

# Démarrer en impression 3D

Augmentez la puissance de vos idées en les matérialisant.

Introduction	3
L'impression 3D FDM	3
Terminologie	4
Général:	4
Formats de fichiers	5
Imprimantes 3D	5
Modélisation avec Tinkercad	6
Design challenge 1: Badge nominatif	6
Trancheurs, STLs, et impression 3D	12
Surplombs	14
Orientation	15
Conception intelligente	15
Remplissage et contours	17
Défi 1 : Types de résistances et impression 3D	19
Défi 2 : Un pont d'autoroute	20
Cahier des charges :	20
Prérequis :	20
Conception et impression	20
Calculs et mesures	21
Auto-évaluation et réflexion	23
Comment équilibrer structure et liberté dans un projet	24
Que dit la littérature?	24
Le système de coordonnées Oresmien	26
Bateaux	26
Catapulte	27
Toupie	27
Conclusion	27
Références	29
Impression 3D en général	29
Technologie en éducation, et makerspaces	29
Logiciels de CAO	29

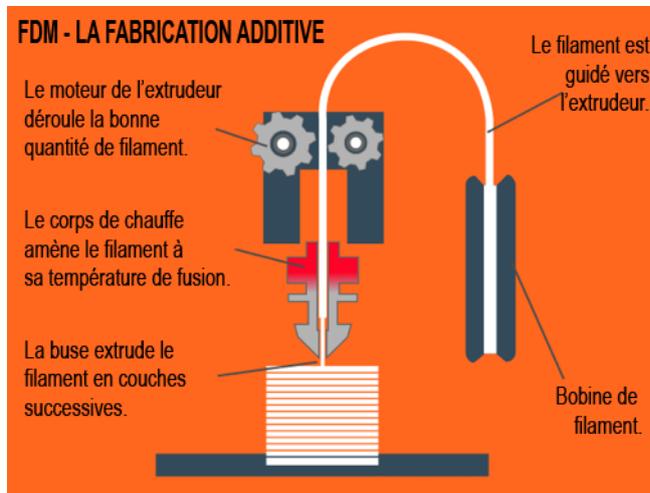


## Introduction

Les imprimantes 3D accèdent lentement mais sûrement aux salles de classe et aux établissements d'enseignement, de l'école primaire à l'université. La technologie offre la grande promesse de connecter le monde virtuel au physique en offrant la possibilité de voir les volumes numériques créés sur un ordinateur prendre vie. Cependant, l'intégration réussie de la technologie dans les salles de classe pour en faire un outil omniprésent pour tous peut être décourageante. Ce guide est une tentative pour faciliter ce voyage et pour arriver au point où des idées nouvelles pourront être enseignées à l'aide de la technologie la plus disruptive du XXI<sup>e</sup> siècle. Le processus de mise en service et d'utilisation des imprimantes 3D doit toujours impliquer les directeurs d'école, les enseignants et, bien sûr, les étudiants. Cela en fait une tâche qui nécessitera toujours beaucoup de ressources, quel que soit le soutien fourni par les différents acteurs. Toutefois, le retour sur investissement peut être immense, et ce document présentera des exemples de plans de cours qui ont été testés et qui ont donné d'excellents résultats en classe. Au cours de ces sessions, les étudiants se sont vraiment immergés dans les projets et de nombreux résultats d'apprentissage intéressants et profonds ont été observés.

## L'impression 3D FDM

Bien qu'il existe plusieurs technologies différentes pour l'impression 3D, les imprimantes 3D FDM ou FFF sont souvent utilisées dans les salles de classe. D'autres systèmes, tels que



SLA et SLS, sont souvent trop coûteux ou peu pratiques pour une utilisation en classe. L'impression 3D FDM fonctionne selon un principe assez simple, qui consiste à déplacer une tête d'impression tout en extrudant du plastique fondu, créant ainsi des objets couche par couche. Cependant, le paramétrage fin d'une imprimante 3D devient rapidement complexe. De nombreux problèmes peuvent être rencontrés lors de l'utilisation de cette méthode de fabrication et de nombreuses solutions différentes

existent. Dans cette section, nous ne tenterons pas de passer en revue tous les aspects de l'impression 3D FDM, car ils sont trop nombreux. Au lieu de cela, le vocabulaire sera fourni pour les termes clés de l'impression 3D FDM, et d'autres sources seront mentionnées. La communauté de l'impression 3D est très active dans le partage, ce qui signifie que l'on peut trouver en ligne une grande quantité de matériaux de qualité pour presque tous les aspects de l'impression 3D FDM.

## Terminologie<sup>1</sup>

L'impression 3D étant un domaine encore nouveau, la terminologie du secteur peut parfois être source de confusion et même être contradictoire. Vous trouverez ci-dessous une liste relativement courte de terminologie pouvant vous aider à démarrer. La liste est loin d'être complète, mais les bonnes sources en ligne devraient contenir des termes avec lesquels vous n'êtes pas familier.

### Général:

- **Fabrication Additive**
  - La fabrication additive est le processus de création d'un objet en trois dimensions, une couche mince à la fois. L'impression 3D n'est que l'une des catégories de la fabrication additive, bien que les deux termes soient souvent considérés comme identiques.
- **Conception Assistée par Ordinateur (CAO)**
  - La conception assistée par ordinateur, ou CAO, est le logiciel qui permet aux utilisateurs de créer des modèles dans des formats bidimensionnels ou tridimensionnels. Alors que la CAO a été initialement développée pour être utilisée dans les industries de l'architecture et de la fabrication, les applications conviviales pour le consommateur sont désormais facilement disponibles pour un coût minime ou nul.
- **Fabrication par Fusion de Filament (FFF)**
  - Une technologie de fabrication additive basée sur le principe de la pose de matériaux en couches. Il a des similitudes avec le terme FDM (modélisation du dépôt fondu), cependant, FDM est un terme de marque déposée. Donc FFF sera utilisé dans la suite de ce document.
- **Filament**
  - Le matériau utilisé pour l'impression 3D. Il a la forme d'un fil et est généralement enroulé sur une bobine. Il est habituellement constitué de différents matériaux plastiques.
- **Acide Poly lactique (PLA)**
  - Un bioplastique dur, sans odeur et à faible impact environnemental. Il est dérivé de ressources renouvelables à base d'amidon. Le PLA a un très faible retrait en refroidissant, ce qui est idéal pour les modèles 3D et le prototypage personnel.
- **Résolution de couche**
  - La résolution de la couche (ou hauteur de la couche) décrit l'épaisseur d'une couche de l'impression 3D.
- **Tranchage**
  - Processus de conversion d'un modèle 3D, tel qu'un fichier STL, en un fichier imprimable, tel qu'un G-code ou F-code. Il divisera le modèle en «tranches» afin que l'imprimante 3D puisse le construire couche par couche. Exemples de trancheurs : Cura, Slic3r, Simplify 3D et REALVision, le trancheur de Create it REAL.

---

<sup>1</sup> Cette liste a été réalisée en s'inspirant des ressources suivantes :

<https://ultimaker.com/en/resources/11720-terminology> <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/definitive-3d-printing-glossary>  
<https://all3dp.com/1/3d-printing-terms-terminology-glossary/>

## Formats de fichiers

- **STL**
  - Un format de fichier largement utilisé pour décrire des modèles 3D lors de l'impression 3D.
- **G-code**
  - Un format de fichier utilisé pour les modèles d'impression 3D (après le découpage en tranches).
- **F-code**
  - Un format de fichier utilisé par Create it REAL pour atteindre des vitesses élevées. Le F-code est plus proche de la machine que le G-code, ce qui active certaines fonctionnalités de la plate-forme Create it REAL.

## Imprimantes 3D

- **Extrudeur**
  - Un nom commun aux pièces qui contrôlent l'extrusion du filament.
- **Tête d'impression**
  - La partie d'une imprimante 3D où le matériau est extrudé. C'est un assemblage de plusieurs composants, y compris la buse dans le cas de machines FFF.
- **Buse**
  - La partie d'une imprimante 3D où le matériau de construction est extrudé.
- **Lit d'impression**
  - Le lit est une surface plane, sur laquelle l'objet est construit.
- **Calibrage du lit**
  - La mise à niveau du lit d'impression (parfois appelée calibrage) consiste à s'assurer que le lit d'impression se trouve à une distance suffisante et homogène de la buse pour que l'objet reste collé au lit. Selon le modèle d'imprimante, cela peut être plus ou moins automatique.
- **Axes XYZ**
  - L'impression 3D est dans la plupart des cas considérée comme un système de coordonnées cartésiennes, les axes X et Y étant le plan sur lequel chaque couche est construite, et l'axe Z la hauteur. Les exceptions sont le Delta et le système bipolaire.
- **Moteurs pas à pas**
  - Les moteurs les plus couramment utilisés pour contrôler une imprimante 3D. Une imprimante 3D sera principalement composée d'au moins quatre moteurs pas à pas, sur chaque axe, et d'un ou de plusieurs moteurs utilisés pour alimenter le filament.
- **Contrôleur**
  - Un circuit imprimé contenant le logiciel et le matériel du contrôleur est nécessaire pour faire fonctionner l'imprimante. Create it REAL a développé et fabriqué sa propre carte mère, la Bluefin, permettant de contrôler une imprimante. Cependant, différentes cartes Arduino sont également utilisées pour l'impression 3D.

