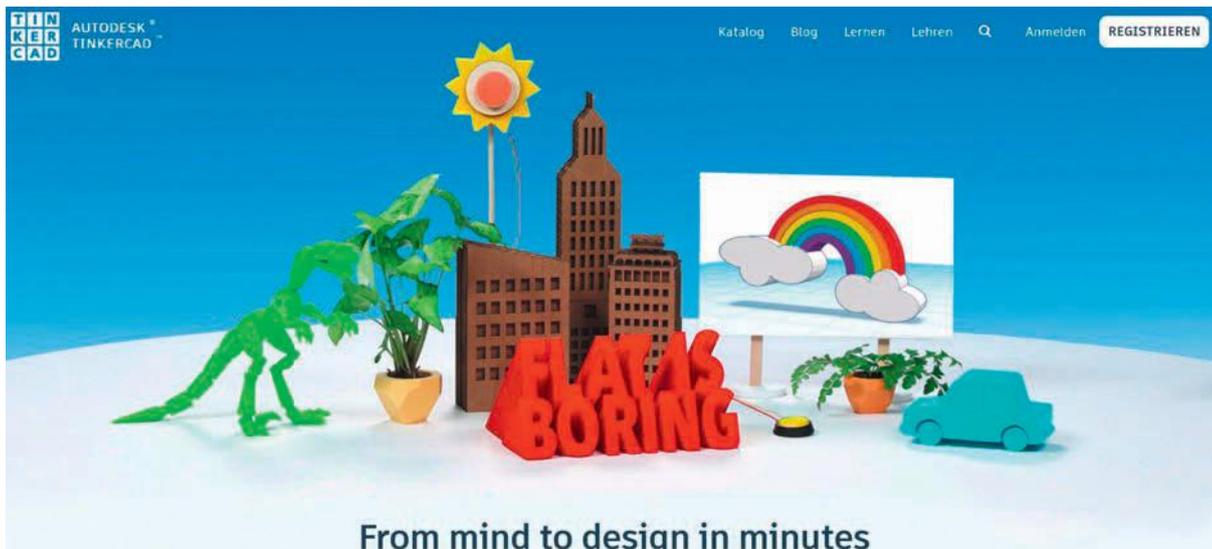


Figure 13 : Ecran d'accueil du logiciel de CAO Tinkercad, disponible sur Internet

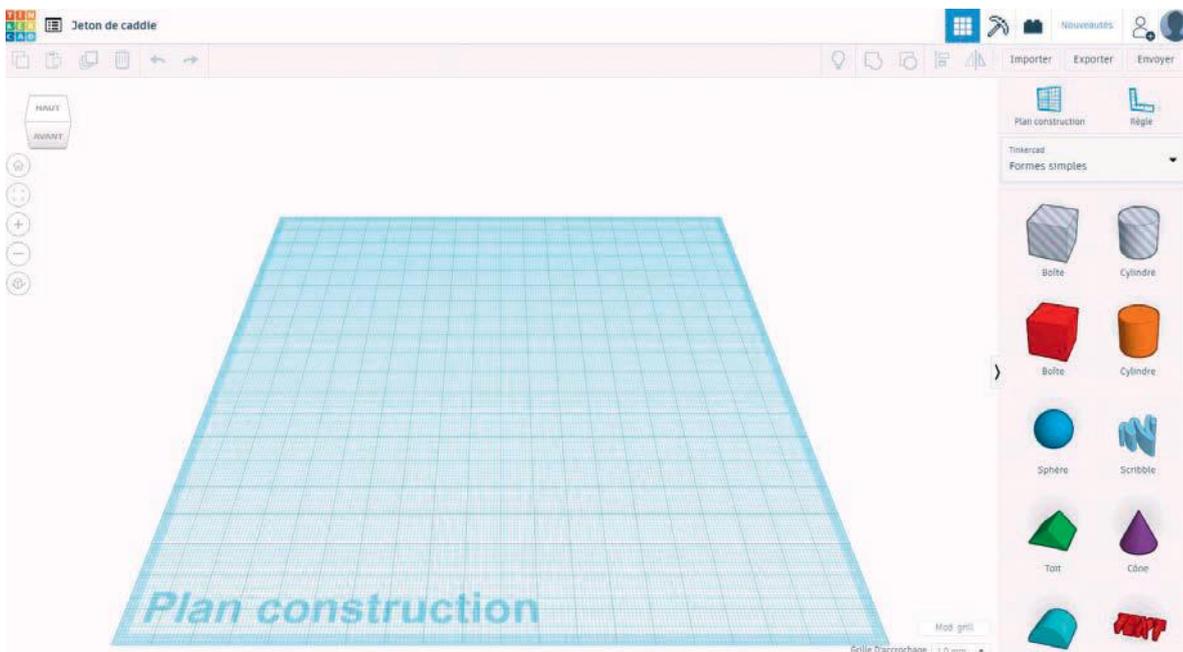


Figure 14 : Environnement de travail dans Tinkercad : outils, zone de travail et boutons

Après l'inscription, on accède au tutoriel de Tinkercad. Les symboles commandant les vues sont situés sur le côté gauche ; à droite figurent les outils, et en haut à gauche, les boutons pour enregistrer, grouper, importer et exporter. La zone de travail se trouve au centre de l'écran.

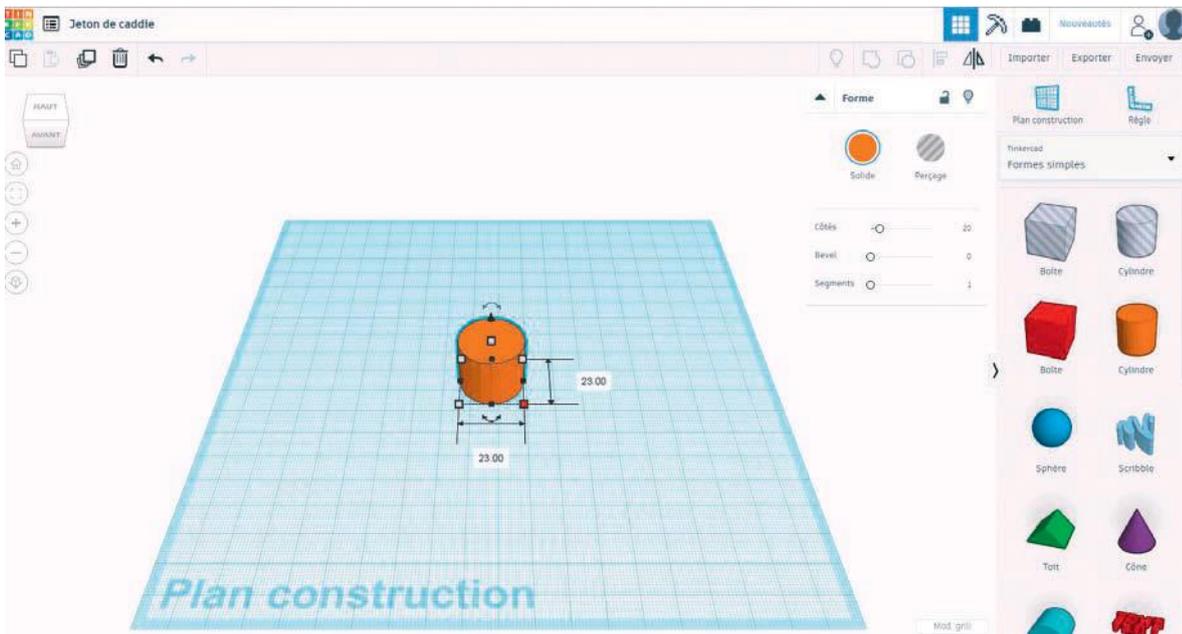


Figure 15 : Projet « Jeton de caddie » - Placement du cylindre, dimensionnement

Dans cet exemple, nous plaçons un cylindre sur la zone de travail puis nous entrons les dimensions de l'objet souhaité (pièce de 1 Euro dans ce cas). Nous indiquons un diamètre de 23 mm dans les directions X et Y afin d'obtenir un objet rond.

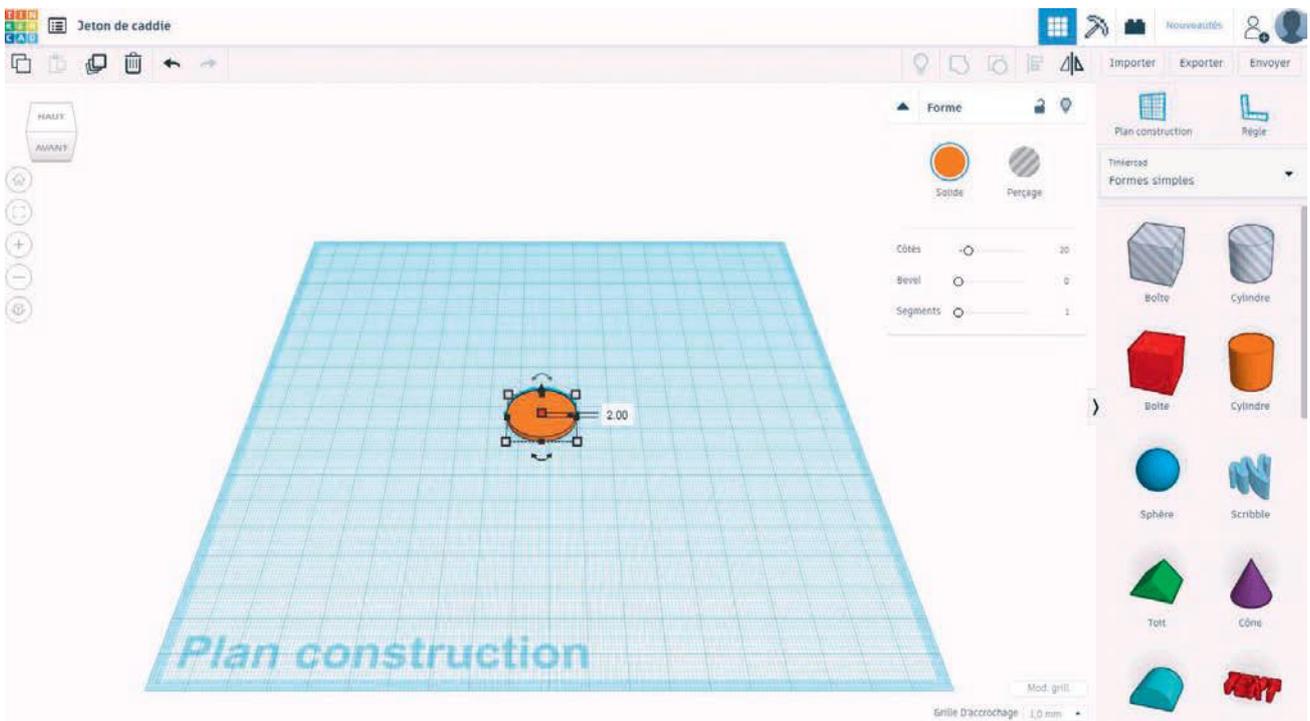


Figure 16 : Projet « Jeton de caddie » - Préparation finale de la pièce (définition de la hauteur)

Le jeton a une hauteur de 2,14 mm. La préparation de la pièce est maintenant terminée.

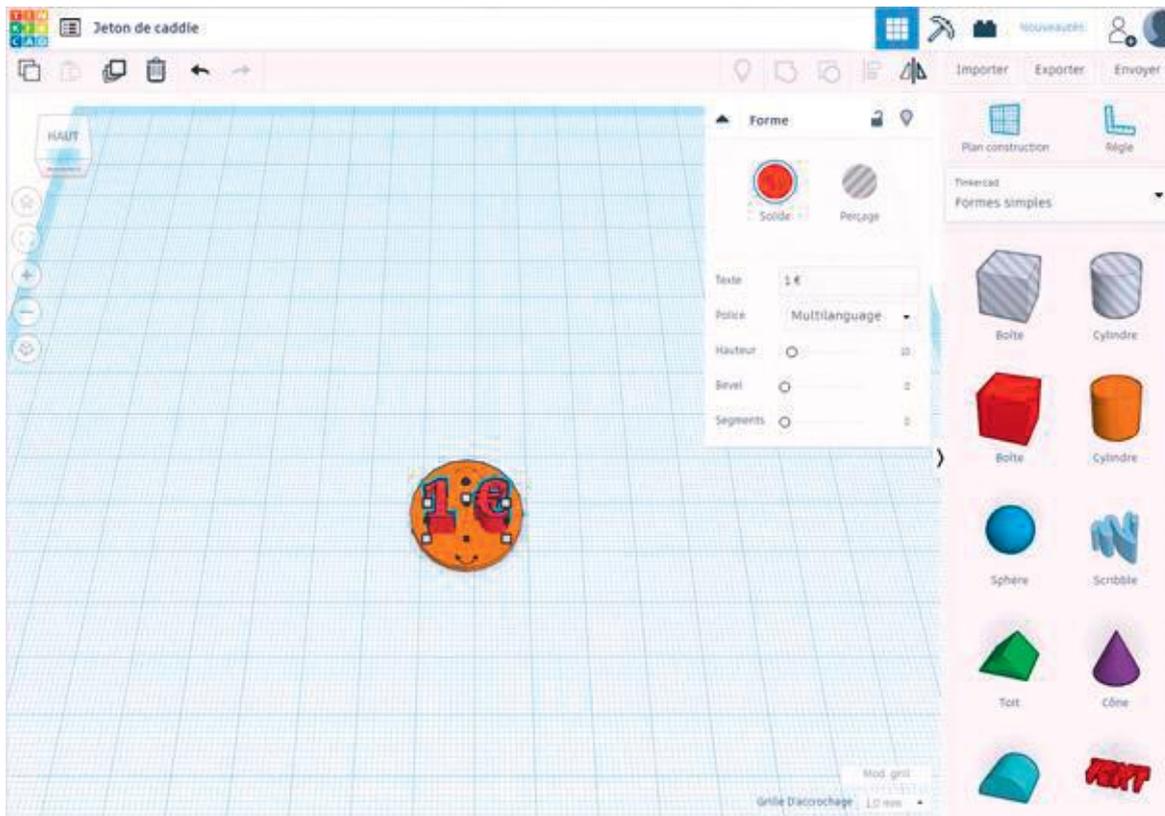


Figure 17 : Projet « Jeton de caddie » - Personnalisation (texte)

Il est possible si on le souhaite d'ajouter une inscription sur le jeton (ici, l'inscription « 1€ » est « estampée » sur la pièce).

Nous commençons par cliquer sur le symbole TEXT dans la colonne de droite, puis nous saisissons le texte à graver (dans notre exemple, « 1€ »). Les textes longs ne conviennent pas, car la taille restreinte de la surface d'impression ne permet pas de reproduire les petits détails comme dans le cas d'une impression papier.



REMARQUE : La buse d'impression a un diamètre de 0,4 mm, les structures plus petites sont techniquement impossibles.

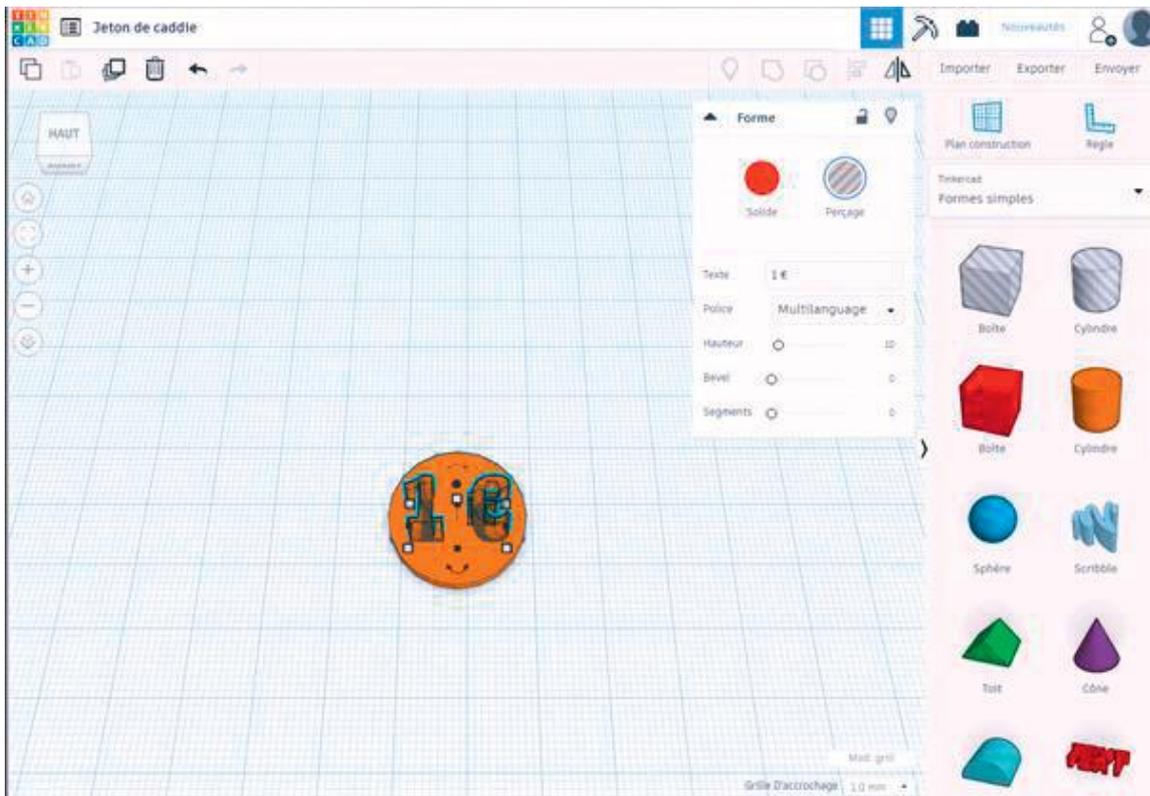


Figure 18 : Projet « Jeton de caddie » - Positionnement du texte à estamper

Nous positionnons et dimensionnons le texte sur le disque, puis nous modifions la forme (de « solide » à « perçage »).

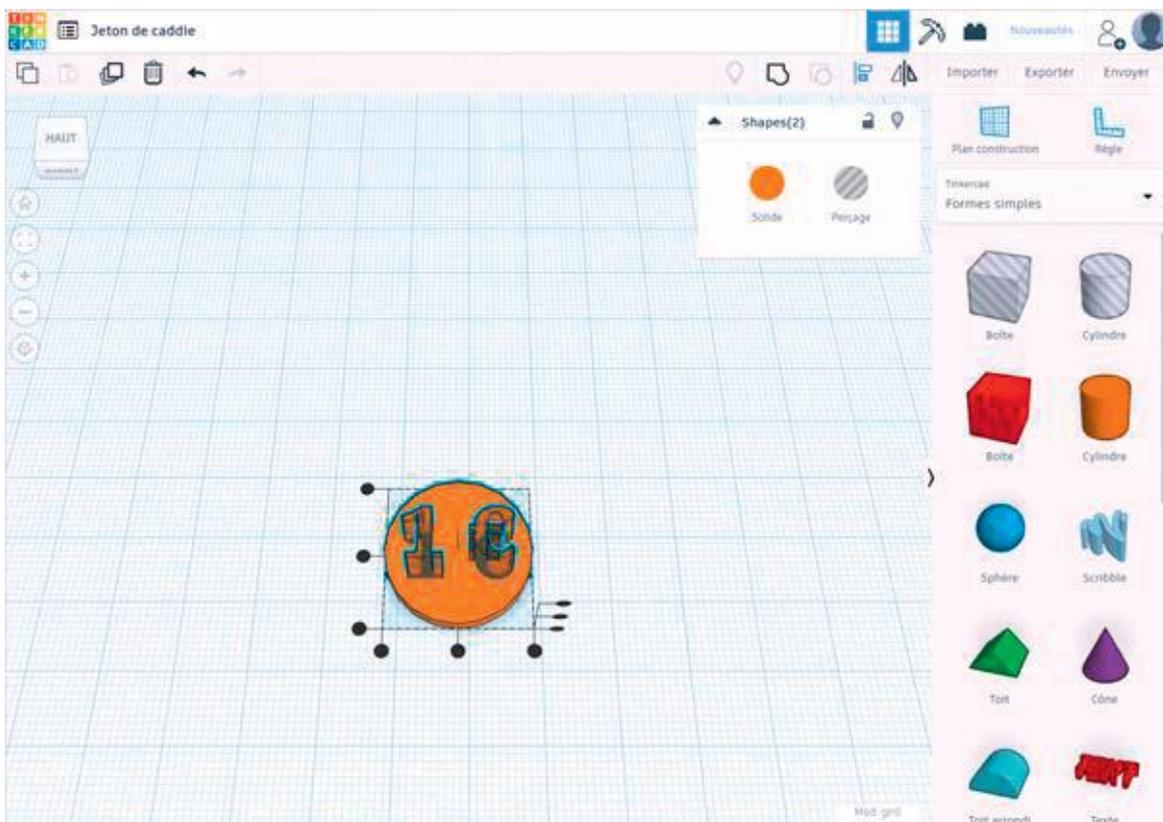


Figure 19 : Projet « Jeton de caddie » - Aligement des différents éléments

Au cours de l'étape suivante, nous sélectionnons les deux éléments puis nous cliquons sur le symbole « Aligner » : les éléments sont alors parfaitement ajustés. Un clic sur le symbole « Grouper » permet de séparer le texte du jeton.

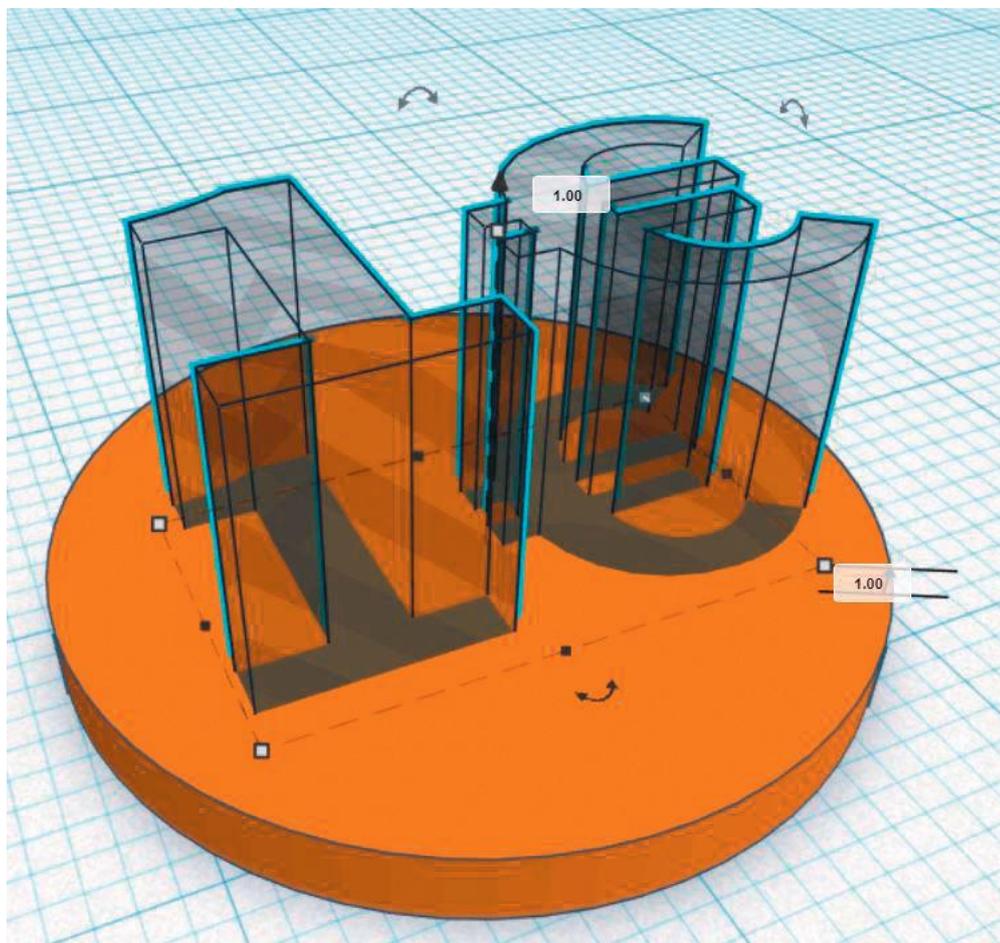


Figure 20 : Projet « Jeton de caddie » - Vue détaillée de la découpe (perçage)



REMARQUE : : Pour obtenir un estampage sur le jeton, ajouter 1 mm à la forme avant le groupage.

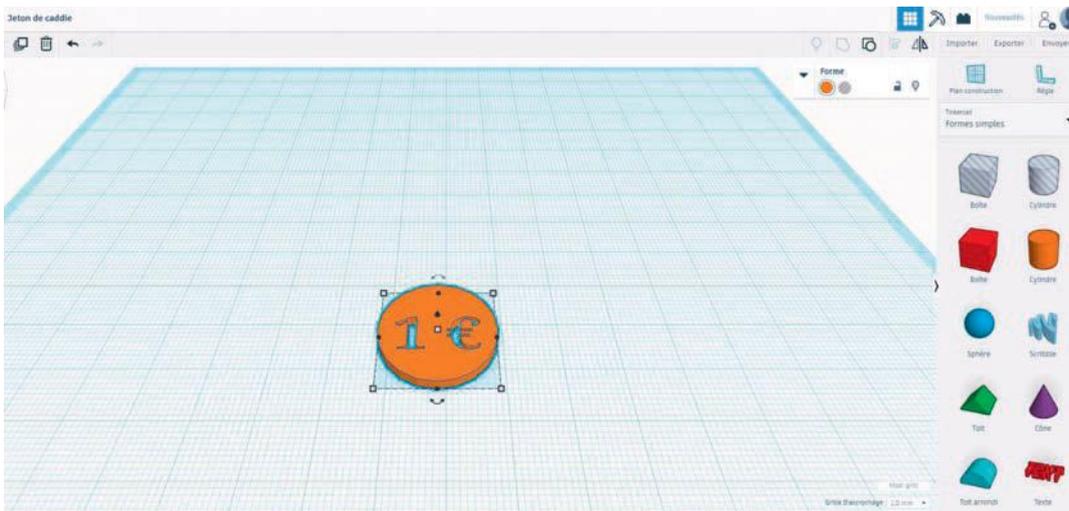


Figure 21 : Projet « Jeton de caddie » - Projet terminé, prêt à être exporté

C'est terminé ! Un clic sur le bouton « Exporter » permet de générer un fichier STL et de le télécharger dans le logiciel de tranchage de l'imprimante 3D (voir paragraphe 3.2 : tranchage).

3.1.1.2 Construction d'un objet simple à l'aide d'un programme de CAO (dans l'exemple, un camion avec charnière)

Les explications qui suivent permettent de fabriquer facilement une charnière. L'exemple du camion permet de comprendre les fonctions de base.

Dans cet exemple, nous utilisons le logiciel « Fusion 360 » d'Autodesk. Ce projet court n'a pas pour but de se familiariser avec le logiciel mais de montrer la différence entre un programme de modélisation comme Tinkercad et un programme de CAO paramétrique comme Fusion 360. Fusion 360 est disponible gratuitement pendant trois ans pour les élèves, les étudiants, les enseignants et les formateurs. (Les conditions de licence actuellement en vigueur figurent sur le site du fabricant).

<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/students-teachers-educators>

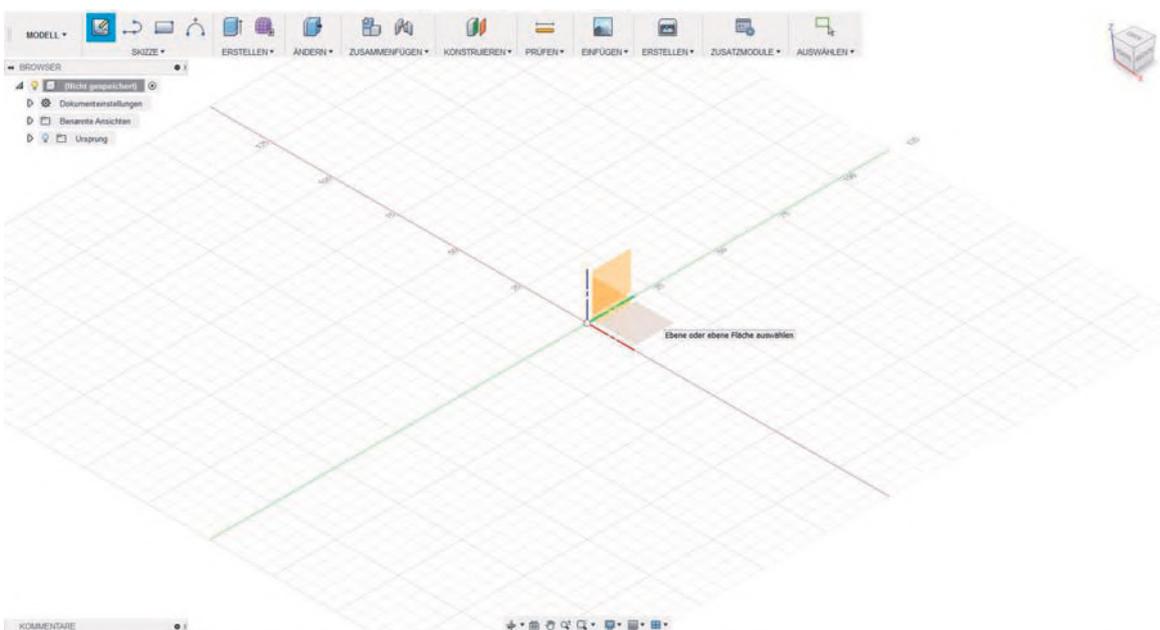


Figure 22 : Projet « Camion avec charnière » - Zone de travail de Fusion 360

Nous démarrons un nouveau projet. Autodesk Fusion travaille avec des dessins appelés « croquis », ce qui facilite la modification des cotes et des étapes de travail.

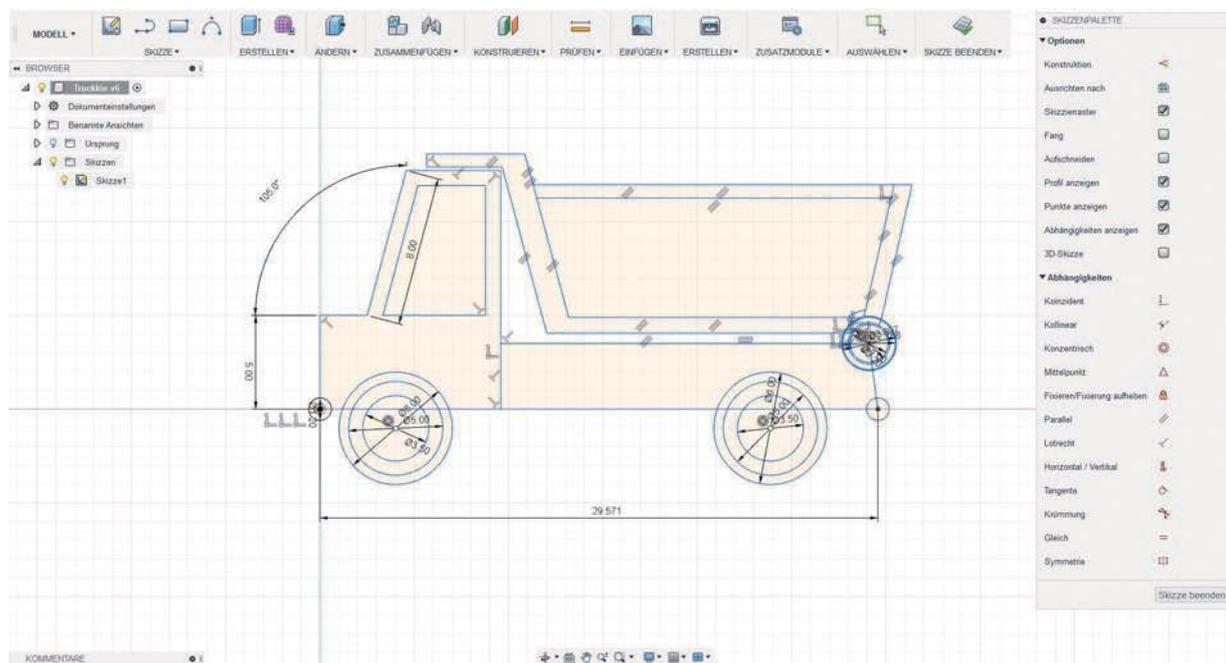


Figure 23 : Projet « Camion avec charnière » - Premier croquis avec cotes

Nous démarrons par le premier croquis.



REMARQUE : Lorsqu'on cote ses croquis dans Fusion 360, il est plus facile de les modifier par la suite.

La pièce essentielle est bien sûr la charnière entre le camion et la surface de chargement. Une charnière se compose en général de trois éléments : une bande droite, une bande gauche, et un pivot ou un boulon, qui maintient ces deux bandes ensemble. Dans notre exemple, le boulon fait partie de la surface de chargement. La surface de chargement et le camion sont deux éléments distincts qui fonctionnent ensemble dans la mesure où ils sont pressés l'un contre l'autre. Il s'agit d'un exemple pratique d'applications pouvant être réalisées avec uniquement un procédé de fabrication additive.

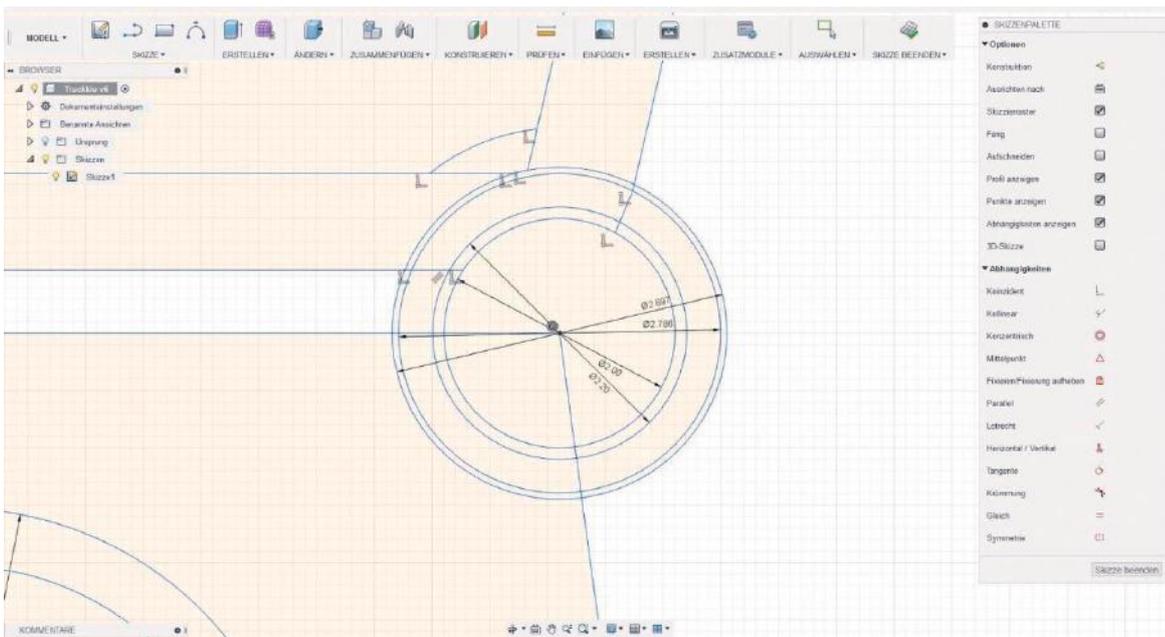


Figure 24 : Projet « Camion avec charnière » - Fabrication de la charnière

Pour créer notre charnière, nous devons déterminer les points suivants :

- le boulon (à la verticale)
- l'espace entre le boulon et la charnière
- la charnière et son épaisseur
- l'espace entre la charnière et les surfaces de chargement

L'espace entre le boulon et la charnière doit être compris entre 0,1 et 0,2 mm. Si cet espace est trop grand, le jeu est trop important. Si cet espace est trop faible, les éléments risquent de frotter les uns contre les autres et de fondre. Cette valeur dépend de l'appareil et des paramètres d'impression. Il existe sur Internet des banques de données permettant de déterminer la valeur optimale.

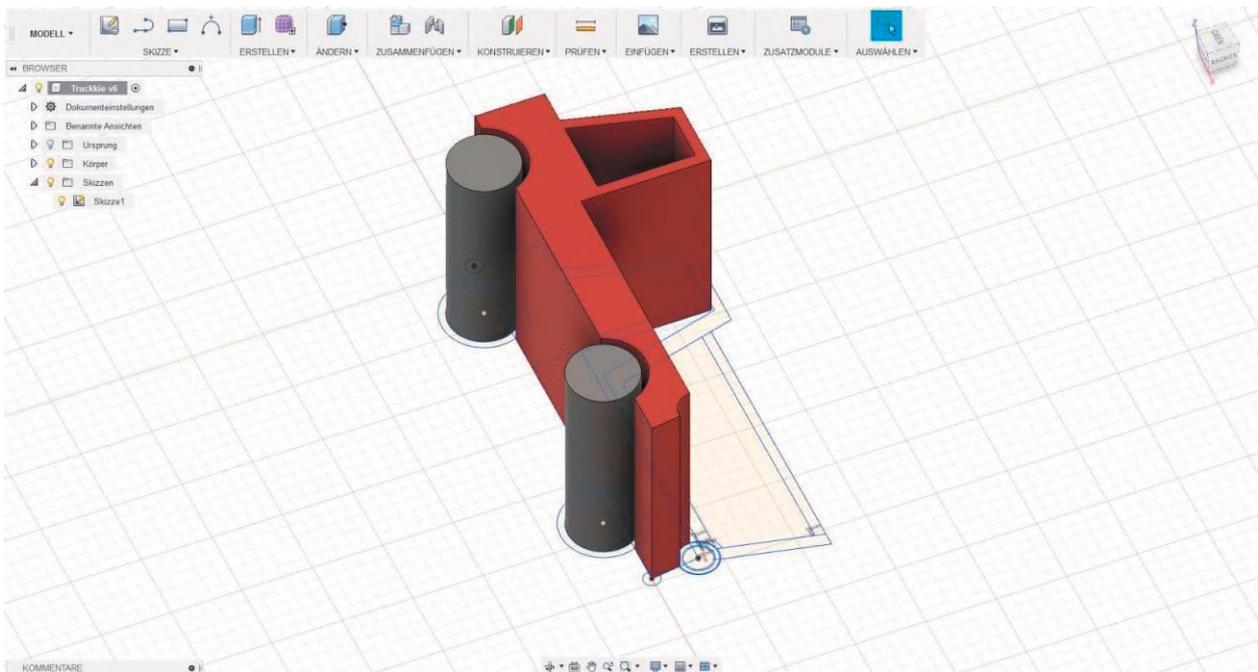


Figure 25 : Projet « Camion avec charnière » - Extrusion des premières surfaces

Une fois que les premiers croquis sont terminés, nous pouvons commencer à donner aux surfaces la hauteur souhaitée.

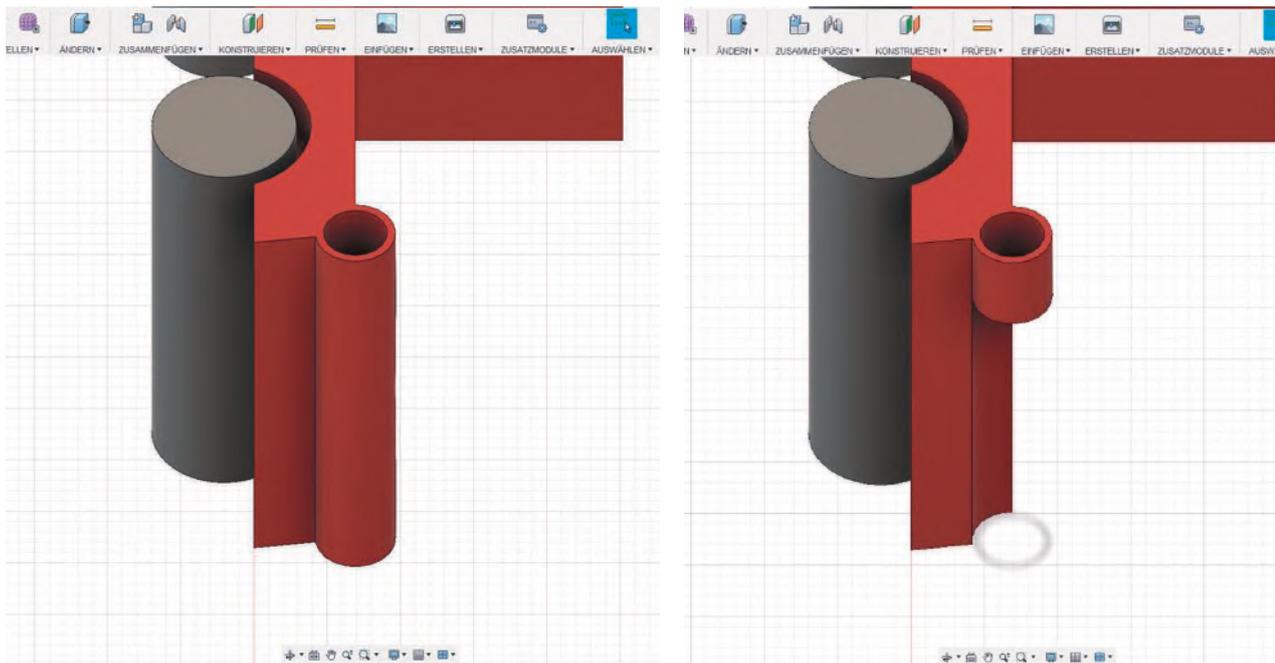


Figure 26 : Projet « Camion avec charnière » - Extrusion et découpe des solides

Il est maintenant possible de passer en trois dimensions les surfaces séparées et fermées de notre croquis. Comme cette extrusion tient compte des dimensions, il est possible de travailler avec une grande précision.

Le procédé permettant d'extruder des solides peut également être utilisé pour les découper. Ainsi, il est possible de définir notre charnière de haut en bas. Si on souhaite changer a posteriori une cote ou une valeur, on peut utiliser sur Fusion 360 la fonction Timeline (en bas de l'écran) pour modifier toutes les étapes.

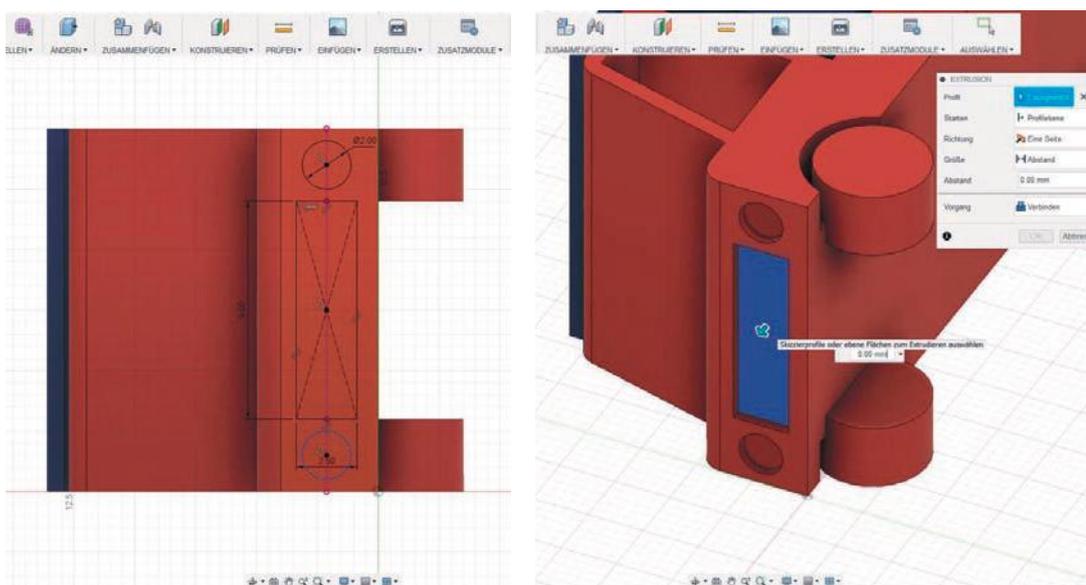


Figure 27 : Projet « Camion avec charnière » - Réalisation d'un nouveau croquis sur un solide

Il est possible de réaliser un nouveau croquis, par exemple de la calandre du camion, de la même manière que le premier croquis. Cela offre deux avantages : il est possible de créer un projet composé de plusieurs croquis, et il est plus facile d'effectuer des modifications après coup. Cette fonction est particulièrement intéressante pour la création d'éléments complexes.

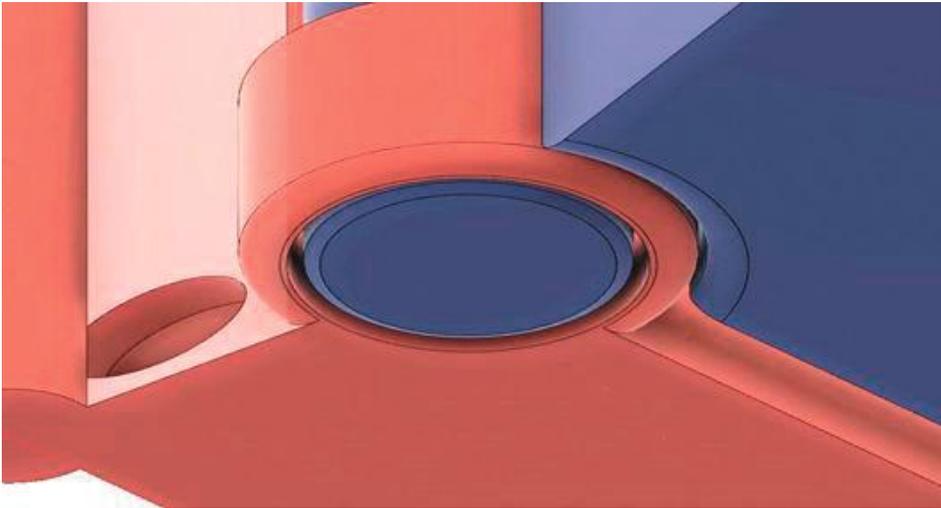


Figure 28 : Projet « Camion avec charnière »



REMARQUE : Comme il s'agit d'un modèle destiné à une impression en 3D, il est recommandé d'arrondir les arêtes de la charnière en contact avec le plateau d'impression, afin d'éviter que les différents éléments de la «première couche» ne fondent.

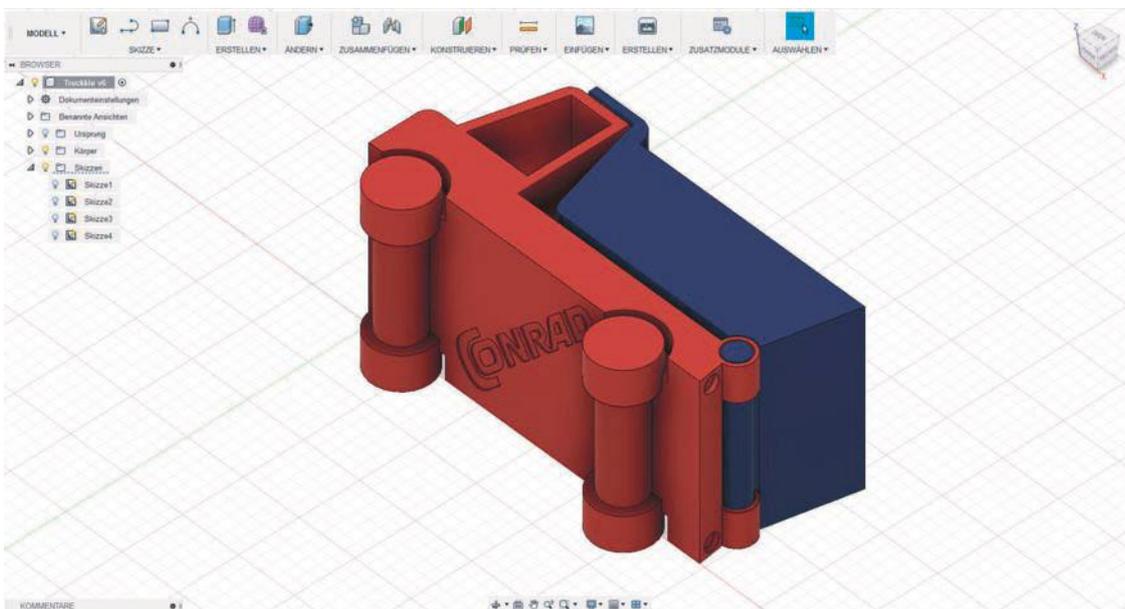


Figure 29 : Projet « Camion avec charnière » - Construction terminée, prête à être exportée

C'est maintenant terminé ! Comme le camion et la surface de chargement sont deux éléments distincts, il est possible de les imprimer avec des couleurs (ou matériaux) différents à l'aide d'une imprimante 3D disposant de deux extrudeuses. On peut par exemple fabriquer le camion dans un matériau robuste qui brille dans l'obscurité, et la surface de chargement dans un matériau qui change de couleur en fonction du rayonnement UV.

3.1.2 Programmation d'un modèle

En plus de la méthode paramétrique professionnelle, il est possible pour créer les éléments en 3D d'utiliser une technique basée sur les langages de programmation (à base de blocs et sous forme de textes).

Cette programmation est basée sur le principe de la « géométrie de construction de solides » (Constructive Solid Geometry, CSG) : des formes géométriques simples (cube, cylindre, sphère...) sont placées à des emplacements définis par leurs coordonnées spatiales, et les relations booléennes entre elles sont définies (ajout, suppression, volume d'ensemble, exclusions respectives). Contrairement à l'exemple présenté plus haut (jeton de caddie), toutes les caractéristiques sont ici définies numériquement. Il est judicieux de définir ces paramètres au début du programme (dans les variables). Ces paramètres peuvent être adaptés si vous souhaitez modifier la construction ; toute modification du code de programmation modifie le modèle 3D. Ainsi, il est possible d'obtenir des définitions facilement adaptables de constructions complexes : roues dentées, boîtiers, etc.

Dans l'exercice suivant, il s'agit de fabriquer un dé à jouer à l'aide d'un outil de programmation graphique disponible en ligne ; les points figurant sur chaque face doivent apparaître sous la forme de petits creux.

Il est judicieux de déterminer au préalable les coordonnées des points du dé (en deux dimensions dans un premier temps), afin que les creux correspondants soient créés sur la face du dé.

Consigne pour les élèves :

Détermine les coordonnées des points du dé en 2D

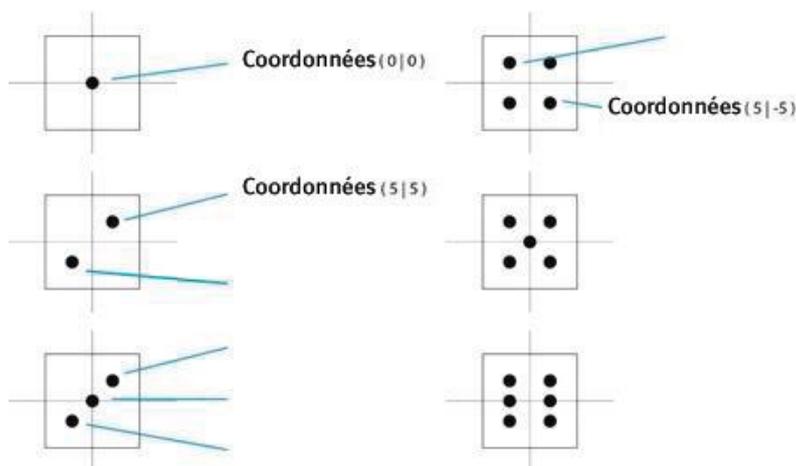


Figure 30 : Fiche de travail - Calcul des coordonnées des points du dé dans un système de coordonnées 2D



REMARQUE : Les points sont réalisés avec des sphères de rayon 3 mm qui « s'enfoncent » légèrement dans le dé et sont ensuite retirées de celui-ci.

- Corps du dé : volume global du dé (3 x 3 x 3 cm) et de la bille ($r = 2,2$ cm), centré dans le système de coordonnées. Position sur l'axe Z à 1,7 cm
- Les points des faces 3 et 4 doivent subir une rotation autour de l'axe X (à 90° et 270°)
- Les points des faces 2 et 5 doivent également subir une rotation autour de l'axe X (à 90° pour les deux faces) et de l'axe Z (les points de la face 2 à 90° , ceux de la face 5 à 270°).

La programmation s'effectue sur le site <https://www.blockscad3d.com> (accès gratuit pour les particuliers).



Figure 31 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » - Création du dé (cube de 3 cm de côté).

La première étape consiste à créer un cube de 3 cm de côté, qui est placé automatiquement au centre du système de coordonnées. Un clic sur le bouton « Générer un rendu » permet de le visualiser.



REMARQUE : La couleur de la commande dans la zone de travail est la même que celle du bouton de commande situé dans la colonne de gauche. Ainsi, la commande « cube » (vert foncé) a été générée après un clic sur « formes 3D ».



Figure 32 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » - Positionnement du cube et de la sphère

Pour arrondir les angles, créez une sphère d'un rayon de 22 ou 23 mm.



Figure 33 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » - Fusion du cube et de la sphère

La commande « Opérations » permet de réunir les deux formes. Choisissez la commande « Intersection » (dans « Opérations ») pour fusionner le cube et la sphère.

La forme de base du cube est maintenant créée. Pour des résultats rapides, il est possible d'exporter directement le fichier dès à présent (pour cela, cliquez sur « Générer STL »). Il faudra alors peindre les points du directement sur le dé à l'aide d'un feutre. L'intérêt de la programmation cependant réside justement dans le fait de pouvoir créer directement ces points, sous la forme de petits creux :

Pour cela, on utilise des sphères d'un rayon de 3 mm qui sont légèrement enfoncées dans le corps de base, puis retirées de celui-ci au cours d'une étape ultérieure.

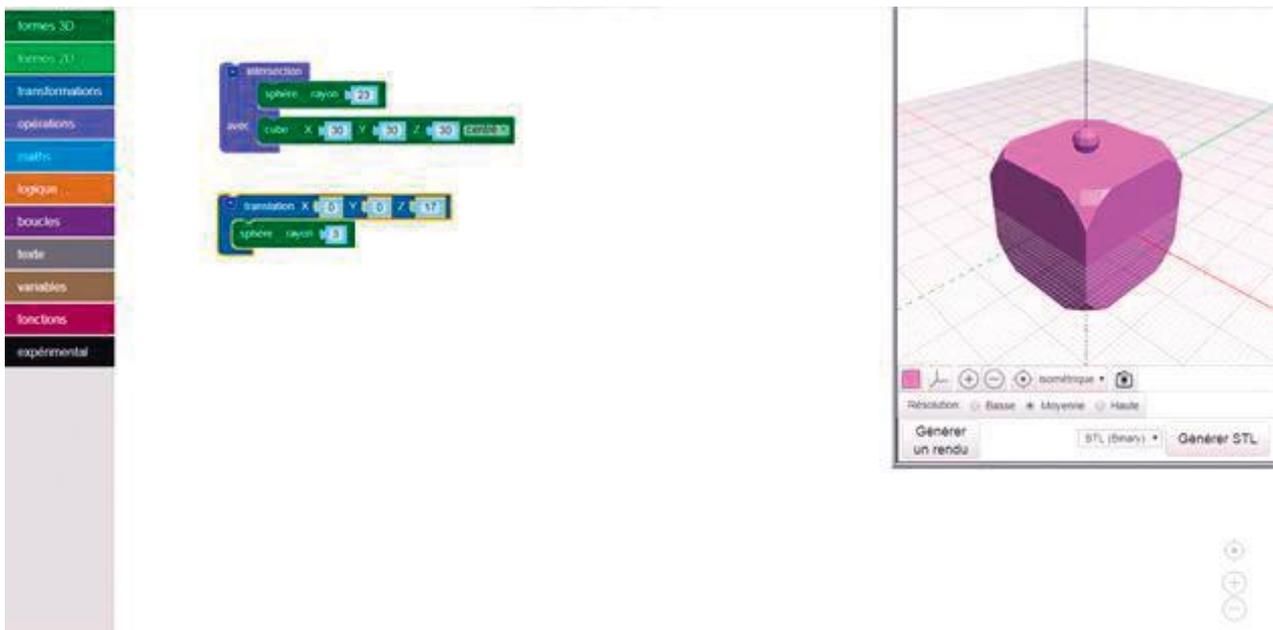


Figure 34 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » - Positionnement des sphères pour former les points

Pour placer les sphères qui serviront à former les points du dé, utiliser la commande « Translation » (changement de position relative) dans le champ « Transformations ». Jusqu'ici, nous avons positionné les objets par rapport à l'origine du repère de coordonnées 3D.