## Modélisation avec Tinkercad

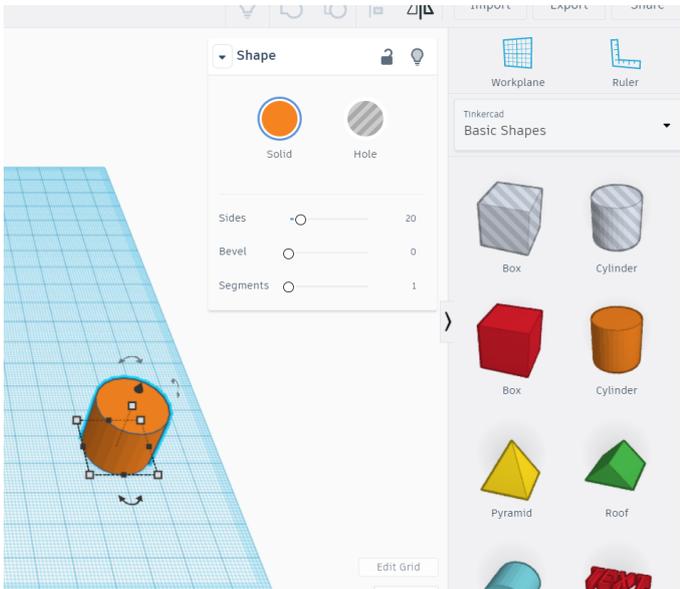
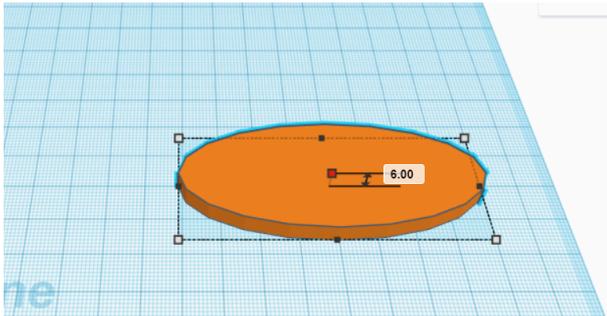
Tinkercad est un logiciel de modélisation gratuit, en ligne, facile à apprendre, mais qui peut vous mener assez loin en termes de modélisation d'objets pour l'impression 3D. Tinkercad peut également être utilisé pour concevoir des objets destinés à la découpe au laser, et présente même des compatibilités avec Minecraft.

Les principes de base de Tinkercad sont de construire n'importe quelle géométrie en combinant et en manipulant des formes prédéfinies. La simplicité du logiciel fait qu'il peut être enseigné aux jeunes enfants. C'est ce qu'on appelle un outil de modélisation CSG (nous en parlerons plus tard).

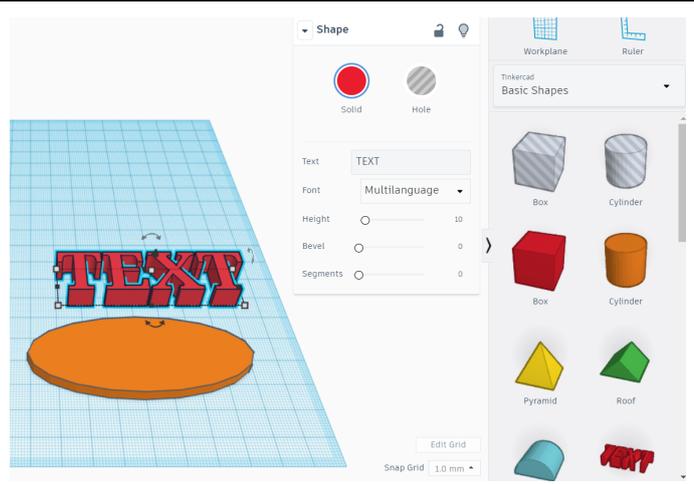
Tinkercad est disponible à l'adresse <https://www.tinkercad.com>

### Design challenge 1: Badge nominatif

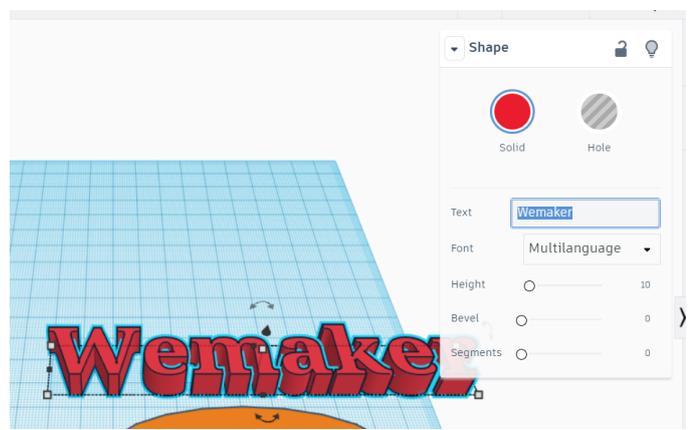
Le moyen le plus simple de se familiariser avec Tinkercad est tout simplement de concevoir quelque chose avec. Par conséquent, nous allons tous créer un badge à utiliser pour ces ateliers.

<p>Étape :</p>	
<p><b>Étape 1:</b> Glissez-déposez une forme qui servira de base à votre badge.</p>	
<p><b>Étape 2:</b> Manipulez la forme en utilisant les poignées carrées blanches pour en faire une forme plate et oblongue.</p>	

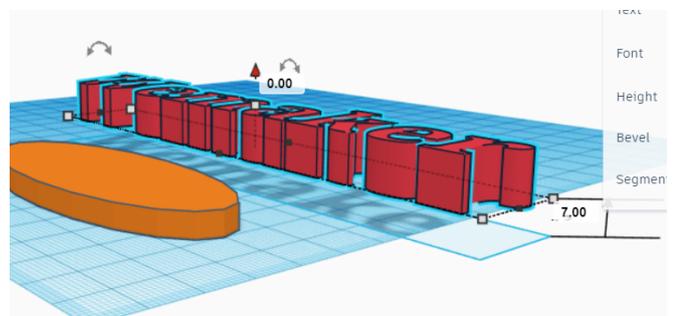
**Étape 3:** Glissez-déposez l'éditeur de texte.



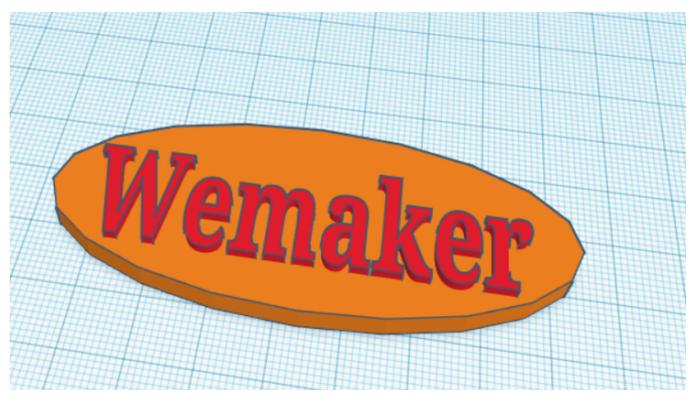
**Étape 4:** Utilisez la fenêtre de réglages pour écrire votre nom, l'objet se transforme en temps réel.



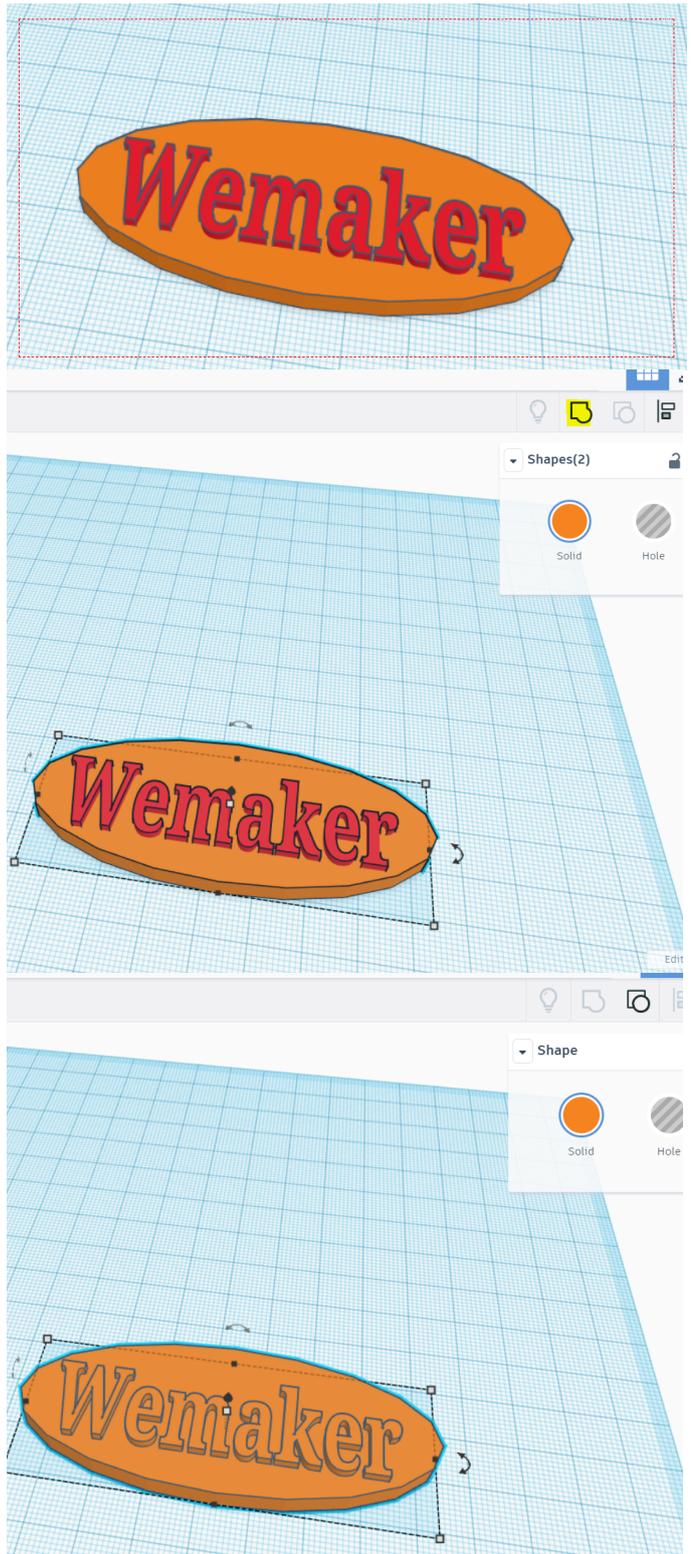
**Étape 5:** Utilisez la flèche verticale pour soulever le texte.