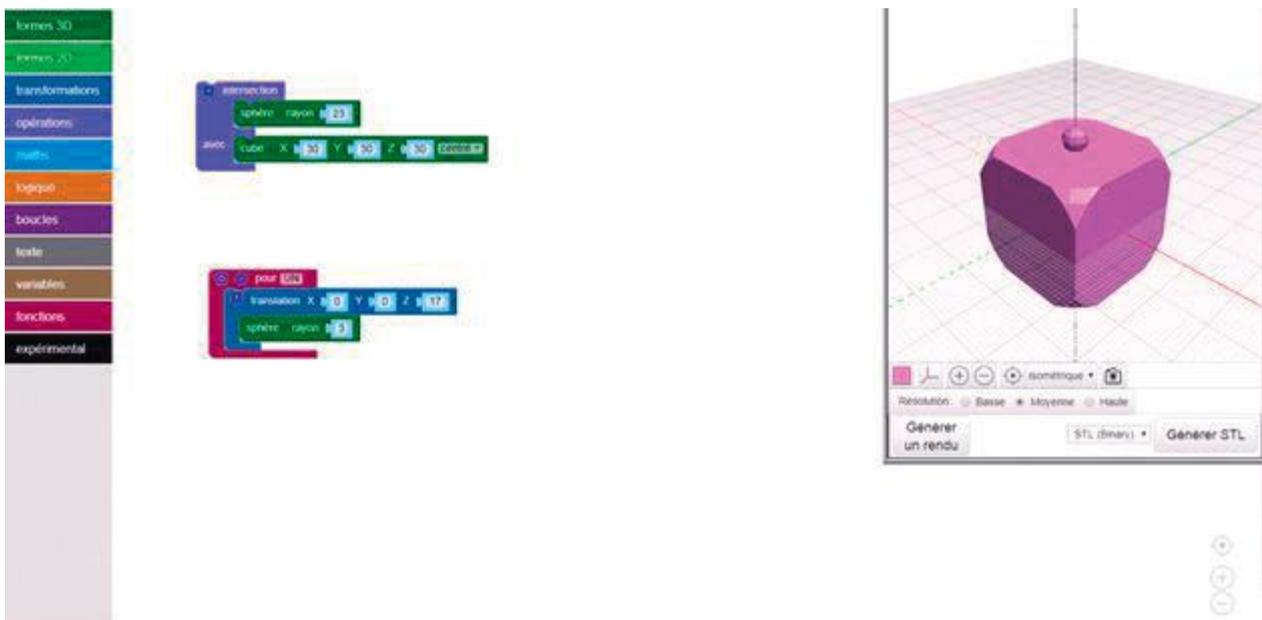


Figure 35 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » -Utilisation de modules pour les points du dé

Des modules permettent de rassembler plusieurs commandes afin que le programme principal soit mieux articulé et plus lisible. Au cours de cette étape, les deux commandes (création et positionnement des sphères) sont rassemblées dans le module nommé « un ».

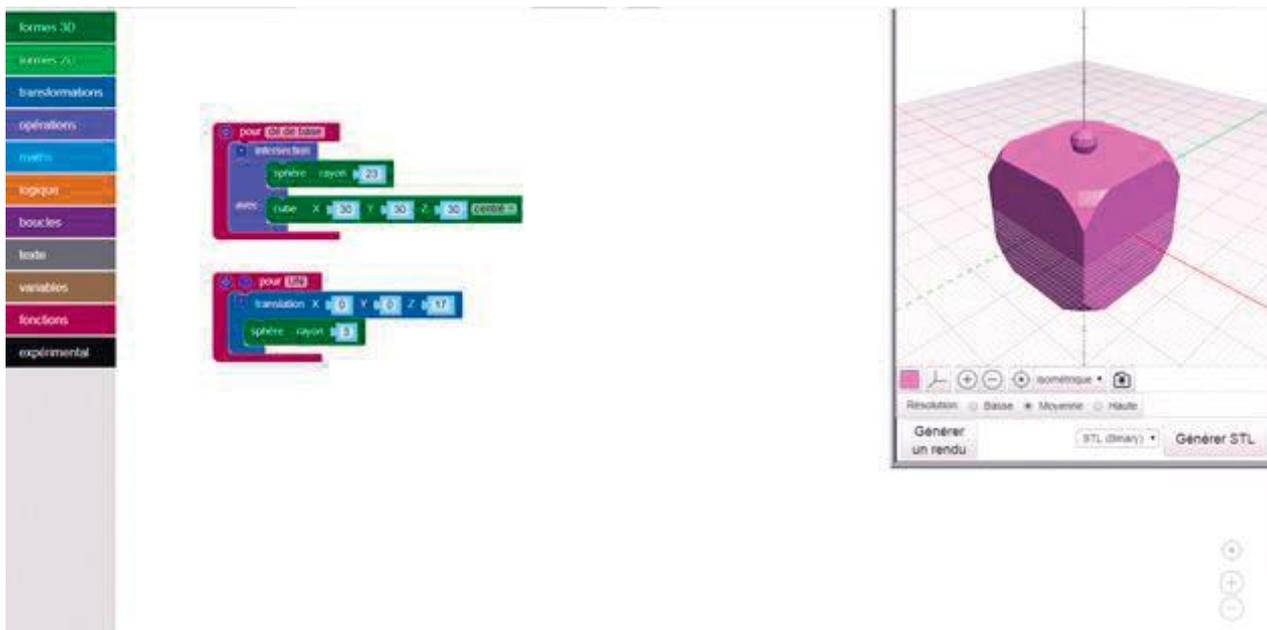


Figure 36 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » - Définition de la forme de base du dé en tant que module

La forme de base du dé avec coins arrondis est également défini sous forme de module, intitulé « dé de base ».

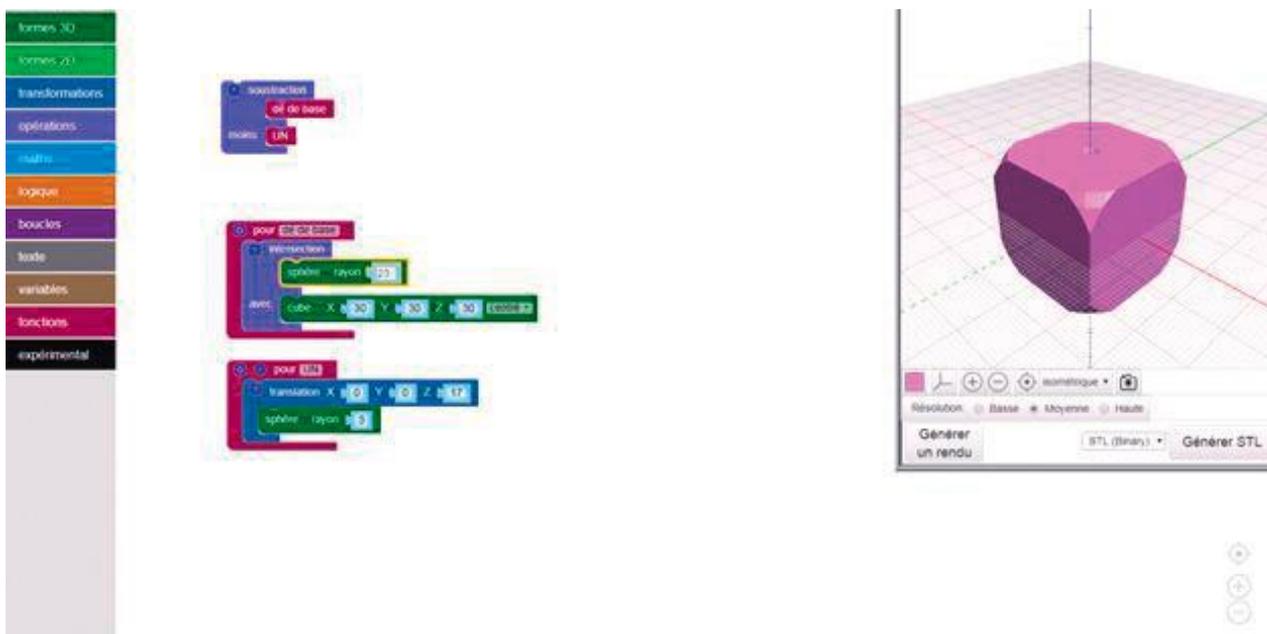


Figure 37 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » - Le point de la face « un » est la différence des deux modules

Il faut maintenant supprimer les sphères de la forme de base ; les creux correspondant aux points du dé apparaîtront alors.

Tous les autres points doivent être créés à l'aide des modules et retirés de la forme de base. Attention : la somme des points situés sur deux faces situées en vis-à-vis est toujours égale à 7.

Il existe deux façons de procéder :

- Les coordonnées peuvent être saisies dans le module correspondant, à partir de la face 6 points, et adaptées à chaque fois.
- Le nombre de points est programmé sous forme de module (identique au module « UN »), et le corps de base effectue des rotations pour que le nombre de points sur chaque face soit correct.



Figure 38 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » - Création du module pour la face à six points

Méthode a) : création de la face à 6 points grâce à la saisie directe des coordonnées (z = -17).

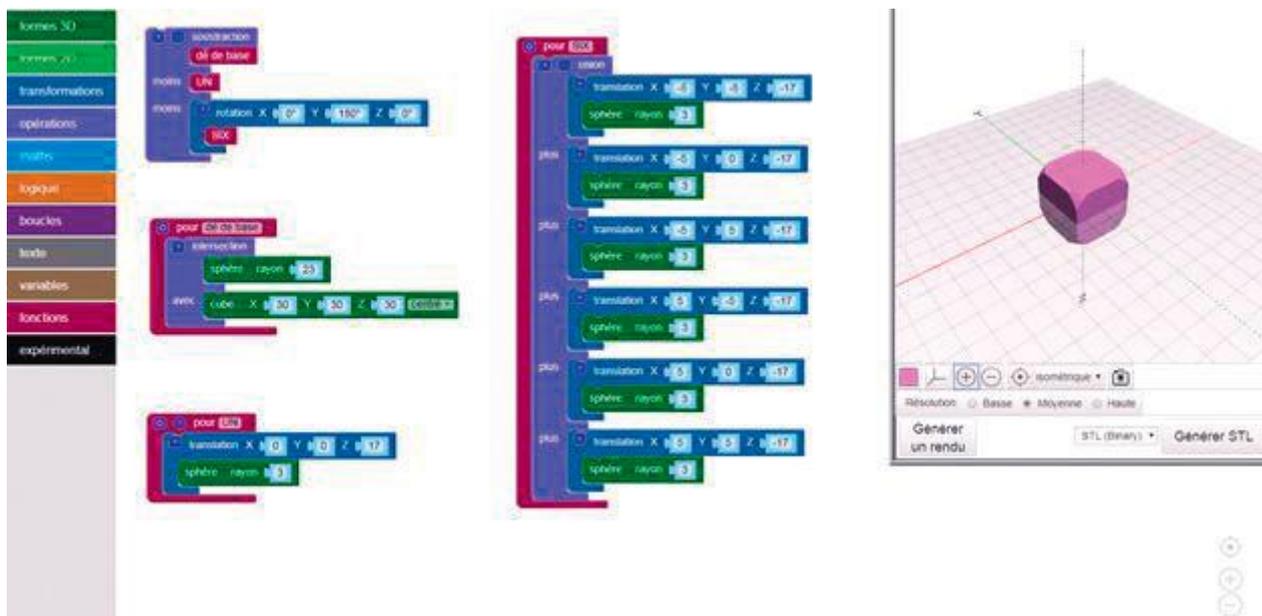


Figure 39 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » - Soustraction des six points après rotation

Méthode b) : création de la face à six points par rotation et saisie des coordonnées comme pour la face à un point (z = 17, rotation à 180°)

L'illustration suivante montre le dé avec tous les points, placés selon la méthode b).

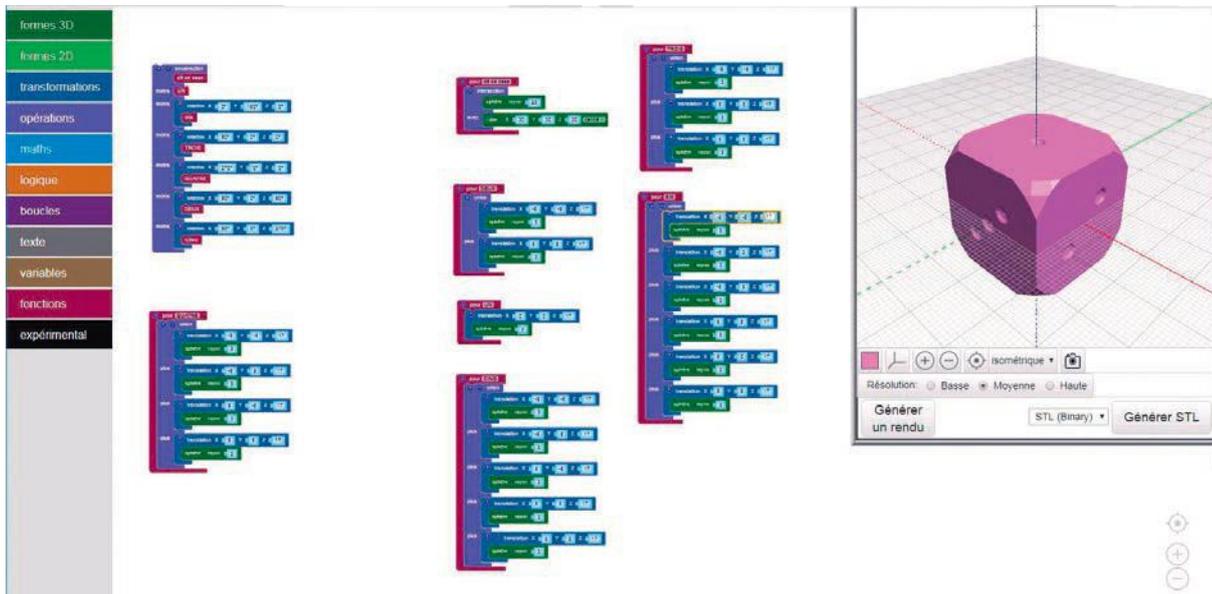


Figure 40 : Projet « Programmation d'un dé à jouer » - Programmation terminée

Les rotations des modules sont également affichées. Cliquez sur « Générer un rendu » pour que le modèle en 3D puisse être exporté pour l'impression. L'impression s'effectue couche par couche. La face posée sur le plateau d'impression possède des petits creux représentant les points et peut dans certains cas présenter des défauts.

Pour les élèves ayant acquis un niveau de compétence moyen dans ce domaine, nous recommandons de démarrer l'apprentissage d'un éditeur de commande OpenSCAD. Ce logiciel est disponible gratuitement pour Linux/Unix, Windows et Apple Mac OS X à l'adresse <http://www.openscad.org/>.

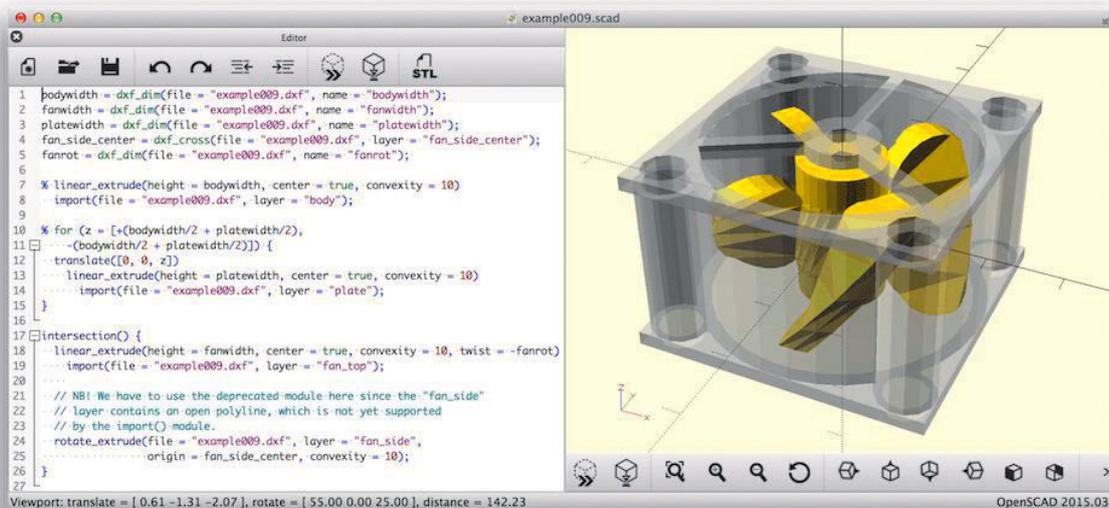


Figure 41 : Programmation d'objets en 3D avec OpenSCAD

L'idée de base de ce logiciel est simple et le jeu d'instructions est très facile à gérer.

Pourquoi continuer à utiliser de nos jours un logiciel à base de lignes de commande ? Parce qu'il permet de comprendre facilement comment créer un objet, et parce qu'il est possible de créer un objet avec une seule commande.

Exemple : `cube([2,3,4]);` permet de définir un pavé

Cette simplicité permet de motiver les élèves les moins à l'aise avec la programmation. Le compilateur 3D offre une représentation de l'objet à l'écran. Les dimensions sont saisies de manière numérique en mm, ce qui peut constituer un grand avantage. Les objets peuvent être définis aisément et les exports sous la forme de fichiers STL sont facile. Des forums et des tutos favorisent les échanges et les interactions. Il existe toute une série de logiciels fonctionnant sur le même principe et inspirés de OpenSCAD, parce que le code source est également accessible librement : Libre3D, RapCAD, CubeHero, CoffeeSCAD, etc.



REMARQUE : Utilisez le dé fabriqué pour réaliser des expériences aléatoires en mathématiques : proposez aux élèves de créer à l'intérieur du dé un « creux » qui ne soit plus visible après l'impression ; le dé serait alors déséquilibré et cette nouvelle répartition du poids favoriserait le tirage de certains chiffres... Qui parviendra à « piper » le dé d'une manière tellement subtile qu'on ne remarquerait pas tout de suite la supercherie ? (on ne prendra pas en compte ici la répartition inégale des masses provoquée par les creux des points du dé).

3.1.3 Création d'un modèle par numérisation



Figure 42 : Scan 3D avec lumière structurée. Le relief de l'objet provoque des déformations des lignes.

Un scanner 3D et une imprimante 3D permettent de réaliser des photos 3D. Le scanner 3D génère un modèle numérique d'une grande précision et l'imprimante 3D permet une impression à l'échelle de votre choix. Les scanners 3D de petite taille sont intéressants pour les utilisateurs privés, et offrent de nombreuses possibilités de création malgré leur petite taille : ils permettent de copier précisément et d'imprimer une vis manquante, une poignée d'armoire, un verre à dents, etc. Il existe plusieurs procédés de numérisation 3D :

- par lumière structurée : éclairage avec motif en damier ou à lignes, les déformations des lignes provoquées par le relief de l'objet sont enregistrées.
- par mesure « temps de vol » (ToF = Time-of-Flight) : les mesures de distance entre les points crée une sorte de « nuage de points » indiquant la distance du capteur à l'objet.
- à l'aide de photos prises depuis différentes perspectives.

En plus du matériel adapté, il est indispensable de posséder un logiciel de numérisation (généralement fourni avec le matériel).

3.1.4 Banques de données de modèles

Les banques de données de modèles disponibles sur Internet permettent de réaliser un grand nombre de constructions en 3D. Les plus connues sont :

- www.thingiverse.com
- www.youmagine.com
- www.grabcad.com
- www.myminifactory.com

Remarque : Respectez les indications figurant sur ces sites, notamment celles qui concernent la réglementation et le droit de la propriété intellectuelle. Avant de mettre en ligne des constructions que vous avez réalisées vous-même, vérifiez que vous possédez tous les droits, et que les droits d'utilisation ont bien été transférés à la plateforme.

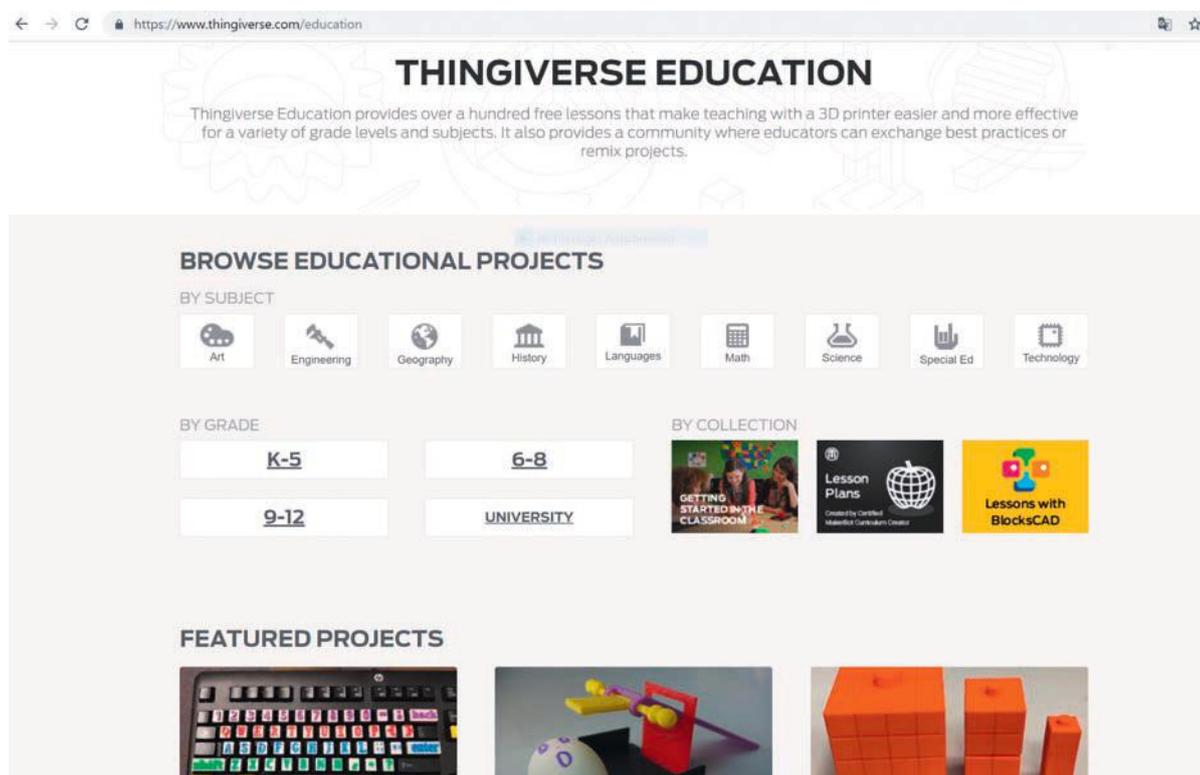


Figure 43 : Exemple d'une page du site Thingiverse

3.2 Tranchage - Préparation de l'objet pour l'imprimante

L'impression s'effectue couche par couche, et à chaque étape, le matériau est transféré à l'endroit nécessaire. Le modèle doit être préparé avant l'impression et détaillé en plusieurs couches ; le déplacement de la tête d'impression est calculé pour chacune des couches. Le découpage en tranches est également appelé « slicing » (tranchage) et les programmes correspondants, « Slicers » (logiciels de tranchage).

Nous présentons ici le programme Open-Source Cura qui peut être téléchargé gratuitement depuis le site du fabricant Ultimaker.

Installation et premières étapes :

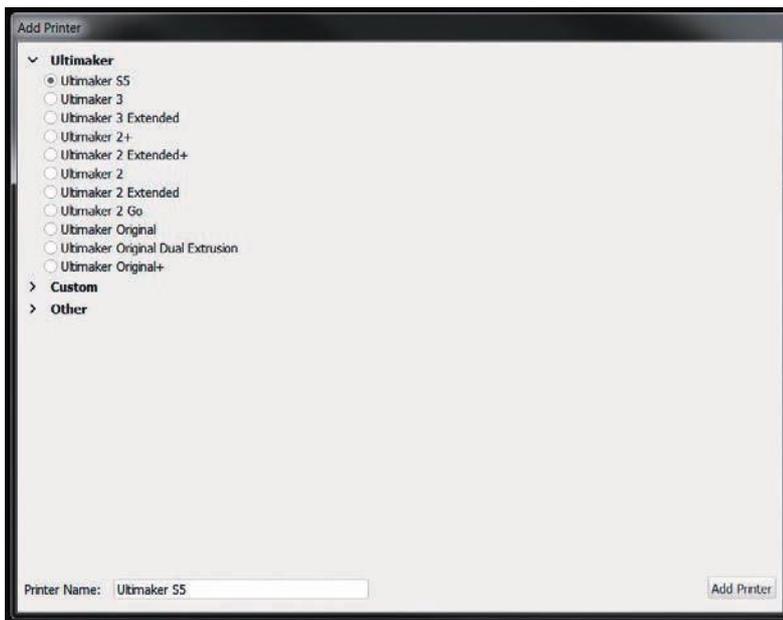


Figure 44 : Tranchage avec Cura - Ajouter une imprimante 3D

Après l'installation, Cura vous demande de sélectionner une imprimante. Vous pouvez choisir un appareil de la famille Ultimaker, par exemple le Ultimaker 3. La configuration est alors terminée pour cette imprimante.

Dans l'exemple ci-après, la préparation de l'objet à imprimer et l'impression sont réalisées avec une imprimante 3D Renkforce RF100 v2. Vous pouvez bien sûr sélectionner dans CURA votre propre imprimante. Vous pouvez préparer pour l'impression sur cette imprimante le jeton de caddie présenté dans le paragraphe 1.1.

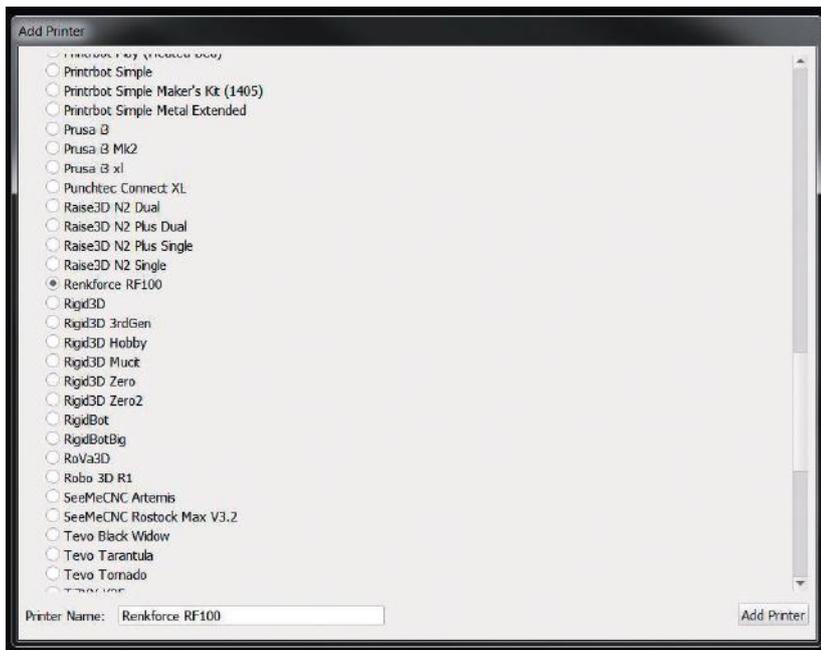


Figure 45 : Tranchage avec Cura - Choix de l'imprimante 3D

Dans notre exemple, nous sélectionnons l'imprimante Renkforce RF100 v2 dans la rubrique « Others ».

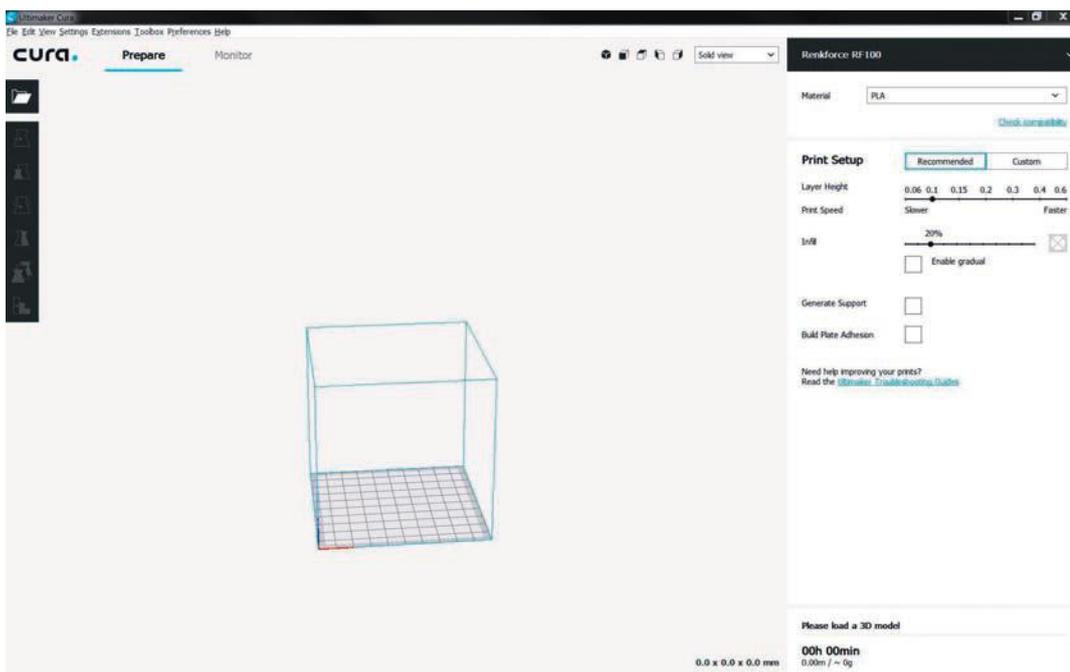


Figure 46 : Tranchage avec Cura - Fenêtre principale du logiciel de tranchage

Nous sommes maintenant dans le logiciel de tranchage. L'espace de travail de l'imprimante s'affiche. Ouvrez [Préférences / Configurer Cura](#).