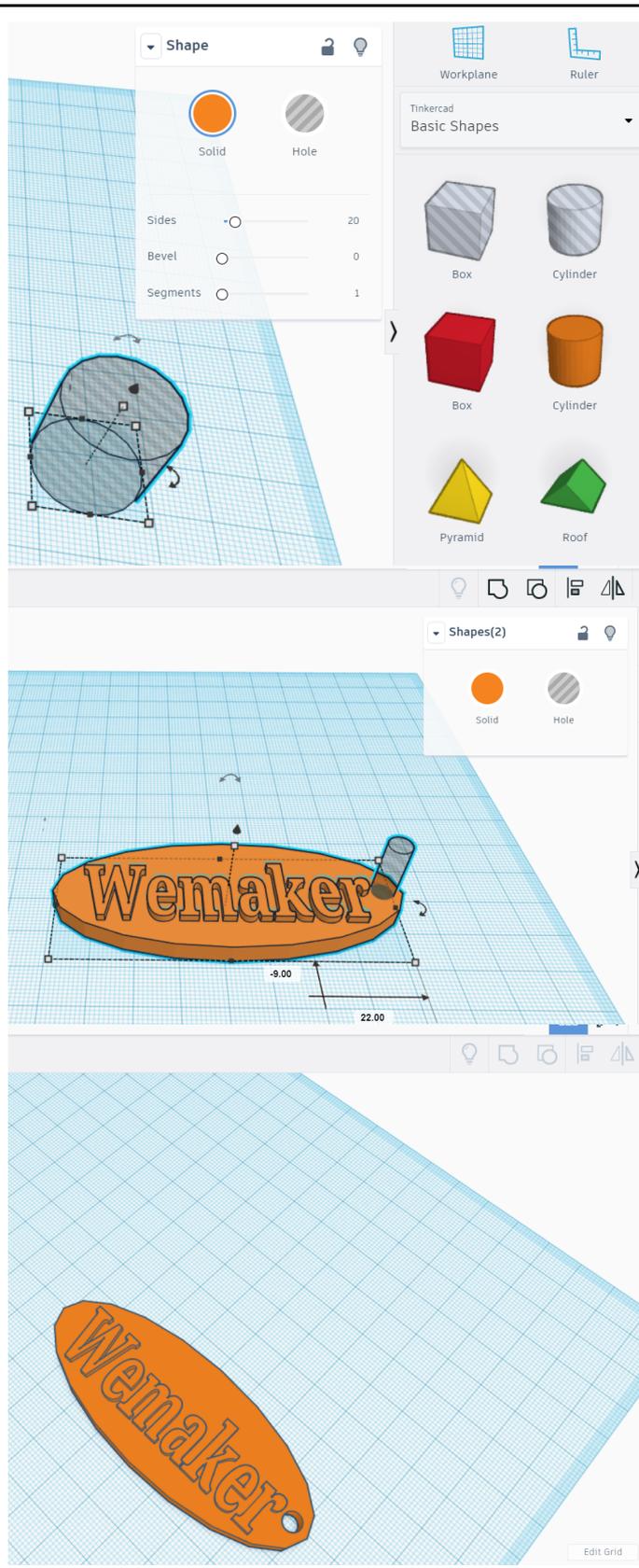
**Étape 6:** Placez le texte sur le badge. Vous avez encore la possibilité de changer la taille de l'un ou l'autre des éléments pour que le texte tienne sur le fond.



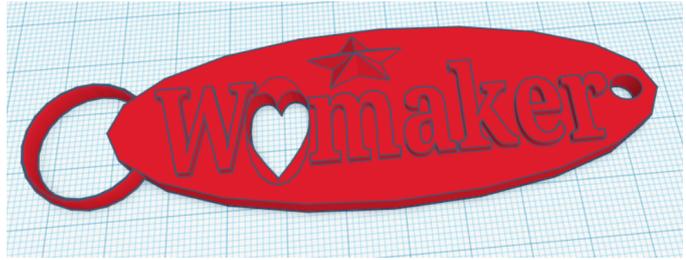
**Étape 7:** Groupez les éléments en sélectionnant les deux et en cliquant sur le bouton "Grouper".



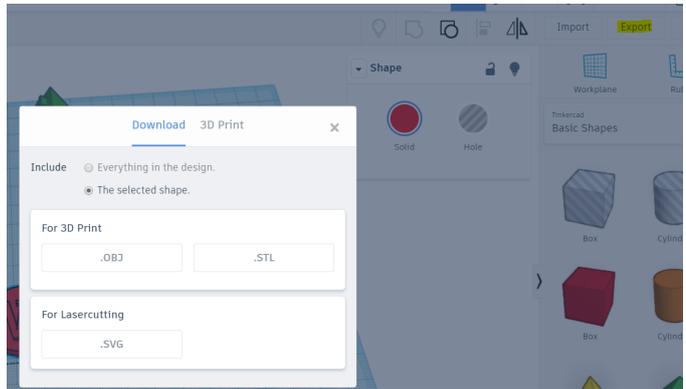
**Étape 8:** Faites un trou rond dans le badge en utilisant un cylindre et en changeant son comportement de "solide" en "creux".  
Mettez-le à la bonne taille et à l'endroit où vous souhaitez voir le trou.  
Groupez les deux objets.



**Étape 9:** Explorez Tinkercad, et décorez votre badge.



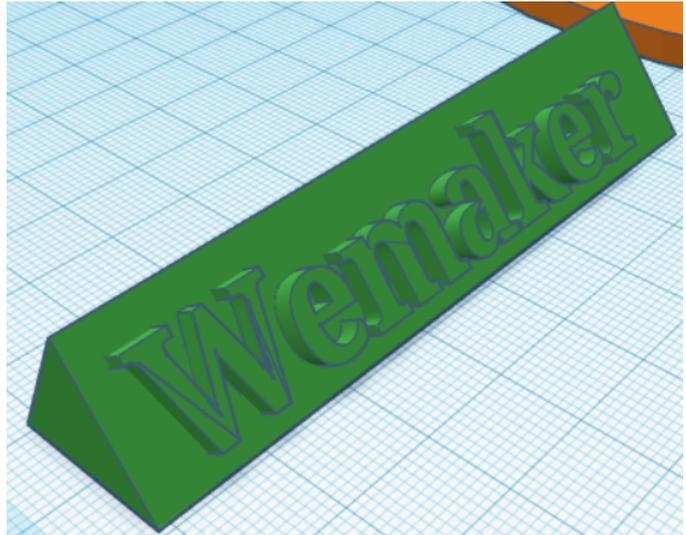
**Étape 10:** Lorsque vous êtes prêt à imprimer votre badge, cliquez sur le bouton "exporter" en haut à droite, et exportez le modèle en STL. Votre badge est prêt à être imprimé.



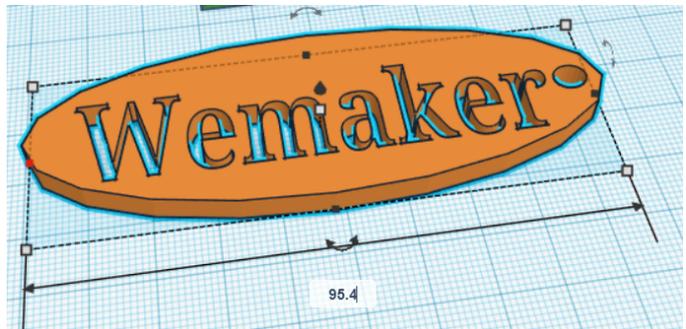
**EXTRA 1:** Transformez le texte en trou. Souvenez-vous que n'importe quelle forme peut être utilisée en solide ou en trou.



**EXTRA 2:** Faites un badge en forme de chevalet.

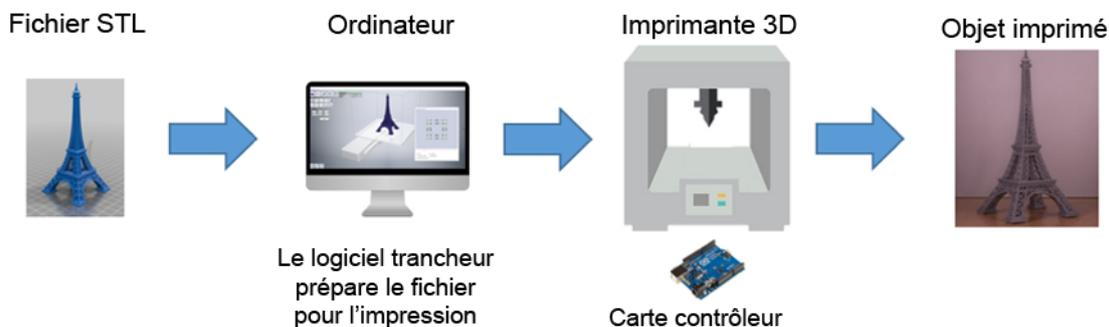


**EXTRA 3:** Faites en sorte que le badge fasse exactement 95,4mm de longueur.



## Trancheurs, STLs, et impression 3D

Nous avons brièvement évoqué le format STL et le tranchage, mais dans cette section, nous allons approfondir le sujet et explorer la manière dont les fichiers STL et les trancheurs fonctionnent ensemble pour produire un objet imprimé en 3D. Le graphique ci-dessous explique les étapes et l'ordre du processus.



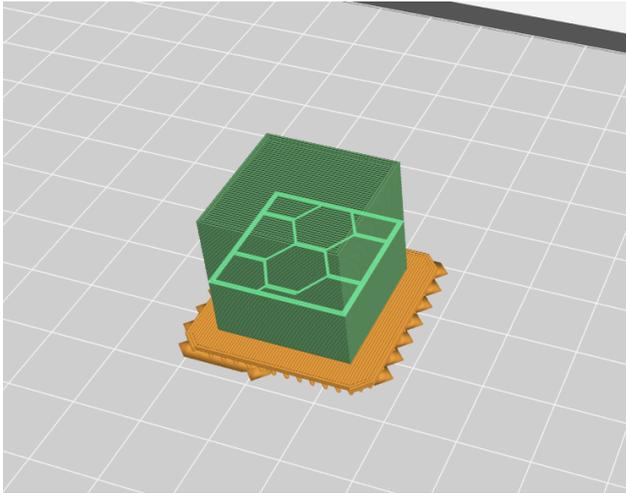
Le format de fichier STL ne représente que la surface de l'objet. La plupart des logiciels de modélisation 3D permettent de produire des STL, qui est devenu la norme de l'industrie de l'impression 3D. Il existe également plusieurs sites Web avec une vaste bibliothèque de fichiers STL pouvant être téléchargés librement. Ces sites incluent :

<https://www.thingiverse.com/> Ce site Web a été conçu par Makerbot et a depuis été acheté par Stratasys. Il propose une vaste collection de modèles gratuits et tout le monde peut télécharger des fichiers directement sur la page.

<https://www.myminifactory.com/> Un site Web présentant des conceptions testées en l'impression 3D. Cela signifie que la qualité moyenne du contenu est assez élevée.

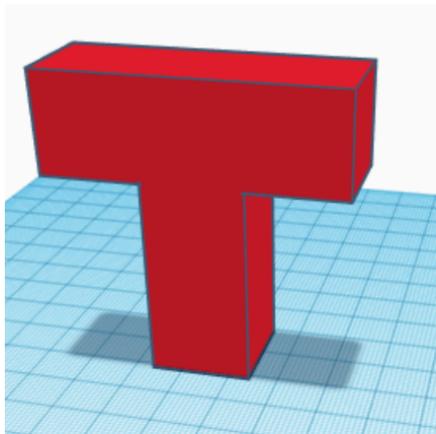
<http://www.yeggi.com/> Un site Web où les fichiers peuvent être partagés librement mais également vendus et achetés par les créateurs.

Le fichier STL est souvent chargé dans un logiciel de découpage, où il est converti en un format de fichier lié au déplacement et à l'extrusion de l'imprimante 3D (souvent du G-code ou du F-code de Create it REAL). Cependant, le logiciel de découpage ne convertit pas nécessairement le modèle en une réplique exacte imprimée 3D. Par exemple, la plupart des objets imprimés en 3D ne sont pas pleins à 100% à l'intérieur. Cela est dû au fait que le segment transforme le modèle en un objet doté d'une coque solide, mais d'une zone interne partiellement creuse. Ci-dessous, une image montre un carré constitué d'un remplissage hexagonal et d'une coque extérieure. La plupart des logiciels de découpage vous permettront également d'effectuer certaines manipulations de l'objet, telles que la mise à l'échelle, la mise en miroir, la rotation, etc.



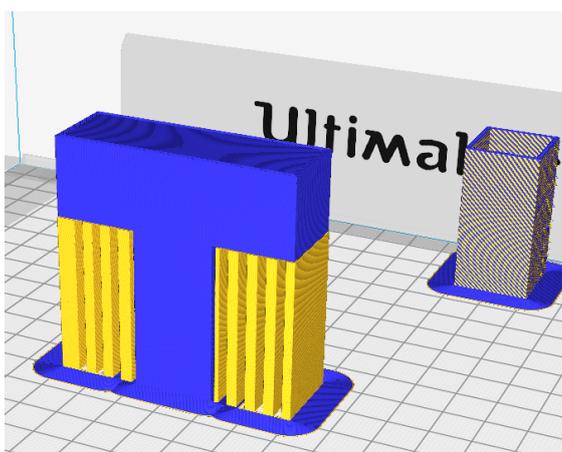
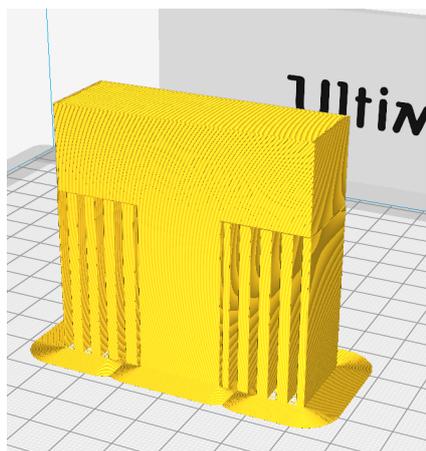
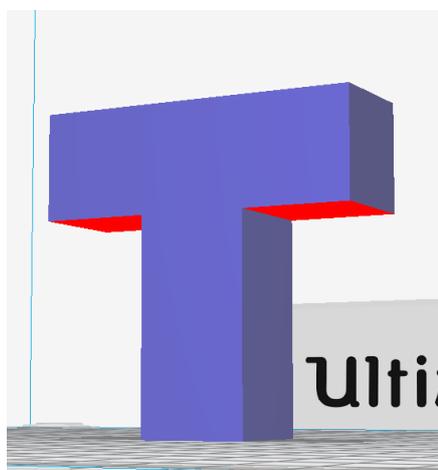
Les logiciels de tranchage ont aussi des fonctionnalités plus avancées, qui permettent à l'utilisateur d'établir des spécifications détaillées pour l'imprimante, notamment la quantité de plastique à extruder, la vitesse de déplacement, la manière de contrôler la température, etc. Entrer dans les détails de la manière de configurer un trancheur pour une imprimante et un matériau à partir de zéro est au-delà de la portée de cette session. Au lieu de cela, nous aborderons les sujets suivants: remplissage, support et couches externes (ci-après dénommés «contours»). Lors de l'enseignement à des étudiants, nous suggérons de leur proposer un défi de conception. Charger trop d'élèves avec trop d'informations sur les réglages avancés peut avoir un impact négatif sur la leçon. Nous avons trouvé bon de laisser les étudiants se salir les mains et ce n'est qu'après avoir conçu et imprimé quelque chose que l'on peut les informer, car ils peuvent ensuite relier l'enseignement reçu à leur expérience réelle.

## Surplombs

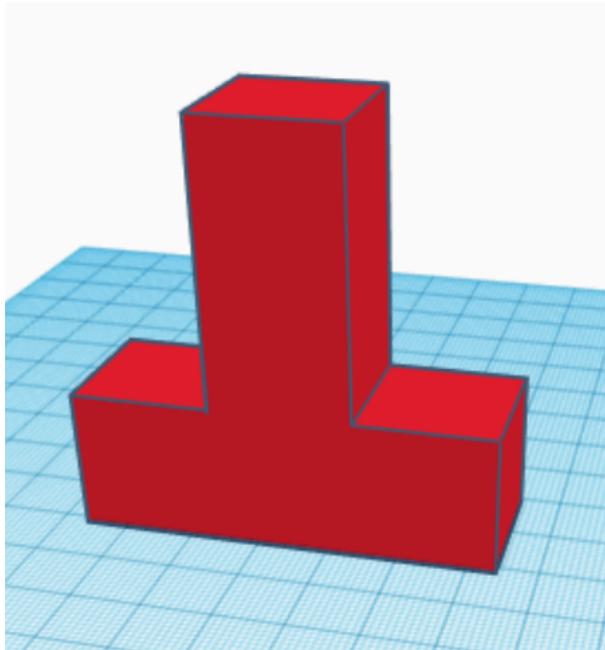


Considérons l'objet à gauche. C'est une forme qui ressemble à la lettre «T». Elle pose un problème en termes de «surplombs». Les surplombs sont les parties d'un objet 3D qui n'ont pas d'appui en dessous. Le chargement de ce modèle dans Cura aura pour résultat ce que vous pouvez voir ci-dessous.

Notez que les surfaces sous les surplombs sont colorées en rouge pour indiquer qu'elles sont problématiques. Si la case «générer un support» est alors cochée et que le modèle est changé en «vue en couches», les éléments suivants apparaissent. Ceci est un rendu des supports générés. Le support est un moyen de gérer les surplombs et, comme on peut le constater, il ajoute des piliers de soutien qui pourront être retirés une fois l'impression terminée. Les réglages de supports peuvent parfois s'avérer difficile à définir, en fonction de l'imprimante 3D, du filament et des différents paramètres du trancheur. De plus, ils utilisent plus de matériaux et prennent plus de temps à imprimer. Certaines imprimantes ont l'option «double extrusion», dans laquelle une extrudeuse peut extruder du matériau de support et l'autre, du PLA, par exemple. Ci-dessous, une capture d'écran de Cura avec Ultimaker 3 est visible. Les supports sont ici imprimés dans un matériau hydrosoluble. Cela signifie que l'objet peut être immergé dans l'eau et que le matériau de support sera dissout au fil du temps. Cependant, avec les paramètres recommandés par ultimakers, cet objet prend 9,5 heures à imprimer.



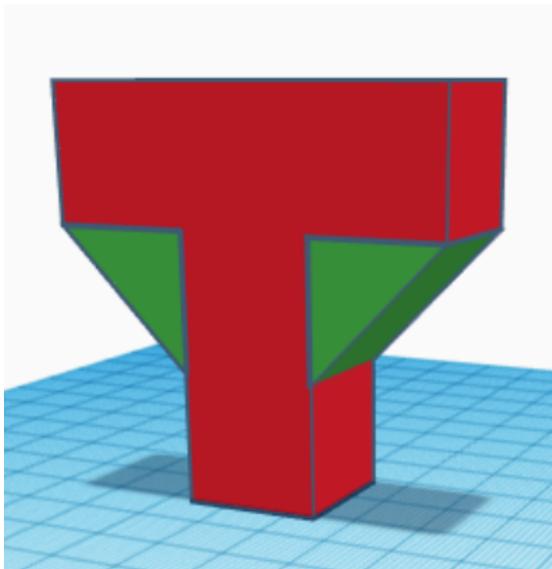
## Orientation



Une autre façon de traiter les porte-à-faux est simplement de réfléchir à l'orientation du modèle. Certains modèles peuvent en fait être simplement retournés sur un ou plusieurs axes et ils deviendront imprimables. Cela est généralement préférable, car cela ne gaspille pas de matériau et prend moins de temps à imprimer. Cependant, il faut penser au processus d'impression 3D et au procédé de fabrication. Cela peut être très positif car, dans tout type de conception physique, il est important de prendre en compte les phases de production. Ce domaine n'est généralement enseigné qu'à l'université, car il est considéré comme un sujet difficile et avancé. Cependant, avec l'impression 3D, cela peut devenir une partie naturelle du processus de conception des jeunes enfants. Basculer un modèle peut généralement être

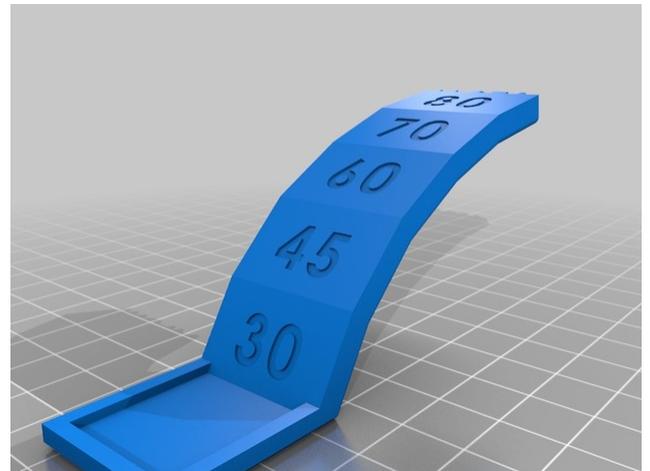
effectué à la fois dans le logiciel de CAO et le logiciel de découpage. Dans le logiciel de découpage, cependant, l'effet de l'orientation sur l'utilisation du matériau et le temps d'impression peuvent être observés directement. Après avoir conçu les pièces pour l'impression 3D pendant un certain temps, on en obtient généralement un «sens», on regarde naturellement un modèle et on réfléchit instinctivement à la façon dont il peut être orienté pour minimiser ou éliminer le besoin de soutien.