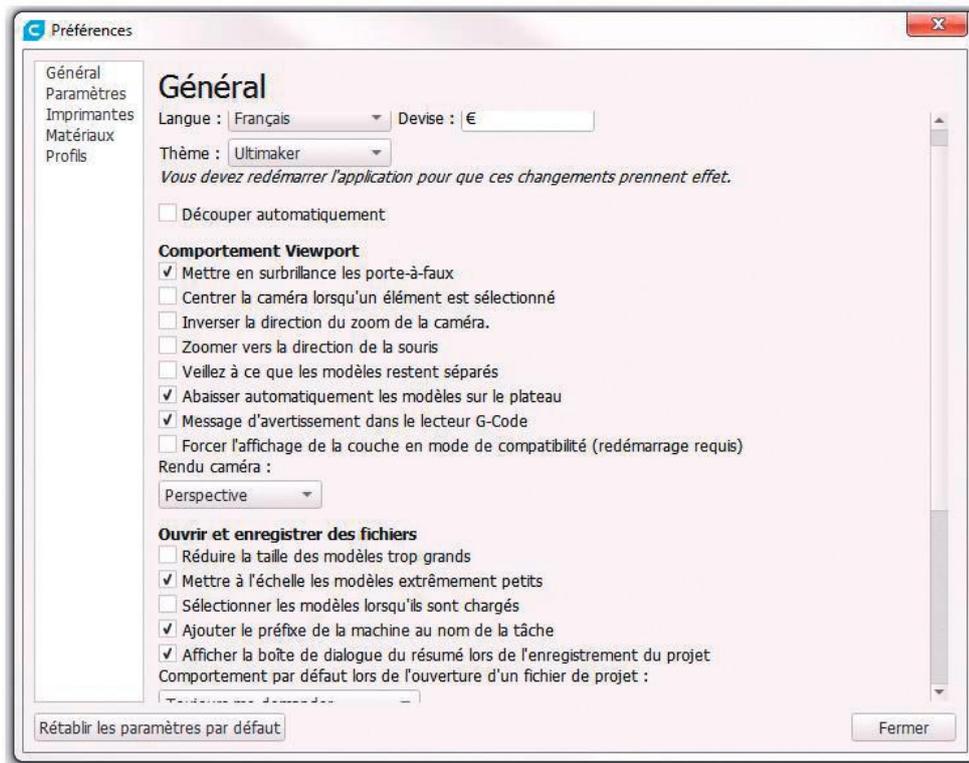


Figure 47 : Tranchage avec Cura - Paramétrage du logiciel

Il est possible de modifier la langue. Décochez la case Découper automatiquement si vous travaillez avec un PC de faible puissance afin d'éviter que Cura n'effectue automatiquement un nouveau tranchage après chaque modification de paramètre.



Figure 48 : Tranchage avec Cura - Symbole d'ouverture de l'objet en 3D

Cliquez sur le symbole du classeur blanc en haut à gauche pour charger le premier fichier STL/OBJ dans le programme.

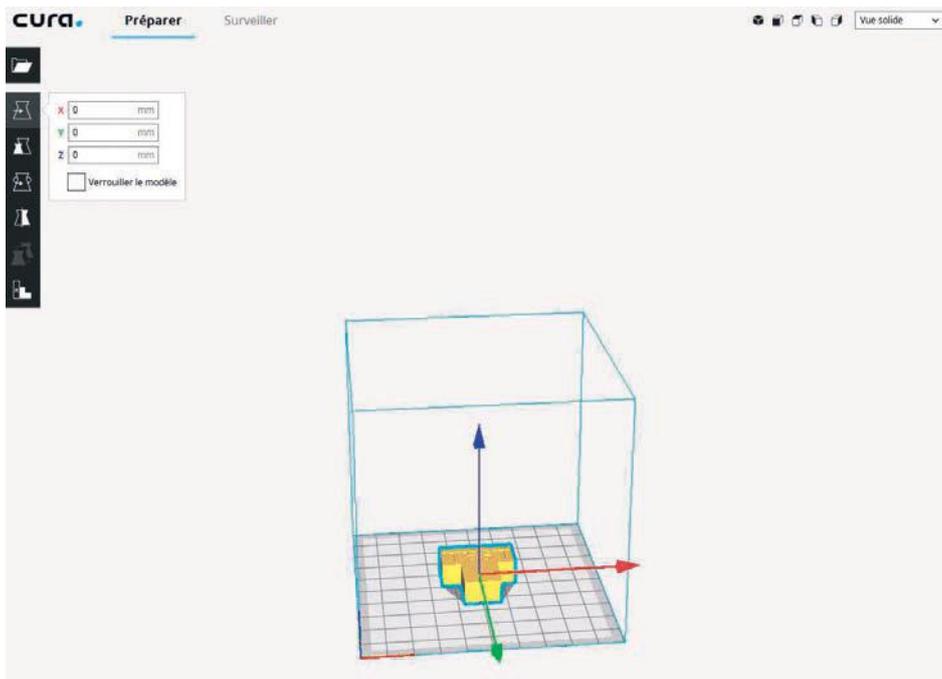


Figure 49 : Tranchage avec Cura - Aperçu de l'objet en 3D ouvert (aperçu dans l'imprimante 3 virtuelle)

Sélectionnez le fichier de votre choix et ouvrez-le pour l'intégrer dans le logiciel. Lorsqu'on effectue un clic sur l'objet ainsi inséré, les symboles de la barre d'outils de gauche deviennent actifs. Cliquez sur ces symboles pour déplacer l'objet, l'agrandir ou effectuer une rotation.



REMARQUE : lorsque vous maintenez le curseur au-dessus d'un symbole ou d'un paramètre (sans cliquer), une info-texte ou un intitulé s'affiche.

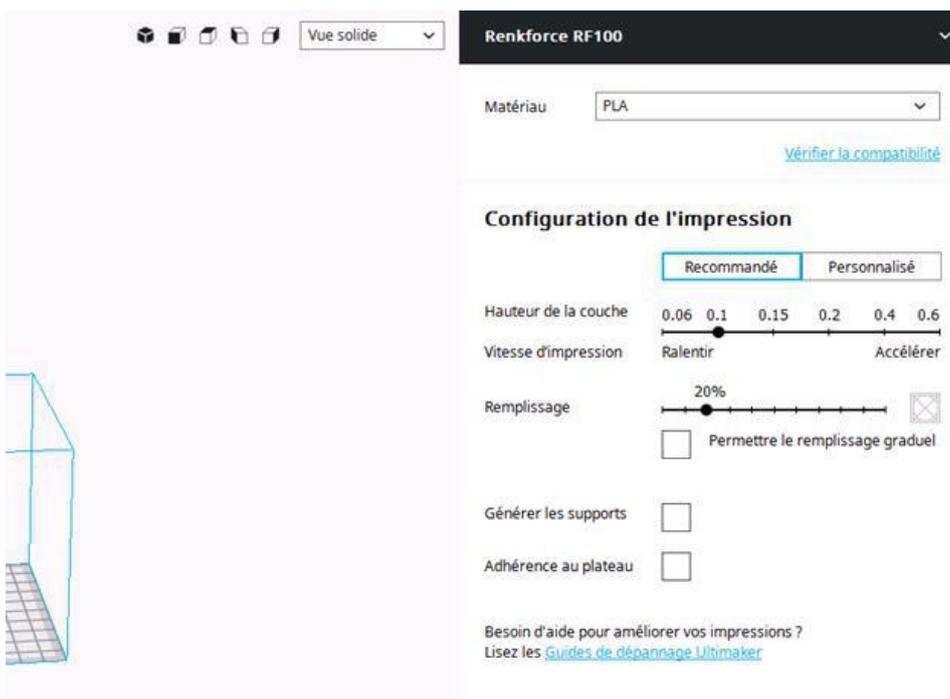


Figure 50 : Tranchage avec Cura - Modification des paramètres d'impression 3D

Les paramètres simplifiés pour l'impression apparaissent sur le côté droit.

- **Matériau.** Vérifiez que le matériau choisi est bien du PLA en cas d'utilisation de l'imprimante renkforce RF100 V2.
- **Hauteur de la couche.** Il est possible de définir ici la résolution/la finesse de l'objet à imprimer. Ce critère a un impact sur la durée d'impression essentiellement.
- **Remplissage.** Ce paramètre permet de déterminer l'épaisseur de l'objet à imprimer.
- **Permettre le remplissage graduel.** Le remplissage graduel augmente la quantité de remplissage vers le haut.
- **Générer les supports.** Les structures permettant de soutenir les pièces d'un modèle présentant des porte-à-faux sont générées. Sans ces structures, les pièces s'effondreront pendant l'impression.
- **Adhérence au plateau.** Activez l'impression d'une bordure ou plaquette (Brim/Raft). Un bord plat est ajouté tout autour ou sous l'objet ; cela facilitera sa découpe à la fin de l'impression.

Pour démarrer le tranchage, cliquez sur « Préparer ».

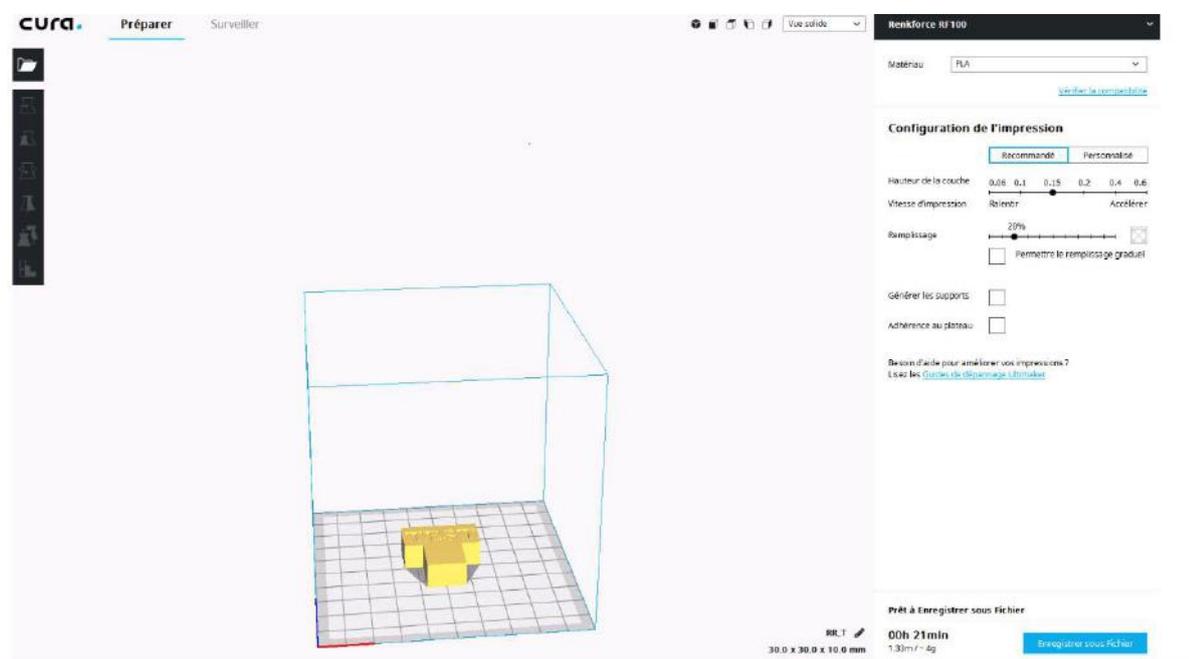


Figure 51 : Tranchage avec Cura - Modification de la résolution (hauteur de la couche), calcul de la durée d'impression et de la quantité de matériau utilisé

Une fois que le tranchage a été effectué, la durée d'impression et la quantité de matériau utilisé apparaissent en bas à droite de l'écran. Avant d'enregistrer le G-code généré sur un support de données amovible/ un disque dur, il convient de toujours le vérifier :

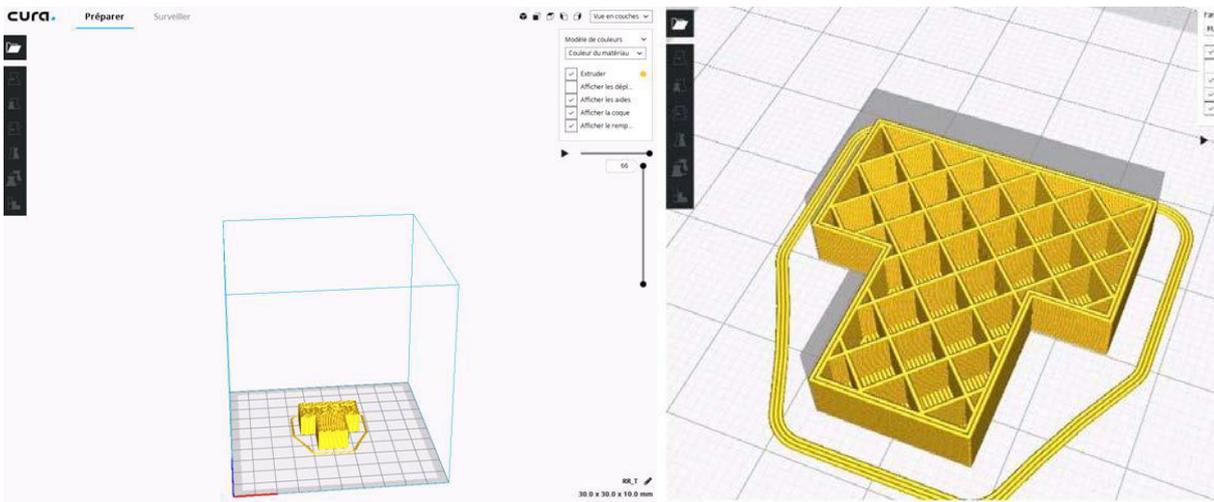


Figure 52 : Tranchage avec Cura - Vue en couches - Simulation du processus d'impression 3D avec vue détaillée

Dans la partie centrale de l'écran, en haut, modifiez le paramètre « **Vue solide** » en « **Vue en couche** ». Il est maintenant possible de vérifier le G-code, c'est-à-dire ce que l'imprimante a effectivement reçu. Si cela vous convient, vous pouvez alors enregistrer le fichier sur une carte SD et lancer l'impression (voir paragraphe 3.4).

3.3 Paramètres importants à respecter lors du tranchage : structures de soutien

Comme leur nom l'indique, les structures de soutien (en anglais Support Material) sont des structures qui soutiennent les porte-à-faux vers le bas avec un angle de 60° (en bleu clair sur l'image ci-dessous). Elles permettent à l'objet à imprimer de garder sa stabilité dimensionnelle et ses propriétés physiques.

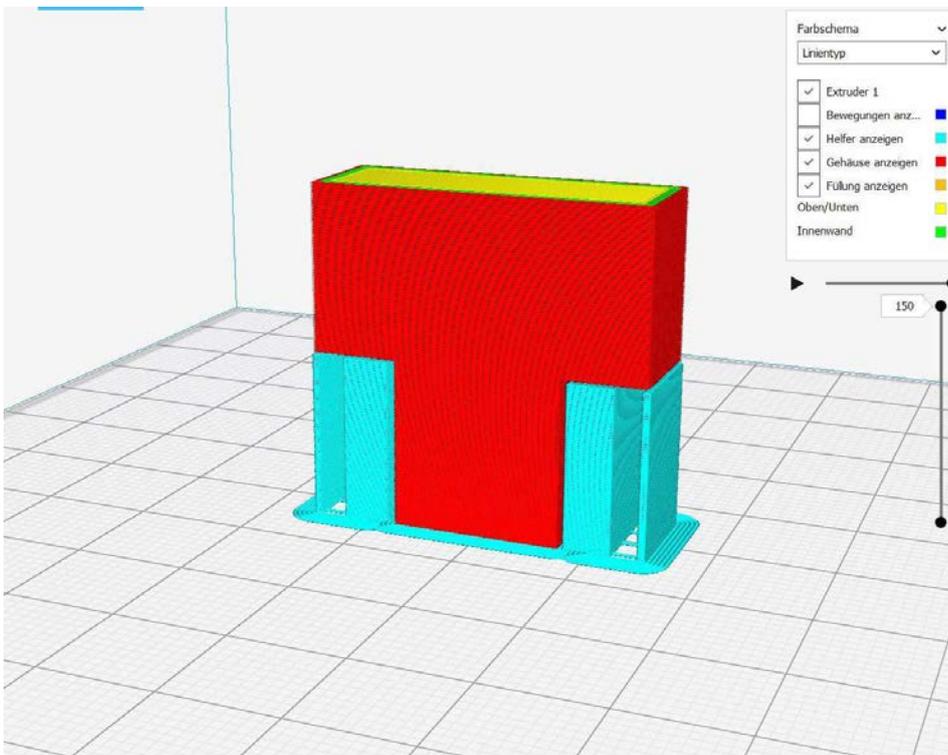
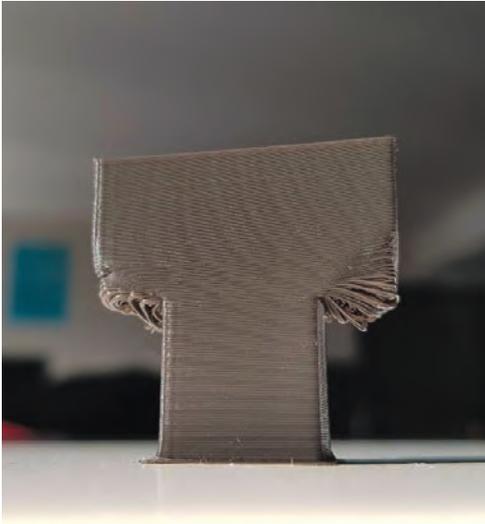


Figure 53 : Paramètres de tranchage - Structures de soutien des parties en porte-à-faux

Dans cet exemple, un positionnement adroit aurait pu permettre de se dispenser de structures de soutien. Cet exemple montre que le logiciel seul ne peut pas effectuer toute la programmation de l'impression : c'est à l'utilisateur de déterminer la meilleure façon d'imprimer l'objet.

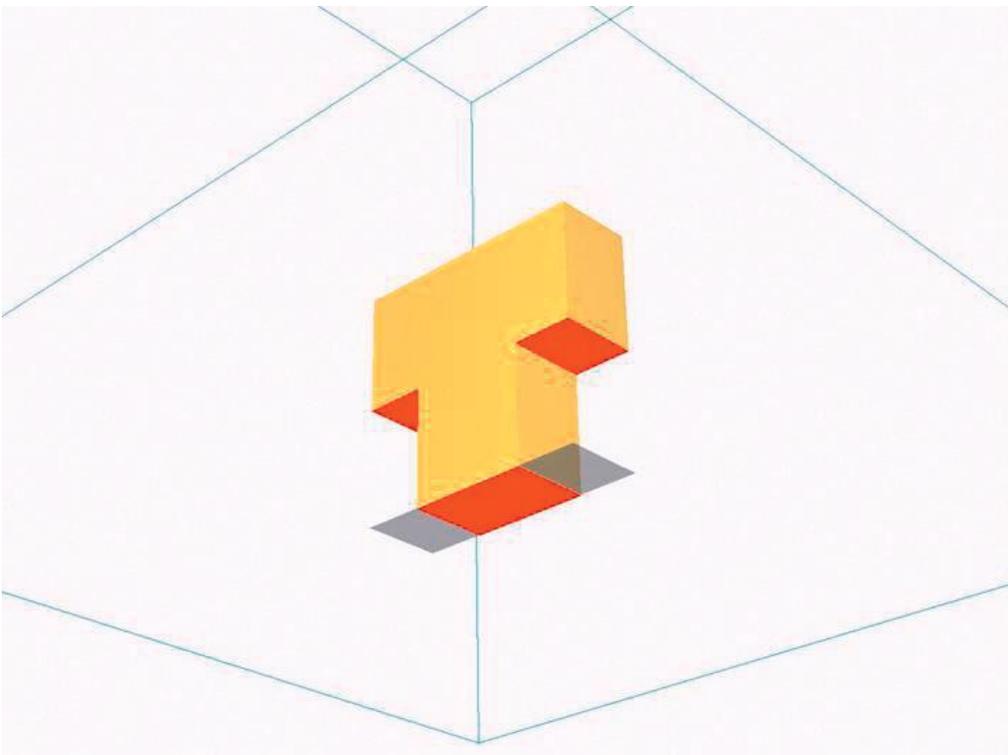
Cependant, si l'objet est positionné comme sur l'image (ou si pour d'autres modèles, il n'est pas possible de placer l'objet dans une position plus adaptée), les structures de soutien sont indispensables. Si l'impression est lancée sans ces structures, l'objet imprimé risque fortement d'être déformé :



Ici, on n'a pas utilisé de structures de soutien, la forme de l'objet obtenu est différente de la forme souhaitée.

Figure 54 : Paramètres de tranchage - Résultats d'une impression sans structures de soutien

Quand utiliser des soutiens ?



Figures 55 : Paramètres de tranchage - Propositions automatiques de positionnement des structures de soutien

Cura indique dans le menu d'aperçu les parties qui se trouvent dans une position critique et qui feront l'objet d'un soutien (en rouge).

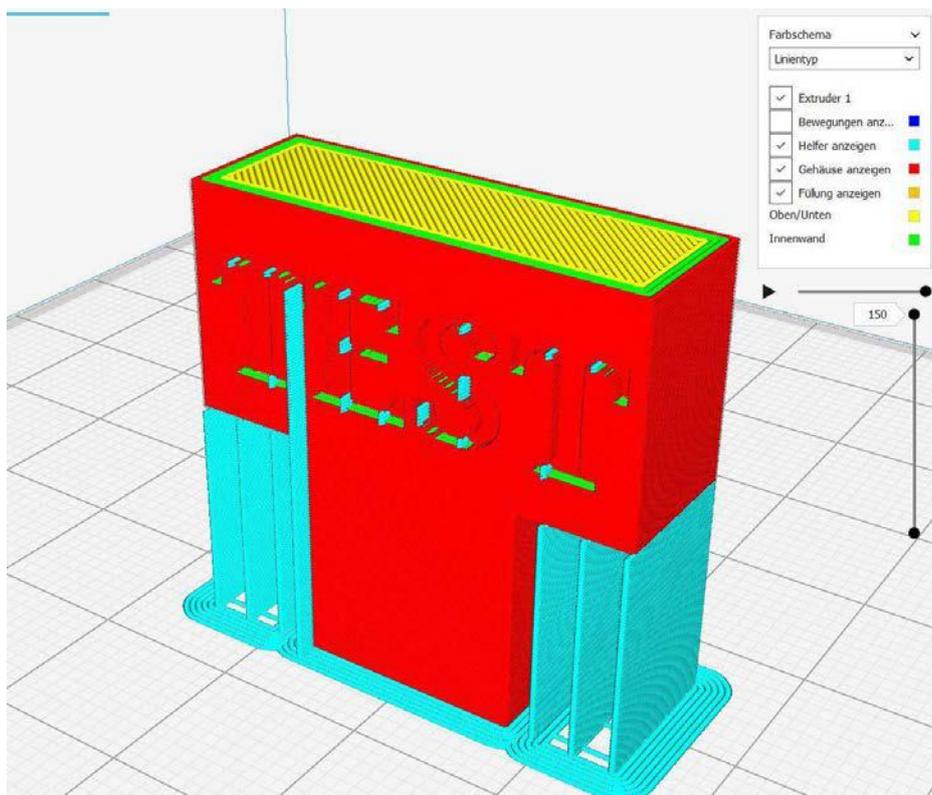


Figure 56 : Paramètres de tranchage - L'algorithme est une aide précieuse...

L'algorithme détermine à quel endroit il faut installer des soutiens, et leur nombre ; il peut cependant en faire parfois un peu trop...



Vous avez la possibilité, à partir de la version 3.5 de Cura, d'utiliser l'outil de blocage des structures de soutien et de déterminer des parties de l'objet qui ne bénéficieront pas de support (dernière icône en bas à gauche).

Après avoir choisi cette option, cliquez sur l'objet à imprimer pour faire apparaître un cadre transparent. Les parties de l'objet se trouvant à l'intérieur de ce cadre n'auront pas de support.

Les deux images qui suivent illustrent cette procédure pas à pas : la partie encadrée ne possède pas de soutien, seule la partie en T est soutenue.

Figure 57 : Icône de blocage des structures de soutien dans Cura

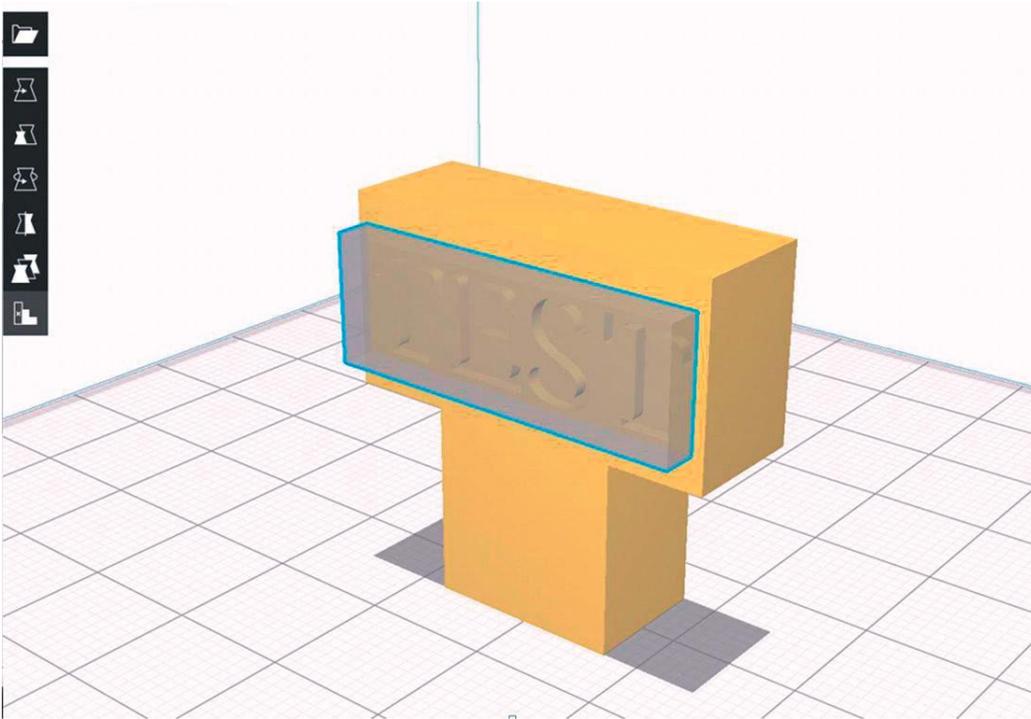


Figure 58 : Paramètres de tranchage - Blocage des structures de soutien dans la zone encadrée

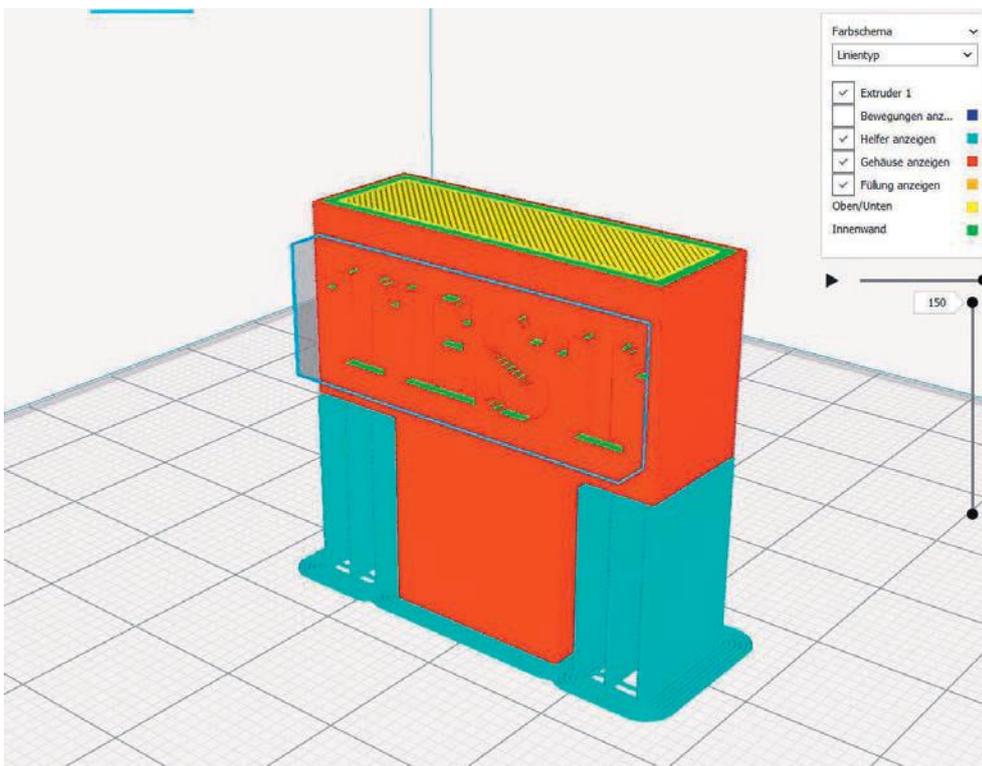


Figure 59 : Paramètres de tranchage - Aperçu du G-code ; seule la structure en T est soutenue.