## Conception intelligente



Concevoir un modèle, tout en gardant constamment à l'esprit le processus d'impression 3D, peut permettre de concevoir des modèles avec peu ou pas de porte-à-faux. Comme on le voit à gauche, le modèle est modifié pour s'adapter aux porte-à-faux. Ce qui est mis à profit sur la photo de gauche, c'est le fait que les imprimantes 3D FFF peuvent réellement imprimer de petits surplombs. La qualité d'impression des porte-à-faux varie considérablement et dépend des facteurs suivants: rapidité du refroidissement du filament, rapidité de l'imprimante, matériau utilisé, etc. Différentes impressions test doivent être effectuées pour connaître les performances de chaque configuration d'imprimante. Comme mentionné précédemment, la conception

intelligente d'une pièce en tenant compte des limitations d'un procédé de production est un principe très précieux, que le procédé de production soit l'impression 3D, l'usinage CNC, le découpage au laser ou autres. Toutefois, dans certains cas, cela pourrait déformer l'intention initiale du modèle. Regardez le modèle ci-dessus. Cela ressemblera-t-il à une lettre T une fois imprimé?



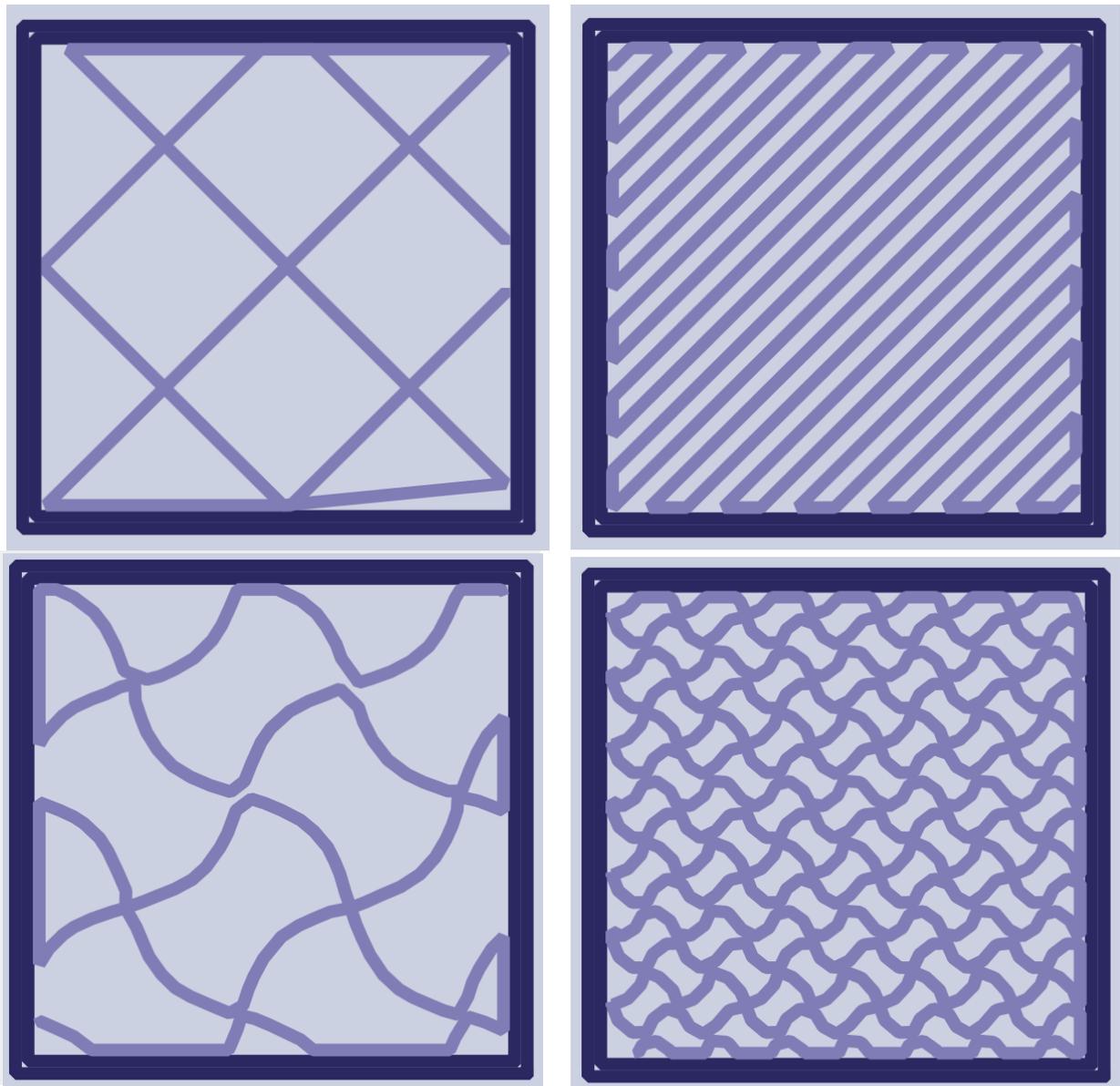
Ainsi, les surplombs peuvent être traités de multiples façons et dans différentes parties du processus d'impression 3D. Le tableau ci-dessous indique le moment où les différentes méthodes de traitement des porte-à-faux sont appliquées. La leçon de transition, qui sera décrite ci-après, est généralement une bonne leçon pour familiariser les étudiants avec le concept de porte-à-faux. Habituellement, pour les étudiants qui débutent en impression 3D, le premier réflexe sera de concevoir un pont tel que vous le voyez dans le monde réel. Nous suggérons que les étudiants soient réellement autorisés à faire des erreurs et à imprimer des objets même si vous savez, en tant qu'enseignant, que cela va échouer. Il peut souvent être plus facile pour l'élève de relier la connaissance de la façon de traiter les surplombs, s'il peut la relier à une expérience réelle de voir une impression ratée, plutôt qu'à une longue leçon chargée à ce sujet.

Method	CAD/design SW	Slicer	Post print
Ajouter des supports	Supports manuels	Supports automatiques	Nettoyage
Modifier l'orientation		Optimiser l'impression en pivotant chaque pièce.	
Conception intelligente	Modélisation prenant en compte les contraintes de l'impression 3D		

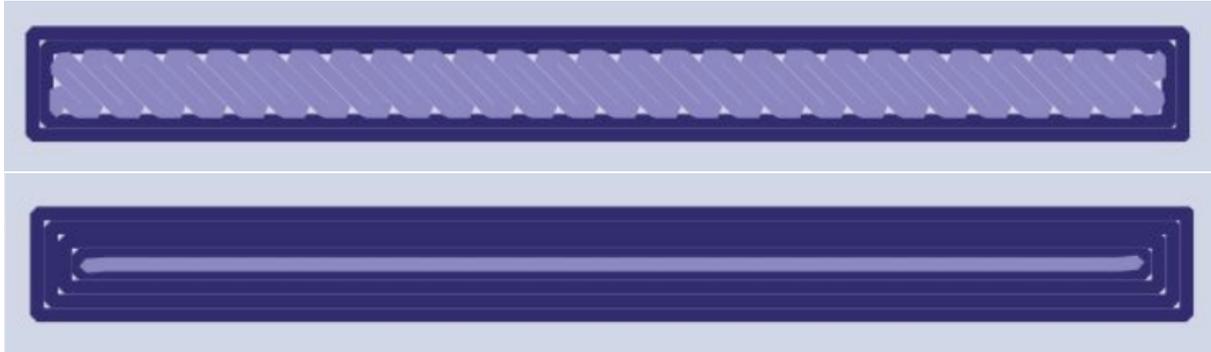
## Remplissage et contours

La plupart des objets imprimés en 3D ne sont pas imprimés sous forme de solide, mais plutôt comme une coque dont l'intérieur sera constitué d'une structure appelée remplissage. Dans le logiciel de découpage en tranches, la densité de ce remplissage peut généralement être contrôlée. Le remplissage par défaut est normalement autour de 20%, ce qui signifie que 20% de la géométrie interne de l'objet sera en plastique, tandis que les 80% restants seront des poches d'air creuses. Pour les objets ne nécessitant pas une intégrité structurelle importante, cela suffit généralement. Cependant, la densité de remplissage peut être augmentée pour acquérir une plus grande résistance. Le compromis est que cela augmente l'utilisation de matériel et le temps d'impression.

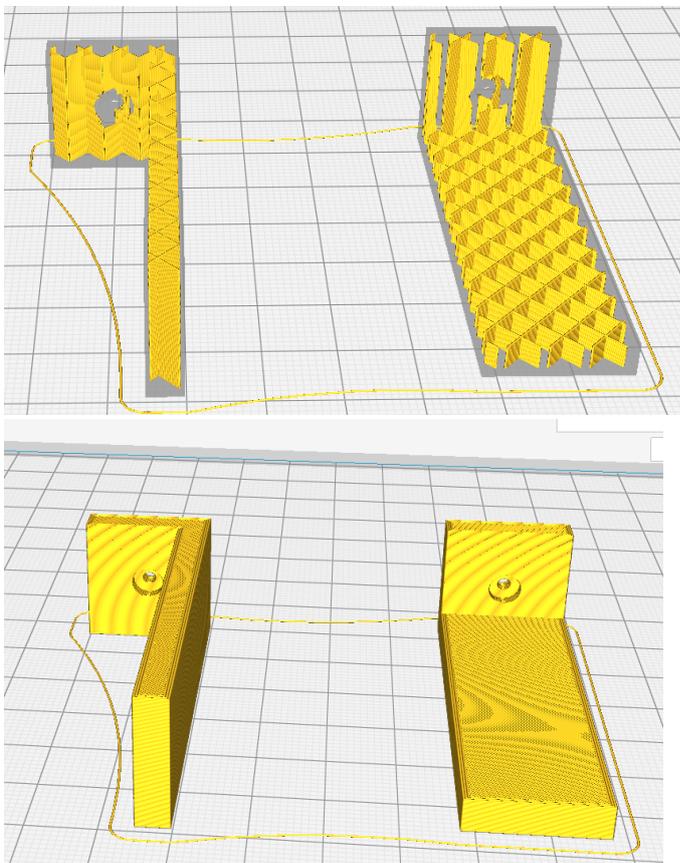
Plusieurs types de remplissage différents existent. Le remplissage le plus courant, et l'un des plus simples, est le remplissage carré. Cependant, il existe d'autres types de remplissage qui peuvent donner à l'objet des propriétés intéressantes. Ci-dessous, nous voyons un exemple de remplissage carré à 15% et 50% et de remplissage gyroïdien à 15% et 50%. Le gyroïde a de nombreuses propriétés intéressantes et Anca se fera un plaisir de répondre à toutes vos questions sur ce type de remplissage.