REMARQUE : Le cache de blocage transparent peut être déplacé comme un objet indépendant et redimensionné.

Réduire ou éviter les structures de soutien

Dans l'exemple de l'objet en forme de T, il est possible de renoncer aux structures de soutien en le positionnant de façon à ce que la barre du T soit placée vers le bas ou posée à plat. Il est recommandé de visionner l'objet sur le plateau d'impression virtuel, avant de l'imprimer. Ainsi, en le tournant et en le faisant pivoter il est possible de réduire les soutiens, voire de ne pas les utiliser du tout.

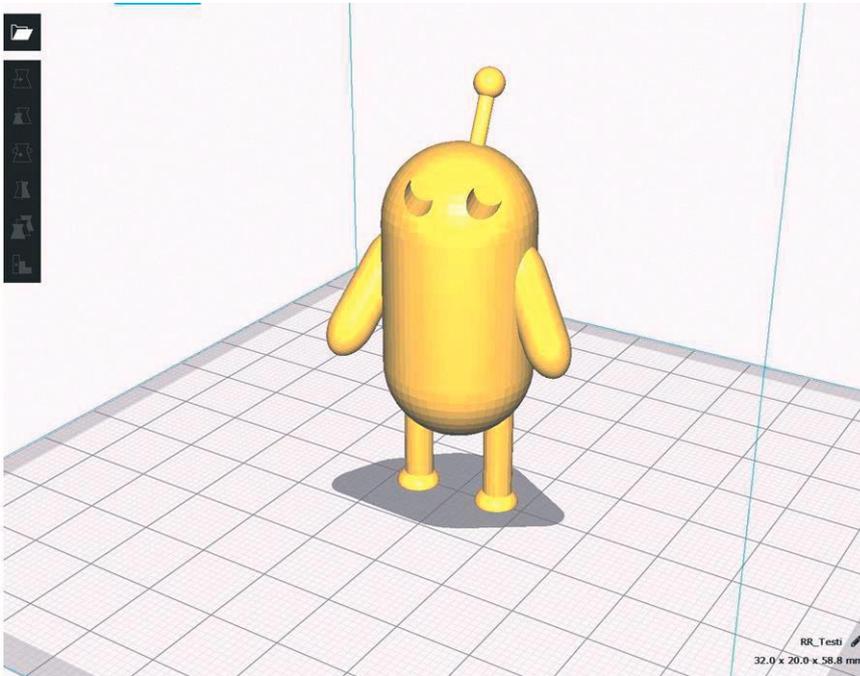


Figure 60 : Paramètres de tranchage - Objet complexe avec parties en porte-à-faux et peu de surfaces de contact.

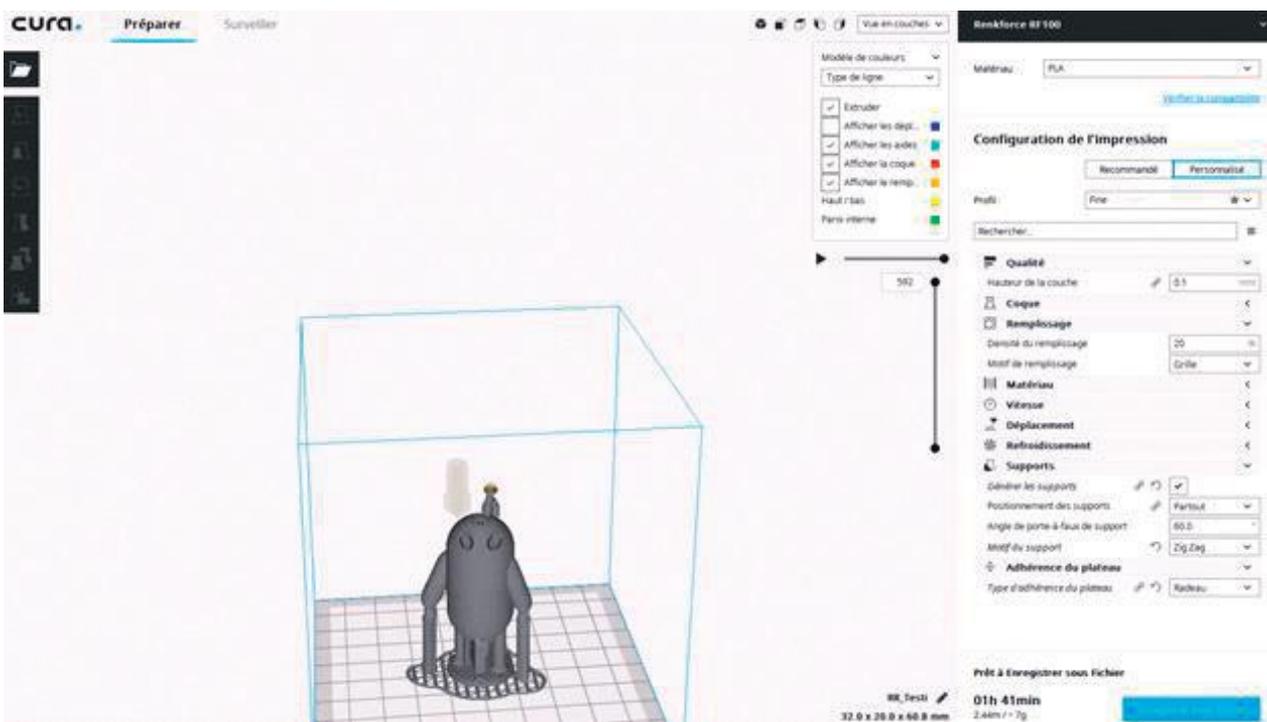


Figure 61 : Paramètres de tranchage - Structures de soutien et radeau.

Dans le cas d'objets possédant une faible surface d'appui (une sphère par exemple), il est conseillé de cocher la fonction « Radeau » de la catégorie « Type d'adhérence du plateau ». Dans ce cas, une structure grillagée est ajoutée sous l'objet afin d'augmenter la surface de contact entre l'objet et le plateau. Ceci permet également d'éliminer les légères irrégularités, comme un plateau d'impression qui ne serait pas parfaitement plat.

3.4 Processus d'impression

Ce paragraphe présente le processus d'impression étape par étape, de la préparation générale de l'appareil jusqu'au lancement de l'impression.

L'exemple traité est celui de l'impression du jeton de caddie fabriqué au paragraphe 3.1, avec une imprimante 3D Renkforce RF100 v2. Cependant, cet exemple peut être transposé à n'importe quelle imprimante 3D. Reportez-vous le cas échéant à la notice de votre imprimante pour retrouver les points de menu mentionnés ici.

Pour que l'impression se déroule normalement, il faut effectuer certaines opérations en amont, comme la préparation de l'imprimante. Le tableau ci-après présente les trois éléments principaux à vérifier lors de la phase de préparation de l'imprimante.

	Élément à vérifier	A quoi faut-il faire attention ?	Effet
1	Plateau d'impression	Le plateau d'impression est-il correctement calibré ?	Important pour l'adhérence de la première couche d'impression sur le plateau.
2	Filament	Le filament chargé convient-il, ou le flux de matériau est-il indiqué ?	Le filament est-il adapté au fichier .gcode préparé (découpé) ?
3	Température	Les températures sont-elles adaptées au filament utilisé ?	La température de l'extrudeuse est-elle adaptée au matériau utilisé ? La température est pré-réglée suivant l'information figurant dans le fichier découpé, mais peut être réglée après coup directement sur l'appareil.

Le fait de respecter ces trois points permet d'éviter la plupart des problèmes au cours de la phase préparatoire.

3.4.1. Éléments de commande et parties d'une imprimante 3D (exemple de l'imprimante renkforce RF100 v2)

La figure ci-après représente les principaux éléments de commande et parties fonctionnelles d'une imprimante 3D préparée pour l'impression.



- | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 Flexible pour filament | 6 Interrupteur | 11 Plateau d'impression |
| 2 Filament avec bobine | 7 Slot pour carte SD | 12 Buse |
| 3 Porte-bobine | 8 Écran LCD | 13 Extrudeuse |
| 4 Fiche réseau | 9 Bouton rotatif | 14 Tube de guidage de filament |
| 5 Compartiment du fusible | 10 Vis de nivellement (3 en tout) | |

Figure 62 : Eléments de commande d'une impression 3D - exemple d'une imprimante d'entrée de gamme renkforce RF100 V2.

3.4.2. Calibrage du plateau d'impression

Pour une impression réussie, il faut que le plateau d'impression soit correctement dimensionné, c'est-à-dire que la distance entre le plateau et la buse soit adaptée. Ce mode de calibrage est largement répandu et bien connu. L'appareil place automatiquement la buse dans les différentes positions du plateau, de sorte que la distance entre la buse et le plateau à ces emplacements puisse être réglée de manière très précise à l'aide des vis de nivellement. Une fois le processus terminé, le plateau est à l'horizontale et à bonne distance de la buse.



REMARQUE : Si vous utilisez une imprimante d'une autre marque, vérifiez dans le manuel la méthode à utiliser pour le calibrage.

Il est important que le banc d'impression soit bien horizontal et que la distance à la buse soit correcte pour imprimer la première couche. Celle-ci doit présenter une adhérence suffisante avec le plateau afin que l'objet imprimé ne se détache pas du plateau pendant l'impression.

Lors de la première mise en service, resserrez un peu les vis de nivellement afin d'abaisser le plateau ; vous éviterez ainsi que la buse ne percute le plateau lors du premier calibrage.

Il convient maintenant d'amener l'extrudeuse à une température normale, afin que les composants de l'extrudeuse puissent s'allonger.

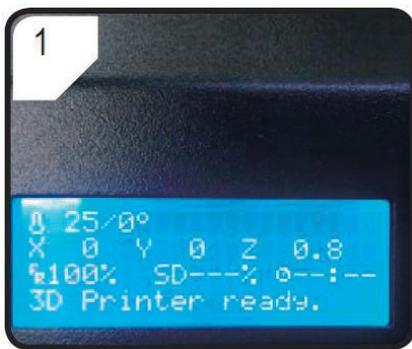


Figure 63 : Infoscreen

Dans « Info screen », appuyez sur le bouton rotatif pour ouvrir « Main Page ».

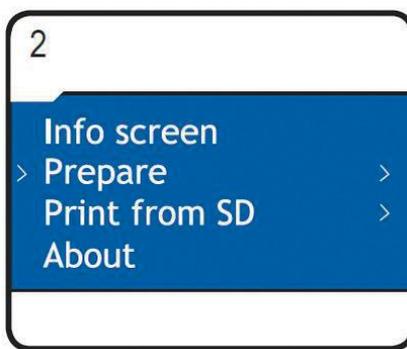


Figure 64 : Option Prepare

Dans le menu « Main », choisissez l'option « Prepare ».

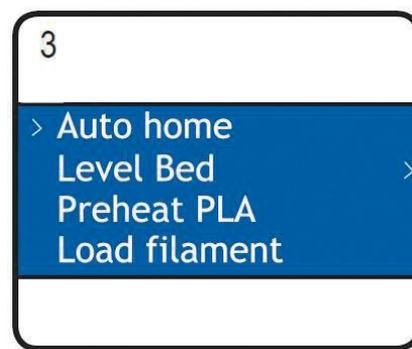


Figure 65 : Auto home

Choisissez « Auto home ».

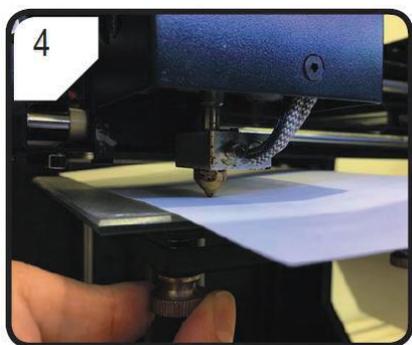


Figure 66 : Réglage de la distance entre la buse et la plaque d'impression - Le papier sert d'aide.

Nul besoin ici d'un outil de calibrage de haute précision, une simple feuille de papier DIN A4 de grammage 80 g suffit. Tenez la feuille d'une main et placez l'autre main sur la vis de nivellement. Faites des va-et-vient avec la feuille et réduisez de l'autre main la distance entre la buse et le plateau. La distance idéale est atteinte lorsque le papier frotte légèrement contre la buse ; il ne doit ni se coincer ni glisser. Répétez la manipulation avec les autres vis de nivellement.

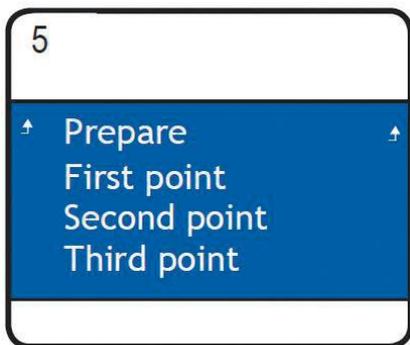


Figure 67 : Menu « Prepare »

Retour au menu « Prepare »
 Ouvrez le menu « Level bed » et sélectionnez « First point ».
 Lors de chaque réglage du plateau d'impression, vérifiez que la distance entre la buse et le plateau est toujours la même. Dans le cas contraire, les champs de guidage de l'extrudeuse et le plateau ne seront pas parallèles, et l'objet ne pourra pas adhérer correctement au plateau.

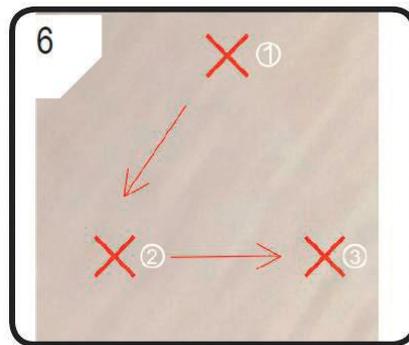


Figure 68 : Calibrage

Répétez les étapes 1 à 4 pour le deuxième et le troisième point (la séquence de calibrage et le sens de déplacement de la buse sont représentés).



REMARQUE : il est recommandé de répéter cette procédure deux fois successivement lors de la première mise en service.

3.4.3. Comment savoir que le banc d'impression est mal calibré ?

Un mauvais réglage du plateau peut occasionner des erreurs d'impression, ou l'objet risque de se détacher au cours de l'impression, ce qui engendre une perte de temps et d'argent puisque les matériaux utilisés sont gaspillés.

Ainsi, il est judicieux de vérifier dès le début de l'impression, au moment où les premières couches de l'objet sont imprimées, que le plateau est correctement calibré. Pour cela, observez le processus d'impression, interrompez-le en cas de doute et apportez les modifications nécessaires.

L'image ci-dessous montre une impression effectuée avec un plateau correctement installé :

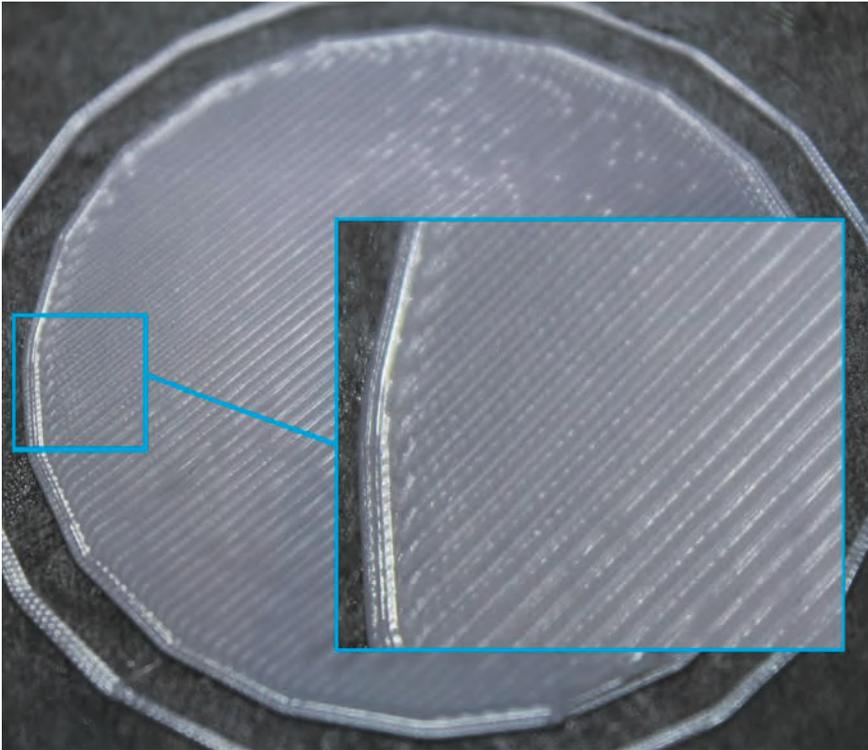


Figure 69 : Impression optimale de la première couche (« first layer »)

On voit bien ici que les lignes sont parallèles et similaires, et peu profondes. Cette première couche, appelée également "first layer", est ici parfaite.

L'image suivante montre une impression défectueuse, causée par une distance trop faible entre la buse et le plateau.

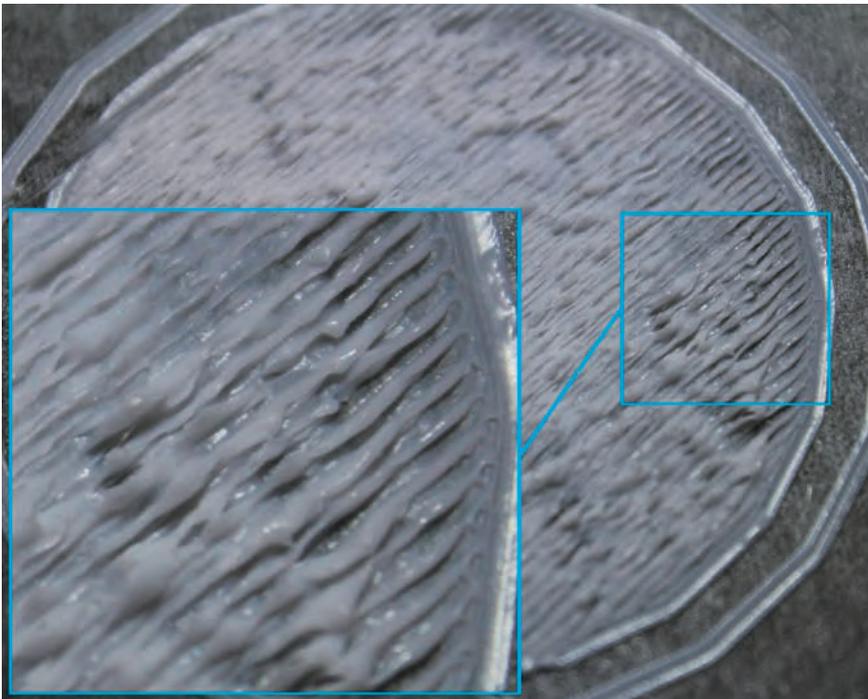


Figure 70 : Impression défectueuse de la première couche, liée à une distance buse-plateau trop faible.

Les rainures déformées présentes sur la couche (appelée également « layer ») indiquent que la distance buse-plateau est trop faible. Ici, le matériau est extrudé et la pièce se soulève au niveau des angles. Les deuxième et troisième couches auront un meilleur aspect, mais risquent de se détacher. Ceci favorise le « warping » (gauchissement).



REMARQUE : Un bruit de claquement du moteur pas-à-pas qui alimente l'imprimante en matériau (le feeder) est un indice supplémentaire : il indique que la distance buse-plateau est trop faible.

L'exemple suivant montre une impression défectueuse causée par une distance buse-plateau trop élevée. On distingue un espace entre chaque ligne. Les lignes sont pour ainsi dire juste posées sur le plateau. Le risque que l'objet se détache du plateau est ici très important.

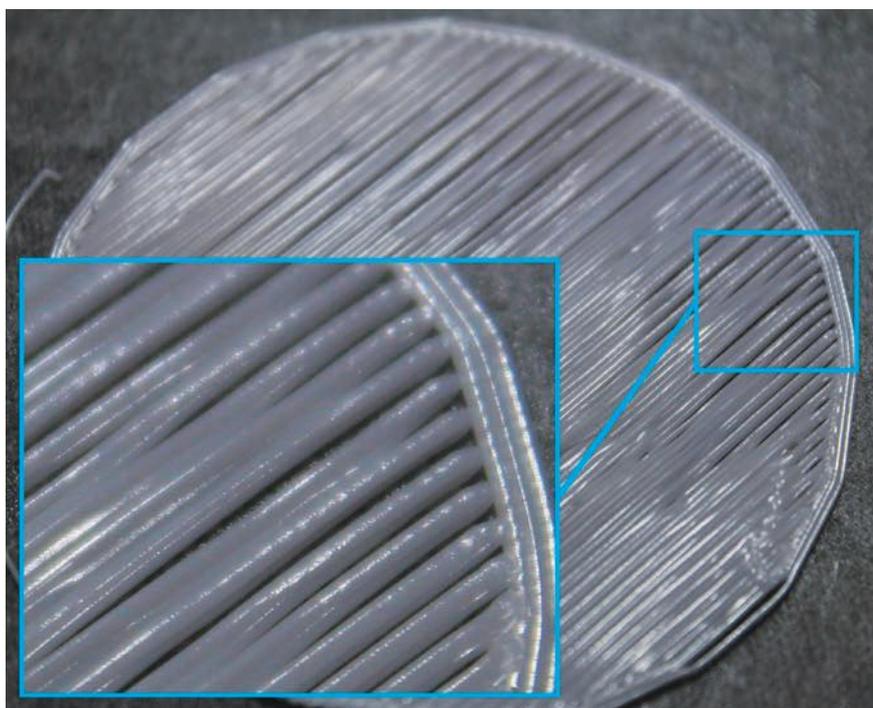


Figure 71 : Impression défectueuse de la première couche, liée à une distance buse-plateau trop élevée.



REMARQUE : Une impression ratée n'est pas à mettre immédiatement à la poubelle, elle peut donner des indices intéressants sur les causes de l'échec. Il est facile de reconnaître la première couche en observant l'envers.

3.4.4. Installation du filament

Respectez les étapes suivantes pour installer sur l'imprimante le filament que vous souhaitez utiliser. Pour imprimer le jeton de caddie, nous recommandons un filament en PLA.

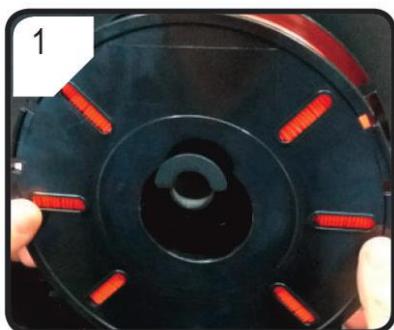


Figure 72 : Porte-filament

Installez le filament sur la bobine.

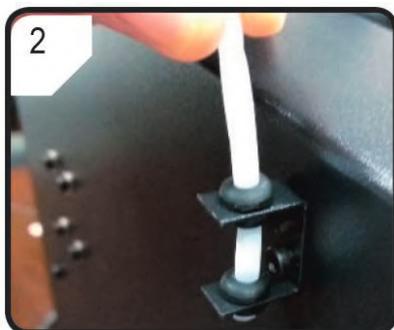


Figure 73 : Support de flexible

Insérez le flexible dans le support.

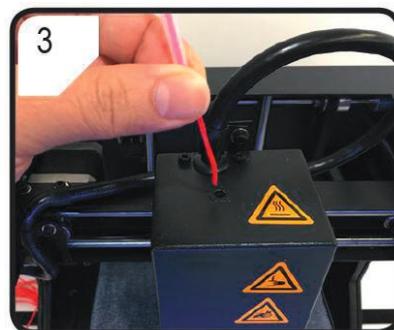


Figure 74 : Insertion du filament dans le flexible

Introduisez le filament dans le flexible jusqu'à ce qu'il dépasse d'environ 5 cm de l'extrémité de l'extrudeuse.



REMARQUE : L'imprimante renkforce RF100 v2 fonctionne avec un filament d'un diamètre courant de 1,75 mm.

3.4.5. Chargement du filament

Une fois que le filament est installé dans l'imprimante, il doit encore être chargé dans l'extrudeuse afin que le matériau soit disponible à l'extrémité de la buse lors du démarrage de l'impression. L'extrudeuse monte d'abord en température, puis l'imprimante prélève une petite quantité de filament dans l'extrudeuse.

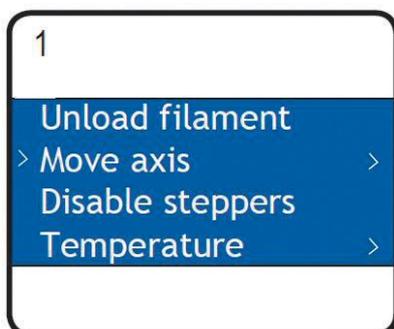


Figure 75 : Move axis

Dans le menu « Prepare », sélectionnez d'abord « Auto Home » puis « Move axis ».



Figure 76 : Move 1 mm

Choisissez l'élément « Move 1mm ».

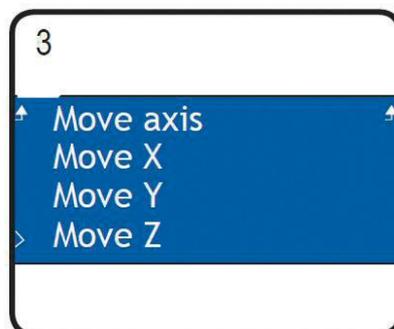


Figure 77 : Move Z

Choisissez l'élément « Move Z ».

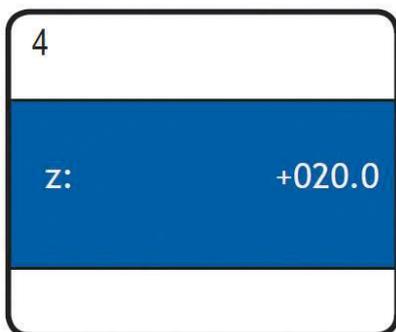


Figure 78 : Axe Z 20 mm

Réglez l'axe Z sur + 20.0 mm au minimum.

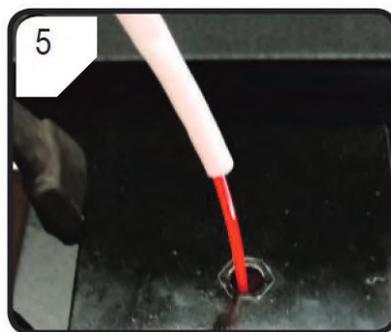


Figure 79 : Insertion du filament

Insérez le filament par l'ouverture de l'extrudeuse.

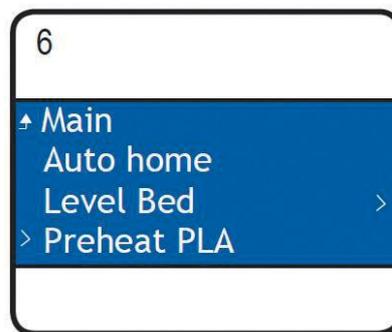


Figure 80 : Preheat PLA

Choisissez l'option « Preheat PLA » dans le menu « Prepare ».

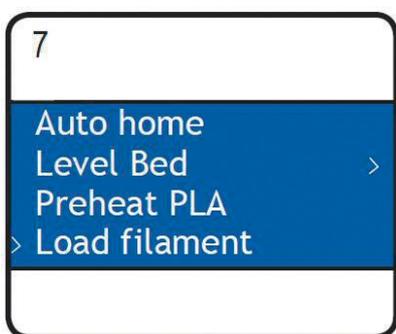


Figure 81 : Load filament

Lorsque la température atteint la température souhaitée (170 °C minimum), sélectionnez « Load filament ».

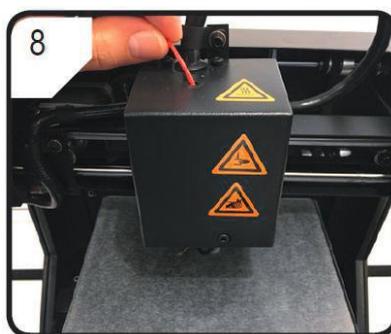


Figure 82 : Poussez le filament

Poussez doucement le filament vers l'avant jusqu'à ce qu'il ressorte de la buse. Il est possible de voir que le filament est inséré lentement dans l'extrudeuse.



REMARQUE : Si le matériau ne ressort pas de la buse, revenez à « Load filament ». Le matériau qui est sorti de la buse peut être retiré à l'aide d'une pincette une fois que le filament a été introduit.

3.4.6. Lancement de l'impression

Tout est maintenant prêt pour lancer l'impression du jeton de caddie conçu au chapitre 3.1, tranché au paragraphe 3.2 et stocké sur une carte SD.