Cependant, le remplissage n'est pas le seul facteur déterminant de la résistance d'un objet. L'enveloppe extérieure, ou la quantité de contours (ou périmètres), peut également avoir une grande influence. La seule différence entre les deux images ci-dessous réside dans le fait que l'objet du bas est découpé en quatre contours, tandis que celui du haut est découpé en deux. La quantité accrue de contours peut en fait augmenter considérablement la résistance, selon comment elle est appliquée.



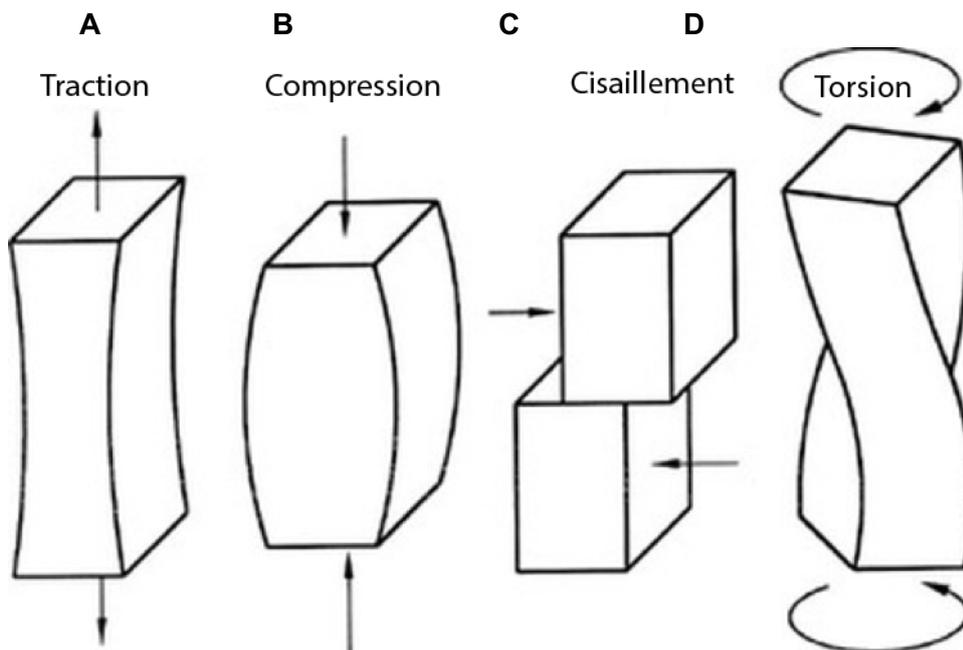
Vous trouverez ci-dessous un exemple d'équerre très simple dans Cura. Sur la photo du haut, seul le remplissage est affiché et sur la photo du bas, la coquille est visible. Comme vous l'avez peut-être remarqué, l'équerre est à chaque fois présentée dans deux orientations différentes. La question est de savoir si elle sera aussi résistante dans chaque position. Cela dépend en fait de ce que nous entendons par résistance, comme le montre l'exemple suivant.



## Défi 1 : Types de résistances et impression 3D

Examinez le schéma ci-dessous. Il s'agit d'une représentation de 4 types de résistances différentes qu'un objet peut avoir dans le domaine de l'ingénierie structurale: résistance à la traction, résistance à la compression, résistance au cisaillement et résistance à la torsion. Dans cet exercice, vous indiquerez l'orientation des couches d'impression qui fournira la meilleure réponse pour chacune de ces forces.

**Devoir 1:** Tracez les couches des objets imprimés en 3D sur les dessins ci-dessous, dans l'orientation qui, selon vous, donnera le plus haut degré de résistance pour chaque contrainte.



**Devoir 2 :** Parmi chacun des exemples, lequel, selon vous, profite le plus d'un pourcentage de remplissage élevé, et lequel, selon vous, profite le plus d'une coque épaisse de nombreux contours? Marquez ceux que vous pensez ci-dessous avec un X.

	Remplissage élevé	Contours épais
A		
B		
C		
D		

Nous discuterons des résultats en classe.

Le fait qu'un objet imprimé en 3D n'ait pas la même résistance sur tous les côtés est appelé «anisotrope». Cette propriété provient du processus même d'impression 3D, qui consiste à construire des objets par couches. L'adhérence entre les couches devient un facteur limitant la résistance. C'est pourquoi, dans l'exemple ci-dessus, la résistance est toujours la plus élevée lorsque les forces se déplacent de manière opposée aux couches, le long de la

coque. Cela mérite d'être pris en compte lors de la conception et de l'impression d'un objet dans lequel la résistance est souhaitée. Pour plus d'informations à ce sujet, reportez-vous au «manuel d'impression 3D». Pour ces figures simples, il est souvent possible de déterminer la résistance optimale d'une pièce spécifique à l'aide des options du logiciel slicer. Toutefois, pour les pièces plus complexes qui peuvent nécessiter différents types de résistance dans différents domaines, il faudra penser à ces éléments dès la modélisation CAO. Voici un exemple de plan de leçon simple, pouvant être donné à des étudiants d'âges variés, leur permettant d'explorer ce sujet de manière intuitive.

## Défi 2 : Un pont d'autoroute

C'est un défi de conception qui a été testé dans une situation d'enseignement réelle dans l'une de nos écoles partenaires. C'est une bonne introduction aux paramètres de base d'une impression 3D, car les participants découvriront souvent des sujets tels que les surplombs, les remplissages et les contours de leur propre chef et tout en travaillant sur un projet. Le plan de cours convient également au travail en groupe et peut facilement être modifié pour augmenter ou réduire la complexité, ce qui le rend adapté à un groupe d'âge étendu..

### Cahier des charges :

Le ministère des Transports] a estimé qu'un grand nombre de ponts sur les autoroutes du pays sont usés et devraient être remplacés immédiatement. Ils recherchent un entrepreneur capable de leur fournir un pont utilisant peu de matériaux, mais également un pont solide. Dans cette mission, votre équipe sera l'entrepreneur et concevra un modèle à l'échelle des ponts qui pourra convaincre le comité du pont que votre conception est le meilleur choix.

### Prérequis :

- Vous allez concevoir un modèle du pont à l'échelle 1: 500.
- Le pont doit pouvoir accueillir 4 camions circulant dessous et deux voitures circulant dessus.
- Vous calculerez le coût des matériaux du pont, sachant qu'un  $m^3$  de béton armé coûte 210 €
- Vous allez tester la résistance du pont en plaçant progressivement des poids sur le dessus du pont jusqu'à ce qu'il se casse. Vous noterez ensuite le poids auquel le pont s'est brisé et ce sera la mesure de la force.
- Vous modifierez ensuite votre pont en fonction de votre expérience avec le pont précédent, améliorant ainsi la conception grâce à plusieurs itérations.

## Conception et impression

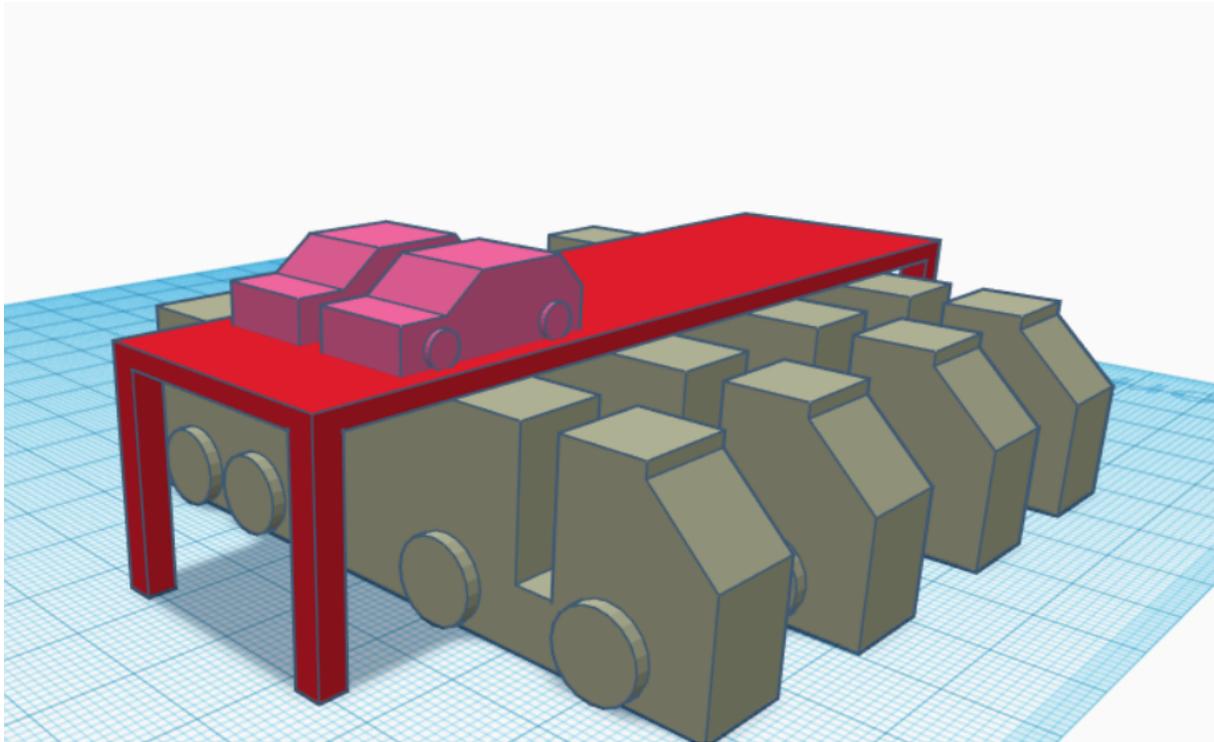
Vous allez concevoir votre pont avec Tinkercad, que vous devriez déjà connaître. Certaines fonctionnalités de Tinkercad peuvent être utiles à mentionner pour cette partie.

**Importer:** utilisez cette option pour importer les fichiers car.stl et truck.stl. Ce sont des modèles réduits de voitures et de camions de la vie réelle que vous pouvez utiliser pour concevoir votre pont. Rappelez-vous que le pont doit accueillir quatre camions et deux voitures.