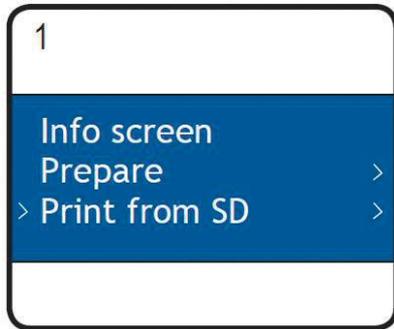


Figure 83 : Print from SD

Appuyez sur le bouton rotatif et choisissez « Print from SD » dans le menu « Main ».



Figure 84 : Sélection du fichier

Sélectionnez le fichier à imprimer, par exemple « Conrad_Coin.gcode ». Attention, seuls les fichiers au format .gcode sont affichés dans le menu.

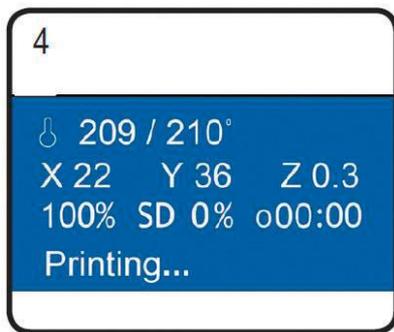


Figure 85 : Infoscreen

« Info Screen » s'affiche à l'écran.

Le plateau d'impression se déplace vers le zéro le long de l'axe Z. La buse revient dans la position initiale et commence à chauffer.

L'impression démarre lorsque la buse a atteint une température suffisante.

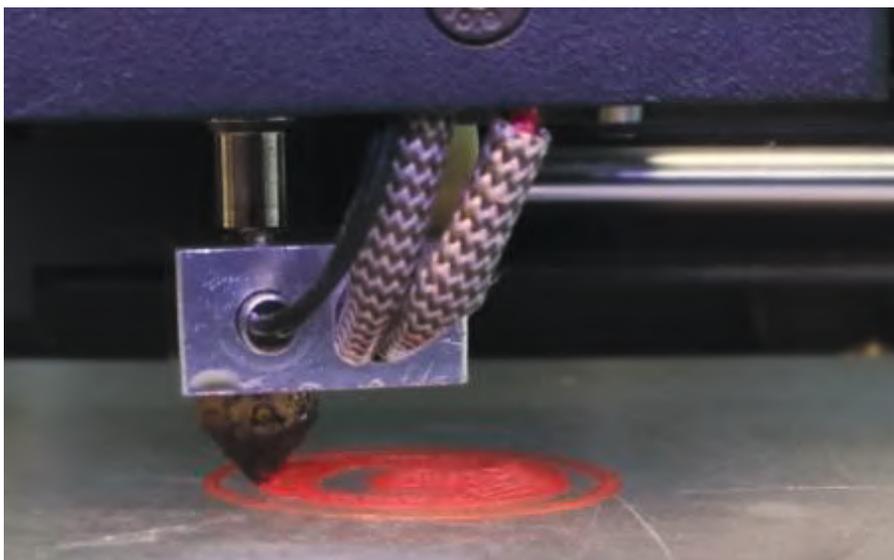


Figure 86 : Impression du jeton de caddie (première couche).

L'imprimante fabrique l'objet couche après couche.

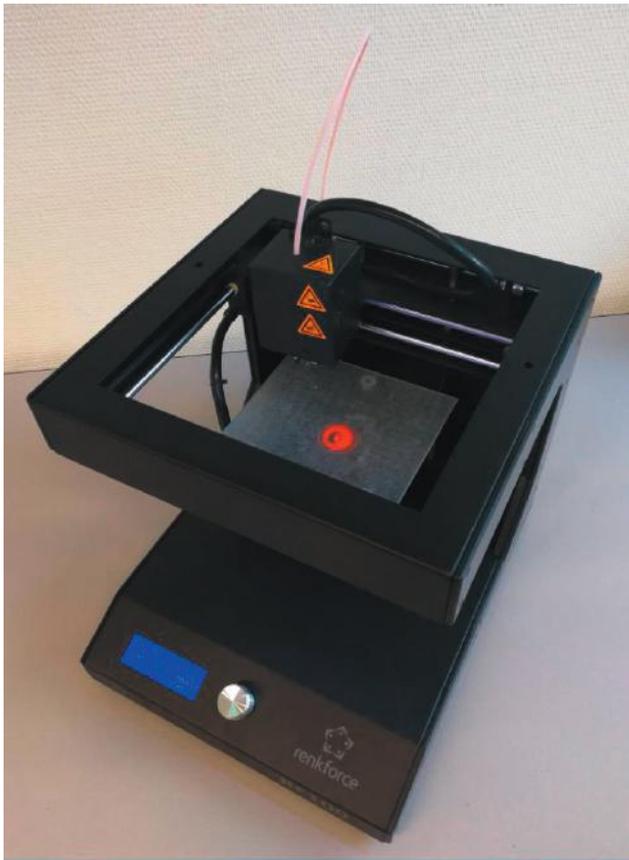


Figure 87 : L'impression est maintenant terminée !

C'est terminé ! Une fois que l'objet est entièrement fabriqué, laissez-le refroidir pendant quelques minutes. Puis faites coulisser le plateau et soulevez l'objet précautionneusement à l'aide d'une spatule.

4. L'impression 3D dans l'enseignement : expériences avec enregistrement numérique des données

Claude Blanc / Irma Mgeladze / Dr. Sergej Stoetzer / Dr. Hildegard Urban-Woldron

L'impression 3D est un procédé de fabrication additif, économe en ressources, adapté à de nombreuses technologies et susceptible d'évoluer. Il est recommandé d'utiliser dans les écoles le procédé d'impression par couches : un fil thermoplastique enroulé sur une bobine est fondu et l'objet est fabriqué couche par couche.

La technologie 3D se prête à de multiples possibilités d'utilisation par les enseignants et les formateurs, depuis l'étude des principes mathématiques-scientifiques à la base de la technologie 3D jusqu'aux projets et recherches initiés de manière autonome par les élèves. Ainsi, il est possible de réaliser des expériences dans les domaines de la mécanique, de la thermodynamique et de l'optique en utilisant des objets imprimés en 3D, dont une partie aura été fabriquée par les élèves eux-mêmes. La technologie d'impression 3D fascine les jeunes gens, son utilisation dans l'enseignement peut être source de motivation pour les élèves. En plus des expériences réalisées en classe, cette thématique est également adaptée à un travail en autonomie dans le cadre d'une pédagogie différenciée, ou de travaux de recherche au sein d'un projet hebdomadaire, par exemple la conception d'une coque de Smartphone. Pour les expériences, il est conseillé d'utiliser des smartphones d'occasion ou des appareils disposant d'un certificat de protection adéquat (certains smartphones d'extérieur par exemple, comme le CAT S31, résistants aux chocs conformément à la norme US-MIL-810-G). Deux utilisations sont possibles en cours :

- l'imprimante 3D est utilisée comme ressource pour améliorer ou faciliter les expériences mises en place (adaptateur de capteur, supports, boîtier pour appareils de mesure « faits maison ») ;
- les objets fabriqués à l'aide de la technologie d'impression 3D sont étudiés (propriétés des matériaux).

Les outils pédagogiques présentés dans la suite de ce document (expériences à réaliser par les élèves) sont destinés au cours de physique et se rapportent à la deuxième utilisation (étude de l'objet imprimé en 3D). Les deux premières expériences se focalisent sur les propriétés d'amortissement des impressions 3D flexibles. La première permet d'étudier l'influence de la densité (Infill-Grade : taux de remplissage) sur le comportement d'amortissement du solide. L'objectif de la deuxième expérience est d'étudier les différences observées sur un dé avec un remplissage de 15 % lors d'un choc sur différentes faces. Il s'agit par conséquent d'étudier les effets de la position du solide au moment de l'impression, lorsque ce solide entre en collision avec un autre objet.

Il est également possible par exemple d'étudier lors de séances de cours ultérieures :

- l'influence de la température lors de l'impression sur les propriétés des matériaux
- l'influence de la température du dé sur les propriétés d'absorption lors du choc (amener le dé à une température élevée en le plongeant dans un bain chaud)
- les propriétés d'absorption de la lumière



REMARQUE : Les deux premières expériences nécessitent une préparation et un protocole quasiment identiques. Ces aspects sont détaillés dans les fiches pédagogiques destinées au professeur. Certaines informations et explications ont été volontairement répétées dans chaque fiche d'expérience, afin que chacune soit complète et puisse être utilisée indépendamment des autres.

Expérience 1 : Quel est l'impact du taux de remplissage de l'objet imprimé sur les propriétés d'amortissement ?

Pour cette expérience, on utilise différents dés fabriqués à partir de filament flexible. Ils se différencient par leur taux de remplissage (Infill-Rate), c'est-à-dire qu'ils ont des densités différentes et donc des propriétés d'amortissement différentes. L'expérience a pour objectif de déterminer l'influence de la densité du solide sur son comportement d'amortissement et de le modéliser si possible (en fonction du niveau de classe). Le choc se produit toujours sur la même face du dé. On utilise un dé de 2 cm de côté, dont les valeurs de remplissage ont été choisies dans le programme de tranchage (5 %, 15 %, 30 %) (voir plus loin dans la fiche enseignant n°1 l'illustration des structures de remplissage).

Le taux de remplissage est déterminé lors de la création du fichier d'impression 3D (tranchage), il est compris entre zéro (corps creux) et cent pour cent (corps plein) ; ici, choisissez une valeur comprise entre 5 % et 50 %. Avec une valeur inférieure à 5 %, l'impression est difficile car il n'y a pas de matériau de soutien disponible pour la face supérieure. L'imprimante doit alors tirer le fil de plastique jusqu'à ce qu'il atteigne à nouveau le remplissage ou une face. Cette fonction, appelée « Bridging » (pontage) est compliquée avec un matériau flexible et aboutit parfois à ce que la face supérieure du dé reste ouverte. À l'inverse, il n'est pas judicieux d'utiliser un taux de remplissage supérieur à 50 %, puisque l'amortissement est marginal au-delà de cette valeur. Il est possible par exemple de travailler avec une valeur de 5 %, 15 % et 30 %, afin d'obtenir une augmentation régulière et graduelle de la densité.

Fiche enseignant n°1 : Choc et élastomère en impression 3D.

Variation de la densité

Introduction

Les élastomères thermoplastiques sont des plastiques flexibles dans des conditions normales, c'est-à-dire qu'ils peuvent être pliés et déformés sous l'effet d'une force ; si cette force n'est plus exercée, le matériau reprend sa forme initiale. A haute température (avec ce type de plastique, l'impression se fait à une température comprise entre 190 °C et 240 °C), la forme de l'objet est définitive après le refroidissement. Il est ainsi possible de fabriquer des pneus ou des corps d'amortissement par exemple. Les expériences qui suivent sont réalisées avec des dés de 2 cm de côté.

Prérequis pour les élèves

- Conversion et conservation de l'énergie (énergie potentielle, énergie cinétique, éventuellement énergie de rotation en cas d'utilisation d'un plan incliné)
- Énergie élastique (amortissement, déformation élastique)
- Choc, variation d'impulsion

Matériel nécessaire

- Dé imprimé en 3D de 2 cm de côté, en filament flexible : un dé avec remplissage à 5 %, 15 % et 30 % par groupe d'élèves
- Bille d'acier de diamètre 6 à 8 mm sur un plan incliné avec une différence de hauteur de 10 cm minimum ou en chute libre (par exemple déclenchée par la coupure d'un électro-aimant), également avec une différence de hauteur de 10 cm au minimum. Déclenchement possible sans contact (par un électro-aimant par exemple)

Enregistrement numérique des données

- Dynamomètre avec +/- 50 N : Vernier DF-BTA pour effectuer des mesures avec une calculatrice graphique
- Enregistreur de données : TI Nspire avec Lab Cradle

Protocole expérimental

Le capteur de force est équipé d'un crochet dévissable qui enregistre les forces ; ce crochet doit être retiré ; le carré/l'hexagone en métal doit être placé de manière à ce que le corps d'amortissement soit centré et que la bille tombe également au centre de l'objet à tester (qu'il s'agisse d'une chute libre ou qu'elle roule sur un plan incliné).

Les objets imprimés en 3D sont placés entre la pièce hexagonale et la bille ; ils doivent être coincés entre le plan incliné et le capteur, ou placés au milieu du capteur, de manière stable. Si la bille effectue une chute libre avant de percuter le dé, vous pouvez immobiliser ce dernier sur le capteur à l'aide d'un petit tube en plastique qui servira de « guide » pour la bille.



Figure 90 : Capteur de forces sans crochet - Hexagone pour l'enregistrement de la force (2 formes différentes)

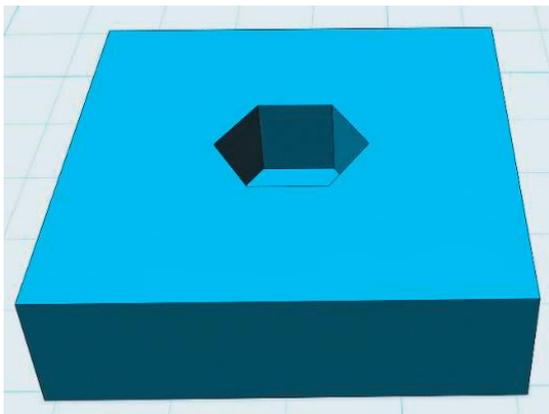


Figure 91 : Mise en place du dé flexible pour les tests de chute ; exemple de montage sur le capteur



Figure 92 : Exemples de construction :
a) avec fischertechnik, b) avec système de support

Le capteur indique par exemple 2 N, une remise à zéro s'effectue avant le début de l'enregistrement des données. Il est possible d'utiliser la construction suivante en filament PLA normal, non-flexible, pour servir de support pour les tests de chute.

Installez le système expérimental de façon à ce que le capteur soit posé sur la table. Une fixation du capteur sur le système de support provoque des oscillations importantes lors de la chute de la bille (oscillations de l'ensemble du protocole expérimental ou du système de mesure). Il n'est pas toujours facile d'aligner précisément la bille, l'objet à tester et le capteur. Utilisez un niveau à bulle ou un tube en plastique (servant d'habitude à installer les câbles électriques) pour les placer plus facilement.

Déroulement de l'expérience

Cette expérience est réalisée avec trois dés (par groupe d'élèves) en filament flexible, avec différents taux de remplissage (donc différentes densités), par exemple 5 %, 15 % et 30 %. Pour cette expérience, il est essentiel que le choc se produise toujours sur la même face du dé. L'orientation peut être définie facilement à l'aide de la face de dessous puisque le motif de remplissage est facilement reconnaissable à cet endroit. Dans cette expérience, la face inférieure ne doit pas être dirigée vers le capteur ni vers la bille.

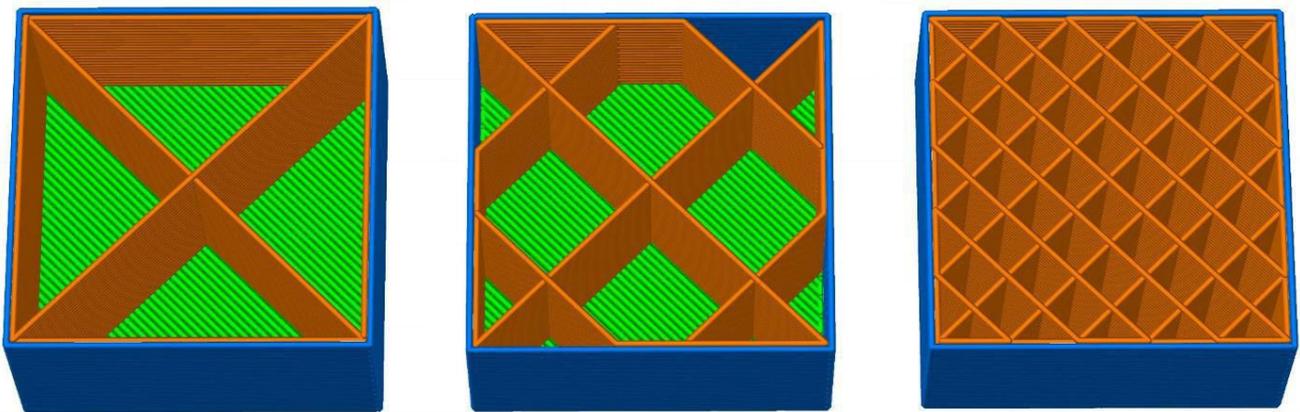


Figure 93 : Comparaison de trois taux de remplissage : 5 %, 15 % et 30 %

Le solide est fabriqué couche après couche par l'imprimante 3D et les motifs de remplissage des différentes couches se superposent. Avec un taux de remplissage faible, elles sont empilées en zig-zag. En cas de taux de remplissage élevé, le maillage de la structure de remplissage est plus serré et la flexibilité de l'objet dans son ensemble diminue. Les élèves peuvent tirer eux-mêmes ces conclusions de manière expérimentale, et même les décrire de manière quantitative, voire proposer un modèle mathématique pour les niveaux de classe les plus élevés.

a) Réglage pour l'enregistrement des données

Pour que le dé soit placé de manière stable sur le capteur, il peut être intéressant de le coincer légèrement sur le côté ou dans un tube en plastique qui oriente la bille vers le capteur. La chute doit s'effectuer autant que possible avec une force constante, par exemple 2 N. Pour cela, remettez d'abord le capteur à zéro afin que le dé soit percuté avec la même force à chaque tentative. Avant la mesure, il faut donc réinitialiser une nouvelle fois le capteur afin que seule la force soit prise en compte.

Pour la saisie des données, il est judicieux d'installer un système de déclenchement qui démarre l'enregistrement dès qu'un certain seuil est atteint. Pour que les valeurs précédant immédiatement l'événement (l'impact de la bille sur le dé) puissent également être exploitées, 20 % des données sont

sauvegardées dans une mémoire circulaire avant l'événement.

Remettez le capteur à zéro avant la mesure pour pouvoir comparer plus facilement les séries de mesures. Attention, la remise à zéro du capteur modifie les paramètres de déclenchement enregistrés dans le logiciel. Pour régler les paramètres de mesure, suivez la procédure ci-dessous :

- | | | | |
|---|--|---|---|
| 1 | Capteur sur zéro | 3 | Capteur sur zéro |
| 2 | Coincer le cas échéant l'objet du test (environ 2 N) | 4 | Régler la fréquence d'échantillonnage et le déclenchement |

Réglez les paramètres suivants sur le TI Nspire :

- 5000 échantillons/s (ignorez l'avertissement)
- Durée de mesure 0,2 secondes
- Déclenchement en cas de force inférieure à 0,1 N (pression sur le capteur = force dans le sens négatif)
- 20 % des données au préalable

b) Analyse et interprétation des résultats

En fonction du niveau de classe, les séries de mesure peuvent être exploitées de manière qualitative ou quantitative.

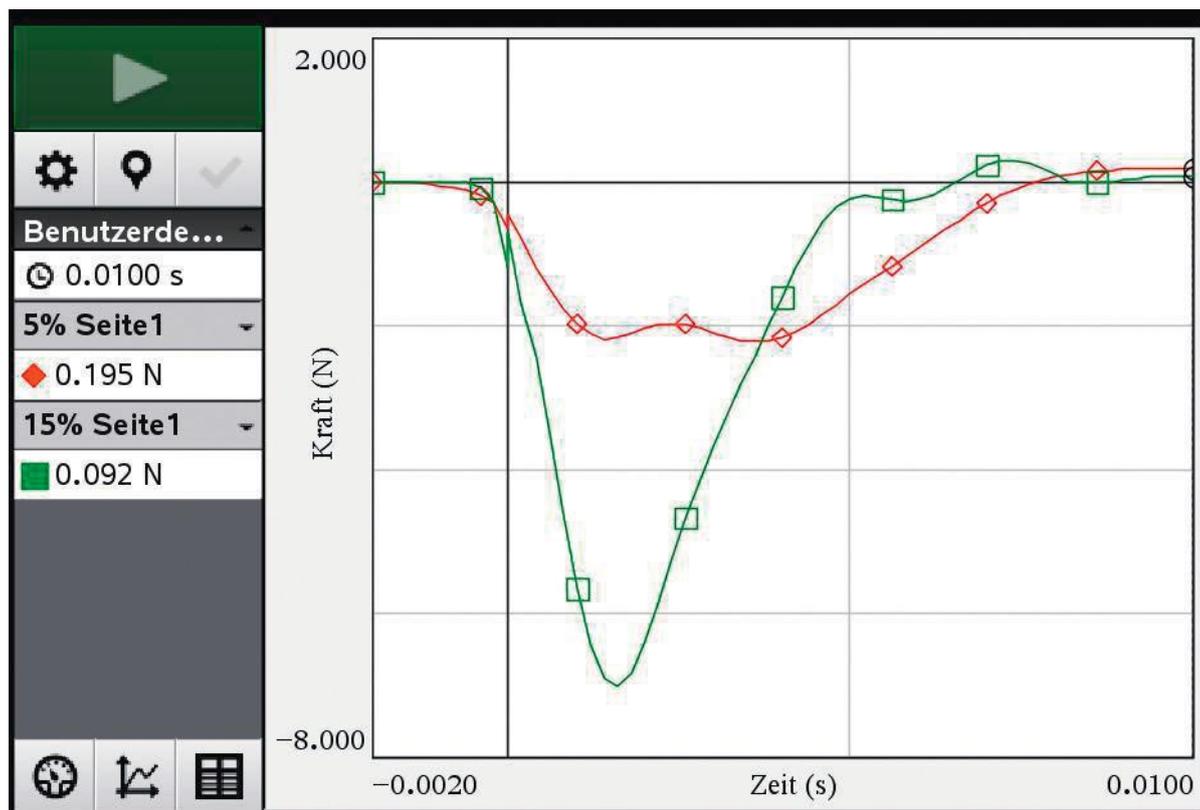


Figure 94 : Choc latéral avec un remplissage de 5 % vs 15 % - Etude qualitative

Le graphique montre clairement que le dé avec un remplissage de 5 % absorbe mieux le choc.

Exemple d'analyse quantitative :

Pour une analyse quantitative, on utilise les résultats des expériences enregistrés par l'appareil numérique, afin de calculer l'impulsion.

Pour cela, on choisit dans le logiciel d'exploitation une vue permettant de visualiser entièrement la déviation provoquée par le choc. La courbe de variation entre les deux points zéro s'affiche et l'intégrale correspondant à cette zone est calculée.

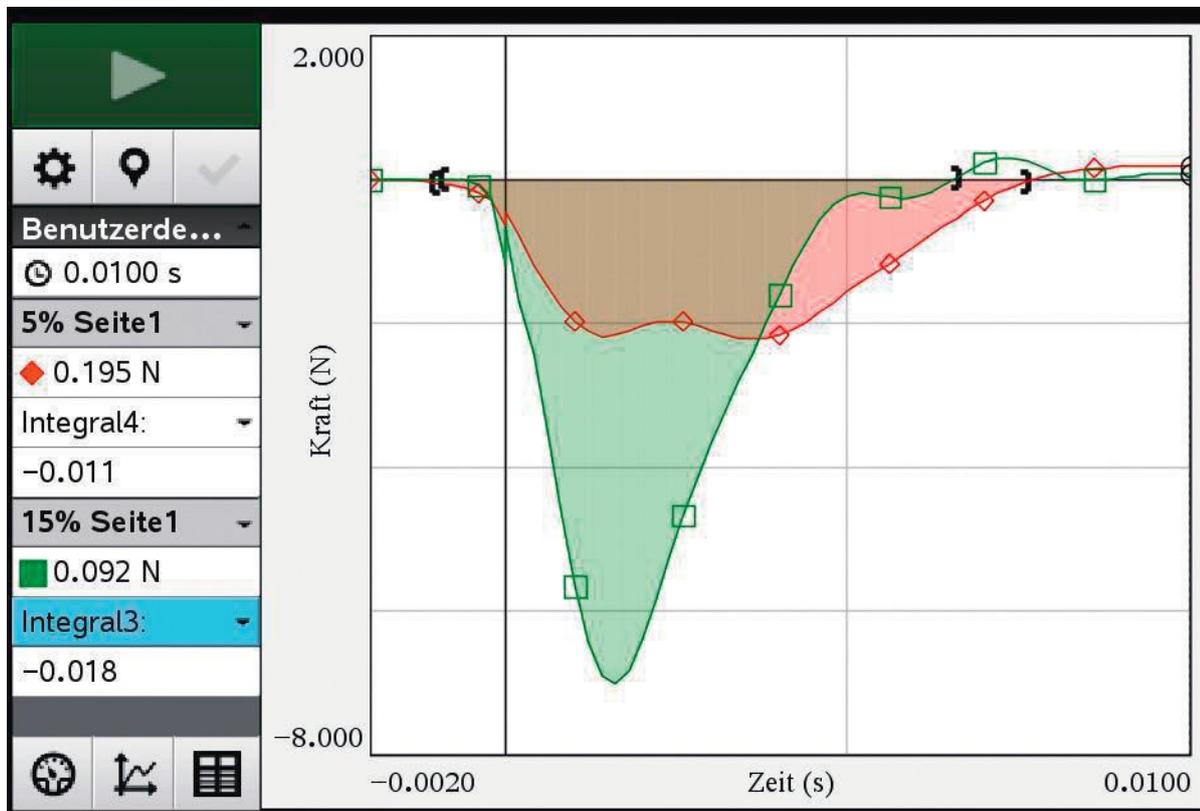


Figure 95 : Choc latéral avec un remplissage de 5 % vs 15 % - Etude quantitative

Répétez cette démarche pour les deux essais de façon à pouvoir comparer les intégrales. Pour évaluer l'enregistrement des mesures, il est judicieux d'effectuer un test de collision sans solide et de calculer l'intégrale correspondante. Lorsque vous comparez les hauteurs de chute, prenez en compte la hauteur du dé (2 cm) : la distance à parcourir est d'autant plus grande en cas d'impact direct sur le capteur (sans solide). Il est possible sur cette base de comparer de manière empirique et de manière théorique les impulsions transmises (elles doivent être situées entre un choc totalement élastique et un choc inélastique).

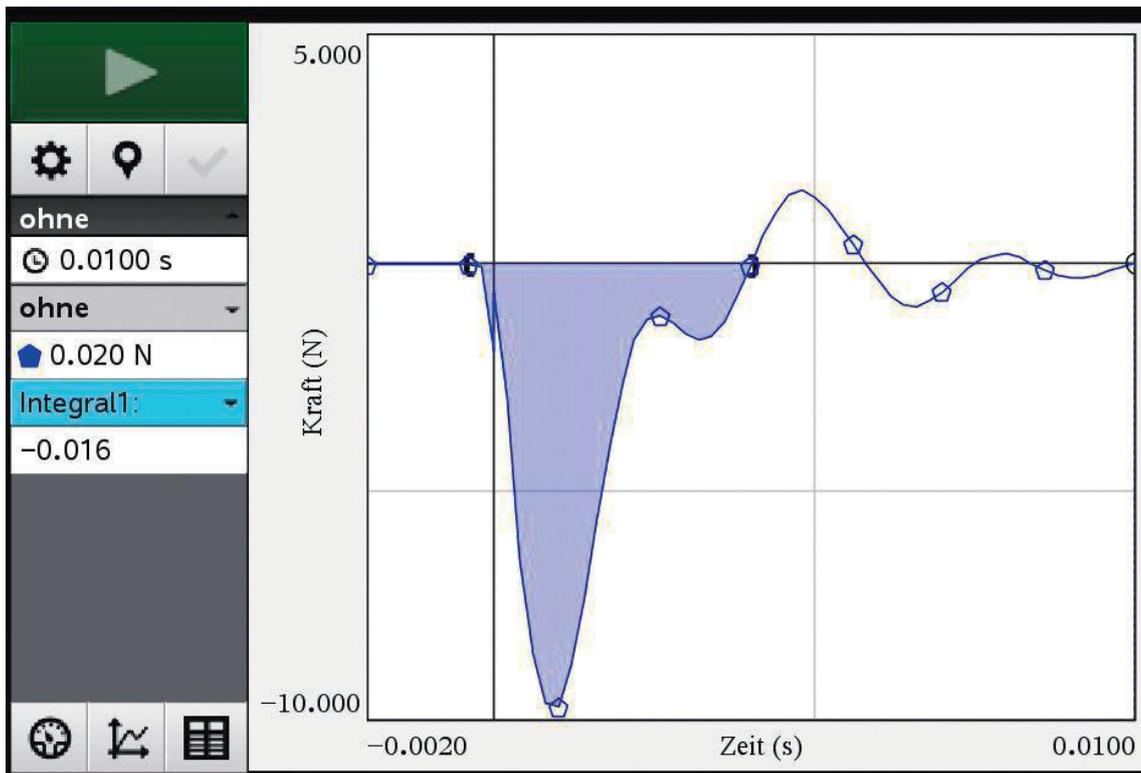


Figure 96 : Choc direct sur le capteur - Etude quantitative

A partir de données connues (hauteur de chute et accélération de la gravité), il est possible de calculer d'abord la vitesse de l'impact, qui permet ensuite de connaître l'impulsion lors de l'impact grâce au poids de la bille. La modification de l'impulsion en cas de choc totalement élastique ou totalement inélastique peut être déterminée et comparée avec les valeurs obtenues de manière empirique.

	sans le dé	avec le dé
Données	Hauteur de chute (h) sans dé servant d'objet de test : $h = 0,101 \text{ m}$ Masse de la bille $m = 0,0082 \text{ kg}$	Hauteur de chute (h) avec dé servant d'objet de test : $h = 0,081 \text{ m}$ Masse de la bille $m = 0,0082 \text{ kg}$
Vitesse au moment de l'impact v_0	$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,101 \text{m}}$ $\approx 1,40746 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,081 \text{m}}$ $\approx 1,26043 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Impulsion au moment de l'impact	$p_0 = m \cdot v_0$ $p_0 \approx 1,40746 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0082 \text{kg}$ $\approx 0,011541 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$p_0 = m \cdot v_0$ $p_0 \approx 1,26043 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0082 \text{kg}$ $\approx 0,010336 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$

Modification de l'impulsion avec un :		
Choc totalement élastique	$\Delta p_{\text{elast}} = 2 \cdot p_0$ $\approx 0.023082 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$\Delta p_{\text{elast}} = 2 \cdot p_0$ $\approx 0.020671 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
Choc totalement inélastique	$\Delta p_{\text{inelast}} = p_0$ $\approx 0.011541 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$\Delta p_{\text{inelast}} = p_0$ $\approx 0.010336 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
déterminé expérimentalement	$\Delta p_{\text{exper}} \approx 0.016 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	Impact latéral 5 % $\Delta p_{\text{exper}_{5\%}} \approx 0.011 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ Impact latéral 15 % $\Delta p_{\text{exper}_{15\%}} \approx 0.018 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
Estimation	<p>L'impulsion au moment de l'impact est plus proche d'un choc totalement inélastique. Lorsqu'on réalise un choc inélastique à 0 % ou un choc élastique à 100 %, l'impact direct sur le capteur est de 38,6 %.</p> <p>En réalité, on peut s'attendre à une valeur plus élevée ; il est possible que le capteur ne réagisse pas assez vite.</p>	<p>L'impulsion en cas d'impact avec un remplissage de 5 % est très proche d'un choc totalement inélastique ; avec un remplissage de 15 %, on se rapproche en revanche d'un choc totalement élastique. En cas de choc inélastique avec un remplissage de 0 % ou de choc élastique avec 100 %, l'impact avec 5 % de remplissage est de 6,4 %, et de 74 % avec un remplissage de 15 %.</p> <p>Avec une densité plus élevée, la bille est « réfléchi » et les valeurs obtenues sont celles attendues.</p>

Propositions pour l'interprétation des résultats

La bille percute la face latérale/la face supérieure du dé fabriqué à partir d'un filament flexible. Cette face est déformée sous le choc, elle absorbe l'énergie créée par la chute en se déformant de manière réversible. Le choc transmis au capteur est ainsi plus faible. Si le matériau est très souple, des forces très faibles suffisent à provoquer une déformation : c'est le cas ici lors de l'impact latéral avec une valeur de remplissage relativement faible. Plus le taux de remplissage est élevé, plus la structure interne de l'objet est resserrée et plus les propriétés d'amortissement sont faibles.