**Aligner :** La fonction Aligner peut être utilisée pour aligner un ou plusieurs objets entre eux. Cela peut être pertinent pour ce projet car cela facilite la modélisation de précision.

**Plan de travail :** un nouveau plan de travail peut être inséré, ce qui facilite la création de modèles superposés. Un plan de travail peut même être ajouté sur le côté d'un modèle.

Une fois qu'un modèle de pont a été créé, téléchargez le fichier STL et chargez-le dans votre trancheur. Nous vous recommandons d'imprimer votre premier modèle assez rapidement afin de pouvoir réaliser plusieurs itérations.



En positionnant votre modèle dans le trancheur, réfléchissez à la meilleure manière de gérer les surplombs.

## Calculs et mesures

Pour chaque pont que vous concevez et imprimez en 3D, vous devrez extraire deux éléments : le **prix** des matières premières et la **résistance** du modèle. Vous obtiendrez le prix par des calculs, et la force par l'expérimentation.

### Le Prix

Dans le logiciel de découpage, vous pourrez généralement obtenir des informations sur la consommation de filament. Cela peut être donné en mètres ou en grammes de filament.

Rappelez-vous que le filament est généralement un long cylindre ayant un diamètre donné (dans cet atelier, le diamètre est de 1,75 mm, mais 2,85 est également utilisé). En utilisant l'équation permettant d'obtenir le volume d'un cylindre à partir de son rayon ( $r$ ) et de sa hauteur ( $h$ ), vous pouvez obtenir le volume de matériau utilisé pour le modèle. Rappelez-vous maintenant que le modèle est conçu à une échelle ( $s$ ) de 1 : 500. Rappelons enfin que le prix ( $p$ ) d'un mètre carré de béton armé était de 210 €. Notez également que le diamètre du filament est fourni en mm, tandis que la longueur du filament est en m.

Il peut être avantageux de convertir toutes les unités en mètres. Voici l'équation qui peut être utilisée pour ce calcul:

$$Price = \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot s^3 \cdot p$$

Une fois le prix calculé, notez-le sur un post-it. Le prix du pont peut être calculé pendant qu'il s'imprime.

### Résistance

Une fois le pont imprimé, vous devrez tester sa résistance. Cela se fait en plaçant des piles de papiers au-dessus du pont, en augmentant progressivement le poids, jusqu'à l'effondrement du pont. Notez combien de piles de papier le pont peut supporter. Ce sera notre mesure de la force dans cette leçon. Notez aussi ceci sur le même post-it.



## Auto-évaluation et réflexion

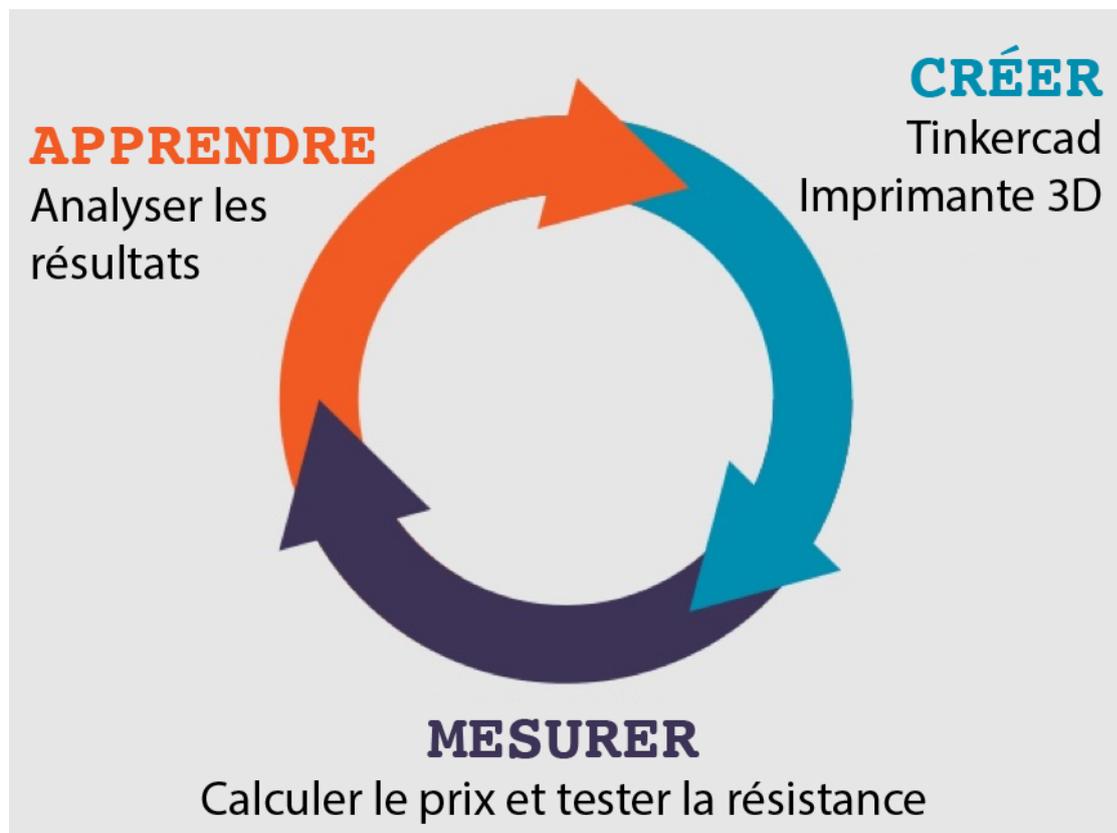
Une fois le pont conçu, le prix calculé et la résistance testée, nous utiliserons désormais un outil d'évaluation baptisé «système de coordonnées orésmiennes». Il s'agit d'un système de coordonnées composé de deux axes, liés aux deux facteurs qui nous intéressaient: le prix et la force. Vous placerez votre dessin au-dessus de votre post-it dans les zones correspondantes du système de coordonnées. Le système de coordonnées peut vous aider à planifier la prochaine itération de votre pont.

Vous pouvez désormais débattre des questions suivantes:

1. Où est la conception optimale dans ce système de coordonnées?
2. Pourquoi pensez-vous que votre pont est placé là où il est?
3. Comparez votre position avec celle de vos concurrents. Quelles sont les plus grandes forces et faiblesses de votre conception?
4. Comment pouvez-vous améliorer votre conception?

Lorsque vous aurez débattu de ces questions dans votre groupe, retournez à la planche à dessin! Concevez une deuxième itération de votre pont qui est meilleure sur au moins un axe. Regardez où votre pont s'est brisé et utilisez cette connaissance à votre avantage.

Continuez ce processus et effectuez autant d'itérations que vous en avez le temps.



## Comment équilibrer structure et liberté dans un projet

L'exemple ci-dessus d'un plan de leçon est une tentative de trouver l'équilibre parfait entre liberté et structure dans une leçon.

L'impression 3D en tant que technologie est profondément ancrée dans le «mouvement des makers», et la philosophie de ce mouvement commence à influencer la façon dont nous enseignons la technologie dans les écoles.

Le mouvement des makers prône le libre accès à des technologies puissantes et un état d'esprit communautaire pour s'entraider tout en apprenant de nouvelles technologies et compétences, plutôt que de s'appuyer sur des établissements d'enseignement établis, parfois rigoureux. Cependant, lorsque les établissements d'enseignement adoptent cette philosophie, il devient nécessaire d'observer ces deux mouvements et de tirer le meilleur parti des deux mondes.

Notre recherche dans les écoles locales a identifié que les enseignants préfèrent avoir une certaine structure dans leurs cours. Ce chapitre se concentrera sur la manière d'unir le désir des enseignants d'avoir une certaine structure avec la philosophie du mouvement créateur d'auto-apprentissage et de bricolage.

### Que dit la littérature?

La plupart des personnes impliquées dans la technologie éducative connaissent les travaux de Seymour Papert. Élève de Piaget et mathématicien, Papert a écrit des livres comme «Mindstorms» et «The Childrens's Machine» qui jettent les bases de sa théorie du «constructionnisme».

Le constructionnisme est un développement ultérieur du constructivisme de Piaget: la notion selon laquelle les enfants construisent des connaissances par l'expérience directe plutôt que de transmettre des connaissances à partir d'un livre ou d'un enseignant.

Le constructionnisme de Papert ajoute à cette théorie que la construction des connaissances par les enfants se produit mieux dans les situations où ils construisent des objets personnellement significatifs, que ce soit un poème, un robot, un programme informatique ou autre chose. Le travail de Papert était centré sur l'ordinateur et la programmation (c'est ce qu'il appelle la «machine pour enfants» dans le livre du même nom). Bien que Papert n'ait jamais spécifiquement abordé les imprimantes 3D (principalement parce que l'imprimante 3D de bureau telle que nous la connaissons aujourd'hui n'existait pas à l'époque où il était actif dans le domaine), ses théories sur l'enseignement et la pédagogie sont largement applicables à cette technologie.

L'un des concepts introduits par Papert, qui peut être appliqué ici, est le concept de «micromonde». Il s'agit d'un environnement d'apprentissage où des idées puissantes et apparemment complexes peuvent être explorées de manière naturelle et exploratoire. Papert présente un tel micromonde pour l'apprentissage de la physique newtonienne, un sujet souvent très difficile à appréhender pour les débutants.

Papert suggère que la raison en est le fait que la physique newtonienne est toujours introduite directement à travers les équations mathématiques qui sont utilisées pour les

décrire. Comme approche alternative, Papert a développé un micromonde où les enfants pourraient programmer différents éléments qui agiraient à terme à travers les lois de la physique newtonienne. Cela signifie que les enfants peuvent avoir une compréhension plus naturelle et intuitive du concept de physique newtonienne sans avoir besoin d'impliquer les mathématiques formelles. Papert soutient que même si l'enfant ne voit jamais une équation à travers ce processus, l'enfant aura beaucoup plus de facilité à se relier aux équations formelles une fois qu'elles seront introduites à un stade ultérieur, car il sera en mesure de la connecter via une expérience bien différente .

Sylvia Martinez dans son livre «Inventer pour apprendre - Faire, bricoler et ingénierie en classe» évalue de nombreux aspects de la philosophie du créateur dans le domaine de l'éducation. L'un d'eux est le thème de «ce qui fait un bon projet». Elle définit les huit caractéristiques suivantes. Nous tenterons d'expliquer brièvement comment le projet de pont peut soutenir ces aspects.

1. **But et pertinence** - Les enfants travaillent sur un problème très proche des problèmes du monde réel.
2. **Temps** - Il est important de réserver suffisamment de temps pour ce projet. Il faut environ cinq heures, même avec des imprimantes 3D rapides. En effet, les enfants devraient réaliser plusieurs itérations de leur conception.
3. **Complexité** - Ce projet peut introduire le concept d'analyse finie et les techniques de construction selon le niveau des étudiants.
4. **Intensité** - Nous constatons que les enfants peuvent s'immerger complètement dans la conception de ces ponts, et nous avons même vu des étudiants trouver les pauses déjeuner extrêmement ennuyeuses et peu pratiques pour leur flux de travail.
5. **Connexion** - La connexion entre les membres du groupe dans ce projet est l'un des moyens les plus évidents d'enseigner le travail d'équipe et la collaboration dans cette leçon. Ce qui était inattendu, c'est que nous avons vu des élèves s'entraider entre différents groupes, et même différents niveaux et classes, pour effectuer un bon test de résistance.
6. **Accès** - Nous avons planifié l'activité afin que chaque groupe de 3-4 élèves ait sa propre imprimante 3D. Cela signifiait qu'ils pouvaient planifier eux-mêmes le processus d'impression. Les étudiants sont lentement devenus des maîtres de la gestion du temps, et repenseraient les ponts qui prenaient trop de temps à imprimer, et seraient autorisés à faire des pauses lors du démarrage d'une impression, et des calculs avaient été effectués pour la conception.
7. **Partage** - Le système de coordonnées Oresmian rend la leçon partageable. Tous les élèves peuvent voir les autres élèves travailler et comparer leurs progrès aux autres.
8. **Nouveauté** - Tout en travaillant sur ce projet, les étudiants ne reçoivent qu'une brève invite de conception décrivant le but de leur conception et les paramètres sur lesquels il doit fonctionner correctement. Dès lors, ils découvrent par eux-mêmes. Nous avons vu des étudiants commencer à mettre en œuvre des poutres transversales et des conceptions d'arc, deux pratiques d'ingénierie structurale, sans jamais être expliquées ces concepts par un enseignant.

Le fait de garder l'invite de conception courte est également décrit par Martinez comme une bonne pratique d'un projet. Dans notre cas, l'invite peut être très courte. L'objectif est assez simple et peut facilement être expliqué rapidement. Une démonstration rapide du test de résistance, de préférence avec un pont très fragile, peut suffire à expliquer comment cela est

fait. À partir de là, l'explication du calcul peut en fait être la partie la plus longue, bien que cela puisse être fait ad hoc avec des résultats décents. Assurez-vous que l'étudiant commence à concevoir rapidement. L'apprentissage vient des itérations du pont et des expériences directes qui y sont impliquées.

À cet égard, notre projet de pont est une tentative de créer un projet ou un micromonde pour l'enseignement de l'ingénierie structurelle, mais à travers une invite de conception ouverte, mais néanmoins dirigée. Les enfants dès l'âge de 10 ans acquerront des connaissances sur l'analyse finie et les techniques de construction, normalement non enseignées jusqu'au niveau universitaire de génie mécanique, d'architecture ou de domaines similaires. Ils n'étudient pas l'utilisation des équations formelles, mais acquièrent à la place l'expérience d'apprentissage intuitive de Piaget. Ils collecteront les informations sur ce qui rend un pont solide, avec l'expérience d'empiler progressivement des poids sur le pont qu'ils ont eux-mêmes conçus, et avec la curiosité impatiente de chercher et d'écouter quand le pont cède lentement, puis s'effondre soudain complètement .

Grâce à notre expérience, nous avons constaté que les enfants sont ravis de briser leur pont. Après tout, à quelle fréquence êtes-vous autorisé à casser des choses exprès à l'école? Cela enseigne également aux enfants une leçon plus profonde encore, l'échec est parfois nécessaire d'apprendre. Leur pont doit non seulement échouer, mais doit. Parce que si le pont n'est pas poussé à son point de rupture, nous ne saurons pas comment l'améliorer pour la prochaine itération. Mais la leçon les oblige également à réfléchir à la destruction qu'ils provoquent sur leur conception. Ce n'est pas simplement de la destruction pour le plaisir, comme on peut le voir lorsqu'un enfant construit un château de sable, pour le botter quelques minutes plus tard. Ils sont obligés d'inspecter attentivement les dommages qu'ils ont causés à leur pont et de transformer ce qu'ils découvrent en une nouvelle conception tangible, qui peut être testée à nouveau dans ce processus itératif.

## Le système de coordonnées Oresmien

L'idée d'activités d'apprentissage gratuites basées sur des projets n'est pas nouvelle, et même les idées de Papert des années 80 sont basées sur les idées encore plus anciennes de John Dewey et Marie Montessori. Une chose que nous prétendons, avec une certaine hésitation, être une nouvelle invention est celle du système de coordonnées oresmiennes. À strictement parler, cela ne doit pas être plus que deux bandes de ruban de peintre, avec des unités et une échelle écrites dessus. Cependant, l'effet de cette aide pédagogique semble plus profond. Le système de coordonnées rend plus visible la nature itérative du processus de conception. Vous pouvez voir les erreurs que vous avez faites dans une version et comprendre comment cela a changé les performances dans les autres versions. Le système de coordonnées offre une excellente occasion de discuter avec les étudiants de leur conception, ainsi que de fournir des commentaires et de remettre en question leur processus, afin de faire réfléchir les étudiants sur leurs futures itérations. Le système de coordonnées Oresmien peut également être utilisé dans plusieurs autres leçons, tant qu'il existe au moins deux paramètres impactants. En voici quelques exemples :

### Bateaux

Les enfants peuvent s'inspirer du design suivant sur thingiverse:

<https://www.thingiverse.com/thing:843646>

Ils peuvent ensuite repenser plusieurs des composants pour réaliser le bateau qui peut aller le plus loin, mais aussi porter le plus de poids (en termes de pièces par exemple). Ils exploreront ici des sujets tels que: l'hydrodynamique, la friction, le principe d'Archimède et le centre de gravité.

## Catapulte

Les élèves conçoivent des catapultes capables de projeter un objet prédéfini aussi loin que possible et aussi précisément que possible. Ainsi, les élèves devront concevoir une catapulte qui a à la fois le pouvoir brut de tirer loin et la précision de frapper à l'intérieur d'une cible. Par conséquent, les deux axes du système de coordonnées auront une unité de longueur (distance parcourue et distance de la cible). La catapulte peut être composée de nombreuses pièces, un cadre, un bras, un ressort et bien d'autres. Tout cela peut être repensé individuellement pour obtenir le meilleur résultat. Grâce à cela, les étudiants peuvent en apprendre davantage sur: la balistique, les courbes paraboliques, le principe de l'échelle et du levier ainsi que la conception d'un système composé de plusieurs parties, les forçant ainsi à penser l'ensemble du système de manière holistique.

## Toupie

Une toupie qui peut être démarrée par un engrenage est un jouet populaire depuis de nombreuses années. Vous pouvez en trouver une version entièrement imprimable en 3D ici : <https://www.thingiverse.com/thing:1395135>

L'avantage de cette conception est que la plupart des pièces peuvent être imprimées à l'avance avant même le début de la leçon. Au cours de la leçon, les étudiants peuvent alors se concentrer sur la modification et l'amélioration de seulement quelques éléments clés de la conception. Les élèves peuvent utiliser le système de coordonnées Oresmien pour tracer le poids ou le diamètre et le temps de rotation moyen de la toupie. Dans cette leçon, les enfants aborderont: l'inertie, l'élan, la physique newtonienne et les coordonnées d'Euler.

## Conclusion

Ce manuel a été un guide rapide sur la façon de démarrer avec l'impression 3D en classe. Il ne s'agit en aucun cas d'un guide complet, car tel ne pourrait probablement jamais exister. L'impression 3D est un domaine en constante évolution et les technologies que nous enseignons aux enfants seront sans aucun doute dépassées une fois qu'ils auront commencé leur carrière. Par conséquent, il est important de réaliser que les leçons durables ne consistent pas à apprendre aux enfants comment modéliser et imprimer en 3D, mais d'enseigner entièrement d'autres choses grâce à l'utilisation de cette technologie. Enseigner aux élèves qu'un design n'est jamais définitif, que les choses peuvent être améliorées grâce aux itérations, qu'il est parfois nécessaire de ne pas apprendre sont tous des exemples de leçons de vie plutôt que des leçons d'impression 3D. En se concentrant sur la vue d'ensemble et sur ce que l'on veut réaliser avec l'impression 3D, plutôt que de se perdre dans les spécificités de la découpe et de la qualité d'impression, cela peut signifier que les étudiants apprennent des idées puissantes qui peuvent durer toute une vie. La possibilité unique de l'imprimante 3D est de voir vos idées prendre vie sous vos yeux et de pouvoir les tester dans la vie réelle. Les possibilités de cette technologie sont encore loin d'être explorées, mais nous croyons fermement que les utilisations vraiment étonnantes de la

technologie ne proviendront pas de notre génération, mais de la génération à laquelle nous enseignons.

## Références

### Impression 3D en général

The 3D printing Handbook <https://www.3dhubs.com/3d-printing-handbook>

Simplify3D has a guide for both print quality, and materials

<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>

<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>

### Technologie en éducation, et makerspaces

Invent to Learn: Making, Tinkering, and Engineering in the Classroom, *Sylvia Martinez and Gary Stager* <https://inventtolearn.com/>

Meaningful making, Projects and inspirations for fab labs and makerspaces, *Paolo Blikstein, Sylvia Martinez* <http://fablearn.stanford.edu/fellows/page/meaningful-making-book>

MINDSTORMS, Children, computers and powerful ideas, *Seymore Papert*

<http://worrydream.com/refs/Papert%20-%20Mindstorms%201st%20ed.pdf>

Worlds of making <https://www.worldsofmaking.com/>

Makerbots 3D printing handbook for education [https://www.makerbot.com/educators-guidebook/?utm\\_source=thingiverse&utm\\_medium=education&utm\\_campaign=tv-makerbot-in-the-classroom](https://www.makerbot.com/educators-guidebook/?utm_source=thingiverse&utm_medium=education&utm_campaign=tv-makerbot-in-the-classroom)

### Logiciels de CAO

[www.tinkercad.com](http://www.tinkercad.com)

<https://www.rhino3d.com/>

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

<http://www.grasshopper3d.com/>

<https://www.autodesk.dk/products/maya/overview>

<https://www.blender.org/>