Laissez les élèves discuter des processus physiques concrets à l'œuvre lors de l'impact de la bille et interpréter l'amortissement de l'oscillation après la première déviation.

Vous pouvez inviter les élèves à formuler leurs propres problématiques de recherche, c'est-à-dire à réfléchir aux éléments qui pourraient encore être modifiés et aux prolongements possibles de l'expérience : il est possible par exemple de choisir d'autres motifs de remplissage dans les programmes de tranchage (structures alvéolaires, structures en 3D) et de mesurer leur influence sur l'amortissement (voir image ci-après : motifs de remplissage différents, avec taux de 15 %)

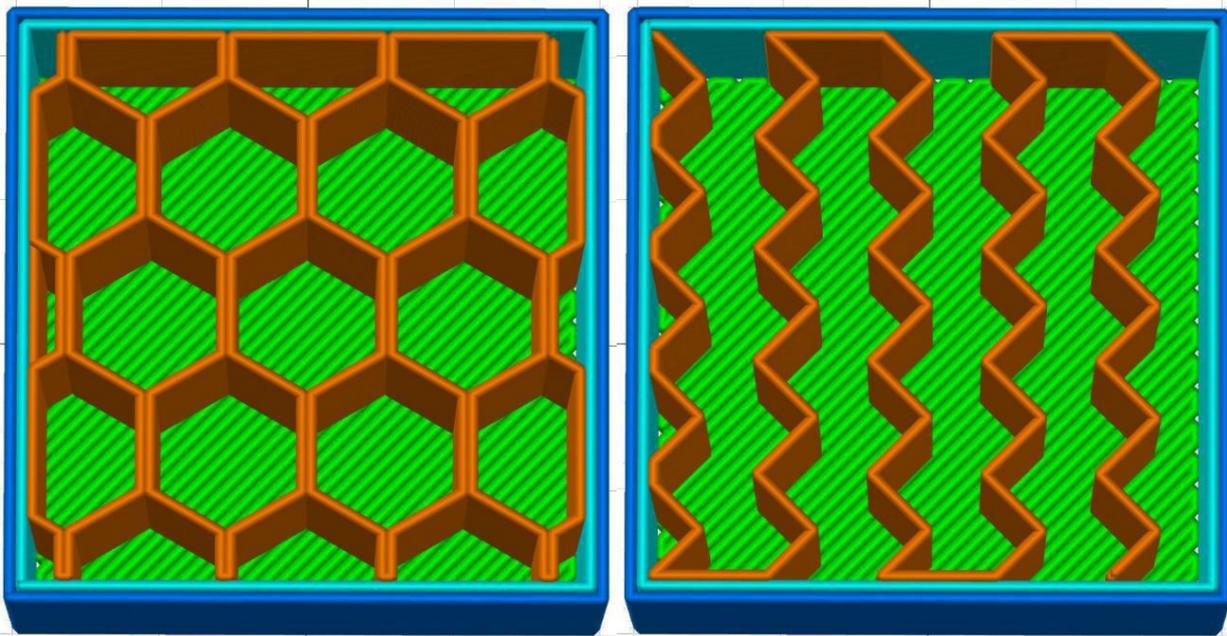


Figure 97 : Motifs de remplissage à 15 % : structure alvéolaire et en zig-zag

Une autre possibilité consiste à travailler avec une résolution différente sur l'axe Z (qualité de l'impression) : comparez par exemple les résultats avec une hauteur d'impression par couche de 0,1 mm et 0,2 mm (ou 0,25 mm). Ces valeurs peuvent également être définies dans le logiciel de tranchage. Mettez à la disposition des élèves des objets de test correspondant, ou demandez-leur de fabriquer ces objets.

Annexe : fabrication d'objets de test (dés avec filament flexible)

Choisissez une vitesse d'impression très lente (10 à 15 mm/s) lorsque vous utilisez un filament flexible, et des températures de 205 à 230 °C pour l'extrusion.

Si vous souhaitez imprimer vos propres objets avec un filament flexible, vous pouvez reprendre les principaux paramètres suivants :

- Dans le champ **Boîtier**, notez 4 ou 5 pour les couches inférieures et supérieures.
- Dans le champ **Remplissage**, saisissez les taux de remplissage souhaités. Choisissez d'abord 15 %, puis "Grillage" comme motif ; vous pourrez par exemple effectuer vos propres séries de tests et comparer des géométries de remplissage différentes en gardant le même taux de remplissage.
- La **température d'impression** doit être comprise entre 205 et 230 °C et la **vitesse** ne doit pas dépasser 15 mm/s ; pour la première couche, elle doit être ramenée à 10 mm/s et à 5 mm/s pour les couches inférieures et supérieures.

Fiche élève expérience 1 : influence de la densité sur les propriétés d'amortissement

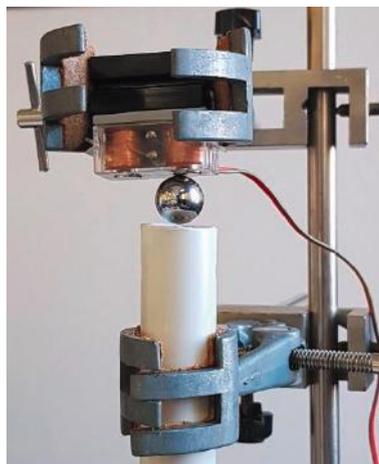
Cette expérience a pour but l'étude des propriétés d'amortissement d'objets 3D fabriqués couche par couche à partir d'un thermoplastique, c'est-à-dire d'un plastique qui se déforme durablement sous l'effet de la chaleur. Comme un pistolet à colle chaude, l'imprimante 3D possède une buse qui donne au plastique la forme d'un fil très fin (le filament). La progression du matériau dans la buse, sa position, sa trajectoire, et le démarrage d'une nouvelle couche sont déterminés par ordinateur. Après refroidissement, le filament est de nouveau rigide. Il est également possible d'utiliser des filaments flexibles (élastomère) : ceux-ci sont mis en forme grâce à la chaleur au moment de l'impression 3D mais demeurent flexibles.

Protocole expérimental

Mettez en place le protocole expérimental (photo ci-contre).

Veillez à coincer légèrement le dé (en le plaçant sur le côté ou à l'aide d'un tube), afin que la bille tombe au centre du capteur.

La force qui frappe le dé doit toujours être la même.



Saisie des valeurs de mesure

- Capteur remis à zéro
- 5000 échantillons/s (ignorez l'avertissement)
- Durée de mesure 0,2 secondes
- Déclenchement en cas de force inférieure à 0,1 N (pression sur le capteur = force dans le sens négatif)
- 20 % des données au préalable

Déroulement de l'expérience

Le dé est percuté par une bille d'acier de diamètre 6 à 8 mm en chute libre ou lancée depuis un plan incliné.

- a) La bille roule le long du plan incliné et tombe sur le dé. Veillez à ce que la position de départ de la bille soit toujours la même (lâchez-la sur le plan incliné sans la pousser).
- b) La bille tombe sur le dé, d'une hauteur constante (elle est lâchée à l'aide d'un électro-aimant par exemple).

L'expérience est réalisée avec des dés de différentes densités (taux de remplissage de 5 %, 15 % et 30 %). Commencez l'expérience avec le dé à 5 % puis réitérez-la en augmentant progressivement le remplissage. Le dé doit être positionné de façon à ce que le capteur et la bille soient orientés vers les faces latérales. La base du dé (ainsi que la densité de remplissage) sont facilement reconnaissables au fait que l'impression est la plus régulière à cet endroit. Le dé doit être dans la même position pour toutes les expériences ; la base doit être positionnée sur le côté.

Interprétation

Décrivez les graphiques générés par la chute de la bille métallique sur les dés possédant différents taux de remplissage. Interprétez les diagrammes.

Quelles sont les différences entre les graphiques et comment peut-on les expliquer ?



REMARQUE : Il est possible de superposer les graphiques, c'est-à-dire de rassembler les résultats des différents « lancers » sur un seul diagramme.

Calculez (à l'aide du logiciel de l'enregistreur de données) l'intégrale de la *force des trois chocs*, comparez les résultats et décrivez les chocs sous la forme mathématique.

Expérience 2 : Choc et propriétés d'amortissement des corps élastiques en fonction de leur position

Au départ, les principes de base de la physique ont été repris d'un sous-domaine de la mécanique. Ils permettaient de décrire et d'analyser les mouvements et les forces, ainsi que leur influence sur les modifications de mouvement, et de comprendre les lois fondamentales comme la gravitation ou la conservation de l'énergie et de l'impulsion. Les expériences réalisées ici permettent d'aborder des concepts et des notions de physique indispensables, qui figurent dans les programmes scolaires du lycée.

La thématique abordée ici (choc et amortissement) se prête à la réalisation d'expériences et de séries de mesure que les élèves peuvent concevoir eux-mêmes ; cette étude pourra même faire l'objet de prolongements.

L'expérience qui suit est prévue pour un cours de deux heures. Comptez 2 à 3 heures pour l'impression des dés en 3D (prévoyez au moins trois dés par groupe d'élèves, avec des taux de remplissage ou structures différentes ; 1,5 h par dé).

Vous pouvez fabriquer vous-même des dés de 2 cm de côté à l'aide d'un programme de construction en 3D, puis exporter le fichier STL et le préparer pour l'impression (tranchage). Reportez-vous au chapitre 3.

Fiche enseignant n°2 : Choc et impression 3D en élastomère.

Influence de la position

Introduction

Les élastomères thermoplastiques sont des plastiques flexibles dans des conditions normales, c'est-à-dire qu'ils peuvent être pliés et déformés sous l'effet d'une force ; si cette force n'est plus exercée, le matériau reprend sa forme initiale. A haute température (avec ce type de plastique, l'impression se fait à une température comprise entre 190 °C et 240 °C), la forme de l'objet est définitive après le refroidissement. Il est ainsi possible de fabriquer des pneus ou des corps d'amortissement par exemple. Les expériences qui suivent sont réalisées avec des dés de 2 cm de côté.

Prérequis pour les élèves

- Conversion et conservation de l'énergie (énergie potentielle, énergie cinétique, éventuellement énergie de rotation en cas d'utilisation d'un plan incliné)
- Énergie élastique (amortissement, déformation élastique)
- Choc, variation d'impulsion

Matériel nécessaire	Enregistrement numérique des données
<ul style="list-style-type: none">· Dé imprimé en 3D de 2 cm de côté, en filament flexible : un dé avec remplissage à 5 %, 15 % et 30 % par groupe d'élèves· Bille d'acier de diamètre 6 à 8 mm sur un plan incliné avec une différence de hauteur de 10 cm minimum ou en chute libre (par exemple déclenchée par la coupure d'un électro-aimant), également avec une différence de hauteur de 10 cm au minimum. Déclenchement possible sans contact (par un électro-aimant par exemple)	Dynamomètre avec +/- 50 N : Vernier DF-BTA pour effectuer des mesures avec une calculatrice graphique Enregistreur de données : TI Nspire avec Lab Cradle

Protocole expérimental

Le capteur de force est équipé d'un crochet dévissable qui enregistre les forces ; ce crochet doit être retiré ; le carré/l'hexagone en métal doit être placé de manière à ce que le corps d'amortissement soit centré et que la bille tombe également au centre de l'objet à tester (qu'il s'agisse d'une chute libre ou qu'elle roule sur un plan incliné).



Figure 99 : Capteur de forces sans crochet - Hexagone pour l'enregistrement de la force (2 formes différentes)

Pour un positionnement optimal du capteur, du dé et de la bille, on peut utiliser un tube vide destiné aux installations électriques, d'un diamètre intérieur suffisamment grand. Le capteur et le tube sont montés sur la table à l'aide de trépiers.



Figure 100 : Exemples de construction :
a) avec fischertechnik, b) avec système de support

Si vous souhaitez utiliser un plan incliné, ajoutez un profilé en U en aluminium pour empêcher que la bille ne dérive sur les côtés.

Installez le système expérimental de façon à ce que le capteur soit posé sur la table. Une fixation du capteur sur le système de support provoque des oscillations importantes lors de la chute de la bille (oscillations de l'ensemble du protocole expérimental ou du système de mesure). Il n'est pas toujours facile de placer d'aligner précisément la bille, l'objet du test et le capteur. Utilisez un niveau à bulle ou un tube en plastique (servant d'habitude à installer les câbles électriques) pour les placer plus facilement.

Les objets imprimés en 3D sont placés entre la pièce hexagonale et la bille ; ils doivent être coincés entre le plan incliné et le capteur, ou placés au milieu du capteur, de manière stable. Si la bille effectue une chute libre avant de percuter le dé, vous pouvez immobiliser ce dernier sur le capteur à l'aide d'un petit tube en plastique qui servira de « guide » pour la bille. Le capteur indique par exemple 2 N et est remis à zéro avant le début de la mesure. Il est également possible de préparer un support pour les dés flexibles, installé directement sur la pièce hexagonale du capteur et imprimé à partir d'un filament en PLA (rigide) avec un taux de remplissage élevé (>50 %). Ceci augmente la surface d'interaction entre le capteur et le dé, ce qui peut réduire l'amortissement. En outre, on peut modéliser l'effet d'inertie de cet adaptateur.

Déroulement de l'expérience : influence de la position de l'objet imprimé sur les propriétés d'amortissement

Cette expérience est réalisée avec un dé (par groupe d'élèves) avec un taux de remplissage faible, par exemple 15 %. L'objectif de cette expérience est d'étudier l'influence de la position du corps d'amortissement ; le dé possède un taux de remplissage global de 15 %, mais le filament flexible servant au remplissage n'est pas forcément réparti de manière homogène dans toutes les directions (voir figure 101).

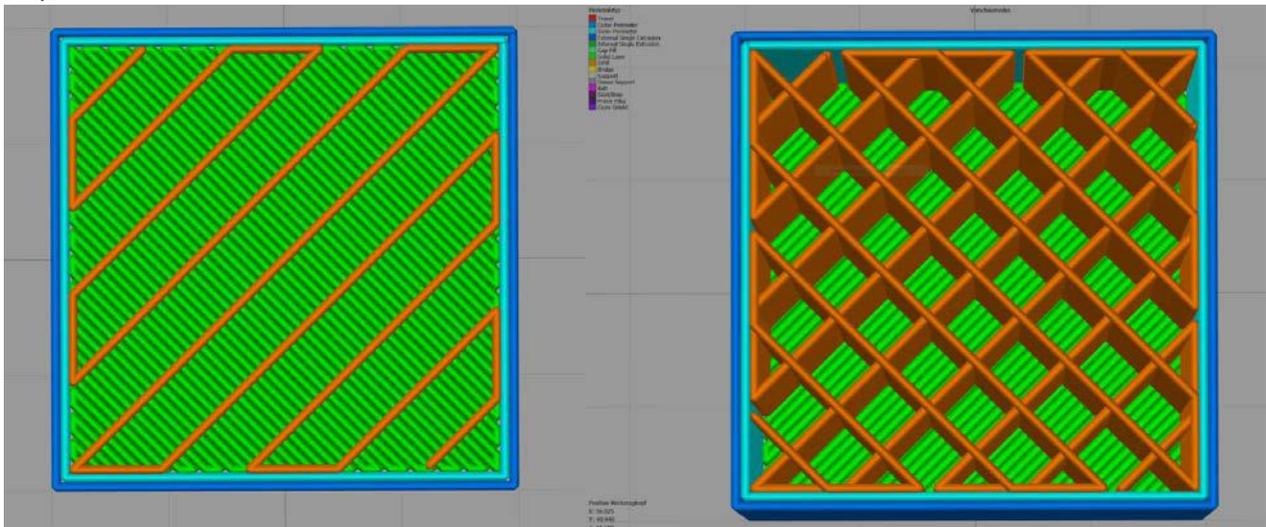


Figure 101 : a) Début de l'impression ; premier niveau avec remplissage
b) Remplissage d'un dé de 2 cm de côté (vue de dessus en oblique)

Le solide est fabriqué couche après couche par l'imprimante 3D et les motifs de remplissage des différentes couches se superposent. Il est également possible de choisir lors du tranchage le motif de remplissage, dont la structure change le long de l'axe Z pendant la formation de la couche. Ces paramètres ne sont pas pertinents pour notre expérience mais peuvent faire l'objet d'une étude complémentaire.

Avec un taux de remplissage faible, les motifs sont empilés en zig-zag. Par conséquent, la disposition du filament flexible dans le corps visible en cas de coupe parallèle à l'axe xy est différente de celle obtenue par une coupe parallèle à l'axe z. L'expérience a pour but d'étudier l'impact de ces différences géométriques sur les propriétés d'amortissement. C'est pourquoi on utilisera ici uniquement des dés identiques avec un remplissage homogène.

a) Réglage pour l'enregistrement des données

Si vous utilisez un plan incliné pour provoquer la chute de la bille sur le dé, il peut être intéressant de coincer le dé entre le capteur et le plan incliné. La chute doit s'effectuer autant que possible avec une force constante, par exemple 2 N. Pour cela, remettez d'abord le capteur à zéro afin que le dé soit percuté avec la même force à chaque tentative. Avant la mesure, il faut donc réinitialiser une nouvelle fois le capteur afin que seule la force soit prise en compte.

Pour la saisie des données, il est judicieux d'installer un système de déclenchement qui démarre l'enregistrement dès qu'un certain seuil est atteint. Pour que les valeurs précédant immédiatement l'événement (l'impact de la bille sur le dé) puissent également être exploitées, 20 % des données sont sauvegardées dans une mémoire circulaire avant l'événement.

Remettez le capteur à zéro avant la mesure pour pouvoir comparer plus facilement les séries de mesures. Attention, la remise à zéro du capteur modifie les paramètres de déclenchement enregistrés dans le logiciel . Pour régler les paramètres de mesure, suivez la procédure ci-dessous :

- | | | | |
|---|--|---|---|
| 1 | Capteur sur zéro | 3 | Capteur sur zéro |
| 2 | Coincer le cas échéant l'objet du test (environ 2 N) | 4 | Régler la fréquence d'échantillonnage et le déclenchement |

Installez les paramètres suivants sur le TI Nspire :

- 5000 échantillons/s (ignorez l'avertissement)
- Durée de mesure 0,2 secondes
- Déclenchement en cas de force inférieure à 0,1 N (pression sur le capteur = force dans le sens négatif)
- 20 % des données au préalable

b) Analyse et interprétation des résultats

En fonction du niveau de classe, les séries de mesure peuvent être exploitées de manière qualitative ou quantitative. La force exercée sur le dé a été mesurée, l'axe Z représente la structure en couches. Les structures de remplissage sont superposées et donnent une répartition spatiale de l'élastomère différente de celle obtenue avec un choc latéral (voir figures 102 et 103).

Une interprétation qualitative permet d'évaluer l'orientation spatiale, tandis qu'une interprétation quantitative (pour les classes supérieures du lycée) inclut les valeurs de mesure numériques et décrit l'influence de la position, par exemple grâce à la formation d'intégrales. Les graphiques ci-dessous illustrent l'influence de la position ; dans le premier cas, le choc a lieu sur une face latérale du dé (la structure de remplissage est moins dense à cet endroit), dans le deuxième cas, sur la face du dessus, c'est-à-dire parallèlement au procédé d'impression. La superposition des deux courbes montre l'amortissement en cas de choc parallèlement aux plans d'impression.

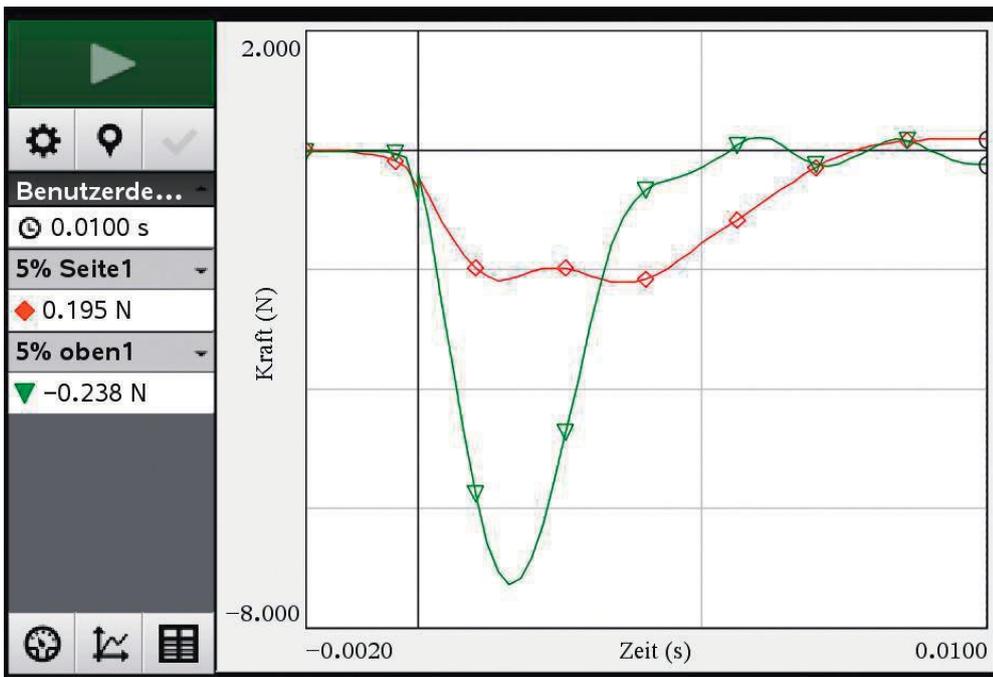


Figure 102 : Comparaison des deux types de choc - en vert : choc sur la face du dessus ; en rouge : choc sur la face latérale, remplissage de 5 %

Utilisez uniquement la première partie pour l'interprétation des résultats (comme sur le graphique ci-dessous). Si on augmente le taux de remplissage à 15 %, l'influence de la position sur l'amortissement est moindre.

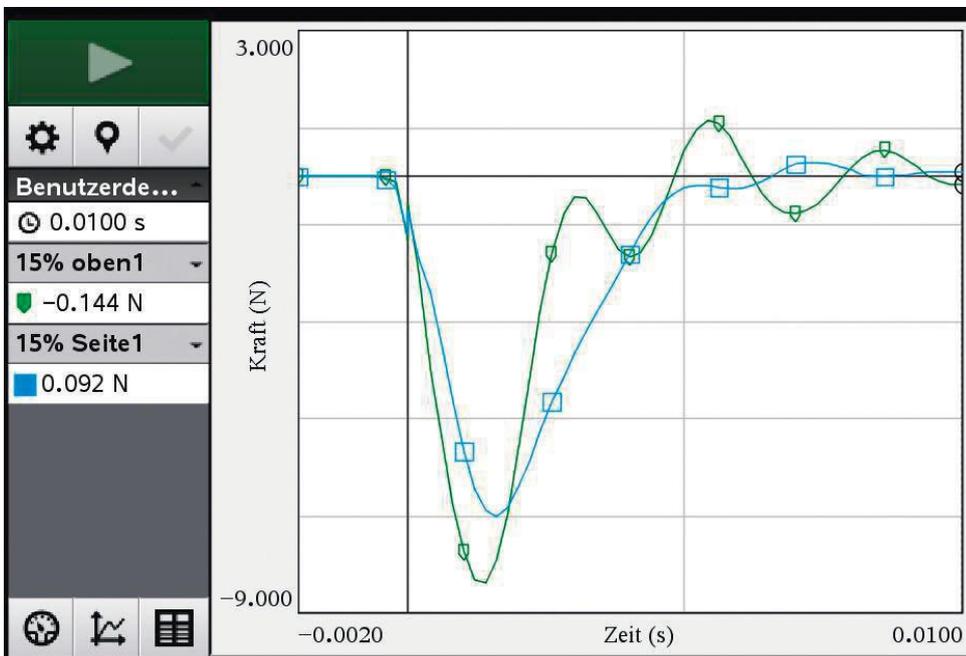


Figure 103 : Comparaison des deux types de choc - en vert : choc sur la face du dessus ; en rouge : choc sur la face latérale, remplissage de 15 %

Exemple d'analyse quantitative

Comme dans la première expérience, on utilise pour une analyse quantitative les résultats des expériences enregistrés par l'appareil numérique, afin de calculer l'impulsion.

Pour cela, on choisit dans le logiciel d'exploitation une vue permettant de visualiser entièrement la déviation provoquée par le choc. La courbe de variation entre les deux points zéro s'affiche et l'intégrale correspondant à cette zone est calculée.

Répétez cette démarche pour les deux essais de façon à pouvoir comparer les deux intégrales. Pour évaluer l'enregistrement des mesures, il est judicieux d'effectuer un test de collision sans solide et de calculer l'intégrale correspondante. Lorsque vous comparez les hauteurs de chute, prenez en compte la hauteur du dé (2 cm) : la distance à parcourir est d'autant plus grande en cas d'impact direct sur le capteur (sans solide). Il est possible sur cette base de comparer de manière empirique et de manière théorique les impulsions transmises (elles doivent être situées entre un choc totalement élastique et un choc inélastique).

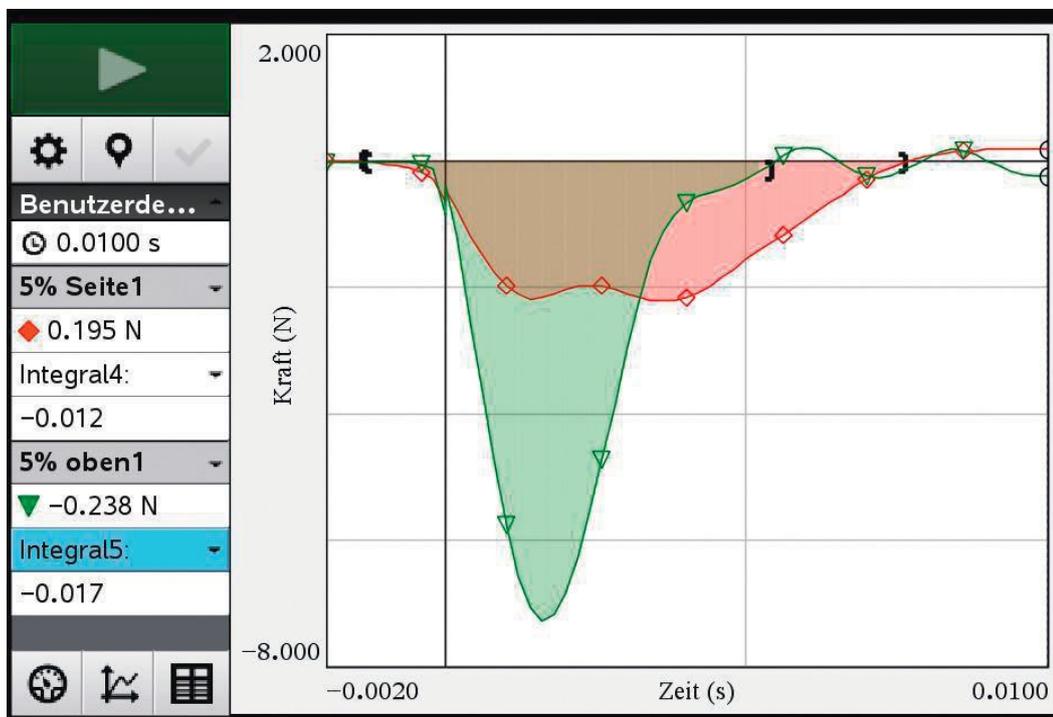


Figure 104 : Intégrale - en vert : choc sur la face du dessus ; en rouge : choc sur la face latérale, remplissage de 5 %

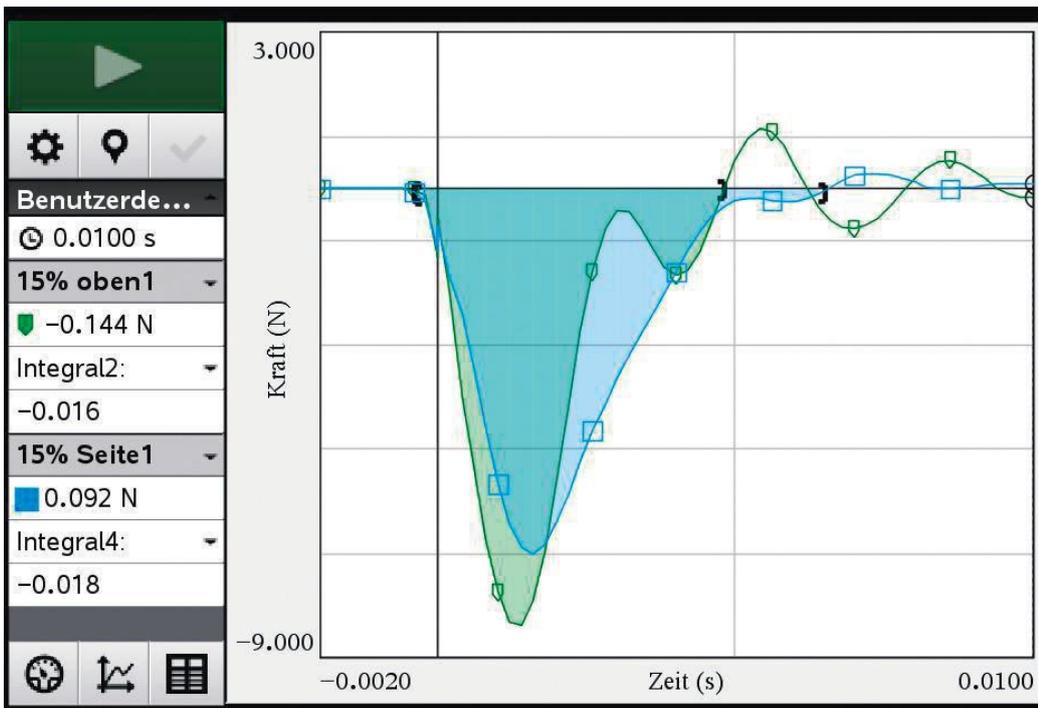


Figure 105 : Intégrale - en vert : choc sur la face du dessus ; en rouge : choc sur la face latérale, remplissage de 15 %

Ceci est obtenu en croisant les données concernant le remplissage et la position lors de l'impact, de sorte qu'il faudra étudier quatre intégrales. Pour évaluer l'enregistrement des mesures, il est judicieux d'effectuer un test de collision sans solide et de calculer l'intégrale correspondante. Il est possible sur cette base de comparer de manière empirique et de manière théorique les impulsions transmises (elles doivent être situées entre un choc totalement élastique et un choc inélastique).

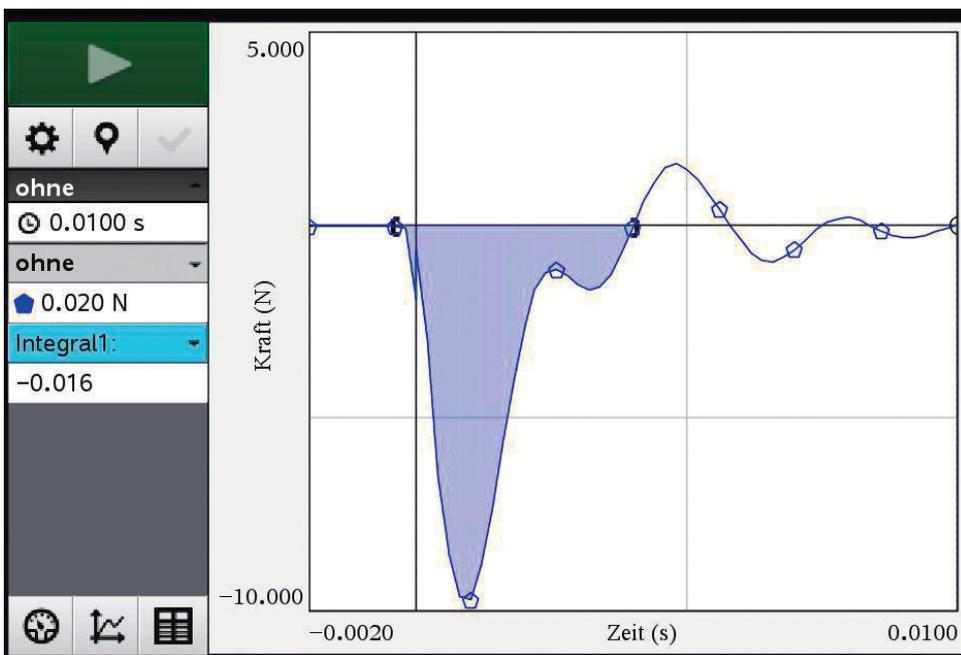


Figure 106 : Intégrale - Chute de la bille directement sur le capteur - Hauteur de chute 10,1 cm

A partir de données connues (hauteur de chute et accélération de la gravité), il est possible de calculer d'abord la vitesse de l'impact, qui permet ensuite de connaître l'impulsion lors de l'impact grâce au poids de la bille. La modification de l'impulsion en cas de choc totalement élastique ou totalement inélastique peut être déterminée et comparée avec les valeurs obtenues de manière empirique.

	sans le dé	avec le dé
Données	<ul style="list-style-type: none"> Hauteur de chute (h) sans dé servant d'objet de test : h = 0,101 m Masse de la bille m = 0,0082 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Hauteur de chute (h) avec dé servant d'objet de test : h = 0,081 m Masse de la bille m = 0,0082 kg
Vitesse au moment de l'impact v ₀	$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,101\text{m}}$ $\approx 1,40746 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,081\text{m}}$ $\approx 1,26043 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Impulsion au moment de l'impact	$p_0 = m \cdot v_0$ $p_0 \approx 1,40746 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0082\text{kg}$ $\approx 0.011541 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$p_0 = m \cdot v_0$ $p_0 \approx 1,26043 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0082\text{kg}$ $\approx 0.010336 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
Modification de l'impulsion avec un :		
Choc totalement élastique	$\Delta p_{\text{elast}} = 2 \cdot p_0$ $\approx 0.023082 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$\Delta p_{\text{elast}} = 2 \cdot p_0$ $\approx 0.020671 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
Choc totalement inélastique	$\Delta p_{\text{inelast}} = p_0$ $\approx 0.011541 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$\Delta p_{\text{inelast}} = p_0$ $\approx 0.010336 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
déterminé expérimentalement	$\Delta p_{\text{exper}} \approx 0.016 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	Impact latéral 5 % $\Delta p_{\text{exper}_5\%} \approx 0.012 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ Impact sur le dessus 5 % $\Delta p_{\text{exper}_15\%} \approx 0.017 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ Impact latéral 15 % $\Delta p_{\text{exper}_5\%} \approx 0.016 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ Impact sur le dessus 15 % $\Delta p_{\text{exper}_15\%} \approx 0.018 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$

<p>Estimation</p>	<p>L'impulsion au moment de l'impact se rapproche d'un choc totalement inélastique. Lorsqu'on réalise un choc inélastique à 0 % ou un choc élastique à 100 %, l'impact direct sur le capteur est de 38,6 %.</p> <p>En réalité, on peut s'attendre à une valeur plus élevée ; il est possible que le capteur ne réagisse pas assez vite.</p>	<p>L'impulsion en cas d'impact avec un remplissage de 5 % est très proche d'un choc totalement inélastique ; avec un remplissage de 15 %, on se rapproche en revanche d'un choc totalement élastique. En cas de choc inélastique avec un remplissage de 0 % ou de choc élastique avec 100 %, on obtient les résultats suivants :</p> <p>5 % - Impact latéral : 16,1 % 5 % - Impact sur le dessus : 64,5 %</p> <p>15 % - Impact latéral : 54,8 % 15 % - Impact sur le dessus : 74,1 %</p> <p>Avec une densité plus élevée ou un impact sur le dessus, la bille est « réfléchi » et les valeurs obtenues sont celles attendues.</p>
--------------------------	---	---

Laissez les élèves discuter des processus physiques concrets à l'œuvre lors de l'impact de la bille et interpréter l'amortissement de l'oscillation après la première déviation.



REMARQUE : La bille percute la face latérale/la face supérieure du dé fabriqué à partir d'un filament flexible. Cette face est déformée sous le choc, elle absorbe l'énergie créée par la chute en se déformant de manière réversible. Le choc transmis au capteur est ainsi plus faible. Si le matériau est très souple, des forces très faibles suffisent à provoquer une déformation : c'est le cas ici lors de l'impact latéral, puisqu'à cet endroit la densité est plus faible que sur la face du dessus. C'est le procédé d'impression (couche par couche) qui explique l'absence d'homogénéité de l'épaisseur dans le dé. La force qui provoque la déformation est restituée à la bille, on peut ainsi observer un amortissement de l'oscillation du système dans son ensemble (bille/dé/capteur)

Annexe : fabrication de l'objet de test (dé avec filament flexible)

Choisissez une vitesse d'impression très lente (10 à 15 mm/s) lorsque vous utilisez un filament flexible, et des températures de 205 à 230 °C pour l'extrusion.

Si vous souhaitez imprimer vos propres objets avec un filament flexible, vous pouvez reprendre les principaux paramètres suivants :

- Dans le champ **Boîtier**, notez 4 ou 5 pour les couches inférieures et supérieures.
- Dans le champ **Remplissage**, saisissez les taux de remplissage souhaités. Choisissez d'abord 15 %, puis "Grillage" comme motif ; vous pourrez par exemple effectuer vos propres séries de tests et comparer des géométries de remplissage différentes en gardant le même taux de remplissage.
- La **température d'impression** doit être comprise entre 205 et 230 °C et la **vitesse** ne doit pas dépasser 15 mm/s ; pour la première couche, elle doit être ramenée à 10 mm/s et à 5 mm/s pour les couches inférieures et supérieures.

Fiche élève expérience 2 : influence de la position sur les propriétés d'amortissement

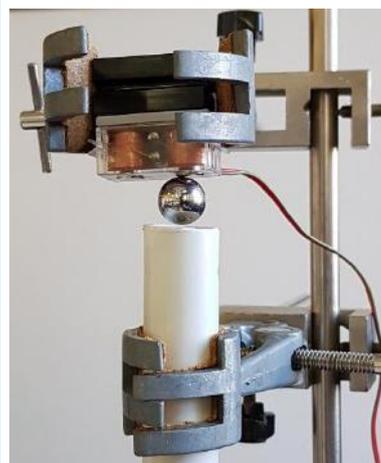
Cette expérience a pour but l'étude des propriétés d'amortissement d'objets 3D fabriqués couche par couche à partir d'un thermoplastique, c'est-à-dire d'un plastique qui se déforme durablement sous l'effet de la chaleur. Comme un pistolet à colle chaude, l'imprimante 3D possède une buse qui donne au plastique la forme d'un fil très fin (le filament). La progression du matériau dans la buse, sa position, sa trajectoire, et le démarrage d'une nouvelle couche sont déterminés par ordinateur. Après refroidissement, le filament est de nouveau rigide. Il est également possible d'utiliser des filaments flexibles (élastomère) : ceux-ci sont mis en forme grâce à la chaleur au moment de l'impression 3D mais demeurent flexibles.

Protocole expérimental

Mettez en place le protocole expérimental (photo ci-contre).

Veillez à coincer légèrement le dé (en le plaçant sur le côté ou à l'aide d'un tube), afin que la bille tombe au centre du capteur.

La force qui percute le dé doit toujours être la même.



Saisie des valeurs de mesure

- Capteur remis à zéro
- 5000 échantillons/s (ignorez l'avertissement)
- Durée de mesure 0,2 secondes
- Déclenchement en cas de force inférieure à 0,1 N (pression sur le capteur = force dans le sens négatif)
- 20 % des données au préalable

Déroulement de l'expérience

Le dé est percuté par une bille d'acier de diamètre 6 à 8 mm en chute libre ou lancée depuis un plan incliné.

- a) La bille roule le long du plan incliné et tombe sur le dé. Veillez à ce que la position de départ de la bille soit toujours la même (lâchez-la sur le plan incliné sans la pousser).
- b) La bille tombe sur le dé, d'une hauteur constante (elle est lâchée à l'aide d'un électro-aimant par exemple).

L'expérience est réalisée avec un dé possédant une taux de remplissage de 15 %. Dans un premier temps, le dé est positionné de façon à ce que les couches d'impression soient placés à l'horizontale. Dans une deuxième expérience, le dé est tourné à 90°, si bien que les couches d'impression sont à la verticale.

Interprétation

Décrivez les graphiques générés par la chute de la bille métallique sur les dés possédant différents taux de remplissage. Interprétez les diagrammes.

Quelles sont les différences entre les graphiques et comment peut-on les expliquer ?



REMARQUE : Il est possible de superposer les graphiques, c'est-à-dire de rassembler les résultats des différents « lancers » sur un seul diagramme.

Calculez (à l'aide du logiciel de l'enregistreur de données) l'intégrale de la force des trois chocs, comparez les résultats et décrivez les chocs sous la forme mathématique.

Expérience 3 : Résistance des objets 3D - Influence de la position lors de l'impression

L'expérience qui suit se distingue des précédentes par le fait que l'objet testé est détruit : il s'agit d'un *essai destructif*.

Il s'agit de définir la force nécessaire pour détruire un objet imprimé en 3D, en faisant varier un seul paramètre par essai afin de déterminer l'influence de ce paramètre sur la résistance de l'objet. Dans cet expérience, on étudiera l'influence de la position de l'objet pendant l'impression sur sa résistance.

Il peut exister selon l'objet plusieurs façons de le placer sur le plateau d'impression. L'impression se fait couche par couche, si bien que l'emplacement et la direction déterminent la position de ces couches dans le modèle. Pour cette expérience, il est préférable d'utiliser à nouveau un corps simple : un pavé droit d'une surface de base de 5 x 5 mm² et d'une hauteur de 50 mm. Celui-ci peut être imprimé à la verticale ou à l'horizontale.

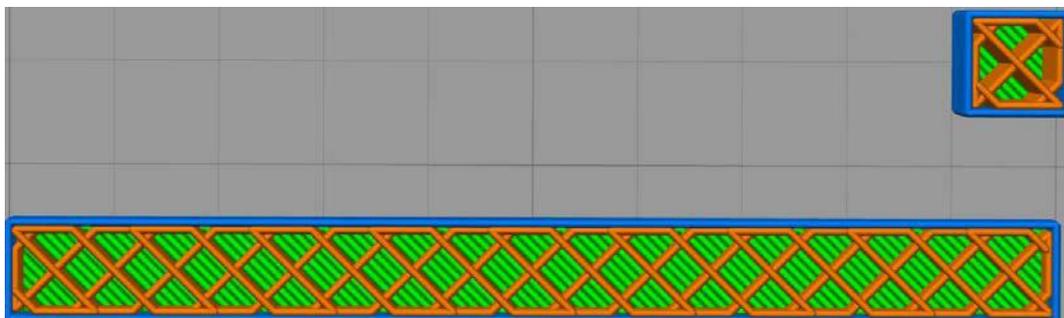


Figure 108 : Objet pour essai destructif, imprimé à la verticale et à l'horizontale



REMARQUE : Les élèves peuvent prévoir d'autres séries de mesure et étudier d'autres paramètres comme la résolution d'impression (hauteur de la couche), la température, la vitesse d'impression, le motif de remplissage, la marque du filament ou sa couleur (additifs et pigments différents), ou même comparer différents types de matériaux. Ces expériences complémentaires sont adaptées à des travaux de recherche en autonomie ; cependant, les conséquences peuvent s'avérer très peu marquées, il peut donc être nécessaire d'utiliser un autre protocole d'expérience, permettant des mesures plus standardisées (le capteur n'est pas tenu à la main par exemple, ou un testeur de structure le cas échéant).

Fiche enseignant n°3 : Test de résistance avec un pavé droit imprimé en 3D. Influence de la position de l'objet lors de l'impression

Introduction

La fabrication d'un objet en impression 3D s'effectue couche après couche : de nombreuses couches (« Layers ») sont imprimées à partir d'un fil de plastique fondu de 0,4 mm de diamètre ; ce fil forme les contours et les remplissages de l'objet. Lorsque la quantité de matériau nécessaire à la réalisation d'une couche est suffisante, le plateau d'impression bascule (axe Z) et une nouvelle couche de matériau est appliquée.

La résistance d'un objet dépend donc de la résistance au déchirement du matériau et de l'adhérence des différentes couches entre elles. Certains objets ne peuvent pas être imprimés dans n'importe quelle position (en fonction du modèle d'imprimante et des paramètres, les porte-à-faux peuvent être difficiles à imprimer ou nécessitent un support) ; c'est pourquoi nous avons choisi pour l'expérience qui suit un corps simple, qui peut être placé aussi bien à l'horizontale qu'à la verticale pour l'impression.

L'objectif de cette expérience est de mesurer la résistance d'un pavé droit de 5 x 5 x 50 mm³, imprimé à la verticale et à l'horizontale. Pour cela, on détermine la force nécessaire pour briser le solide. A l'aide d'un capteur de force et d'un enregistreur de données, on étudie ainsi l'influence de la position lors de l'impression sur la résistance de l'objet.

Prérequis pour les élèves

- Force
- Lois des leviers
- (Couple ?)

Matériel nécessaire	Enregistrement numérique des données
<ul style="list-style-type: none">• Pavé droit imprimé en 3D (5 x 5 x 50 mm³) : 2 ou 3 par groupe d'élèves, imprimés à la verticale et à l'horizontale• Étau ou bornes à vis pour la fixation	<ul style="list-style-type: none">• Dynamomètre avec +/- 50 N : Vernier DF-BTA pour effectuer des mesures avec une calculatrice graphique• Enregistreur de données : TI Nspire avec Lab Cradle

Protocole expérimental

Les élèves ont à leur disposition plusieurs pavés imprimés à la verticale ou à l'horizontale (chaque groupe d'élèves doit pouvoir effectuer des expériences avec des pavés imprimés dans les deux directions). On commence par placer à l'aide d'un feutre des traits de marquage à 5 mm de chaque bord des objets afin que ceux-ci soient tous fixés à la même distance et que le capteur soit toujours accroché au même endroit.

Les élèves émettent d'abord des hypothèses (quel solide est le plus résistant ?) et les consignent sur la fiche de travail (voir plus loin : fiche élève n°3).

On commence par serrer dans l'étau le solide imprimé à la verticale, puis on place le crochet du capteur de force au niveau du deuxième marquage et on remet à zéro le capteur de l'enregistreur de données. Le capteur est tenu à la main.



Figure 109 : Le solide est serré dans l'étau - La force appliquée ici est de 6,7 N

Dès que l'enregistrement des données commence, le capteur est tiré à l'horizontale avec une force croissante, jusqu'à ce que le solide casse. La durée de mesure est de 5 secondes avec le paramétrage standard du logiciel ; cette durée peut être augmentée si nécessaire. Après avoir testé le pavé imprimé à la verticale, les élèves testent de la même façon celui imprimé à l'horizontale.

Réglage de la durée de mesure

La durée de mesure est réglée automatiquement sur 5 secondes, avec 50 mesures/s ; elle peut être utilisée directement ou augmentée. Utilisez sur le capteur la valeur la plus élevée (± 50 N).

Exploitation des données

Les courbes du graphique ci-dessous représentent la force appliquée sur le solide imprimé à la verticale et à l'horizontale.

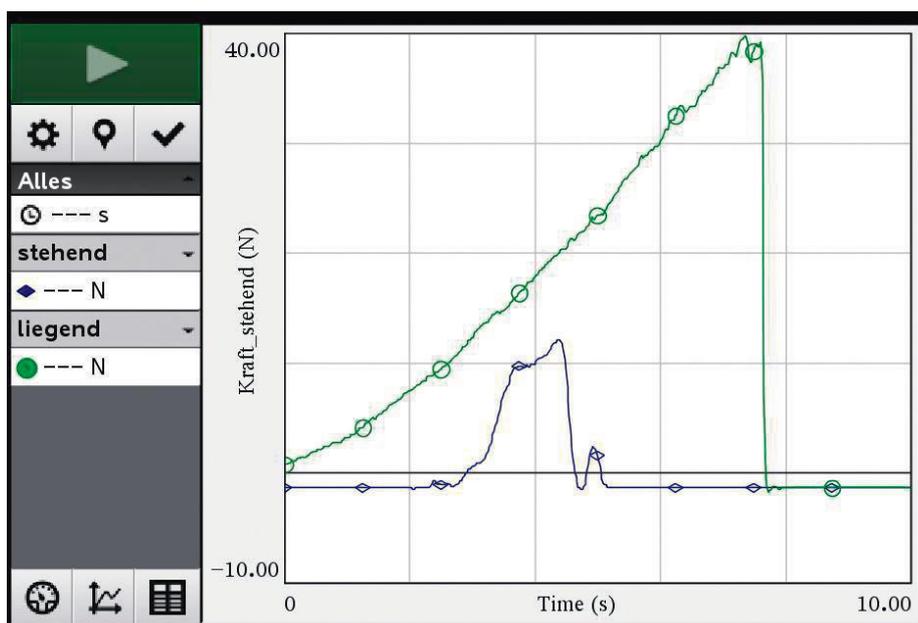


Figure 110 : Test de résistance avec un solide imprimé à la verticale et à l'horizontale

Les solides imprimés à la verticale cassent beaucoup plus vite. Ceci s'explique par le fait que la surface d'adhérence entre les couches est beaucoup plus faible lorsque le solide est imprimé à la verticale. Si on ne tient pas compte du taux de remplissage, on a une surface maximale de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ pour les solides imprimés à la verticale, contre $5 \times 50 \text{ mm}^2$ pour ceux imprimés à l'horizontale. Cette surface maximale vaut uniquement pour l'impression de corps pleins.

Cette expérience n'est cependant pas un test de qualité classique car non seulement les forces s'exercent à la verticale sur la couche d'impression, mais en plus un couple de torsion est appliqué sur le solide à cause de la traction latérale.

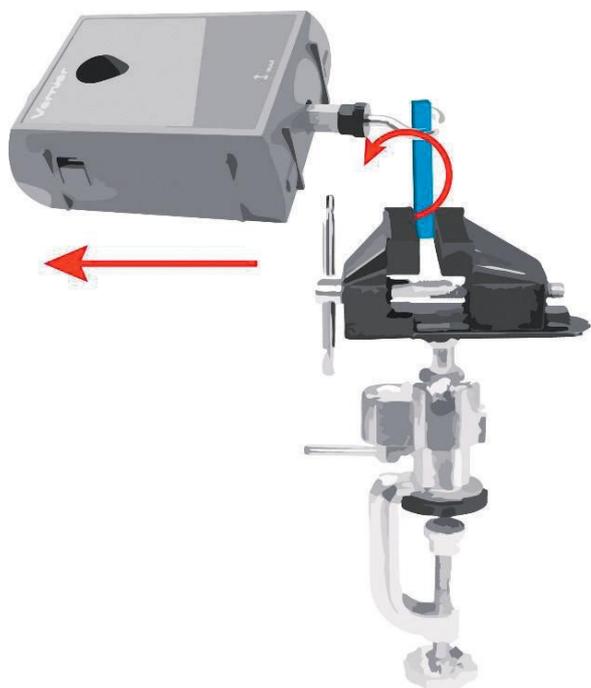


Figure 111 : Forces exercées lors du test de résistance (traction, couple de torsion)

Fiche élève expérience 3 : Test de résistance avec un pavé droit imprimé en 3D. Influence de la position de l'objet lors de l'impression.

L'objectif de cette expérience est de tester la résistance d'objets imprimés en 3D. Pour cela, on utilise des pavés droits (L = 5 mm, l = 5 mm, H = 50 mm) imprimés à la verticale et à l'horizontale. On peut déduire le sens d'impression en observant les petites rainures sur le solide. Le test a pour but de déterminer l'impact que peut avoir la position de l'objet lors de l'impression couche par couche sur sa résistance. Ce critère peut être déterminant pour la construction de structures porteuses ou de pièces supportant une forte sollicitation mécanique (roues dentées par exemple).

Protocole expérimental

Vous avez à votre disposition plusieurs pavés imprimés à la verticale ou à l'horizontale (un pavé imprimé dans chaque direction par élève). Faites un trait blanc au feutre sur le côté le plus long, à 5 mm des bords inférieur et supérieur. Serrez le pavé dans l'étau au niveau de l'une de ces marques ; serrez suffisamment pour qu'il ne puisse pas glisser ni bouger, mais pas trop pour ne pas l'écraser. Placez le crochet du capteur de force sur le deuxième marquage. Le capteur est tenu à la main (voir photo ci-après).

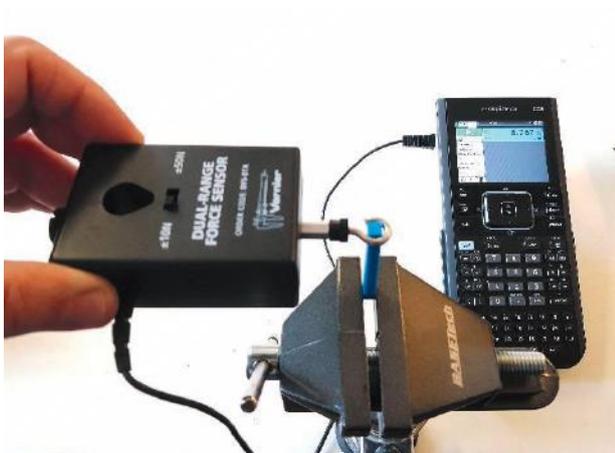


Figure 112 : Le solide est serré dans l'étau - La force appliquée ici est de 6,7 N

Réglage de la durée de mesure

La durée de mesure est réglée automatiquement sur 5 secondes, avec 50 mesures/s ; elle peut être utilisée directement ou augmentée. Utilisez sur le capteur la valeur la plus élevée (± 50 N).

Prévisions :

Avant d'effectuer les tests, consignez vos attentes et vos hypothèses dans le tableau ci-dessous :

Sens d'impression	Cassé en premier/dernier ?	Raison
horizontal		
vertical		

Réalisation de l'expérience

Serrez l'objet à tester dans un petit étau et placez le crochet du capteur à environ 5 mm du bord de l'objet. Le capteur doit être tenu à la main.



Le capteur doit être remis à zéro avant la mesure (maintenez-le le plus immobile possible ; de petits écarts sont tolérés dans le cas d'expériences pratiques). Dès que la mesure démarre, tirez sur le capteur parallèlement au plateau d'impression jusqu'à ce que le solide en 3D se brise. Répétez l'expérience plusieurs fois avec des solides similaires, pour vérifier les résultats. Répétez ensuite le test avec l'autre sens au moment de l'impression (vertical ou horizontal).

Exploitation des données

Décrivez ce que vous avez observé pendant l'expérience :

Quel solide a été détruit en premier ? Vos observations confirment-elles vos hypothèses ?

Comment peut-on expliquer les différences de résistance ?

Les points de rupture sont-ils similaires ?

Pour des expériences ultérieures : Quels paramètres d'impression peuvent avoir une influence sur la solidité des objets 3D ? Proposez une expérience permettant de vérifier votre hypothèse.